



TÜRKİYE VE DÜNYADA TEKSTİL BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Prof.Dr. Suat CANOĞLU

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği

Editör

Prof.Dr. Suat CANOĞLU

yaz
yayınları

2025

Türkiye ve Dünyada Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği

Editör: Prof.Dr. Suat CANOĞLU

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-48-2

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitler (KETTK): İleri Yapısal Malzemelerin Analizi ve Endüstriyel Konumlandırması.....	1
<i>Devrim D. SOYASLAN</i>	

Yüksek Performanslı Polibenzimidazol Lifi: Üretim, Özellikler ve Uygulamalar.....	18
<i>Suat CANOĞLU, Ayberk ŞİT</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

KARBON ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLER (KETTK): İLERİ YAPISAL MALZEMELERİN ANALİZİ VE ENDÜSTRİYEL KONUMLANDIRMASI

Devrim D. SOYASLAN¹

1. GİRİŞ

Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler (KETK), özellikle yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve üstün rijitlik (stiffness) gerektiren havacılık, otomotiv, gemi üst yapıları ve spor ekipmanları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan son derece güçlü ve hafif elyaf takviyeli plastiklerdir (Wikipedia, 2025). Geleneksel olarak bu kompozitlerde bağlayıcı polimer olarak epoksi gibi termoset reçineler tercih edilmekteydi. Ancak termosetlerin uzun kimyasal kürleme döngüleri gerektirmesi ve doğası gereği geri dönüştürülemez olmaları, özellikle yüksek hacimli üretim ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından önemli kısıtlamalar yaratmıştır (Murata ve diğerleri, 2023).

Bu kısıtlamalara yanıt olarak, Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitler (KETTK), İngilizcede “Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites “ (CFRTC) olarak da adlandırılan bir devrim başlattı. KETTK’ler, termosetlerin aksine, ısıtıldığında yumuşayan ve soğutulduğunda tekrar sertleşen polimer zincirlerine sahiptir (Sudhin ve diğerleri, 2020). Bu termoplastik yapı, malzemenin yeniden şekillendirilebilirliğini ve

¹ Doç. Dr. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-5145-8551.

geri dönüştürülebilirliğini mümkün kılarak, modern imalat teknolojilerinde geniş bir uygulama alanı potansiyeli yaratmaktadır.

KETTK, karbon elyafı takviyesini termoplastik polimer matrisle birleştiren bir kompozit sınıfıdır. Bu malzemelerin yapısal başarısı, kullanılan matris reçinesinin performansına bağlıdır. Yüksek performanslı KETTK'lerde sıklıkla Poliarieterketon (PAEK) ailesi (örneğin PEEK), Polifenilen Sülfür (PPS) ve Polieterimit (PEI) gibi polimerler kullanılmaktadır. Bu matrisler, mükemmel mekanik dayanımın yanı sıra, üstün çevresel, kimyasal ve termal direnç özellikleri sunarak havacılık ve zorlu endüstriyel ortamlardaki uygulamalar için vazgeçilmez hale gelmiştir (Chao ve diğerleri, 2025).

Termoplastik matrislerin temel kimyasal farklılığı, polimer zincirleri arasında çapraz bağlanma (kürleme) olmamasıdır. Termosetlerin işlenmesi geri dönüşümsüz kimyasal reaksiyonları zorunlu kılarak, termoplastiklerde süreç sadece fiziksel faz geçişlerinden (erime ve donma) ibarettir.³ Bu durum, KETTK'lerin çevresel faydalarına doğrudan katkıda bulunur, çünkü malzemenin işlenmesi sırasında karmaşık kimyasal reaksiyon yönetimine ihtiyaç duyulmaz (Sudhin, 2020).

2. KETTK'LERİN TEMEL BİLEŞENLERİNİN DETAYLI ANALİZİ

KETTK'lerin nihai performansı, takviye elyafı ile polimer matris arasındaki sinerjinin bir sonucudur. Bu sinerji, her bir bileşenin bireysel özelliklerinin yanı sıra, bu iki farklı faz arasındaki kritik ara yüzeyin kalitesine de bağlıdır.

2.1. Takviye Bileşeni: Karbon Elyafının Yapısal Özellikleri

Karbon elyafları, kompozit malzemelere yüksek mukavemet, rijitlik ve düşük yoğunluk sağlayan temel bileşendir (An ve diğerleri, 2014). KETTK'lerde kullanılan elyaflar, sürekli elyaf (Continuous Fiber) veya kısa elyaf (Short Fiber) formatlarında olabilir ve seçilen format, nihai malzemenin mekanik özelliklerini ve işleme yöntemini doğrudan etkiler (OpenPR, 2025).

Ancak karbon elyafının doğasında var olan zorluklar, termoplastik kompozitlerin potansiyelini kısıtlamaktadır. Karbon elyaflarının kimyasal ataleti (inertness), pürüzsüz yüzey yapısı ve düşük yüzey enerjisi, reçine matrisleriyle zayıf arayüzey yapışmasına (adhesion) yol açar (Hu ve diğerleri, 2025). Bu zayıf yapı, kompozitlerin genel mekanik özelliklerini ve uzun süreli dayanıklılığını sınırlayan en kritik teknik zorluktur. Bu zorluğun üstesinden gelinmesi, yüksek performanslı KETTK'lerin endüstriyel alanda yaygınlaşmasının temel şartıdır.

2.2. Matris Bileşeni: Yüksek Performanslı Termoplastik Reçineler

Termoplastik matrisler, kompozitin çevresel direncini, darbe toleransını ve termal performansını belirler. Kullanılan matrisler, genellikle yarı-kristalin (PEEK, PPS, PA) veya amorf (PEI) yapıda olabilir.

Yarı-Kristalin Matrisler (PEEK, PPS, PAEK): Polikarbonat veya naylon gibi daha yaygın termoplastiklere kıyasla, yüksek performanslı yarı-kristalin termoplastikler, üstün ısı direnci, kimyasal direnç ve çözünme direnci sunar. Örneğin, Polieter eter keton (PEEK), Poliarieterketon ailesinin bir üyesi olarak, aşırı koşullarda (havacılık, offshore) metali ikame etmek üzere geliştirilmiştir (Arkema, 2025). Karbon elyaflarıyla takviye edildiğinde, PEEK kompozitler, metallerle karşılaştırılabilir

rijitlik ve çok daha düşük bir ağırlık sunar, aynı zamanda istisnai darbe, yüksek sıcaklık ve agresif kimyasal ajanlara karşı direnç gösterir. Polifenilen Sülfür (PPS) ise, mükemmel kimyasal direnci ve termal stabilitesi ile havacılık ve otomotiv sektörlerinde ticari uygulamaları hızlanmıştır (Chao ve diğerleri, 2025).

Amorf Matrisler (PEI): Polieterimit (PEI) gibi amorf matrisler, genellikle çok iyi boyutsal kararlılık, yüksek cam geçiş sıcaklığı ve kolay işlenebilirlik sunar (Chao ve diğerleri, 2025). Amorf yapıları, yarı-kristalin muadillerine göre bazen daha az kimyasal direnç gösterse de, düşük nem emilimi ve doğal alev geciktiricilik gibi özellikler nedeniyle havacılık iç mekanlarında tercih edilebilirler.

2.3. Arayüzey Yönetimi: Termoplastik Kompozitlerde Adhezyonun Kritikliği

Termoplastik kompozitlerin imalatında karşılaşılan en büyük teknik zorluk, matrisin yüksek viskozitesidir (Valente ve diğerleri, 2023). Erimiş haldeki termoplastik polimerler, termoset reçinelerden (düşük viskozite) önemli ölçüde daha yüksek viskoziteye sahiptir. Bu yüksek viskozite, karbon elyaf takviyesinin yeterince emprenye edilmesini (ıslatılmasını) zorlaştırır. Yetersiz ıslanabilirlik, fiberler ile matris arasında hava boşluklarına ve zayıf arayüzey yapışmasına neden olur, bu da nihai ürünün mekanik özelliklerinin (özellikle interlaminar kayma mukavemeti) termoset kompozitlerinkiyle kıyaslanabilir düzeyde olmamasına yol açabilir (Hu ve diğerleri, 2025).

Bu kısıtlamanın üstesinden gelmek için, arayüzey mühendisliği hayati önem taşır. Karbon elyaf yüzey modifikasyon teknolojileri, zayıf yapışmayı gidermek amacıyla tasarlanmıştır. Bu teknolojiler, yüzey mimarisini (pürüzlülüğü artırma) ve kimyasal bileşimi (aktif fonksiyonel gruplar ekleme) kontrol ederek mekanik kilitlemeyi, kimyasal bağlanmayı ve

ıslanabilirliği artırır. Yaygın modifikasyon teknikleri arasında sıvı faz oksidasyonu, plazma işlemi, kimyasal aşılama ve özel kaplamalar (sizing) yer alır (Hu ve diğerleri, 2025).

