

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ



**ALTERNATİF BİR MALZEME OLARAK POLİMER NANOKOMPOZİT /
METAL HİBRİDLERİN GÜÇ İLETİM VE YAPI ELEMANLARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI: TASARIM VE ÜRETİM
PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK ADEZYON, MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİN OPTİMİZASYONU**

Proje No: FCD-2016-5997

Proje Türü CDA

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Yrd.Doç.Dr. Soner SAVAŞ
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü

Araştırmacı:

Doç.Dr. Mehmet DOĞAN
Tekstil Mühendisliği Bölümü
Arş.Gör. Lemiye ATABEK SAVAŞ
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü

02 / 2018

KAYSERİ

TEŞEKKÜR

Bu proje, Erciyes Üniversitesi Rektörlüğü, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FCD-2016-5997 kodu ile desteklenmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Soner SAVAŞ
Proje Yürütücüsü

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR	1
İÇİNDEKİLER	2
ÖZET	3
ABSTRACT	4
1. GİRİŞ / AMAÇ VE KAPSAM	5
2. GENEL BİLGİLER	7
3. BULGULAR	26
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	43
5. KAYNAKLAR	45

**Alternatif bir Malzeme Olarak Polimer Nanokompozit / Metal Hibridlerin Güç İletim
ve Yapı Elemanlarında Kullanılabilirliğinin Araştırılması: Tasarım ve Üretim
Parametrelerine Bağlı Olarak Adezyon, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerin
Optimizasyonu**

ÖZET

Polimerik malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve özgül elastisite modülüne sahiptirler ve kolay şekillendirilebilirler. Bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere kullanım yerine göre üstün durumuna geçebilmektedirler. Polimerlerin mekanik ve tribolojik özellikleri genelde takviye edici veya yağlayıcı organik/inorganik dolgu maddeleri ilave edilerek geliştirilir. Montmorillonit kili ve titanyum dioksit (TiO_2) de polimer matrisli kompozitler için en etkili katkı maddelerindendir.

Proje çalışmasında Polyamid (PA6)/ kil- TiO_2 ve Polipropilen (PP)/ kil- TiO_2 kompozit peletleri çift vidalı ekstrüder kullanılarak, ergiyik harmanlama metodu ile üretilmiş, daha sonra aşınma testleri yapabilmek için kalıplanmıştır. PA6/kil- TiO_2 kompozitlerine, Taber abrazif aşınma test cihazı pin-on-disk testi şekline adapte edilerek aşınma testi uygulanmıştır. Takviye fazı, takviye fazı % bileşimi ve aşındırma kuvveti parametrelerinin etkileri 2^3 tam eşlendirmeli deney tasarımı yöntemi ile araştırılmıştır. Kompozit aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri incelenerek aşınma mekanizmaları yorumlanmıştır.

PP/kil- TiO_2 bazlı kompozitler için ise, deneyler, kuru kayma şartlarında ball on disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin aşınma direncini etkileyen önemli faktörlerin taranması için 2^4 tam faktöryel deney tasarımı yapılmıştır. Takviye malzemesinin türü, takviye faz oranı, normal yük ve aşınma hızı kompozitleri karakterize etmek için seçilmiş parametrelerdir.

Anahtar Kelimeler: Polimer kompozitler, polyamid 6, polipropilen, titanyum dioksit, aşınma.

**Investigation of Applicability of Polymer Nanocomposite / Metal Hybrids as an
Alternative Material for Load-Carrying and Structural Parts: Optimization of
Adhesion, Mechanical and Tribological Properties Depending on Design and Production
Parameters**

ABSTRACT

The polymeric materials have a high modulus-to-weight ratio and a specific modulus of elasticity and they are easily shaped. They are superior to other materials because of these properties. The mechanical and tribological properties of the polymers are generally enhanced by the addition of reinforcing or lubricating organic / inorganic fillers. Montmorillonite clay and titanium dioxide (TiO₂) are also the most effective additives for polymer matrix composites.

In this project, composite pellets of Polyamide (PA6)/clay TiO₂ and Polypropylene (PP) / clay-TiO₂ were produced by melt blending method using double screw extruder and then molded to make wear tests. Polyamide (PA6)/clay-TiO₂ composites were subjected to abrasion test with Taber abrasive wear tester. Taber abrasive wear test device was applied to the pin-on-disc. The effects of reinforcement phase % composition and abrasion strength parameters were investigated by 2³ full-factorial experimental design methods, modified in accordance with the requirements of the desired experiment. Composite abrasion surfaces were examined by optical microscope images and the wear mechanisms were interpreted.

For PP/clay-TiO₂ based composites, a systematic study of the friction and wear behavior of the composites was carried out using a custom-built ball-on-disc tribometer under dry sliding conditions. A 2⁴ full-factorial experimental design was conducted to screen the significant factors influencing the wear resistance of the composites. Four factors, involving in the reinforcement type, reinforcement content, normal load, and sliding speed, were selected to characterize the composite.

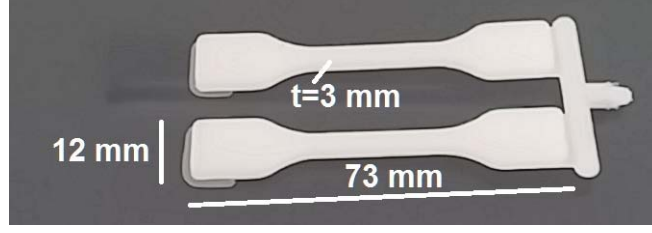
Keywords: Polymer composite, polyamide 6, polypropylene, tribology, wear.

1. AMAÇ VE KAPSAM

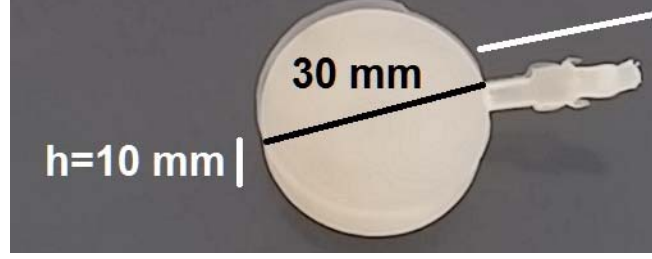
Polimer kompozitler, istenen özelliklere sahip tamamen yeni malzemelerin gelişiminde uygun, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve diğer üstün fiziksel özelliklerinden dolayı metallere alternatif olarak kullanılmaktadır. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemet 110 Nm / gr, cam lifi – polyesterlerde ise bu değer 620 Nm/gr dır. Diğer taraftan karbon lifi epoksida 700 Nm/gr ve kevlar epoksida 886 Nm/gr dır. Alüminyum ile karşılaştıracak olursak, karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir.

Önceki ara raporlarda da bahsedildiği gibi dik plastik enjeksiyon makinesi için 2 kez ihaleye çıkılmış, ilkinde tek firma katılımı (eksik dosya), ikincisinde ise katılım olmamıştır. İhale komisyonu 18/11/2016 tarihinde saat 14:00’ de 3. kez toplanmıştır. Son yapılan ihale kapsamında, söz konusu makinenin istenilen teknik şartnameye uygunluğu, piyasada bulunma zorluğu ve projedeki kullanımının elzem olması ve projenin çalışmasının zamanında bitirilmesi gerektiği için söz konusu firmadan temini konusunda mutabakata varılmıştır. 28.07.2015 tarihinde yapılan proje başvurusu üzerinden yaklaşık 1.5 sene geçmiş olması, ülkemizin içinden geçtiği zorlu koşullar ve ihale tekrarlarından dolayı kaybedilen zaman sürecinde cihaz fiyatı öngörülen tutarı oldukça aşmış ve proje bütçesini zorlamıştır. Bu sebepten ötürü üretilmesi gereken kalıplar konusunda değişikliğe gidilmiş (Şekil 1.1, 1.2 ve 1.3) ve yukarıda bahsedilen ön çalışmalar ışığında proje içeriğinde değişiklikler yapılmıştır. Deniz aşırı gelen cihazın 31.05.2017 gibi oldukça geç bir tarihte kurulumu gerçekleştirilmiş olup hibrid aşınma numunesi üretimi gerçekleştirilmemiştir.

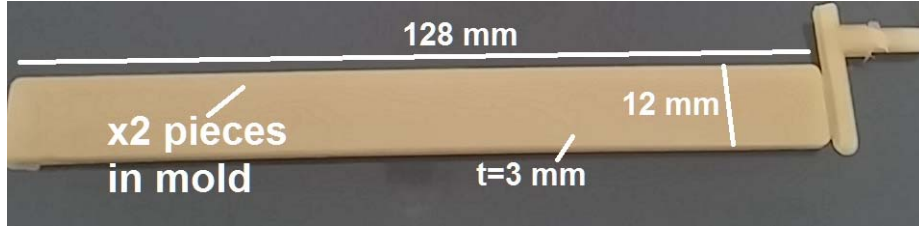
Ara raporlarda sunulan bu değişiklikler komisyon tarafından da kabul edilmiştir. Proje kapsamında belirtildiği gibi polimer nanokompozitler; eriyik harmanlama metodu ile farklı tip takviye elemanları (nano-kil Nanomer® I.44P, ve TiO₂) ve polimer matriks malzemeleri (polyamid 6-PA6 ve polipropilen-PP) kullanılarak, çift ve tek vidalı ekstrüderler yardımıyla pelet formunda üretilmişlerdir. Bu projenin konusu polyamid 6 ve polipropilen matrisli kompozitlerin farklı tribolojik özelliklerinin incelenmesidir. Konunun önemi ise farklı özellikte takviye elemanlarını polimere katarak üstün mekanik ve aşınma özellikleri elde etmeye çalışmaktır.



Şekil 1.1. Standart çekme numunesi.



Şekil 1.2. Silindirik aşınma numunesi.



Şekil 1.3. Abrasif aşınma test numunesi.

2. Rapor dönemi içerisinde polimer nanokompozitlerin aşınma oranlarının belirlenmesi için yeni bir sayısal model geliştirilmiştir. Bu model polimer karışımları gibi heterojen aşınma izi veren sistemlerde de kullanılabilir. Geleneksel bir ball-on-disc aşınma testinde aşınma oranı numunenin testten sonra optik mikroskop altında aşınma izi genişliğinin (2D) veya bir profilometre ile aşınma izi kesit profilinin (3D) taranmasıyla ölçülür. Bütün metotların amacı aşınma hacmini doğru bir şekilde hesaplamaktır. 3D metotlarda, örneğin bir optik profilometre kullanılarak elde edilen derinlik ve iz genişliği boyutları, aşınma izinin kesit alanını hesaplamak için kullanılır. Heterojen polimer karışımlarından oluşan numuneler her bir bileşenin kümелendiği yerlerde farklı aşınma miktarlarına sahiptir. Bu gibi durumlarda aşınmanın değerlendirilmesi için daha güvenilir ve tekrarlanabilir bir tekniğe ihtiyaç duyulmaktadır. Proje çalışması kapsamında, bu eksikliklerin üstesinden gelinebilmesi için yeni bir 2D model geliştirilmiş olup 2. Raporda sunulduğu için burada detaylarından bahsedilmeyecektir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Literatür Araştırması

Yapılan araştırmamıza referans olması için oluşturduğumuz literatür çalışmasında incelenen ve elde edilen bulgular bu bölümde sunulacaktır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Du Xin ve arkadaşları cam fiber takviyeli PA6 kompozitlerinin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada PA6'yı tek olarak, PTFE ve yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kombinasyonu ile birlikte incelemişlerdir. Bu kombinasyonlar enjeksiyon yöntemi ile üretilmişlerdir. Deney şartları 40N yük ve 200 rpm hızda gerçekleşmiştir. PTFE'nin tribolojik özelliklerin gelişmesinde katkıda bulunurken, WHMWPE'nin katkısı olumsuz yönde olmuştur[1].

H.ÜNAL ve arkadaşları polyamid, grafiit ve reçineli PA6 kompozitinin kuru kayma şartları altında sürtünme ve aşınma performansını incelemişlerdir. Bu çalışmada saf PA6, %5, %15 grafit takviyeli, %4 reçineli PA6 numuneler kullanılmıştır. Deneyler pin on disk cihazında paslanmaz çeliğe karşı gerçekleştirilmiştir. Dolgu tipinin etkisi uygulanan yük, kayma hızının tribolojik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kayma hızı; 0,4, 0,8, 1,6 m/s, yük; 50, 75, 100 N'da gerçekleşmiştir. Daha sonra numunelerin görüntüleri SEM'de çekilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki PA6 ve PA6 kompozitlerinin sürtünme katsayıları artan yük ve hız ile birlikte artmıştır. WAX takviyeli kompozitler artan yüklere karşı diğerleri kadar hassas değildir. En düşük aşınma oranı %4 wax takviyeli PA6'da, en yüksek aşınma ise saf PA6'da gözlemlenmiştir[2].

S.Yakar yüksek lisans çalışmasında, mikrometre boyutundaki ZnO toz partiküllerin, yüksek enerjili öğütme işlemiyle boyutlarının nano boyuta indirgenmesi ve nanopartiküllerin PP ile karıştırılarak enjeksiyon kalıplama metodu ile polimer kompozit haline getirilmesi amaçlamıştır. Öğütme koşulları incelenen ZnO, en uygun koşul belirlendikten sonra PP ile direkt karıştırılarak besleme stoğu hazırlanmış ve enjeksiyon cihazına beslenerek kompozit üretimi sağlanmış, elde edilen polimer kompozitlerin karakterizasyonu yapılmıştır[3].

