



TEKSTİL VE MÜHENDİS

(Journal of Textiles and Engineer)



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

Yüksek Performanslı PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) Lifleri

High Performance PBO (poly-p-phenylene benzobisoxazole) Fibers

Ece KALAYCI, O. Ozan AVİNÇ, Arzu YAVAŞ
Pamukkale Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Denizli,

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online): 26 Haziran 2015 (26 June 2015)

Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):

Ece KALAYCI, O. Ozan AVİNÇ, Arzu YAVAŞ (2015): Yüksek Performanslı PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) Lifleri, Tekstil ve Mühendis, 22: 98, 63-83.

For online version of the article: <http://dx.doi.org/10.7216/130075992015229807>



YÜKSEK PERFORMANSLI PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) LİFLERİ

Ece KALAYCI
O. Ozan AVINÇ*
Arzu YAVAŞ

Pamukkale Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 03.12.2014
Kabul Tarihi / Accepted: 12.02.2015

ÖZET: Yüksek performanslı lifler arasında üstün mukavemeti ve yanma dayanımı ile öne çıkan PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) lifleri teknik tekstillerin neredeyse tüm alanlarında geniş bir kullanıma sahiptir. Lif, iplik, kumaş (örme ya da dokuma), dokusuz yüzey ya da kompozit olarak farklı yapı formlarında kullanılabilen bu liflerin uygulamalarında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ışık ve neme karşı hassasiyetleridir. Bu sebeple hem saklama hem de uygulama koşullarına büyük özen gösterilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) liflerinin üretimine, özelliklerine ve kullanım alanlarına yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Poli-p-fenilenbenzobisoksazol lifi, yüksek performans lifi, yüksek mukavemetli lif, yüksek modüllü lif, ısıya dayanıklı lif

HIGH PERFORMANCE PBO (poly-p-phenylene benzobisoxazole) FIBERS

ABSTRACT: PBO (poly-p-phenylenebenzobisoxazole) fibers which step forward among other high performance fibers due to its excellent strength and flame resistance properties have a widespread usage in almost all technical textile areas. PBO can be used in different forms such as fiber, yarn, fabric (knitted or woven), nonwoven or composite. The most striking unfavorable point of these fibers is their sensitivity to light and moisture. Therefore, these fibers should be applied and stored in a sensitive manner. In this review, production, properties and application areas of PBO (poly-p-phenylenebenzobisoxazole) fibers are given in detail.

Keywords: Poly-p-phenylenebenzobisoxazole fiber, high performance fiber, high strength fiber, high modulus fiber, heat resistant fiber

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: oavinc@pau.edu.tr
DOI: 10.7216/130075992015229807, www.tekstilvemuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

Yüksek teknoloji ile üretilen ve genellikle teknik amaçlı olarak kullanılan lifler olarak tanımlanan yüksek teknolojiye sahip lifler içerisinde mukavemet, modül, termal dayanım, kimyasal dayanım, hava şartlarına dayanım gibi özellikleri konvansiyonel tekstil liflerinden çok daha üstün olan lifler “yüksek performanslı lifler” olarak ifade edilmektedir [1,2]. Yüksek performanslı lifleri sahip oldukları özelliklere ve son kullanım alanlarına göre, ısıya dayanıklı lifler, yüksek mukavemetli lifler ve kimyasallara dayanıklı lifler olarak üç kategoride incelenebilmektedir. Yüksek mukavemetli yüksek performanslı lifleri başlığı altında incelenen poli-p-fenilenbenzobisoksazol (PBO) lifleri tümüyle aromatik bir polimer zincirine sahip polibenzobisoksazol (PBO) polimerinden elde edilmektedir [3,4]. Yaklaşık 30 yıllık bir geçmişi olan bu liflerin tarihi Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri tarafından Kevlar’dan daha üstün özelliklere sahip lif elde etmek amacıyla yapılan çalışmalara dayanmaktadır [5]. Bu araştırmalarda ilk olarak polibenzazoller geliştirilmiş ve bunu takiben lif formu olarak poli-p-fenilen-benzobisdiazol (PBZT) lifleri elde edilmiştir [6-8]. Fakat PBZT liflerinin pahalı işlem basamaklarından dolayı, bu liflere göre performans ve fiyat bakımından avantaj sağlayan liflerin geliştirilmesi için araştırmalara devam edilmiş ve tüm bu yoğun çabaların sonunda PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) lifleri geliştirilmiştir [6,7,9-12].

