



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**YÜZEY İŞLEMLERİNİN ULTRA YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLİ POLİETİLEN
FİBER/DOYMAMIŞ POLİESTER REÇİNE KOMPOZİTLERİNİN
ÖZELLİKLERİNİN ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NESLİHAN KAYACIK KİREZ

DANIŞMAN: DOÇ. DR. MEHMET ARİF KAYA

**YALOVA
OCAK 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

YÜZEY İŞLEMLERİNİN ULTRA YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLİ POLİETİLEN
FİBER/DOYMAMIŞ POLİESTER REÇİNE KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNİN
ÜZERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NESLİHAN KAYACIK KİREZ
228115023

DANIŞMAN: DOÇ. DR. MEHMET ARİF KAYA

YALOVA
OCAK 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Yüzey İşlemlerinin Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Fiber/Doymamış Poliester Reçine Kompozitlerinin Özelliklerinin Üzerine Etkisi” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

NESLİHAN KAYACIK KİREZ





ÖNSÖZ

Tez sürecim boyunca bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşan danışmanım Doç. Dr. Mehmet Arif Kaya'ya değerli katkıları için teşekkür ederim. Ayrıca, mesleki anlamda bana çok şey katmış, vizyonumu genişletmiş ve yolumu aydınlatmış olan Sinan Göktuğ'a özel teşekkürlerimi sunarım Her koşulda yanımda olan, bana güç veren ve bu zorlu yolculuğu birlikte yürüdüğüm kıymetli eşim Hakan Kirez'e de içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2024/YL/0002) teşekkür ederim.

Ocak – 2025

Neslihan KAYACIK KİREZ





İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Polimerler	3
2.1.1. Polimerlerin genel özellikleri.....	4
2.1.1.1. Fiziksel özellikler	4
2.1.1.2. Kimyasal özellikler.....	4
2.1.1.3. Mekanik özellikler.....	5
2.1.1.4. Elektriksel özellikler.....	5
2.1.1.5. Termal özellikler.....	5
2.1.2. Polimerlerin sınıflandırılması.....	7
2.2. Kompozitler	8
2.2.1. Polimer matrisli kompozitler	8
2.2.1.1. Poliester reçine	9
2.2.1.2. Doymuş poliesterler.....	9
2.2.1.3. Doymamış poliester	10
2.2.1.4. Poliester reçine uygulama şekilleri.....	12
2.3. UHMWPE	15
2.3.1. UHMWPE tarihçesi.....	16
2.3.2. UHMWPE üreticileri.....	17
2.3.3. UHMWPE polimerizasyon yöntemi	17
2.3.4. UHMWPE formları	18
2.3.5. UHMWPE şekillendirme yöntemleri	19
2.3.6. UHMWPE uygulamaları	22
2.4. UHMWPE Fiber.....	24
2.4.1. UHMWPE fiberlerin üretimi.....	25
2.4.1.1. Jel eğirme yöntemi ile UHMWPE fiber üretimi.....	25
2.4.1.2. Eriyik eğirme yöntemi ile UHMWPE fiber üretimi	26

2.4.2. UHMWPE fiberlerin kullanım alanları	26
2.5. Fiber.....	28
2.5.1. Doğal fiberler	28
2.5.1.1. Bitkisel fiberler (selülozik fiberler)	28
2.5.1.2. Hayvansal fiberler.....	29
2.5.1.3. Mineral fiberler.....	29
2.5.2. Sentetik fiberler	29
2.6. Fiberlere uygulanan yüzey işlemleri	31
2.6.1. Plazma işlemi	31
2.6.2. Yüzey kaplama (sizing) metodu.....	32
2.6.3. Fiziksel muamele (corona-korona) yaklaşımı	32
2.6.4. Lazer işleme	33
2.6.5. Asit veya Alkali İşleme	34
2.6.6. Karbonizasyon.....	34
2.6.7. Nanopartikül kaplama	34
2.6.8. Protein veya enzim kaplama.....	34
3. LİTERATÜR ÖZETİ	35
4. MALZEMELER VE YÖNTEMLER.....	43
4.1. Malzemeler	43
4.2. UHMWPE Fiber Yüzey Modifikasyon İşlemleri.....	43
4.2.1. Kimyasal aşındırma (etching) yaklaşımı	44
4.2.2. Fiziksel muamele (corona-korona) yaklaşımı	45
4.2.3. Yüzey kaplama (sizing) yaklaşımı	45
4.2.4. Poliester reçine / UHMWPE fiber esaslı kompozitlerin hazırlanması	46
4.2.5. Kompozitlere uygulanan karakterizasyonlar	51
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	55
5.1. UHMWPE Katkılı Poliester Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	55
5.1.1. Yüzeyi modifiye edilmemiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin mekanik özellikleri	55
5.1.2. Yüzeyi modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin mekanik özellikleri	57
5.1.2.1. Kromik asit ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin mekanik özellikleri	57
5.1.2.2. Korona işlemi ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin mekanik özellikleri	61
5.1.2.3. Hekzametildiamin kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin mekanik özellikleri	64

5.1.2.4. Silan kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin mekanik özellikleri	67
5.1.3. Yüzeyi modifiye edilmemiş/edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin yoğunluk değerleri	74
5.1.4. Yüzeyi modifiye edilmemiş/edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin sertlik değerleri	75
5.2. Yüzeyi Modifiye Edilmemiş/Edilmiş UHMWPE Fiber İlavesiyle Elde Edilen Polimer Kompozitlerin FTIR Sonuçları	76
5.2.1. Kromik asit ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları	77
5.2.2. Korona ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları	78
5.2.3. Hekzametilendiamin kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları	78
5.2.4. Silan kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları	79
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	91
TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER.....	91



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

α	: Isıl genleşme katsayısı
C=C	: Karbon- karbon çift bağ
C-C	: Karbon- karbon tek bağ
COOH	: Karboksil Grubu
OH	: Hidroksil Grubu

KISALTMALAR

CNC	: Computer Numerical Control
CTP	: Cam Elyaf Takviyeli Polyester
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HMDA	: Hekzametilendiamin
PAN	: Poliakrilonitril
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PVC	: Polivinil Klorür
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
SCF	: Süper Kritik Akışkan
T _g	: Camı Geçiş Sıcaklığı
T _m	: Erime Sıcaklığı
UHMWPE	: Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen
UV	: Ultraviyole



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Polimerler ve diğer malzemelerin karşılaştırılması	6
Tablo 2.2. Termoplastikler ve termosetlerin karşılaştırılması.....	7
Tablo 4.1. Poliester-UHMWPE kompozitlerine ait bileşim ve kodlamaları.....	48
Tablo 5.1. Fiber içermeyen ve yüzey modifikasyon işlemi uygulanmamış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.	55
Tablo 5.2. Fiber içermeyen ve kromik asit ile aşındırma yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.	58
Tablo 5.3. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.	61
Tablo 5.4. Hazırlanan fiber içermeyen ve hekzametilendiamin kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.	64
Tablo 5.5. Hazırlanan fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.....	68
Tablo 5.6. Fiber içermeyen, yüzeyi modifiye edilmemiş ve edilmiş UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait yoğunluk test sonuçları.....	75
Tablo 5.7. Fiber içermeyen, yüzeyi modifiye edilmemiş ve edilmiş UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait sertlik test sonuçları.	76



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Monomer ve polimer yapısı	3
Şekil 2.2. Doymuş poliestер örnekleri	10
Şekil 2.3. Doymamış poliestер reçine yapısı	11
Şekil 2.4. El ile yatırma yöntemi proses aşamaları	12
Şekil 2.5. Vakum infüzyon yönteminde kullanılan elemanlar	13
Şekil 2.6. Sprey yöntemi	13
Şekil 2.7. Reçine transfer kalıplama yöntemi	14
Şekil 2.8. Sıkıştırma kalıplama yöntemi	14
Şekil 2.9. Elyaf sarma yöntemi	15
Şekil 2.10. Pultrüzyon yöntemi	15
Şekil 2.11. UHMWPE yapısı	16
Şekil 2.12. UHMWPE'nin polimerizasyon reaksiyonları.....	18
Şekil 2.13. UHMWPE toz formunun mikroskop altındaki görüntüsü	18
Şekil 2.14. UHMWPE fiber	19
Şekil 2.15. Ekstrüzyon hattı	20
Şekil 2.16. Plastik enjeksiyon makinesi	20
Şekil 2.17. Sıkıştırarak kalıplama yöntemi	21
Şekil 2.18. Isı ile şekillendirme yöntemi	21
Şekil 2.19. UHMWPE implant üretim süreci: A) Reçine tozuyla başlama, B) Yarı mamul çubuklar, C) Torna tezgahında işleme, D) Asetabular bileşenler	22
Şekil 2.20. UHMWPE'den yapılan dişliler	23
Şekil 2.21. UHMWPE'den yapılan kurşun geçirmez yelek	23
Şekil 2.22. UHMWPE fiber	24
Şekil 2.23. Jel eğirme yöntemi ile fiber üretimi	25
Şekil 2.24. Eriyik lif çekim yöntemi	26
Şekil 2.25. Yapay kalça ve diz UHMWPE bağlantıların şematik görünüşleri	27
Şekil 2.26. UHMWPE fiber uygulamaları	28
Şekil 2.27. UHMWPE fiber	30
Şekil 2.28. Karbon fiber yapısı	31
Şekil 2.29. Vakum plazmanın şematik görünümü	32
Şekil 2.30. Korona uygulaması işlemi sonrası yüzey	33
Şekil 4.1. Doymamış poliestер reçinenin kimyasal yapısı	43
Şekil 4.2. Kromik asit ile UHMWPE fiberleri aşındırma mekanizması	44
Şekil 4.3. Polietilen filme korona işlemi uygulaması	45

Şekil 4.4. Silan bağlayıcı ajanlarının substrat üzerindeki kaplama mekanizmasının şematik açıklaması	46
Şekil 4.5. Kırpılmış UHMWPE fiberler	47
Şekil 4.6. Çekme test çubuğu ve eğme test çubuğu kalıpları	47
Şekil 4.7. Kromik asit ile yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliestер kompozit test çubukları	49
Şekil 4.8. Korona yöntemiyle yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliestер kompozit test çubukları	50
Şekil 4.9. HMDA kaplama ile yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliestер kompozit test çubukları	50
Şekil 4.10. Silan kaplama ile yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliestер kompozit test çubukları	51
Şekil 4.11. Z050 Allround (Zwick) model çekme test cihazı	52
Şekil 4.12. Zwick Roell analog Shore-D sertlik cihazı	52
Şekil 4.13. A&D Instruments Ltd, GR-200 yoğunluk test cihazı	53
Şekil 5.1. Fiber içermeyen ve yüzeyi modifiye edilmemiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiğı	56
Şekil 5.2. Fiber içermeyen ve yüzeyi modifiye edilmemiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiğı	57
Şekil 5.3. Fiber içermeyen ve kromik asit ile modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiğı	58
Şekil 5.4. Fiber içermeyen ve kromik asit ile modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiğı	60
Şekil 5.5. Fiber içermeyen ve kromik asit ile modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiğı	60
Şekil 5.6. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiğı	62
Şekil 5.7. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiğı	63
Şekil 5.8. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiğı	64
Şekil 5.9. Fiber içermeyen ve HMDA kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestер reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiğı	65

Şekil 5.10. Fiber içermeyen ve HMDA kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği.....	66
Şekil 5.11. Fiber içermeyen ve HMDA kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma uzaması grafiği	67
Şekil 5.12. Fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği	69
Şekil 5.13. Fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği.....	70
Şekil 5.14. Fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma uzaması grafiği	71
Şekil 5.15. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %5 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği	71
Şekil 5.16. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %5 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği	72
Şekil 5.17. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %5 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma uzaması grafiği.....	72
Şekil 5.18. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %15 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği	73
Şekil 5.19. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %15 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği	73
Şekil 5.20. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %15 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma uzaması grafiği.....	74
Şekil 5.21. Saf UHMWPE fiber ve kromik asit ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliestere ait FTIR spektrumları	77
Şekil 5.22. Saf UHMWPE fiber ve korona yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliestere ait FTIR spektrumları	78
Şekil 5.23. Saf UHMWPE fiber ve hekzametildiamin kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliestere ait FTIR spektrumları	79
Şekil 5.24. Saf UHMWPE fiber ve silan kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliestere ait FTIR spektrumları	80



YÜZEY İŞLEMLERİNİN ULTRA YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLİ POLİETİLEN FİBER/DOYMAMIŞ POLİESTER REÇİNE KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNİN ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZET

Polimer kompozitler, hafiflik, dayanıklılık ve esneklik gibi avantajları sayesinde pek çok endüstride vazgeçilmez bir malzeme türü haline gelmiştir. Bu malzemeler, metal, ahşap ve seramik gibi geleneksel materyallerin yerine geçmekle kalmayıp, bu materyallere kıyasla daha düşük maliyet ve çevre dostu özellikler sunar. Polimerlerin içine takviye edici malzemelerin eklenmesiyle elde edilen kompozitler, mekanik dayanım, kimyasal direnç ve termal kararlılık gibi özellikleri iyileştirerek daha geniş bir kullanım alanına hitap eder. Lif veya parçacık formundaki takviye malzemeleri, kompozitlerin performansını artırmak için sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle yüksek performanslı polimer kompozitler, havacılık, otomotiv, sağlık ve yapı malzemeleri gibi zorlu uygulamalarda önemli bir pazar payına sahiptir. Bu bağlamda, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberlerin, doymamış poliestere reçine ile takviyeli kompozitlerde kullanımı, malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini daha da iyileştirmek adına önemli bir potansiyele sahiptir. Tez çalışmasında, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberler, doymamış poliestere reçine ile takviye edilerek kompozit malzemeler hazırlanmıştır. UHMWPE fiberlerin zayıf arayüzey yapışma özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri uygulanmıştır. ‘İslak’ kimyasal ve ‘kuru’ teknikler kullanılarak modifiye edilen UHMWPE fiberler, poliestere matris ile homojen şekilde birleştirilmiş ve elde edilen kompozitlerin mekanik performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Uygulanan yüzey modifikasyon işlemleri, fiber-matris arayüz bağlanmasını iyileştirerek kopma mukavemeti, elastik modül, darbe dayanımı ve eğilme mukavemeti gibi özellikleri geliştirmiştir. Örneğin, %15 oranında yüzeyi modifiye edilmemiş fiber içeren kompozitlerde kopma mukavemeti %38 oranında azalmıştır. Buna karşılık, kromik asit ile 4 saat yüzey modifikasyonu yapılan %15 fiber içeriğine sahip kompozitlerde kopma mukavemetinde %29 artış sağlanmıştır. Korona işlemi uygulanan %15 fiber içeriğine sahip kompozitlerde ise kopma mukavemeti %7,7 oranında artmıştır. Ancak işlem sayısının artması kopma mukavemetini olumsuz etkilemiştir. Silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş %5 fiber içeriğine sahip kompozitlerde elastik modül %53 oranında artırılmıştır. Korona işlemi ile modifiye edilen fiberlerin ağırlıkça %15 ilavesiyle üretilen poliestere kompozitlerde, elastik modülde %90 artış gözlenmiş ancak kopma uzamasında %21 düşüş meydana gelmiştir. Bu, yüzey modifikasyonunun esnekliği azaltan bir etki yarattığını göstermektedir. Yüksek fiber oranlarında homojen dağılım sağlanamaması, fiberlerin kümelenmesi nedeniyle kopma mukavemeti ve esneklik üzerinde olumsuz etkiler yaratmıştır. Bu çalışma, yüzey modifikasyon tekniklerinin UHMWPE fiberlerin yüzey özelliklerini geliştirmede ve kompozitlerin mekanik dayanımını artırmada önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Modifikasyon süreleri, fiber oranları ve yüzey işlemleri optimize edilerek yüksek elastik modül, eğilme direnci ve kopma mukavemeti sunan kompozitler üretilebileceği belirlenmiştir. Düşük maliyetli ve uygulanabilir yöntemlerle geliştirilmiş bu kompozitler, sanayide daha az gevrek, yüksek dayanımlı ve katma değeri yüksek malzemelerin üretimine katkı sağlamaktadır. Çalışma, literatüre, yüksek performanslı polimer kompozitlerin geliştirilmesi için rehber olabilecek bulgular sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: UHMWPE fiber, Yüzey modifikasyonu, Doymamış poliestere reçine, kompozitleri, Polimer kompozit, Arayüzey bağlanma.



THE EFFECT OF SURFACE TREATMENTS ON THE PROPERTIES OF ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE FIBER/UNSATURATED POLYESTER RESIN COMPOSITES

ABSTRACT

Polymer composites have become an indispensable material in many industries due to their advantages such as lightness, durability, and flexibility. These materials not only replace traditional materials such as metal, wood, and ceramics but also offer lower costs and environmentally friendly properties. The addition of reinforcing materials into polymers enhances mechanical strength, chemical resistance, and thermal stability, expanding their application areas. Fiber- or particle-based reinforcement materials are widely preferred to improve composite performance. Particularly, high-performance polymer composites hold a significant market share in demanding applications such as aerospace, automotive, healthcare, and construction. In this context, the use of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers in unsaturated polyester resin-reinforced composites presents a significant potential for improving mechanical and chemical properties. In this study, UHMWPE fibers were reinforced with unsaturated polyester resin to fabricate composite materials. Various surface modification techniques were applied to improve the weak interfacial adhesion properties of UHMWPE fibers. Both "wet" chemical and "dry" techniques were used to modify the UHMWPE fibers, which were then homogeneously integrated into the polyester matrix. The mechanical performance of the obtained composites was examined in detail. Applied surface modification processes enhanced fiber-matrix interfacial bonding, improving properties such as tensile strength, elastic modulus, impact resistance, and flexural strength. For instance, composites containing 15% unmodified fibers exhibited a 38% reduction in tensile strength due to insufficient fiber-matrix interaction. In contrast, composites with 15% fiber content subjected to 4-hour chromic acid surface modification showed a 29% increase in tensile strength. Corona treatment applied to 15% fiber-reinforced composites resulted in a 7.7% increase in tensile strength, although excessive treatment negatively affected it. The silane coating method increased the elastic modulus by 53% in composites with 5% fiber content. Composites containing 15% corona-treated fibers showed a 90% increase in elastic modulus, but a 21% decrease in elongation at break, indicating that surface modification reduced flexibility. At high fiber contents, inadequate homogeneous distribution and fiber agglomeration negatively affected tensile strength and flexibility. This study demonstrates that surface modification techniques play a crucial role in enhancing the surface properties of UHMWPE fibers and improving the mechanical strength of composites. By optimizing modification durations, fiber contents, and surface treatments, it is possible to produce composites with high elastic modulus, flexural strength, and tensile resistance. These cost-effective and applicable methods contribute to the production of high-strength, less brittle, and high-value-added materials for industrial applications. The study provides valuable insights into the development of high-performance polymer composites in the literature.

Keywords: UHMWPE fiber, Surface modification, Unsaturated polyester resin, Composites, Polymer composite, Interfacial bonding.

1. GİRİŞ

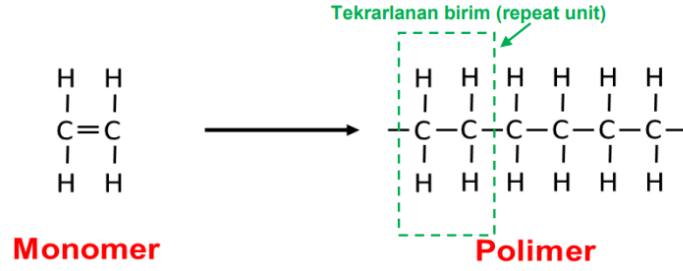
Polimerler sergiledikleri elastikiyet ve esneklik, kimyasal dayanıklılık, su ve nem direnci, termal, elektriksel ve optik özellikleri ve diğer malzemelere göre daha hafif, ucuz ve çevre dostu olmaları, kolay işlenebilmeleri sayesinde metal, ahşap, cam ve seramik gibi birçok geleneksel malzemenin yerini almış veya tamamlayıcı rol oynamıştır. Standart polimerlerin özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile bir polimer matris içine takviye edici malzemelerin eklenmesi ile polimer kompozitler oluşturulur. Takviye edici malzeme olarak genellikle lifler veya parçacıklar kullanılır. Liflerin katılması ile elde edilen polimer kompozitler fiber takviyeli polimer kompozitler olarak adlandırılır. Bu yüksek performanslı polimerik malzemeler birçok endüstride yüksek pazar payına sahiptir. Bu malzemeler sahip oldukları olağanüstü mekanik özellikler, kimyasal dayanım, termal stabilite ve diğer üstün özellikleri sayesinde tercih edilirler. Endüstrilerin daha karmaşık ve zorlu uygulamalara yönelmesi ile yüksek performanslı polimerik malzemelere olan talep arttığından pazar payı da sürekli olarak artmaktadır. Aynı zamanda yapılan Ar-Ge faaliyetleri sonucu geliştirilen yeni yüksek performanslı polimerik malzemelerin ticarileştirilmesi de pazar payının büyümesine katkı sağlamaktadır. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaf, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, iyi tokluk ve yüksek kimyasal ve aşınma direnci nedeniyle ideal bir takviye bileşeni olarak kabul edilir. Bununla birlikte, farklı polimerik matrislerle zayıf arayüzey yapışması, yüksek performanslı UHMWPE bazlı kompozitlerin geliştirilmesini engellemiştir. Bu çalışmada, UHMWPE elyafının 'ıslak' kimyasal ve 'kuru' teknikler olarak kategorize edilen çeşitli yüzey modifikasyonları gerçekleştirilecektir. Modifiye elyaflar çeşitli oranlarda doymamış poliester reçine içine katılarak farklı bileşimde kompozitler hazırlanacaktır. Uygulanan işlemlerle elyaf/matris yapışması ve kompozitlerin mekanik özellikleri arasındaki ilişki incelenecektir. UHMWPE fiberin yüzeydeki fiziksel ve kimyasal değişikliklerin arayüzeydeki yapışma güçlendirme mekanizmalarını nasıl desteklediğini anlamayı ve sunulan modifikasyon tekniklerini kullanarak gelecekteki gelişmelere rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Polimerler

Polimerler, tek bir birim anlamına gelen ve içerisinde reaktif gruplar içeren monomer olarak isimlendirilen basit moleküllerin kimyasal bağlarla bağlanması sonucu oluşan yüksek molekül ağırlıklı maddelerdir.



Şekil 2.1. Monomer ve polimer yapısı [1]

Polimerler sahip oldukları ve daha da geliştirilebilen özellikleri sayesinde diğer malzemelerden üstün hale gelmiş, birçok uygulama alanında kullanılmaya başlanmış uzun bir süre boyunca kullanılan metal, odun, cam ve seramik gibi malzemelerin yerini alarak tıp, otomotiv, elektronik, gıda, uzay ve havacılık gibi birçok sektörde kullanılan malzemeler olmuşlardır [1].

Polimerlerin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan özellikler:

- Düşük yoğunluk
- Yüksek korozyon direnci
- Yüksek çekme dayanımı
- Kimyasallara karşı yüksek direnç
- Hafiflik
- Esneklik ve darbe dayanımı
- Aşınmaya karşı direnç
- Düşük ısı iletkenlik
- Düşük elektriksel iletkenlik
- Yüksek yüzey kalitesi
- Düşük maliyet
- Kolay şekil verilebilirlik, işçilik, zaman kaybı ve yüksek maliyet gerektiren son işlemlere ihtiyaç duymadan karmaşık yapıları ürünlerin üretilebilmesi
- Şeffaf ve yarı saydam olarak üretilebilir olması camla rekabet etmesini sağlar.

- Düşük işleme sıcaklığına sahip olması. Bu işleme sıcaklıklarının metal, cam gibi diğer malzemelerin işleme sıcaklıklarından düşük olması plastiklerin işlenebilmesi için gerekli enerji miktarının da az olmasını sağlar.
- Seri üretime uygundur [1, 2].

2.1.1. Polimerlerin genel özellikleri

2.1.1.1. Fiziksel özellikler

- Polimerlerin yoğunluğu genellikle 0.8–2.2 g/cm³ arasında değişir. Bu düşük yoğunluk, hafiflik istenen uygulamalarda avantaj sağlar.
- Polimerlerin amorf ve kristal olmaz üzere iki faza sahiptir.
- Kristalin polimerler yapısında yüksek oranda kristalin olarak adlandırılan polimer zincirlerinin düzenli ve tekrarlayan bir yapı oluşturduğu bölgeler içeren polimerlerdir. Kristalin polimerler amorf polimerlere kıyasla genellikle:
 - Yüksek mekanik dayanım,
 - Kimyasal direnç,
 - Düşük şeffaflık,
 - Daha düşük esneklik gibi özellikler gösterir.
- Amorf polimerler polimer zincirlerinin düzensiz dizilmelerine sahip rastgele yapılar içerir. Amorf polimerler kristalin polimerlere kıyasla genellikle:
 - Yüksek şeffaflık,
 - İyi elastikiyet,
 - Kimyasal maddelere karşı daha düşük direnç,
 - Yumuşak ve esnek yapı gibi özellikler gösterir.
- Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı (T_g), amorf bölgelerin segmentel hareketlerin başladığı; T_m, kristalin yapıların eridiği sıcaklığı ifade eder.

2.1.1.2. Kimyasal özellikler

- Polimerler yapılarındaki polar ve apolar gruplar sayesinde asitlere, bazlara ve organik çözücülere karşı dirençlidir.
- Polimerlerin yapılarında bulunan çapraz bağlar genellikle mekanik, kimyasal ve ısıya karşı dayanıklılığı önemli ölçüde arttırırlar.

2.1.1.3. Mekanik özellikler

- Polimerlerin çekme dayanımı genellikle 10-200 MPa arasındadır.
- Termoplastiklerde 0.01-3 GPa, termosetlerde 2-10 GPa arasında değişir.

2.1.1.4. Elektriksel özellikler

- Polimerler genellikle düşük elektrik iletkenliğe sahiptir. Polianilin, polipirol gibi iletken polimerler istisnadır.
- Polimerlerin dielektrik sabiti değeri genellikle 1,9-2'den büyüktür. Bu değer polimerlerin yalıtkan malzeme olmasını sağlar [3,4].

2.1.1.5. Termal özellikler

- Isıl genleşme katsayısı (α) bir malzemenin sıcaklık değişimine karşı boyutsal değişim hızını tanımlar. Malzemenin uzunluğunun, hacminin veya şeklinin, sıcaklık arttıkça veya azaldıkça ne kadar değiştiğini ölçen bir parametredir. Polimerlerin ısı genleşme katsayısı, genellikle metallerden yüksektir. Bu durum polimerlerin moleküler yapılarının metallere göre düzensiz olmasından kaynaklanır. Yüksek ısı genleşme katsayısı sıcaklık değişimlerine karşı daha büyük boyutsal değişimler anlamına gelir [5,6].
- Termal iletkenlikleri düşüktür.

Tablo 2.1. Polimerler ve diğer malzemelerin karşılaştırılması

Özellik	Polimerler	Metaller	Seramikler	Camlar	Kompozitler
Çekme Dayanımı	Orta (10-200 MPa)	Yüksek (100-2500 MPa)	Düşük (10-200 MPa)	Düşük (30-100 MPa)	Yüksek (500-1500 MPa)
Elastik Modül	Düşük-orta (100-5000 MPa)	Yüksek (50-200 GPa)	Çok yüksek (100-400 GPa)	Yüksek (50-100 GPa)	Yüksek (30-100 GPa)
Çekme Uzaması	Yüksek (100-1000 %)	Düşük (1-30 %)	Çok düşük (0.1-2 %)	Düşük (0.1-1 %)	Orta (2-5 %)
Sertlik	Düşük-orta (Shore A-D, 20-90)	Yüksek (Brinell, Vickers 100-1000)	Çok yüksek (Mohs 6-9)	Yüksek (Mohs 5-7)	Yüksek (Shore D 80-90)
Kırılganlık	Düşük (plastik deformasyon gösterir)	Orta-düşük (plastik deformasyon ve akma özellikleri gösterir)	Yüksek (kırılgan)	Yüksek (kırılgan)	Orta (takviyeli fiberler kırılmayı azaltabilir, ancak polimerin özelliklerine bağlı olarak değişir)
Darbe Dayanımı	Yüksek	Orta-yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Sıcaklık Dayanımı	Düşük-orta (Termoplastikler: 100-250°C, termosetler:200-400°C)	Yüksek	Çok yüksek (Seramikler: 1000-2000°C)	Yüksek	Yüksek
Isı İletkenliği	Düşük (0.1-1.5 W/m·K)	Yüksek (50-400 W/m·K)	Orta (10-50 W/m·K)	Düşük (1-2 W/m·K)	Orta (5-40 W/m·K)
Elektriksel İletkenlik	Düşük (yalıtkanlar, dielektrik malzemeler)	Yüksek (çelik, bakır, alüminyum)	Çok düşük (seramikler elektriksel iletken değildir)	Düşük	Orta
Kimyasal Dayanım	Orta-iyi (kimyasal solventlere karşı dayanıklı, ancak UV ışınları ve yüksek sıcaklıklara karşı zayıf)	Düşük (çoğu metalin kimyasal dayanımı düşük seviyelerde kalır, çünkü metaller genellikle oksijenle tepkimeye girerek oksitlenirler ve bazı asidik veya alkali ortamlarla etkileşime girerek korozyona uğrayabilirler. Ancak, paslanmaz çelik, titanyum, nikel gibi metallerin dayanımı çok daha yüksektir.)	Yüksek	Yüksek	Yüksek

2.1.2. Polimerlerin sınıflandırılması

Polimerler, işleme şekilleri ve/veya çözücülere karşı gösterdikleri davranışlara göre sınıflandırıldığında termoplastikler ve termosetler olarak ikiye ayrılırlar [11]:

Termoplastikler özelliklerin önemli değişiklikler olmadan ısı ve basınç altında defalarca ergitilip yeniden şekillendirilebilen ve geri dönüştürülebilen malzemelerdir. Zincirler moleküller arası çekim kuvvetleri ile birleşir.

Termosetler bir kere şekillendirildikten sonra ısıtılarak yeniden şekillendirilemez ve geri dönüştürülemezler. Zincirler birbirlerine kimyasal bağlarla bağlıdır.

Tablo 2.2. Termoplastikler ve termosetlerin karşılaştırılması

Özellik	Termoplastikler	Termosetler
Yapısal Özellik	Lineer veya az dallanmış yapılara sahiptirler. Moleküller arasında zayıf bağlar bulunur.	Moleküller arasındaki bağlar güçlüdür ve 3D ağ yapısı oluşturur.
Isı ile Davranış	Isıtıldığında yumuşar, tekrar şekillendirilebilirler.	Isıtıldığında sertleşir, bir kez şekillendirildikten sonra tekrar ısıtıldığında bozulurlar.
Şekillendirilebilirlik	Isıtıldığında kolayca şekil alabilir.	Sadece ilk şekillendirme işleminde şekil alabilir.
Mukavemet ve Dayanım	Düşük veya orta seviyede dayanım. Genellikle daha esneklerdir.	Yüksek mukavemet ve dayanım. Genellikle daha sert ve kırılgandır.
Kimyasal Dayanım	Kimyasallara karşı hassastır. Bazı termoplastikler belirli kimyasallara dayanıklıdır.	Genellikle kimyasallara karşı yüksek dayanım gösterirler.
Sıcaklık Dayanımı	Sıcaklığa karşı daha duyarlıdır. Yüksek sıcaklıkta şekil kaybı yaşayabilirler.	Yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır ve boyutsal kararlılıkları daha yüksektir.
İşlenebilirlik	Enjeksiyon, ekstrüzyon ve termoform gibi birçok şekillendirme yöntemi ile kolayca işlenebilirler.	İşlenmesi daha zordur, genellikle döküm veya kalıplama işlemleri ile şekillendirilirler.
Geri Dönüşüm	Geri dönüştürülebilirler.	Geri dönüştürülemezler.
Örnekler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polistiren (PS), Polivinil Klorür (PVC), Polikarbonat (PC).	Poliester reçine, Epoksi reçineler, Fenolik reçineler, Bakalit, Melamin, Üretan.

Polimerlerin uygulama alanlarının genişleyerek artması ile yeni uygulama alanları için özel polimerlerin geliştirilmesi veya mevcut özelliklerin çeşitli katkı ve dolgular kullanılarak istenilen seviyelere getirilmesi çalışmaları her geçen gün artarak kritik bir öneme sahip

olmaktadır. Polimer matrisli kompozitler, plastik sektöründe kullanılan polimer karışımları ve dolgulu polimerlere alternatif olarak yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

2.2. Kompozitler

Kompozit malzemeler, fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı iki veya daha çok malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilirler. Kompozit malzemeler takviyelendirici faz ve matrisin en iyi özelliklerini sergilerken olumsuz özelliklerini diğer bileşenle telafi eder. Bu sayede kompoziti oluşturan malzemelerin ayrı ayrı oluşturmaları mümkün olmayan bir yapı elde edilir [16].