Theiler ve arkadaşı, poliimid polimerine %15 grafit takviyesi yaparak polimer kompozit elde etmişler ve bu kompozitin tribolojik özelliklerini hava ve hidrojenli ortamda incelemişlerdir.

Saf poliimide göre grafit takviyeli poliimid daha iyi özellik göstermiş ve kayganlığı ise nemli havaya göre hidrojenli ortamda daha etkili çıkmıştır[4].

Li chang ve arkadaşları; yüksek sıcaklığa dayanıklı PEEK (Polietereeterketon) ve PEI (Polietiremid) polimerlerine kısa karbon fiber, grafit ve TiO_2 ve ZnS partikülleri katarak tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kayma ve aşınma deneyleri pin on disk cihazında çeliğe karşı gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığından artan 150 o C'de gerçekleştirilmiştir. SCF ve grafit polimerin yük taşıma ve aşınma direnci kapasitesini iyi yönde etkilemiştir. TiO_2 ve ZnS ilavesi ile birlikte kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı özellikle de artan sıcaklıklarda daha da azalmıştır[5].

T. Saylan yüksek lisans çalışmasında; Polyamid 6 malzemesine ağırlıkça %30'a kadar kısa cam elyaf ve mika dolguları katarak ekstrüzyon ve enjeksiyon makinelerinde üretmiştir. Cam elyaf ve mika dolgu ilavesinin polyamid 6 malzemeye aşınma deneyleri, mekanik, tribolojik ve termal etkisini araştırmak için Dinamik mekanik analiz, diferansiyel taramalı kalorimetre, ve aşınma testleri uygulamıştır. Bu testlerde katkısız polyamid ve kompozitlerinin ergime sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığı, sürtünme katsayısı ve aşınma oranları değerlerini elde etmiştir. Sonuç olarak erime ve camsı geçiş sıcaklığının cam elyaf ve mika ile arttığını görmüştür. Aşınma testleri pim disk aşınma cihazında yapmıştır. Malzemeler %30 cam elyaf, %30 mika ve %6 vaks katkı disk malzemelerine 20N, 30N ve 40N yük ile 0,5m/sn kayma hızında 1500 metre kayma yolunda yapılmış. Tüm malzeme kombinasyonları için yük miktarı arttıkça sürtünme katsayısı arttığı görülmüş. Malzemelerin farklı sürtünme katsayıları ve özgül aşınma oranları elde edilmiştir[6].

Bhuyan ve arkadaşları; biyotabanlı nanokompozitler hazırlamışlardır. Hazırlanan organomodifiye edilmiş montmorillonit kil takviye edilmiştir. Kilin katılma oranı ağırlıkça %0, %1, %5'dir. Bu çalışma sonunda VMMT'nin polimer matriksin içinde önemli rol oynadığı sonucuna varılmıştır[7].

Zhang ve arkadaşları; hibrid PTFE/yün yapılı kompozitlerin mikrobeyutlu Sb_2O_3 ve melamin siyanürat (MCA) ile takviyelendirilmesi sonucu tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Sb_2O_3 takviyesi aşınma oranını artırmış, MCA ilavesi azaltmıştır[8].

A.Kaştan, yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, PA6 polimerine %5, %10, %15 grafit katarak polimer kompozit oluşturulmuştur. PA6 polimerine belirli oranlarda ilave edilen grafitin aşınma ve sürtünme davranışlarına etkisini, aynı zamanda uygulanan yükün ve kayma hızının etkisini araştırmak için yapmıştır. Aşınma oranları değerlendirildiğinde, %10, %15 katkılı polimerlerde aşınma oranının düşük olduğu, %5 katkılı ve katkısız PA6 daki aşınma oranının ise fazla olduğu sonucuna varılmıştır[9].

S.R.Chauhan ve arkadaşları cenosphere (alümina ve silikadan oluşan inert malzeme) katkılı vinilester kompozitlerinin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Farklı partikül boyutları, kayma mesafesi ve yük uygulanmıştır. Cenosphere katkısının mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği görülmüştür[10].

W.Gregory ve ekibi alümina nanopartikülleri ilave edilen PTFE polimerinin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Bu kompozitin aşınma direnci artan dolgu oranıyla monotonik olarak artış göstermiştir[11].

David L.Burris ve arkadaşı W.Gregory Sawyer Alümina-PTFE nanokompozitine şekli düzensiz nanokompozit ilave ederek aşınma direncini geliştirmeyi amaçlamışlardır ve sonunda, düzensiz şekilli nanopartikül içeren PTFE'nin aşınmasını azaltmış, sürtünmeyi artırmıştır[12].

Xin-Rui Zhang ve arkadaşları kısa fiber, grafit ve mikro SiO₂ katkılı poliimid kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları incelemiştir. Grafit ve kısa karbon takviyeli polimerin aşınma davranışlarında olumlu yönde gelişmeler yaşanırken, mikro SiO₂ katkılı polimerin bunların aksine aşınma davranışının olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir. En iyi sonuç ise üç katkı maddesinin de kullanılarak elde edilen kompozitte görülmüştür[13].

L.Chang ve arkadaşları epoksi tabanlı kompozitlerin nano-TiO₂ partikülleri ilavesiyle aşınma direncindeki değişimi incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar nano-TiO₂'nin sürtünme katsayısını gözle görülür şekilde düşürdüğünü ve aşınma direncini artırdığını göstermiştir[14].

Jianing Zhang ve arkadaşları epoksi nanokompozitlerin aşınma davranışlarının üzerine nanopartiküllerin etkisini araştırmıştır. Epoksi nanokompozitlere nanosilika ilave edilmesi ile

birlikte (ağırlıkça %20) aşınma davranışları ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir[15].

Yi-Lan You ve ekip arkadaşları $\text{TiO}_2/\text{PA6}$ (%5,%95) nanokompozitine MoS_2 , UHMWPE, PTFE ve bunların kombinasyonları ile katkı yapılmış ve aşınma davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ise, PTFE ve UHMWPE 'nin aşınma performansının daha iyi olduğu MoS_2 'nin ise aşınma performansını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür[16].

Murat Koyunbakan ve arkadaşları karbon elyaf dolgulu polyamid 6 polimer kompozitlerinin sürtünme ve aşınma davranışları üzerine kayma hızı ve yükün etkileri incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda tüm polimer numuneler için yükün ve kayma hızının artması ile sürtünme katsayısı artmıştır. Pa6 polimer kompozitlerinin aşınma oranını etkileyen en önemli parametrenin uygulanan kayma hızı olduğu sonucuna varılmıştır[17].

Recep Koç yaptığı çalışmasında, mühendislik plastiklerinin aşınma davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmasında polyamid 6, döküm polyamid 6 (PA6G), poli-oksi-metilen (POM), poli-eter-eterketon (PEEK) ve poli-etilen-tereftalat (PET) mühendislik polimerleri kullanmış, sürtünme katsayıları ve özgül aşınma oranları tespit edilmiş olup, en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı PET mühendislik polimerinde tespit edilmiştir. Kayma hızının artışı ile aşınma oranlarının ve sürtünme katsayılarının arttığı görülmüştür[18].

B.Suresha ve ekip arkadaşları Polyamid66/Polipropilen kompozitlerinin aşınma ve mekanik özelliklerinin üzerine mikro/nano dolgu maddelerinin etkisi araştırılmıştır. Dolgu maddesi olarak nanokil, kısa karbon fiber ve grafit kullanılmıştır. En iyi aşınma davranışı ve mekanik özellikler nanokil ve kısa karbon fiberin birlikte kullanıldığı kompozit malzemede görülmüştür[19].

Junya Yuan ve ekip arkadaşları farklı partikül boyutlarında titanyum borid hibrid Nomex/PTFE kompozitine katmıştır. Termal, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiş, TiB_2 'nin varlığının termal ve mekanik özellikleri iyileştirdiğini ayrıca kompozitin aşınma önleme kabiliyetini artırdığını gözlemlemişlerdir[20].

2.2. Polimerler

Çok sayıda küçük molekülün kovalent bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu makromoleküller polimer olarak adlandırılır. Polimerleri meydana getiren küçük moleküllü maddelere ise monomerler denir. Polimerleri diğer kimyasal maddelerden ayıran en önemli özelliği moleküllerinin büyüklüğüdür. Polimerlerin üstün özelliklerine makromoleküler yapısının etkisi büyüktür[21].

Polimer zincirlerinin yapısı polimerin özelliklerini etkiler. Polimer molekülleri doğrusal, dallanmış veya çapraz bağlı olabilirler. Çapraz bağ oranının fazla oluşu ağ yapılı polimerleri oluşumunu sağlar(Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Polimer zincir biçim ve ilişkilerinin şematik gösterimi [21].

Doğrusal veya dallanmış yapıdaki polimerler, eritilebilir veya uygun çözücünde çözündürülebilir. Ağ yapılı polimerlerde ise bu durum söz konusu değildir. Bu gibi zincir özelliklerinden kaynaklanan özelliklerine göre ise polimerler termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç gruba ayrılabilir.

Polimeri oluşturan monomerler aynı kimyasal yapıya sahip olabileceği gibi, kimyasal formülü farklı monomerleri de birbirine bağlayarak polimer zincirini oluşturmak mümkündür. Tek tip monomerden oluşan polimere *homopolimer* adı verilirken, farklı monomerlerin oluşturduğu polimer zincirine *kopolimer* denir [22].

2.2.1. Termoplastikler

Bu malzemeler karakteristik olarak ısıtıldığı zaman kalıplanabilme ve soğutulduğu zaman da katılaşabilme yeteneğine sahiptirler. Kalıplama sırasında kimyasal bir değişikliğe uğramazlar. En büyük özellikleri ısıtıldıklarında camlaşma sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda yumuşayıp yarı sıvı bir hal aldıktan sonra soğuduğunda camlaşma sıcaklığının altında katı hale dönmeleridir. Camlaşma sıcaklığının alt sınırında soğuk ekstrüzyon, basma, derin çekme gibi

işlemler yapılabilirken sıvılaşma sıcaklığının üstünde ise enjeksiyon ile üretim yöntemleri tercih edilebilir ve kullanılabilir[23].

Zincir içinde kovalent, zincirler arası van der Waals bağlara sahiptir. Bütün polimerler düşük sıcaklıklarda yüksek bir katılık (elastik modülü ve kayma modülü yüksektir) gösterirler ve gevrektiler. Termoplastlar tekrar tekrar eritebilirler ve çözülebilirler. Bu da çevre koruma açısından özel bir anlam taşır.

Camlaşma sıcaklığı T_g (donma sıcaklığı) denilen belirli bir sıcaklık bölgesinin üzerinde zincir molekülleri belirli bir ısı hareketliliği kazanırlar. Böylece madde daha kolay bükülebilir hale gelir ve sünekleşir. Termoplastlar sıcaklığa bağlı olan özelliklere sahiptir. Bu özellikler ise elastik modülü, mukavemet, sünekliktir. Sıcaklık daha da yükselirse, primer bağlar teker teker çözülmeye başlar, molekül zincirleri parçalanır ve düşük moleküllü maddeler haline geçer. Malzeme hasara uğrar.

Termoplastikler termal enerji (ısı) ve basınç uygulandığında kolaylıkla yumuşayan, deforme olabilen, akan bu durumda herhangi bir şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşebilen malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı geri dönüşüm yolu ile tekrar tekrar kullanılabilirler. Bu şekillendirme sırasında herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Bu özellikleri esasen termoplastiklerin molekül yapısından ileri gelmektedir.

Belli başlı termoplastikler ise şu şekilde sıralanabilir[24];

- Alçak ve yüksek yoğunluklu polietilen
- Lineer alçak yoğunluklu polietilen
- Yüksek molekül ağırlıklı polietilen
- Polivinilklorür ve vinil kopolimerleri
- Polistiren
- Polipropilen
- Termoplastik polyamid
- Polyamid
- Sulfon polimerleri
- Polimetil penten
- Fenilen oksit kökenli reçine

- Asetal hopolimerleri
- Asetal kopolimerleri
- Polikarbonat
- Termoplastik polyester
- Polibütillen
- Poliüretan
- Selülozikler
- Stiren akrilonitril
- ABS
- Poliakrilat
- Naylon
- Nitril reçine
- Polifenilen sülfid
- Termoplastik elastomerler

Termoplastiklerin belli başlı kullanım yerlerine örnek ise Şekil 2.2’de verilmiştir.

Asetol Reçineler	Şaft yatağı
Akrilikler (Polimetil metakrilat)	Işıklı reklâmlarda
Selulozik (Selüloz asetat)	Selefond kâğıdı
Florokarbon (Polutetro floroetilen)	Teflon tava
İzosiyonatlar (Poliüretan)	Isı izolasyonu
Poliolefinler (Polietilen-Polipropilen)	Naylon torba, meşrubat kasası
Stiren (Polistren)	Okul gereçleri, yoğurt kabı
Vinil (Poli vinil klorür P.V.C)	Boru
Polikarbonat	Trafik ışıkları
Poliamitler (Naylon)	İp imali, çorap, çamaşır

Şekil 2.2 Bazı termoplastikler ve kullanım alanları.