Endüstriyel açıdan, termoplastik kompozitlerin ticari uygunluğu, matrisin kimyasal üstünlüğüne bağlı olduğu kadar, arayüzey mühendisliğinin yüksek viskozite engelini ne ölçüde aşabildiğine de bağlıdır. Geleneksel epoksi kompozitler için kullanılan sizing ajanları, çoğu termoplastikle etkileşime girmediği için yetersizdir. Bu nedenle, PEEK, PEI veya PA gibi spesifik termoplastik matrisler için termal stabilite ve kimyasal direnç sunan Silan, Poliüretan veya Poliimid bazlı özel sizing kimyaları gereklidir (Specialchem, 2025). Sektördeki büyük R&D yatırımları (örneğin Boeing tarafından yüksek hacimli imalat için yapılan yatırımlar), arayüzey sorunlarının çözümüne odaklanmakta ve yeni prepreg hazırlama tekniklerinin (film istifleme, toz emprenyesi, hibrit iplikler) bu zorlukları aşarak kütle üretimine geçişi desteklemesini sağlamaktadır (Valente ve diğerleri, 2023).

3. KETTK'LERİN GELENEKSEL TERMOSET KOMPOZİTLERLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

KETTK'ler, özellikle imalat ve yaşam döngüsü özellikleri söz konusu olduğunda, geleneksel termoset matrisli (örneğin Epoksi) kompozitlere göre belirgin avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır.

3.1. Avantajlar: Hız, Sürdürülebilirlik ve Dayanım

Üretim Hızı ve Verimlilik (Hızlı Şekillendirme): Termoset kompozitlerin en büyük operasyonel kısıtlaması, polimerizasyon reaksiyonunun tamamlanması için uzun kürleme sürelerinin (dakikalar ila saatler, örneğin RTM'de 30-60 dakika 11) zorunlu

olmasıdır. KETTK'ler ise kimyasal reaksiyon yönetimine ihtiyaç duymaz; imalat süreci sadece matrisin eritilmesini, elyafın emprenye edilmesini ve hızlı soğutma ile konsolidasyonu içerir. Bu fiziksel faz geçişi temelli süreç, termo-stamping gibi yöntemlerle dakikalar düzeyinde hızlı döngü süreleri sunarak, özellikle otomotiv gibi yüksek hacimli sektörler için idealdir (Murata ve diğerleri, 2023). Bu hız potansiyeli, KETTK'lerin kütle üretimine geçişindeki en önemli ekonomik itici güçtür.

Geri Dönüşebilirlik ve Çevresel Etki: Termoset kompozitler, geri dönüşümsüz kimyasal çapraz bağlanma nedeniyle geri dönüştürülmeleri zor olan malzemelerdir. KETTK'ler ise matrisin tekrar eritilip yeniden şekillendirilebilmesi sayesinde doğası gereği geri dönüştürülebilir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmeleri (LCA), takviyeli termoplastiklerin genel çevresel etkisinin, geleneksel termoset bileşiklere kıyasla %25 daha düşük olduğunu göstermektedir (Sudhin ve diğerleri, 2020).

Geri dönüşüm süreçleri açısından, KETTK'lerin mekanik geri dönüşümü, özellikle otomotiv endüstrisinde etkin olarak teşvik edilebilmektedir (Aldosari ve diğerleri, 2024). Daha gelişmiş termoset geri kazanım yöntemleri (Piroliz, Akışkan Yatak) farklı teknolojik olgunluk seviyelerinde bulunurken (Meng ve diğerleri, 2018), termoplastiklerin basit mekanik ve termal geri dönüşüm potansiyeli, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada stratejik bir üstünlük sağlar (OpenPR, 2025).

Mekanik Dayanım ve Depolama Kolaylığı: KETTK'ler, matrisin sünek yapısı sayesinde, termosetlere kıyasla üstün darbe direnci ve hasar toleransı sunar (Arkema, 2025). Bu süneklik, lamine yapıda enerji absorpsiyonuna izin vererek interlaminar kırılma tokluğunu artırır (Alam ve diğerleri, 2019). Bu özellik, özellikle havacılıkta hasar toleransının kritik olduğu uygulamalar için büyük bir avantajdır. Ayrıca, kütleme reaksiyonu

gerektirmeyen termoplastik prepreg'ler, sıcaklık kontrollü depolama ve sınırlı raf ömrü gerektiren termoset prepreg'lere göre çok daha uzun (genellikle sınırsız) raf ömrüne sahiptir.

3.2. Dezavantajlar: Maliyet ve Proses Zorlukları

Hammadde ve İşleme Maliyeti: KETTK'lerin üretimi genellikle yüksek maliyetlidir. Bu, kısmen PEEK veya PEI gibi yüksek performanslı termoplastik matrislerin kendisinin pahalı olmasından ve kısmen de kompleks malzeme tasarımı ve işleme gereksinimlerinden kaynaklanmaktadır (TryTaiga, 2025). Yüksek performanslı termoplastik reçineler, tipik olarak epoksi reçinelerden çok daha pahalıdır.

Yüksek İşleme Sıcaklıkları ve Basınç: Yüksek performanslı termoplastiklerin matrisini eritmek ve karbon elyaflarını yeterince ıslatmak (emprenye etmek) için çok yüksek sıcaklıklar ve basınçlar gereklidir (Murata ve diğerleri, 2023). Bu durum, özel, daha pahalı kalıplama ekipmanları ve daha yüksek enerji tüketimi gerektirir.

Termoplastiklerin imalat hız avantajının her zaman mutlak olmadığı görülmektedir. Örneğin, Termoplastik Reaktif Kalıplama (TP-RTM) gibi süreçlerde, matrisin sertleşmesi için kimyasal kürlleme olmasa bile, matrisin eritilmesi ve kalıbın termal döngülerle ısıtılıp soğutulması gerekir. Yapılan analizler, standart epoksi RTM sistemine kıyasla, termal döngünün baskın olması nedeniyle TP-RTM döngü süresinde %22'ye varan bir artış gözlemlenebileceğini göstermiştir (Verrey ve diğerleri, 2006). Bu durum, termoplastiklerin hız avantajının yalnızca kullanılan imalat tekniğine (örneğin termo-stamping) uygunlukla tam olarak gerçekleştirilebileceğini, karmaşık geometriler için kullanılan sıvı reçine bazlı yöntemlerde ise termal gereksinimler nedeniyle nötralize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, endüstriyel hız avantajı, malzemenin kendisinin

termoplastik olmasından ziyade, imalat prosesinin etkinliğine bağlıdır.

3.3. KETTK ve Termoset Kompozitlerin Karşılaştırmalı Özeti

Aşağıdaki tablo, KETTK'lerin (Termoplastik) ve geleneksel termosetlerin (TS) endüstriyel karar alma sürecinde kritik olan temel performans kriterlerini özetlemektedir (Tablo 1).

Tablo 1. KETTK ve Termoset Kompozitlerin Karşılaştırmalı Endüstriyel Kriterleri

Kriter	KETTK (Termoplastik Matris)	Geleneksel TS (Epoksi Matris)	Endüstriyel Çıkarım	Kaynaklar
İşleme Döngü Süresi	Çok Hızlı (Dakika Düzeyi)	Yavaş (Saat Düzeyi)	Otomotiv/Kütle Üretimi için yüksek potansiyel.	Murata ve diğerleri, 2023
Geri Dönüşebilirlik	Mükemmel (Termal Olarak)	Zayıf (Geri Dönüşümsüz Kütleme)	Sürdürülebilirlik ve LCA avantajı kritiktir.	Sudhin ve diğerleri, 2020
Darbe Direnci/Tokluk	Üstün (Yüksek Hasar Toleransı)	Orta/İyi	Güvenlik ve uzun ömürlülük için idealdir.	Arkema, 2025
Erime Viskozitesi	Yüksek	Düşük	Proses zorluğu ve gelişmiş arayüzey yönetimi gerektirir.	Hu ve diğerleri, 2025
Hizmet Sıcaklığı (°C)	Çok Yüksek (Örn: PEEK > 140°C)	Orta/Yüksek (Tipik Epoksi < 140°C)	Termal açıdan zorlu uygulamalar için tercih edilir.	Abbas ve diğerleri, 2022

4. KETTK'LERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN EN KRİTİK ÜÇ TEMEL ÖZELLİĞİ

KETTK'lerin havacılık ve otomotiv gibi kritik endüstrilerde benimsenmesini sağlayan temel özellikler, geleneksel termoset matrisli kompozitlerin üstesinden gelemediği operasyonel gereksinimlere doğrudan yanıt vermektedir. Bu kritik özellikler, mekanik, çevresel ve termal kategorilerde değerlendirilmektedir.

4.1. Yüksek Hasar Toleransı ve Darbe Direnci

Yüksek hasar toleransı ve darbe direnci, özellikle uçak yapılarında ve çarpışma güvenliği standartlarına tabi otomotiv bileşenlerinde, kompozit malzemelerin yaygın kullanımı için zorunlu bir gerekliliktir. Termoplastik kompozitler, matrisin sünek (ductile) doğası sayesinde bu alanda üstün performans sergilerler.

KETTK'lerde, uygulanan darbe enerjisi, polimer matris tarafından etkin bir şekilde absorbe edilir. Bu süneklik, laminatlar arası kırılma tokluğunu (interlaminar fracture toughness) önemli ölçüde artırarak, termoset kompozitlerde sıkça görülen katmanlar arası ayrılma (delaminasyon) eğilimini azaltır. PEEK gibi yüksek performanslı matrislerle takviye edilen kompozitler, aşırı koşullarda bile istisnai darbe direncine sahip olup (Arkema, 2025), bu özellik, KETTK'leri hafiflik ve yüksek mukavemetin yanında güvenlik ve uzun ömürlülüğün gerekli olduğu uygulamalar için ideal kılar (An ve diğerleri, 2014).