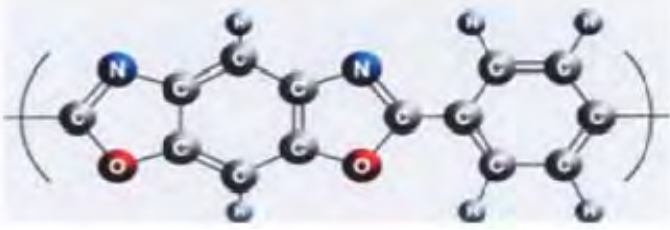
PBO liflerinin ticarileşmesi için atılan ilk adım, PBO ile ilgili tüm patentlerin sahibi Standford Araştırma Enstitüsü’nün bu patentlerin tüm haklarını Dow Kimya Şirketi’ne satışı ile gerçekleşmiştir [7,13]. Ancak Dow Kimya Şirketi’ni bu satışın ardından yedi yıl boyunca PBO polimerinin rijit karakterinden kaynaklanan problemlerle karşılaşmış ve lif çekiminde başarılı sonuçlar elde edememiştir [14,15]. Toyobo, Dow Kimya Şirketinin aksine bu rijit karakterin gelecek vaat ettiğini düşünerek şirkete lifin geliştirilmesi için ortaklık teklif etmiş ve 1991 yılında birlikte çalışma kararı alan iki şirket bundan 3 yıl sonra PBO liflerini lif haline getirebilecekleri özel bir lif çekimi geliştirilmişlerdir [7]. Fakat Dow Kimya Şirketi iş stratejilerindeki değişiklik sebebiyle PBO liflerinin

geliştirilmesine katılmaktan vazgeçmiş böylece 1998 yılında Zylon ticari ismi ile PBO lifi ilk olarak Toyobo tarafından piyasaya sürülmüştür [4,7,10,13,14,16-18]. Üretimi ilk yıllarda yılda 200 ton olan PBO (Zylon) lifleri, 2002 yılında yılda 360 ton tüketilmeye başlanmıştır [14]. Zamanla mukavemeti daha da geliştirilen PBO liflerinin günümüzde 5,8 GPa’ı aşan mukavemet değerlerine rastlamak mümkündür [9,13,19].

Günümüzde PBO lifleri ticari olarak, sadece Toyobo tarafından Poli (p-fenilen-2,6-benzobisoksazol) ya da Zylon olarak üretilmektedir. Yaygın kullanımda Zylon-AS (As Spun-ekstra germe çekme işlemi uygulanmamış) ve ısı işlem uygulanmış daha yüksek modüllü Zylon-HM (High Modulus-yüksek modüllü) gibi türleri mevcuttur [2,3,5,11,12,14,20-34]. Literatürde başta aramid olmak üzere birçok yüksek performans özellikli lifler ile karşılaştırılan bu liflerin genellikle üstün özellikler sergilediği, aynı zamanda maliyet olarak aramid liflerinden oldukça fazla, PBI (polibenzimidazol) lifleri ile ortalama aynı maliyette olduğu kaydedilmiştir [3,35]. Bu derlemenin ileriki bölümlerinde polimer sentezi, polimerden lif çekimi, elde edilen liflerin özellikleri ve bu liflerin kullanım alanları gibi konulara yer verilecektir.