2.2.2 Termosetler

Termoset polimerler kritik bir sıcaklığın üzerinde kalıcı olarak sertleşen ve tekrar ısıtıldığında yumuşamayan polimerlerdir. Termosetler genellikle sert (rijit) malzemelerdir çünkü kovalent bağların kurduğu çapraz-bağlar polimer zincirinin hareketini büyük ölçüde kısıtlar. Termosetin çapraz-bağ derecesi arttıkça molekül hareketleri daha fazla kısıtlandığı için sertlik ve yüksek darbe direnci gibi özellikleri ön plana çıkar. Buna ek olarak, kuvvetli kovalent çapraz bağlar sayesinde sahip oldukları boyutsal kararlılık, yeni polimer sisteminin ısı dengeye sahip olmasını, erimemesini, yüksek ısılara dayanıklı olmasını ve hiçbir solventle çözünememesini getirir. Eğer termoset polimerin üzerine solvent dökülürse, polimeri oluşturan molekül ağ bu solventi emer ve malzeme şişmeye başlar (swelling).

2.2.3. Elastomerler

Çekme kuvveti altında çok yüksek oranda uzama gösteren ve kuvvet kaldırıldığında anında ilk uzunluğuna dönen, çapraz bağlanmış kauçuğumsu polimerlere, ya da başka bir deyişle kauçuğumsu ağyapılara, elastomer adı verilir. Bilimsel jargonda elastomer adıyla anılan bu polimer, gösterdiği yüksek elastikiyet sayesinde bu ismi almıştır. Elastomerlerin en önemli bu özelliği, tamamen molekül yapılarının içerdiği düşük çapraz-bağ yoğunluğuna sahip ağı yapıdan kaynaklanmaktadır. En sık kullanılan ve bilinen elastomerler poliizopiren (ya da doğal kauçuk), polibütadiyen, poliizobütilen ve poliüretandır [22].

Polimer malzemelerin kullanım alanlarını ve tercih edilme sebeplerini özetleyecek olursak, kolay üretilir, hafif, ucuz, bakım masraflarının azlığı, çevreye zararının diğer malzemelere göre az oluşu, aşırı yüklemenin olmadığı alanlarda rahatlıkla kullanılabilmesi, yerlerde rahatlıkla kullanılabilmesi gibi avantajlarından dolayı kullanımı yaygındır [25].

2.3. Plastiklerin Tanıtılması

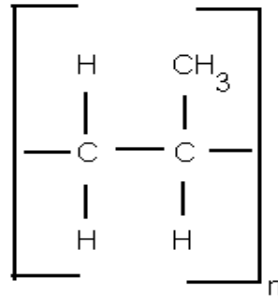
Endüstriyel alanda kullanılan birçok plastik mevcuttur. Çeşitliliğin fazla oluşu sebebiyle bu kısımda çalışmamızda kullandığımız plastikler tanıtılacaktır.

2.3.1. Polipropilen (PP)

Polipropilen (PP) tüm dünyada üretimi, tüketimi ve dış ticareti, polietilenden sonra en fazla olan plastik hammaddesidir. Nitekim 2015 yılında PP ithalatı, dünya toplam plastik hammadde ithalatı içinden % 16, ihracatı ise toplam plastik hammadde ihracatı içinden % 17 pay almıştır. 2017 yılında Mart ayı sonunda ise Türkiye’de üretilen toplam plastik hammaddenin %12’sini polipropilen oluşturmaktadır.[26] Polipropileni kimyasal olarak tanıttığımız olursak, PP olarak adlandırılan polipropilen; propilen gazının polimerizasyonu ile elde edilir. Renk olarak süt beyazı rengindedir. Boyanma kabiliyetleri iyidir. İlaç, kozmetik ve gıda sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı olarak düşük yoğunluklu polietilen ile yüksek yoğunluklu polietilen arasında bir yapıya sahiptir. Polipropilenin özellikleri detaylı bir şekilde aşağıdaki alt başlıklarda anlatılmıştır.

2.3.1.1. Üretimi

Monomer propilenin moleküler yapısı $\text{CH}_2 = \text{CH}-\text{CH}_3$ şeklindedir. Ziegler-Natta katalizörleri olarak bilinen TiCl_3 katalizörü etkisinde aradaki çift bağ açılarak açık kalan uçlara $-\text{CH}_3$ ve $-\text{H}$ radikallerinin bağlanması sonucu polimer meydana gelir. Oluşan zincirin sonuna $-\text{H}$ radikali bağlandığı zaman zincir oluşumu sona erer [27].



Şekil 2.3. Polipropilenin yapısı [27].

Dünyada uygulanmakta olan polipropilen prosesleri üç ana gruba ayrılabilir;

- * Slurry polipropilen üretimi (süspansiyon ortamı olarak heptan kullanılır).
- * Polipropilen Bulk Prosesi (likit propilen ile polimerizasyon).
- * Polipropilen Gaz Faz Prosesi (gaz faz ortamında polimerizasyon) [27].

Polimerizasyon sırasında Ziegler-Natta katalizörlerinin aktivitesine bağlı olarak izotaktik, ataktik ve sindiotaktik polipropilen oluşur. Ortalama bir değer verilecek olursa %93 izotaktik polimer, %5.5 sindiotaktik polimer ve %1.5 ataktik polimer oluşur [27].

2.3.1.2. Polipropilenin Genel Özellikleri

Polipropilenin genel özelliklerini polipropilen giriş konusunda anlatılmıştır. Bu kısımda Tablo üzerinde gösterilecektir. Polipropilenin tercih edilme nedenleri, avantajları, dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Avantajları;

- * Spesifik ağırlığı en düşük polimerdir.
- * Darbeye karşı dayanıklıdır.
- * Şeklini koruma özelliği iyidir.
- * Kimyasallara karşı dayanıklıdır.
- * Elektrik geçirgenliği çok azdır.
- * Isı geçirgenliği çok azdır.
- * Polipropilen aynı zamanda menteşelerde mükemmel bükülme ömrüne sahiptir.

Dezavantajları;

- * Düşük sıcaklıklarda kırılgandır.
- * Hızlı bir şekilde oksidasyona uğrar [27].

Tablo 2.1. Polipropilen genel özellikleri [28].

ÖZELLİK	BİRİM	DEĞERİ	TEST METODU
Özgül Ağırlığı	g/cm ³	0,90-0,91	ASTM-D-1501
Akmada Gerilme Direnci	Kg/cm ² (23 ⁰ C)	300-350	ASTM-D-638
Kopma Noktasında Uzama	%	600-700	ASTM-D-638
Bükülme Mukavemeti	Kg/cm ² (23 ⁰ C)	7500-8000	ASTM-D-747
Rockwell	R-Scale (23 ⁰ C)	90-94	ASTM-D-785
Su absorpsiyon hızı	% ağırlık kazancı	<0,03	ASTM-D-570
Dielektrik sabiti	X 10 ⁶ CS (10 ⁰ C)	2,2-2,3	ASTM-D-150
Dielektrik kaybı	X 10 ⁶ CS (18 ⁰ C)	0,0003-0,001	ASTM-D-150
Voltaj Direnci	Kv/mm	30,32	ASTM-D-149
Spesifik hacim direnci	Ohm-cm	<10 ¹⁶	ASTM-D-257
Termal iletkenlik	Kel/cm/cm ² /s/ ⁰ C	2,7 10 ⁻⁷	
Spesifik ısı	Gcal/g ⁰ C	0,46	
Termal Genleşme Katsayısı	Mm/mm/ ⁰ C	110X106	ASTM-D-695
Deformasyon Noktası	⁰ C	120-130	ASTM-D-648
Yumuşama noktası	⁰ C	165-172	ASTM-D-648
Alkaliye karşı direnci		Mükemmel	
Çözücüye karşı direnci		Mükemmel	

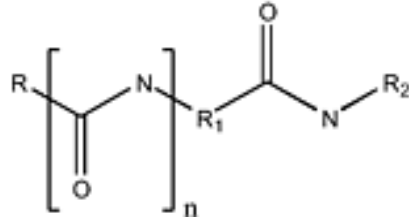
2.3.1.3. Polipropilenin Kullanım Alanları

Ticari olarak 150'den fazla polipropilen türü bulunması geniş kullanım alanı sağlar. Polipropilenin kullanım alanları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir ve bu örnekler çoğaltılabilir[29].

- Bahçe mobilyası
- Beyaz eşya gövdesi
- Vantilatör fanı
- Deterjan gözü
- Çamaşır makinesi kazanı
- Elektrikli aletler
- Valiz
- Bavul
- Çanta
- Traş kremi tüpleri
- Steril sağlık gereçleri
- Plastik raf
- Hava filtresi
- Plastik kaplar
- Şişeler
- Gösterge tabloları
- Güneşlik
- Test tüpleri
- Taşıma kapları
- Depolama kapları
- Kasa
- Bant
- Şeffaf ambalaj
- Termos

2.3.2. Polyamid 6 (PA6)

Polyamid 6 ilk defa 1899’da keşfedilmiş, sert, diğer mühendislik plastiklerine göre daha düşük bir sıcaklıkta eriyen plastiktir.[30] Polyamidler, poliaminler gibi, birincil, ikincil veya üçüncül olarak süstitüentlere bağlı olarak sınıflandırılır. Polyamid grubunun kimyasal gösterimi Şekil2.2’de gösterilmiştir. Bunlar, poliaminlerin ve dimer asitlerin veya yağ asitlerinin yoğunlaşma ürünleridir. İçinde genel olarak, polyamidler çoğu poliaminden daha az reaktiftir, bu nedenle genellikle çevre reaktivitesini arttırmak, viskozite azaltmak ve epoksi reçineleriyle uyumluluğu artırmak için kullanılır. Polyamidler, mükemmel yapışma, düşük toksisite ve iyi tokluk sağlar ancak biraz koyu renkli olabilirler. Polyamidler genellikle kaplamalar, yapışkanlar ve sızdırmazlık malzemeleri için kullanılır[31].



Şekil 2.4. Polyamidin yapısı [31].

Polyamidlerin karakterisitik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir. [31].

Tablo 2.2. Polyamid 6’nın genel özellikleri.

ÖZELLİK	BİRİM	DEĞER
Camsı Geçiş Sıcaklığı	°C	60
Erime Noktası	°C	216
Isı Eğilimi (66Psi Yük Altında	°C	177
Proses Sıcaklığı	°C	246-274
Morfoloji Tipi	Kristalin	...
Çekme Dayanımı	Kgf/cm ²	650
Kopma Uzaması	...	%273
Eğilme Dayanımı	Kgf/cm ²	515
Sertlik	Rockwell E	112

2.4. Kompozitler

İkinci bölümün başlangıcında malzemelerin tanımları, kullanım yerleri, endüstrideki önemlerinden bahsedilmişti. Bu bölümde ise çalışmamızın ana noktası olan polimer kompozitler üzerinde durulacaktır.

Polimer kompozitlerden önce, geleneksel malzemelere göre üstün özellikleri olan ileri malzeme sınıfında değerlendirilen kompozitleri incelemek yerinde olacaktır.

En genel tanımı ile kompozit malzeme; makroskobik olarak birbirinden ayrı iki ya da daha fazla malzemenin bir araya getirilerek üretilen yeni malzemedir. Kompozit malzemeler genelde düşük dayanıma sahip matris ana fazı ile bu faz içinde dağılmış takviye fazından meydana gelmektedir. Takviye ve matris fazları atomsal boyutta birleşmez, birbirleri içinde çözünmeyerek inert davranırlar.

Kompozitler, mikroskop altında incelendiğinde bileşenlerini seçip, ayırt edebiliriz, makro düzeyde homojen yapıda görünseler de, mikro yapıya inildiğinde heterojen özellik gösterirler. Kompozitleri alaşımlardan ayıran en önemli özellik ise budur. Alaşımlar mikro düzeyde homojen yapılardır. Örneğin çelikteki krom ve vanadyum bir karışım oluşturur ve bu durum kompozit olarak tanımlanmaz, atomsal ve moleküler boyutta birleşme söz konusu olduğu için bu durum alaşım olarak adlandırılır.

Bir kompozit malzeme genel anlamda üç ana elemandan meydana gelir.

- Matris malzemesi
- Takviye elemanı
- Bağlayıcı eleman

Kompozit malzemelerden beklenen özellikler ise şu şekilde sıralanabilir,

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- İyi aşınma direnci

- Isıya karşı yüksek direnç
- İyi korozyon direnci
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği
- Düşük yoğunluk
- Estetik görünüm ve iyi yüzey kalitesi

Kompozitlerde takviye malzemesi olarak farklı morfolojilere sahip malzemeler kullanılmaktadır. Takviye malzemesinin kullanımındaki temel amaç; malzeme üzerine gelen yükün taşınması, matrisin rijitliğinin ve dayanımının arttırılmasının sağlanmasıdır. Kompozit malzeme içinde matrisin fonksiyonunu ise, çoğu gevrek ve kırılgan olan takviye elemanlarını dış ve çevresel etkilere karşı korumak, kompozit malzeme üzerine gelen yükü takviye elemanlarına iletmek ve tüm kompozit yapıyı bir arada tutmak olarak sıralayabiliriz[32,33].

Kompozit malzemeleri ana matris elemanına göre 3 başlık altında inceleyebiliriz.

- Metal matrisli malzemeler
- Seramik matrisli malzemeler
- Polimer matrisli malzemeler

2.4.1. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak, dökme demir, çelik, bakır, alüminyum ve bronz gibi metaller kullanılır. Takviye elemanı kullanılmayabilir veya metal bağlayıcılar kullanılabilir. Bu tür kompozitlerde takviye malzemesi olarak, metal, plastik, seramik, ağaç tozu, pudra, kullanılabilir. Metal matrisli kompozitler de partikül esaslı, kısa fiber takviyeli ve sürekli fiber takviyeli olarak sınıflara ayrılabilir.