4.2. Üstün Kimyasal ve Çevresel Direnci

KETTK'ler, özellikle agresif kimyasal ortamlara maruz kalan havacılık (hidrolik sıvılar, yakıtlar) veya endüstriyel uygulamalar için termosetlere göre belirgin bir avantaj sunar. Geleneksel epoksi matrisli kompozitler, özellikle neme (nem

emilimi) ve bazı çözücülere karşı hassasiyet gösterebilirken, yüksek performanslı termoplastikler üstün kimyasal stabilite sunar (Arkema, 2025).

PEEK ve PPS gibi yarı-kristalin matrisler, aşındırıcı kimyasal ajanlara, suya ve neme karşı istisnai direnç gösterir (Chao ve diğerleri, 2025). Örneğin, Kepstan® PEEK, en agresif kimyasal ajanlara karşı bile direnç sağlarken, Kynar® PVDF reçineleri üstün UV ve kimyasal direnç özelliklerini birleştirir (Arkema, 2025). Bu özellik, KETTK'leri zorlu dış ortam koşulları altında uzun süre güvenilirliğini sürdürmesi gereken borulama sistemleri, yakıt sistemleri veya uçak dış panelleri gibi alanlarda birincil tercih haline getirmektedir.

4.3. Yüksek Termal Performans

Kompozit bir malzemenin hizmet vereceği sıcaklık aralığı, büyük ölçüde polimer matrisin Cam Geçiş Sıcaklığı ve Erime Sıcaklığı değerlerine bağlıdır. Özellikle motor bölmesi bileşenleri, fren sistemleri veya yüksek hızlı hava araçlarının yapıları, malzemenin mekanik rijitliğini yüksek sıcaklıklarda korumasını gerektirir. Yüksek performanslı termoplastikler (örneğin PEEK, PEI), bu gereksinimi karşılamak için özel olarak tasarlanmıştır ve standart epoksi matrislere göre çok daha yüksek ve değerlerine sahiptir.⁴ Bu yüksek termal eşik, malzemenin yüksek sıcaklıklarda dayanımının ve şekil kararlılığının korunmasını sağlar (Abbas ve diğerleri, 2022). Ayrıca, Kynar® PVDF gibi bazı reçineler, üstün yüksek sıcaklık ve yangın direnci sunarak, kompozitlerin FST (Fire, Smoke, Toxicity) gereksinimlerini karşılamasına yardımcı olur (Arkema, 2025).

Bu üç özellik, KETTK'lerin, termosetlerin yetersiz kaldığı iki temel kısıtlamaya (darbe sonrası hasar toleransı ve yüksek sıcaklık/kimyasal çevre) doğrudan çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu performans farkı, havacılık endüstrisinin bu

teknolojiyi stratejik olarak benimsemesinin ana nedenidir (OpenPR, 2025).

4.4. Endüstriyel Olarak Kritik Termoplastik Matrislerin Özellikleri

Farklı termoplastik matrislerin seçimi, spesifik uygulama gereksinimlerine göre değişir. Aşağıdaki tablo, en yaygın yüksek performanslı termoplastik matrislerin kritik özelliklerini ve endüstriyel konumlarını detaylandırmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Endüstriyel Olarak Kritik Termoplastik Matrislerin Özellikleri

Termoplastik Matris	Kristalin Yapı	Kritik Endüstriyel Özellik	Tipik Uygulama Alanı	Kaynaklar
PEEK (PAEK Ailesi)	Yarı-Kristalin	Olağanüstü Kimyasal Direnç, Yüksek Servis Sıcaklığı, Rijitlik	Havacılık (Metal İkamesi), Offshore, Tıbbi	Arkema, 2025
PEI (Polieterimit)	Amorf	Yüksek , Boyutsal Kararlılık, Alev Geciktirici	Havacılık İç Mekanları, Elektrik /Elektronik	Chao ve diğerleri, 2025
PPS (Polifenilen Sülfür)	Yarı-Kristalin	Mükemmel Kimyasal Direnç, Nispeten Düşük Maliyet (PEEK'e göre)	Otomotiv (Yakıt Sistemleri), Endüstriyel	Chao ve diğerleri, 2025
PA (Poliamid/ Naylon)	Yarı-Kristalin	İyi Darbe ve Aşınma Direnci, Biyolojik Kaynak Potansiyeli	Otomotiv (Uzun Elyaf Takviyeli Bileşenler)	Arkema, 2025

5. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR, TEDARİK ZİNCİRİ VE İMALAT TRENDLERİ

KETTK'ler, performans, hafiflik ve imalat hızı potansiyelinin birleşimi sayesinde küresel pazarda hızla büyümektedir, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde stratejik yatırımların odak noktası haline gelmiştir.

5.1. Havacılık Mühendisliği Uygulamaları

Havacılık, düşük ağırlık ve yüksek mukavemet kombinasyonunu en kritik şekilde talep eden sektördür. KETTK'lerin yüksek hasar toleransı ve mükemmel kimyasal direnci, bu malzemeleri uçak yapılarında, motor bileşenlerinde ve gövde panellerinde metal ikamesi için ideal kılmaktadır.

Sektördeki büyük oyuncular, KETTK'lerin endüstriyel benimsenmesini hızlandırmak için önemli taahhütlerde bulunmaktadır. Örneğin Boeing, ticari havacılık platformlarında KETTK kullanımını ölçeklendirmek amacıyla R&D merkezine 120 milyon dolar yatırım yapmıştır (OpenPR, 2025). Bu yatırım, malzemenin temel performansından ziyade, yüksek hacimli imalat teknolojilerini olgunlaştırmaya odaklanmıştır. Bu stratejik odaklanma, KETTK'nin laboratuvar aşamasından endüstriyel olgunluğa geçtiğini ve sektörün artık kütle üretimi engellerini aşmayı hedeflediğini göstermektedir.

5.2. Otomotiv Sektörü ve Elektrikli Araçlarda (EV) Hafifletme

Otomotiv Karbon Termoplastik pazarının, önümüzdeki yıllarda yüksek Bileşik Yıllık Büyüme Hızı (CAGR) ile büyümesi beklenmektedir. KETTK'ler, özellikle elektrikli araçların (EV) hafifletilmesi için kritik öneme sahiptir. Araç ağırlığının azaltılması, enerji verimliliğini ve dolayısıyla menzili doğrudan artırır (OpenPR, 2025).

Tedarik zinciri ilerlemeleri, bu büyümeyi desteklemektedir. Mitsubishi Chemical Corporation, otomotiv uygulamaları için KETTK R&D yatırımlarını duyurmuş, temel olarak kütle üretimi için ölçeklenebilirliği ve malzeme performansını geliştirmeye odaklanmıştır (OpenPR, 2025). Benzer şekilde, büyük ABD’li otomobil üreticileri, hafif EV bileşenlerinde geri dönüştürülmüş termoplastik bileşiklerin kullanımını artırma planları açıklamıştır. Toray Industries ve Teijin Limited gibi Japon üreticiler de hafifletme ve yakıt verimliliğini artırmak amacıyla yeni nesil karbon elyaf prepreg'leri piyasaya sürmüşlerdir (OpenPR, 2025). Bu gelişmeler, KETTK'lerin sürdürülebilirlik potansiyeli ile yüksek hacimli üretim gereksinimlerini birleştiren stratejik bir malzeme tercihi olduğunu doğrulamaktadır.

5.3. İmalat Teknolojilerinde İlerlemeler

Termoplastiklerin yüksek erime viskozitesinin yarattığı emprenye zorlukları, yeni nesil imalat ve prepreg hazırlama teknikleri ile aşılmaktadır. Geleneksel RTM (Reçine Transfer Kalıplama) yerine, termoplastikler için özel olarak geliştirilmiş teknikler kullanılmaktadır.

Bu teknikler arasında film istifleme (film stacking), toz emprenyesi (powder impregnation), hibrit dokuma kumaş (hybrid woven fabric) ve hibrit iplik (hybrid yarn) yöntemleri bulunmaktadır.⁹ Bu yöntemler, termoplastik matris kompozitlerinin üretiminde fiber takviyesinin yeterli düzeyde ıslatılmasını sağlayarak nihai mekanik performansı iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Konsolidasyon aşamasında, sürekli elyaf takviyeli termoplastik prepreg'ler (örneğin Polystrand® X-Ply®) termo-sıkıştırma veya termo-damgalama yöntemleriyle işlenerek hızlı döngü süreleri elde edilmektedir, bu da kütle üretimine uygunluğu maksimize eder (Arkema, 2025).

6. SONUÇ

Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitler (KETTK), geleneksel termoset kompozitlere göre çevresel sürdürülebilirlik, üstün darbe toleransı ve potansiyel olarak çok daha hızlı üretim döngüleri sunan ileri mühendislik malzemeleridir. KETTK'ler, termoset kompozitlerin yerini almak yerine, onların performansının ve işleme kabiliyetinin yetersiz kaldığı, zorlu uygulamalar için stratejik bir tamamlayıcı veya üstün alternatif olarak konumlanmaktadır.