Özetle kompozit malzemeler düşük yoğunluk, yüksek tokluk, yüksek mekanik dayanım ve iyi boyutsal kararlılık özellikleri sergiledikleri için; havacılık, uzay, tıp ve savunma gibi önemli uygulama alanlarında yüksek oranda kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemeler matrislerine göre 3 sınıfa ayrılır:

- 1- Metal Matrisli Kompozit Malzemeler
- 2- Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler
- 3- Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Yukarıda belirtilen sınıflar içerisinde polimer matrisli kompozitlerin kullanımı her geçen gün artmaktadır [31, 32, 33, 34].

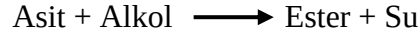
2.2.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler otomotiv, havacılık, savunma, gıda ve medikal gibi uygulamalarda yüksek oranda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin uygulama alanlarına göre sahip olması beklenen özelliklerin istenilen seviyelere getirilmesi için polimer matrisi içine çeşitli takviye ve dolgular katılır. Polimer matrisli kompozitlerde takviyelendirici faz olarak genellikle cam, karbon, aramid ve yüksek performanslı elyaflar kullanılmaktadır [17, 18].

Matris malzemesi olarak genellikle epoksi, poliester ve vinilester reçineleri tercih edilir. Kompozit malzemelerin kullanıldığı alana göre istenilen değerleri sağlaması için matris ve takviye faz arayüzey etkileşimlerinin artırılması gerekebilir. Bu durumda takviye faz olarak seçilen malzemelerin modifiye edilmesi gerekir [19, 20].

2.2.1.1. Poliester reçine

Poliester reçineler, dibazik organik asitler ve polihidrik alkollerin reaksiyonu sonucu elde edilen sentetik reçinelerdir [21].



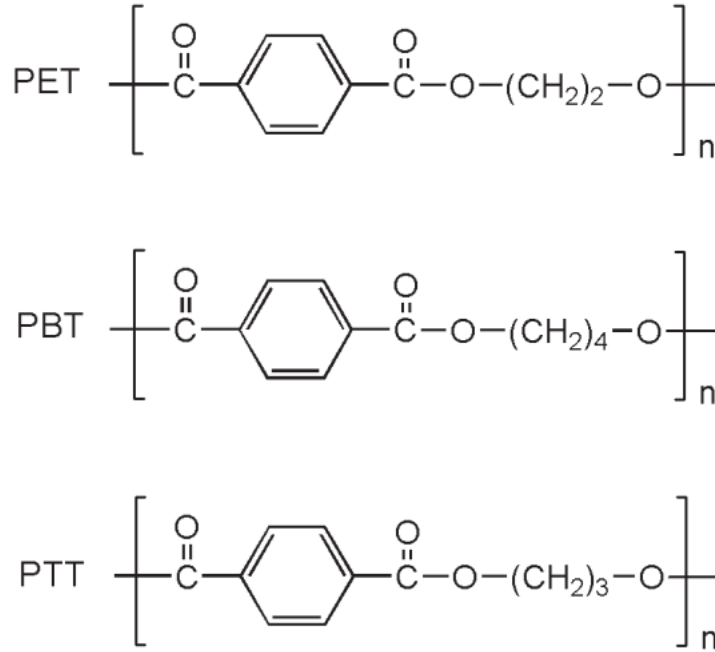
Poliester reçinenin geçmişten günümüze uzanan gelişim süreci malzeme bilimi alanına önemli katkılar sağlamıştır. Poliester reçinesinin tarihi 1920'li yıllara dayanmaktadır ve ilk keşif kimyager John C. Stevens tarafından yapılmıştır. Stevens, esterleşme reaksiyonları üzerine yaptığı bir çalışma esnasında glikol ve tereftalik asit gibi maddelerin reaksiyonu sonucu polimerleşen bir malzeme keşfetmiştir. 1930'lu yılların sonlarında Amerikalı kimyager Wallace H. Carothers ve ekibi tarafından sertleşebilen poliester reçineleri geliştirilmiştir. Bu gelişme sonrası poliester reçineler ilk defa ticari uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. 1940'lı yıllara gelindiğinde poliester reçine üretiminde seri üretime geçilmiş ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı artmıştır. Bu yıllarda poliester reçine içerisine cam elyaf katılmasıyla elde edilen polimer kompozitleri hafiflik, yüksek mukavemet ve kimyasal direnç gibi özellikleri sayesinde uygulama alanları genişleyerek artmaya devam etmiştir [23,24]. Özellikle otomotiv ve denizcilik sektörlerinde araç gövdeleri, tekneler ve çeşitli parçalarda kullanılmıştır. 1960-1970'li yıllarda poliester reçineler içerisine katılan dolgu ve katkıları ile UV dayanımı, mekanik dayanım, kimyasal direnç gibi özellikleri geliştirilmiştir. Yine bu yıllarda çevre bilincindeki artış ile birlikte poliester reçinenin içerdiği kimyasallar ve geri dönüşüm zorluğu hakkında endişeler doğurmuştur. Oluşan endişeler sonrası poliester reçinelerin biyo bazlı ve sürdürülebilir üretim yöntemleri geliştirilerek çevre dostu hale getirilmesi çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. 1990'lı yıllardan sonra çevre dostu üretim yöntemleri geliştirilmiştir. İlk yıllarda sınırlı bir uygulama alanına sahip olan poliester reçine, her geçen gün gelişerek birçok uygulama alanında kendine yer edinmiştir [22].

Poliester reçineler, kimyasal yapılarına göre doymuş ve doymamış olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılır.

2.2.1.2. Doymuş poliesterler

Ester bağlarının sadece C-C bağları içerdiği ve polimer zincirinde C=C çift bağı bulunmayan poliesterler doymuş poliesterler olarak adlandırılır. Yapıda çift bağ olmaması polimerin kimyasal olarak daha stabil ve daha az reaktif olmasını sağlar. Doymuş poliesterler alifatik veya

aromatik dikarboksilik asitlerin ve alifatik diollerin kondenzasyon polimerizasyonu ile üretilir. Doymuş poliestерler genellikle serttir ve şeffaf görünümüne sahiptirler [25].

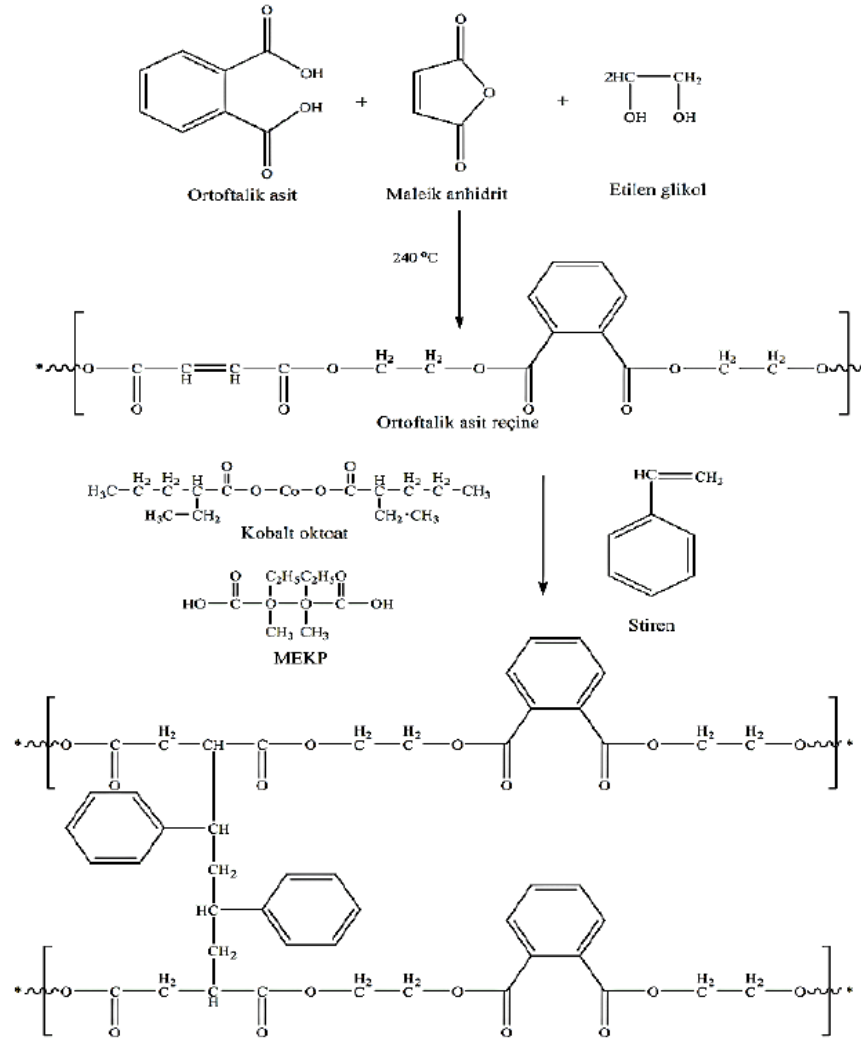


Şekil 2.2. Doymuş poliestер örnekleri [37]

Doymuş poliestер reçineleri sergiledikleri kimyasal ve mekanik dayanım sayesinde tekstil, otomotiv, inşaat, elektronik ve sanat gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır [25, 37].

2.2.1.3. Doymamış poliestер

Doymamış poliestер reçineleri, doymamış asitlerin veya anhidritlerin ve diasitli - diasitsiz diollerin yoğunlaşma ürünleridir. Polimer zincirlerinde $\text{C}=\text{C}$ çift bağı bulunduran poliestерlerdir. Poliestер yapısında bulunan $\text{C}=\text{C}$ çift bağı kimyasal reaksiyona girerek çapraz bağlanabilir ve çapraz bağlı yapılar oluşturabilir. Bu reçineler çeşitli dolgu maddeleri ve takviyeler ile birleştirilerek çeşitli kimyasal ve mekanik özelliklere sahip termoset ürünler elde edilir. Son ürünün özellikleri reçinenin üretiminde kullanılan diasitlerin, diollerin, çapraz bağlayıcı maddelerin, başlatıcıların ve kullanılan katkı maddelerin yapısına göre değişiklik gösterir. Doymamış poliestер reçineler kimyasal olarak daha reaktif ve esnektir [27, 30].



Şekil 2.3. Doymamış poliester reçine yapısı [36]

Doymamış poliester reçineleri sahip oldukları düşük maliyet, yüksek mekanik özellikler, yüksek korozyon direnci ve hafiflik avantajları sayesinde kompozitler, otomotiv, yapı ve inşaat, yüzey kaplamaları, boya, banyo mobilyaları, yapıştırıcı ve dolgu malzemelerinde kullanılmaktadırlar [38].

Kompozit malzemelerin üretiminde en çok tercih edilen matrislerden biri doymamış poliester reçinelerdir. Öncelikle düşük maliyeti seri üretimler ve ticari uygulamalar için bu matrisi tercih edilebilir kılar. Düşük sıcaklıklarda ve kısa sürede kürlenmesi, işleme kolaylığı üretim prosesinin hızlı ve verimli olmasını sağlar. Doymamış poliester reçineler, el ile uygulama (hand lay-up), vakumla infüzyon, sprey yöntemi, kalıp dökümü, reçine transfer kalıplama (RTM), sıkıştırma kalıplama, filament sarma (filament winding) ve pultrüzyon gibi çeşitli yöntemlerle istenilen tasarımda şekillendirilebilirler [39].

Sahip oldukları mekanik ve kimyasal dayanım sayesinde kompozit malzemelerin taşıma kapasitesini ve gerilme dayanımını arttırarak iyi mekanik özellikler sergilemesini sağlarken çevresel koşullara karşı yüksek direnç gösterirler [26, 27].

Düşük yoğunluğa sahip olduğu için hafif kompozitler elde edilir ve ağırlığı önemli olduğu uygulamalar için alternatif çözüm sunan malzemelerin üretilmesine imkan tanır.

Yapısında yer alan karbon-karbon çift bağı sayesinde çapraz bağlanarak sertleşebilir ve kompozitin yüksek mekanik dayanıma sahip olmasını sağlar.

Doymamış poliestere reçineleri şeffaf ve renkli kaplamalar üretilbildiği için dekoratif uygulamalarda kullanılabilirler.

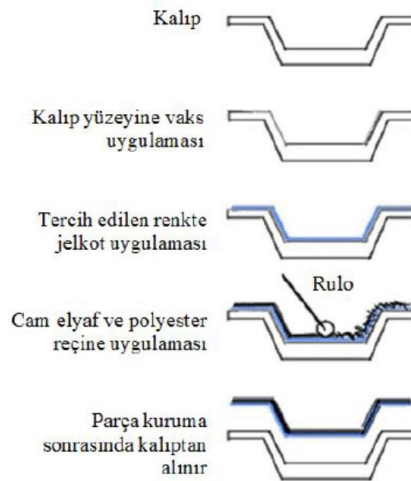
Günümüzün en önemli konularından biri olan geri dönüşüm ve çevre dostu ürünler üzerine yapılan çalışmalar sonucunda bu reçinelerin sürdürülebilirlik uygulamalarında yüksek bir potansiyeli olduğu görülmüştür [28, 29, 30].

Bu nedenlerle doymamış poliestere reçineleri, kompozit malzemelerde matris olarak kullanılmak için ideal bir seçimdir.

2.2.1.4. Poliestere reçine uygulama şekilleri

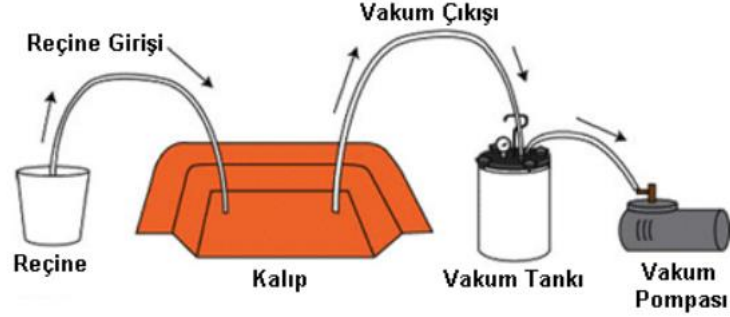
Poliestere reçinelerin şekillendirilmesinde en çok kullanılan uygulamalar aşağıda yer almaktadır:

1. El ile Uygulama (Hand Lay-Up): En yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan el ile yatırma yönteminde doymamış poliestere reçinesi ve takviye malzemeleri örneğin; cam elyaf kalıba el ile yerleştirilir. Her katman üzerine elle reçine uygulanır ve katmanlar arasına takviye malzemesi eklenir. Bu yöntem, küçük ve orta ölçekli üretimlerde tercih edilir [40].



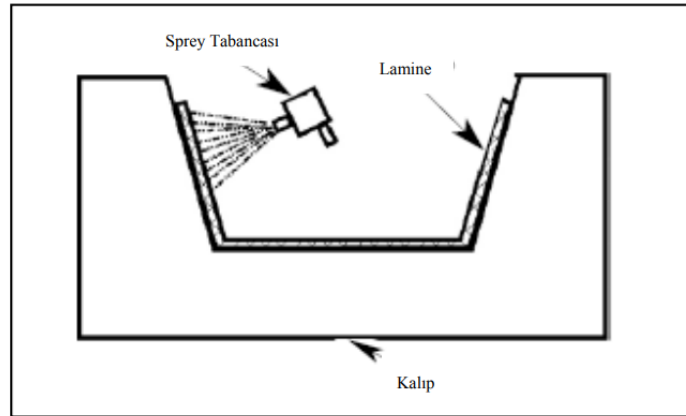
Şekil 2.4. El ile yatırma yöntemi proses aşamaları [41]

Vakumla İnfüzyon (Vacuum Infusion): Vakum yardımıyla reçinen takviye malzemelere emdirilmesi yöntemidir. Bu yöntem homojen ve düşük hava içeriğine sahip kompozitlerin üretiminde kullanılır ve büyük parçaların üretimi için tercih edilir [42].



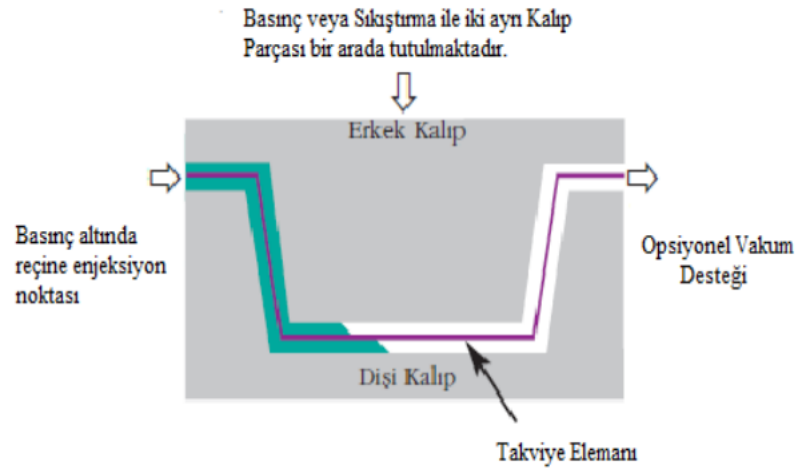
Şekil 2.5. Vakum infüzyon yönteminde kullanılan elemanlar [42]

Sprey Yöntemi (Spray-Up): Bu yöntemde reçine ve takviye malzemeler sprey tabancası ile doğrudan kalıba püskürtülür. Büyük ve kalın parçaların üretimi için hızlı bir çözüm sunar. Bu yöntemle küvetler, yüzme havuzları, tekne gövdeleri, depolama tankları, ürünler üretilmektedir [43, 44].



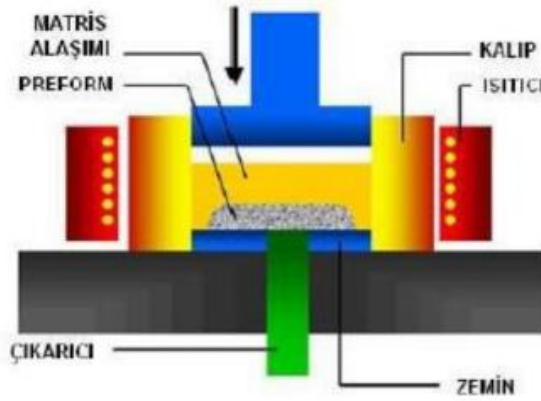
Şekil 2.6. Sprey yöntemi [43]

2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM): Bu yöntemde, düşük viskoziteye sahip bir reçine dişi ve erkek olmak üzere iki parçalı bir kalıba yerleştirilmiş preform haldeki takviyelere yüksek basınçla enjekte edildiği yöntemdir. Enjeksiyon aşamasının ardından polimerizasyon başlar. İşlem tamamlandıktan sonra kalıp açılarak parça çıkarılır. RTM, genellikle karmaşık yapıli kompozitlerin üretiminde tercih edilir. RTM ile üretilen nihai ürünler yüksek mekanik performans, yüksek yüzey kalitesi ve iyi boyutsal kararlılık özelliklerine sahip olurlar [45, 46].



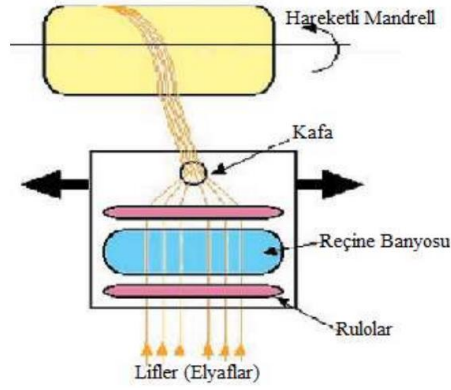
Şekil 2.7. Reçine transfer kalıplama yöntemi [47]

3. Sıkıştırma Kalıplama (Compression Molding): Bir kalıp için reçinenin sıcaklık ve basınç altında sıkıştırıldığı yöntemdir. Özellikle otomotiv ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılan büyük ve kalın parçalar için tercih edilir.



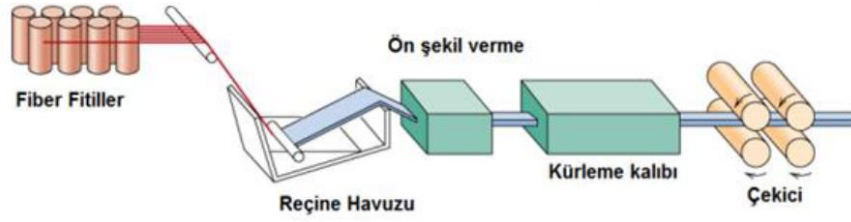
Şekil 2.8. Sıkıştırma kalıplama yöntemi [48]

4. Elyaf Sarma (Elyaf Winding): Elyaf sarma yöntemi yüksek yüzey kalitesi beklene ürünlerin üretimi için çok önemlidir. Bu yöntem, elyafların reçine havuzundan geçirilerek ıslatılması sonrası silindirik kalıp üzerine sarılır. Elyaf/polimer matris yapısının maksimum verimlilikte kullanımını sağlayan üretim yöntemidir. Prosesin otomasyona uyarlanabilmesi ve düşük işçilik, yüksek mekanik dayanım sergileyen kompozit üretimi gibi avantajları sayesinde borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tankları gibi ürünlerin yüksek üretim kapasitesiyle üretilmesini sağladığı için tercih edilen bir yöntemdir [48, 49].



Şekil 2.9. Elyaf sarma yöntemi [48]

5. Pultrüzyon (Pultrusion): Pultrüzyon, sürekli takviye malzemelerin reçine havuzunda ıslatılır ve ıslatılmış takviye malzemelerinin ısıtılmış kalıptan geçirilerek belirli sıcaklık ve basınç altında kürleşmesi ve şekillendirilmesi işlemidir. Bu yöntem, borular, levhalar ve çubuklar gibi doğrusal ürünler üretmek için tercih edilir.



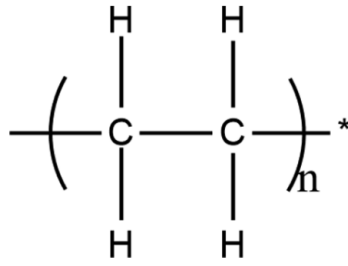
Şekil 2.10. Pultrüzyon yöntemi [50]

Kompozit üretim yöntemleri poliestere reçinelerinin çeşitli geometrilerde ve birçok uygulama alanlarına uygun şekillendirilmesini sağlar. Nihai ürünün kullanım alanına ve üründen beklenen performansa göre yukarıda bahsedilen kompozit üretim yöntemlerinden uygun olan yöntem seçilir.

2.3. UHMWPE

Çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), etilen monomerinin uzun polimer zincirleri halinde düzenlemesi sayesinde olağanüstü fiziksel ve mekanik özellikler sergileyen benzersiz bir termoplastiktir. Yapıdaki uzun zincirler ve zincirler arası bağlar/etkileşimler mekanik dayanımı artırır. Molekül ağırlığı genellikle 2-6 milyon g/mol aralığındadır. Yüksek moleküler ağırlığı malzemeye yüksek darbe dayanımı, yük taşıma kapasitesi, aşınma direnci ve kimyasal kararlılık gibi özellikler katar. Aynı zamanda yarı kristalin yapıya sahip olması da bu özelliklerine katkı sağlar [51].

UHMWPE'nin kimyasal yapısı şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. UHMWPE yapısı [52]

UHMWPE' nin erime sıcaklığı 130-136°C'dır. Viskozitesinin yüksek olması sebebiyle; sıkıştırarak kalıplama veya ram ekstrüzyon gibi teknikler ile şekillendirilebilirler. Düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu için montaj parçalarında kullanıldığında aşınmaz. Bu özelliği sayesinde makine ve implantlarda kullanılabilir. Diğer malzemelere kıyasla düşük yoğunluğa sahip hafif bir polimerdir. En önemli özelliklerinden biri biyouyumlu olmasıdır. UV ışınları ve hava koşullarına karşı yüksek direnç gösterir. Nem çekme oranı düşüktür. Korozyon ortamlarda uzun süre kullanılabilir. UHMWPE özel tekniklerle geri dönüştürülebilir [54,101].

2.3.1. UHMWPE tarihçesi

Günümüzde Celanese olarak bilinen Ruhrchemie AG ve Max Planck Enstitüsü'ndeki araştırmacılar düşük basınçlı polimerizasyon ile üretilen bir PE türü keşfetmişlerdir.

1950'li yılların ortasında UHMWPE'nin ticari üretimini başlatmış ve ürünü KK55 adıyla piyasaya sunmuştur.

1960'larda daha saf ve yüksek kaliteli UHMWPE, Ziegler-Natta katalizörlerinin kullanımı ile üretilmeye başlanmıştır. Elde edilen yüksek kalite UHMWPE piyasada kendine yer edinmiş ve uygulama alanları genişlemiştir.

1980'li yıllara gelindiğinde UHMWPE'nin tıbbi uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Yüksek aşınma direnci ve biyouyumluluk özellikleri sayesinde özellikle implantlarda, diz ve kalça protezlerinde kullanılan önemli bir malzeme haline gelmiştir.

1990'larda geliştirilen sıkıştırarak kalıplama ve ram ekstrüzyon gibi modern üretim teknikleri ile birlikte daha kaliteli UHMWPE üretimine olanak sağlanmıştır.

Kısaca UHMWPE, 1950’lerden günümüze gelişerek yaptığı yolculukta başta tıp olmak üzere birçok uygulama alanı için kritik öneme sahiptir [55, 56].

2.3.2. UHMWPE üreticileri

Dünya çapında UHMWPE üreticileri:

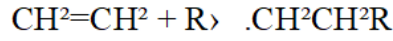
1. Celanese Corporation
2. DSM Engineering Plastics
3. LyondellBasell Industries
4. Mitsui Chemicals
5. Quadrant Engineering Plastic Products (Şu anda DSM)
6. Asahi Kasei Corporation
7. Techstar Inc.
8. Total Petrochemicals & Refining USA, Inc.
9. SABIC (Saudi Basic Industries Corporation)
10. Mitsubishi Chemical Corporation
11. Daewon [51, 57].

2.3.3. UHMWPE polimerizasyon yöntemi

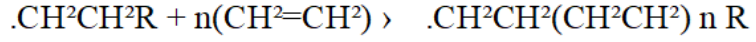
UHMWPE polimerizasyonu teknik ve ekonomik açıdan oldukça zordur. Polimerizasyon, genellikle etilen monomerlerinin uygun bir katalizör kullanılarak polimerleşmesi ile gerçekleşir. Reaksiyonu etkileyen en önemli faktörlerden biri katalizördür. Katalizörler polimerizasyon prosesinin verimliliğini ve üretilen UHMWPE’nin kalitesini etkiler. UHMWPE üretimi için genellikle Ziegler-Natta veya metallocene katalizörleri kullanılır. Ziegler-Natta katalizörleri düşük sıcaklık ve basınç altında polimerizasyon sağlarken Metallocene katalizörleri daha hassas polimerizasyon sağlayarak elde edilen polimerin daha homojen ve yüksek kalitede üretilmesine olanak tanır. Seçilen katalizörler polimerin yüksek molekül ağırlığına ulaşmasını sağlamalıdır [59].

Polimerizasyon, yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleşir. Etilen monomerinin reaktif olması için bir başlatıcı kullanılır. Başlatıcı etilen monomerinin reaksiyona girmesini sağlayan serbest radikal veya iyonik bir tür oluşturur. Bu sayede polimer zincirinin büyümesi için ilk adım gerçekleşmiş olur. Büyüme adımı etilen monomerleri aktif bir bölgelere bağlanarak uzun polimer zincirleri oluşturur. Polimer zincirinin uzunluğu ne kadar artarsa UHMWPE’nin molekül ağırlığı da o kadar artar.

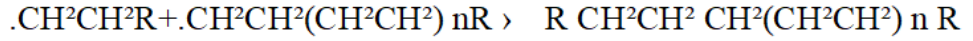
Zincir Başlatma



Zincir Uzaması



Sonlanma



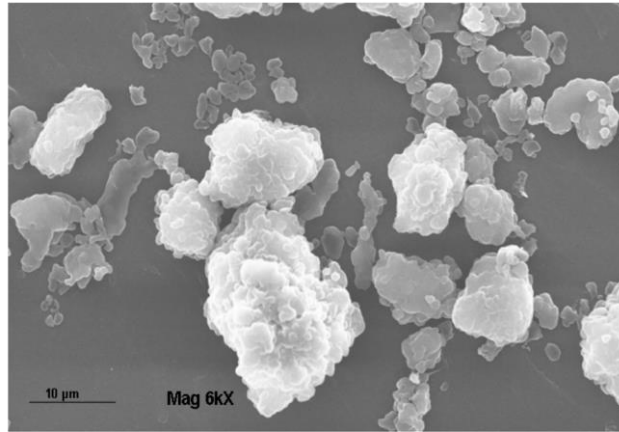
Şekil 2.12. UHMWPE'nin polimerizasyon reaksiyonları

Polimerizasyonun sonlanması başlatıcı moleküllerinin sonlandırıcı bir ajanla reaksiyona girmesi veya ortamdaki etilen monomerinin bitmesiyle gerçekleşir [51, 53, 58].

2.3.4. UHMWPE formları

Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri toz, granül, levha, film ve fiber formunda üretilebilir. Ayrıca yüzey kaplama uygulamalarında kullanılmak üzere sıvı formda da üretilirler.

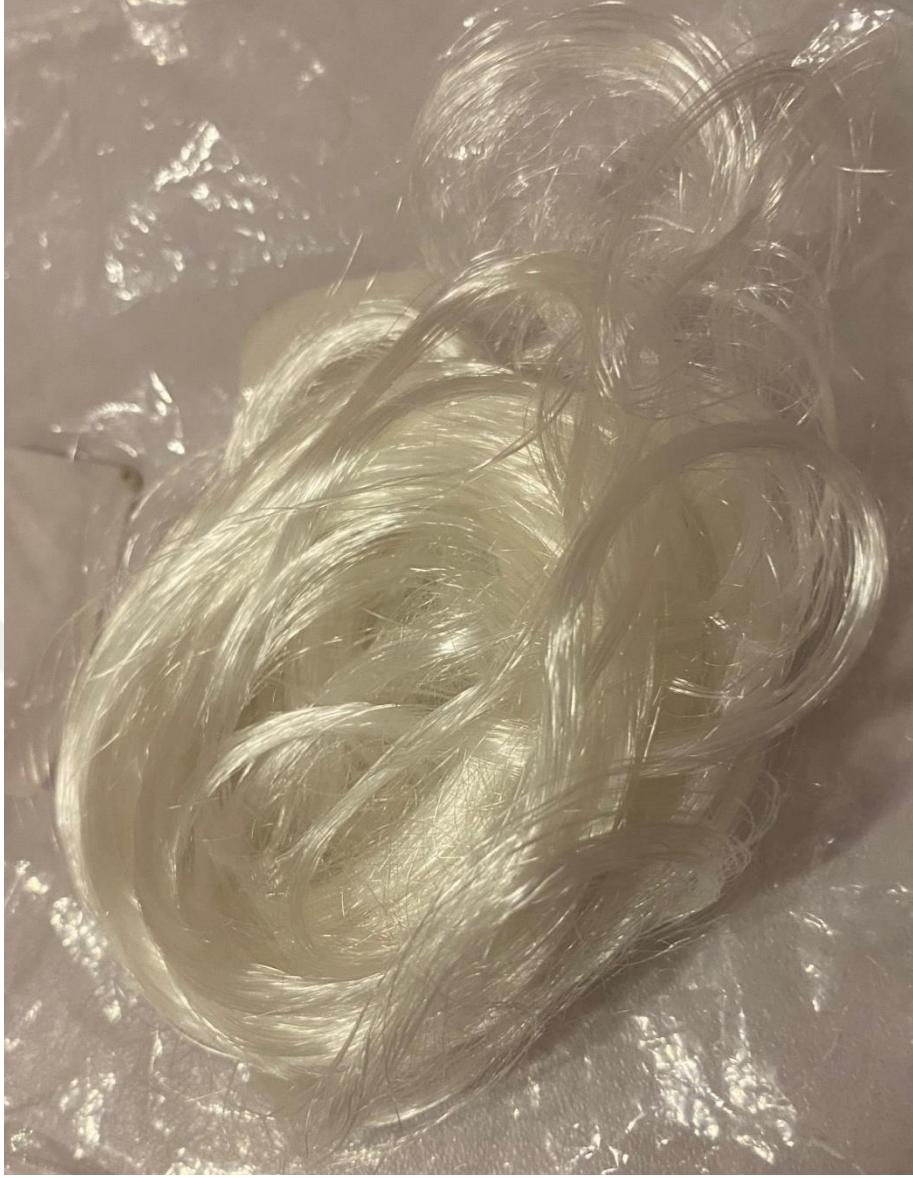
Toz formunda üretilen UHMWPE toz metalürjisi veya kompozit malzemelerde takviye fazı olarak kullanılır [62].



Şekil 2.13. UHMWPE toz formunun mikroskop altındaki görüntüsü [56]

Granül formdaki UHMWPE kolay şekil verilebilirlik özelliği sayesinde enjeksiyon, ekstrüzyon gibi birçok şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılır [52].

UHMWPE, levha veya film formunda da üretilebilir. Yüksek mekanik özellikler gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.