- Partikül esaslı metal matrisli kompozitler, düşük maliyetli, rijit ve izotropik özellikler gösterirler. Ancak kopmadaki şekil değişimi ve kırılma tokluğu değerleri düşüktür.
- Kısa fiber takviyeli kompozitler partikül esaslı olanlara göre daha pahalı ancak daha mukavemetlidir

- Sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler ise en yüksek mukavemet ve elastiklik modülüne sahiptirler ancak anizotropik özellik gösterirler ve üretim maliyetleri yüksektir[34].

2.4.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Matris malzemesi seramiktir. Bağlayıcı eleman kullanılmayabilir ya da metal, seramik ve diğer kimyasal bağlayıcılar kullanılır. Takviye elemanı olarak ise metal, plastik, seramik ve ağaç tozu kullanılabilir. Seramik matrisli kompozit malzemeler genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalar için kullanılırlar. Sert ve kırılgan malzemeler olan seramik malzemeler, çok düşük kopma uzaması gösterirler, düşük tokluğa sahiptirler ve termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bu nedenle liflerle takviye edilirler. Seramik matrisli kompozit malzemelerde; matris malzemesi olarak Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 ve B_4C yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik malzemeleri takviye etmemizin veya güçlendirmemizin nedeni plastik ve metallere farklıdır. Plastik ve metaller, yüksek mukavemete sahip olmalarına karşın seramikler, mukavemetin yanı sıra özellikle yüksek tokluk ve ısı dayanımına sahiptirler. Takviye elemanı olarak da genellikle Al_2O_3 ve SiC seramik malzemeler fiber formuna getirilerek kullanılmaktadır[34].

2.4.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Kompozitler malzemelerin % 90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. İleri plastik-polimer grubu matris malzemelerin çoğunlukla elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri bu gruptaki kompozit malzemeleri oluşturur. En tipik örnek, artık günümüzde gelenekselleşmeye başlayan ve "fiberglas" olarak bilinen poliester esaslı reçinelerin cam elyafı takviyesiyle üretilen malzemelerdir. Ancak ileri kompozitler grubunda daha üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek dayanım (çekme ve basma dayanımı), yüksek elastik modül ve yüksek tokluğa sahiptirler.

Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumundadırlar. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemetin 110 Nm/g olmasına karşın cam lifi-poliesterlerde 620 Nm/g'dır. Diğer taraftan karbon lifi

epoksida 700 Nm/g ve kevlara epoksida 886 Nm/g'dır. Diğer taraftan karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışabilir malzemelerdir. Öte yandan düşük elastik modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Kompozit malzemelerde polimer matris olarak kullanılan genelde üç tip plastikler mevcut olup bunlar; termosetler, termoplastikler ve elastomerlerdir. Termosetler grubunda ağırlıklı poliestere ve epoksi reçine kullanılır[22].

2.5. Triboloji

Triboloji, en genel tanımıyla, sürtünme, aşınma ve yağlama konularını inceleyen bilim dalıdır. Dünyada çeşitli kuruluşlarca yapılan çalışmalarda üretilen enerjinin yaklaşık üçte birinin sürtünme sonucu harcandığı ortaya çıkmıştır. Makinaların fonksiyon yüzeylerinde meydana gelen aşınmalarında büyük ekonomik kayıplara neden olduğu tespit edilmiştir[35].

Tribolojiyi oluşturan ana unsurlar,

2.5.1. Sürtünme

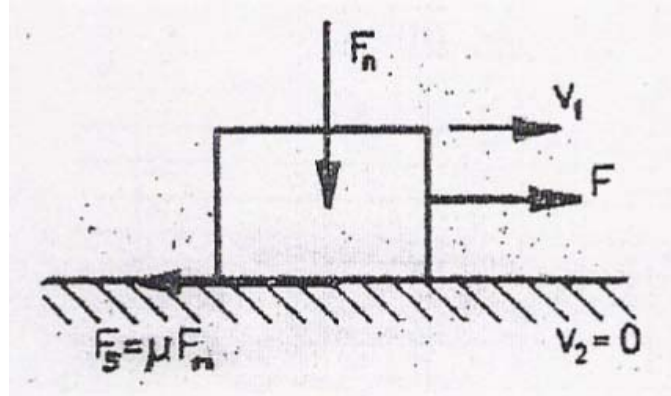
Sürtünme, birbiriyle izafi hareket yapan iki katı yüzeyin harekete ya da hareketin ihtimaline göstermiş oldukları dirençtir. Birbirine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma – yuvarlanma mevcut olabilir. Böylece sürtünme kinematik bakımdan kayma, yuvarlanma veya kayma – yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur[36].

Sürtünme çeşitleri,

- Kuru sürtünme
- Sınır sürtünmesi
- Sıvı sürtünmesi
- Yuvarlanma sürtünmesi

Kuru Sürtünme; Bağlı hareket yapan iki kuru parça temas yüzeylerinde meydana gelen sürtünme türü olup birbirleri üzerinden yüzey pürüzleri üzerinden kayarlar. Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için Şekil 2.2 de gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre

izafî hareket yapan ve normal bir kuvvetin (F_n) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı $F_s = \mu \cdot F_n$ değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur.[36]

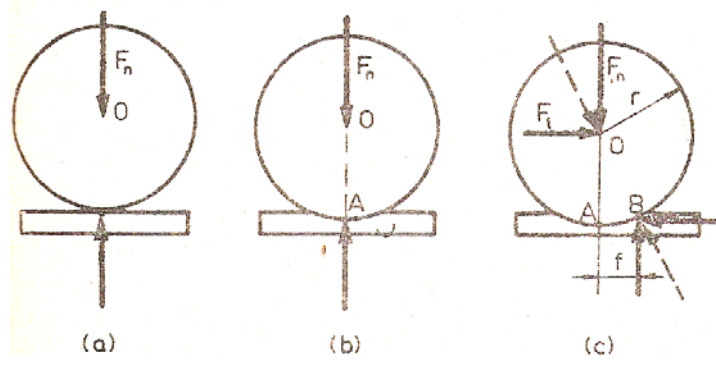


Şekil 2.5. Sürünmeli düzlemde harekette serbest cisim diyagramı[36]

Sınır sürtünmesi, Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulamadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0,03 ile 0,1 arasında değişir.

Sıvı sürtünmesi, Sıvı sürtünmesinde madeni yüzeyler arasında bulunan yağ tabakasındaki basınç dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığı takdirde yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmış olur. Madensel yüzeylerde doğrudan doğruya temasta olan yağ tabakalarının adsorpsiyon dolayısıyla her iki yüzey boyunca tamamen yapışmış olduğu görülür. Sıvı sürtünmesi haline sürtünme esas itibarıyla birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmakta ve bu tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlı olmaktadır. Sıvı sürtünmesinin oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır.

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bir elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında (Şekil 2.6 a) hiçbir sürtünme kuvveti meydana gelmez. Aslında bu tür elemanların temas yüzeylerinde elastik ve daha az olarak plastik deformasyonlar oluşur (Şekil 2.6 b). Temas yüzeyleri doğru veya nokta değil de alan şeklindedir. Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga meydana gelmektedir.[36]



Şekil 2.6. Yuvarlanma sürtünmesi mekanizması

Yuvarlanma sürtünmesinde en çok rastlanan dişli çarklar ve rulmanlar gibi sistemlerde rastlanır.

2.5.2. Aşınma

Aşınma, birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasında, yüzey etkileşimi nedeniyle yüzeyden malzeme ayrılması olarak kabul edilmiştir. Neredeyse tüm makineler dayanıklılıklarını kaybeder; güvenilirliği ve ömrü aşınmaya bağlı olarak kısalır. Bu nedenle aşınma ciddi ekonomik kayıplara neden olur. [37]

Aşınma türlerini 4 başlık altında toplayabiliriz,

- Adezyon aşınması
- Abrazyon aşınması
- Yorulma aşınması
- Mekanik korozyon aşınması

Adezyon aşınması, en yaygın aşınma türüdür. Birbirine temas eden cisimlerin temas yüzeylerinin hareket esnasında oluşturdıkları bir aşınma türüdür. Adezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelir. Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir. Adezyon aşınması, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmemektedir. Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür. Temiz yüzeylerde olay daha küçük hızlarda ve yüklemelerde meydana gelir.

Abrasyon aşınmasında türünde yüzeylerin bozulması, dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert parçacıklar yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğilemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine sebep olurlar.

Yorulma aşınmasında, temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması ile meydana gelir. Yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve malzemenin yorulması ile ortaya çıkar.

Korozyon aşınmasında, yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda ince sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da elde edilir. Değişken yük altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getirirler[36].

3. BULGULAR

3.1. Giriş

Proje çalışmasında, polyamid 6 ve polipropilen matrisli kompozitler hazırlanmış, bu kompozitlerin, farklı parametreler altındaki tribolojik özellikleri incelenmiştir.

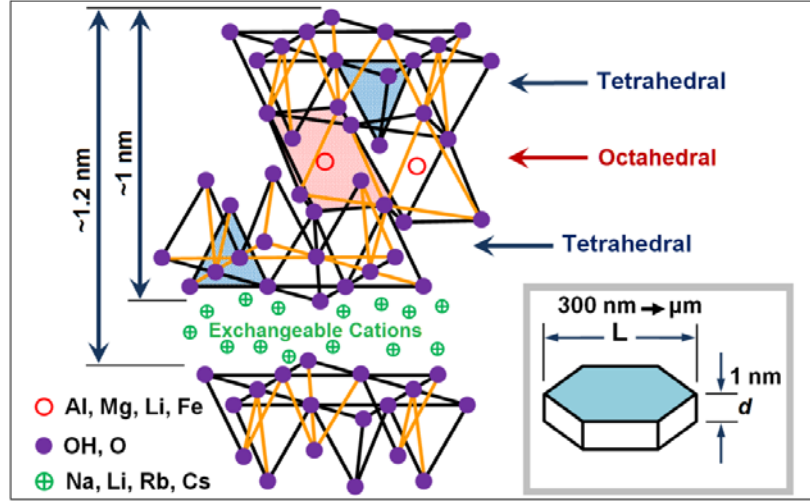
3.2. Kullanılan Malzemeler

Kullanılan PA6, 35 g/10 dak (230 °C/2.16 kg yükte, ASTM D1238) ergiyik akış hızına (MFR), 1.14 g/cm³ yoğunluğa (ASTM D1505) ve 220 °C ergime sıcaklığına sahiptir. 0.905 g/cm³'lük (ASTM D1505) yoğunluğa, 4.5 g/10 dak'lık (230 °C/2.46 kg yükte, ASTM D1238) eriyik akış hızına (MFR), 163 °C ergime noktasına (DSC) (ASTM D3417) ve 42 MPa'lık (ASTM D638) kırılmada gerilme dayanımına sahip PP (Petoplen® MH 418) peletleri Petkim A.Ş.'den (İzmir, Türkiye) satın alınmıştır. Montmorillonit kili (35-45 wt. dimetil dialkil (C14-C18) amin ile modifiye edilmiş / Nanomer I.44P®) ve TiO₂ (4.17 g/mL, <5 µm) Sigma-Aldrich Şirketi'nden temin edilmiştir. Montmorillonit kilinin tabakalı yapısı Şekil 3.1'de, TiO₂'nin kafes yapısı Şekil 3.2'de görülmektedir (griler Ti'u, kırmızılar ise O'i temsil etmektedir).

3.3. Polimer Kompozitlerin Sentezi

3.3.2. PA6/Kil-TiO₂ Kompozitlerinin Sentezi

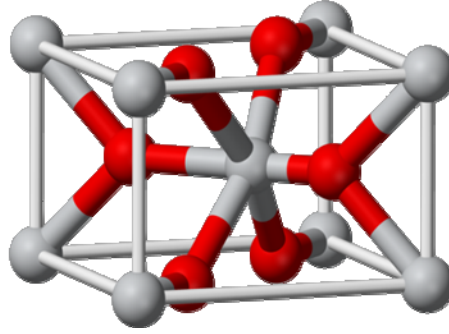
Karıştırma işlemlerinden önce PA6 peletler ve takviye elemanları adsorbe olmuş nemin uzaklaştırılması için 80°C' de 12 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. PA6 matrsili kompozitler aynı yönde dönen çift vidalı ekstrüder kullanılarak ergiyik harmanlama metodu ile üretilmiştir. Ekstrüder sıcaklık bölgeleri girişten çıkışa doğru sırasıyla 50, 220, 225, 230, 225 ve 220 °C'dir.



Şekil 3.1. Montmorillonit kilinin tabakalı yapısı.



(a)



(b)

Şekil 3.2. a) TiO₂ tozu, b) TiO₂'nin kafes yapısı.

Üretimdeki ilk adım PA6 peletler (Şekil 3.3) ve takviye fazları 150 d/d vida hızına sahip ekstrüdere beslenmiştir. Ekstrüderden çubuk formunda çıkan kompozitler bir su banyosundan geçirilerek soğutulmuşlar, ardından granülatör içerisindeki yüksek hızla dönen bıçakla doğranmışlardır. Kompozit peletler üzerlerindeki nemin giderilmesi için bir etüvde 60 °C'de bir gece bekletilmişlerdir.