KETTK'lerin benimsenmesindeki temel zorluklar, yüksek hammadde maliyeti ve yüksek erime viskozitesinden kaynaklanan karmaşık imalat süreçleri olarak kalmaya devam etmektedir. Ancak endüstriyel Ar-Ge, artık temel performans sorunlarının büyük ölçüde aşıldığını varsayarak, bu zorlukların üstesinden gelmek için ölçeklenebilirlik ve kütle üretimine uygunluk konularına yoğunlaşmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abbas, K., Balc, N., Bremen, S., & Skupin, M. (2022). Crystallization and aging behavior of polyetheretherketone PEEK within rapid tooling and rubber molding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(5), 1-12. <https://doi.org/10.3390/jmmp6050093>
- Alam, P., Mamalis, D., Robert, C., Floreani, C., & Bradaigh, C. M. (2019). The fatigue of carbon fibre reinforced plastic-A review. *Composites Part B: Engineering*, 166(1), 555-579. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.016>
- Aldosari, S. M., AlOtaibi, B. M., Alblalaih, K. S., Aldoihi, S. A., AlOgab, K. A., Alsaleh, S. S., . . . Alshammari, B. A. (2024). Mechanical recycling of carbon fiber-reinforced polymer in a circular economy. *Polymers*, 16(10), 1363. <https://doi.org/10.3390/polym16101363>
- An, H. J., Kim, J. S., Kim, K. Y., Lim, D. Y., & Kim, D. H. (2014). Mechanical and Thermal Properties of Long Carbon Fiber-reinforced Polyamide 6 Composites. *Fibers and Polymers*, 15(11), 2355-2359. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-2355-5>
- Arkema. (2025, 11 06). Arkema Innovative Chemistry. Thermoplastic and thermoset composite solutions, specialty additives, structural adhesives: Arkema presents a complete offer at JEC 2015: https://www.arkema.com/files/live/sites/shared_arkema/files/downloads/press-kit/en/2015-arkema-press-kit-jec2015-composite-global-offer.pdf
- Chao, C., Zang, Z., Tong, H., Yao, J., Zou, K., Wang, C., Chen, X. (2025). Development of high-performance thermoplastic resin-based composites: materials,

- processes and applications. *Journal of Aeronautical Material*, 45(3), 1-18.
<https://doi.org/10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000084>
- Hu, W., Pan, Y., Zhong, M., Lou, Z., & Wu, Y. (2025). Advances in effects of carbon fiber surface modification on interface properties of carbon fiber composites. *Composites Interfaces*, 1-31.
<https://doi.org/10.1080/09276440.2025.2569937>
- Meng, F., Olivetti, E. A., Zhao, Y., Chang, J. C., Pickering, S. J., & McKechnie, J. (2018). Comparing life cycle energy and global warming potential of carbon fiber composite recycling technologies and waste management options. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(8), 9854-9865. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01026>
- Murata, Y., Machiya, R., & Komori, T. (2023). Influence of Processing Conditions on the Generation of Surface Defects in a Heat-and-Cool Hybrid Injection Molding Technique for Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheets and Development of a Suitable Mold Heated by Far-Infrared Radiation. *Polymers*, 15(22), 4437.
<https://doi.org/10.3390/polym15224437>
- OpenPR. (2025, 11 05). OpenPR Worldwide Public Relation. United States Automotive Carbon Thermoplastic Market 2025 | Growth Drivers, Market Forecast, Competitive Landscape & Business Opportunities: <https://www.openpr.com/news/4212949/united-states-automotive-carbon-thermoplastic-market-2025>
- Specialchem. (2025, 11 15). Specialchem The Material Selection Platform. Thermoplastic composites: Solutions to optimize matrix fiber interface: <https://www.specialchem.com/plastics/guide/thermoplast>

ic-composites-solutions-to-optimize-the-matrix-fiber-interface

- Sudhin, A. U., Remanan, M., Ajeesh, G., & Jayanarayanan, K. (2020). Comparison of Properties of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic and Thermosetting Composites for Aerospace Applications. *Materials Today Proceedings*, 24(2), 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.297>
- TryTaiga. (2025, 11 20). TryTaiga. Is CFRP a flame-retardant material? Explanation of advantages, disadvantages, scenes of use, and main molding methods: <https://trytaiga.com/en/blog/is-cfrp-burn-resistant>
- Valente, M., Rossitti, I., & S, M. (2023). Different production processes for thermoplastic composite materials: Sustainability versus mechanical properties and processes parameter. *Polymers*, 3(15), 242. <https://doi.org/10.3390/polym15010242>
- Verrey, J., Wakeman, M., Michaud, J., & Manson, A. E. (2006). Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 37(1), 9-22. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.048>
- Wikipedia. (2025, 10 10). Wikipedia. Carbon-fiber reinforced polymer: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-fiber_reinforced_polymer

YÜKSEK PERFORMANSLI POLİBENZİMİDAZOL LİFİ: ÜRETİM, ÖZELLİKLER VE UYGULAMALAR

Suat CANOĞLU¹

Ayberk ŞİT²

1. GİRİŞ

Celanese Americas (ABD) tarafından üretilen PBI (polibenzimidazol) lifi, yüksek ısıya ve zorlu kimyasal ortamlara dayanabilen, yüksek performanslı bir malzemedir. PBI lifi, bu üstün niteliklerine ek olarak üretim sürecinde iyi sonuçlar verdiği için özel ve değerli bir yere sahiptir. 1990 yılından bu yana, PBI elyafı, yangına karşı koruyucu kumaşlar gibi yüksek güvenlik ve performans gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir malzeme olmuştur. Polibenzimidazolün hikayesi 1960'ların başına kadar uzanmaktadır. ABD Hava Kuvvetleri Malzeme Laboratuvarı (US Air Force Materials Laboratory, AFML), yüksek sıcaklığa dirençli elyaf için Celanese Şirketi ile anlaşma yapmıştır. Bu anlaşma çerçevesinde, lifin polimerizasyon ve çekim süreçlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. 1967'de Apollo uzay aracındaki yangının ardından, AFML ve NASA, astronotları ve pilotları yüksek oksijen ortamında koruyacak, yanıcı olmayan uçuş giysilerinin üretimi için PBI lifini değerlendirmiştir. Seneler boyunca pilot ölçekli üretim yapıldıktan ve PBI lifleri yüksek düzeyde özel askeri ve havacılık alanlarında kullanıldıktan sonra,

¹ Prof. Dr., Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1604-9875.

² Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0009-0008-9116-9800.

1983'te Celanese tarafından büyük ölçekli üretime geçilmiştir. O dönemde Celanese şirketi PBI ürünleri için sivil pazarlara yönelik çalışmalar geliştirmeye başlamıştır (Horrocks vd., 2001).

Polibenzimidazoller, yapılarında benzimidazol halkası içeren heteroaromatik özellikteki polimerlerdir. Polibenzimidazoller ve türevleri; yüksek termal ve mekanik stabilite, kimyasal maddelere karşı dirençleri ve lif oluşturabilme yetenekleri gibi belirgin nitelikleriyle ön plana çıkmaktadır (Erdoğan, 2014). PBI, yüksek ısıya dayanıklılığı, kimyasal etkilere direnci ve iyi mekanik özellikleri ile tanınan yüksek performanslı bir polimer türü olup, ısıya dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyan uygulamalarda ideal bir seçenektir (Sandor, 1990; Zhou vd., 2024). PBI malzemesi, elyaf, reçine ve kompozitler gibi farklı şekillerde üretilebilir ve bu farklı formlarda birçok endüstriyel veya teknik yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir (Sandor, 1990).

Polibenzimidazol liflerinin üretiminde, yüksek ısıya ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı, uzun zincirli bir polimer olan PBI polimeri kullanılır. PBI lifleri, üstün nem çekme kapasitesi ve iyi tuşe gibi aranan özellikleri taşır. PBI liflerinin son kullanım alanları incelendiğinde, genellikle yüksek ısı ve alev dayanımından yararlanıldığı görülmektedir. Bu nedenle PBI lifleri, ısıya dayanıklı yüksek performanslı lifler arasında değerlendirilir (Kalaycı vd., 2014a). PBI liflerinin güç tutuşur özellikleri ve düşük duman oluşumu, son yıllarda bu malzemeyi özellikle yangına dayanıklı tekstil ürünleri, itfaiyeci kıyafetleri, askeri ve endüstriyel uygulamalar için önemli hale getirmiştir.

Bu çalışmada, PBI lifinin üretimi, özellikleri ve uygulamaları incelenecektir. Çalışma kapsamında ilk olarak, PBI polimerinin kimyasal yapısı ele alınacak, ardından sentez aşamaları ve lif üretim süreci açıklanacaktır. Ayrıca, PBI liflerinin çeşitli özellikleri değerlendirilecek ve kullanım alanları üzerinde

durulacaktır. Çalışmanın amacı, PBI lifinin üretiminden uygulamalarına uzanan farklı yönlerini analiz ederek bu lif hakkında kapsamlı bilgi sunmaktır.