2. PBO POLİMERİNİN SENTEZİ VE PBO LİF ÇEKİMİ

PBO, Şekil 1’de görüldüğü gibi aromatik hetero-siklik halka içeren polibenzazollerden biridir [9]. Aşırı sert ve oldukça sıralı kristalin yapı formuna sahip sıvı kristalin polimerler olarak bilinen bir malzeme sınıfına aittir ki [1,12,23-25,28,36-38] bu polimer sahip olduğu yapı sayesinde yüksek mukavemete ve oldukça iyi termal ve alev dayanımına sahiptir [39]. Sıvı kristalin polimerler termotropik (ısı yönelimli yani sıcaklık değişimi ile sıvı kristalin faza geçen) ve liotropik (çözeltideki sıvı kristal moleküllerin konsantrasyonuna ve sıcaklığına bağlı olarak faz değiştiren) sıvı kristalin polimerler şeklinde ayrılmaktadır. Liotropik ve termotropik polimerler ayrı ayrı hem çözelti içerisinde hem de hem de eriyikte sıvı kristalin hale gelir. PBO ve Kevlar polimerleri liotropik davranış sergilemektedirler [18].



Şekil 1. PBO'nun kimyasal yapısı [27,40]

2.1. PBO polimer sentezi

PBO polimeri DABDO (4,6-diamino- 1,3-benzendiol dihidroklorid) ve teraflatik asitin (TA) reaksiyonu ile sentezlenmektedir (Şekil 2) [10,14,17,18,36]. Polimerizasyon öncesinde, amino monomerinin tamamen aktifleştirilmesi için gerekli olan dehidroklorinasyon reaksiyonuna (bir molekülden hidrojenklorit elementlerinin uzaklaştırılması reaksiyonu) izin vermek amacıyla amino hidroklorit monomeri ve polifosforik asit (PPA) 3-24 saat arasında değişen sürelerde 60-130C sıcaklığa kadar ısıtılır [10]. İşlem bir vakum sisteminde veya reaksiyona girmeyen bir gaz ortamında gerçekleştirilir [10]. Bu sentez işlemi sırasında polifosforik asit çözücü, katalizör ve kurutucu ajan olarak üç farklı görevi üstlenmektedir [17,18].

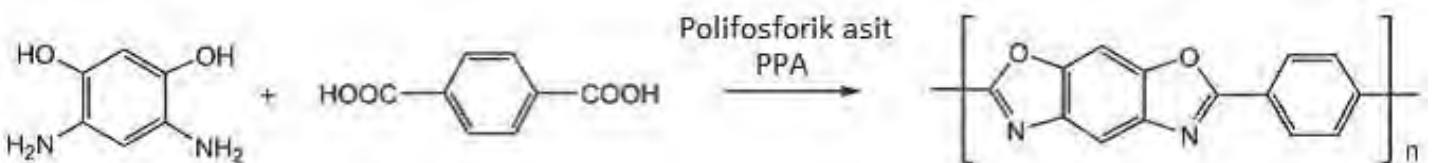
İşlem sonrasında karıştırılabilir bir karışım elde etmek için bir miktar daha PPA (polifosforik asit) ve/veya P₂O₅ (fosfor pentoksit) ilavesi gerekmektedir [10]. Polimerizasyonun başlaması ve teraflatik asidi ısılatmak için karışım 100-150°C'e ısıtılır. Aynı zamanda kalan hidrojen klorit de uzaklaştırılmış olur. Daha sonra karışım hetero halkalaşma (heterocyclization) tamamlanmaya kadar 48 saate kadar değişen sürelerde 150°C'den daha yüksek sıcaklıklara (190-200) ısıtılır [10].

Üretim metodu ve amin monomerinin saflaştırılması, polimerin üstün mekanik özelliklere sahip olmasını garanti eden yüksek molekül ağırlığı ile ilişkili olduğundan büyük önem taşımaktadır. Bu işlemler aynı zamanda oldukça da pahalıdır [10].

Molekül ağırlığını etkileyen diğer bir önemli konu da teraflatik asitin karışım içerisinde tamamen çözünmesini sağlayacak kadar küçük yapıda (10 nm' den az) olmasıdır. Teraflatik asit ne kadar küçük yapıda ise molekül ağırlığı o kadar artar. Uygun şartlar altında, polimerin viskozitesi 30-50 dL/g, molekül ağırlığı ortalama 40000-60000 g/mol civarındadır ve zincir uzunluğu yaklaşık 210 nm olarak elde edilmektedir [10].