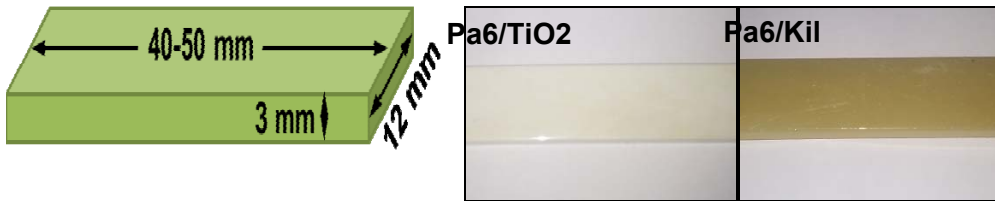
Üretimin ikinci adımında kompozit peletler abrazif aşınma test numuneleri formuna 12 ml'lik hacme sahip Şekil 3.4'te gösterilen sıcak bir presle (Xplore IM 12, The Netherlands) şekillendirilmişlerdir. Kovan ve kalıp sıcaklığı sırasıyla 250 °C ve 25 °C olarak seçilmiştir. Enjeksiyon basıncı ise; 6 bar'dır. Abrazif aşınma testine tabi tutulacak numune 3 mm x 12 mm ebatındadır (Şekil 3.5). Silisyum karbür zımpara kâğıdı (yaklaşık 2000 mesh) ile parlatılmış, testten önce numuneler yıkanarak kurutulmuştur.



Şekil 3.3. PA6 peletleri.



Şekil 3.4. Xplore IM 12 enjeksiyon kalıplama cihazı.



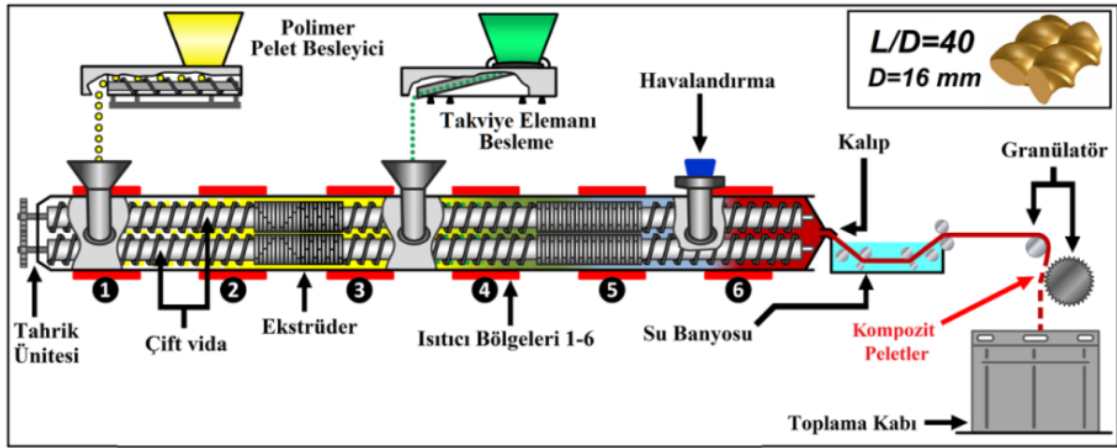
Şekil 3.5. Üretilen PA6 matrisli kompozit ebatları ve numuneler.

3.3.1. PP/ Kil-TiO₂ Kompozitlerin Sentezi

Karıştırma işleminden önce, PP peletler ve takviye elemanları, TiO₂ ve montmorillonit, adsorbe olmuş nemin uzaklaştırılması için 80 °C’de 12 saat boyunca etüvde kurutulmuşlardır. Kompozitler aynı yönde dönen çift vidalı bir ekstrüder (vida çapı $D=16$ mm, vida boy/çap oranı $L/D=40$) (Gülner/Türkiye) kullanılarak ergiyik harmanlama yöntemi ile üretilmişlerdir.

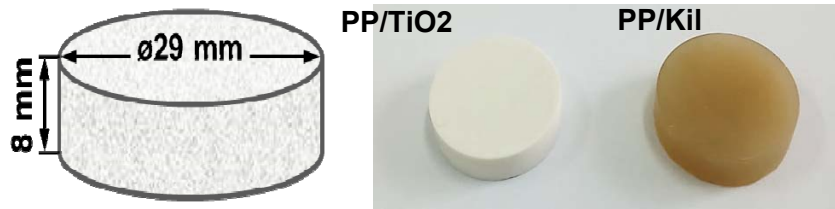
Şekil 3.6’da çift vidalı ekstrüder şematik olarak gösterilmiştir. Ekstrüder sıcaklık bölgeleri girişten çıkışa doğru sırasıyla 50, 180, 190, 195, 200 ve 205 °C’dir.

Üretimde ilk adım olarak, PP peletler ve takviye fazları 150 d/d vida hızına sahip ekstrüzyon içerisine beslenmiştir. Ekstrüderden çubuk formunda çıkan kompozitler bir su banyosundan geçirilerek soğutulmuşlar, ardından granülatör içerisindeki yüksek hızla dönen bıçakla doğranmışlardır. Kompozit peletler (Şekil 3.6) üzerlerindeki nemin giderilmesi için bir etüvde 60 °C’de bir gece bekletilmişlerdir.



Şekil 3.6. Çift vidalı ekstrüderin şematik gösterimi.

Üretimin ikinci adımında ise kompozit peletler abrazif aşınma test numuneleri formuna 12 ml’lik hacme sahip bahsedilen sıcak presle (Xplore IM 12, The Netherlands) şekillendirilmişlerdir. Kovan ve kalıp sıcaklığı sırasıyla 240 °C ve 25 °C olarak seçilmiştir. Enjeksiyon basıncı ise; 6 bar’dır. Aşınma testine tabi tutulacak numune 8 mm kalınlık ve 29 mm çaptadır (Şekil 3.7). Silisyum karbür zımpara kâğıdı (yaklaşık 2000 mesh) ile parlatılmış, testten önce numuneler yıkanarak kurutulmuşlardır.

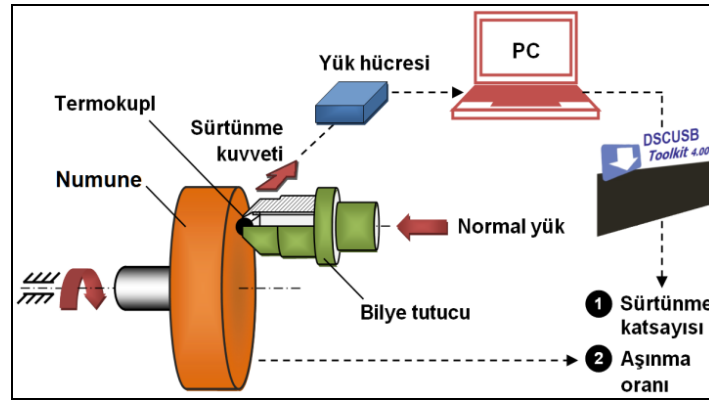


Şekil 3.7. Üretilen PP matrisli kompozit ebatları ve numuneler.

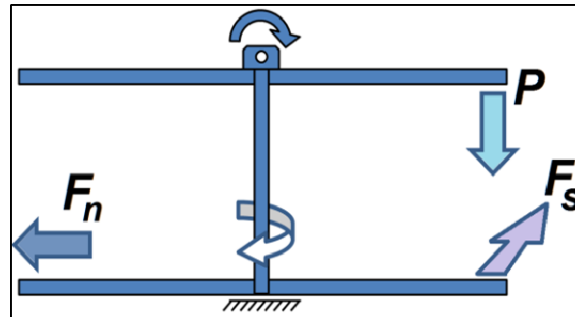
3.4. Sürtünme ve Aşınma Testleri

3.4.1. PA6/Kil-TiO₂ Kompozitlerinin Aşınma Testleri

Klasik pin/ball-on-disk konfigürasyonunda tasarlanan bir aşınma test cihazının prensip şeması Şekil 3.8’de görülmektedir. Düşey olarak yerleştirilen silindirik numune yüzeyine Şekil 3.9’daki yük kolu yardımıyla aşındırma pini veya bilyesi üzerinden normal kuvvet (F_n) iletilmektedir. Çevresel hıza paralel yönde (normal yüke dik yönde) oluşan sürtünme kuvveti (F_s), bir yük hücresi yardımıyla deney süresince kaydedilebilmekte, teste ait sürtünme katsayısı ve aşınma oranları hesaplanabilmektedir.

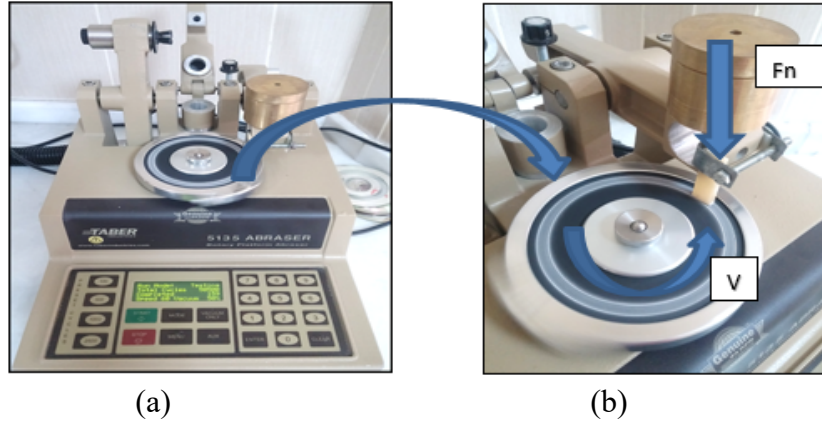


Şekil 3.8. Ball on disk aşınma test cihazı prensibi



Şekil 3.9. Yük iletimi ve sürtünme kuvvet ölçümü için tasarlanan yük kolu (F_n : Normal Kuvvet, F_s : Sürtünme kuvveti, P : Ağırlık askısına asılan yük)

PA6 matrsili numunelerin aşınma testini yapmak için Şekil 3.10’de gösterilen Taber 5135 abrazif aşınma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.10. (a)Taber aşınma cihazı (b) Aşınma test anı.

Abrazif aşınma testinde ise yükler, (F_N) 6.5 ve 9.6 N olarak seçilmiştir. $n=60$ d/d (numune merkezinde yaklaşık $V=0.26$ m/s) hızda çalışılmıştır. Toplam test süresi 10 dak'dır. Testler oda sıcaklığında (22 ± 2 °C) ve atmosfer koşullarında (nispi nem: $\%30 \pm 2$) gerçekleştirilmiştir.

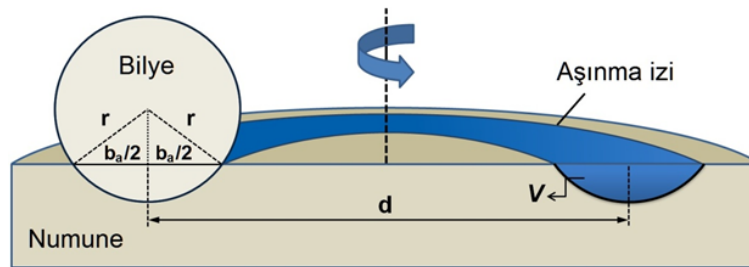
3.4.2. PP/Kil -TiO₂ Kompozitlerinin Aşınma Testleri

Klasik pin/ball-on-disk konfigürasyonunda tasarlanan bir aşınma test cihazının prensip şeması alt Şekil 3.8'de verilmişti. Düşey olarak yerleştirilen silindirik numune yüzeyine üst Şekil 3.9'daki yük kolu yardımıyla aşındırma pini veya bilyesi üzerinde normal kuvvet (F_n) iletilmektedir. Çevresel hıza paralel yönde (normal yüke dik yönde) oluşan sürtünme kuvveti (F_s), bir yük hücresi yardımıyla deney süresince kaydedilebilmekte, teste ait sürtünme katsayısı ve aşınma oranları hesaplanabilmektedir.

PP/kil-TiO₂ kompozitlerinin aşınma testlerini yapmak için kullanılan aşındırıcı topraklar 5 mm çapında 17,2 GPa sertliğinde alümina (Al₂O₃)'dır. Alümina seçilmesinin nedeni ise sertliğinin yüksek ve aşındırılacak malzeme ile reaksiyon girmiyor oluşudur.

Numunelerin sürtünme katsayısı (CoF), 30 N'ye kadar yükleri ölçebilen konsol kirişine tutturulmuş bir yük hücresi sensörü ile ölçülen sürtünme kuvvetlerinin hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Yük hücresinden gelen çıkış voltajından veri toplamak için bir dijital modül (Mantracourt DSC-SUEASC) ve yazılım (Instrument Explorer version 1 build 6.8) kullanılmıştır.