2. POLİBENZİMİDAZOL POLİMERİNİN YAPISI

Polibenzimidazoller adı verilen polimer sınıfı, yüksek ısıya ve kimyasal etkilere karşı çok dayanıklıdır. Polibenzimidazol, poli-[2,2'-(m-fenilen)-5,5'-dibenzimidazol] polimerinin kısaltmasıdır (Horrocks vd., 2001). Polimer zincirinde benzimidazol grubu tekrar eden yapı birimidir (Wang vd., 2016). PBI polimerinin cam geçiş sıcaklığı 425 °C olup, bozunma sıcaklığı 600 °C'nin üzerindedir (De Gregorio vd., 2025). Bu polimerin yüksek termal stabilitesi, aromatik ve merdiven benzeri yapısından kaynaklanır (Horrocks vd., 2001).

Sülfürik asit ile işlem uygulanması, PBI liflerinin alev direncini artırır. Bu nedenle sülfürik asit ile işlem uygulanmış PBI lifleri, yüksek performanslı elyaf pazarında yaygın olarak bulunur (Kalaycı vd., 2014b). Sülfürik asit ile işlem uygulanmış polibenzimidazol, doğrudan alevle temas ettiğinde boyut olarak %10'dan az oranda büzülür. Sülfürik asit yerine fosforik asit kullanılarak işlem yapılırsa, PBI lifleri daha yüksek alev dayanımı gösterebilir. Fosforik asit ile işlem uygulanmış PBI, çok yüksek performans gerektiren özel durumlarda tercih edilir (Horrocks vd., 2001).

3. POLİBENZİMİDAZOL POLİMERİNİN SENTEZİ VE LİF ÜRETİMİ

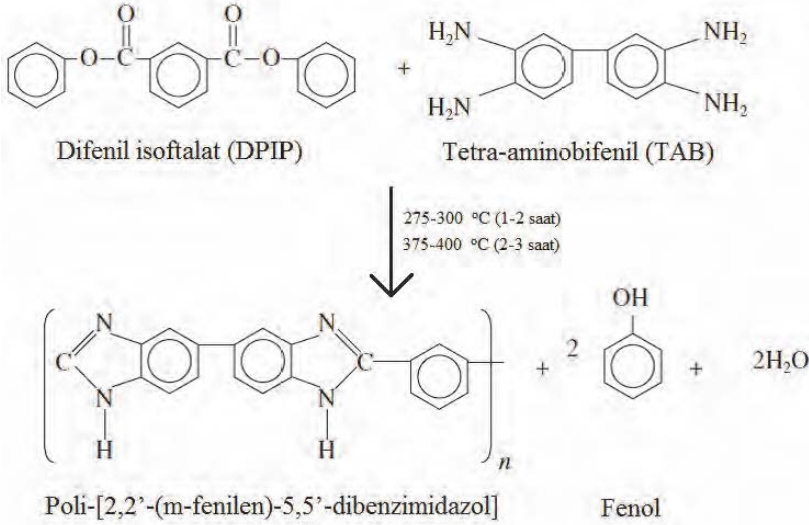
PBI polimeri, tetra-aminobifenil (TAB) ve difenil izoftalat (DPIP) adlı iki kimyasal bileşen kullanılarak sentezlenir ve bu sentez iki aşamalı bir reaksiyon süreci ile gerçekleşir. İlk aşamada, monomerler inert bir ortamda ısıtılarak eritilir.

Monomerler birbirleriyle reaksiyona girip PBI ön polimerini meydana getirirken, bu süreçte yan ürün olarak su ve fenol oluşur. Bu maddeler, ön polimerin köpürmesine yol açar. Malzeme, 260-275 °C sıcaklıkta 1-2 saat boyunca işlem gördükten sonra köpük soğutulur. Daha sonra ön polimer ince toz formuna getirilir. PBI ön polimeri, ikinci aşamada yüksek sıcaklıkta (375-400°C) 2-3 saat ısıtılarak tamamen polimerleşir. Böylece polimer, sonraki işlemlerde kullanılabilecek uygun molekül ağırlığına ulaşır. Polimerleşme tamamlandıktan sonra PBI, altın rengi ile kahverengi arasında renge sahip ince bir toz halinde elde edilir (Horrocks vd., 2001). Şekil 1’de polibenzimidazol polimerinin sentezi sunulmuştur (Kalaycı vd., 2014a).

PBI lifleri, kuru çekim, yaş çekim ve kuru-jet yaş çekim yöntemleri ile üretilbilmekle birlikte, yaygın olarak kullanılan yöntem, kuru çekim yöntemidir. PBI polimerini çözebilen birkaç çözücü bulunmaktadır. Bu çözücüler; sülfürik asit, dimetilformamid (DMF), dimetil sülfoksit (DMSO) ve dimetil asetamid (DMAC) gibi maddelerdir. Bununla birlikte, PBI liflerinin kuru çekim yöntemiyle üretimi için en yaygın kullanılan çözücü dimetil asetamiddir. Dimetil asetamidin tercih edilmesinin nedenleri, lif üretiminde kullanılabilecek şekilde çözelti meydana getirmesi, polimer çözeltisinde sorun oluşturmaması, kaliteli lif üretme özelliğine sahip olması ve NMP (N-metil-pirolidon) ile DMSO’ya göre daha düşük sıcaklıkta buharlaştırılabilmesidir (Chung, 1997).

PBI polimer tozu, LiCl ile birlikte inert ortamda ve kontrollü sıcaklık ile basınçta dimetilasetamid (DMAC) içinde çözülerek polimer çözeltisi hazırlanır. Bu çözeltinin içerisinde bulunan PBI polimer oranı %25 olup, çözeltinin oda sıcaklığında viskozite değeri 1500 P civarındadır. LiCl eklenmesi, çözeltinin daha uzun süre stabil kalmasını sağlayarak raf ömrünü önemli ölçüde artırır. PBI çözeltisi, sonraki üretim aşamalarında sorun

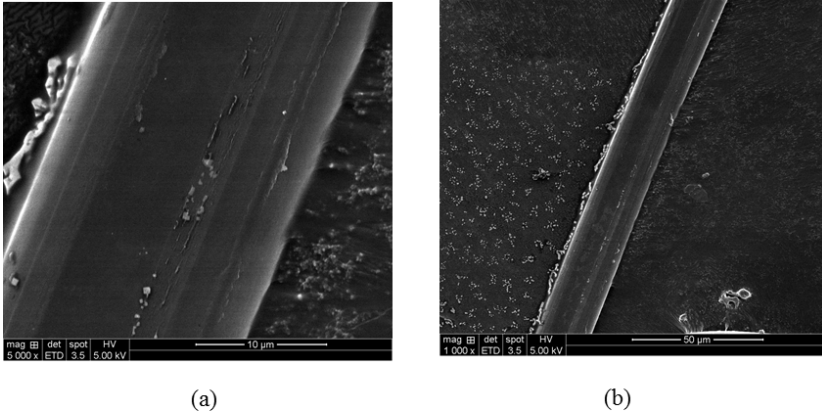
oluşturabilecek katı maddeleri uzaklaştırmak için filtrelendir (Horrocks vd., 2001).



Şekil 1. Polibenzimidazol polimerinin sentezlenmesi (Kalaycı vd., 2014a)

Kuru çekim sürecinde düze, 50-1000 arasında delik içerebilir ve bu deliklerin çapı yaklaşık 75-100 µm'dir. Lif üretiminde kullanılan çözelti önce filtrelendir ve ardından pompa ile 70-110°C sıcaklıkta düzeye gönderilir. Lifin oluşması, çözücünün buharlaşmasıyla mümkün olur. Genellikle, lif çekimi sırasında çözeltiden çözücünün buharlaştırılması işlemi, nitrojen gazı dolaştırılan bir kolon içinde gerçekleştirilir ve sıcaklık 200-220°C civarındadır. Çekim işlemi sonrasında, lifte bulunan DMAC kalıntıları uzaklaştırılır. 400-440°C civarında yapılan sıcak çekme işlemi sayesinde lifin dayanımı ve modül değeri belirgin şekilde artırılabilir. PBI lifi, asit ile işleme tabi tutularak yanmaya karşı boyutsal olarak daha stabil hale getirilir (Wang vd., 2016). Şekil 2, PBI lifinin boyuna yönde yüzey morfolojisini göstermektedir (Yao vd., 2019).

Sun vd. (2020) tarafından yapılan çalışma, sıvı kristal halde PBI çözeltisi kullanılarak yüksek mukavemetli PBI liflerinin üretildiğini ve bunun çevre dostu ve yeni bir çekim yöntemiyle yapıldığını göstermektedir. Bu çalışmada, mikrodalga enerjisi kullanılarak PBI/PPA (polibenzimidazol/polifosforik asit) sıvı kristal çözeltisi hazırlanmış ve liflerin oluşturulması esnasında saf su kullanılarak koagülasyon ve yıkama yapılmıştır. Bu teknoloji, çevre dostu bir yaklaşım sunmakta ve PBI liflerinin büyük ölçekli üretimi için potansiyel taşımaktadır.



