

Yüksek Performanslı Lifler: PIPD, poli(piridobisimidazol) Lifleri

Ece Kalayci, O.Ozan Avinc*, Arzu Yavas

Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü, Denizli, 20070, +2582963058
ekalayci@pau.edu.tr

Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü, Denizli, 20070, +2582963326
oavinc@pau.edu.tr

Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü, Denizli, 20070, +2582963130
aozerdem@pau.edu.tr

*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş/ Received: 18 Ağustos (August) 2015

Kabul/ Accepted: 14 Aralık (December) 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.25094>

Özet

PIPD polimerinden, poli{2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'-e]-piridinilen-1,4(2,5-dihidroksi)fenilen}, üretilen PIPD lifleri yüksek mukavemet, yüksek modül, yüksek basma dayanımı ve yüksek ısı-alev dayanımı ile diğer yüksek performans lifleri arasında öne çıkan bir lif türüdür. Basma dayanımı en yüksek liflerden biri olarak bilinen PIPD lifleri, yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra termal özelliklerinin de iyi olması sayesinde koruyucu teknik tekstiller başta olmak üzere, spor teknik tekstilleri hatta endüstriyel ve taşımacılık teknik tekstillerinde de kullanım alanlarına sahiptir. Bu çalışmada, PIPD (polipiridobisimidazol) liflerinin üretimine, özelliklerine ve kullanım alanlarına detaylı olarak yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler — poli(piridobisimidazol) lifi, PIPD, basma dayanımı yüksek lif, yüksek mukavemetli lif, yüksek modüllü lif, ısıya dayanıklı lif, alev dayanıklı lif

High Performance Fibers: PIPD, poly (pyridobisimidazole) Fibres

Abstract

PIPD fibers produced from PIPD polymer, poly{2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'-e]-pyridinylene-1,4(2,5-dihydroxy)phenylene}, differ from other high performance fibers with higher strength, higher modulus, higher compressive strength and greater thermal-fire resistance. PIPD fibers, one of the fibers with the highest compressive strength, are used in protective textiles, sport textiles and even in industrial and automotive textiles owing to their high strength properties on top of good thermal properties. In this study, the production, properties and end-use applications of PIPD fibers are discussed in detail.

Keywords — poly(pyridobisimidazole) fiber, PIPD, high compressive strength fiber, high strength fiber, high modulus fiber, heat resistant fiber, fire resistant fiber

1 Giriş

Tekstil endüstrisindeki üretimin temelini her ne kadar ortalama tekstil özelliklerine sahip konvansiyonel tekstil ürünleri oluştursa da, katma değeri yüksek teknik tekstillerin üretimi tekstil endüstrisinin yarınını

belirleyen faktörlerden biri haline gelmiştir. Koruyucu teknik tekstillerden, taşımacılık teknik tekstillerine birçok endüstri alanında kullanılabilen bu teknik tekstil ürünleri sahip oldukları özellikler bakımından diğer tekstil ürünlerinden ayrılmaktadır. Farklılık yaratan bu özellikler genellikle üretimlerinde üstün

özelliklere sahip liflerin kullanılması sayesinde kazandırılmaktadır. Genel olarak 'Yüksek Teknolojili Lifler' olarak isimlendirilen bu lifler, yüksek performanslı, yüksek konforlu ve yüksek fonksiyonlu lifler olmak üzere üç farklı başlık altında sınıflandırılmaktadır [1-3].

Yüksek performanslı lifler tanımı genellikle mukavemet, modül, termal dayanım, kimyasal dayanım gibi özellikleri ile diğer liflerden ayrılan lif türlerini ifade etmek için kullanılmaktadır ve bu gruba dahil olan lifler sahip oldukları özelliklere göre ısıya dayanıklı, yüksek mukavemetli ya da kimyasallara dayanıklı yüksek performanslı lifler olarak farklı kategorilerde incelenebilmektedirler [1, 3]. PIPD polimerinden [poli 2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'-e]piridinilen-1,4(2,5-dihidroksi)fenilen] üretilen PIPD lifleri de yüksek performanslı lifler başlığı altında incelenen lif türlerinden birisidir [4-6]. Ticari olarak M5 markası ile bilinen bu lifler günümüzde DuPont ile ortak olan [7, 8] United States Magellan Systems International LLC tarafından üretilmektedir. Hem mukavemet özellikleri hem de ısıya dayanıklılığı birçok tekstil lifine göre oldukça yüksek olsa da adı genellikle yüksek mukavemetli yüksek performanslı lifler başlığı altında sınıflandırılmaktadır [4, 8]. PIPD lifleri ısıya ve alev dayanıklı olarak bilinen birçok lif türünden çok daha üstün ısı ve alev dayanımına sahiptir [3, 5]. PIPD lifleri sahip oldukları üstün özellikler sayesinde ısıdan ve alevden koruyucu giysiler, hafif ağırlıklı kompozitler, balistik koruma sağlayan sert ve yumuşak zırhlar, yüksek mukavemetli kablolar başta olmak üzere birçok teknik tekstil malzemelerinde kullanılabilirler [6, 9, 10]. Teknik tekstillerin üretiminde sahip olduğu yüksek performans özellikleri ile öne çıkan lif türlerinden biri olan PIPD lifleri ülkemiz teknik tekstil endüstri için de önemli bir potansiyele sahiptir. Bu sebeple bu derleme çalışmasında PIPD liflerinin yapısı, lif üretimi, lif özellikleri ve kullanım alanları gibi başlıklara yer verilmiş, bu lifin bilinirliğinin artırılması hedeflenmiştir.