Ortalama aşınma izi genişliği belirlendikten sonra aşınma hacmi kaybı ve aşınma oranı değerleri, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi temas geometrisine göre, sırasıyla (3.1) ve (3.2) formüllerinin kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Numunenin hacim kaybının belirlenmesi aşınmış dairesel izin kesit alanı ve çevresinin çarpımıyla gerçekleştirilmiştir. r karşı bilyenin yarıçapı (mm), b_a aşınma iz genişliği (mm), V aşınma hacmi kaybı (mm^3), K aşınma oranı değeri ($\text{mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$), P uygulanan yük (N) ve L ise kayma mesafesidir (m).



$$V = \left[\frac{\pi r^2}{180} \arcsin \left(\frac{b_a}{2r} \right) - \frac{b_a}{2} \sqrt{r^2 + \frac{b_a^2}{4}} \right] \pi d \quad (3.1)$$

$$K = \frac{V}{FL} \quad (3.2)$$

Yaygın kullanılan bir tasarım, her bir giriş faktörünün iki seviyeye sahip olduğu deneysel tasarımıdır. Böyle bir tasarımda seviyeler ‘yüksek’ ve ‘düşük’ veya ‘+1’ ve ‘-1’ (veya ‘2’ ve ‘1’) şeklinde adlandırılır. Her iki seviyeye sahip k adet faktör varsa, tam eşlendirmeli tasarımın 2^k adet çevrimi olacaktır. Bu çalışmada, tribolojik özelliklere etki eden faktörlerin etkilerini ve faktörler arası etkileşimleri tespit etmek için tam eşlendirmeli deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Deneysel tasarımda kullanacağımız kriter formülü, formül (3.3)’de verilen “en düşük en iyi kriteri”dir.

$$\frac{S}{N} = -\log \frac{1}{n} (\sum y^2) \quad (3.3)$$

3.5.1 PA6/Kil-TiO₂ Kompozitlerinin Deneysel Tasarım Metodu

Tribolojik özelliklere etki eden faktörlerin etkilerini ve faktörler arası etkileşimleri tespit etmek için üç faktörlü ve iki seviyeli ($2^3 = 8$ çevrimli) tam eşlendirmeli deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Deneysel verileri analiz etmek için MINITAB® 16 istatistik yazılımı kullanılmış ve aşınma oranlarını karakterize edecek olan numune ağırlık kaybı değerleri dikkate alınarak ‘en düşük en iyi’ kriterine göre tribolojik özelliklere etki eden faktörler ve etkileşimleri araştırılmıştır. Deney parametreleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir. A takviye fazı, B, takviye fazı oranı, C aşındırma yükü olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 3.1. L8 tam eşlendirmeli deney tasarımı için faktörler ve seviyeleri.

Sembol	Parametreler	Seviye 1	Seviye 2
A	Takviye Fazı	Kil	TiO ₂
B	Takviye Fazı Oranı (%)	1	7
C	Aşındırma Yükü	6.5	9.6

3.5.2 PP/Kil-TiO₂ Kompozitlerinin Deneysel Tasarım Metodu

Tribolojik özelliklere etki eden faktörlerin etkilerini ve faktörler arası etkileşimleri tespit etmek için dört faktörlü ve iki seviyeli ($2^4 = 16$ çevrimli) tam eşlendirmeli deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan seviyelere karşılık gelen faktörler ve değerler Tablo 3.2’de listelenmiştir. Deneysel hataların sonuçlara etkisini en aza indirmek için deneyler rastgele sırada yapılmıştır. Deneysel verileri analiz etmek için MINITAB® 16 istatistik yazılımı kullanılmıştır. A normal yük, B kayma hızı, C takviye fazı, D takviye faz oranı olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 3.2. L16 tam eşlendirmeli deney tasarımı için faktörler ve seviyeleri.

Sembol	Parametreler	Seviye 1	Seviye 2
A	Normal Yük (N)	2.5	5
B	Kayma Hızı (rpm)	500	1000
C	Takviye Fazı	TiO ₂	Montmorillonite (Kil)
D	Takviye Faz Oranı (wg.%)	1	5

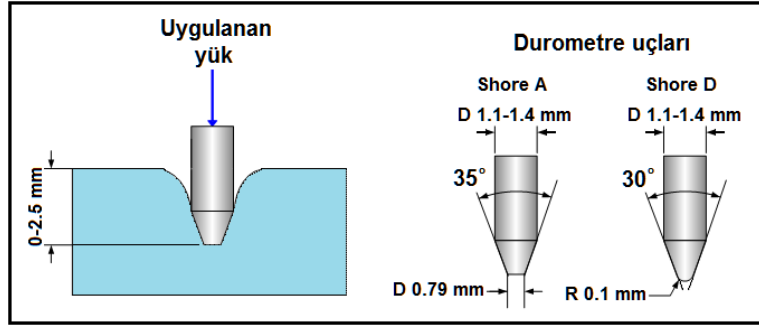
3.6 Sonuçlar

3.6.1. PA6/Kil-TiO₂ Kompozitlerinin Deney Sonuçları

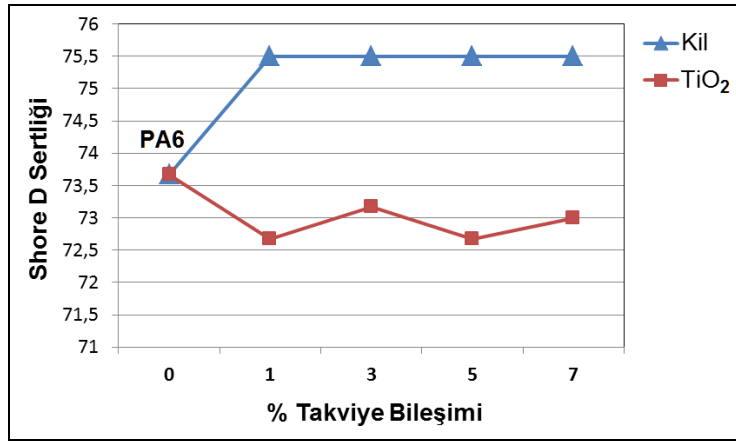
2³ tam eşlendirmeli deney tasarımı sonuçları Tablo 3.3'te listelenmiştir. Aşınmanın ölçüsü olarak ağırlık kaybı (g) kullanılmıştır. Şekil 3.12'de Shore A ve D'nin test prosedürleri gösterilmiş olup PA6/kil-TiO₂ kompozitlerinin Shore D sertlik değerleri de ölçülmüştür. Şekil 3.13'te ise % ağırlık takviye bileşiminin, kompozitlerin Shore D sertliğine etkileri gösterilmiştir. Yapılan Shore D sertlik ölçüm sonuçlarından kil takviyesinin sertlik değerlerini arttırırken, TiO₂ takviyesinin sertliği düşürdüğü görülmüştür. Bileşime göre belirgin bir değişime rastlanılmamıştır.

Tablo 3.3. L8 Aşınma deneyi sonuçları.

Sıra	Faktörler ve seviyeleri			Deney sonuçları		
	A	B	C	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (g)
1	1	1	1	1.6987	1.5029	0.1958
2	1	1	2	1.4796	1.2483	0.2313
3	1	2	1	2.2888	1.9636	0.3252
4	1	2	2	1.9516	1.4931	0.4585
5	2	1	1	2.0943	1.9770	0.1173
6	2	1	2	1.9697	1.7735	0.1962
7	2	2	1	1.7493	1.5527	0.1966
8	2	2	2	1.5475	1.3008	0.2467

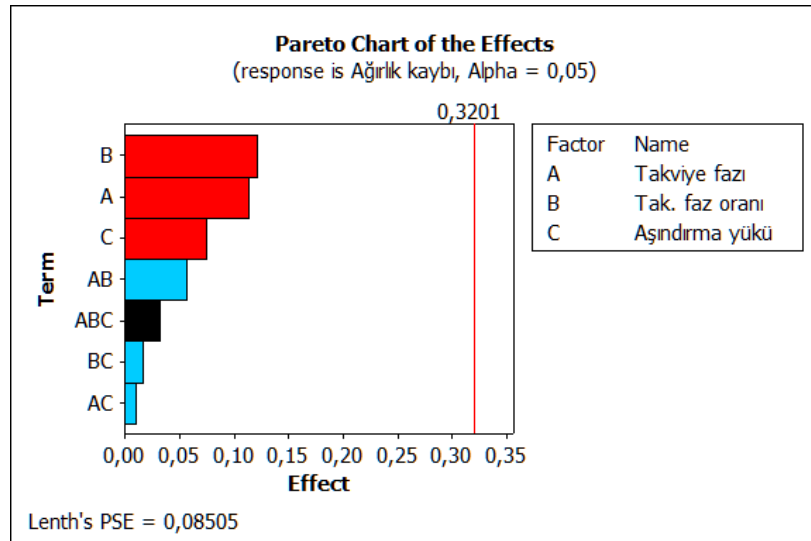


Şekil 3.12. Shore A ve D için test prosedürü.



Şekil 3.13. % Ağırlık takviye bileşiminin, PA6 kompozitlerin Shore D sertliğine etkileri.

PA6/kil-TiO₂ kompozitlerine ait Pareto grafiği Şekil 3.14'te verilmiştir. Pareto grafiği, faktörlerin ve faktörler arası etkileşimlerinin mutlak değerlerinin gözlemlemek için kullanılır.

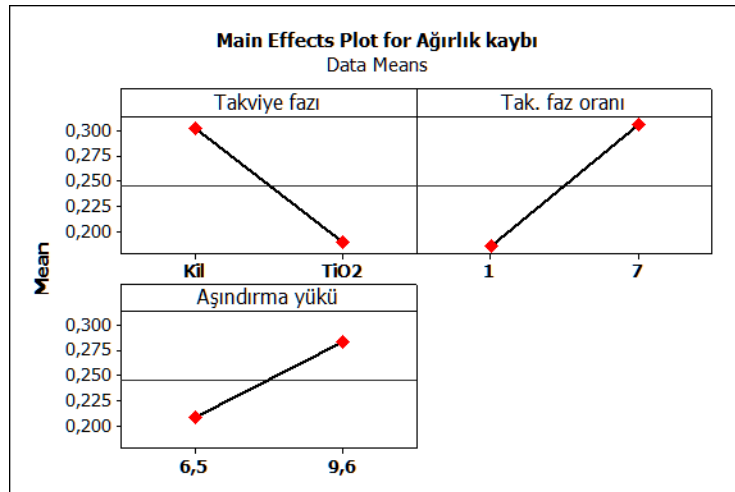


Şekil 3.14. Aşınma oranları için pareto grafiği.

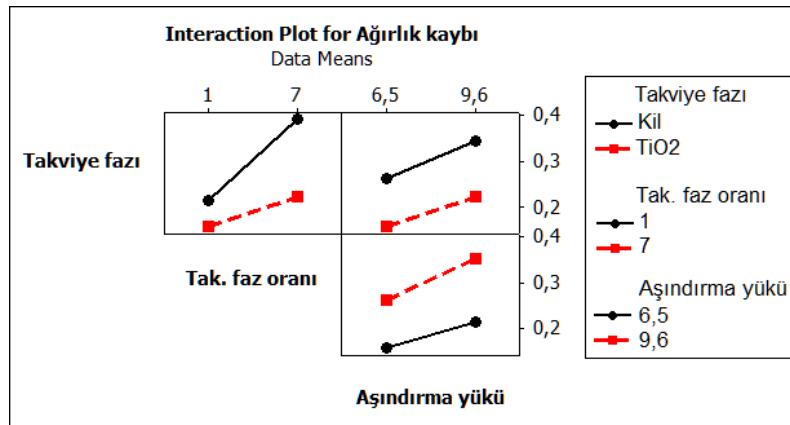
Pareto grafiğinden, aşınma oranı üzerinde sırasıyla; takviye fazı oranı, takviye fazı tipi ve aşındırma yükü parametrelerinin önemli olduğu, etkileşimlerinin ise önem derecelerinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

PA6/kil-TiO₂ kompozitlerine ait ana etkiler grafiği ise Şekil 3.15'te verilmiştir. Ana etkiler grafiği, faktörlerin etki seviyelerinin birbirine göre önem derecelerini gösteren grafikdir. Bu grafiğe göre kil yerine TiO₂, %7 yerine %1, 9.6 N aşındırma yükü yerine 6.5 N yükün tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

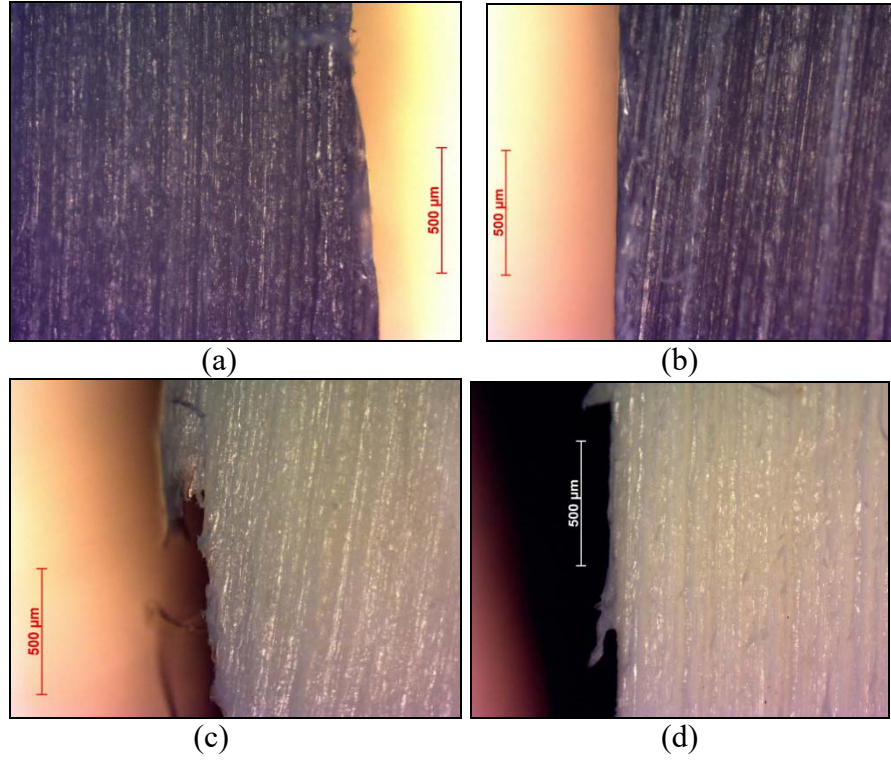
PA6/kil-TiO₂ kompozitlerine ait etkileşim grafiği ise Şekil 3.16'da verilmiştir. Etkileşim grafiklerinde bütün olası etkileşim kombinasyonları dikkate alınır. Doğruların birbirine paralel olması etkileşimin olmadığı sonucuna götürür. Şekil 3.16'da ise doğrular birbirine nispeten paraleldir. PA6/kil-TiO₂ kompozitlerine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.15. PA6/kil-TiO₂ kompozitlerine ait ana etkiler grafiği.