Şekil 2. PBI lifinin boyuna yönde yüzey morfolojisi: (a) 5000× ve (b) 1000× SEM görüntüleri (Yao vd., 2019)

PBI lifinin FTIR spektrumunda, 3000–3675 cm^{-1} aralığında yer alan karakteristik tepeler, PBI lifinde bulunan imidazol halkasındaki N–H gruplarıyla ilişkilidir. 1285 cm^{-1} bölgesindeki band, imidazol halkasının genişleyip daralması biçimindeki titreşimine karşılık gelir. 1440 cm^{-1} 'deki band ise PBI'nın düzlem içi halka titreşimlerinden kaynaklanır. 1602 cm^{-1} bölgesinde bulunan absorpsiyon bandı, malzemedeki C=C gerilme titreşimine atfedilir (Sun vd., 2020).

Bir çalışmada, PBI lifinin XRD analizi yapılmıştır. XRD analizi sonucunda 25.6°'de görülen tepe, PBI'nın amorf ve kristalin bölgesini temsil eder. 9.5° ve 12.2°'de ortaya çıkan iki

karakteristik tepe, PBI lifinin kristalin yapısından kaynaklanır (Sun vd., 2020).

4. PBI LİFİNİN ÖZELLİKLERİ

PBI lifi, yüksek ısıya ve kimyasallara çok iyi direnç gösterir ve lifin alev altında büzülme oranı düşüktür. Ayrıca, PBI lifinin nem ve tuşe özelliği iyidir. Bu nedenle PBI lifi, ısıya karşı koruyucu giysilerde kullanılması durumunda kullanıcıya konfor sağlar. Kullanıcıların yaptığı değerlendirmelere göre PBI malzemesi, konfor açısından %100 pamukla aynı seviyede bulunmuştur (Demartino, 1984).

4.1. PBI Lifinin Alev Dayanımı ve Termal Dayanım Özellikleri

PBI lifi, yüksek alev direnci ve termal stabilite gösteren sentetik bir liftir (Yao vd., 2019). LOI (Limit Oksijen İndeksi) testi, PBI lifinin havadaki oksijen konsantrasyonu ile yanmayı sürdüremediğini göstermektedir. PBI lifinin yanmayı sürdürebilmesi için gereken en düşük oksijen oranı %41'dir (Horrocks vd., 2001). PBI lifi, aramid liflerinden daha yüksek bir LOI değerine sahiptir (Miraftab, 2000). Tablo 1'de çeşitli liflerin LOI değerleri gösterilmiştir (Mazumder ve Islam, 2021). Malzemelerin aleve veya yangına karşı direncini test etmek için kullanılan yöntemlerden biri de dikey yanıcılık testidir. Test sırasında kumaş numunesi, alev etkisine maruz bırakılır. Bir kumaşın yanıcılık özelliğini belirlemek için alevle temas sonrası yanma süresi ve alev tahrip ettiği kumaş uzunluğu ölçülür. PBI lifinden elde edilen kumaşın, alevle temas ettikten sonra kendi kendine yanmaya devam etmediği ve alev tarafından tahrip edilen kumaş uzunluğunun sadece 10 mm olduğu görülmüştür. Bu özellikler, PBI lifinin aleve karşı direncinin çok yüksek olduğunu gösterir (Horrocks vd., 2001). PBI elyafı, kısa süreli yüksek sıcaklıklara (3-5 saniye boyunca 600 °C) dayanabilmektedir. Bu

lifler, daha uzun süreli etkiye ise 300-350 °C'ye kadar dayanıklıdır (Bajaj, 2000). PBI lifinin kullanım ömrü, 600 °C sıcaklıkta 3-5 saniye, 450 °C sıcaklıkta 5 dakika, 400 °C sıcaklıkta 1 saat, 330 °C sıcaklıkta ise 24 saattir (Horrocks vd., 2001).

PBI lifinin termal stabilitesi üzerine testler gerçekleştirilmiştir. Liflerin çeşitli sıcaklıklara belirli bir süre maruz bırakıldığı ve sonrasında dayanım, kütle ve uzunluk gibi özelliklerinin ölçüldüğü bu testlerde, PBI liflerinin yüksek sıcaklıklara karşı çok dayanıklı olduğu ortaya çıkmıştır. Termogravimetrik (TGA) analiz sonuçlarında, PBI'nin hava ortamında 450°C'ye kadar, azot ortamında ise 1000°C'den fazla sıcaklıklarda bütünlüğünü koruyabildiği görülmüştür (Horrocks vd., 2001). Geleneksel kimyasal güç tutuşurluk işlemleri yerine, liflerin kendiliğinden alev ve ısıya dirençli olması, ürünün daha uzun ömürlü olmasını sağlar (Yao vd., 2019).

Tablo 1. Çeşitli liflerin LOI değerleri (Mazumder ve Islam, 2021)

Lif Türü	Limit Oksijen İndeksi (LOI)
Pamuk	18.4
Polipropilen	19
PET Polyester	20-21
Nylon 6 ve Nylon 6.6	20-21.5
Yün	25
Meta-aramid	28-31
Para-aramid	29-31
PBI	>41

Yapılan bir çalışmada, PBI liflerinin termal stabilitesini değerlendirmek amacıyla, lifler TGA yöntemiyle azot atmosferinde analiz edilmiştir. Sonuç olarak, PBI lifleri iki aşamalı bir ağırlık kaybı göstermiştir. 200 °C'ye kadar meydana gelen baştaki ağırlık kaybı, suyun buharlaşmasından kaynaklanır. Malzemede ikinci ağırlık kaybının gerçekleştiği sıcaklık 600 °C civarındadır. Bu ağırlık kaybının sebebi, PBI polimer

omurgasının bozunmasıdır. PBI, yüksek termal stabiliteye sahiptir ve ayrıca güç tutuşur özellik gösterir (Sun vd., 2020).

4.2. PBI Lifinin Isı Salınımı ve Duman/Gaz Üretimi

Yangın koruması amacıyla kullanılan bir malzemenin, ek yakıt sağlayarak yangını şiddetlendirmemesi önemlidir. PBI lifi, ABD Federal Havacılık İdaresi'nin (US Federal Aviation Administration, FAA) belirlediği bir test yöntemine göre ihmal edilebilir ısı salınım özelliği göstermektedir. Ölçülen ısı salınımı (iki dakikalık ortalama), 10 kW/m^2 'nin altındadır. Bu değer, FAA'nın belirlediği 65 kW/m^2 'lik üst sınırdan çok daha düşüktür (Horrocks vd., 2001).

PBI lifleri, hava ortamında tutuşmadığından dolayı önemli miktarda duman veya zararlı gaz üretmez. Ancak lifin bozunma sıcaklığına ulaşıldığında bazı gazlar açığa çıkabilir. PBI lifinin spesifik optik duman yoğunluğu 2'dir. Diğer yaygın yüksek sıcaklık dayanımlı liflerde bu değer 3 ile 8 arasındadır (Horrocks vd., 2001).

4.3. PBI Lifinin Kimyasal Direnç Özellikleri

PBI lifi, hem çeşitli inorganik asit ve baz türlerine hem de birçok organik kimyasala karşı dayanıklıdır. PBI lifinin kimyasallara karşı dayanıklılığı, lifin belirli maddelerle işlem gördükten sonra mukavemetini koruma oranıyla belirlenir. Tablo 2, PBI lifinin yaygın olarak karşılaşılan bazı kimyasallara karşı gösterdiği direnci ortaya koymaktadır. Ayrıca PBI lifleri, 30°C sıcaklıkta 168 saat süreyle asetik asit, metanol, perkloretilen, dimetilformamid, dimetilasetamid, dimetilsülfoksit, aseton ve kerosen gibi çeşitli kimyasal maddelere maruz kaldığında, mukavemetinde azalma göstermemiştir (Horrocks vd., 2001).

Tablo 2. PBI lifinin organik asitler ve bazlar içinde belirli bir süre bekletildikten sonra çekme dayanımının korunma oranı (Horrocks vd., 2001)

Kimyasal Madde	Konsantrasyon (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Çekme Dayanımının Korunma Oranı (%)
Sülfürik asit	50	30	144	90
Sülfürik asit	50	70	24	90
Hidroklorik asit	35	30	144	95
Hidroklorik asit	10	70	24	90
Nitrik asit	70	30	144	100
Nitrik asit	10	70	48	90
Sodyum hidroksit	10	30	144	95
Sodyum hidroksit	10	93	2	65
Potasyum hidroksit	10	25	24	88

4.4. PBI Lifinin Fiziksel Özellikleri

PBI lifinin pek çok üstün fiziksel özelliği, önceki bölümlerde değinilen termal ve kimyasal dayanımıyla bir araya geldiğinde, onu yüksek performans gerektiren uygulamalar için uygun liflerden biri haline getirmektedir. Yüksek nem geri kazanım kapasitesinin yanı sıra çekme dayanımının iyi seviyede olması, PBI lifini tekstil alanında kullanılmaya elverişli kılar (Horrocks vd., 2001). PBI lifinin fiziksel özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

PBI lifleri, konfor bakımından iyi özellikler sunmaktadır (Çelikkanat, 2002). PBI lifinin diğer sentetik liflere göre dikkat çekici farklarından biri, üstün nem geri kazanım özelliğidir (Kalaycı vd., 2014a). PBI lifinin nem geri kazanım değeri (%15), Nomex (%6.5), pamuk (%7-8.5) ve ipek (%10) liflerinin nem geri kazanım değerlerine göre daha yüksektir (Fan ve Lau, 2009; Kalaycı vd., 2014a; Yao vd., 2019). Ayrıca, PBI lifinin uzama

oranı %27'dir. Bu özellikler, PBI lifinden elde edilen kumaşların iyi bir konfor sağlamasına olanak tanır (Yao vd., 2019).