2 PIPD Polimeri ve Polimerizasyonu

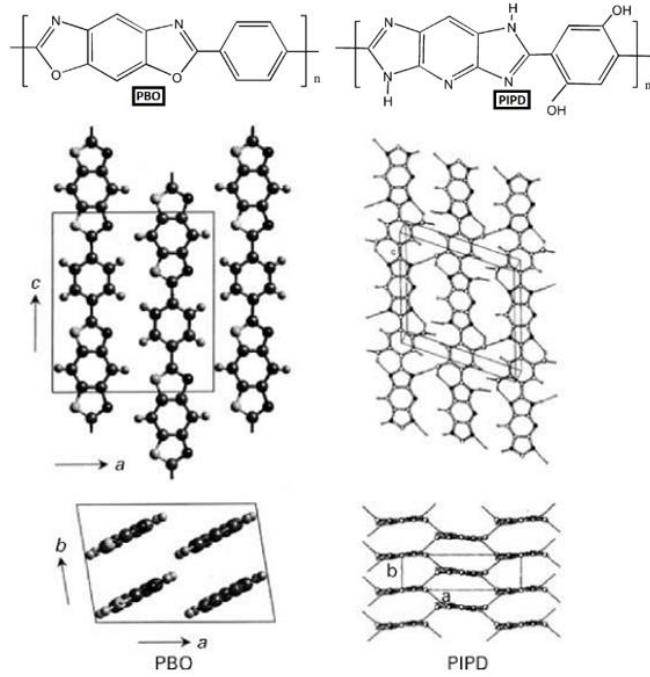
Polimer zincirleri arasında çok sayıda ve çok yönü hidrojen bağlarına sahip rijit-rod bir polimer olan PIPD polimeri ilk olarak 1990'larda Dr. Sikkema ve ekibi tarafından Akzo Nobel araştırma merkezinde sentezlenmiştir [4, 11-23]. PIPD polimeri, PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) ve aramid gibi sıvı-kristalin

yapılı polimerler olarak bilinen fibrilli malzemeler sınıfında incelenmektedir [16, 17, 24].

PBO ve aramidler dâhil olmak üzere bugüne dek bilinen yüksek modüllü ve yüksek mukavemetli liflerin çoğunluğunun enine yöndeki mukavemet özellikleri zayıftır. PIPD liflerinin geliştirilme nedenlerinin başında da her düzlemde iyi mekanik özellikleri sergileyebilen bir lif olması gelmektedir [14, 25-27].

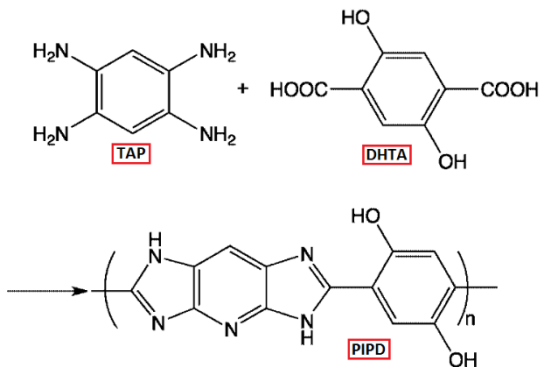
PIP D polimerinin kimyasal formülünde [-OH] ve [>NH] grupları arasında hidrojen bağları bulunmaktadır (Şekil 1) [14, 18, 20]. Kimyasal formülü temelde PBO polimerinin yapısında olduğu gibi ardışık benzen halkalarından [5-6-5] oluşmaktadır [14, 26, 28]. Ancak PIPD polimerinin kimyasal formülünde benzen halkalarına bağlı iki hidroksil [-OH] grup bulunur ve PBO polimerinin kimyasal formülündeki oksijen [>O] yerine PIPD polimerinde imidazol [>NH] grupları bulunmaktadır [14, 18, 26].

PIP D polimerinin yapısında bulunan [-OH] ve [>NH] grupları hem enine hem boyuna yönde hidrojen bağları oluşumunu sağlarken molekül zincirleri arasında çok sayıda hidrojen bağlarının kurulmasına neden olmaktadır [15, 19, 26, 29-32]. PBO polimerinin yapısında ise molekül zincirleri arasında sadece zayıf Van-der-Waals bağları bulunur [7]. Yüksek mukavemet ve yüksek modüle sahip diğer birçok lif de enine yönde genellikle zayıf Van-der-Waals bağları barındırmaktadır. Bu sayede çok yönlü hidrojen bağları ile geliştirilen PIPD polimeri bu liflere göre daha öne çıkmaktadır [14, 16, 20, 25, 29].



Şekil 1. PIPD ve PBO polimerlerinin kimyasal formülleri [17, 26, 33] ve bu polimerlerin kristal yapısı [7]

PIPd polimerinin sentezlenmesi ve lif çekimi ile M5 adı verilen yüksek performanslı bu lifler ticari olarak üretilmektedir [13]. Bu liflerin üretiminde kullanılan PIPd polimeri, PPA (polifosforikasit) içinde dikkatlice ısıtılarak 2,3,5,6 tetraaminopiridin (TAP) ve 2,5-dihidroksiteraftalik asit (DHTA) monomerleri arasında meydana getirilen bir kondenzasyon polimerizasyonu ile elde edilmektedir (Şekil 2) [7, 11, 34-36]. Bu yöntemin avantajı, PPA (polifosforikasit) içinde oluşturulan PIPd polimer çözeltisinin, direkt olarak lif çekim çözeltisi olarak kullanılabilmesidir [36]. Bu sayede de saflaştırılmış polimer reaksiyon ürünlerinden lif çekim çözeltisinin hazırlanması ve lif çekim çözeltisinin çözgen hazırlama işlemleri ve geri dönüşümü gibi işlemlerin maliyetlerinde de önemli miktarlarda azalmalar olmaktadır [35-38].



Şekil 2. PIPd polimerini oluşturan TAP ve DHTA

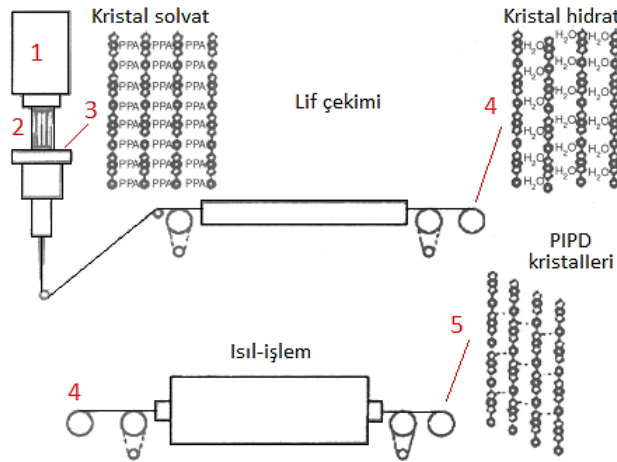
monomerlerinin polimerizasyon reaksiyonu [7, 11, 34-36]