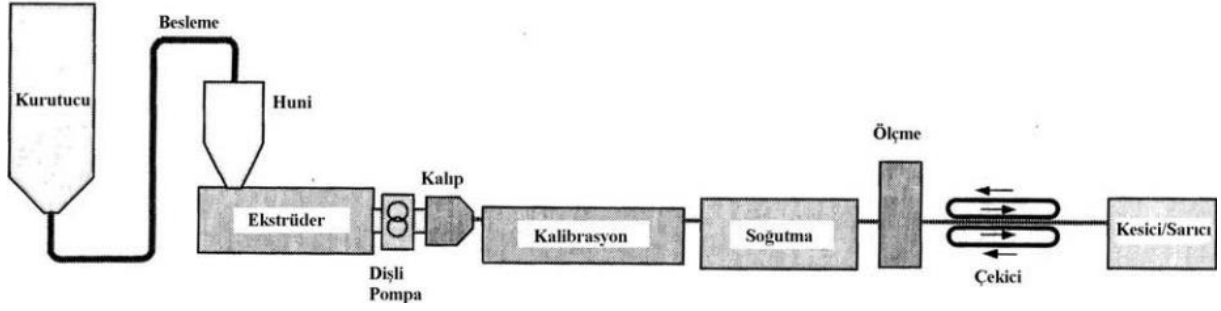
Şekil 2.14. UHMWPE fiber

UHMWPE fiberleri, polimer matrisli kompozitler için kritik öneme sahiptir. Sergiledikleri üstün özellikler sayesinde geniş uygulama alanına sahiptirler [60, 61].

2.3.5. UHMWPE şekillendirme yöntemleri

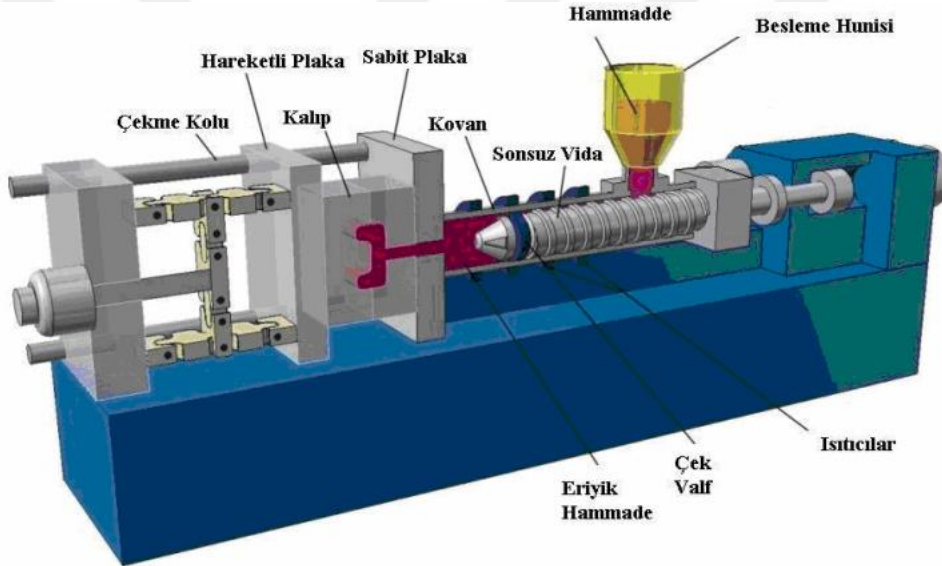
UHMWPE şekillendirilmesinde kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir.

Ekstrüzyon: Granüller ısı yardımı ile eritilir. Ergiyik plastik yüksek basınç altında bir kalıptan geçirilir. Bu yöntemle UHMWPE'den levhalar, borular ve film gibi ürünler üretilir.



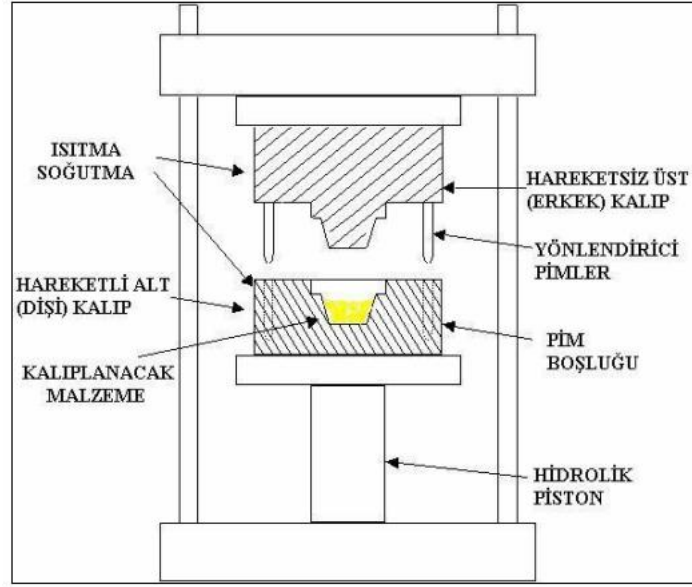
Şekil 2.15. Ekstrüzyon hattı [120]

Enjeksiyon Kalıplama: UHMWPE granülleri bir enjeksiyon makinesinde, yüksek sıcaklıkta kalıba enjekte edilir. Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile karmaşık şekiller ve çeşitli kalınlıkta parçalar üretilebilir. Seri üretim için oldukça verimli olan bu yöntem otomotivde kullanılan parçalar ve medikal implantlar gibi UHMWPE ürünlerinin üretiminde tercih edilir.



Şekil 2.16. Plastik enjeksiyon makinesi [120]

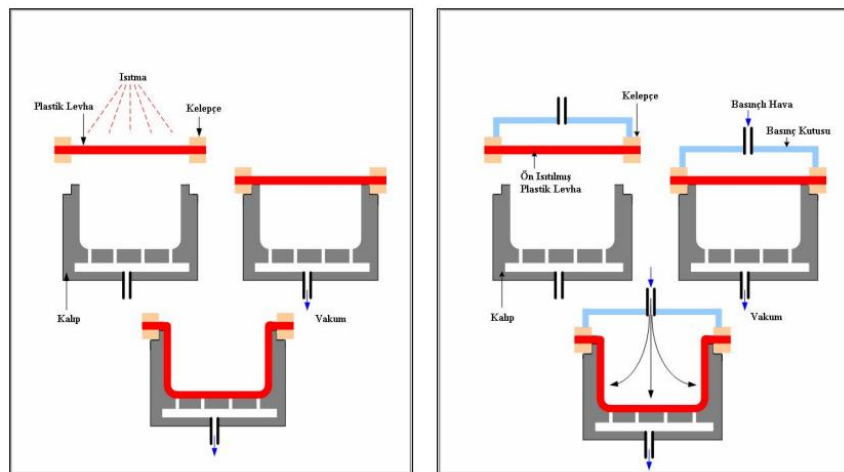
Sıkıştırarak Kalıplama: kalıplara yerleştirilen UHMWPE tozu veya granülleri yüksek sıcaklık ve basınç altında şekillendirilir. Büyük ve kalın parçaların üretiminde tercih edilen bir yöntemdir.



Şekil 2.17. Sıkıştırarak kalıplama yöntemi [120]

Süper Plastik Şekillendirme: Süper plastik şekillendirme işlemi, malzemenin erime noktasının altında, yüksek bir sıcaklıkta gerçekleşir. Polimerin veya malzemenin akışkan hale gelmeden oldukça şekil alabildiği sıcaklık belirlenir. UHMWPE bir kalıba yerleştirilir ve belirlenen sıcaklık altında uzun süre bekletilir. Süre sonunda malzeme yerleştirildiği kalıbın şeklini alır. İnce, çok karmaşık geometrilerin ve hassas parçaların üretiminde kullanılır.

Isı ile Şekillendirme (Termoforming): UHMWPE levhalar ısıtılır ve bir kalıba yerleştirilir. Vakum veya basınç altında levhanın kalıbın şeklini alması sağlanır. Büyük ve düz parçaların üretimi için kullanılan bir yöntemdir [63, 64].



Şekil 2.18. Isı ile şekillendirme yöntemi [120]

Talaşlı İşleme: Levha veya blok şeklinde UHMWPE, CNC ve torna gibi talaşlı imalat yöntemleri ile işlenerek şekillendirilebilir. Dişliler ve doğrusal hareketli parçaların üretiminde tercih edilen bir yöntemdir [65].

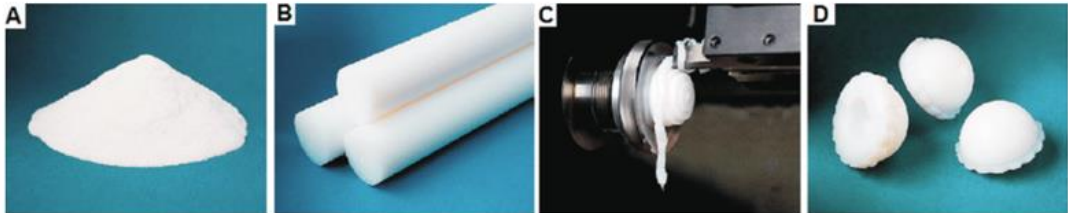
Gel İşleme: Bu yöntemde polimer zincirlerini gevşetmek için çözücüler kullanılır. Zincirlerin gevşemesi ile malzemenin işlenebilirliği artırılmış olur. Lif veya film üretiminde yaygın olarak tercih edilen yöntemdir [64, 65].

Süper kritik Akışkan İşleme: Süper kritik akışkan (SCF), kritik sıcaklık ve basınç noktasında bir maddenin sıvı ve gaz arasında bir duruma geçtiği özel bir formdur. SCF'ler, polimerin viskozitesini düşürerek şekillendirilmesini kolaylaştırırlar [66].

2.3.6. UHMWPE uygulamaları

UHMWPE, sahip olduğu yüksek molekül ağırlığının kazandırdığı mekanik özellikler sayesinde üstün performans sergileyen benzersiz bir polimerdir. Her geçen gün artan geniş bir uygulama alanına sahip UHMWPE'nin başlıca uygulamaları aşağıda yer almaktadır.

- UHMWPE, medikal uygulamalarda özellikle diz ve kalça protezlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Sahip olduğu olağanüstü aşınma direnci ve biyouyumluluğu sayesinde kemiğe hızlıca uyum sağlar ve eklemlerin yerine ikame malzemeler üretilmesine olanak tanır.



Şekil 2.19. UHMWPE implant üretim süreci: A) Reçine tozuyla başlama, B) Yarı mamul çubuklar, C) Torna tezgahında işleme, D) Asetabular bileşenler [72].

- Tıbbi dikiş iplikleri ve yara bantlarında da UHMWPE'ler kullanılmaktadır [67].
- Özellikle dişliler, makaralar, taşıma bantları gibi yüksek mekanik özellikler gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Uzun ömürlü olması ve çok fazla bakım gerektirmemesi gibi özellikleri UHMWPE'yi endüstriyel uygulamalar için ideal bir malzeme kılar.



Şekil 2.20. UHMWPE'den yapılan dişliler [121]

- Gıda sektöründe işleme makinelerinde, taşıma bantlarında ve kesme yüzeylerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sergilediği yüksek kimyasal direnç ve düşük sürtünme katsayısı bu uygulamalar tercih edilmesinin başlıca sebepleridir.
- Kurşun geçirmez yelekler, balistik kaslar, patlayıcı madde taşımada güvenlik sağlayan malzemelerde, zırhlı araçlarda ve askeri helikopterlerde kullanılır [68].



Şekil 2.21. UHMWPE'den yapılan kurşun geçirmez yelek [121]

- UHMWPE, otomotiv sektöründe süspansiyon ve fren sistemleri, kılavuz yayları, kapı menteşeleri, yakıt ve hava filtreleme sistemleri ve motor parçaları gibi birçok uygulamada kullanılır.
- Otomotivde yaygın olarak titreşim yalıtımı ve elektriksel yalıtım malzemelerinde kullanılırlar.
- UHMWPE, bu sektörde tekne ve yat zırhları, kablolar ve halatlar, dalgakıran, su altı çalışma ekipmanları malzemelerin yapımında kullanılır. UHMWPE, suya karşı dayanıklı

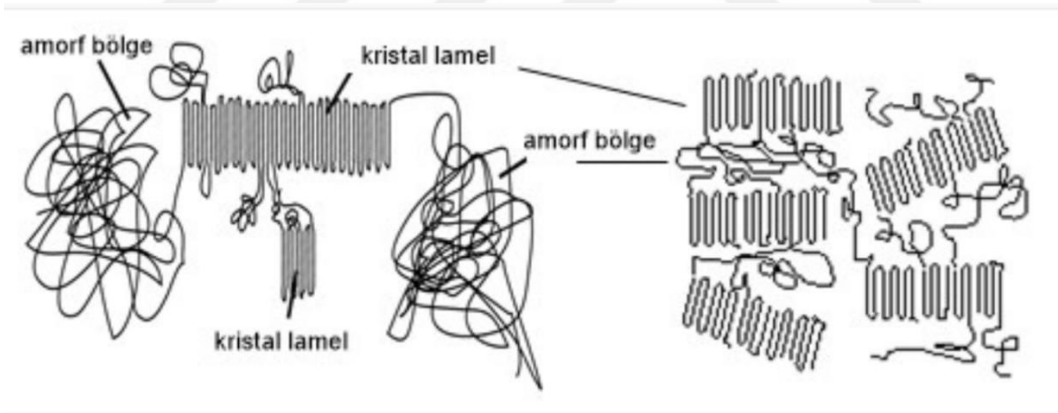
olması, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme özellikleri sayesinde bu sektör için uzun ömürlü ve dayanıklı ürünlerin üretimini sağlar.

- UHMWPE, kablo yalıtım malzemeleri, kaplamaları ve yüksek mukavemetli elektronik cihazlar ve makinelerde kullanılır.
- Düşük sürtünme katsayısı ve dayanıklılığı sayesinde UHMWPE, gıda ve ilaç endüstrisinde hijyenik taşıma sistemlerinde ve diğer sektörlerde kullanılan ağır yük taşıma bantlarında yaygın olarak tercih edilir.

UHMWPE'nin bu kadar geniş bir kullanım yelpazesinde tercih edilmesinin başlıca sebebi; malzemenin sahip olduğu mükemmel mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile, çeşitli endüstrilerdeki kritik ihtiyaçlara hitap etmesidir [69, 70, 71].

2.4. UHMWPE Fiber

Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiber, yüksek molekül ağırlığına sahip polietilenin işlenmesiyle elde edilen, güçlü, hafif ve dayanıklı bir fiber türüdür. Bu fiberlerin özelliklerini belirleyen temel faktörlerden biri molekül ağırlıklarının 1 milyon g/mol ve üzerinde olmasıdır [102].



Şekil 2.22. UHMWPE fiber [121]

- UHMWPE fiberleri, yüksek çekme mukavemetine sahiptirler ve ağırlıklarına oranla çelikten 10 kat daha güçlüdürler. Bu sayede fiberler çok yüksek gerilmelere bile kopmadan dayanabilirler.
- Yoğunlukları düşüktür (0.97 g/cm^3) ve mükemmel aşınma direncine sahiptir.
- UHMWPE fiberlerin asidik ve alkali ortamlara ve kimyasallara karşı dirençleri yüksektir. Bu özellikler UHMWPE fiberleri zorlu çevre koşullarında tercih edilen bir malzeme yapar.
- Yüzeyleri çok pürüzsüz olduğu için sürtünme katsayısı düşüktür.

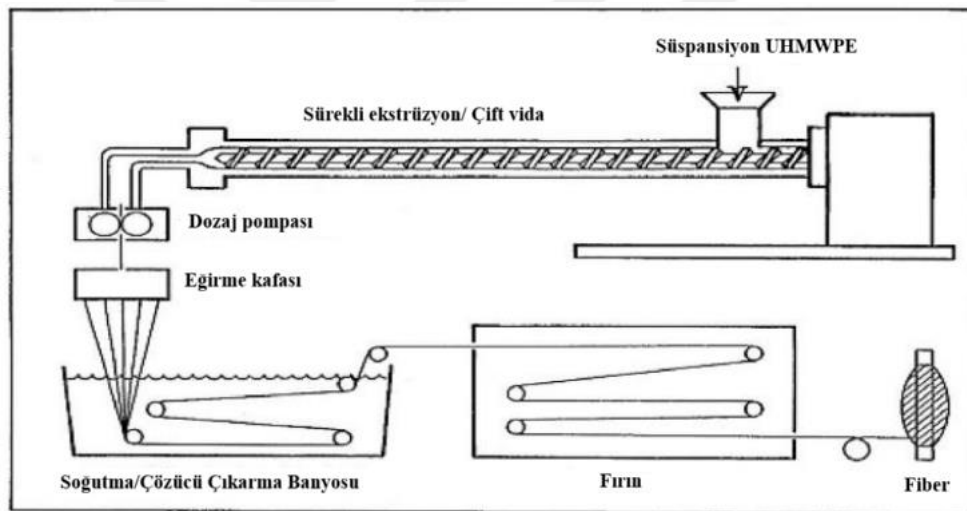
- UHMWPE fiberler yüksek esneklik özellikleri sayesinde çekme, burkulma ve bükülmeye karşı dayanıklıdır.
- UV dayanımları yüksektir.
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır [73, 74, 75].

2.4.1. UHMWPE fiberlerin üretimi

UHMWPE'nin yüksek viskozitesi yüzünden geleneksel elyaf üretme yöntemleriyle işlenmesi bir dizi zorluk gerektirir. UHMWPE fiberlerin üretiminde en yaygın kullanılan yöntemler jel eğirme ve eriyik eğirmedir.

2.4.1.1. Jel eğirme yöntemi ile UHMWPE fiber üretimi

UHMWPE (Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen) fiber üretiminde kullanılan en etkili yöntemlerden biri jel eğirmedir. Polimer zincirlerinin istiflenerek yüksek derece kristalin bölgeler oluşturmalarını sağlayan bir yöntemdir.



Şekil 2.23. Jel eğirme yöntemi ile fiber üretimi [79]

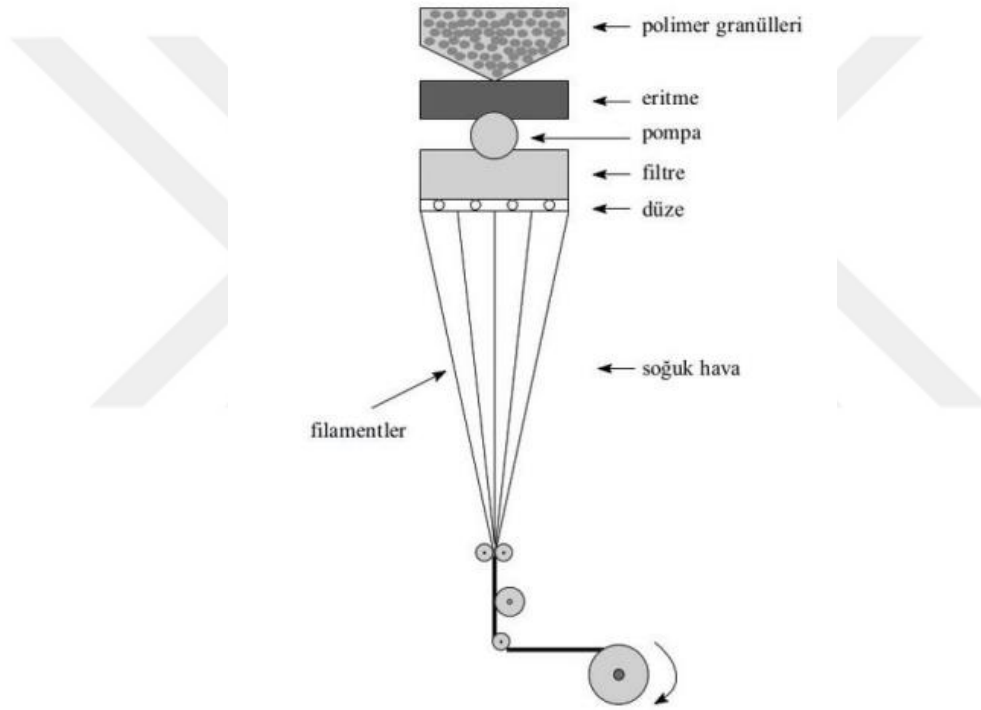
- Jel eğirme yönteminin ilk adımı UHMWPE polimerini çözecek bir çözelti hazırlanmasıdır. Çözücü olarak genellikle dekalın veya mineral yağlar kullanılır. Uygun bir çözücü içerisinde UHMWPE düşük sıcaklıklarda çözülerek bir jel çözeltisi oluşturur.
- Jel çözeltisi nozuldan geçirilerek polimer zincirleri belirli bir yönde istiflenmeye başlar ve ince fiberler oluşturulur.
- Mekanik bir sistem aracılığıyla fiberler belirli bir kuvvetle çekilerek inceltilir. Çekme işlemi istiflenen polimer zincirlerinin tamamen hizalanmasını sağlayarak fiberlerin mekanik özelliklerini artırır.

- Çözücünün uzaklaştırılması için fiberler banyodan geçirilir. Fiberlerin özelliklerini stabil hale getirmek için son olarak ısıtma işlemi uygulanır [76, 77].

Jel eğirme yöntemi, yüksek maliyetine rağmen UHMWPE fiberlerin üstün mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayan bir tekniktir [76, 77].

2.4.1.2. Eriyik eğirme yöntemi ile UHMWPE fiber üretimi

Bu yöntemde granüller ekstrüderde ergitilir. Eriyik polimer basınç uygulanarak vida ile pompalara gönderilir. Pompalarda basınç altındaki eriyiği düzelerle iletir. Düzeye çıkışında soğuk hava ile karşılaşan UHMWPE filament formuna getirilir. Lif germe işlemiyle birlikte polimer zincirleri belirli bir yönde hizalanırlar. Şekil 2.24'te eriyik lif üretim aşamaları gösterilmektedir.



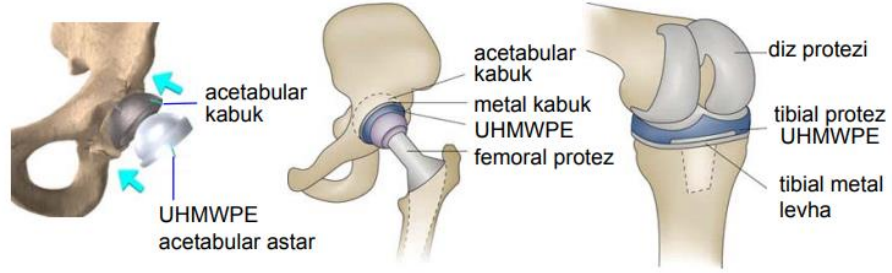
Şekil 2.24. Eriyik lif çekim yöntemi [78]

2.4.2. UHMWPE fiberlerin kullanım alanları

Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaflar, sergiledikleri mükemmel mekanik ve fiziksel özellikler sayesinde birçok alanda kullanılmaktadır [75, 76, 79, 80].

- Kurşun geçirmez yelekler, kalkanlar ve askeri kasklar.
- Araç zırhları.
- Tanklar ve helikopter parçaları.
- Cerrahi iplikler, protezler ve kardiyovasküler cihazlar.

- Ortopedik destekler ve bandajlar.
- Skolyoz tedavisinde kullanılan omurga sabitleyici yapılar.



Şekil 2.25. Yapay kalça ve diz UHMWPE bağlantılarının şematik görünümü [82]

- Spor giysileri, kasklar ve ayakkabılar.
- Olta ipleri, uçurtma ipleri ve spor raketleri.
- Motor ve bisiklet sporlarında koruyucu ekipmanlar.
- Yelken halatları, ağlar ve balık çiftliklerinde kullanılan yapılar.
- Derin su çalışmaları için halatlar ve çekme sistemleri.
- Hafif ve dayanıklı paraşüt halatları, uçak kokpit kapıları.
- Uzay araçlarında kullanılan koruyucu malzemeler.
- Kesilmeye dayanıklı eldivenler ve giysiler.
- Fırtına koruma panelleri ve darbeye dayanıklı tekstil ürünleri.
- Hafif ve güçlü kargo ağları, emniyet kemerleri.
- Karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik taşıma konteynırları.
- Kompozit malzemelerde güçlendirme elemanı.
- Yüksek dayanıklılık gerektiren mekanik parçalar.



Şekil 2.26. UHMWPE fiber uygulamaları [82]

UHMWPE fiberler üstün mekanik özellikleri sayesinde kompozit malzemeler için vazgeçilmez bir konumdadır. Bu fiberlerin epoksi reçineler, vinil ester reçineleri, poliestere reçineleri, polietilen, poliamidler, seramikler, alüminyum, çelik, titanyum, biyoplastikler, karbon nanotüpler gibi birçok matriste kullanılması ile üstü performanslı kompozitler elde edilebilir [4].

2.5. Fiber

Uzunluklarının genişliklerine oranı çok büyük olan, ince, esnek ve yüksek dayanım özelliğine sahip malzemelerdir. Fiberler elde edildikleri kaynaklara göre doğal ve sentetik olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılırlar [83, 84].

2.5.1. Doğal fiberler

Bitkileri hayvanlar ve mineraller gibi doğada bulunan kaynaklardan elde edilen fiberlerdir ve bunlar biyolojik olarak parçalanabilirler. Doğa dostudurlar.

2.5.1.1. Bitkisel fiberler (selülozik fiberler)

Bitkilerden elde edilen ve genellikle selüloz içeren fiberlerdir. Bu fiberler genellikle tekstilde kullanılır.

- Pamuk: Pamuk bitkisinin tohumlarından elde edilir. Tekstil sanayisinde yaygın olarak kullanılır.
- Kenevir: Kenevir bitkisinden elde edilen dayanıklılığı yüksek bir fiberdir. Tekstil sektöründe kullanılır.
- Jüt: Genellikle halı, çuval ve iplik üretiminde kullanılan bu fiber jüt bitkisinden elde edilir.

- Sisal: Agave bitkisinden elde edilen bir fiber olan sisal halat ve ip üretiminde kullanılır.
- Abaka (Musa Fiberi): Güçlü ve esnek yapıdaki bu fiber abaka ağacının liflerinden elde edilir. Kağıt üretimi ve tekstil endüstrisinde kullanılır.

2.5.1.2. Hayvansal fiberler

Hayvanlardan elde edilen protein bazlı fiberlerdir.

- Yün: Koyunlardan elde edilir ve tekstil sektöründe kullanılır.
- İpek: Yüksek kalite ve yumuşak özellikleri ile bilinen bu doğal fiber ipek böceğinden elde edilir.
- Kaşmir: Kaşmir keçisinden elde edilir.

2.5.1.3. Mineral fiberler

Doğal minerallerden elde edilen bu fiberler ısıya dayanım özellikleri sayesinde yalıtım malzemelerinde kullanılırlar.

- Asbest: Yalıtım malzemelerinde yaygın olarak kullanılan bu fiber türünün sağlık riskleri nedeniyle günümüzde kullanımı yasaktır.
- Cam Elyaf: Yüksek sıcaklık dayanımı, düşük ağırlık, yüksek dayanıklılığı ve nispeten düşük maliyeti ile bilinen cam fiberler, genellikle yalıtım, kompozit malzemeler ve güçlendirilmiş plastiklerde kullanılır. En çok kullanılan fiber türüdür.
- Bazalt Elyafı: Bazalt lavından elde edilen bir fiber türüdür. Cam elyafa benzer özellikler gösterir ve çevre dostudur. İnşaat ve otomotiv sektöründe kullanılır.

2.5.2. Sentetik fiberler

Genellikle polimer malzemeler kimyasal işlemlerle üretilen fiberlerdir. Sentetik fiberler genellikle doğal fiberlerden daha dayanıklıdır.

a. Poliamid Fiberler: Poliamid yapısına sahip fiberlerdir. Esnek ve dayanıklı bir malzeme olup tekstil ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

b. Akrilik Fiberler: Yün benzeri bir his veren akrilik fiberler hafif olması ve sıcak tutma özellikleri ile ön plana çıkarlar.

c. Polipropilen Fiberler: Hafif, su geçirmez ve kimyasal olarak dayanıklı bir fiber grubudur. Endüstriyel halılar, jeotekstil malzemeleri ve otomotiv uygulamalarında tercih edilirler.

d. Aramid Fiberler: Aramid fiberleri yüksek sıcaklık, aşınma ve darbe dayanımına özelliklerine sahiptir.

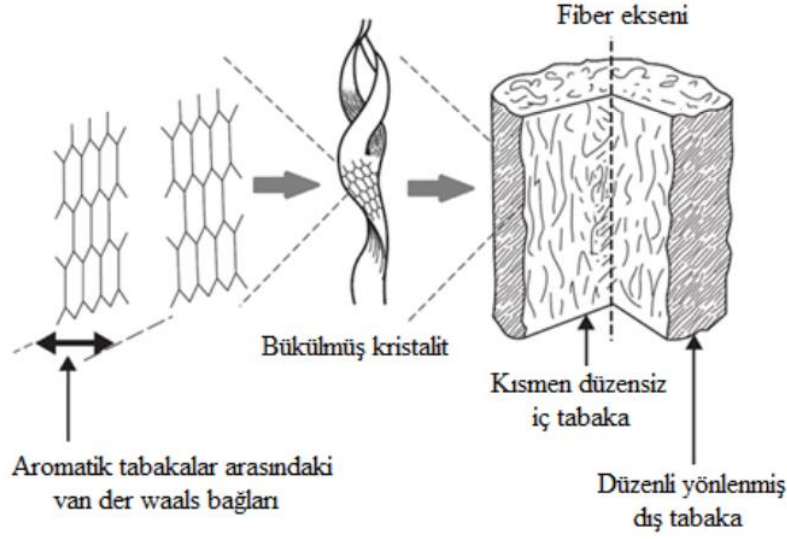
- Kevlar: Zırh ve koruyucu giysi gibi yüksek performans gerektiren balistik uygulamalarında kullanılırlar.

e. UHMWPE (Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen) Fiberler: UHMWPE fiberleri, üstün mekanik ve fiziksel özellikler sergileyen sentetik fiberlerdir.



Şekil 2.27. UHMWPE fiber

f. Karbon Fiberler: Karbon fiberler, cam fiberlere göre daha yüksek mukavemet ve hafiflik özelliklerine sahiptir. Fakat maliyetinin yüksek olması nedeniyle havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları gibi özel sektörlerde tercih edilen bir malzemedir.



Şekil 2.28. Karbon fiber yapısı [94]

2.6. Fiberlere uygulanan yüzey işlemleri

Fiberlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla yüzey işlemleri uygulanır. Özellikle kompozit malzemelerde, fiber ile matris ara yüzey etkileşimlerinin güçlenmesi ve iyi yapışma için gereklidir.

Fiberlere uygulanan yüzey işlemleri ile;

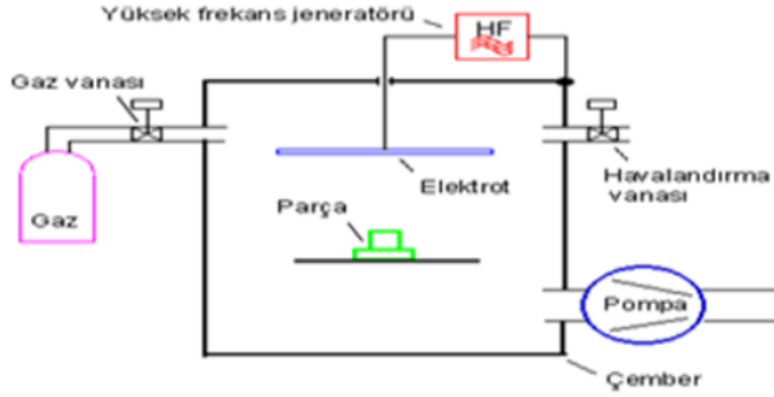
- Fiberlerin mekanik dayanımı artırılabilir.
- Yüzey enerjileri artırılarak diğer malzemelerle daha iyi yapışması sağlanabilir.
- Fiber yüzeylerinin suya karşı dirençli (hidrofobik) veya suyu emen (hidrofilik) özellikler kazanması sağlanabilir.
- Fiberlerin kimyasal maddelere karşı dayanıklılığı artırılabilir. Bu fiberlerin zorlu çevre koşullarında uzun ömürlü olmasını sağlar.
- Fiberlere antimikrobiyal özellik kazandırılabilir.
- Fiberlerin ısıya karşı dayanıklılığını artırılabilir.
- Elektriksel ve termal iletkenlik değiştirilebilir.
- Fiberler Biyoyumlu hale getirilebilir. Medikal uygulamalarda için önemlidir.

Özetle, fiberlerin fonksiyonel ve estetik özelliklerini geliştirmek amacıyla yüzey işlemleri uygulanır [88, 89, 91].

2.6.1. Plazma işlemi

Bu yöntemde fiberler bir odada düşük basınç altında plazma maruz bırakılır. Plazma gazı argon, oksijen, azot gibi gazlar kullanılarak oluşturulur. Plazma gazındaki iyonlar ve serbest

radikaller fiber yüzeyine çarparak kimyasal reaksiyonları başlatır. Yüzeydeki reaktif atomlar aktive edilir ve yüzey enerjisi artar. Dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü artar. Burada yüzeye hidrofilik ve hidrofobik özellikler kazandırılır.