Tablo 3. PBI lifine ait fiziksel özellikler

Özellik	Değerler
Filament başına denye (dpf)	1.5 (Horrocks vd., 2001)
Mukavemet (g/den)	2.7 (Horrocks vd., 2001), 2.7-3.1 (Kalaycı vd., 2014a)
Kopma uzaması (%)	28.5 (Horrocks vd., 2001), 28-30 (Kalaycı vd., 2014a), 30 (Chae ve Kumar, 2006)
Başlangıç modülü (g/den)	32 (Horrocks vd., 2001)
Eğilme rijitliği (g/den)	9-12 (Fung, 2000)
Yoğunluk (g/cm ³)	1.43 (Horrocks vd., 2001; Kalaycı vd., 2014a; Kalaycı vd., 2014b), 1.4 (Chae ve Kumar, 2006) 1.3 (Fung, 2000; Kalaycı vd., 2014a)
Nem geri kazanımı (%)	15 (Chae ve Kumar, 2006; Horrocks vd., 2001; Kalaycı vd., 2014a; Kalaycı vd., 2014b; Yao vd., 2019)
Kaynar su çekmesi (%)	< 1 (Horrocks vd., 2001)
Sıcak hava çekmesi, 205°C (%)	< 1 (Horrocks vd., 2001)
Renk	Altın rengi (Horrocks vd., 2001)
Kesikli lifler için kıvrım (%)	28 (Horrocks vd., 2001)
Kesikli lifler için standart uzunluklar (mm)	38, 50, 76, 102 (Horrocks vd., 2001)

5. PBI LİFİNİN UYGULAMA ALANLARI

Polibenzimidazoller, üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, ısıya dayanıklı lifler, yüksek sıcaklıklarda kullanılan reçineler, yapıştırıcılar ve özel amaçlı köpükler olarak uygulama alanı bulmaktadır (Penchev vd., 2017). Polibenzimidazolün yüksek termomekanik özelliklere sahip olması, onu zorlu sıcaklık koşullarında yapıştırıcı olarak kullanmaya uygun hale getirmektedir (Iqbal vd., 2014). PBI malzemesi, farklı fiziksel formlarda (örneğin iplik, kumaş, kompozit malzeme, membran) üretilip, çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. PBI, yüksek ısı ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı

olması sayesinde, özellikle koruyucu giysilerde kullanılabilen bir malzemedir. PBI, uçak koltuklarında güvenlik amacıyla aleve karşı koruma sağlayan malzeme olarak da görev yapabilir (Kalaycı vd., 2014b).

PBI lifi, yüksek ısıya ve kimyasallara karşı dirençli olduğu için askeri, havacılık uygulamalarında ve koruyucu giysiler gibi zorlu koşullarda kullanılan ürünlerde tercih edilen bir organik liftir (Kalaycı vd., 2014b). PBI lifi hem güvenlik hem de konfor sağladığı için özel koruyucu giysilerde ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Örnek olarak, astronot kıyafetlerinde, itfaiyecilerin koruma giysilerinde, yüksek ısıya dayanıklı eldivenlerde ve uçak duvar kumaşlarında kullanılır (Holmes, 2000; Menczel, 2020). PBI lifi, sahip olduğu özellikler sayesinde yüksek sıcaklık ile kimyasal dirence ihtiyaç duyulan birçok alanda (örneğin yüksek sıcaklığa dayanıklı filtre kumaşlarında, ısıya karşı koruyucu giysilerde) kullanılabilir (Coffin vd., 1982). PBI lifi, havacılık, otomotiv ve rüzgâr enerjisi gibi yüksek teknoloji gerektiren sektörlerde kullanılan kompozit malzemelerde üstün ve ileri düzey özellikler sergiler (Hsissou vd., 2021). PBI'nin olumsuz yönü, fiyatının yüksek olmasıdır (Menczel, 2020).

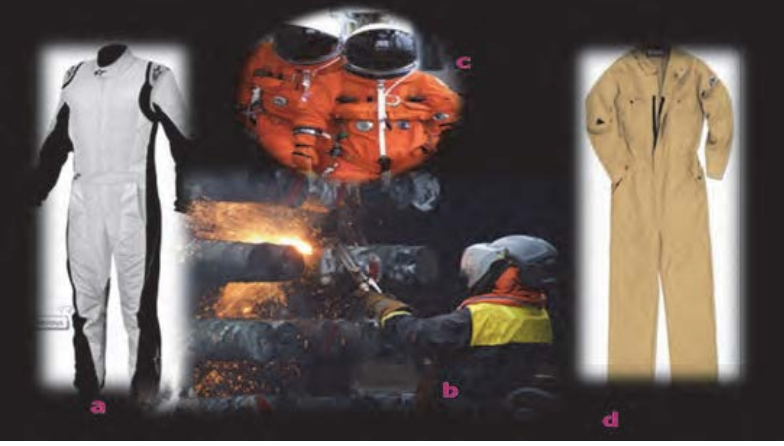
PBI lifleri, bazı uygulamalarda kesikli liflere gereksinim duyulması nedeniyle, bu ihtiyacı karşılamak için kesikli formda üretilip sunulmaktadır. Kesikli PBI lifi, başka malzemelerle kolayca karıştırılabilmekte ve dokunmamış yalıtım malzemeleri ile yüksek sıcaklığa dayanıklı özel kâğıtların üretimi gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Kesikli PBI liflerinin karışıma ufak bir oranda katılması dahi, pek çok ürünün ısıya dayanıklılığını belirgin şekilde artırabilir (Horrocks vd., 2001).

PBI, yüksek sıcaklıklarda filtrasyon yapabilme kapasitesi sayesinde membran üretiminde tercih edilmektedir (Tashvigh ve

Chung, 2019). PBI, yüksek sıcaklığa dayanıklı olduğu ve çeşitli kimyasal çözücülerden etkilenmediği için, PBI membranlar zorlu çalışma koşullarda kullanılabilir. Polibenzimidazollerin organik çözücülere karşı düşük çözünürlüğü, bu malzemeleri organik çözücü nanofiltrasyonunda etkili kılar (Cong vd., 2021). Polibenzimidazoller, yüksek alkali dayanımı sergileyen stabil yapıları sayesinde alkali elektrolizörlerde kullanım için uygun malzemelerdir (Lee vd., 2025). PBI polimeri, gazların ayrıştırılması, pervaporasyon işlemleri, su arıtımı ve yakıt hücreleri gibi pek çok farklı alanda kullanılabilir (Akhtar vd., 2017). PBI membranlar, ileri osmoz, basınç geciktirmeli osmoz, nanofiltrasyon ve ultrafiltrasyon uygulamalarında araştırılmaktadır (Nithya vd., 2018). PBI, yakıt hücrelerinde proton değişim membranı olarak kullanılma potansiyeli nedeniyle ilgi çekmektedir (Zhang vd., 2012). PBI membranlar, üstün termal stabilite ve düşük nem koşullarında sağladığı yüksek proton iletkenliği ile yakıt hücrelerinde kullanılmak üzere uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir (Cong vd., 2021). PBI membranlar, karbon yakalama teknolojilerinde kullanılabilir (Kalaycı vd., 2014b). PBI içi boş liflerden elde edilen membranlar, sıvı ve gazların ayrıştırılmasında kullanılabilen malzemelerdir (Chen vd., 2025). PBI malzemesi, içi boş lif içeren membranlar için ilgi çekici bir seçenek olarak görülmektedir. Bunun sebebi, malzemenin 250°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda sürekli çalışabilmesi, iyi bir mekanik stabiliteye sahip olması ve kimyasal maddelere karşı direnç göstermesidir (Wang vd., 2018).

Genel olarak PBI lifleri, uçak ve uzay araçlarında kullanılan aleve dayanıklı kumaşlarda, kompozit malzemelerde, askeri birlikler, itfaiyeciler ve astronotlar için üretilen kıyafetlerde, endüstriyel iş kıyafetlerinde, motor sporları sürücülerinin giysilerinde, kimyasallara dayanım sağlayan kıyafetlerde ve koruyucu eldivenlerde kullanılmaktadır. Bu lifler

ayrıca baca gazı filtrelerinde, karbon yakalama teknolojilerinde, yakıt hücreleri ile hidrojen pillerinde ve osmoz uygulamalarında da yer almaktadır. Şekil 3'te, PBI liflerinin kullanımına yönelik örnekler bulunmaktadır (Kalaycı vd., 2014a).



Şekil 3. PBI liflerinin kullanımına yönelik örnekler: a) Yarış arabası sürücüleri için PBI karışımı özel giysi, b) PBI içeren koruyucu giysi ve eldiven, c) NASA tarafından geliştirilen PBI içeren astronot giysileri, d) PBI Gold uçuş kıyafeti (Kalaycı vd., 2014a)

PBI lifinin hammadde maliyetinin yüksekliği, bu lifin pahalı olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, PBI liflerinin farklı liflerle karıştırılarak kullanıldığı örneklere rastlanmaktadır. PBI liflerinin karıştırılması, maliyet avantajı sağlamakla kalmayıp, gereksinimlere göre hedeflenen lif özelliklerinin geliştirilmesini de mümkün kılar. Örnek olarak, PBI liflerinin aramid lifleriyle birlikte kullanımı, kumaşın dayanımını artırmakta ve maliyetin optimize edilmesini sağlamaktadır (Kalaycı vd., 2014a).