3 PIPd Lif Çekimi ve Lif Özellikleri

PIPd liflerinin üretiminde konvansiyonel hava boşluklu yaş çekim yöntemi (kuru-jet yaş lif çekim yöntemi) kullanılmaktadır [6, 7, 14, 35, 39]. Lif çekimi gerçekleştirilecek polimerize edilmiş PIPd çözeltinin molekül ağırlığı 60000-150000 dalton arasında değişmektedir [40, 41]. Polimer çözeltisi hazırlanırken çözgen olarak metansülfonik asit [14, 22] de kullanılabilir gibi genelde tercih edilen çözgen polifosforikasittir [39, 42]. Şekil 3'de sırası ile lif çekim işlemi gösterilmiştir. İlk olarak lif çekim çözeltisi 180 °C'ye ısıtılır. Bu sıcaklıkta çözelti nematik fazdadır (Şekil 3-(1)) [6]. Lif çekim işlemi için hazırlanan polimer çözeltisi düzelerden geçirilerek 180-190°C'de hava ortamından su ya da seyreltilmiş fosforik asit bulunan koagülasyon banyosuna alınır [6, 7, 39, 40]. Çözelti düzelerdeyken ve hava boşluğuna ilk girdiği anlarda nematik haldeki çözelti yerini oryante olmuş nematik çözeltiye bırakır (Şekil 3-2). Ardından çözeltinin soğutulması ile birlikte nematik faz kristal solvat faza dönüşür (Şekil 3-3). Akabinde lifler koagüle olur (katlaşır) ve yıkanır [41]. Kristal solvat faz içerisindeki polifosforikasit (PPA) su ile yer değiştirir ve yapı Şekil 3-(4)'de gösterilen kristal hidrat formuna dönüşür. Ilımlı bir kurutma işleminden sonra yapı içerisinde hala su molekülleri bulunmaktadır [6, 41]. Bu noktada lifler "as-spun" lifler olarak adlandırılır. Isıl işlemler sırasında kristal yapı içerisindeki su molekülleri uzaklaştırılır ve susuz PIPd yapısı oluşturulur (Şekil 3-5). Isıl işlemler sırasında liflere uygulanan ısıl işlemin sıcaklığı çok düşük olursa ya da ısıl işlem süresi kısa olursa, kristal hidrat formundan PIPd kristallerine geçiş bozulabilir ve tersine çevrilebilmektedir (tersinebilmektedir) [6, 41]. Isıl işlemler sonucunda ortalama 10 mm çapında parlak mavi lifler elde edilmektedir [6, 20, 34, 43].

PIPd liflerinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için azot gazı altında yüksek sıcaklıkta gerilerek kısa süreli germe işlemine tabi tutulur [6, 7, 34]. Bu işlem sayesinde PIPd liflerinin atomik yapısı, kopma mukavemeti ve basma dayanımı için daha iyi bir düzenlemeye sahip hale gelmektedir [34]. 400 °C sıcaklık altında gerçekleştirilen bir çekme-germe işlemi sonrası mekanik özelliklerinde ciddi ölçüde bir gelişme gözlemlenen PIPd liflerinin modülleri 150-195

GA'dan 320-360 GPa' a yükselirken, mukavemet değeri de 2,5 GPa'dan 5,5 GPa'a artış göstermektedir [7, 14, 20, 39].



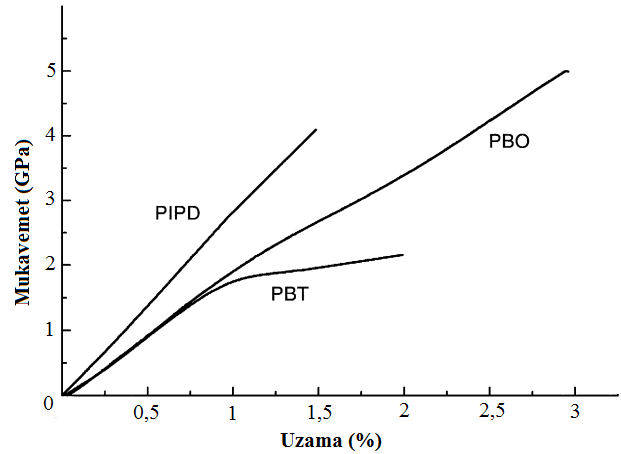
Şekil 3. PIPD polimerinden lif çekim işlemleri sırasında lif yapısının gelişimi:1-nematik faz, 2-oryante olmuş nematik faz, 3-kristal solvat, 4-kristal hidrat, 5-susuz yapı [6, 41]

3.1 PIPD Liflerinin Mekanik Özellikleri

Rijit-rod polimer yapısına sahip PIPD lifleri bu yapıdaki diğer tüm lifler gibi yüksek mukavemet ve modüle sahiptir (Şekil 4) [11]. Fakat PIPD polimerinin polimer zincirleri arasındaki çok yönlü hidrojen bağları sayesinde sahip olduğu yüksek basma direnci ve kayma direnci dayanımı ile diğer liflerden farklılaşmaktadır [11, 13, 23, 24, 31, 44, 45]. PIPD lifleri 1-1.75 GPa [15, 29, 35] basma dayanımı ile sentetik lifler arasında bugüne dek bilinen en yüksek basma dayanımına sahip lifleri oluşturmaktadır [15, 20, 29, 30].

PIPd liflerinin mekanik özellikleri diğer yüksek performanslı lifler ile karşılaştırıldığında birçoğundan daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu kaydedilmektedir [44]. Örneğin PIPd liflerinin kopma mukavemeti (3,5-6 GPa [7, 18, 21, 42, 46]) birçok Aramid (Kevlar, Twaron) (2,8-3 GPa [47]) ve UHMWPE (Dyneema, Spectra) (3-3,5 GPa [47]) liflerinden daha yüksektir [34]. Ayrıca PIPd lifleri neredeyse Aramid liflerinin iki katı basma dayanımına sahiptir [45]. PIPd lifleri yüksek mukavemetli karbon lifleri ile karşılaştırıldığında, PIPd liflerinin %40-60 daha yüksek mukavemete ve %20-40 daha yüksek başlangıç modülüne (300-360 GPa) [18, 21, 35, 48, 49]) sahip olduğu kaydedilmektedir [17, 42]. Fakat karbon liflerinden daha kırılmandır ve gerildiklerinde kalıcı

deformasyona uğrar [34].