Şekil 2.29. Vakum plazmanın şematik görünümü [123]

Çevre dostu ve kimyasal madde kullanımı gerektirmeyen bir yöntem olması ve fiberlerin hacimsel özelliklerini değiştirmeden sadece yüzey özelliklerini değiştirmesi önemli avantajlarından [88].

2.6.2. Yüzey kaplama (sizing) metodu

Yüzey kaplama veya sizing işlemi, liflerin işlenebilirliğini artırmak, yüzeydeki pürüzlülüğü azaltmak, dayanıklılığı artırmak, su ve kir tutmayı engellemek amacıyla uygulanan yüzey modifikasyon yöntemidir. Hekzametildiamin ve silan çözeltileri gibi çözeltiler kaplama malzemesi olarak kullanılır.

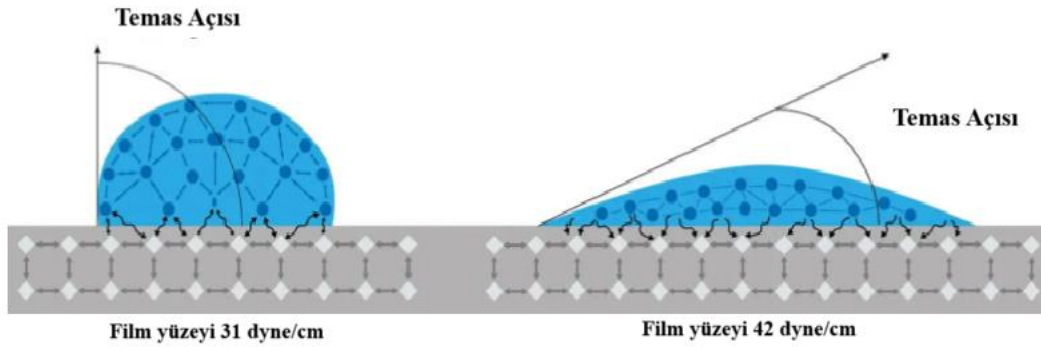
Örneğin; fiberlerin hazırlanan silan çözeltisine daldırılması veya spreyleme yöntemi ile kaplanması sağlanır. Kaplama sonrası ısı kurutma uygulanır. Fiber yüzeyine kaplanan silan yüzeydeki -OH grupları ile kimyasal bağ oluşturur. Silanın bir ucu yüzeye bağ oluştururken diğer ucu matrisle reaksiyona girer. Bu sayede elyaf/matris ara yüzey bağlanması artar.

Bu yöntem elyaf/matris bağlanmasını artırarak kompozit malzemelerin dayanıklılığını iyileştirir [84].

2.6.3. Fiziksel muamele (corona-korona) yaklaşımı

Özellikle polimerlerin yüzey enerjisini artırmak, ıslatma özelliklerini iyileştirmek ve yapışma performansını artırmak amacıyla ve korona işlemi, özellikle sentetik polimerler (polietilen, polipropilen gibi) için yaygın bir yüzey işlemi yöntemidir. Korona işleminde, yüksek frekanslı

elektiriksel deşarj (yüksek voltaj) kullanılarak polimer yüzeyine uygulanır. Bu işlem, plastik yüzeyindeki molekülleri oksitleyerek bozar. Oksidasyon sırasında karbon molekülleri parçalanır ve oksijen iyonlara ayrılır; oksijen iyonları polimer yüzeyine girer ve yeni fonksiyonel gruplar (örneğin karbonil grupları) oluşturur. Bu yeni gruplar, polimerin yüzeyini daha reaktif hale getirir ve bu da polimerin sıvılarla veya diğerk malzemelerle daha iyi kimyasal bağlanabilirliğı (dyne/cm cinsinden) iyileştirir. Korona tedavisi yalnızca plastik yüzeyinin 0,01 mikron derinliğıne kadar etki eder ve malzemenin görünümünü değıştirmez.



Malzeme	Dyne / cm	Uygulama	Dyne / cm
PP	29	Solvent bazlı mürekkep	40 - 42
PE - LD	31	Su bazlı mürekkep	46 - 48
PE - HD	32	Kaplama	44 - 54
BOPP	32	Laminasyon	46 - 56

Korona işlemiyle ve işlemsiz yüzey enerjisi

Sol taraf: Düşük yüzey enerjisi = yüksek temas açısı = zayıf yapışma

Sağ taraf: Yüksek yüzey enerjisi = düşük temas açısı = iyi yapışma

Şekil 2.30. Korona uygulaması işlemi sonrası yüzey [125]

2.6.4. Lazer işleme

Elyaf yüzeyine belirli yoğunlukta ve süreyle lazer ışını uygulanır. Lazer ışınının yüksek enerjisi, yüzeyde bölgesel erimeye veya buharlaşmaya neden olur. Fiber yüzeyinde mikroskobik oyuklar veya nano boyutta desenler oluşur. Bu sayede yüzey alanı artar ve fiberin mekanik bağlanma kapasitesi iyileşir. Bu yöntem hassas ve kontrollü bir yüzey modifikasyonu sağlayarak elyaf/matris yapışmasını güçlendirmek için kullanılır [93].

2.6.5. Asit veya Alkali İşleme

Fiberler uygun konsantrasyonlarda hazırlanan asit veya alkali çözeltilerine belirli bir sıcaklıkta daldırılır. Belirli süre çözelti içerisinde bekletilir. Çözeltiler, elyaf yüzeyindeki amorf bölgelerdeki moleküler bağları kırarak -OH, -COOH gibi yeni işlevsel gruplar oluşturur.

Yüzeye hidrofilik grupların eklenmesi ile fiberlerin kaplanma ve yapışma özellikleri geliştirilir. Bu yöntemle yüzey modifikasyonu fiber mukavemetini ve parlaklığını iyileştirir [89, 91].

2.6.6. Karbonizasyon

PAN veya selüloz gibi organik fiberler inert bir atmosferde 800-1600°C arasında işlenir. İçerisindeki organik bileşikler ayrıştırılır ve saf karbon yapısı elde edilir. Fiber yüzeyindeki oksijen miktarı artar ve yapışma özellikleri geliştirilir.

Bu yöntemle elyafa elektriksel iletkenlik ve yüksek mukavemet kazandırılabilir [95].

2.6.7. Nanopartikül kaplama

Fiberler, nanopartikül içeren bir çözeltiye daldırılır veya kaplanır. Kaplama sonrası kurutma ve sinterleme işlemleri uygulanır. Çözelti içerisindeki nanopartiküller fiziksel ve kimyasal bağlarla fiber yüzeyine tutunur. Bu nanopartiküller sayesinde yüzey alanı artar. Aynı zamanda yapıya kimyasal direnç ve fonksiyonellik kazandırır.

Bu yöntem; UV koruması, antibakteriyel özellikler veya su iticilik özelliklerinin önemli olduğu uygulamalar için tercih edilir.

2.6.8. Protein veya enzim kaplama

Fiberler hazırlanan enzim veya protein çözeltisine daldırılır. Proseste enzim veya proteinlerin fibere bağlanmasını sağlayan bağlayıcılar kullanılabilir. Bu biyolojik moleküllerin fiber yüzeyine tutunması ile yüzeyde biyoaktif bir tabaka oluşur ve fiber biyolojik sistemler uyumlu hale gelir.

Bu yöntem medikal uygulamalarda biyoyumluluğu artırmak için kullanılır [92].

Tüm yüzey işlemleri fiberleri hedeflenen uygulamaya uygun hale getirmek ve performansını artırmak amacıyla kullanılır ve kritik öneme sahiptir [85, 86, 87, 90].

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Korku, M., ve arkadaşları, ortoftalik ve izoftalik türlerdeki polyester ve polistiren ve plastifiyen içeren cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemeleri ile çalışmışlardır. UV ışınlamayı, asit ve tuzlu su ortamı, hızlandırılmış yaşlandırma, hidrotermal yaşlandırma ve termal çevrim gibi çevresel koşulların CTP kompozitlerinin aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada sonunda elde edilen veriler; tuzlu su ve UV ışınlamaya maruz kalan numunelerde aşınma direncinin arttığını, termal çevrim ve asit ortamının aşınma dayanımını azalttığını göstermiştir. Hidrotermal yaşlandırmaya karşı izoftalik polyester reçineli CTP kompozitlerinin daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, farklı reçine ve katkı kombinasyonlarının CTP malzemelerin çevresel dayanımını üzerinde doğrudan etkisi olduğunu göstermektedir [96].

Gümölcine, T., ve ekibi izoftalik polyester matrisli sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. İnceleme sonucunda bazalt fiberlerin E-cam fiberlere kıyasla daha yüksek mekanik mukavemet ve elastik modül sağladığı görülmüştür. İnce çaplı bazalt fiberlerin özellikle çekme ve eğme dayanımlarını son derece iyi olduğu bulunmuştur. Fiber çapı küçüldükçe mekanik mukavemette artış görüldüğü, ince çaplı fiberlerin matrisle daha güçlü bir ara yüzey oluşturduğu ve yük aktarımını iyileştirdiği bulgusu elde edilmiştir. E-cam fiber takviyeli kompozitlerde, fiber-matris arayüzey bağlantısının zayıf olduğu tespit edilmiş ve sebebinin üretim esnasında fiber demetlerinin tam olarak ıslatılamaması olduğu düşünülmüştür. SEM analizi sonuçları, yukarıda belirtilen bulguları destekleyerek bazalt fiberlerin matrisle daha iyi uyum sağladığını, E-cam fiberlerin ise ara yüzey bağlantısının zayıf olduğunu göstermiştir. Yapılan deneysel çalışma bazalt fiberlerin E-cam fiberlerin yerine ikame olabileceğini ve ince çaplı fiberlerin mekanik dayanımı artırıcı etkisini ortaya koymuştur [97].

El-Wazery, ve ekibi cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada el yatırma tekniğiyle farklı oranlarda ağırlıkça %15, %30, %45, ve %60 cam elyaf içeren kompozitler üretilmiştir. BU kompozitlere çekme, eğilme, darbe ve sertlik testleri uygulanmıştır. Elyaf oranının artmasıyla çekme dayanımı 28.25 MPa'dan 78.83 MPa'a, eğilme dayanımı 44.65 MPa'dan 119.23 MPa'a, darbe enerjisi ise 3.5 Joule'dan 6.5 Joule'a yükselmiştir. Sertlik değeri 31.5 BHN'den 47 BHN'ye artmıştır. En iyi mekanik özellikler %60 cam elyaf içeren kompozitte elde ve bu yöntem, elyaf-matris ara yüzey bağını ve mekanik performansı artıran etkili bir strateji sunduğunu göstermişlerdir [98].

Aramide, F. O., ve arkadaşları dokuma cam elyafı ile takviye edilmiş polyester kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çeşitli elyaf hacim oranlarında (%5- %30) üretilen kompozitlerde, çekme dayanımı, elastik modül, elastik gerinim ve darbe dayanımı verileri ölçülmüştür. Cam elyaf hacmi arttıkça çekme dayanımı ve elastik modülde iyileşme görülürken, darbe dayanımı azalmıştır. Elastik gerinim, %25 elyaf oranına kadar artmış, ardından azalma göstermiştir. Yapılan çalışma sonucunda cam elyafın kompozitlerin çatlak ilerlemesine karşı yüksek dayanıklılık sağladığı ve en iyi sonuçların %25 elyaf hacim oranında elde edildiği belirlenmiştir [99].

Islam M. Ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada geleneksel el ile yerleştirme tekniğiyle elyaf içeriği ağırlıkça %5 ile %50 arasında değişecek şekilde E-cam elyaf mat takviyeli doymamış polyester reçine (UPR) bazlı kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin çekme ve bükme dayanımı gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. %5 ve %50 elyaf içeren kompozitlerin çekme dayanımı sırasıyla 32 MPa ve 72 MPa olarak raporlanmıştır. Elyaf miktarının artmasıyla birlikte çekme modülü, kopma uzaması, bükme dayanımı, bükme modülü ve darbe dayanımı da iyileşmiştir. Ara yüzey özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve elyaf ile matris arasındaki bağın çok güçlü olduğu gözlenmiştir. Elyaf ve matrisin hidrofobik yapısı, güçlü bir ara yüzey bağı oluşturmuştur. %50 elyaf içeriğine sahip kompozitlerde, matris malzemesine kıyasla mekanik özelliklerde %389'luk bir artış kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerle UPR bazlı termoset kompozitlerin, geleneksel yöntemlerle başarılı bir şekilde üretildiği ve elde edilen mekanik özelliklerin sivil yapı uygulamalarında kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır [100].

Chhetri, S. ve Bougherara, H., UHMWPE elyaflarının yüzey modifikasyon tekniklerini inceleyerek lif-matris ara yüzey yapışmasını ve mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Kimyasal yöntemlerle liflere polar gruplar eklenmiş, plazma ve UV gibi fiziksel yöntemlerle yüzey pürüzlülüğü artırılmıştır. Polidopamin kaplama ve nano-takviyelerle sinerjik etki sağlanmıştır. Modifikasyon sonrası ara yüzey kayma dayanımı ve mekanik performansta iyileşme gözlemlenmiş; en iyi sonuçlar plazma ve polidopamin kaplama kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu yöntem, lif mukavemetini korurken ara yüzey yapışmasını arttıran bir strateji sunmuştur [103].

Ning Han, Xiaolin Zhao ve Vijay Kumar Thakur, UHMWPE elyaflarının yüzey modifikasyonu ile ara yüzey yapışma performansını artırmak üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada, nanomalzemeler eklenerek liflerin mekanik özelliklerinin ve ara yüzey yapışma kuvvetinin iyileştirildiği görülmüştür. Modifikasyon yöntemleri arasında karbon nanotüpler

(CNT) ve nano-SiO₂ kullanımı öne çıkmış, bu dolgu maddelerinin mekanik kilitleme etkisi ve lif-reçine bağlanma performansı üzerinde olumlu etkiler sağladığı gözlemlenmiştir. Araştırma, Polipropilen kaplama ile liflerin yüzey yapışma performansı %848, sıkıştırma dayanımı ise %54 oranında artırılmıştır ve bu da yüzey modifikasyonunun liflerin pürüzsüz yüzeyine polar gruplar kazandırarak yüzey enerjisini ve ıslanabilirliği artırdığını kanıtlamaktadır. Ayrıca, dielektrik bariyer deşarj (DBD) plazma ile yapılan modifikasyonlarda, oksijen içeren gruplar sayesinde ara yüzey kayma dayanımı (IFSS) büyük ölçüde iyileştirilmiştir. Bunun yanında, kimyasal oksidasyon ve kaplama yöntemleri ile liflerin yüzey pürüzlülüğü artırılmış ve lif-matris ara yüzey etkileşimi güçlendirilmiştir. Tüm bu çalışma, UHMWPE elyaflarının yüzey modifikasyonu ile yüksek performanslı kompozitlerin geliştirilmesi için bir temel sağlamaktadır [104].

Shicheng Wang, Jinyang Ma ve ekibi, UHMWPE elyaflarının yüzey özelliklerini geliştirmek ve epoksi reçine ile yapışmasını sağlamak amacıyla TA-Na⁺ metal-organik kompleks kaplamasını tercih etmişlerdir. 6 saat sonra modifiye edilen UHMWPE elyafların IFSS değeri %43,3, makro kompozitlerin çekme mukavemeti %28 artmıştır. Uygulanan kaplama, liflere polar gruplar kazandırarak yüzey pürüzlülüğünü artırarak mükemmel ara yüzey yapışması sağlamıştır. Çalışmada elde edilen veriler düşük maliyetli ve çevre dostu bu yöntemin lif-matris performansını artırmada etkili olduğunu göstermektedir [105].

Cuiyu Li ve çalışma grubu, UHMWPE liflerini asetik asit, sülfürik asit ve su karışımıyla modifiye ederek yüzey özelliklerini ve mekanik performansını incelemiştir. Modifikasyon işlemleri sonrası UHMWPE elyafların yüzey pürüzlülüğü artmış ve yüzeyde polar gruplar oluşmuştur. En optimum sonuç 9 dakikalık işlem süresiyle sağlanmış ve elyaf-matris ara yüzeyinde en iyi yapışma elde edilirken kompozitlerin çekme mukavemeti %16.7, bükülme dayanımı %55.3 görülmüştür. Uzun işlem sürelerinde elyaf mukavemetinde azalma gözlemlenmiştir. TGA ve mekanik testlerden elde edilen verilerde 9 dakika modifikasyon süresinin optimum metot olduğunu desteklemiştir [106].

M.S. Silverstein ve O. Breuer, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaflarının yüzey özelliklerini geliştirmek ve epoksi matris ile yapışmayı artırmak için kromik asit ile aşındırma yöntemini incelemiştir. Yapılan çalışmada, kromik asidin elyaf yüzeyindeki oksijen açısından zengin tabakayı kaldırdığı, yüzeyi pürüzlendirdiği ve lifin oksitlenmesini sağladığı belirtilmiştir. Aşındırma işlemi sonrasında elyafların ara yüzey kayma dayanımı (IFSS) 1,7 MPa'dan 11,3 MPa'ya çıkararak altı kat artmıştır. Aşındırma süresi uzadıkça elyafların mukavemetinde azalma görülmüştür. Çalışma sonucunda elde edilen verilen

UHMWPE elyafların kompozit malzemelerde kullanım potansiyelini artırmak için yüzey modifikasyonunun kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur [107].

Yixuan Wang ve Ruixiang Hou, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaflarının yüzey modifikasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, liflerin yüzey pürüzlülüğünü artıran ve polar fonksiyonel gruplar ekleyen farklı modifikasyon yöntemlerini incelemişlerdir.

Plazma ve korona yöntemleri yüzey pürüzlülüğünü artırmış, kimyasal oksidasyon ve aşındırmalar ise elyaf yüzeyine polar gruplar ekleyerek kimyasal etkileşimleri desteklemiştir. Örneğin, atmosferik plazma tedavisinin UHMWPE/epoksi kompozitlerinde ara yüzey kayma dayanımını üç kat artırdığı görülmüştür. Tüm modifikasyon yöntemleri UHMWPE elyafının inert yüzeyini iyileştirmiş, elyaf-matris ara yüzey yapışmasını arttırmış ve mekanik özellikleri de geliştirmiştir [80].

S.P. Lin ve çalışma arkadaşları ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaflarının yüzey modifikasyonu ve UHMWPE/epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Yüzey modifikasyonu için plazma ve kimyasal aşındırma metotları seçilmiştir. Plazma işleminde, elyaf yüzeyinde mikro oyuklar oluşturulmuş ve oksijen gruplarının oluşumu sağlanmıştır. Bu sayede elyaf/matris ara yüzey yapışmasını iyileştirmiştir. Kimyasal aşındırma işlemi ise yüzeyi daha pürüzlü hale getirerek mekanik bağlanmayı artırmıştır. Çalışmadaki veriler modifikasyon işlemleri sonrası oluşturulan kompozit yapıların mekanik dayanımda artma ve UHMWPE elyafların uzama özelliklerinde azalma olduğu görülmüştür [108].

Tian, Y. L., ve Guo, L. M. yaptıkları çalışma ile ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaflarının epoksi matrisle yapışmasını iyileştirmek için yenilikçi bir yüzey modifikasyon yöntemi sunmayı amaçlamışlardır. UHMWPE elyaflarının yüzeyine polietilen mum graflanmış maleik anhidrit (PEW-g-MAH) kaplama yöntemi ile yüzey modifikasyonu yapılmıştır. Modifikasyon öncesi ve sonrası UHMWPE fiberlerin yüzey kimyasal bileşimi, kristalin yapısı, mekanik özellikleri, ıslanabilirliği, yüzey topografyası ve epoksi reçine ile yapışma performansı özellikleri incelenmiştir. FTIR sonuçları, işlem sonrası elyaf yüzeyine polar grupların (MAH) eklendiğini göstermiştir. XRD analizleri, elyafın kristalinitesinin işlem öncesi ve sonrası değişmediğini ortaya koymuştur. Çekme testleri, %9 PEW-g-MAH ile işlem gören kompozitin çekme dayanımında %10.75 artış olduğunu göstermiştir. İşlem sonrası elyafların su temas açısı azalmış ve ıslanabilirlik dereceleri artmıştır. Tek lif koparma testi verilerine göre, %9 PEW-g-MAH ile işlem gören elyaflarda, saf UHMWPE elyaflarına kıyasla %53.59 daha yüksek bir koparma kuvveti (1.304 MPa) elde edilmiştir. SEM ve FTIR analizleri,

yüzey pürüzlülüğü ve polar grupların eklenmesinin yapışma iyileştirme mekanizmasını oluşturduğunu doğrulamıştır. Sonuçların, PEW-g-MAH konsantrasyonunun elyaf-epoksi yapışma özelliklerini etkileyen önemli bir parametre olduğunu ortaya koyduğunu göstermişlerdir [109].

M. S. Silverstein, ve ekibi UHMWPE elyaflarının yapışma sorunlarını gidermek için kimyasal aşındırma ile yüzey modifikasyon yöntemlerini incelemiştir. Çalışmada, elyafların yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelemek için kromik asit, potasyum permanganat ve hidrojen peroksit gibi farklı kimyasal aşındırıcılar kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü artırarak yüzeye polar grupların eklenmesinde kromik asit çok etkiliyken potasyum permanganat ve hidrojen peroksit sınırlı kalmıştır. Veriler incelendiğinde; 4 saat kromik asit ile aşındırma işlemi sonunda elyaf yüzeyindeki oksijen oranı %22'den %14'e düştüğü ve bu sayede elyaf/matris ara yüzeyinde yapışma kuvveti %50'den fazla arttığı görülmüştür. Potasyum permanganat ve hidrojen peroksit ile yapılan modifikasyon işleminde ise oksijen oranındaki azalma sınırlı kalmış ve yapışma performansında belirgin bir iyileşme gözlemlenmemiştir. Yapılan çalışma, UHMWPE elyaflarının yapışma özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan yüzey modifikasyon işlemlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir temel oluşturmaktadır [110].

Bahramian, N., ve iki arkadaşı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaflarının zayıf ara yüzey yapışma problemini çözmek için korona ve silan yüzey işlemlerinin etkileri inceleme amacıyla bir çalışma başlatmışlardır. UHMWPE elyafları, farklı sürelerde (0 s, 5 s, 7 s) korona deşarjına maruz bırakılmıştır. Elyafların yüzey özellikleri ATR-FTIR, AFM, SEM ve nanoindentasyon teknikleriyle değerlendirilmiş ve işlem görmüş elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin bükme dayanımı, bükme modülü ve kırılma tokluğu (KIC) ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, 5 saniye korona işlemi gören elyafların yüzey sertliğinin, bükme modülünün ve pürüzlülüğünün arttığını göstermektedir. Bu elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerde, bükme modülü, bükme dayanımı ve kırılma tokluğunda önemli iyileşmeler olduğu raporlanmıştır. SEM görüntüleri, 5 saniyelik korona işlemi ve silanizasyon sonrası elyaf-matris ara yüzeyinde daha iyi bir yapışma olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, UHMWPE elyaflarına uygulanan korona ve silan yüzey modifikasyon yöntemlerinin kompozitlerin özelliklerinin geliştirilmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir [111].

He, J. ve ekibi, UHMWPE elyaflarının yüzey modifikasyon tekniklerini inceleyerek, ara yüzey yapışmasını ve kompozit performansını geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada plazma, korona gibi "kuru" ve kimyasal aşındırma, yüzey kaplama gibi "ıslak" modifikasyon yöntemleri

değerlendirilmiştir. Plazma işlemi, elyaf yüzeyinde polar gruplar oluşturarak yüzey hidrofobitesini azaltmış ve ara yüzey kayma dayanımını %90 artırmıştır. Kimyasal aşındırma, lif yüzey pürüzlülüğünü artırırken mekanik kilitlenmeyi desteklemiştir. Modifikasyonlar, UHMWPE'nin yüzey özelliklerini geliştirirken mekanik mukavemetini etkilemeden malzeme performansını artırmıştır. En iyi sonuçlar, plazma tedavisi ile kimyasal aşındırma kombinasyonu ile elde edilmiştir [112].

Lei Han ve ekibi, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen elyafların yüzey modifikasyonu ve UHMWPE/epoksi kompozitlerin özelliklerini inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, modifikasyon yöntemi olarak iki adımlı PVA-glutaraldehit kondenzasyonu (Corona-PG-2S) tercih edilmiştir. Corona-PG-2S yöntemiyle modifiye edilen elyaflarda, yüzeye polar oksijen grupları eklenmiş oksijen içeriği %25'e kadar artmış, modifiye edilmemiş elyaflara göre %262,8 daha yüksek soyulma dayanımı sağlamıştır ve elyaf/matris ara yüzey yapışmasını geliştirmiştir. Elektron spektroskopisi (XPS) ve enerji dağılımlı spektrum (EDS) analizler sonuçları da elyaf yüzeyindeki oksijen içeriğinin önemli ölçüde arttığını ve C-O-C gruplarının başarılı bir şekilde oluştuğunu desteklemektedir. Bu modifikasyon yöntemi kompozitlerin mekanik dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Corona-PG-2S yöntemi hem çevre dostu olması hem de yüzey pürüzlülüğünü ve oksijen gruplarını artırarak elyaf/matris ara yüzey yapışmasını iyileştirmesi açısından elyaf modifikasyonunda önemli bir yöntemdir [113].

Grand View Research tarafından yapılan bir araştırma, tıbbi grade UHMWPE pazarının 2015-2024 yılları arasında 60.9 kilotondan 204.8 kilotona yükseldiğini ve yıllık bileşik büyüme oranının %15 olduğunu ortaya koymaktadır. UHMWPE, üstün biyouyumluluğu, kimyasal direnci, düşük aşınma hacmi, yüksek gerilme dayanımı ve düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleri nedeniyle tıbbi implantlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, gama ışınlaması ile oluşan serbest radikallerin neden olduğu oksidatif bozulma ve aşınma parçacıkları gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunları aşmak için, UHMWPE'nin özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri ve kompozit güçlendirmeler geliştirilmiştir. Elektron ışını veya soğuk plazma tedavisi gibi tekniklerle saf UHMWPE'nin özellikleri iyileştirilirken, hidroksiapatit, karbon nanotüpler, E vitamini ve grafen oksit gibi materyallerle güçlendirilmiş kompozitler kullanılmıştır. Bu güçlendirmeler, mekanik özellikleri, biyouyumluluğu ve aşınma direncini artırmaktadır. Özellikle, hidroksiapatit ve grafen oksit, kemik doku mühendisliği uygulamalarında, karbon nanotüpler ise antibakteriyel özellikler için önemli avantajlar sunmaktadır. Bu araştırmalar, fonksiyonelleştirilmiş UHMWPE'nin tıbbi

implantlarda dayanıklılığı artırarak daha uzun ömürlü çözümler sunduğunu göstermektedir [52].

Poliester reçine matrisli kompozitlerle ilgili yapılan çalışmaların yaklaşık olarak %60'ında cam elyaf, %30'unda karbon elyaf ve %10'unda UHMWPE elyaf kullanılmıştır.

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaflar, üstün özellikler sergileyen yüksek performanslı malzemelerdir. Ancak bu elyaflar, zayıf ara yüzey etkileşimi göstermesi nedeniyle yüzey modifikasyonu gerektirir ve tedarik kısıtı olduğundan kompozit çalışmalarında daha az tercih edilir. Literatürü incelediğimizde UHMWPE elyaf ile yapılan çalışmaların sınırlı kaldığı malzemenin sahip olduğu üstün mekanik özelliklerin kompozit yapılara katacağı avantajlar düşünüldüğünde ilgili çalışmaların artması beklenmektedir. Aynı zamanda ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaf ile gerçekleştirilen çalışmalara bakıldığında, hazırlanan kompozitlerin genelde termoplastik ve epoksi reçine matrisi esaslı olduğu görülmektedir. Çalışmamızın odağındaki matris seçimi olan doymamış polyester reçinenin kullanımı ise bu alanda önemli bir yenilik olarak değerlendirilebilmektedir. Tez kapsamında bu konu üzerinde çalışmalar yapılmıştır.



4. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

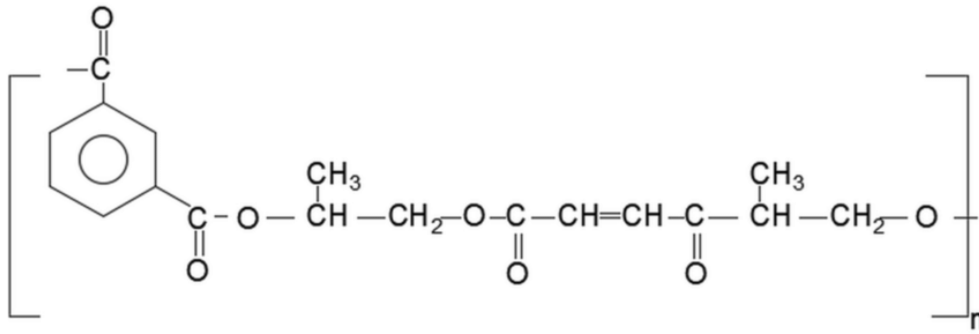
4.1. Malzemeler

Çalışmada kullanılan Polipol 3401 kodlu (viskozite: 500-600 cP) doymamış poliester reçine (PES), sertleştirici metil etil keton peroksit (MEK-P) ve hızlandırıcı kobalt naftanat (KN) Poliya Polyester Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. firması tarafından sağlandı.

Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) fiberler Dyneema firmasından tedarik edildi.

Potasyum dikromat, sülfürik asit, hidrojen peroksit, hekzametilendiamin (HMDA) ve 3-aminopropiltrimetoksisilan (APTMS) Sigma Aldrich firmasından temin edildi. Tüm kimyasallar yüksek saflıktadır ve kullanım öncesi ilave bir saflaştırma işlemine tabi tutulmamıştır.

Doymamış poliester reçinesine ait kimyasal yapı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Doymamış poliester reçinenin kimyasal yapısı [119]

4.2. UHMWPE Fiber Yüzey Modifikasyon İşlemleri

UHMWPE fiberler çok düşük bir yüzey enerjisine sahip olduklarından polimerik matrislerle düşük bir etkileşime girmektedir, bu da yüksek performans beklenen tüm kompozit yapılar için önemli bir parametre olan fiber-reçine tutunma gücünü yetersiz bir seviyede olmasına yol açmaktadır. Bu özelliğin iyileştirilmesi için kimyasal aşındırma (Etching), fiziksel muamele (Corona) ve yüzey kaplama (sizing) gibi çeşitli yaklaşımlar tercih edilebilmektedir.

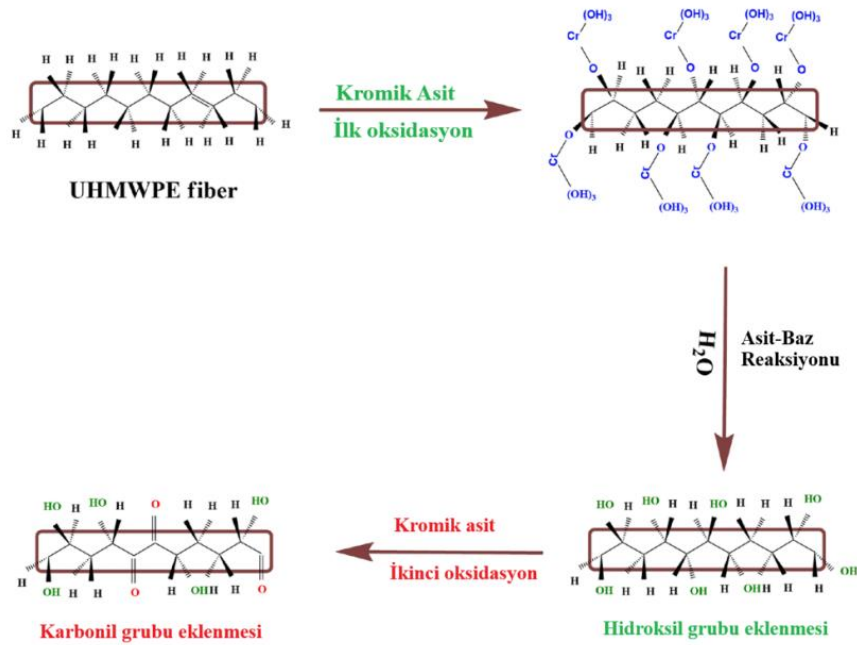
Tüm yüzey işlemleri öncesi UHMWPE elyaflar yüzeyinin kirleticilerden arındırılması için sırasıyla aseton veya etanol ile yıkanarak temizlendi. Temizlenen elyaflar destile su ile durulanarak yüzeydeki çözücü kalıntıları uzaklaştırıldı ve etüvde 50 °C de kurutuldu.

4.2.1. Kimyasal aşındırma (etching) yaklaşımı

Yüksek oksidasyon gücüne sahip agresif kimyasalların kullanımı ile metalik ve/veya polimerik materyallerin yüzeylerinin modifiye edilmesi pek çok sektörde kullanılan bilinen bir yöntemdir. Genelde kimyasal aşındırma işleminde reçetesinde mineral asitler, yükseltgeyici ajanlar ve/veya radikal oluşturan organik bileşiklerin bir arada bulunduğu çözeltiler görev alır. İşleminde öncelikle uygulanacak malzeme türüne bağlı olarak tip, bileşim ve konsantrasyon seçimi yapılır, ardından kimyasal aşındırma işlemine uğratılacak materyal hazırlanan çözeltide belirlenen sürede tutulur ve son olarak aşındırıcı kimyasal yüzeyden uzaklaştırılır ve/veya nötralize edilir. Süre işlemin sadece yüzeyde belli kalınlığa kadar etki etmesi adına mümkün olacak en kısa şekilde tutulur.