Şekil 3.16. PA6/kil-TiO₂ kompozitlerine ait etkileşimler grafiği.



Şekil 3.17. PA6/kil-TiO₂ kompozitlerinin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri
(a) %1 Kil katkılı, (b) %7 Kil katkılı, (c) %1 TiO₂ katkılı, (d) %7 TiO₂ katkılı

3.6.2. PP/Kil-TiO₂ Kompozitlerinin Deney Sonuçları

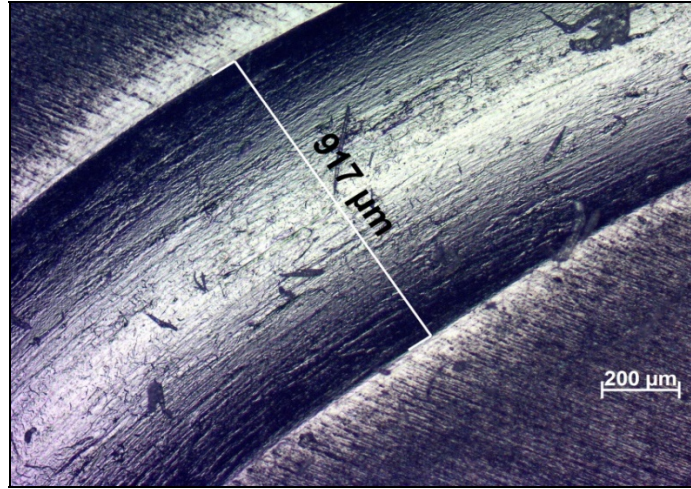
PP matsili kompozitlere uygulanan aşınma testlerinin sonuçları Tablo 3.4'te verilmiştir. Bu deneyler sonucunda aşınma iz genişliği ve sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Aşınma sonrası optik mikroskop altında numunelerin aşınma izi görüntüleri alınmıştır. Bunlar ise Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verilmiştir.

Pareto çizelgeleri, aşınma izi genişliği ve sürtünme katsayısı için etkiler Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de verilmektedir. Grafikler dikkate alınarak çıkarılan sonuçlar ise şu şekilde özetlenebilir:

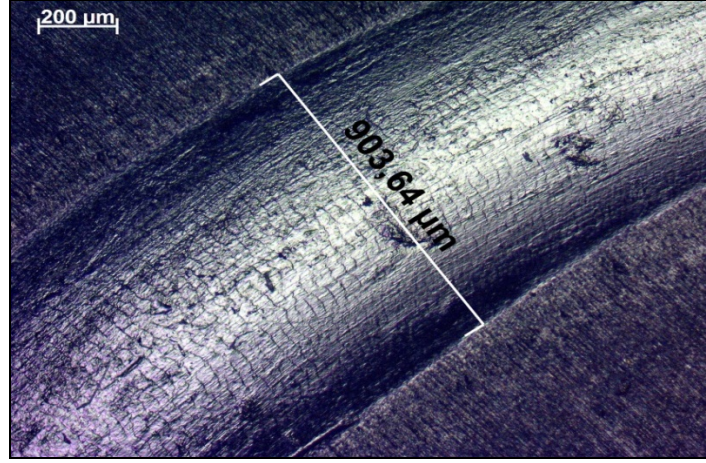
- Aşınma oranını en çok etkileyen faktörler sırasıyla; kayma hızı, normal yük, takviye fazı, takviye fazı oranıdır,
- Sürtünme katsayısını en çok etkileyen faktörler sırasıyla; kayma hızı, normal yük, takviye fazı oranı, takviye fazıdır.

Tablo 3.4. PP/Kil-TiO₂ Kompozitlerinin Deney Sonuçları

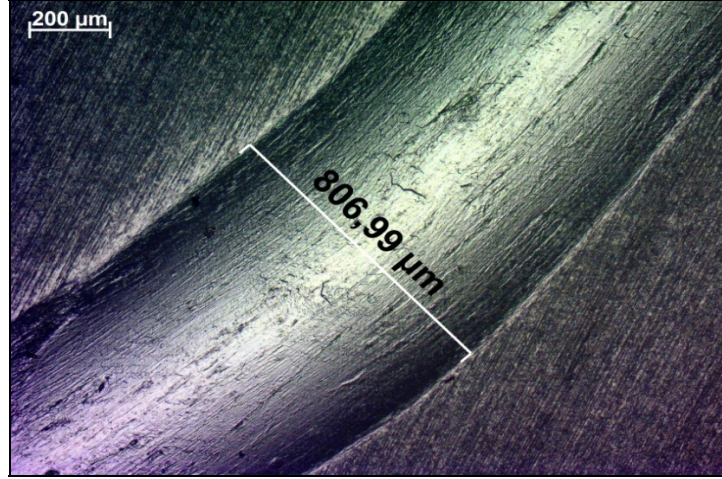
Deney No	Normal Yük (N)	Aşınma Hızı (d/d)	Takviye Fazı	Takviye Fazı (%ağ.)	Aşınma Genişliği (μm)	İz Sürtünme Katsayısı
1	2,5	1000	Kil	5	897,1	0,202
2	5,0	500	TiO ₂	1	972,7	0,318
3	5,0	1000	Kil	1	1057,7	0,308
4	2,5	1000	Kil	1	894,9	0,328
5	2,5	500	TiO ₂	1	829,0	0,398
6	5,0	1000	Kil	5	967,3	0,245
7	2,5	500	Kil	1	780,5	0,415
8	5,0	1000	TiO ₂	1	1091,5	0,267
9	2,5	1000	TiO ₂	5	867,2	0,307
10	2,5	500	TiO ₂	5	736,7	0,441
11	2,5	1000	TiO ₂	1	934,9	0,295
12	5,0	500	Kil	5	829,5	0,247
13	5,0	500	TiO ₂	5	885,7	0,365
14	2,5	500	Kil	5	737,4	0,336
15	5,0	500	Kil	1	853,2	0,393
16	5,0	1000	TiO ₂	5	1199,6	0,262



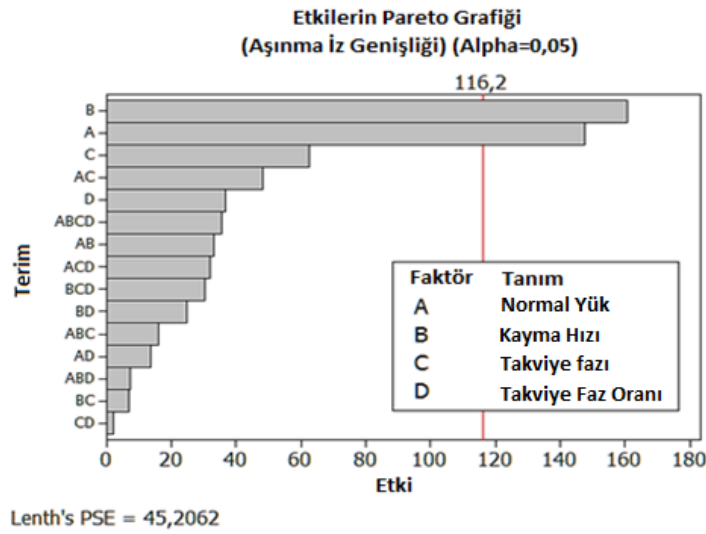
Şekil 3.18. %1 Kil katkılı PP optik mikroskop görüntüsü (2,5N, 1000 rpm).



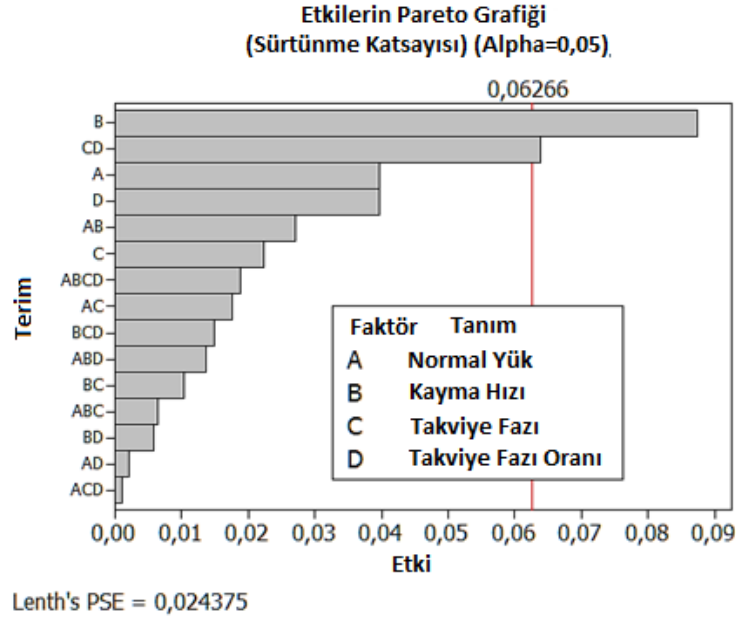
Şekil 3.19. %5 Kil katkılı PP optik mikroskop görüntüsü (2,5N, 1000 rpm).



Şekil 3.20. %1 TiO₂ katkılı PP optik mikroskop görüntüsü (2,5N, 500 rpm).

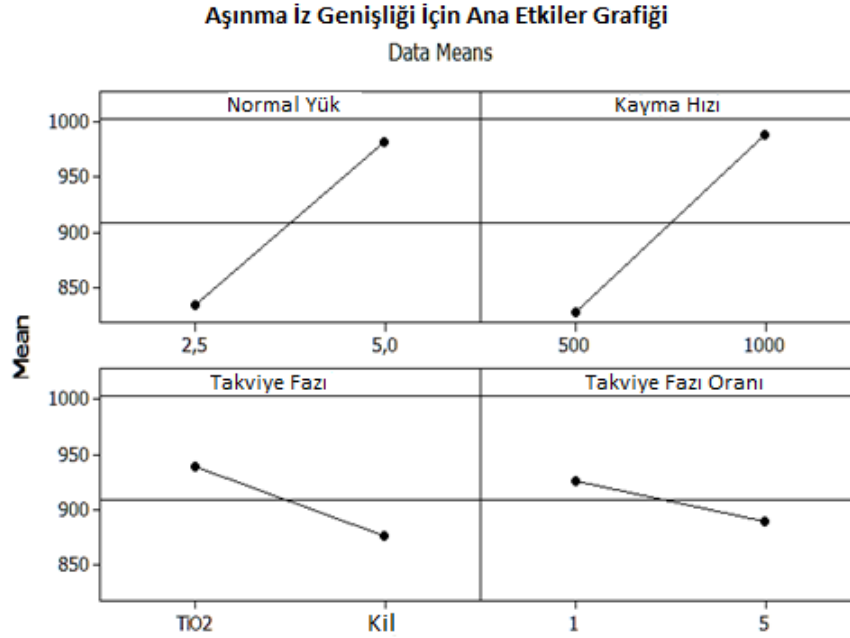


Şekil 3.21. Aşınma oranını etkileyen faktörlerin için oluşturulan Pareto Grafiği.

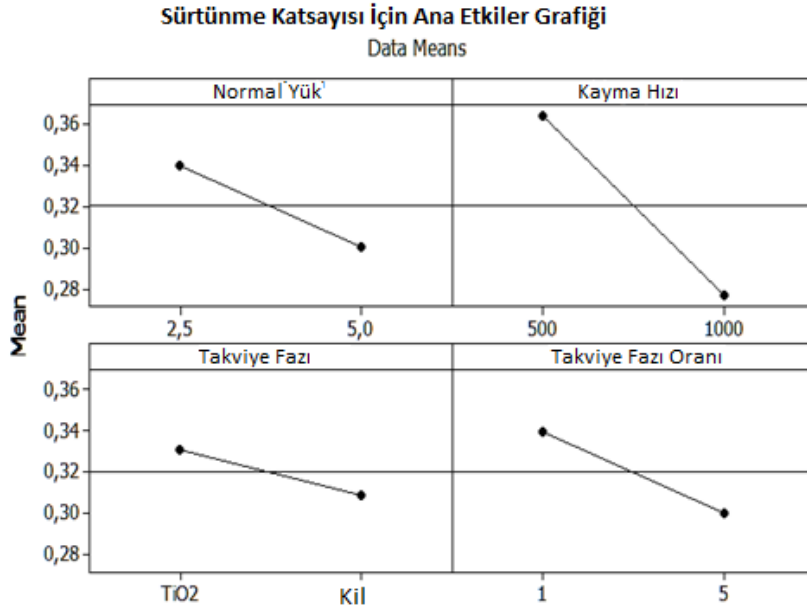


Şekil 3.22. Sürtünme katsayısını etkileyen faktörlerin için oluşturulan Pareto Grafiği.