Şekil 4. Mukavemet-Uzama Eğrisi [19]

Yapısındaki benzerlikten dolayı hem mekanik hem de termal özellikleri PBO lifleri ile de sıkça karşılaştırılan PIPD liflerinin modülü bu liflerden bir miktar yüksek iken, bu liflerin mukavemeti PBO liflerinin mukavemetin çok az bir farkla düşüktür [16, 18]. Ancak hala bu lif üzerinde iyileştirmeler devam ettiğinden daha yüksek değerlerin elde edileceği düşünülmektedir (Tablo 1) [17, 25].

Çizelge 1. PIPD lifleri ile bazı yüksek performanslı liflerin özelliklerinin karşılaştırılması [7, 13, 15, 16, 27, 28, 35, 37, 42, 46, 49]

Lif Cinsi	Kopma Anında ki Uzama (%)	Kopma Mukavemeti (GPa)	Başlangıç Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
PIPd (Polipiridobisimidazol) Lifleri	1,5-2,5	3,5-6	330-360	1,70
PBI (Polibenzimidazol) Lifleri	28-30	0,4	5,6	1,3-1,43
PBO (Poli-p-fenilenbenzobisoksazol) Lifleri	2,5-3,5	5,6-5,8	180-280	1,5
HPPE (Yüksek Performanslı Polietilen) Lifleri	2,5-4	2,4-3,1	70-105	0,97

Oldukça pahalı bir polimer olan PIPD polimerinin basma özellikleri suya karşı hassasiyet göstermektedir. Su ile teması PIPD liflerinin basma özelliklerinin zamanla kaybolmasına neden olmaktadır [29]. Ancak, PIPD lifleri gerilim altında yeniden tavlama işlemine tabii tutularak başlangıcında sahip olduğu hidrojen bağları seviyesini ve basma dayanımını korunabilmektedir [29, 50].

3.2 Isı ve Alev Dayanımı

Tüm rijit-rod polimerik liflerde olduğu gibi PIPD lifleri de yüksek alev direncine sahiptir [5, 8, 51, 52]. Tam bir erime noktasının olmayışı, yapısında bulunan molekül zincirlerinin rijitliği ve zincirler arası güçlü etkileşimi bu liflerin yüksek alev dayanımının nedeni olarak kabul edilmektedir [5, 9, 51].

Hava bulunan ortamda yanmayan PIPD lifleri aynı zamanda kendi kendilerini söndürebilme yeteneğine sahiptir [9, 51]. Yanma için gerekli oksijen değeri (LOI) 25'den büyük olan lifler güç tutuşur olarak kabul edildiğinden PIPD lifleri de 50'den büyük LOI değeri ile termal dayanımı oldukça yüksek lifler kategorisine girmektedir (Tablo 2) [51]. Ancak LOI değeri tam olarak alev dayanımını temsil etmediğinden, liflerin aleve karşı dayanıklılığının değerlendirilebilmesi için konik kalorimetre kullanılmaktadır [9].

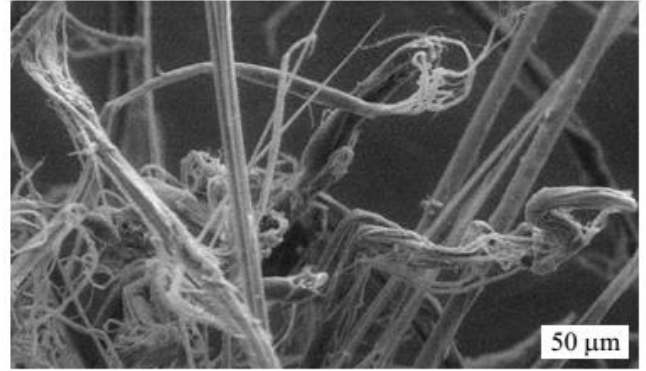
Çizelge 2. Bazı yüksek performanslı liflerin nem geri kazanımları ve termal özellikleri [15, 28, 37, 51]

Lif Cinsi	LOI	Bozunma		Nem Geri Kazanımı (%)
		Sıcaklığı (C°)		
HPPE (Yüksek Performanslı Polietilen)	16	150	-	
PBO (Poli-p-fenilenbenzobisoksazol)	68	550-650	0,6-3	
PBI (Polibenzimidazol)	41	450-550	15	
PIP (Polipiridobisimidazol)	>50	500	4,5	
Aramid Lifleri (Kevlar)	30	550	3-3,5	

PIP liflerinin ısı salım hızı 44 kW/m² ve tutuşma zamanı 77 saniye, PBO liflerinin ısı salım hızı 48 kW/m² ve tutuşma zamanı 56 saniye, p-aramid liflerinin ısı salım hızı 205 kW/m² ve tutuşma zamanı 20 saniye olarak ölçülmüştür [51]. Bu değerlendirmeler PIP liflerin yüksek termal dayanım özelliklerine sahip olduğunu onaylar niteliktedir [9, 51]. Ani alevlenme (flashover) şartları dâhil birçok ortamda yanmadığı ve duman üretmediği ya da çok az miktarda ürettiği gözlemlenmiştir [5, 9, 51]. Testler sırasında lif yüzeyinde bir kömür tabakasının oluştuğu ve bu kömür tabakasının da lifin geri kalan kısmını, alevin olumsuz etkilerinden koruduğu

kaydedilmiştir [51].