Çalışmada kimyasal aşındırma ajanı olarak kullanılan kromik asit çözeltisi, sırasıyla potasyum dikromat ($K_2Cr_2O_7$), sülfürik asit (H_2SO_4) ve distile suyun 7:150:2 kütle oranında karıştırılmasıyla hazırlandı.

UHMWPE fiberler hazırlanan kromik asit çözeltisine batırılarak sırasıyla 1 saat, 4 saat ve 24 saat bekletilmiştir. Modifikasyon işlemi tamamlandıktan sonra, elyaflar distile su ile yıkandı ve yıkama işlemi sonrası elyaflar oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı.

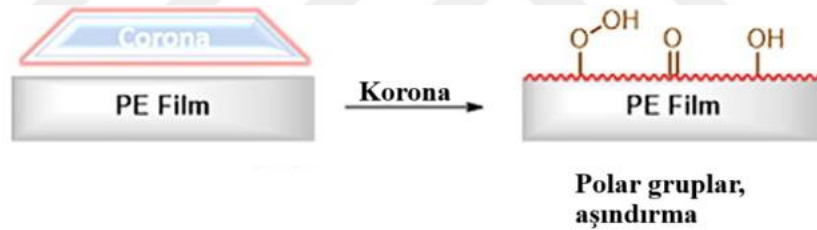


Şekil 4.2. Kromik asit ile UHMWPE fiberleri aşındırma mekanizması [114, 116]

4.2.2. Fiziksel muamele (corona-korona) yaklaşımı

Özellikle polimerlerin yüzey enerjisini artırmak, ıslatma özelliklerini iyileştirmek ve yapışma performansını artırmak amacıyla korona işlemi ile yüzey modifikasyonu, yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu işlemde, polimer belirli bir süre boyunca elektriksel deşarj arkına maruz bırakılarak polimer yüzeyinde oksidatif etki oluşturulur. Bu etki, polimerin yüzeyinde serbest radikallerin oluşmasına neden olur ve daha reaktif bir yüzey elde edilir. Bu sayede yüzeydeki moleküler yapıların değişmesi, yüzey enerjisinin artması ve dolayısıyla malzemenin yapışma özelliklerinin güçlenmesi sağlanır. İşlem süresi ve güç seviyeleri gibi proses parametreleri polimerin türüne ve istenilen yüzey özelliklerine göre belirlenir.

Temizlenmiş elyaflar, 2 kW güce ve 8-20 kHz frekans aralığına sahip USET UD1100 markalı korona cihazı kullanılarak işleme tabi tutuldu. Uzunlamasına akan bir bant üzerine sabitlenen fiberler cihaz içinden geçirildi, 0,5 m/s hızla ilerleyen bant üzerindeki fiberler, 10 kV gerilim altında korona cihazının elektrostatik elektrotları arasından geçirildi. İşleme bir kez maruz kalan örnekler 1.Geçiş, iki kez maruz kalan örnekler 2.Geçiş olarak adlandırıldı.



Şekil 4.3. Polietilen filme korona işlemi uygulaması [115]

4.2.3. Yüzey kaplama (sizing) yaklaşımı

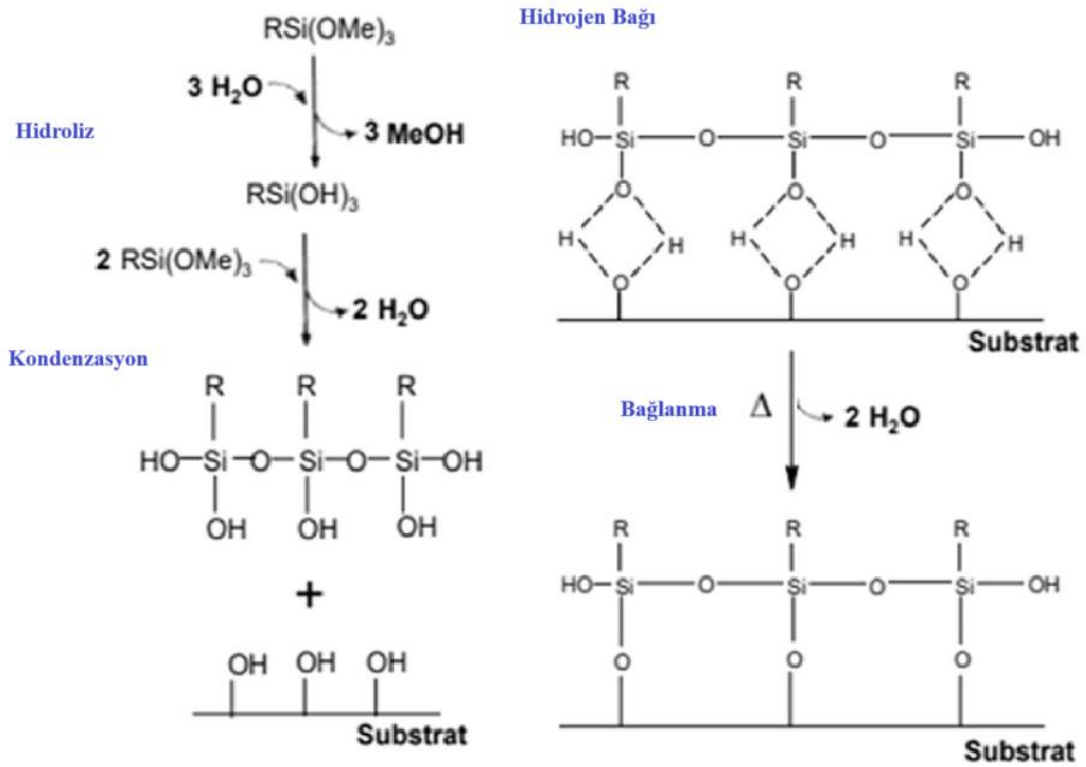
Yüzey kaplama sizing yaklaşımı, polimerlerin yüzey özelliklerini iyileştirme ve performansını artırma amacıyla sıvı kaplama bileşenlerinin uygulanması yöntemidir. Polimerlerde kaplama mekanizması, kaplama bileşenlerinin homojen bir şekilde uygulanarak polimer yüzeyine bağlanması ile koruyucu bir katman oluşturmasıyla gerçekleşir. İşlem sonrasında polimerin suya, kirlenmeye ve mekanik etkilere karşı dayanıklılığı artar. Kullanılan bileşenlerin türü, bileşimi ve konsantrasyonu, polimerin türüne ve istenilen yüzey özelliklerine göre belirlenir.

Yüzey kaplama (sizing) yaklaşımı kapsamında temizlenmiş UHMWPE fiberler iki farklı kaplama çözeltisi ile muamele edildi.

Bunlardan ilki için 100 ml su içerisine 5 ml heksametilendiamin (HMDA) katılarak çözelti hazırlandı. Çözeltinin homojen olması için iyice karıştırıldı. Temizlenmiş UHMWPE fiberleri,

hazırlanan hekzametilendiamin çözeltisine daldırılarak tamamen ıslanması sağlandı. İşlem 70 °C’de 24 saat uygulandı. HMDA kaplanan elyaflar, yüzeyindeki fazla çözücüyü uzaklaştırmak için destile su ile yıkandı ardından 50°C’de etüvde kurutuldu.

İkinci kaplama çözeltisi ise 100 ml izopropil alkol içerisine 1 ml 3-aminopropiltrimetoksisilan (APTMS) eklenerek hazırlandı. Temizlenen UHMWPE fiberleri hazırlanan silan çözeltisine tamamen ıslanacak şekilde daldırıldı. Fiberler çözelti içerisinde 1 saat bekletildi. Silan ile kaplanan elyaflar, yüzeyindeki fazla çözücüyü uzaklaştırmak için 1 saat boyunca hava ile kurumaya bırakıldı. Daha sonra elyaflar 50°C’de etüvde kurutuldu.



Şekil 4.4. Silan bağlayıcı ajanlarının substrat üzerindeki kaplama mekanizmasının şematik açıklaması [124]

4.2.4. Poliester reçine / UHMWPE fiber esaslı kompozitlerin hazırlanması

Yukarıda değinilen yüzey işlemleri uygulanmış ve herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış UHMWPE fiberler öncelikle 1 mm boyutlarında kırıldı. Ardından kırılmış fiberler ağırlıkça farklı oranlarda sabit hızda mekanik karıştırma altında poliester reçine içine eklendi. Tüm fiberlerin ilavesinin ardından homojenizasyon için 5 dak. ilave karıştırma gerçekleştirildi. Son olarak karışıma bileşim reçetesine oranla ağırlıkça %1 hızlandırıcı kobalt naftanat (KN) ve ağırlıkça %10 sertleştirici metil etil keton peroksit (MEK-P) katıldı. Homojen dağılım için iyice

kariştırılan bileşim çekme ve darbe test çubuğu için önceden hazırlanan çok gözlü silikon esaslı numune kalıplarına dökülerek 24 saat sertleşmeye bırakıldı.



şekil 4.5. Kırpılmış UHMWPE fiberler



şekil 4.6. Çekme test çubuğu ve eğme test çubuğu kalıpları

Üretilen poliester kompozitlerine ait bileşim ve ilgili kodlamalar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Poliester-UHMWPE kompozitlerine ait bileşim ve kodlamaları

Malzeme	Malzeme Karışım Kodlaması
Poliester Reçine	R
UHMWPE Fiber	U
Poliester- UHMWPE Fiber (%5)	F5
Poliester- UHMWPE Fiber (%15)	F15
Poliester-Kromik Asit- UHMWPE (1 h, %5)	CA5-1
Poliester-Kromik Asit- UHMWPE (4 h, %5)	CA5-4
Poliester-Kromik Asit- UHMWPE (24 h, %5)	CA5-24
Poliester-Kromik Asit- UHMWPE (1 h, %15)	CA15-1
Poliester-Kromik Asit- UHMWPE (4 h, %15)	CA15-4
Poliester-Kromik Asit- UHMWPE (24 h, %15)	CA15-24
Poliester-Korona- UHMWPE Fiber (1. Geçiş, %5)	C5-1
Poliester-Korona- UHMWPE Fiber (2. Geçiş, %5)	C5-2
Poliester-Korona- UHMWPE Fiber (1. Geçiş, %15)	C15-1
Poliester-Korona- UHMWPE Fiber (2. Geçiş, %15)	C15-2
Poliester - HMDA UHMWPE Fiber (%5, 70 °C- 24 Saat)	A5
Poliester - HMDA UHMWPE Fiber (%15, 70 °C- 24 Saat)	A15
Poliester - Silan UHMWPE Fiber (%5)	S5
Poliester - Silan UHMWPE Fiber (%15)	S15

Elde edilen test numunelerinin görselleri Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.7. Kromik asit ile yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliester kompozit test çubukları



Şekil 4.8. Korona yöntemiyle yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliestere kompozit test çubukları



Şekil 4.9. HMDA kaplama ile yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliestere kompozit test çubukları

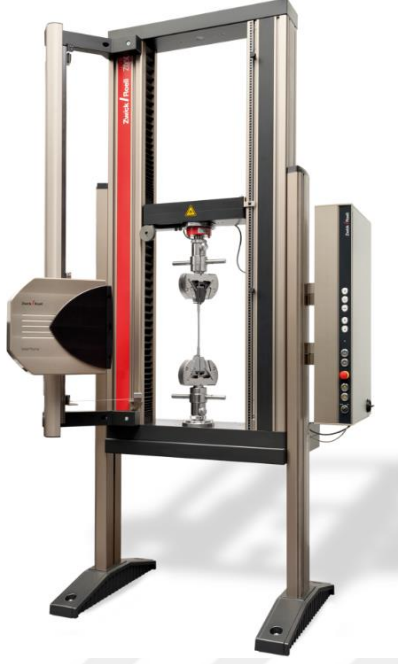


Şekil 4.10. Silan kaplama ile yüzeyi modifiye edilen UHMWPE ilaveli poliester kompozit test çubukları

4.2.5. Kompozitlere uygulanan karakterizasyonlar

Hazırlanan kompozit örnekleri için çekme testleri, ISO 527-1A standardı (170 mm x 10 mm x 4 mm) ölçülerine göre şekillendirilmiş papyon (dogbone) numuneler kullanılarak Z050 Allround (Zwick) model çekme test cihazı yardımıyla oda sıcaklığında 60 N ön yükleme ve 5 mm/dk çekme hızıyla gerçekleştirildi. Her test için 5 adet numune kullanıldı, elde edilen elastik modül (MPa), kopma mukavemeti (MPa) kopmadaki uzama (%) değerlerinin ortalamaları alınarak raporlandı.

Hazırlanan kompozit örnekleri için üç nokta eğme testleri, ISO 178 standardına göre Z050 Allround (Zwick) model çekme test cihazında 2 mm/dk hızıyla yapıldı. Üç nokta eğme testi için 80x10x4 mm boyutlarına sahip numuneler hazırlandı. Her test için 5 adet numuneden elde edilen eğilme modül (MPa) ve eğilme değerlerinin ortalamaları alınarak raporlandı.



Şekil 4.11. Z050 Allround (Zwick) model çekme test cihazı [117]

UHMWPE fiberlerin poliester reçine içerisine ilavesiyle saf poliester reçinenin sertliği üzerine etkileri ISO 868 standardına göre 3 mm kalınlığındaki örnekler kullanılarak oda sıcaklığında $50 \pm 0,5$ N ağırlık altında her test için 5 adet numuneden elde edilen Shore D değerlerinin ortalamaları alınarak raporlandı. Test Zwick Roell analog Shore-D sertlik cihazında yapılmıştır.



Şekil 4.12. Zwick Roell analog Shore-D sertlik cihazı [117]

Üretilen polimer kompozitlerin yoğunlukları 23°C ' de ISO 1183 standardına göre GR-200 model yoğunluk ölçme cihazıyla (A&D Instruments Ltd, Birleşik Krallık) ölçüldü. Her test için 5 adet numuneden elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak raporlandı.



Şekil 4.13. A&D Instruments Ltd, GR-200 yoğunluk test cihazı [118]



5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. UHMWPE Katkılı Poliester Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Çalışma kapsamında UHMWPE elyafları üzerine kimyasal ve fiziksel teknikler olarak kategorize edilen çeşitli yüzey modifikasyonları gerçekleştirilmiştir. Modifiye elyaflar çeşitli oranlarda doymamış polyester reçine içine katılarak farklı bileşimde kompozitler hazırlanmıştır. Uygulanan işlemlerle kompozitlerin mekanik özellikleri arasındaki ilişki ve sonuçlar üzerinden elyaf/matris etkileşimi değerlendirilmiştir.

5.1.1. Yüzeyi modifiye edilmemiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin mekanik özellikleri

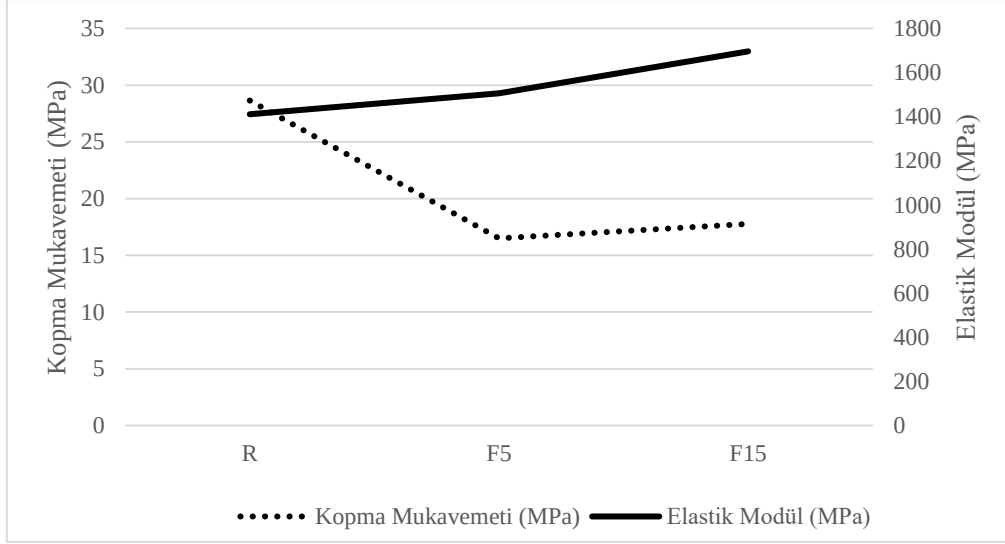
Çalışmamızda hazırlanan fiber içermeyen ve yüzey modifikasyon işlemi uygulanmamış UHMWPE fiber içeren doymamış polyester reçine esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri, eğilme ve eğilme modül değerleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1. Fiber içermeyen ve yüzey modifikasyon işlemi uygulanmamış UHMWPE fiber içeren doymamış polyester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.

Malzeme	Kopma Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Kopma Uzunluğu (%)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
R	28,65	1411,11	9,38	59,2	3400
F5	16,5	1505,92	1,18	27,24	1274,92
F15	17,77	1696,25	1,35	15,54	1346,5

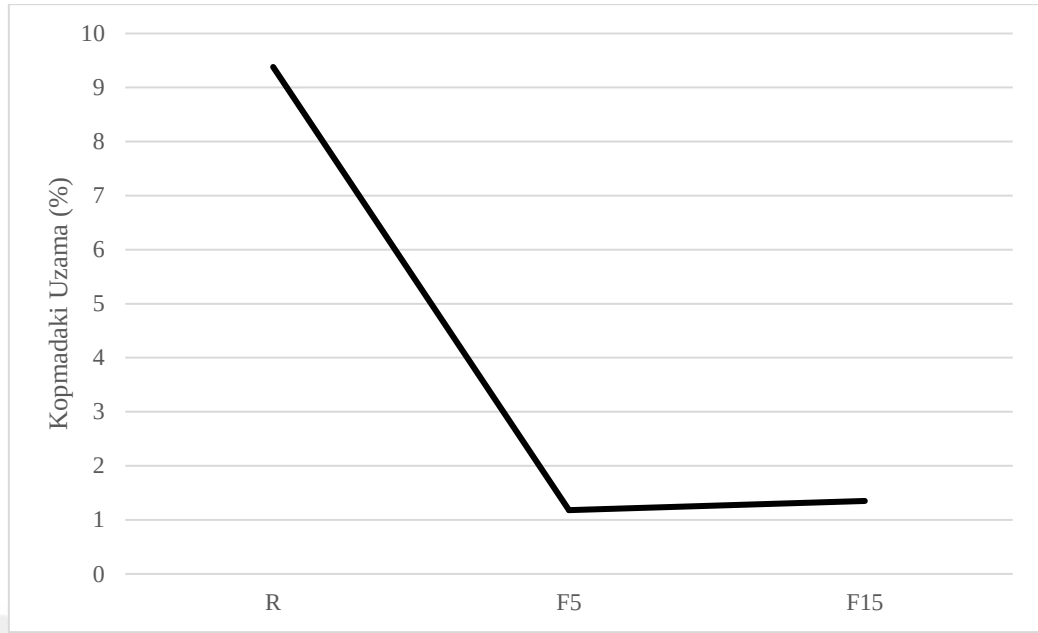
Herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiber içeren ve fiber içermeyen doymamış polyester reçine esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri kıyaslamalı olarak incelendiğinde;

- Doymamış polyester esaslı kompozitlere herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiber ilavesi ile kopma mukavemet değerlerinde düşüş gözlenmektedir (Tablo 5.1).



Şekil 5.1. Fiber içermeyen ve yüzeyi modifiye edilmemiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği

- %5 oranında herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiber içeren F5 kodlu örneğe ait kopma mukavemeti değerindeki düşüş yaklaşık %42 oranla en düşük değeri sergilerken, %15 oranında herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiber içeren F15 kodlu örneğe ait kopma mukavemeti değerindeki düşüş ise yaklaşık %38 oranında tespit edildi (Şekil 5.1). Sonuçlara bakıldığında bileşimden bağımsız olarak herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiberlerin doymamış poliestere reçine matrisi ile düşük etkileşim sergilediği, bileşimde miktar arttırıldığında ise göreceli ama performans açısından yetersiz bir iyileşme elde edildiği söylenebilir.
- %5 oranında herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiber içeren F5 kodlu örneğe ait kopma uzaması değerinde de düşüş gözlenmektedir. Yaklaşık %87 oranında gözlenen bu dramatik düşüş ile F5 kodlu örnek en düşük kopma uzaması değerine sahip olmuştur. Bunun yanında %15 oranında herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiber içeren F15 kodlu örneğe ait kopma uzaması değerindeki düşüş oranı yaklaşık %85 oranında gerçekleşmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Fiber içermeyen ve yüzeyi modifiye edilmemiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiği

- Sonuçlara bakıldığında bileşimden bağımsız olarak herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiberlerin doymamış poliester reçine matrisi içinde bir dolgu gibi karakter sergilediği bunun neticesinde ise uzama esnasında polimer zincirlerinin birbiri üzerinden mekanik etki altında kaymasına karşı bir direnç oluşturarak kopma uzaması değerlerini düşürdüğü, bileşimde miktar arttırıldığında ise bu etkinin dikkate alınmayacak ölçüde küçük oranlarda değiştiği söylenebilir
- %5 ve %15 oranlarında herhangi bir yüzey modifiye işlemine uğratılmamış UHMWPE fiber içeren F5 ve F15 kodlu örnekler için elastik modül değerlerinde ise sırasıyla yaklaşık %7 ve %20 oranlarında (Şekil 5.1) bir artış gözlenmiştir. Bu artışın kompozit malzemelerde istenilen şekliyle artan kopma mukavemeti kaynaklı değil kopma uzamasındaki düşüşün neden olduğu bir olgu olarak çalışmamızda ortaya çıkmıştır.

5.1.2. Yüzeyi modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin mekanik özellikleri

Elde edilen verilerden yola çıkarak UHMWPE fiberlerin poliester reçine içerisindeki performansının artırılması için yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmalıdır.

5.1.2.1. Kromik asit ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin mekanik özellikleri

Hazırlanan fiber içermeyen ve kromik asit ile aşındırma yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait

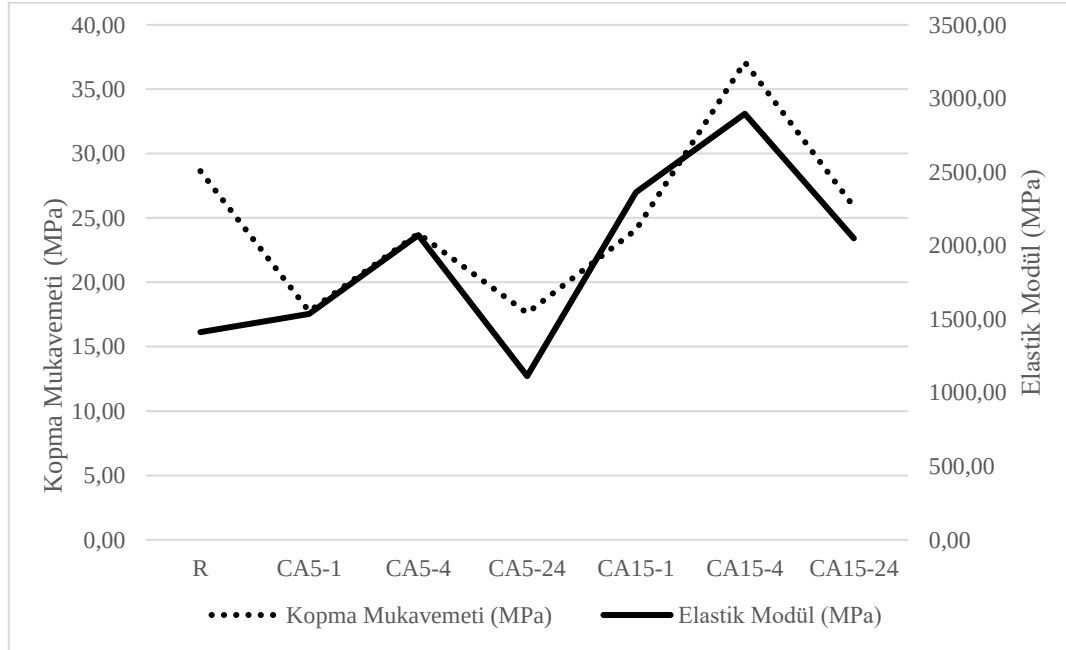
kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri, eğilme ve eğilme modül değerleri Tablo 5.2’de verilmektedir.

Tablo 5.2. Fiber içermeyen ve kromik asit ile aşındırma yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.

Malzeme	Kopma Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
R	28,65	1411,11	9,38	59,2	3400
CA5-1	17,75	1536,08	1,31	14,98	1346
CA5-4	23,79	2070,12	1,34	26,5	1996
CA5-24	17,61	1112,6	2,01	16,4	1059,12
CA15-1	24,09	2361,34	1,09	26,82	1241,67
CA15-4	37,1	2895,47	1,78	38,64	4596,76
CA15-24	25,88	2048,26	1,78	64,58	3300,55

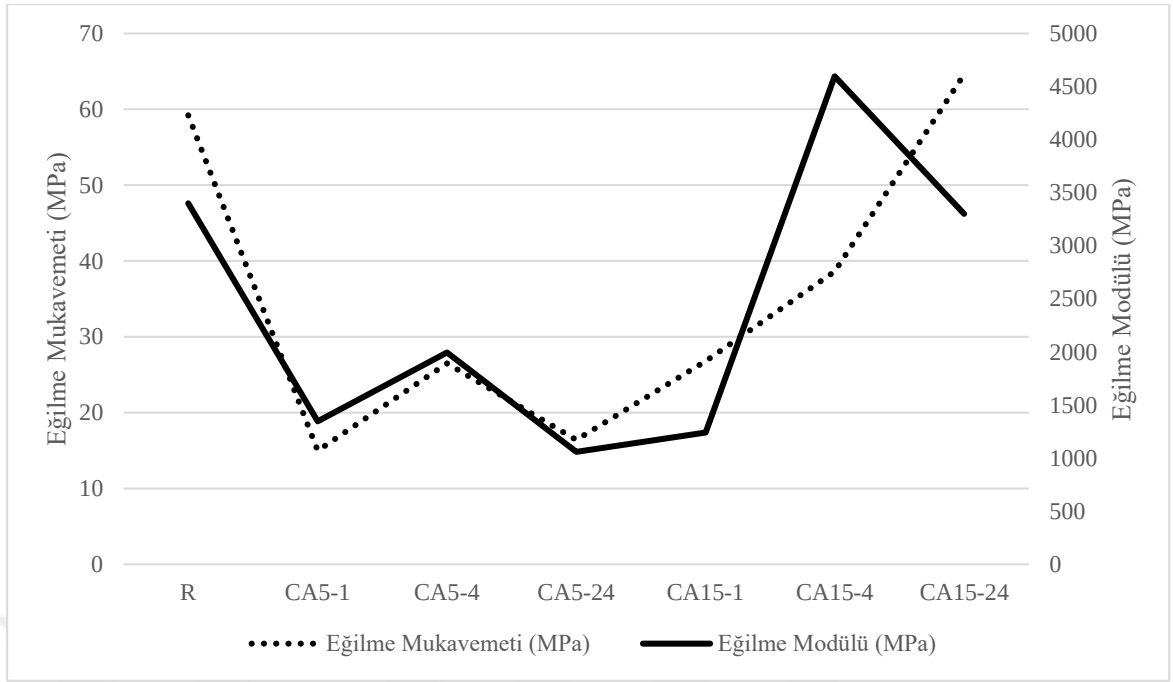
Fiber içermeyen ve kromik asit ile aşındırma yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri kıyaslamalı olarak incelendiğinde;

- Doymamış poliester esaslı kompozitlere kromik asit ile yüzey modifiye işlemine uğratılmış UHMWPE fiber ilavesi ile kopma mukavemet değerlerinde farklı kompozisyonlarda düşüşler ve artışlar gözlenmektedir (Şekil 5.3).



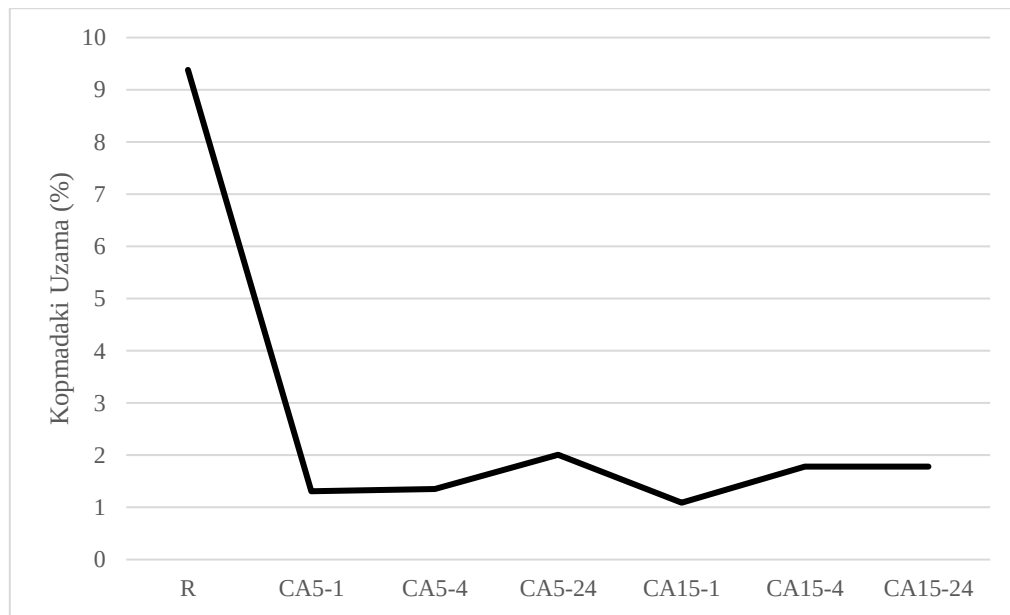
Şekil 5.3. Fiber içermeyen ve kromik asit ile modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği

- %5 oranında kromik asit ile farklı sürelerde (1 saat, 4 saat, 24 saat) yüzey modifiye işlemine uğratılmış UHMWPE fiber içeren CA5-1, CA5-4 ve CA5-24 kodlu örnekler için kopma mukavemeti değerindeki düşüşler sırasıyla %38, %17 ve %39'dur. %15 oranında kromik asit ile farklı sürelerde (1 saat, 4 saat, 24 saat) yüzey modifiye işlemine uğratılmış UHMWPE fiber içeren örnekler için kopma mukavemeti değerindeki düşüşlere bakıldığında CA15-1 örneği %16 düşüş ve CA15-24 %10 düşüş göstermiştir. Fakat CA15-4 kodlu ürünün kopma mukavemeti değerinde fiber içermeyen poliestere göre %29 artış görülmektedir (Şekil 5.3). Bu durum kromik asidin fiber yüzeyinde hidrojen bağları ve polar grupların oluşumunu artırarak reçine/fiber arayüzey etkileşiminin arttığı yönünde yorumlanabilir. Sonuçlar incelendiğinde bileşime ve modifikasyon süresine bağlı olarak kromik asit ile yüzey modifikasyon işlemi yapılan UHMWPE fiberlerin doymamış poliestere matrisi ile etkileşimi arttırdığı söylenebilir. Kimyasal aşındırma işlemleri arasında en optimum sonuçlar 4 saat kromik asit ile %15 UHMWPE içeren yapıda elde edilmiştir.
- CA5 kodlu örneklerin eğilme mukavemeti değerleri yüzey modifikasyon süreleri uzatıldıkça (1 saatten 24 saate), eğilme mukavemeti önemli ölçüde düşmüştür. En düşük değer, %72,3 azalma ile CA5-24'te görülmüştür. Bu seride, modifikasyon süresi arttıkça modüldeki azalma daha da belirginleşerek en düşük değer CA5-24'te %68,9 azalma olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.4). CA15 kodlu örneklerde fiber oranı daha yüksek (ağırlıkça %15) olduğundan mukavemet değerleri CA5 serisine göre daha iyidir. Ayrıca modifikasyon süresi arttıkça, eğilme mukavemeti artmıştır. En yüksek CA15-24 kodlu örnekte %9,1 olarak tespit edilmiştir (Tablo 5.2).
- Tüm bu veriler incelendiğinde modifikasyon süresi uzadıkça aşırı işlemin yüzey özelliklerini olumsuz etkilediği ve mekanik özelliklerde düşüşlere neden olduğu söylenebilir. CA5 kodlu örneklerde (ağırlıkça %5 fiber içeren poliestere kompozit örnekleri) düşük fiber oranı ve modifikasyon işleminin bağlanma etkinliğini yeterince artırmaması, mukavemet ve modülde belirgin düşüşlere yol açmıştır. En optimum sonuçlar fiber oranının artırılması ve modifikasyon süresinin doğru ayarlanması ile CA15-4 kodlu örnekte elde edilmiştir.