6. SONUÇ

Yüksek performanslı lifler arasında yer alan polibenzimidazol (PBI) lifleri, üstün termal dayanım, alev direnci ile kimyasal direnç özellikleri sayesinde endüstriyel ve teknik uygulamalar için önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada PBI liflerinin üretim süreci ve başlıca özellikleri incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında, malzemenin kullanım alanları kapsamlı olarak ele alınmıştır. Bu çalışmanın hedefi, PBI lifinin üretiminden başlayarak çeşitli kullanım alanlarına kadar uzanan yönlerini inceleyip lif hakkında genel bir bakış sağlamaktır.

PBI liflerinin yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, güç tutuşurluk ve kimyasal stabilite gibi öne çıkan özellikleri, onu zorlu koşullarda kullanılabilen bir malzeme haline getirmektedir. Dolayısıyla PBI lifleri, uzun ömür ve dayanıklılığa ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılabilecek ve geleneksel liflerin sağlayamadığı performans düzeyini karşılayabilecek bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Sahip olduğu özellikler, PBI liflerinin askeri giysiler, itfaiyeci kıyafetleri, endüstriyel koruyucu kıyafetler, havacılık ile uzay endüstrisinde kullanılan tekstiller ve membran teknolojileri gibi uygulamalarda tercih edilebileceğini göstermektedir. Uygulama alanları incelendiğinde, PBI liflerinin geniş bir kullanım yelpazesine sahip olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, PBI lifleri üstün özellikleri ve çeşitli kullanım alanları sayesinde çok yönlü bir malzeme niteliği taşımaktadır. PBI lifi hem mevcut ihtiyaçlara uygun hem de geleceğe dönük bir malzemedir. Gelecekte, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve diğer malzemelere birlikte kullanımının artırılması konusundaki çalışmaların, PBI liflerinin uygulama alanlarını genişleteceği düşünülmektedir. Bu sayede PBI lifi, yüksek performans gerektiren tekstil ürünlerinde ve ileri düzey teknoloji uygulamalarındaki önemini devam ettirecektir.

KAYNAKLAR

- Akhtar, F.H., Kumar, M., Villalobos, L.F., Vovusha, H., Shevate, R., Schwingenschlögl, U., Peinemann, K.-V. (2017). Polybenzimidazole-based mixed membranes with exceptionally high water vapor permeability and selectivity. *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 21807.
- Bajaj, P. (2000). Heat and flame protection. In Horrocks, A.R., Anand, S.C. (Eds.), *Handbook of technical textiles*. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Chae, H.G., Kumar, S. (2006). Rigid-rod polymeric fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 100, 791-802.
- Chen, Y., Aili, D., Zhang, W., Azizi, K., Cleemann, L.N., Li, Q. (2025). Reinforced polybenzimidazole membranes by crosslinked fiber mats for high temperature polymer electrolyte membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, 529, 146260.
- Chung, T.-S. (1997). A critical review of polybenzimidazoles: Historical development and future R&D. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 37(2), 277-301.
- Coffin, D.R., Serad, G.A., Hicks, H.L., Montgomery, R.T. (1982). Properties and applications of Celanese PBI—polybenzimidazole fiber. *Textile Research Journal*, 52(7), 466-472.
- Cong, S., Wang, J., Wang, Z., Liu, X. (2021). Polybenzimidazole (PBI) and benzimidazole-linked polymer (BILP) membranes. *Green Chemical Engineering*, 2(1), 44-56.
- Çelikkanat, A.B. (2002). *Teknik tekstiller. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.*

- De Gregorio, E., Roviello, G., Naticchioni, V., Cigolotti, V., Pozio, A., Hein, L. A., De Luca, C., Ferone, C., Rinaldi, A., Tarallo, O. (2025). Electrospun polybenzimidazole membranes: Fabrication and fine-tuning through physical and statistical approaches. *Polymers*, 17, 1594.
- Demartino, R.N. (1984). Comfort properties of polybenzimidazole fiber. *Textile Research Journal*, 54(8), 516-521.
- Erdoğan, G. (2014). Benzimidazol halkası içeren polimerlerin sentezi ve özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Fan, J., Lau, L. (2009). Flammability of fabrics and garments. In Fan, J., Hunter, L. (Eds.), *Engineering apparel fabrics and garments*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Fung, W. (2000). Textiles in transportation. In Horrocks, A.R., Anand, S.C. (Eds.), *Handbook of technical textiles*. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Holmes, D.A. (2000). Textiles for survival. In Horrocks, A.R., Anand, S.C. (Eds.), *Handbook of technical textiles*. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Horrocks, A.R., Eichhorn, H., Schwaenke, H., Saville, N., Thomas, C. (2001). Thermally resistant fibres. In Hearle, J.W.S. (Ed.) *High-performance fibres*. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640.
- Iqbal, H.M.S., Bhowmik, S., Benedictus, R. (2014). Process optimization of solvent based polybenzimidazole

- adhesive for aerospace applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 48, 188-193.
- Kalaycı, E., Avinç, O., Yavaş, A. (2014a). Polibenzimidazol (PBI) Lifleri. *Tekstil ve Mühendis*, 21(96), 52-67.
- Kalaycı, E., Avinç, O.O., Yavaş, A. (2014b). One of the promising technical textile fiber: Polybenzimidazole (PBI) fibers. In *Textile Science and Economics VI*, Zrenjanin, Serbia.
- Lee, T.K., Kim, M., Cho, H., Lee, S., Kim, J., Al Munsur, A.Z., Lee, B.-N., Chae, J.E., Han, J., Park, H.S., Jang, J.H., Yoo, S.J., Peak, S.Y., Lee, S.Y., Cho, H.-S., Park, S.-Y., Song, K.H., Kim, H.-J. (2025). Long-Term, Stable Alkaline Electrolysis with a Durable Crystalline Polybenzimidazole Membrane. *Small*, 21(38), e02810.
- Mazumder, N.-U.-S., Islam, M.T. (2021). Flame retardant finish for textile fibers. In Rather, L.J., Haji, A., Shabbir, M. (Eds.), *Innovative and emerging technologies for textile dyeing and finishing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Menczel, J.D. (2020). Polybenzimidazole fiber. In Jaffe, M., Menczel, J.D. (Eds.), *Thermal analysis of textiles and fibers*. Duxford, UK: Elsevier.
- Miraftab, M. (2000). Technical fibres. In Horrocks, A.R., Anand, S.C. (Eds.), *Handbook of technical textiles*. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Nithya, D., Beril Melbiah, J.S., Mohan, D. (2018). Benzimidazole-based dendritic nanofiltration membranes. *Iranian Polymer Journal*, 27, 225-237.
- Penchev, H., Ublekov, F., Budurova, D., Sinigersky, V. (2017). Novel electrospun polybenzimidazole fibers and yarns from ethanol/potassium hydroxide solution. *Materials Letters*, 187, 89-93.

- Sandor, R.B. (1990). PBI (Polybenzimidazole): Synthesis, properties and applications. *High Performance Polymers*, 2(1), 25-37.
- Sun, G., Zhang, M., Chen, N., Niu, H., Qi, S., Wu, D. (2020). Fabrication of ultrahigh-strength polybenzimidazole fibers via a novel and green integrated liquid crystal spinning process. *Macromolecular Materials and Engineering*, 305(3), 1900717.
- Tashvigh, A.A., Chung, T.-S. (2019). Robust polybenzimidazole (PBI) hollow fiber membranes for organic solvent nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 572, 580-587.
- Wang, X., Jayaweera, P., Alrasheed, R.A., Aljlil, S.A., Alyousef, Y. M., Alsubaei, M., AlRomaih, H., Jayaweera, I. (2018). Preparation of polybenzimidazole hollow-fiber membranes for reverse osmosis and nanofiltration by changing the spinning air gap. *Membranes*, 8(4), 113.
- Wang, Y., Yang, T., Fishel, K., Benicewicz, B.C., Chung, T.-S. (2016). Polybenzimidazoles. In Olabisi, O., Adewale, K. (Eds.), *Handbook of thermoplastics*, Boca Raton, FL: CRC Press.
- Yao, L., Wu, L., Wu, H., Koo, J.H., Krifa, M. (2019). Design and characterization of flame resistant blended nondrip PA6/Lenzing FR®/PBI fiber nonwoven fabrics. *Flame Retardancy and Thermal Stability of Materials*, 2(1), 49-59.
- Zhang, M., June, S.M., Long, T.E. (2012). Principles of step-growth polymerization (polycondensation and polyaddition). In Matyjaszewski, K., Möller, M. (Eds.), *Polymer science: A comprehensive reference*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Zhou, J., Zhong, X., Takada, K., Okajima, M.K., Yamaguchi, M., Kaneko T. (2024). Autohomogenization of polybenzimidazole composites with enhanced mechanical performance by air incorporation. *Langmuir*, 40(45), 23780-23787.

TÜRKİYE VE DÜNYADA
TEKSTİL BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com