Konik kalorimetre ile gerçekleştirilen bir başka çalışmada, PIPD (M5) lifleri ve PPTA (Poli-p-



fenilenediamintereftalamid) liflerinin 75 kW/m² 'lık bir ısı akışı altında kütle kaybı ve ortalama yaydıkları CO ve CO₂ miktarları incelenmiştir. Yapılan değerlendirmelere göre; azot ortamında hem PIPD liflerinin hem de PPTA liflerinin 450°C'den 600°C'e kadar olan sıcaklıklarda ciddi bir bozunma yaşadığı, 1200 °C'de ise her iki lifin de kütlelerinin sadece %4'ünü koruyabildiği belirtilmektedir. Hava ortamında ise 1200 °C'de PIPD lifleri ağırlığının %55'ini korumayı başarmıştır, PPTA lifleri ise ağırlıklarının %40'ını koruyabilmiştir [9]. PIPD liflerinin süreye bağlı olarak ortama yaydıkları CO miktarı düzensiz bir eğri sergilese de PIPD liflerinin CO₂ salınımının PPTA liflerine göre daha düşük olduğu kaydedilmiştir [9].

Ayrıca test sırasında PPTA lifleri oldukça yüksek alevli yanarken, PIPD lifleri çok küçük alevler ile kor gibi parladığı ve PPTA lifleri yanma sırasında duman üretmesinin aksine PIPD liflerinin duman üretmediği gözlemlenmiştir [9].

PIP (M5) liflerinin, aleve dayanıklılıkları ile bilinen PBO ve aramid liflerinden (Kevlar, Twaron, Nomex lifleri) daha yüksek ısı ve alev dayanımına sahip olduğu, hatta bugüne kadar geliştirilmiş organik lifler arasında alev dayanımı en yüksek lif olduğu belirtilmektedir [5, 27, 34, 51, 52].

3.3 PIPD Liflerinin Diğer Özellikleri

PIP liflerinin üstün mekanik özellikleri ve oldukça yüksek termal dayanımının yanında UV ışınlarına karşı dayanımı da oldukça iyidir. Yapısal benzerlikler taşıdığı PBO lifleri ile kıyaslandığında, UV ışınlarına ve neme karşı ciddi oranda hassas PBO liflerinin

aksine PIPD (M5) liflerinin UV ışınlarına ve neme karşı iyi bir dayanım gösterdiği belirtilmektedir [6, 35, 53]. Aynı zamanda oldukça yüksek darbe dayanımına ve kesilme dayanımına sahip bu lifler özellikle balistik ürünler için iyi bir hammadde adayı haline gelmektedir [27, 35]. Literatürde balistik koruma amaçlı geliştirilen PIPD lifleri ile hazırlanmış kumaş ya da kompozit yapılara rastlamak mümkündür (Şekil 5) [39]. PIPD lifleri gibi yüksek darbe dayanımına sahip PBO lifleri de balistik ürünlerde kullanılmaktadır. Ancak PBO liflerinin UV ışınlarına ve neme hassasiyeti sebebiyle, PBO lifleri UV ışınlarından ve nemden korunacak şekilde balistik ürünlerde kullanılabilir [28]. PIPD lifleri bu açıdan PBO lifleri ile kıyaslandığında avantaj sağlamaktadır.

Şekil 5. PIPD lifi kompozit yapıda balistik darbe sonrası liflerin uğradığı deformasyon [39]

PIPd liflerinin UV dayanımı açısından PBO liflerine olan üstünlüğü farklı bir çalışmaya ilham olmuş, poli(parafenilen benzobisoksazol) polimeri molekül zincirlerinin içerisine poli(pridobisimidazol) polimeri molekül zincirlerindeki fonksiyonel gruplar sokulmuştur [54]. Bu yeni karışım polimerin polimerizasyon çözeltisinden direk kuru jet yaş lif çekim yöntemi ile PBO/PIPd lifleri elde edilmiştir. PBO lifleri ile kıyaslandığında, PBO/PIPd liflerinin daha yüksek UV dayanımının olduğu kaydedilmiştir [54].

PIPd (M5) liflerinin sağlığa belirlenmiş bir zararı bulunmamaktadır. Fareler üzerinde yapılan bir araştırmada PIPd (M5) lif parçacıklarının farelerin solunum sistemine verdiği zarar incelenmiş ve sonuç olarak farelerin akciğerlerinde ciddi bir hasarın oluşmadığı, PIPd (M5) liflerinin sağlık için çok düşük bir risk potansiyeline sahip olduğu kaydedilmiştir [4].

4 PIPD Liflerinin Kullanım Alanları

Balistik özelliklerinin iyi olması, ısıya ve aleve karşı gösterdiği üstün dayanım ile birlikte UV ışınlarına ve neme karşı hassasiyetlerinin az olması PIPd liflerini yüksek performanslı lif pazarında öne çıkan bir hammadde kaynağı haline getirmektedir [56]. Bu lifler, hafif ağırlıklı kompozitler; balistik koruma sağlayan sert ve yumuşak zırhlar; asker, polis, itfaiyeci kıyafetleri ya da endüstri çalışanlarının kıyafetleri gibi kişisel koruma ürünleri; yüksek mukavemetli

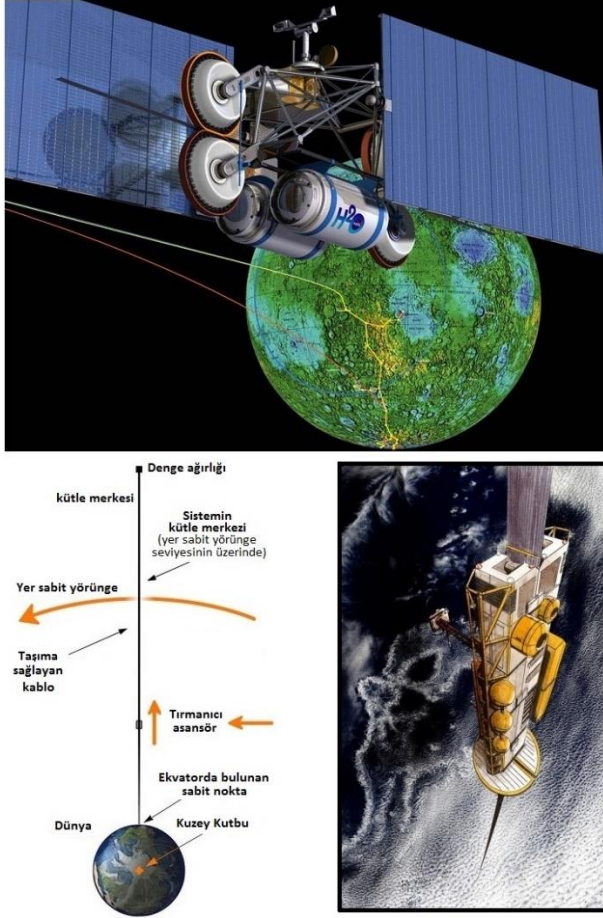
kablolar, spor tekstilleri ve uzay uygulamaları başta olmak üzere birçok teknik tekstil malzemelerinde kullanılabilirler [8-10, 27, 35, 51, 53, 57] (Şekil 6 **Error! Reference source not found.**). Özellikle PIPd lifli yapıların balistik koruma amaçlı kullanımını ve balistik koruma sağlayan diğer ürünler karşısında performans özelliklerini araştıran çalışmalara rastlamak mümkündür [39, 58].