Şekil 5.4. Fiber içermeyen ve kromik asit ile modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait eğilme mukavemeti ve eğilme modülü grafiği

- %5 ve %15 oranında kromik asit ile yüzeyi modifiye edilmiş UHMWPE fiber içeren tüm örneklerde fiber içermeyen doymamış poliestere kıyasla kopma uzaması değerlerinde düşüş gözlenmektedir. En yüksek düşüş CA15-1 kodlu örnekte tespit edilmiştir. Fiber oranı arttıkça sertliğin artması ve esnekliğin azalması beklenen bir durumdur (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Fiber içermeyen ve kromik asit ile modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait kopma uzaması grafiği

5.1.2.2. Korona işlemi ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin mekanik özellikleri

Hazırlanan fiber içermeyen ve korona yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri, eğilme ve eğilme modül değerleri Tablo 5.3'te verilmektedir.

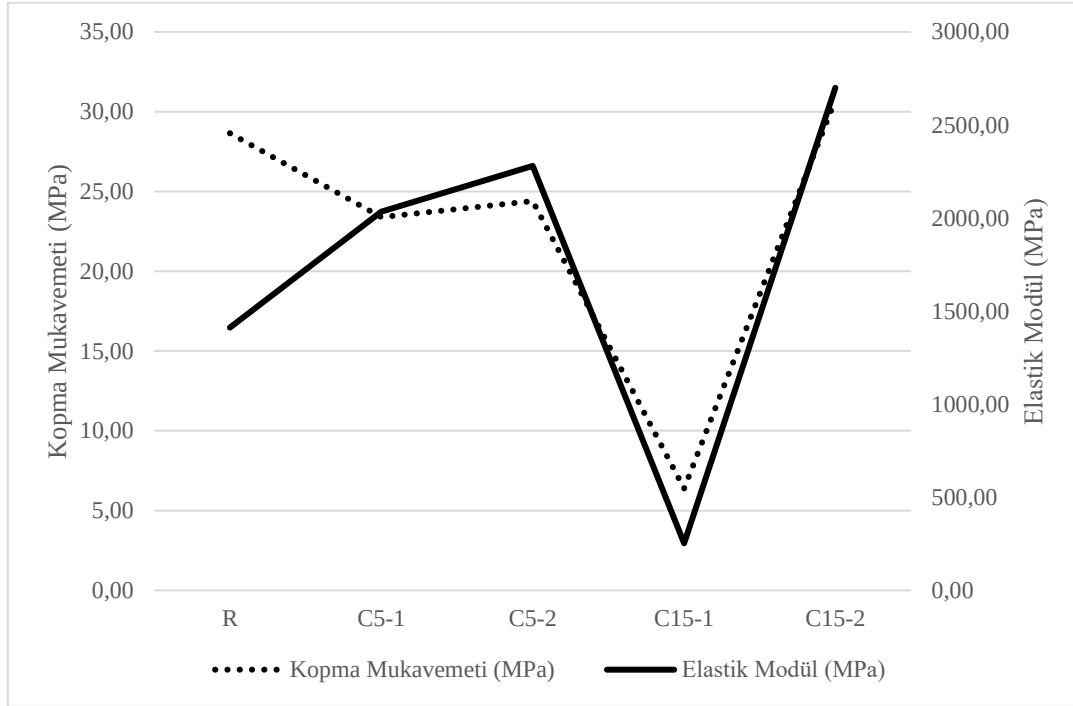
Tablo 5.3. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.

Malzeme	Kopma Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Kopmadaki Uzama (%)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
R	28,65	1411,11	9,38	59,2	3400
C5-1	23,40	2035,01	1,27	55,59	2824
C5-2	24,40	2279,50	1,18	61,6	3030
C15-1	6,38	252,74	23,02	32,3	4760
C15-2	30,76	2699,52	7,37	46,7	4230

Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri kıyaslamalı olarak incelendiğinde;

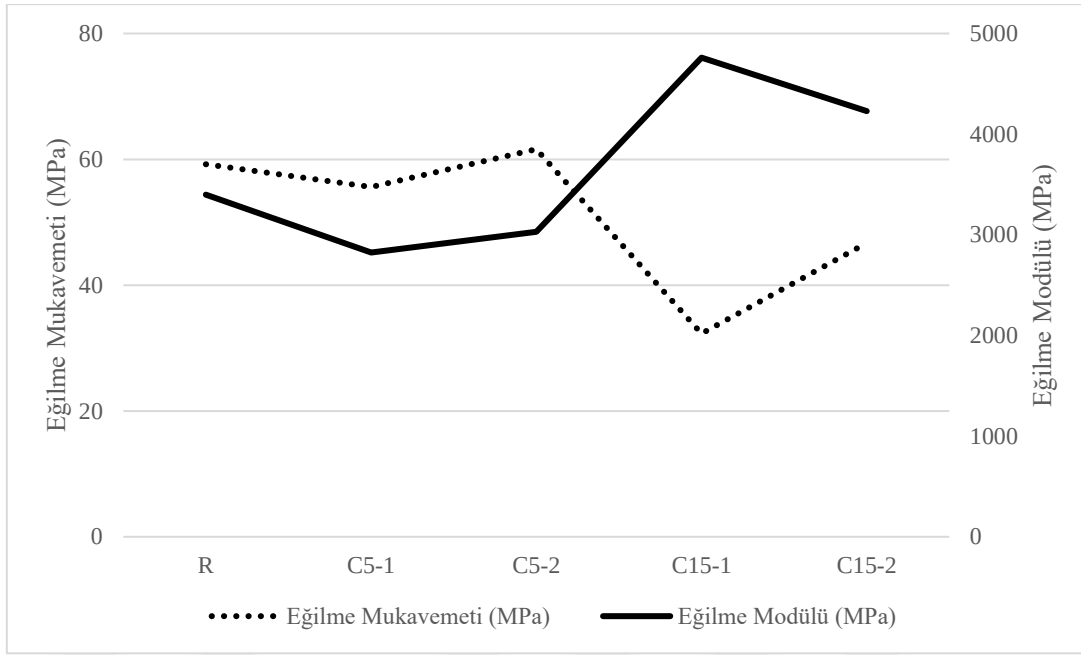
- Doymamış poliester esaslı kompozitlere korona yöntemiyle yüzey modifiye işlemine uğratılmış UHMWPE fiber ilavesi ile kopma mukavemet değerlerinde farklı kompozisyonlarda düşüşler ve artışlar gözlenmektedir (Şekil 5.6).
- C5-1 ve C5-2 kodlu örneklerinin kopma mukavemetleri fiber içermeyen poliester reçineye kıyasla sırasıyla; %18,3 ve %14,8'lik düşerken elastik modüllerinde %44,2'lik ve %61,4'lük artış görülmüştür. Bu örneklerde yüzey modifikasyonunun kopma mukavemeti üzerinde olumsuz etkisi görülürken elastik modül üzerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Elastik modülün artması malzemenin kompozit malzemelerde istenilen şekliyle artan kopma mukavemeti kaynaklı değil kopma uzamasındaki düşüşün neden olduğu bir olgu olarak çalışmamızda ortaya çıkmıştır. Yüzey modifikasyonunun daha fazla fiber ile birleşmesinin, bağlanma kuvvetini artırdığı fakat kopma mukavemetini düşürdüğü söylenebilir.
- C15-1 kodlu örnekte kopma mukavemeti yaklaşık %77,7'lik büyük bir düşüş göstermektedir. Buna karşın, C15-2'de %7,7'lik bir artış gözlenmiştir. C15-2 kodlu örneğin fiber oranı ve geçiş sayısının (2 geçiş) kopma mukavemeti ve elastik modül üzerinde olumlu etkiler yaptığı görülmüş, bağlanma noktası yeterince güçlenmiş ve mukavemet artmıştır.

C15-2'de elastik modül %90,9 oranında artmıştır. Bu durum, korona işlemi ile yüzey modifikasyonunun elastik modülü büyük ölçüde artırarak sertliği artırdığı anlamına gelir.



Şekil 5.6. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği

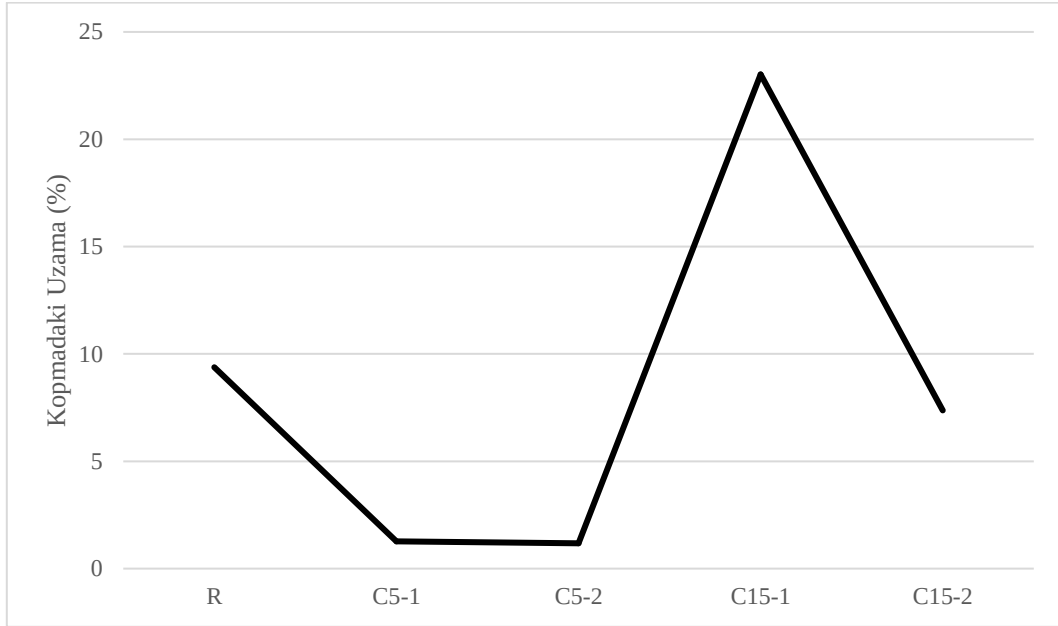
- Eğilme mukavemetinde C5 fiber oranı düşük olduğu için mukavemet üzerindeki etkileri sınırlı kalmıştır (C5-1: %6,1 düşüş- C5-2: %4,1 artış). C15-1 ve C15-2 kodlu örneklerde sırasıyla %45,5'lik büyük bir düşüş ve %21,1'lik bir azalma görülmüştür. Bu azalma, yüksek fiber oranının, reçine içinde homojen dağılamaması ve fiberlerin birbirine yapışarak kümeleşmesinde kaynaklanabilir. Bu durum, malzemenin zayıflamasına neden olmuştur. C15 serisinde yüksek fiber oranına rağmen, fiberlerin homojen dağılmaması mukavemetin düşmesine neden olmuştur. Mukavemet azalması, fiber-matris ara yüzey etkileşimi ile ilişkilidir.
- Eğilme modül değerlerinde C15-1'de %40, C15-2'de %24,4 artış gözlenirken C5 serisinde düşüş görülmüştür. Modül artışı, yüksek fiber oranının sertlik ve rijitlik üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reşine kompozitlerine ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiğı

- Referans malzeme olan doymamış poliestere reşine (R), %9,38 uzama değeri ile temel bir karşılaştırma noktasıdır. Polimer zincirlerinin kayma hareketi serbest olduğu için R'nin uzama kapasitesi diğer örneklerle kıyasla yüksek gözlemlenmiştir. C5-1 ve C5-2 kodlu örneklerin kopmadaki uzama değerlerinde sırasıyla %86,5 ve %87,4'lük dramatik bir düşüş göstermiştir (Şekil 5.8). Korona işlemi, fiber yüzeyinde polar gruplar oluşturarak fiber-matris bağını güçlendirerek fiberlerin matriste daha sıkı tutulmasına yol açmış, ancak polimer zincirlerinin birbiri üzerinden kayma hareketini sınırlandırarak esnekliğı büyük ölçüde azaltmıştır. Korona işlem sayısının artmasıyla (C5-2'de) bu etki daha da belirginleşmiş ve uzama kapasitesinde daha fazla düşüş tespit edilmiştir.
- Ağırlıkça %15 UHMWPE içeren C15-1 kodlu kompozit örneğinde yaklaşık %145,4 gibi büyük bir artış gözlemlenmiştir. Fiber oranının artışının, fiberlerin mekanik yük taşıma kapasitesini artırarak ve matriste daha dengeli bir yük dağılımı sağladığı söylenebilir. Bu durum, uzama sırasında fiberlerin matrise zarar vermeden yük taşımasını kolaylaştırmış ve uzama değerini artırmıştır. Ayrıca, C15-1'de korona işlem sayısının az (tek geçiş) olması, fiberlerin yüzey sertliğini aşırı derecede artırmadan matrisle etkileşimlerini optimize etmiş olabilir. C15-2 kodlu örnekte %21,4'lük düşüş gözlemlenmiştir. C15-2'nin uzama değerinin düşmesi, korona işleminin iki kez uygulanması sonucu fiberlerin aşırı sertleşmesine ve deformasyon kabiliyetinin azalmasına bağlanabilir. Yüksek fiber oranı ile birlikte artan işlem sayısı, fiber-matris bağlanmasını daha güçlü yaparak fiberlerin esnekliğinin azalmasına ve yük altında kırılma hale gelmesine bağlanabilir. Yüksek fiber oranında

kopmadaki uzama başlangıçta artmış (C15-1: %145,4 artış) ancak korona işleminin iki kez uygulanmasıyla tekrar azalmıştır (C15-2: %21,4 düşüş) (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Fiber içermeyen ve korona yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiği

5.1.2.3. Hekzametilendiamin kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin mekanik özellikleri

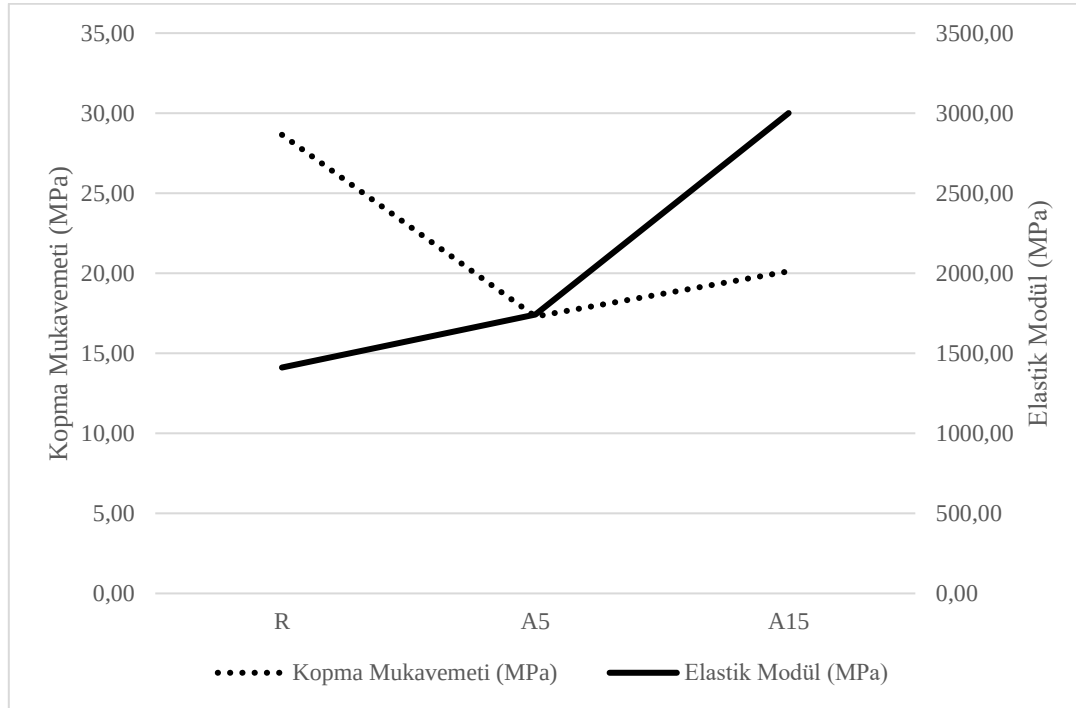
Hazırlanan fiber içermeyen ve hekzametilendiamin (HMDA) kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri, eğilme ve eğilme modül değerleri Tablo 5.4'te verilmektedir.

Tablo 5.4. Hazırlanan fiber içermeyen ve hekzametilendiamin kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.

Malzeme	Kopma Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
R	28,65	1411,11	9,38	59,2	3400
A5	17,30	1741,42	1,01	29,45	2950
A15	20,12	3000,69	0,7	45,5	3980

Fiber içermeyen ve HMDA kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri kıyaslamalı olarak incelendiğinde;

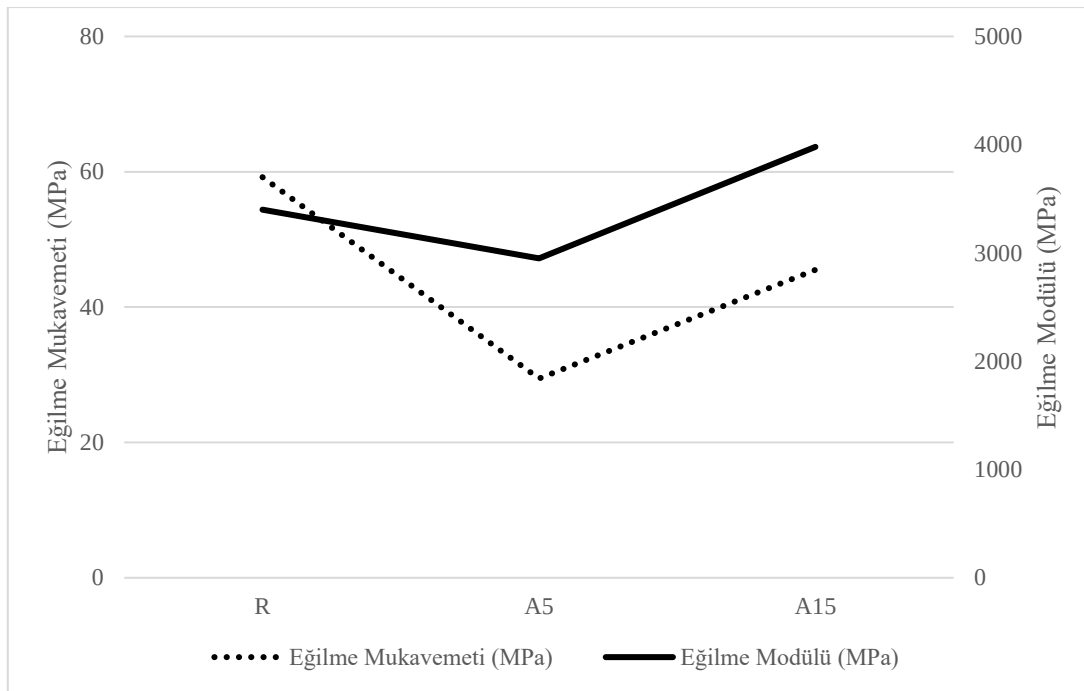
- Doymamış poliestere esaslı kompozitlere HMDA kaplama yöntemiyle yüzey modifiye işlemine uğratılmış UHMWPE fiber ilavesi ile kopma mukavemet değerlerinde farklı kompozisyonlarda düşüşler gözlenmektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Fiber içermeyen ve HMDA kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği

- Kopma mukavemet değerlerindeki değişimi incelediğimizde A5 kodlu örnekte %39,6'lık, A15 kodlu örnekte %29,8'lik bir düşüş görülmüştür. Hekzametilendiamin (HMDA) kaplama, UHMWPE fiberlerin yüzeyini polar gruplar ile zenginleştirerek reçine ile kimyasal bağ oluşturmalarını sağlar. Ancak, bu bağ yeterince güçlü olmadığında, mekanik yükler sırasında fiber-matris ara yüzünde kaymalar meydana gelir. Bu kaymalar, kopma mukavemetinin düşmesine neden olabilir. Düşük fiber oranında (A5), fiber-matris bağlanmasının yetersizliği daha belirgin bir etki gösterir ve kopma mukavemetinde daha büyük bir düşüş meydana gelir. A15'te (%15 fiber oranı), daha fazla fiber varlığı nedeniyle düşüş daha azdır, çünkü fiberler yük taşıma kapasitesine sınırlı bir şekilde de olsa katkıda bulunmuştur. UHMWPE fiberler yüksek mukavemete sahiptir, ancak doymamış poliestere reçine içinde homojen dağılmadığında veya iyi bir bağlanma sağlanamadığında malzeme mukavemetine katkıları sınırlı kalır. UHMWPE fiberlerin kaplanması ile polar yüzeyler elde edilmiş olsa bağlanma istenilen düzeyde gerçekleşmediğinde kopma mukavemeti açısından yetersiz kalmış olabilir.

- Elastik modüle bakıldığında; hekzametilendiamin kaplama ile yüzey modifikasyonu yapılmış UHMWPE fiberlerin doymamış poliestere ilavesiyle hazırlanan tüm kompozit örneklerinde (A5 ve A15) artış görülmüştür. Bu artışlar A5 için %23,4 ve A15 için %112,6'dır. UHMWPE fiberler, doymamış poliestere kıyasla çok daha yüksek elastik modüle sahiptir. Bu nedenle, fiberlerin matrise eklenmesi, kompozitin toplam elastik modülünü artırır. Hekzametilendiamin kaplama, fiber-matris etkileşimini artırarak yük taşıma kapasitesini artırır. Yüksek fiber oranında (A15), fiberlerin matriste homojen dağılımı ve polar yüzey kaplamanın sağladığı bağlanma artışı, elastik modülde ciddi bir yükselişe neden olmuştur (Şekil 5.9).

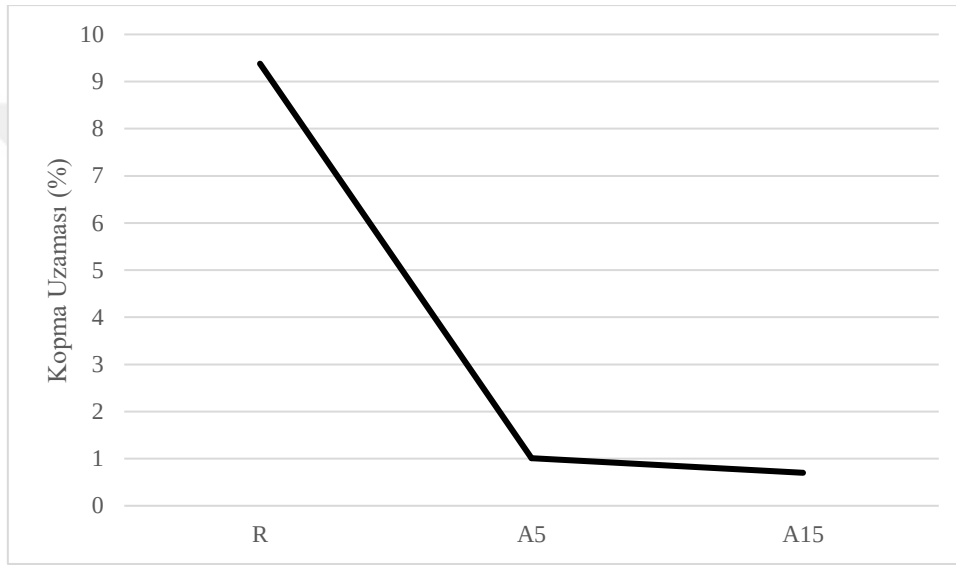


Şekil 5.10. Fiber içermeyen ve HMDA kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği

- Şekil 5.10'da görüldüğü gibi eğilme mukavemeti değerlerinde A5 kodlu örnekte yaklaşık %50,3'lük, A15 kodlu örnekte yaklaşık %23,2'lik düşüş tespit edilmiştir. UHMWPE fiberlerin HMDA ile yüzey kaplaması eğilme mukavemetini artırmada etkili olmadığı görülmüştür. Fiberlere uygulanan yüzey kaplaması matris ile yeterli bağlanma sağlamamış olabilir. Bu durum, yük aktarımı sırasında fiber-matris ara yüzünde zayıflıklara neden olur. A5 (%5 fiber oranı), düşük fiber içeriği nedeniyle matris içerisinde yük taşıma kapasitesine daha az katkıda bulunmuştur. A15 (%15 fiber oranı), daha fazla fiber katkısı nedeniyle bu kaybı bir miktar telafi etmiş olsa da matriste homojen dağılım sağlanamaması veya ara yüzey etkileşimlerinin güçlü olmaması nedeniyle eğilme mukavemeti R'ye kıyasla hala

düşüktür. UHMWPE fiberler, matris içinde yük taşıma yerine dolgu malzemesi gibi hareket etmiş olabilir. Bu durumda eğilme mukavemetinde düşüşe neden olmuş olabilir.

- A5 kodlu örneğin eğilme modülünde yaklaşık %13,2'lik bir düşüş görülmektedir. Düşük fiber oranında fiber-matris ara yüzey etkisi sınırlı kalarak düşük bağlanma kalitesine neden olabilir. Bu durum eğilme modülünde bir düşüş olarak ortaya çıkabilir. A15 kodlu ürünün eğilme modül değerinde doymamış poliestere göre %17,1'lik bir artış görülmüştür. Fiber oranı arttıkça (%15), yük taşıma kapasitesine artırarak eğilme modülünün artmasına sebep olmuş olabilir. Bu durum, fiberlerin daha rijit bir yapı sağlayarak matrise katkıda bulunduğu şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 5.11. Fiber içermeyen ve HMDA kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiği

- A5 ve A15 kodlu örneklerde kopma uzamasında sırasıyla %89,2 ve %92,5'lik büyük düşüşler görülmüştür. UHMWPE fiberler, oldukça düşük uzama yeteneğine sahip rijit malzemelerdir. Fiberler doymamış poliestere matrise eklendiğinde, matrisin kendi esnekliğini kısıtlayarak kopma sırasında uzama kapasitesini önemli ölçüde azaltır. Fiber-matris bağlanmasının yeterince güçlü olmaması, yük taşıma sırasında fiberler ve matris arasındaki uyumsuzluğu artırır. Bu, kompozitin kopmadan önce uzama kapasitesini daha da sınırlar. Fiber oranının artışı ile birlikte (A15) matristeki esneklik daha da kısıtlanır ve uzama kapasitesini A5'e kıyasla daha fazla düşürür (Şekil 5.11).

5.1.2.4. Silan kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliestere kompozitlerin mekanik özellikleri

Hazırlanan fiber içermeyen ve silan (APTMS) kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliestere esaslı kompozit örneklerine ait

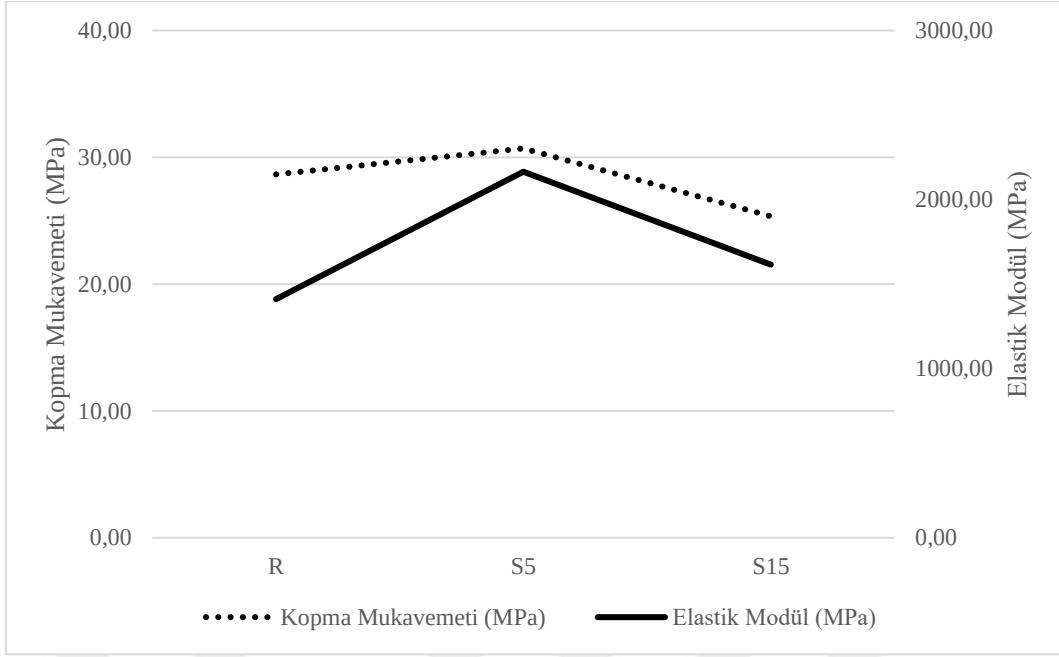
kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri, eğilme ve eğilme modül değerleri Tablo 5.5'te verilmektedir.

Tablo 5.5. Hazırlanan fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliestere esaslı kompozit örneklerine ait mekanik test sonuçları.