Aşınma izi genişliği ve CoF için ana etkiler Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Aşınma oranı için ana etkiler grafiği.



Şekil 3.24. Sürtünme katsayısı için ana etkiler grafiği.

Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'ten çıkan sonuçlar ise şu şekildedir;

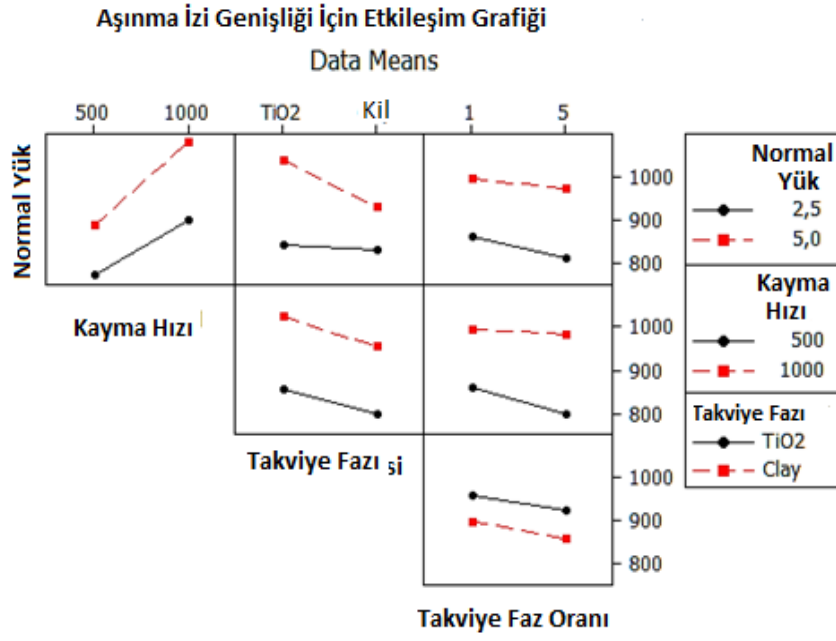
- Takviye fazı ve takviye fazı oranını aşınma oran genişliği ve sürtünme katsayısı üzerinde benzer etkiye sahiptir.
- TiO₂ yerine %5 kil kullanarak aşınma oranı ve sürtünme katsayısı düşürülebilir.
- Normal yük ve kayma hızını artırarak aşınma oranı artırılır, sürtünme katsayısı azalır.

Etkileşimli faktörlerin aşınma izi genişliği ve sürtünme katsayısına etkisi ise Şekil 3.25 ve 3.26'da verilmiştir. Grafikteki çizgiler paralel değilse (kesişıyorsa), iki faktör arasında etkileşim olduğunu gösterir.

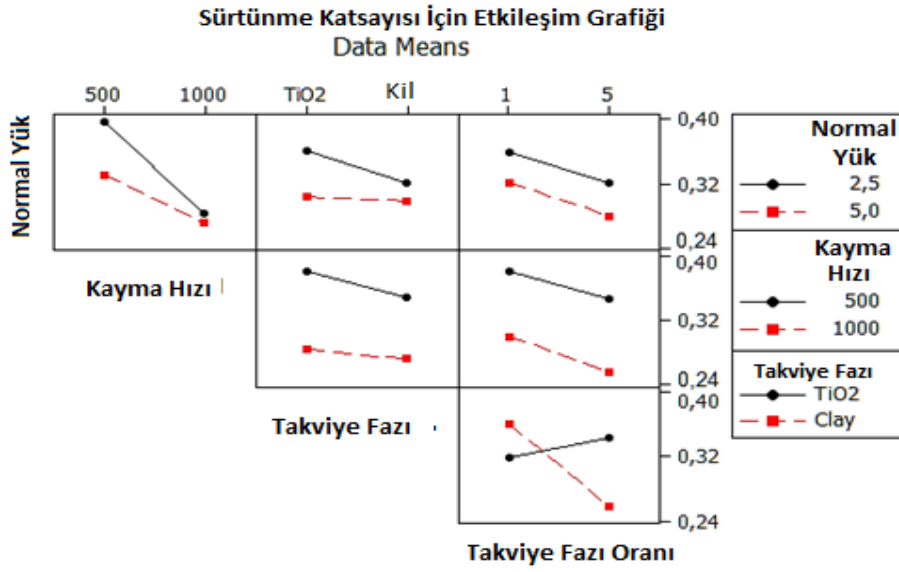
Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'ya göre çıkan sonuçlar şu şekildedir;

- Takviye fazı ve takviye fazı oranı arasında etkileşim vardır.

%1 TiO₂ ve %5 kil sürtünme katsayısını minimum yapan optimum faktörlerdir.



Şekil 3.25. Aşınma iz genişliği için etkileşimli faktörler grafiği.



Şekil 3.26. Sürtünme Karsayısı için etkileşimli faktörler grafiği.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Bu projede, PA6/kil-TiO₂ ve PP/kil-TiO₂ kompozit peletleri çift vidalı ekstrüder kullanılarak, ergiyik harmanlama metodu ile üretilmiş, daha sonra aşınma testleri yapabilmek için kalıplanmıştır.

PA6/kil-TiO₂ kompozitlerine, Taber abrazif aşınma test cihazı ile aşınma testi uygulanmıştır. Takviye fazı tipi, takviye fazı % bileşimi ve aşındırma kuvveti parametrelerinin etkileri 2³ tam eşlendirmeli deney tasarımı yöntemi ile araştırılmıştır. Sonuçta ise;

- Aşınma oranları üzerinde sırasıyla, takviye fazı oranı, takviye fazı tipi ve aşındırma yükü parametrelerinin önemli olduğu,
- Kil yerine TiO₂,
- %7 bileşim yerine %1,
- 9.6 N yerine 6.5 N yükün uygulanması en düşük aşınma oranını verdiği,
- Yüksek sertliğin abrazif aşınma direnci üzerinde olumsuz etkileri olduğu ve abrazif şartlarda çalışacak sistemlerde dikkate alınması gerektiği sonuçlarına varılmıştır.

PP/kil-TiO₂ bazlı kompozitler için ise, deneyler, kuru kayma şartlarında ball-on-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin aşınma direncini etkileyen önemli faktörlerin taranması için 2⁴ tam eşlendirmeli deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Takviye fazının tipi, takviye fazı oranı, normal yük ve kayma hızı kompozitleri karakterize etmek için seçilmiş parametrelerdir. Yapılan deneylerden çıkan sonuçlar ise;

- Aşınma oranı üzerinde en büyük etkiyi sırasıyla, kayma hızı, normal yük, takviye fazı, takviye fazı oranı göstermiştir.
- Sürtünme katsayısı üzerinde en büyük etkiyi sırasıyla, kayma hızı, normal yük takviye fazı oranı ve takviye fazı göstermiştir.
- Normal yük ve aşınma hızının artması ile aşınma oranı artmış, sürtünme katsayısı azalmıştır.
- TiO₂ yerine %5 kil kullanımı aşınma oranını ve sürtünme katsayısını azaltmıştır.

4.2. Öneriler

Yapılan alışmalar, uyumlaştırıcı kullanılmadan yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda uyumlaştırıcı kullanarak, parametrelerin nasıl etkilendiği gözlemlenebilir. PP tabanlı kompozitlerin aşınma özellikleri Taber aşınma cihazı ile ağırlık kaybına göre araştırılabilir ve karşılaştırmalar yapılabilir. Konu ile ilgili hibrid sistem çalışmaları devam edecektir.

5. KAYNAKLAR

1. Li,D., You Y., Deng X., Li W., Xie Y., 2013. Tribological properties of solid lubricants filled glass fiber reinforced polyamide 6 composites. **Materials and Design**, **46**, 809–815.
2. Unal, H., Mimaroglu A., 2012 . Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions. **Wear**, **289**, 132-137.
3. Yakar, S., 2010, ZnO tozunun yüksek enerjili öğütme davranışlarının incelenmesi ve bu tozlardan hareketle ZnO katkılı polimer kompozitlerin geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 77 s.
4. Theiler G., Gragt T., 2015. Tribological characteristics of polyimide composites in hydrogen environment. **Tribology International**,**92**, 162-171.
5. Chang L., Zhang Z., Ye L., Friedric K., 2007, Tribological properties of high temperature resistant polymer composites with fine particles. **Tribology International**, **40**, 1170-1178.
6. Saylan T., 2010, PA 6 kompozitlerinin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi.Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 160 s.
7. Bhuyan S., Sundararajana S., Lub Y., Larockb R.C., 2010, A study of the physical and tribological properties of biobased polymer–clay nanocomposites at different clay concentrations. **Wear**, **289**,797-802
8. Zhang H., Zhang Z., WeiJiang F., Liu W.,2009, Study on the tribological behavior of hybrid PTFE/cotton fabric composites filled with Sb₂O₃ and melamine cyanurate. **Tribology International**, **42**, 1061-1066.
9. Kaştan A., 2005, Grafit katkılı nylon 6 (polyamid 6)’nın aşınma davranışlarının deneysel incelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 86 s.
10. Chauhan S.R., Thakur S., 2013., Effects of particle size, particle loading and sliding distance on the friction and wear properties of cenosphere particulate filled vinylester composites. **Materials and Design**, **51**, 398-408.
11. Sawyer W. G., Freudenberg K., Bhimaraj P., Schadler L. S.,2003, A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. **Wear**, **254**, 573-580
12. Burris D. L., Sawyer W. G., 2006, Improved wear resistance in alumina-PTFE nanocompositeswith irregular shaped nanoparticles. **Wear**, **260**, 915-918.
13. Zhang X., Pei X., Wanga Q., 2009, Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO₂. **Materials and Design**, **30**, 4414-4420.
14. Chang L., Zhang Z., Breidt C., Friedrich K., 2005, Tribological properties of epoxy nanocomposites I. Enhancement of the wear resistance by nano-TiO₂ particles. **Wear**, **258**, 141-148.

15. Zhang J., Chang L., Deng S., Ye L., Zhang Z., 2013, Some insights into effects of nanoparticles on sliding wear performance of epoxy nanocomposites. **Wear**, **304**, 138-143.
16. You Y., Li D., Si G., Deng X., 2014, Investigation of the influence of solid lubricants on the tribological properties of polyamide 6 nano composite. **Wear**, **311**, 57-64.
17. Koyunbakan M., Yetgin S. H., Yıldırım F., Kuş G., Eskizeybek V., Genç A., 2017., Karbon Elyaf Dolgulu Pa6 Polimer Kompozitlerinin Aşınma Özellikleri Üzerine Uygulanan Yük ve Kayma Hızının Etkisi. **Akademik Platform Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi**, 49-57.
18. Koç R., 2011, Mühendislik Plastiklerinin Aşınma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi. **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, **8**, 27-40.
19. Suresha B., Kumar R., Venkataramareddy M., Jayaraju T., 2010, Role of micro/nano fillers on mechanical and tribological properties of polyamide66/polypropylene composites. **Materials and Design**, **31**, 1993-2000.
20. Yuan J., Zhang Z., Yang M., Guo F., Men X., Liu W., 2017, TiB₂ reinforced hybrid-fabric composites with enhanced thermal and mechanical properties for high-temperature tribological applications. **Tribology International**, **115**, 8-17.
21. Saçak, M., 2004. Polimer Kimyası . 2. Baskı. Gazi Kitabevi, Ankara.
22. Mudu M., 2010, Organik-İnorganik Hibrid Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 108 s.
23. Can C., 2008. Plastik Enjeksiyon Kalıplamada Termoplastik Malzemelerin Modelleme ve Analizleri. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 126 s.
24. Açar İ., 2013. Termoplastik Malzemelerden Birleştirme İşlemlerinde Kaynak Parametrelerinin Etkisi Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 77 s.
25. Akdoğan A., 2014 <http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/plastikmalzeme/Polimer1> (Erişim Tarihi: Kasım 2017)
26. PAGEV, 2017. Plastik Sektör İzleme Raporu, Türk Plastik Sanayicileri Araştırma ve Geliştirme Vakfı.
27. ALOBAIDI A., 2017, PP-g-MA'NIN PP/TPU Polimer Karışımlarının Mekanik Ve Tribolojik Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 60 s.
28. Yaşar H., 2001. Plastikler Dünyası, Tmmob Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
29. <http://www.ozgenkimya.com/Polipropilen.htm> (Erişim Tarihi: Aralık 2017)
30. Özkoç G., 2007, ABS/POLYAMIDE-6 Blends, Their Short Glass Fibercomposites And Organoclay Based Nanocomposites: Processing And Characterization. Middle East Technical University, Department of Polymer Science and Technology, Phd Thesis. Ankara, 310 s.

31. 2001. Composites, ASM Handbook, Volume 21,
32. Sönmez Murat.,2009, Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi Ve Geleceği : Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerinde Bir İnceleme. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 183 s.
33. Babat V., 2014,Alüminyum, Cam Küre Ve Bor Karbür İlaveli Akrilonitril Bütadien Stiren (Abs) Polimer Kompozitinin Mekanik, Sürtünme Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 129 s.
34. AkdoğanA.,2014http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son (Erişim Tarihi: Aralık 2017)
35. Temiz V., 2015, <http://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf> (Erişim Tarihi: Aralık 2017)
36. Yılmaz M., 2013, Kompozitlerin Kuru Kaymadaki Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 99 s.
37. Çakır S., 2010,Tribological Properties Of In Lubricated Environment Mo-N-Cu Nanocomposite Coatings, İstanbul Technical University, Institute Of Science And Technology. İstanbul, 93 s.