Şekil 6. PIPd liflerinin başlıca kullanım alanlarından biri olan koruyucu teknik tekstiller itfaiyecilerin giysilerinde, asker ve polislerin balistik koruma sağlayan zırhlarında kullanılmaktadır [59]

Yüksek darbe dayanımı ile özellikle balistik koruma sağlayan ürünlerin üretiminde kullanımı için oldukça iyi bir adaydır [16, 35, 53, 56, 60, 61]. Balistik özellikleri açısından Amerika Birleşik Devletleri Ordusu ve Natick Askeri Merkez Laboratuvarları tarafından yapılan testler bu yeni yüksek performanslı lifin balistik ürünlerde kullanımı için iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir [6, 56, 62]. Özellikle balistik koruma sağlayan zırhlar için PBO, Kevlar, HPPE (Yüksek performanslı polietilen) gibi liflere bir alternatif oluşturmaktadır [61]. Mekanik özellikleri oldukça iyi olan bu lifin, karbon liflerinin kullanıldığı uygulama alanlarına rakip olabileceği belirtilmiştir [35]. Yüksek kutuplaşmasının (polaritesi) gelişmiş kompozit üretiminde adezyonu kolaylaştırdığı gözlemlenen PIPd liflerinin kompozit yapılarda kullanım potansiyelinin de oldukça yüksek olduğu kaydedilmiştir [10, 11, 35, 42, 44, 51, 53, 63].

PIPd (M5) lifleri yenilikçi birçok araştırmanın içerisinde de yer alan bir malzemedir. 2020'li yıllarda hayata geçirilmesi hedeflenen uzay asansörü projesi de buna bir örnektir (Şekil 7).



Şekil 7. Yakın gelecekte gerçekleştirilmesi hedeflenen uzay asansörü projesinde yapılan araştırmalara göre kablo olarak kullanılacak en uygun malzemelerden biri PIPD (M5) lifli kablo yapılıdır [64, 65].

Dünya ile uzayın her hangi bir noktasında sağlam dayanıklı kablolar üzerinde gidip gelen bir uzay asansörü amaçlanmaktadır [64]. Günümüzde bu projenin sağlıklı şekilde hayata geçirilmesine yetecek şartlar henüz sağlanmış olmasa da bu konuda araştırmalar halen devam etmektedir. PIPD (M5) lifleri de bu proje kapsamında kablo olarak kullanıma elverişli lifler arasında incelenmektedir. Düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet özellikleri açısından PIPD (M5) ve HPPE liflerinin kullanımı oldukça olası görülse de, hem maliyet hem de performans özellikleri ile karbon nanotüpler bu liflerin kullanımına bir alternatif oluşturmaktadır. PIPD (M5) liflerinin performans özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar halen devam ettiğinden, PIPD (M5) liflerinin bu projede kullanılması olası görülmektedir [64, 65] (Şekil 7).

5 Sonuç

Yüksek performanslı lifler önemini her geçen gün daha da arttıran bir lif grubu haline gelmiştir. Çeşitli üstün performans özellikleri ile farklı alanlarda kullanım potansiyeline sahip bu lif sınıfı sadece tekstil endüstrisinde değil, birçok endüstri alanında tekstil materyali olarak kullanılabilir. Ülkemizde de son yıllarda teknik tekstillerin üretiminin oldukça önem kazanması bu ürünlerin üretiminde kullanılan hammaddelerin yapılarının ve özelliklerinin bilinirliğinin artması ve bu hammaddelerin çeşitliliğine dikkat çekilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple bu derleme çalışmada, yüksek performanslı lifler arasında yüksek mukavemet, yüksek modül, yüksek basma dayanımı ve yüksek ısı-alev dayanımı ile öne çıkan PIPD (M5) liflerine yer verilmiştir. Bu liflerin bünyesinde barındırdığı performans özelliklerine ve bugünkü kullanım alanlarına dikkat çekilerek ülkemizdeki teknik tekstil çalışmalarına alternatif bir hammadde kaynağı oluşturmak hedeflenmiştir.

6 Kaynaklar

- [1] Erdoğan, Ü.H. Yüksek Mukavemetli Lifler ve İplikler. TSE Standard Ekonomik Ve Teknik Dergi. 2012; 51, 57-65.
- [2] Horrocks, A.; C. Anands. Teknik Tekstiller El Kitabı; Türk Tekstil Vakfı: İstanbul, 2003.
- [3] Horrocks, A.R.; Anand, S.C. Handbook Of Technical Textiles; Woodhead Publishing Limited: Cambridge, 2000.
- [4] Warheit, D.B.; Webb, T.R.; Reed, K.L. Pulmonary Toxicity Screening Studies In Male Rats With M5 Respirable Fibers And Particulates. Inhalation Toxicology. 2007; 19, 951-963.
- [5] Horrocks, A.R. And Price, D. Advances in Fire Retardant Materials; Elsevier: Cambridge, 2008.
- [6] Mittal, V., High Performance Polymers And Engineering Plastics; John Wiley & Sons: New Jersey, 2011.
- [7] Bunsell, A.R., Handbook Of Tensile Properties Of Textile And Technical Fibres; Woodhead Publishing Limited: Cambridge, 2009.
- [8] Dupont To Acquire Majority Interest In Magellan Systems International. 2005; Erişim: Temmuz 2015, http://www2.dupont.com/Media_Center/en_US/news_releases/2005/nr04_04_05a.html
- [9] Bourbigot, S.; Flambard, X.; Ferreira, M.; Devaux, E.; Poutch, F. Characterisation and Reaction to Fire of "M5" Rigid Rod Polymer Fibres. Journal of Materials Science. 2003; 38, 2187-2194.
- [10] So, C.; Bennett, J.; Sirichaisit, J.; Young, R. Compressive Behaviour of Rigid Rod Polymer Fibres and Their Adhesion to Composite Matrixes. Plastics, Rubber and Composites. 2003; 32, 5, 199-205.
- [11] Sikkema, D.J.; Northolt, M.G.; Pourdeyhimi, B.