Malzeme	Kopma Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Kopma Uzunluğu (%)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
R	28,65	1411,11	9,38	59,2	3400
S5	30,70	2164,94	1,58	42,5	3121
S15	25,35	1614,88	2,21	24,5	4410

Fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE fiber içeren doymamış poliestere esaslı kompozit örneklerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri kıyaslamalı olarak incelendiğinde;

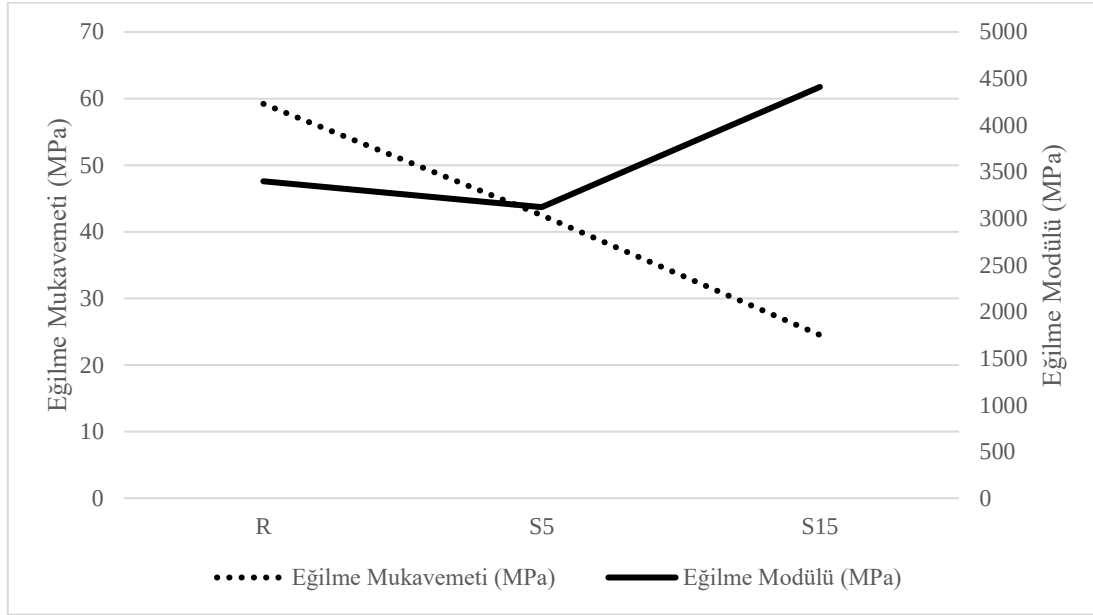
- Doymamış poliestere esaslı kompozitlere silan kaplama yöntemiyle yüzey modifiye işlemine uğratılmış UHMWPE fiber ilavesi ile kopma mukavemet değerlerinde farklı kompozisyonlarda artışlar ve düşüşler gözlenmektedir (Tablo 5.5).
- Kopma mukavemeti değerleri kıyaslandığında S5 kodlu üründe %7,2'lik artış var iken S15 kodlu üründe %11,5'lik bir düşüş meydana gelmiştir. Fiber oranı %15'e çıkarıldığında, fiberlerin yoğunluğu artarak kümelenebilir ve matris içindeki homojenlik bozulabilir. Bu durum, yükün düzgün dağıtılmasını engelleyerek kopma mukavemetinde azalmaya yol açabilir. S5 ve S15 için elastik modül değerlerinde sırasıyla %53,4 ve %14,5'lik bir artış gözlemlenmiştir. Silan kaplama ile yüzey modifikasyonu, fiberlerin matrise daha iyi entegre olmasını sağlar. UHMWPE fiberlerin doğal rijitliği, elastik modülün önemli ölçüde artmasına katkıda bulunur. Yapılan çalışmada %5 fiber oranı, rijitlik artışını optimize eden bir seviye olarak ön plana çıkmaktadır. %15 fiber içeriği (S15) ile elastik modülde artış devam etse de artış sağlansa da kopma mukavemetindeki azalma, matrisin etkinliği ve yük taşıma kapasitesinin sınırlandığını gösterir. Bu nedenle, %15 fiber oranı, yüksek rijitlik gerektiren ancak kopma dayanımı ön planda olmayan uygulamalarda daha uygun olabilir. %5 fiber içeriği (S5), hem kopma mukavemeti hem de elastik modülde dengeli bir artış sağlar ve silan kaplamanın etkisini en iyi şekilde yansıtır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği

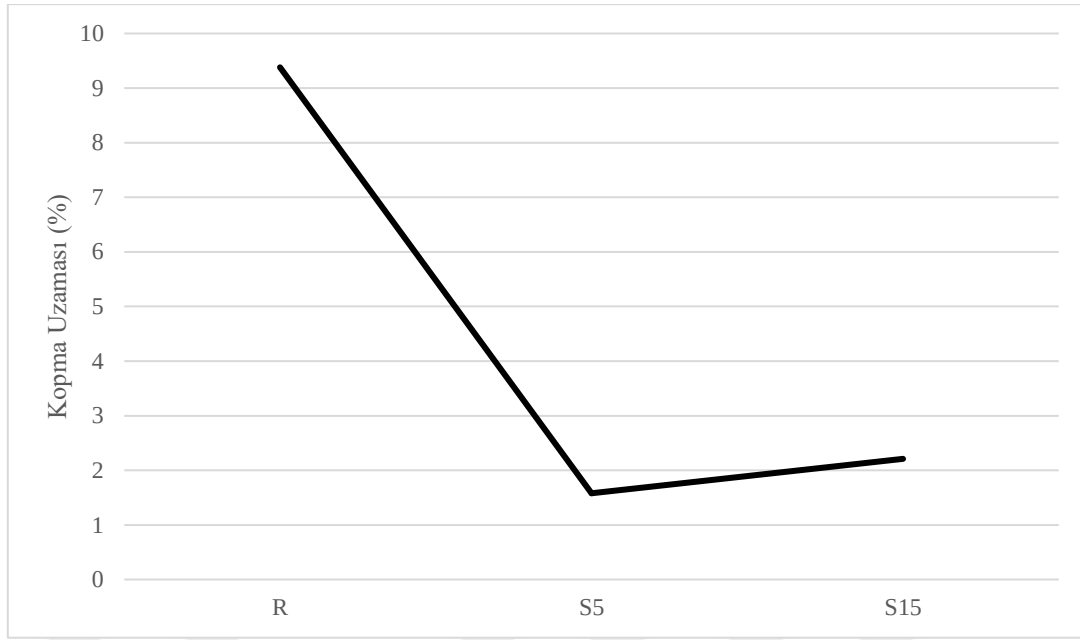
- S5 ve S15 kodlu örneklerin eğilme mukavemetleri doymamış poliestere reçineye oranla %28,2 ve %58,6'lık bir düşüş göstermiştir. %5 fiber oranında, silan kaplama ile modifiye edilmiş UHMWPE fiberlerin matrise entegrasyonu kısmen başarılıdır. Ancak fiber içeriği arttıkça, fiber-matris bağında meydana gelen olası mikro boşluklar veya zayıf bağlanma eğilme mukavemetini düşürebilir. Fiberlerin, yük taşımada matrisi destekleyememesi, eğilme mukavemetindeki azalmaya neden olur. %15 fiber içeriğinde, fiberler arası yakınlık artar ve homojen bir yük transferi sağlanamaz. Bu da matrisin mekanik özelliklerinin bozulmasına yol açabilir. Ayrıca, yüksek fiber içeriği, gerilmenin birikmesine neden olarak çatlak oluşumunu hızlandırabilir. Eğilme modüllerinde S5'te %8,2'lik düşüş gözlemlenirken S15'te %29,7'lik bir artış tespit edilmiştir. %5 fiber oranında eğilme modülündeki düşüş silan kaplamanın fiber-matris bağlanmasını tamamen güçlendirememesinden kaynaklanabilir. Ayrıca düşük fiber oranı, fiberlerin sertliğinin matrise etkisini sınırlandırır. %15 fiber içeriğinde, UHMWPE fiberlerin yüksek elastik modülü etkisini gösterir (Şekil 5.13). Bu fiberler, matrisin rijitliğini artırarak eğilme modülünde anlamlı bir artış sağlar. Ancak bu artış, eğilme mukavemeti üzerindeki olumsuz etkileri telafi edemez. Silan kaplama, fiber-matris ara yüzeyinde bağlanmayı iyileştirse de kaplama işleminin etkinliği ve homojenliği, mekanik özelliklerdeki iyileşmeyi sınırlamış olabilir. Düşük fiber oranı (%5), eğilme mukavemeti ve modülü arasında denge sağlarken yüksek fiber oranı (%15), matristeki homojenliği bozarak eğilme mukavemetinde ciddi

düşüşe neden olmuştur. Ancak %15 fiber oranında, fiberlerin sertliği baskın hale gelmiş ve bu da eğilme modülünde artış sağlamıştır.



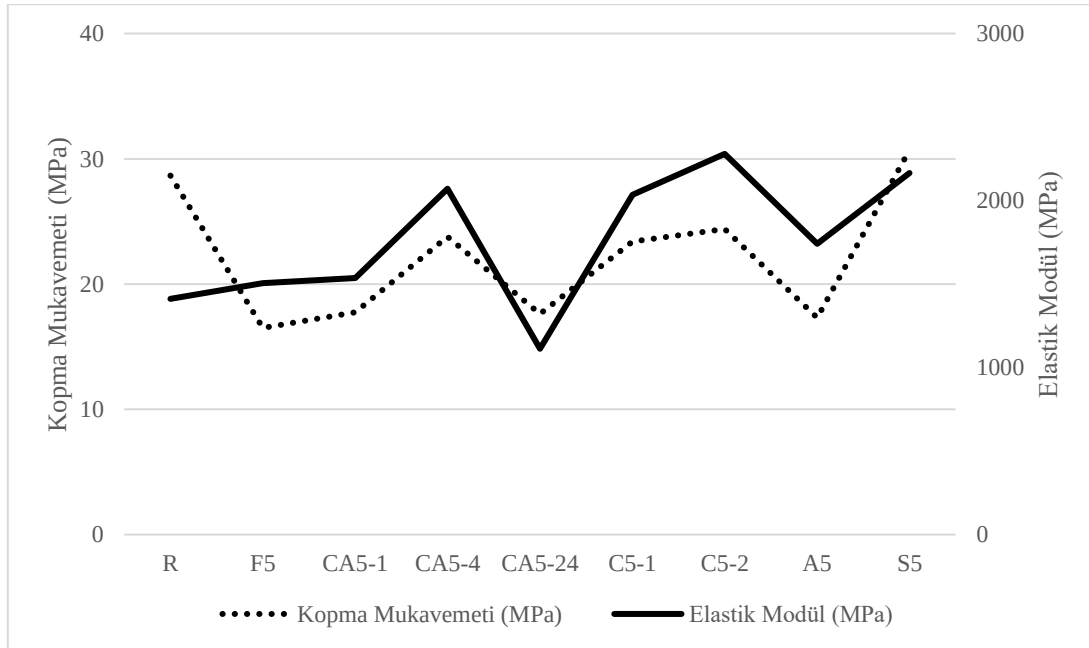
Şekil 5.13. Fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği

- Şekil 5.14 te yer alan kopma uzaması grafiğinde de görüldüğü gibi S5 ve S15 kodlu örneklerde kopma uzamasında sırasıyla %83,16 ve %76,38'lik düşüşler gözlemlenmiştir. UHMWPE fiberleri, düşük uzama yeteneğine sahip rijit malzemelerdir. Bu fiberler, doymamış poliestere matrisi ile birleştiğinde, matrisin esnekliğini kısıtlayarak kompozitin uzama kapasitesini önemli ölçüde azaltır. Elde edilen veriler ışığında silan kaplama ile fiberler arasında güçlü bir bağ kurulsa da bu bağ fiberlerin elastikiyetini sınırlayarak kompozitin uzama kapasitesini düşürdüğü yönünde yorumlanabilir.

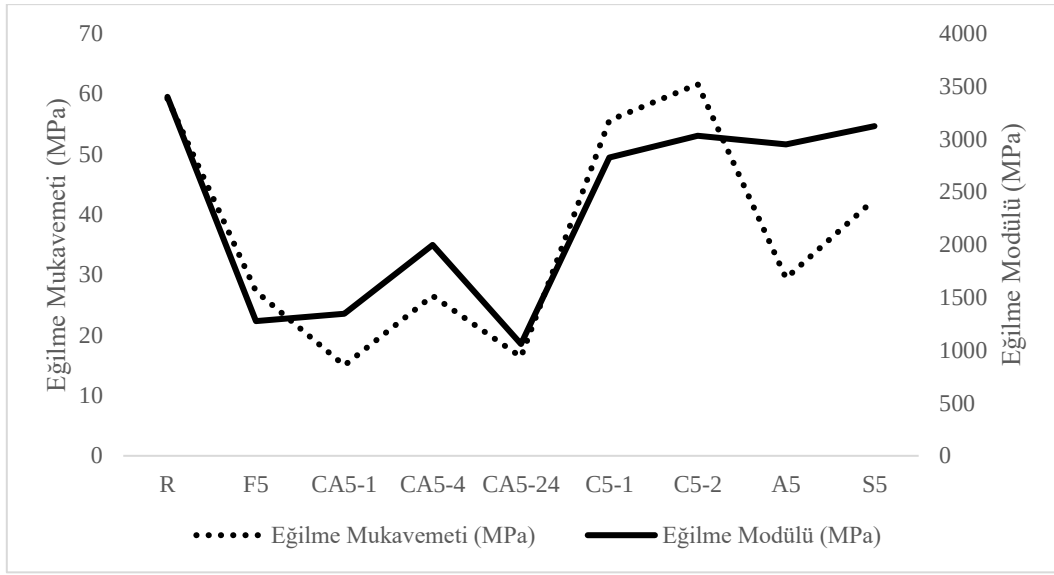


Şekil 5.14. Fiber içermeyen ve silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiği

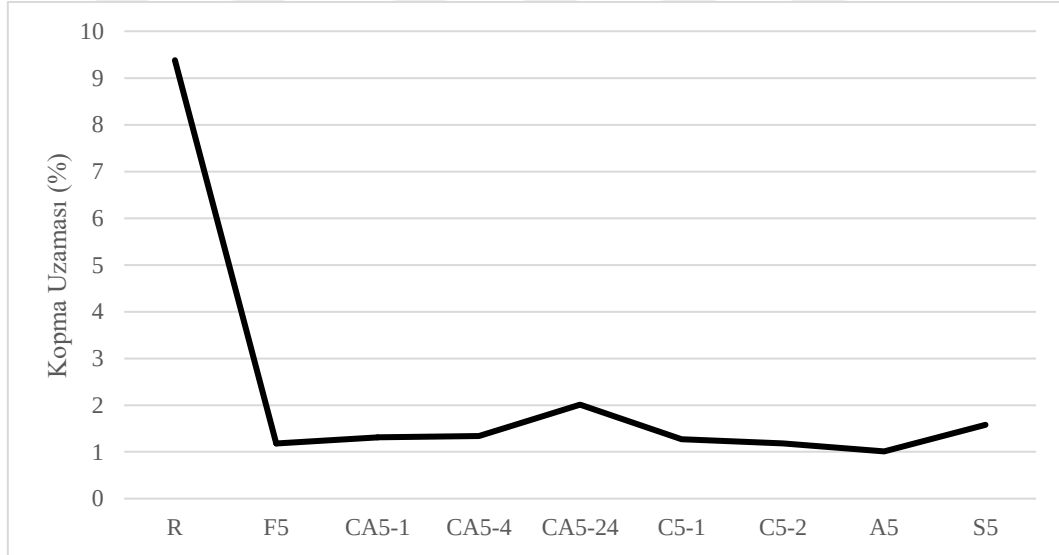
Detayları yukarıda verilen yüzey işlemi uygulanmış ve uygulanmamış, ağırlıkça %5 fiber içeren poliester reçinelerinin mekanik test sonuçları, kompozitlerin performansını değerlendirmek amacıyla elde edilen veriler ışığında aşağıda sunulmaktadır. Bu grafikler, farklı yüzey işlemlerinin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde özetlemektedir.



Şekil 5.15. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %5 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği

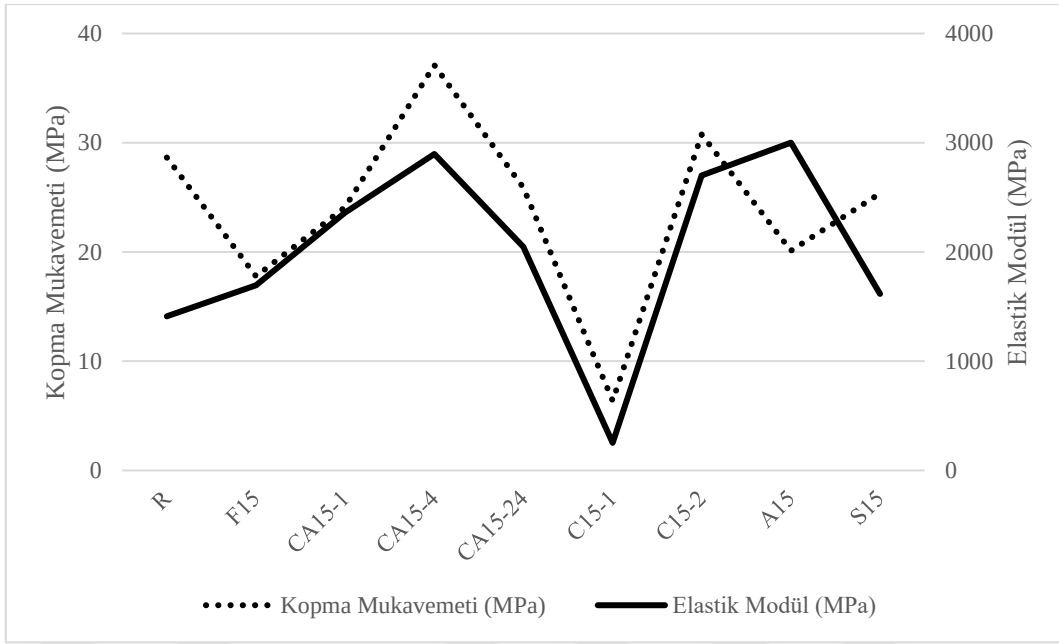


Şekil 5.16. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %5 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reçine kompozitlerine ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği

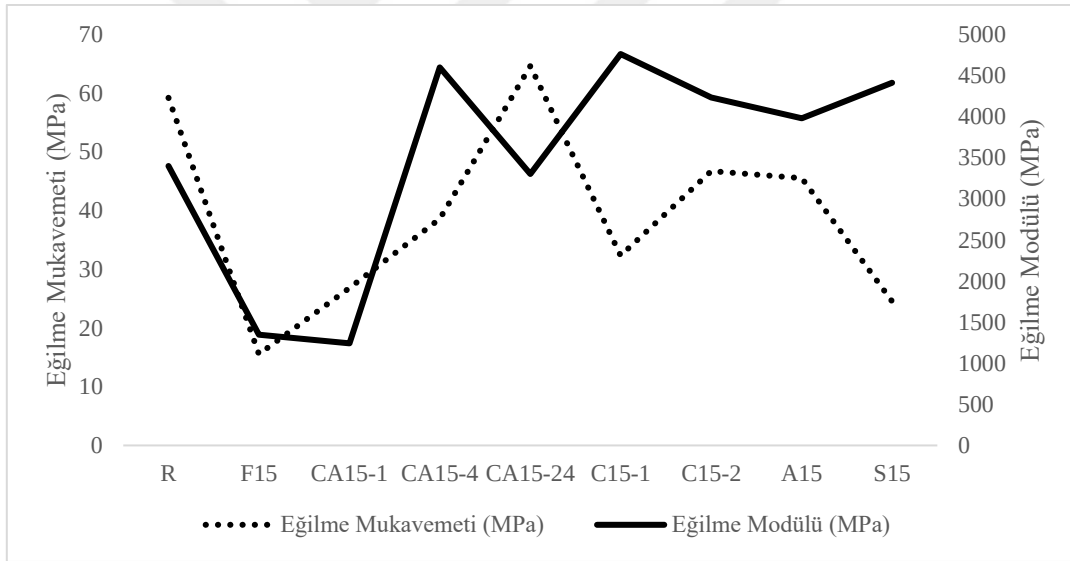


Şekil 5.17. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %5 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliestere reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiği

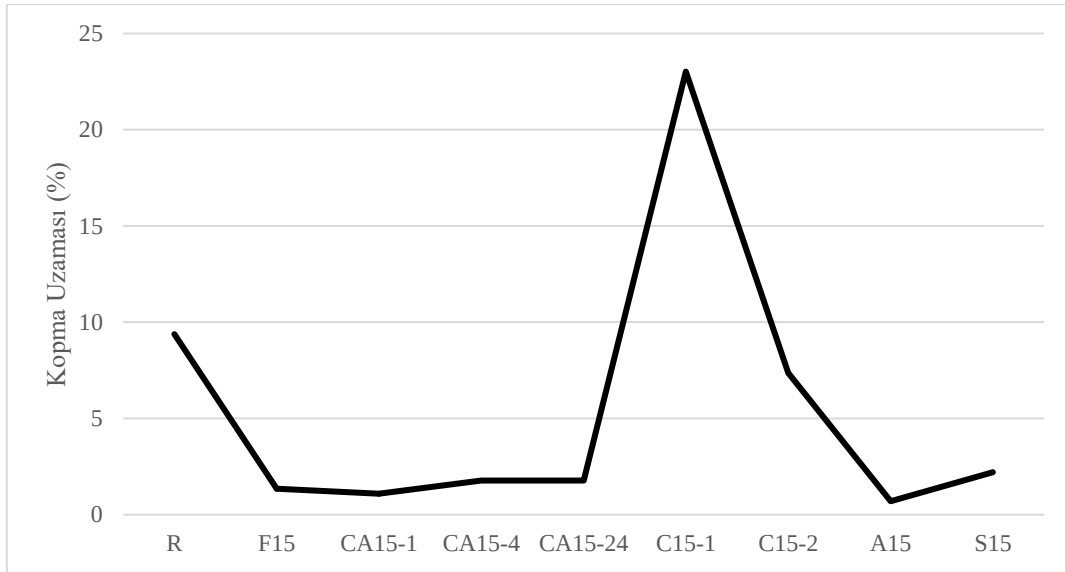
Yukarıda detaylı olarak verilen bilgilere dayanarak, yüzey işlemi uygulanmış ve uygulanmamış, ağırlıkça %15 fiber içeren poliestere reçinelerinin mekanik test sonuçları aşağıda özetlenen grafiklerde sunulmaktadır. Bu grafikler, farklı fiber oranlarının ve yüzey işlemlerinin poliestere reçinelerinin mekanik performansına olan etkilerini kapsamlı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 5.18. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %15 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait kopma mukavemeti ve elastik modül grafiği



Şekil 5.19. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %15 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği



Şekil 5.20. Fiber içermeyen ve ağırlıkça %15 UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen poliester reçine kompozitlerine ait kopma uzaması grafiği

5.1.3. Yüzeyi modifiye edilmemiş/edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin yoğunluk değerleri

Hazırlanan fiber içermeyen, yüzeyi modifiye edilmemiş ve edilmiş UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait yoğunluk değerleri Tablo 5.6'da verilmektedir.

- Sonuçlar incelendiğinde; yüzey modifikasyon işlemi uygulanmamış %5 UHMWPE içeren kompozitlerin yoğunlukları, saf poliester reçinenin yoğunluğuna daha yakındır. Ancak %15 UHMWPE içeren kompozitlerin yoğunluğu, daha yüksek miktarda UHMWPE fiber içerdiğinden daha düşük ölçülmüştür.
- CA5 kodlu (%5 UHMWPE içeren) örneklerde, yüzey modifikasyon süresi arttıkça (1 saatten 24 saate), yoğunluk değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. En yüksek yoğunluk artışı, %1,48 ile CA5-1'den CA5-24'e geçişte görülmüştür. Bu artış, kromik asit ile yapılan uzun süreli modifikasyonun fiber-matris etkileşimini güçlendirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, CA15 (%15 UHMWPE içeren) kodlu örneklerde yoğunluk değerleri CA5 serisine kıyasla daha düşük olup, modifikasyon süresine bağlı olarak daha sınırlı bir değişim göstermiştir. Bu durum, yüksek oranda fiber içeriğinin reçinenin yoğunluk etkisini baskıladığını düşündürmektedir.
- Korona modifikasyonu yapılan örneklerde, yoğunluk değerleri saf poliester reçineye göre düşüş göstermiştir. C5 kodlu (%5 UHMWPE) örneklerde modifikasyonun birinci ve ikinci geçişleri arasında yoğunluk değişimi %0,7'den daha düşük bir farkla sınırlıdır. Bununla

birlikte, C15 kodlu (%15 UHMWPE) örneklerde, fiber oranının artmasıyla yoğunluk daha belirgin şekilde düşerek ikinci geçişte %1,01 azalma göstermiştir.

Tablo 5.6. Fiber içermeyen, yüzeyi modifiye edilmemiş ve edilmiş UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait yoğunluk test sonuçları.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)
R	1,200
U	0,970
F5	1,195
F15	1,182
CA5-1	1,198
CA5-4	1,198
CA5-24	1,197
CA15-1	1,166
CA15-4	1,166
CA15-24	1,167
C5-1	1,181
C5-2	1,180
C15-1	1,170
C15-2	1,169
A5	1,180
A15	1,170
S5	1,176
S15	1,170

- HMDA (A) ve silan (S) modifikasyonu uygulanmış UHMWPE fiberler ile hazırlanan yapılan örneklerde, A5'in yoğunluğu 1,1801 g/cm³ olarak tespit edilirken, S5 kodlu örneklerde bu değer daha düşük, 1,1756 g/cm³ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, A5 ve S15 kodlu örnekler arasında da silan modifikasyonunun yoğunluk üzerindeki etkisinin daha az olduğu görülmektedir.

5.1.4. Yüzeyi modifiye edilmemiş/edilmiş UHMWPE fiber ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin sertlik değerleri

Hazırlanan fiber içermeyen, yüzeyi modifiye edilmemiş ve edilmiş UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait sertlik değerleri Tablo 5.7'de verilmektedir.

- Yüzey modifikasyon işlemi uygulanmamış UHMWPE ile hazırlanan F5 kodlu örneklerde sertlik 80 iken, %15 fiber içeren F15 kodlu örnekte 81 olarak ölçülmüştür. Bu durum, fiberlerin matrise katkı yaparak kompozitin sertliğini artırdığını gösterir.
- %15 fiber içeren CA15 kodlu kompozit örneklerinde modifikasyon süresine bağlı olarak (1 s, 4 s, 24 s) sertlik değerinin 83'ten 84'e çıktığı gözlenmektedir. Bu, kromik asit işleminin

fiber-matris arayüzündeki bağlanmayı güçlendirdiğini ve daha rijit bir yapı sağladığını gösterir.

- Korona ile modifiye edilen kompozitlerde, sertlik değerleri düşüş göstermektedir. Özellikle ikinci geçişte (C5-2) sertlik değeri 77 olarak ölçülmüştür. Bu durum, korona işleminin yüzey enerjisini artırmasına rağmen mekanik bağlanmada beklenen kadar etkili olmadığı şeklinde yorumlanabilir.
- A5 ve A15 kodlu örneklerde sertlik değerini önemli ölçüde artırmıştır. Bu veriler kimyasal bağlanma yoluyla matris-fiber arayüzünde güçlü bir etkileşim sağladığını göstermektedir.
- Silan ile yapılan modifikasyon (S5 ve S15 kodlu örnekler), yüzey modifikasyonsuz kompozitlere (F5 ve F15 kodlu örnekler) göre sertliği artırmıştır. Silan kaplama yönteminin fiber-matris uyumunu geliştirdiğini ve sertliği artırdığını söylenebilir.

Tablo 5.7. Fiber içermeyen, yüzeyi modifiye edilmemiş ve edilmiş UHMWPE fiber içeren doymamış poliester reçine esaslı kompozit örneklerine ait sertlik test sonuçları.

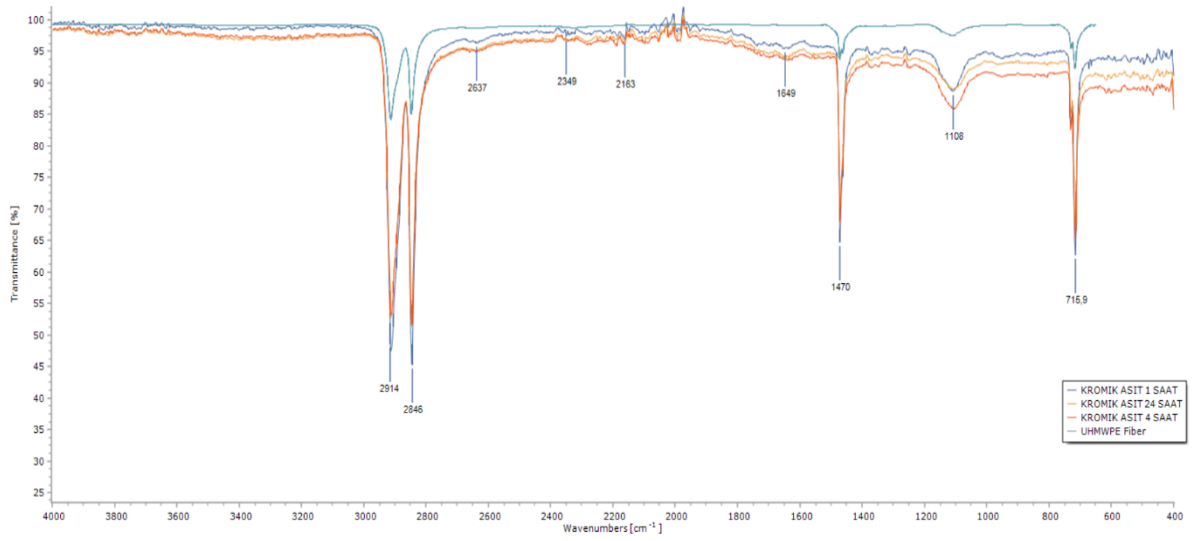
Malzeme	Sertlik (Shore D)
R	78
F5	80
F15	81
CA5-1	81
CA5-4	82
CA5-24	83
CA15-1	83
CA15-4	84
CA15-24	84
C5-1	78
C5-2	77
C15-1	79
C15-2	79
A5	84
A15	85
S5	81
S15	82

5.2. Yüzeyi Modifiye Edilmemiş/Edilmiş UHMWPE Fiber İlavesiyle Elde Edilen Polimer Kompozitlerin FTIR Sonuçları

Bu başlık altında, yüzeyi modifiye edilmemiş ve modifiye edilmiş UHMWPE fiberlerinin ilavesiyle elde edilen polimer kompozitlerin FTIR sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu analizler, UHMWPE fiberlerin yapısındaki değişiklikleri ortaya koymaktadır.

5.2.1. Kromik asit ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları

Bu çalışmada, yüzey modifikasyonuna tabi tutulmamış ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberler ile farklı sürelerde (1, 4 ve 24 saat) kromik asit (H_2CrO_4) ile yüzey modifikasyonu uygulanmış fiberlerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri gerçekleştirilmiştir. FTIR spektrumları, yüzey kimyasında meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla incelenmiş ve modifikasyon süresine bağlı olarak karakteristik fonksiyonel grupların oluşumu ve pik değişimleri değerlendirilmiştir.



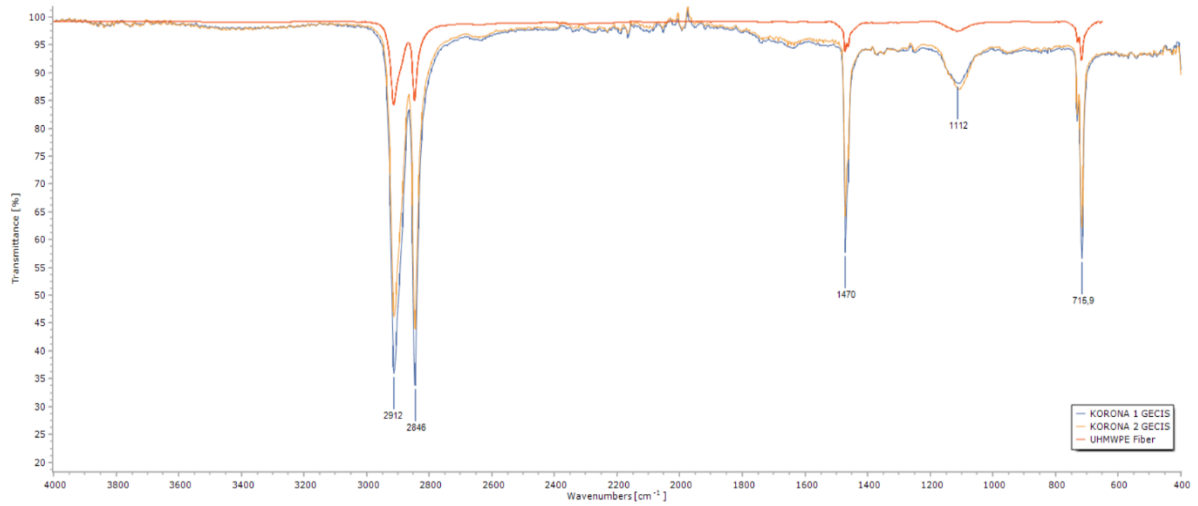
Şekil 5.21. Saf UHMWPE fiber ve kromik asit ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR spektrumları

Kromik asit ile işlem gören fiberlerde 2637 cm^{-1} ve 2349 cm^{-1} 'de yüzeyde değişime kanıt yeni pikler belirmiştir. 1649 cm^{-1} 'de gözlenen karbonil pikleri, yüzeyde aldehit, keton veya karboksilik asit türevlerinin oluştuğunu işaret etmektedir. 2163 cm^{-1} 'de ortaya çıkan pik, $C\equiv C$ (alkin) veya $C\equiv N$ (nitril) gruplarına bağlı olduğu ve oksidatif parçalanma sonucu konjuge yapıların oluştuğu değerlendirilmektedir.

FTIR analizleri, kromik asit ile işlem gören UHMWPE fiberlerin oksidatif değişimlere uğradığını ve yüzey hidrofilikliğin arttığını göstermektedir. İşlem süresi arttıkça fonksiyonel grup yoğunluğu artmış, 24 saatlik işlem en yüksek oksidasyon seviyesini ortaya koymuştur. Bu değişimler, UHMWPE fiberlerin ileri uygulamalar için yüzey enerji seviyesini artırarak bağlanma kapasitesini geliştirmektedir.

5.2.2. Korona ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları

Bu çalışmada, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberlere uygulanan korona yüzey işleminin kimyasal etkileri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile incelenmiştir. Fiberler, korona işlemine farklı maruz kalma sürelerine göre (1 geçiş ve 2 geçiş) analiz edilerek yüzeyde meydana gelen fonksiyonel grup değişimleri belirlenmiştir.



Şekil 5.22. Saf UHMWPE fiber ve korona yöntemiyle yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR spektrumları

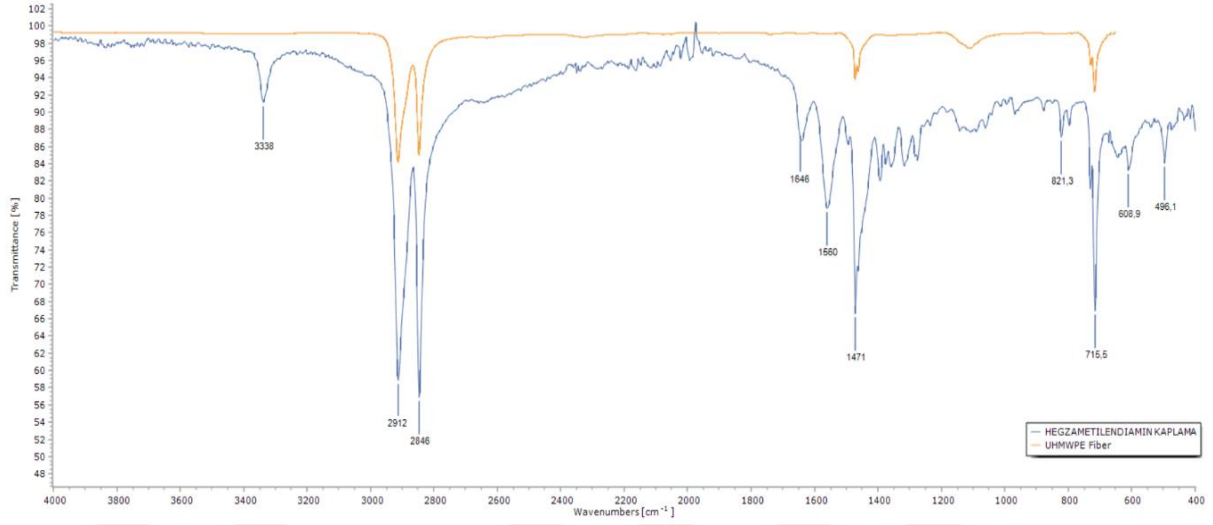
Korona işlemine maruz bırakılan fiberlerde Kromik asit ile işlem gören fiberlere benzer şekilde 2637 cm^{-1} ve 2349 cm^{-1} 'de yüzeyde değişime kanıt yeni pikler belirmiştir. 1649 cm^{-1} 'de gözlenen karbonil pikleri, yüzeyde aldehit, keton veya karboksilik asit türevlerinin oluştuğunu işaret etmektedir. 2163 cm^{-1} 'de ortaya çıkan pik, $\text{C}\equiv\text{C}$ (alkin) veya $\text{C}\equiv\text{N}$ (nitril) gruplarına bağlı olduğu ve oksidatif parçalanma sonucu konjuge yapıların oluştuğu değerlendirilmektedir.