Assessment of New High Performance Fibers for Advanced Applications. *MRS Bulletin*, 2003, 28, 08, 579-584.

[12] Lammers, M. PIPD Rigid-Rod Polymer Fibers and Films: Structure Formation and Mechanical Properties; Abe Books: Zurich, 1998.

[13] Hearle, J.W.; Morton, W.E. Physical Properties of Textile Fibres; CRC Press: Cambridge, 2008.

[14] Eichhorn, S.; Hearle, J.W.; Kikutani, T. Handbook of Textile Fibre Structure Volume 1: Fundamentals And Manufactured Polymer Fibres; Woodhead Publishing Limited: Cambridge, 2009.

[15] Chae, H.G.; Kumar, S. Rigid Rod Polimeric Fibres. *Journal Of Applied Polymer Science*, 2006; 100, 1, 791-802.

[16] National Research Council of The National Academies. Opportunities in Protection Materials Science And Technology for Future Army Applications. The National Academies Press: Washington D.C., 2011.

[17] Gupta, B.S. Friction in Textile Materials. Woodhead Publishing Limited: Cambridge; 2008.

[18] Kitagawa, T.; Yabuki, K.; Wright, A.C.; Young, R.J. An Investigation Into The Relationship Between Processing, Structure And Properties For High-Modulus PBO Fibres: Part 3: Analysis Of Fibre Microstructure Using Transmission Electron Microscopy. *Journal Of Materials Science*, 2014; 49, 6467-6474.

[19] Leal, A.A.; Deitzel, J.M.; Gillespie Jr, J.W. Assessment Of Compressive Properties Of High Performance Organic Fibers. *Composites Science And Technology*, 2007; 67, 2786-2794.

[20] Montes-Moran, M.A.; Davies, R.J.; Riekel, C.; Young, R.J. Deformation Studies Of Single Rigid-Rod Polymer-Based Fibres Part 1: Determination Of Crystal Modulus. *Polymer*, 2002; 43, 5219-5226.

[21] Niu, H., M. Huang, S. Qi, E. Han, G. Tian, X. Wang And D. Wu, High-Performance Copolyimide Fibers Containing Quinazolinone Moiety: Preparation, Structure And Properties. *Polymer*, 2013; 54, 6, 1700-1708.

[22] Acton, Q.A. Sulfur Acids- Advances In Research And Application. Scholarly Editions: Atlanta, Georgia, 2013.

[23] Jacobs, M. Ph.D. Thesis, Eindhoven University Of Technology. Eindhoven, 1999.

[24] Elices, M.; Llorca, J. Fiber Fracture. Elsevier Science Ltd.: Oxford, 2002.

[25] Scott, R.A. Textiles For Protection. CRC Press: Cambridge, 2005.

[26] Mckenna, H.A.; Hearle, J.W.; O'Hear, N. Handbook Of Fibre Rope Technology. Elsevier, 2004.

[27] Zhu, R.; Young, R. Thermal Performance Garments Comprising An Outer Shell Fabric Of PIPD And Aramid Fibers. Google Patents, 2006.

[28] Kalaycı, E.; Avinç, O.O.; Yavaş, A. Tekstil Ve Mühendis, Yüksek Performanslı PBO (Poli-P-Fenilenbenzobisoksazol) Lifleri. 2015; 22, 98, 62-83.

[29] Denchev, Z.; Dencheva, N. Manufacturing And Properties Of Aramid Reinforced Composites. Synthetic Polymer-Polymer Composites, Hanser Publishers, 2012; 251-

280.

[30] Mortensen, A. Concise Encyclopedia Of Composite Materials Elsevier: Amsterdam, 2006.

[31] Lin, H.; Huang Y.D.; Wang, F. Synthesis And Properties Of Poly [P-(2, 5-Dihydroxy)-Phenylenebenzobisoxazole] Fiber. *International Journal Of Molecular Sciences*, 2008; 9, 11, 2159-2168.

[32] Takahashi, Y. Crystal Structure Of Poly (Pyridobisimidazole), PIPD. *Macromolecules*, 2003; 36, 23, 8652-8655.

[33] Cervenka, A.; Young, R.; Kueseng, K. Micromechanical Phenomena During Hygrothermal Ageing Of Model Composites Investigated By Raman Spectroscopy. Part II: Comparison Of The Behaviour Of PBO and M5 Fibres Compared With Twaron. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 2005; 36, 7, 1020-1026.

[34] M5 Fiber; Erişim: Eylül 2014, [Http://En.Wikipedia.Org/Wiki/M5_Fiber](http://En.Wikipedia.Org/Wiki/M5_Fiber),

[35] Afshari, M.; Sikkema, D.J.; Lee, K.; Bogle, M. High Performance Fibers Based on Rigid and Flexible Polymers. *Polymer Reviews*, 2008; 48, 2, 230-274.

[36] Picken, S.; Sikkema, D.; Boerstael, H.; Dingemans, T.; Van Der Zwaag, S. Liquid Crystal Main-Chain Polymers For High-Performance Fibre Applications. *Liquid Crystals*, 2011; 38, 1591-1605.

[37] Kalaycı, E.; Avinç, O.; Yavaş, A. Polibenzimidazol (PBI) Lifleri. *Tekstil Ve Mühendis*, 2014, 21, 96 51-67.

[38] Mather, R.R.; Wardman, R.H. The Chemistry Of Textile Fibres. The Royal Society Of Chemistry: Cambridge, 2011; 214-217.

[39] Cunniff, P.M.; Auerbach, M.A.; Vetter, E.; Sikkema, D.J. High Performance "M5" Fiber For Ballistics/Structural Composites. 23rd. Army Science Conference, 2002.

[40] Mark, H.F.; Kroschwitz, J.I. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. John Wiley & Sons: New York, 1987.

[41] Lammers, M.; Klop, E.A.; Northolt, M.G.; Sikkema, D.J. Mechanical Properties and Structural Transitions in The New Rigid-Rod Polymer Fibre PIPD ('M5') During The Manufacturing Process. *Polymer*, 1998, 39, 5999-6005.

[42] Lesser, A.J. Drawing Nylon 6, 6 Fibers in High Pressure Co₂. DTIC Document, 2005.

[43] Takahashi, Y. Resonance Raman Spectra of poly-(p-phenylenebenzobisoxazole), poly-(p-phenylenebenzobisthiazole), and poly (pyridobisimidazole). *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2001; 39, 15, 1791-1793.

[44] Zhang, T.; Li, G.; Jin, J.; Jiang, Research and Application of New High Performance Fiber M5. *Journal of Materials Review*, 2007; 009.

[45] Houcks, M.M. Identification Of Textile Fibers. Woodhead Publishing Limited: Oxford, 2009; 12-13.

[46] Journee, M.J.G., USUS 20120165423A1, Google Patents, 2012.

[47] Module 2. High Strength High Modulus Fibres, Erişim: Aralık 2014, [Http://Nptel.Ac.In/Courses/116102006/6](http://Nptel.Ac.In/Courses/116102006/6),

- [48] Rice, B.; Quinzi, J.; Lund, L.; Ulreich, J.; Shoup, M. Measurement of Young's Modulus and Damping of Fibers at Cryogenic Temperatures. *Cryogenics*, 2014; 63, 43-48.
- [49] Sirichaisit, J.; Young, R.J. Tensile and Compressive Deformation of Polypyridobisimidazole (PIPD)- Based 'M5' Rigid-Rod Polymer Fibres. *Polymer*, 1999; 40, 12, 3421-3431.
- [50] Leal, A.A.; Deitzel, J.M.; Mcknight, S.H.; Gillespie Jr, J.W. *Polymer*, 2009; 50, 2900-2905.
- [51] Bourbigot, S.; Flambard, X. Heat Resistance and Flammability of High Performance Fibres: A Review. *Fire and Materials*, 2002; 26, 155-168.
- [52] Northolt, M.; Sikkema, D.; Zegers, H.; Klop, E. PIPD, A New High-Modulus and High-Strength Polymer Fibre With Exceptional Fire Protection Properties. *Fire and Materials*, 2002; 26, 169-172.
- [53] Gillespie Jr, J.; De Vault, J.; Edie, D.; Gabara, V.; Haulik, T. High-Performance Structural Fibers For Advanced Polymer Matrix Composites. The National Academies Press: Washington DC, 2005.
- [54] Cao, K.; Zhong, Y.; Guan, G.; Li, C.; Zhu, W.; Xiao, Y.; Zhang, D.; Zheng, L. Synthesis and Characterization of Poly (p-phenylene benzobisoxazole)/Poly (pyridobisimidazole) Block Copolymers. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 2012; 49, 508-517.
- [55] Cao, K.; Zhong, Y.; Guan, G.; Li, C.; Zhu, W.; Xiao, Y.; Zhang, D.; Zheng, L. Effect of Hydration on The Structures and Properties of Poly (p-phenylene benzobisoxazole)/Poly (pyridobisimidazole) Block Copolymer Fibers. *High Performance Polymers*, 2012, 24, 432-440.
- [56] Bhatnagar, A. *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications*. Woodhead Publishing: 2006.
- [57] Van Der Jagt, O.; Beukers, A. The Potential of A New Rigid-Rod Polymer Fibre (M5') in Advanced Composite Structures. *Polymer*, 1999; 40, 4, 1035-1044.
- [58] Army Soldier, Erişim: Ağustos 2015, <http://hermes52.deviantart.com/art/u-s-army-soldier-34508852>
- [59] Emergency Rescue Services Team Silhouettes, Erişim: Ağustos 2015, <http://www.shutterstock.com/s/firemen/search.html?page=1&inline=226237927>
- [60] Çay, A.; Süpüren, G.; Kanat, Z.E.; Gülümser, T.; Tarakçıoğlu, I. Balistik Lifler (Bölüm 1). *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2007; 17, 4, 232-236.
- [61] Holmes, G.; Rice, K.; Snyder, C. Ballistic Fibers: A Review of The Thermal, Ultraviolet and Hydrolytic Stability of The Benzoxazole Ring Structure. *Journal of Materials Science*, 2006; 41, 13, 4105-4116.
- [62] Wilusz, E. *Military Textiles*. Woodhead Publishing Limited: Cambridge, 2008.
- [63] Sikkema, D.J. Design, Synthesis and Properties of A Novel Rigid Rod Polymer, PIPD or 'M5': High Modulus and Tenacity Fibres With Substantial Compressive Strength. *Polymer*, 1998, 39, 24, 5981-5986.
- [64] Walker, R. Is It Feasible To Move An Iron Rich Asteroid Into A Geosynchronous or Geostationary Low Earth Orbit and Build A Steel Works On or In The Asteroid to Manufacture A Steel Cable That Could Be Lowered To Earth? 2014. Erişim: Ağustos 2015, [Http://www.Quora.Com/Is-It-Feasible-To-Move-An-Iron-Rich-Asteroid-Into-A-Geosynchronous-Or-Geostationary-Low-Earth-Orbit-And-Build-A-Steel-Works-On-Or-In-The-Asteroid-To-Manufacture-A-Steel-Cable-That-Could-Be-Lowered-To-Earth](http://www.Quora.Com/Is-It-Feasible-To-Move-An-Iron-Rich-Asteroid-Into-A-Geosynchronous-Or-Geostationary-Low-Earth-Orbit-And-Build-A-Steel-Works-On-Or-In-The-Asteroid-To-Manufacture-A-Steel-Cable-That-Could-Be-Lowered-To-Earth)
- [65] Pearson, J.; Levin, E.; Oldson, J.; Wykes, H. Lunar Space Elevators for Cislunar Space Development. NASA Institute for Advanced Concepts Study Technical Report, 2005; 7.