FTIR analizleri, korona işleminin UHMWPE fiberlerin yüzey kimyasında oksidatif değişimlere neden olduğunu göstermektedir. Özellikle ikinci geçişte hidrofilik grupların yoğunluğu artmış, yüzey enerjisinin yükseldiği tespit edilmiştir. Bu değişimler, UHMWPE fiberlerin yapışma kabiliyeti ve ıslanabilirliğini artırarak, kompozit üretimi, kaplama ve biyomedikal uygulamalar gibi ileri yüzey işlemlerinde avantaj sağlamaktadır.

5.2.3. Hekzametilendiamin kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları

Bu çalışmada, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberlerin yüzeyine uygulanan hekzametilendiamin (HMDA) kaplamanın kimyasal etkileri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile incelenmiştir. Kaplamasız UHMWPE fiber ile HMDA

kaplamalı fiberlerin spektrumları karşılaştırılarak yüzeyde meydana gelen kimyasal değişimler değerlendirilmiştir.



Şekil 5.23. Saf UHMWPE fiber ve hekzametilendiamin kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR spektrumları

FTIR analizi, HMDA kaplamanın UHMWPE fiber yüzeyinde belirgin kimyasal değişikliklere yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu durum, kaplamanın fiber yüzeyinde bir tabaka oluşturduğunu ve kimyasal değişikliklere neden olduğunu göstermektedir.

3338 cm^{-1} 'de gözlenen N-H gerilme titreşimi, HMDA kaplamanın yüzeye başarılı şekilde bağlandığını ve amin gruplarının UHMWPE yüzeyiyle etkileşime girdiğini göstermektedir.

1646 cm^{-1} 'deki karbonil/amid ve 1560 cm^{-1} 'deki N-H bükülme titreşimleri, HMDA kaplamanın yüzeye tutunduğunu ve kimyasal etkileşimlerin gerçekleştiğini kanıtlamaktadır.

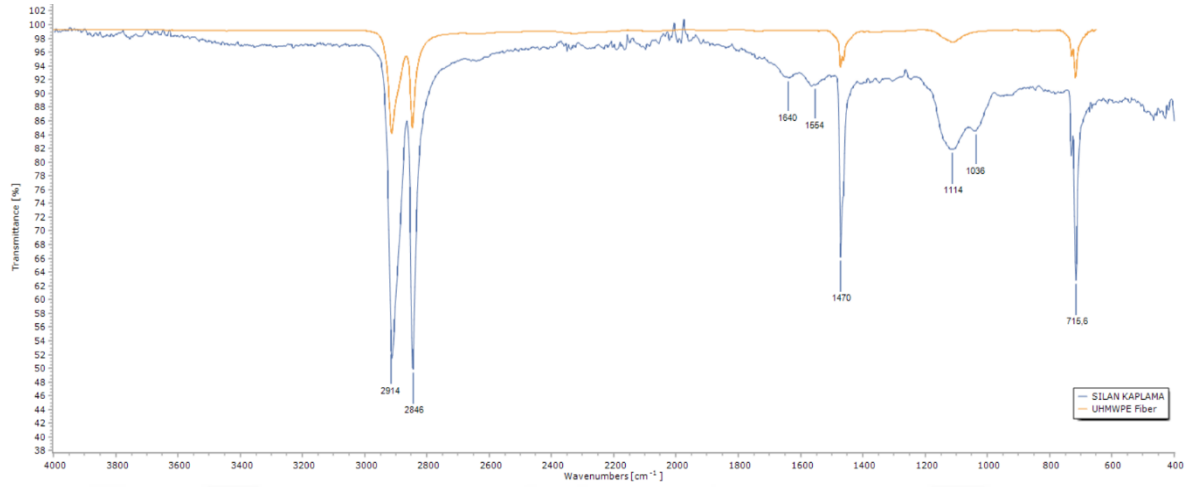
Ayrıca, 821,3 cm^{-1} , 608,9 cm^{-1} ve 496,1 cm^{-1} 'de gözlenen yeni pikler, HMDA'nın fiber yüzeyi ile kimyasal etkileşime girdiğini ve yüzey modifikasyonunun gerçekleştiğini doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, HMDA kaplamanın UHMWPE fiber yüzeyine başarılı şekilde bağlandığı, yüzey enerjisini artırarak kimyasal modifikasyon sağladığı belirlenmiştir. Bu değişimler, fiberlerin ıslanabilirliğini ve yapışma özelliklerini geliştirmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

5.2.4. Silan kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR sonuçları

Bu çalışmada, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberlerin yüzeyine uygulanan silan kaplamanın kimyasal etkileri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

(FTIR) ile incelenmiştir. Kaplamasız UHMWPE fiber ile silan kaplamalı fiberlerin spektrumları karşılaştırılarak yüzeyde meydana gelen kimyasal değişimler değerlendirilmiştir.



Şekil 5.24. Saf UHMWPE fiber ve silan kaplama ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış UHMWPE ilaveli poliester kompozitlerin FTIR spektrumları

Silan kaplama ile spektruma yeni fonksiyonel gruplar eklenmiştir. 1036 cm^{-1} 'de belirginleşen Si-O-Si titreşimleri, siloksan yapısının varlığını gösterirken, 1640 cm^{-1} ve 1554 cm^{-1} 'deki pikler Si-OH ve hidrofilik grupların oluşumuna işaret etmektedir. Bu değişimler, silan kaplamanın fiber yüzeyine kimyasal olarak bağlandığını ve hidrofilik özellik kazandırdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, silan kaplamanın UHMWPE fiber yüzeyinde belirgin kimyasal değişimlere neden olduğu belirlenmiştir. Si-O-Si ve Si-OH gruplarının varlığı kaplamanın başarılı şekilde bağlandığını, C-H titreşimlerindeki değişimler yüzey enerjisinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, silan kaplamanın UHMWPE fiberlerin yapışma ve yüzey modifikasyonu özelliklerini geliştirmede etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doymamış poliestер esaslı kompozitler, yüzeyi modifiye edilmemiş ve çeşitli yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmış UHMWPE fiberlerle takviye edilerek üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yüzey modifikasyon işlemleri, mekanik özellikler üzerindeki etkileri açısından detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda belirtilmiştir:

- Yüzey modifikasyonu yapılmamış fiberler, düşük kopma mukavemeti ve elastik modül değerleri sergilemiştir. %15 oranında yüzeyi modifiye edilmemiş fiber içeren kompozitlerde, fiber-matris etkileşiminin yetersizliği nedeniyle kopma mukavemeti %38 oranında azalmıştır.
- Kromik asit ile 4 saat yüzey modifikasyonu yapılan %15 fiber içeriğine sahip kompozitlerde kopma mukavemetinde %29 artış gözlenmiştir. Bu durum, kromik asidin fiber yüzeyinde hidrojen bağları ve polar gruplar oluşturarak fiber-matris ara yüzey etkileşimini güçlendirdiğini göstermiştir. Bu sonuç, modifikasyon işlemlerinin fiber-matris bağımlı güçlendirerek kopma direncini artırabildiğini göstermektedir.
- Korona işlemi uygulanan %15 oranındaki fiber içeriğine sahip kompozitlerde kopma mukavemetinde %7,7 oranında artış sağlanmıştır. Ancak işlem sayısının artması kopma mukavemetini olumsuz etkilemiştir.
- Silan kaplama yöntemiyle modifiye edilmiş %5 fiber içeriğine sahip kompozitlerde elastik modül %53 oranında artırılmıştır. Bu yöntem, düşük fiber oranlarında hem rijitliği hem de mekanik dayanımı dengeli şekilde iyileştirmiştir.
- Korona işlemi ile modifiye edilen fiberlerin ağırlıkça %15 ilavesiyle üretilen poliestер kompozitler, elastik modül üzerinde %90 artış sağlamış, ancak kopma uzamasında %21 düşüş gözlenmiştir. Bu, yüzey modifikasyonunun esnekliği azaltan bir etki yarattığını göstermektedir.
- Silan kaplama yöntemiyle %5 fiber içeriğine sahip kompozitler, kopma dayanımında önemli iyileşmeler göstermiştir. Ancak %15 oranındaki fiberlerde, homojenliğin bozulması nedeniyle kopma dayanımında düşüş gözlenmiştir.
- Yüksek fiber oranlarında, homojen dağılımın sağlanamaması ve fiberlerin kümelenmesi, kopma mukavemeti ve esneklik üzerinde olumsuz etkiler yaratmıştır.
- Bu çalışma, yüzey modifikasyon işlemlerinin doymamış poliestер esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmede kullanılabilecek etkili yöntemler sunduğunu göstermiştir.

- Modifikasyon süreleri, fiber oranları ve yüzey işlemleri optimize edilerek yüksek elastik modül, eğilme direnci ve kopma mukavemeti sunan kompozitler üretilebileceği ortaya konmuştur.
- Düşük maliyetli ve uygulanabilir yöntemlerle geliştirilmiş bu kompozitler, sanayide daha az gevrek, yüksek dayanımlı ve katma değeri yüksek malzemelerin üretimine katkı sağlamaktadır.
- Yoğunluk değişimleri, kullanılan fiber oranına ve yüzey modifikasyon yöntemine göre önemli farklılıklar göstermektedir. Kromik asit modifikasyonu, uzun sürelerde yoğunlukta artış sağlarken, korona ve silan gibi yöntemler yoğunluk üzerinde daha sınırlı etkiler yaratmaktadır. Fiber oranı arttıkça yoğunluk genellikle azalma eğilimindedir, ancak bu durum modifikasyon yöntemi ve süresiyle dengelenebilmektedir.
- Poliester reçine esaslı UHMWPE fiber içeren kompozitlerde, fiber oranı ve yüzey modifikasyonunun malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği açıkça görülmektedir. Sertlik değerleri açısından HMDA kaplama ve kromik asit işlemleri en başarılı sonuçları verirken, korona işlemi için geliştirme fırsatları bulunmaktadır. Bu tür çalışmalar, kompozit malzemelerin istenilen özelliklere uygun şekilde tasarlanmasına önemli katkılar sağlayabilir.
- Yapılan çalışma, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen fiberleri ve doymamış polyester reçinesi kompozitlerinin yüzey işlemleriyle etkileşiminin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini derinlemesine inceleyerek, bu alandaki literatür boşluğunu doldurmaktadır. Bu araştırma, söz konusu malzemelerin yüzey modifikasyonlarının kompozitlerin performansına katkı sağlama potansiyelini ortaya koymakta olup, gelecekteki çalışmalara rehberlik edebilir ve yeni araştırma yolları için temel oluşturabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Rorrer, G. L., & McCaskey, T. A. (2011). Monomer and polymer structures: Synthesis, properties, and applications. *Journal of Polymer Science*, 49(6), 1059-1070.
- [2] Chanda, M., & Roy, S. K. (2007). *Introduction to polymer science and engineering*. CRC Press.
- [3] Békési, L., & Berczi, L. (2012). Dielectric properties of polymers: Influence of temperature, frequency, and moisture content. *Polymer Engineering and Science*, 52(4), 753-759.
- [4] Kurt, A. (2009). ATRP metodu ile hazırlanan üç kollu polimerlerin dielektrik özellikleri. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 2(1), 47-55.
- [5] Akdoğan, E. (2019). *Polimer esaslı kompozit malzemelere farklı dolgu maddelerinin ilavesinin mekanik ve ısı özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi*.
- [6] Özşahin, B., Mülayim, A., & Arkoç, O. (2015). Betonarme yapı elemanlarında lif takviyeli polimerlerin kullanımı. *IX Sinan Symposium Book of Proceedings*, 109-115, Edirne.
- [7] Choy, C. L. (1977). Thermal conductivity of polymers. *Polymer*, 18(10), 984-1004.
- [8] Brinson, H. F., Brinson, L. C., Brinson, H. F., & Brinson, L. C. (2015). Characteristics, applications and properties of polymers. In *Polymer engineering science and viscoelasticity: An introduction* (pp. 57-100).
- [9] Landel, R. F., & Nielsen, L. E. (1993). *Mechanical properties of polymers and composites*. CRC Press.
- [10] Petrudi, A. M., Vahedi, K., Rahmani, M., & Petrudi, M. M. (2020). Numerical and analytical simulation of ballistic projectile penetration due to high velocity impact on ceramic target. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(54), 226-248.
- [11] Sperling, L. H. (2006). *Introduction to physical polymer science* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [12] Hou, X., & Li, X. (2018). Thermoplastics and thermosets for advanced materials: An overview. *Journal of Advanced Materials*, 50(12), 234-245.
- [13] Choi, S. H., & Kim, M. H. (2017). Thermoplastic and thermoset polymers: Structure, properties, and applications. *Journal of Polymer Science*, 55(7), 2459-2471.
- [14] Monteiro, M. S., & Silva, A. F. (2015). Thermoset and thermoplastic resins in the automotive industry. *Polymer Composites*, 36(4), 741-755.
- [15] Rodríguez, M. A., & Méndez, M. R. (2014). Thermoplastics versus thermosets: Applications in the design and manufacturing of composite materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 82, 1-9.
- [16] Baker, A. A., & Jones, A. D. (2017). Introduction to composite materials. *Journal of Composite Materials*, 51(4), 311-328.
- [17] Biron, M. (2003). *Thermosets and composites*. Elsevier.

- [18] Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: Science and engineering* (3rd ed.). Springer.
- [19] Piggott, M. S. (2013). *Composite materials: Properties and applications*. Butterworth-Heinemann.
- [20] Rout, P. K., & Hazra, S. (2020). *Handbook of composite materials: Fundamentals, types, and applications*. CRC Press.
- [21] Biron, M. (2012). *Thermoplastics and thermoplastic composites*. William Andrew.
- [22] Woodhams, R. T. (1985). History and development of engineering resins. *Polymer Engineering & Science*, 25(8), 446-452.
- [23] Aoyama, M., & Tanaka, Y. (2016). History of polyester resin development for synthetic fibers and its forefront. In *High-Performance and Specialty Fibers: Concepts, Technology and Modern Applications of Man-Made Fibers for the Future* (pp. 67-80).
- [24] McIntyre, J. E. (2003). The historical development of polyesters. In *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters* (Vol. 2, p. 1).
- [25] Higgins, C., Cahill, J., Jolanki, R., & Nixon, R. (2020). Polyester resins. In *Kanerva's Occupational Dermatology* (pp. 809-819).
- [26] Ezeh, E. M. (2024). Advances in the development of polyester resin composites: A review. *World Journal of Engineering*.
- [27] Hunt, T. (1980). Polyester resin chemistry. In *Developments in Reinforced Plastics—1: Resin Matrix Aspects* (pp. 59-86).
- [28] Jones, F. R. (2017). Unsaturated polyester resins. In *Brydson's Plastics Materials* (pp. 743-772). Butterworth-Heinemann.
- [29] Kanerva, L., Tarvainen, K., Estlander, T., & Jolanki, R. (2000). Polyester resins. In *Handbook of Occupational Dermatology* (pp. 602-606). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [30] Dholakiya, B. (2012). Unsaturated polyester resin for specialty applications. *Polyester*, 7(Sep), 167-202.
- [31] Mudu, M. (2010). *Organik-inorganik hibrid takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [32] Gupta, A. K., & Wells, S. (2004). Surface-modified superparamagnetic nanoparticles for drug delivery: Preparation, characterization, and cytotoxicity studies. *Nanobioscience*.
- [33] Şengel-Türk, C. T., & Haşçıçek, C. (2009). Polimerik nanopartiküler ilaç taşıyıcı sistemlerde yüzey modifikasyonu. *Ankara Ecz. Fak. Derg.*, 47(4), 542-559.
- [34] Akarsu, U. (2011). *Biyobozunur polimer nanokompozit geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi).
- [35] Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L., & Li, L. (2009). Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in Polymer Science*, 34(12), 1348-1368.

- [36] Eren, S., Poyraz, B., Gokce, N., Sarnandar, A., Aykanat, B., & Subasi, S. (2018). Investigation of the initiator effect on mechanical, thermal and chemical properties of polyesters used composite material production.
- [37] Wu, T., Hu, H. L., Du, Y. P., Jiang, D., & Yu, B. H. (2014). Discrimination of thermoplastic polyesters by MALDI-TOF MS and Py-GC/MS. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 441-453.
- [38] Mohammad, N. A. B. (2007). *Synthesis, characterization and properties of the new unsaturated polyester resins for composite applications*. MARA University of Technology, 45-56.
- [39] Penczek, P., Czub, P., & Pielichowski, J. (2005). Unsaturated polyester resins: Chemistry and technology. *Crosslinking in Materials Science*, 1-95.
- [40] Davallo, M., & Pasdar, H. (2009). Comparison of mechanical properties of glass-polyester composites formed by resin transfer molding and hand lay-up technique. *International Journal of ChemTech Research*, 1(3), 470-475.
- [41] Durgun, İ. (2014). El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi. *7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara*, 45-52.
- [42] Durgun, İ. (2014). Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parça üretimi. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, 26-27.
- [43] Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing: Materials, product and process engineering*. CRC Press.
- [44] Ersoy, M. S. (2005). *Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş.
- [45] Topbaşoğlu, M. C., Kaboğlu, C., & Keleş, M. (2023). RTM yönteminde jelkot ve laminasyon planının nihai ürünün mekanik özelliklerine etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 772-779.
- [46] Laurenzi, S., & Marchetti, M. (2012). Advanced composite materials by resin transfer molding for aerospace applications. *IntechOpen*, 198-226.
- [47] Bulut, M. (2014). *Türkiyede kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [48] ARICASOY, O. (2006). Kompozit sektör raporu. *İTO-0017049, İstanbul Ticaret Odası Yayınları*, 25-29.
- [49] İNKAYA, S. (2011). Dünya’da ve Türkiye’de kompozit sektörü. *Mühendis ve Makina*, 52(613), 31-34.
- [50] Leblebiciler, B. (2022). *Pultrüzyon yöntemi ile üretimi yapılan kompozit malzemelerin çevre koşulları altındaki performanslarının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).
- [51] Canbaloğlu, C. D. (2010). *Çok yüksek yoğunluklu polietilenin (UHMWPE) talaşlı işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin araştırılması ve optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- [52] Patil, N. A., Njuguna, J., & Kandasubramanian, B. (2020). UHMWPE for biomedical applications: Performance and functionalization. *European Polymer Journal*, 125, 109529.
- [53] Kurtz, S. M. (2004). *UHMWPE handbook*.
- [54] Spiegelberg, S., Kozak, A., & Braithwaite, G. (2016). Characterization of physical, chemical, and mechanical properties of UHMWPE. In *UHMWPE Biomaterials Handbook* (pp. 531-552). William Andrew Publishing.
- [55] Kurtz, S. M. (2016). The origins of UHMWPE in total hip arthroplasty. In *UHMWPE Biomaterials Handbook* (pp. 33-44). William Andrew Publishing.
- [56] Musib, M. K. (2011). A review of the history and role of UHMWPE as a component in total joint replacements. *International Journal of Biological Engineering*, 1(1), 6-10.
- [57] Expert Market Research. (2025). *Ultra high molecular weight polyethylene companies*. <https://www.expertmarketresearch.com/articles/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-companies>
- [58] Patel, K., Chikkali, S. H., & Sivaram, S. (2020). Ultrahigh molecular weight polyethylene: Catalysis, structure, properties, processing and applications. *Progress in Polymer Science*, 109, 101290.
- [59] Jones, R. L., & Armoush, M. (2009, September). Catalysts for UHMWPE. In *Macromolecular Symposia* (Vol. 283, No. 1, pp. 88-95). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- [60] Du, J., Wang, Z., Yu, J., Ullah, S., Yang, B., Li, C., ... & Xu, J. (2018). Ultrahigh-strength ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE)-based fiber electrode for high performance flexible supercapacitors. *Advanced Functional Materials*, 28(20), 1707351.
- [61] Park, J. H., & Rutledge, G. C. (2018). Ultrafine high performance polyethylene fibers. *Journal of Materials Science*, 53, 3049-3063.
- [62] Khalil, Y., Hopkinson, N., Kowalski, A., & Fairclough, J. P. A. (2019). Characterisation of UHMWPE polymer powder for laser sintering. *Materials*, 12(21), 3496.
- [63] Lee, S. H., & Park, S. H. (2019). Processing of UHMWPE and its applications. *Journal of Polymer Engineering*, 39(3), 289-299.
- [64] Graessley, W. W. (2008). Polymer melts and the rheology of polymer processing. *Polymer Engineering and Science*, 48(6), 1060-1067.
- [65] Kim, H. S., & Kim, M. J. (2020). Fabrication and processing of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) for industrial applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 142, 100-120.
- [66] Bhaskar, A., & Ramaswamy, A. (2018). Supercritical fluid processing of polymers and composites. *Polymer Processing and Engineering*, 21(1), 34-42.
- [67] Boul, M. K., & Kuan, K. H. (2004). Polyethylene and its applications in medical devices. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(2), 775-783.
- [68] Chen, Z., & Gao, W. (2016). The application of UHMWPE in industrial and military sectors. *Journal of Industrial Materials*, 45(7), 1201-1209.

- [69] Hassani, M., & Nia, M. (2018). UHMWPE in food industry and transportation systems: Applications and challenges. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 670-679.
- [70] Alavi, S. H., & Ghaffari, M. (2020). UHMWPE-based composites in biomedical applications. *Biomedical Materials*, 15(4), 047004.
- [71] Greenwood, L., & Brown, R. J. (2002). The use of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) in industrial and consumer products. *Polymer Engineering & Science*, 42(4), 838-844.
- [72] Chilukoti, G. R., & Periyasam, A. P. (2012). Ultra high molecular weight polyethylene for medical applications. *Vol*, 55, E100-E103.
- [73] Haugen, J. E., & Broge, S. H. (2020). The role of UHMWPE fibers in high-performance applications. *Journal of Polymer Science*, 58(4), 210-225.
- [74] Branden, L. H., & Wallen, G. (2019). Ultrahigh molecular weight polyethylene fibers: Production and applications in industrial and personal protective use. *Materials Science and Engineering*, 102(6), 450-461.
- [75] Zhao, M., & Liu, Y. (2022). Properties and applications of UHMWPE fibers in the defense industry. *Textile Research Journal*, 92(2), 153-160.
- [76] van der Werff, H., & Heisserer, U. (2016). High-performance ballistic fibers: Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). In *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection* (pp. 71-107). Woodhead Publishing.
- [77] Xia, L., Xi, P., & Cheng, B. (2015). A comparative study of UHMWPE fibers prepared by flash-spinning and gel-spinning. *Materials Letters*, 147, 79-81.
- [78] Carraher, C. E. (2003). *Polymer chemistry* (6th ed.). Marcel Dekker Inc.
- [79] Lemstra, P. J. (2022). High-performance polyethylene fibers. In X. Huang (Ed.), *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* (Vol. 6, pp. 49-59).
- [80] Wang, Y., & Hou, R. (2022, April). Research progress on surface modification and application status of UHMWPE fiber. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2263, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
- [81] Selyutin, G. E., Gavrilov, Y. Y., Voskresenskaya, E. N., Zakharov, V. A., Nikitin, V. E., & Poluboyarov, V. A. (2010). Composite materials based on ultra high molecular polyethylene: Properties, application prospects. *Chemistry for Sustainable Development*, 18(3), 301-314.
- [82] Besergil, M. (t.y.). Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) ve kompozit uygulamaları. Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi. https://besergil.cbu.edu.tr/9_muh_plast_UHMWPE.pdf (Erişim tarihi: 5 Ocak 2025).
- [83] Chang, H., Luo, J., Gulgunje, P. V., & Kumar, S. (2017). Structural and functional fibers. *Annual Review of Materials Research*, 47(1), 331-359.
- [84] Biberlioğlu, E. (2022). *Bazalt ve karbon elyaf yüzeylerinin farklı reçinelerle kaplanması ve betonda kullanımının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- [85] Yılmaz, K., Akçıl, M., & Çelik, A. (2002). Fiber takviyeli polimer uygulamalarında yapışma yüzeyi kalitesinin kompozit performansına etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 6(2), 82-86.
- [86] Abdulsamet, G. Ö. R., & Osman, A. S. İ. (2024). Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin alev sprej kaplama yöntemi ile $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ kaplanmasında kaplama özelliklerinin incelenmesi. *Ejona International Journal*, 8(2), 183-190.
- [87] Tiwari, S., & Bijwe, J. J. P. T. (2014). Surface treatment of carbon fibers - A review. *Procedia Technology*, 14, 505-512.
- [88] Akçalı, K., & Oktav Bulut, M. (2012). Plazma teknolojilerinin yün elyafı üzerindeki etkileri üzerine bir inceleme.
- [89] Seki, Y., Sarikanat, M., Sever, K., Erden, S., & Gulec, H. A. (2010). Effect of the low and radio frequency oxygen plasma treatment of jute fiber on mechanical properties of jute fiber/polyester composite. *Fibers and Polymers*, 11(8), 1159-1164.
- [90] Jang, J., & Yang, H. (2000). Effect of surface treatment on the performance improvement of carbon fiber/polybenzoxazine composites. *Journal of Materials Science*, 35, 2297-2303.
- [91] Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fiber reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B*, 43, 2883-2892.
- [92] Karahan, H. A., Demir, A., Özdoğan, E., Öktem, T., & Seventekin, N. (2007). Some methods used for the surface modification of textiles. *Textile and Apparel*, 17(4), 248-255.
- [93] Takahashi, H., Morpew, J., Oručević, F., Noguchi, A., Kassa, E., & Keller, M. (2014). Novel laser machining of optical fibers for long cavities with low birefringence. *Optics Express*, 22(25), 31317-31328.
- [94] Somiya, S. (2013). *Handbook of advanced ceramics: Materials, applications, processing, and properties*. Elsevier Academic Press.
- [95] Tekinalp, H. (2011). *Pitch based carbon fibers: The effect of precursor composition on pore structure* (Doktora Tezi). Clemson University, Graduate School, Clemson.
- [96] Korku, M., Feyzullahoğlu, E., & İlhan, R. (2022). Farklı türlerde polyester ve çekme katkısı içeren cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemelerde çevresel koşulların aşınma davranışlarına olan etkilerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- [97] Gümölcine, T., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., & Ünal, A. (2013). İzofthalik polyester matrisli sürekli E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma. *Sigma*, 5, 104-115.
- [98] El-Wazery, M. S., El-Elamy, M. I., & Zoalfakar, S. H. (2017). Mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 14(3), 121-131.
- [99] Aramide, F. O., Atanda, P. O., & Olorunniwo, O. O. (2012). Mechanical properties of a polyester fibre glass composite. *International Journal of Composite Materials*, 2(6), 147-151.

- [100] Islam, M. N., Ar-Rashid, H., Islam, F., Karmaker, N., Koly, F. A., Mahmud, J., ... & Khan, R. A. (2019). Fabrication and characterization of E-glass fiber reinforced unsaturated polyester resin based composite materials. *Nano Hybrids and Composites*, 24, 1-7.
- [101] Roiron, C., Lainé, E., Grandidier, J. C., Garois, N., & Vix-Guterl, C. (2021). A review of the mechanical and physical properties of polyethylene fibers. *Textiles*, 1, 86-151.
- [102] Shelly, D., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2024). Compatibilization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers and their composites for superior mechanical performance: A concise review. *Composites Part B: Engineering*, 275, 111294.
- [103] Chhetri, S., & Bougherara, H. (2021). A comprehensive review on surface modification of UHMWPE fiber and interfacial properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 140, 106146.
- [104] Han, N., Zhao, X., & Thakur, V. K. (2023). Adjusting the interfacial adhesion via surface modification to prepare high-performance fibers. *Nano Materials Science*, 5(1), 1-14.
- [105] Wang, S., Ma, J., Feng, X., Cheng, J., Ma, X., Zhao, Y., & Chen, L. (2020). An effective surface modification of UHMWPE fiber for improving the interfacial adhesion of epoxy resin composites. *Polymer Composites*, 41(4), 1614-1623.
- [106] Li, C., Shi, Y., Zhang, R., Wang, G., & Jia, J. (2019). Effect of surface modifications on the properties of UHMWPE fibres and their composites. *e-Polymers*, 19(1), 40-49.
- [107] Silverstein, M. S., & Breuer, O. (1993). Relationship between surface properties and adhesion for etched ultra-high-molecular-weight polyethylene fibers. *Composites Science and Technology*, 48(1-4), 151-157.
- [108] Lin, S. P., Han, J. L., Yeh, J. T., Chang, F. C., & Hsieh, K. H. (2007). Surface modification and physical properties of various UHMWPE-fiber-reinforced modified epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(1), 655-665.
- [109] Tian, Y. L., & Guo, L. M. (2018). Surface modification of UHMWPE fibers by means of polyethylene wax grafted maleic anhydride treatment. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(31), 46555.
- [110] Silverstein, M. S., Breuer, O., & Dodiuk, H. (1994). Surface modification of UHMWPE fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 52(12), 1785-1795.
- [111] Bahramian, N., Atai, M., & Naimi-Jamal, M. R. (2015). Ultra-high-molecular-weight polyethylene fiber reinforced dental composites: Effect of fiber surface treatment on mechanical properties of the composites. *Dental Materials*, 31(9), 1022-1029.
- [112] Ai, C., Sheng, D., Chen, J., Cai, J., Wang, S., Jiang, J., & Chen, S. (2017). Surface modification of vascular endothelial growth factor-loaded silk fibroin to improve biological performance of ultra-high-molecular-weight polyethylene via promoting angiogenesis. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 7737-7750.
- [113] Han, L., Cai, H., Chen, X., Zheng, C., & Guo, W. (2020). Study of UHMWPE fiber surface modification and the properties of UHMWPE/epoxy composite. *Polymers*, 12(3), 521.

- [114] Wang, H., Chen, S., & Zhang, J. (2009). Surface treatment of LLDPE and LDPE blends by nitric acid, sulfuric acid, and chromic acid etching. *Colloid and Polymer Science*, 287, 541-548.
- [115] Dai, L., & Xu, D. (2019). Polyethylene surface enhancement by corona and chemical co-treatment. *Tetrahedron Letters*, 60(14), 1005-1010.
- [116] Belgacemi, R., Derradji, M., Trache, D., Zegaoui, A., Mehelli, O., & Tarchoun, A. F. (2021). Advanced hybrid materials from epoxy, oxidized UHMWPE fibers and silane surface modified silicon nitride nanoparticles. *High Performance Polymers*, 33(4), 440-450.
- [117] ZwickRoell. (t.y.). *ZwickRoell - Çekme testi ve yoğunluk cihazı*. ZwickRoell. Erişim Tarihi: 10 Ocak 2025, <https://www.zwickroell.com/tr/>
- [118] Hoegen Tögler. (t.y.). *GR-200 analytical balance*. Hoegen Tögler. Erişim Tarihi: 10 Ocak 2025, <https://www.hogentogler.com/and/gr-200-analytical-balance.asp>
- [119] Kumar, A. M., Parameshwaran, R., & Rajasekar, R. (2021). Effect of abaca reinforced polymer composite on dynamic mechanical analysis. *Colloid & Polymer Science*, 299(11), 1657-1667.
- [120] Demirci, A. (2010). *Plastik ekstrüderlerinde ısıtma-soğutma proseslerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [121] SDLookchem. (2022). *UHMWPE*. Erişim tarihi: 11 Ocak 2025, <https://www.sdlookchem.com/uhmwpe.html>
- [122] Bilsen Besergil. (t.y.). *Blog sayfası*. Erişim tarihi: 11 Ocak 2025, https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_719.html
- [123] Açikel, S. M., & Kayguzuz, M. (2018, Kasım 1-3). Plazma yüzey modifikasyonu ile tekstil ve derideki uygulamalar [Plasma surface modifications on textile and leather applications]. 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye.
- [124] Evcin, A., Çoşkun, B., & Akarca, G. (2022). A closer look at silane-based anti-bacterial coatings on polycarbonate: Synthesis and characterizations. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12), 11741-11748.
- [125] VETAPHONE. (t.y.). *Corona treatment*. VETAPHONE. Erişim adresi: <https://www.vetaphone.com/our-offering/corona-treatment/> Erişim tarihi: 14 Ocak 2025.

ÖZGEÇMİŞ

Neslihan KAYACIK KİREZ, ilk ve orta öğretimini Zonguldak'ta tamamladı. 2013 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Polimer Mühendisliği Bölümünden 2019 yılında mezun oldu. 2021 yılından beri plastik sektöründe çalışmaktadır. Şu anda Eurotec Mühendislik Plastiklerinde Satış departmanında çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Neslihan KAYACIK KİREZ, Doç. Dr. Mehmet Arif KAYA, Chemical and physical surface treatments applications for ultra-high molecular weight polyethylene fibers, 1. International Transylvania Scientific Researches And Innovation Congress, 2025