2.2. Lif çekimi

Polibenzozol olarak sınıflandırılan, heterosiklik bir polimer olan PBO polimeri yüksek sıcaklıklarda erimeden ayrılmakta ve aromatik yapısı sayesinde çok az sayıda çözücü içerisinde çözünebilmektedir [14,18, 42,43]. PBO polimeri hidrojen iyonu içeren kuvvetli asitler (polifosforik asit, metansülfonik asit, klorosülfonik asit, %100 sülfürik asit ve trifloroasetik asit) içerisinde sıvı kristalin bir yapı almaktadır [10,11,13, 17,18,33,43-45]. Bu lifin üretiminde en yaygın kullanılan yöntem kuru jet-yaş lif çekim yöntemidir ve polimer çözeltisi genellikle polifosforik asit kullanılarak elde edilmektedir [18]. Ancak polifosforik asit harici farklı çözücülerin kullanılmasının, üretilen lifin mekanik özelliklerinde kayda değer bir farklılık yaratmadığı gözlemlenmiştir [12,16,19,43].



Şekil 2. PBO polimerinin sentezlenmesi [28,41]

Polimer çözeltisinin viskozitesi lifin mekanik özelliklerini etkilediğinden oldukça önemlidir. 10-14 dL/g' den düşük viskoziteye sahip çözeltiden elde edilen liflerin mekanik özelliklerinin zayıf olduğu rapor edilmiştir [46]. Yeterli mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için çözeltinin minimum 20-30 dL/g viskozitede olması gerekirken, üstün özelliklere sahip PBO liflerini elde etmek için 50 dL/g viskozitede polimer çözeltisine ihtiyaç vardır [10,13,18,19].

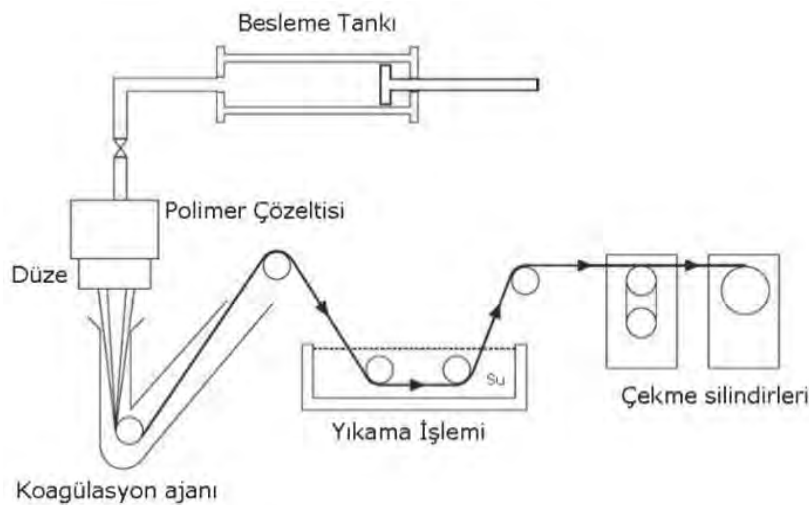
Hazırlanan polimer çözeltisi ısı ve basınç altında kuvvetli asidik bir ortamda, düzeden geçirilerek, genellikle oda sıcaklığında bir su bulunan koagülasyon banyosuna doğru çekilir (Şekil 3) [17-19,33,36,43,47], ardından yıkanır, kurutulur ve ısıl işleme tabii tutulur [17,19]. Isıl işlem genellikle gerilim altında, nitrojen gazı bulunan bir ortamda, 500–700°C sıcaklıklarda birkaç dakika ya da birkaç saniye arasında değişen sürelerde gerçekleştirilir [18]. PBO lifleri filament ya da stapel olarak elde edilebilmektedir [27].

Koagülasyon banyosu genellikle oda sıcaklığında su içermektedir. Koagülasyonun hızı da banyonun sıcaklığına ve içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Koagülasyon banyosunun bu özellikleri elde edilen liflerin mekanik özelliklerini ve yapısını doğrudan etkilediğinden büyük önem taşımaktadır. Altın renge sahip PBO liflerinin koagülasyon banyosunda su ve

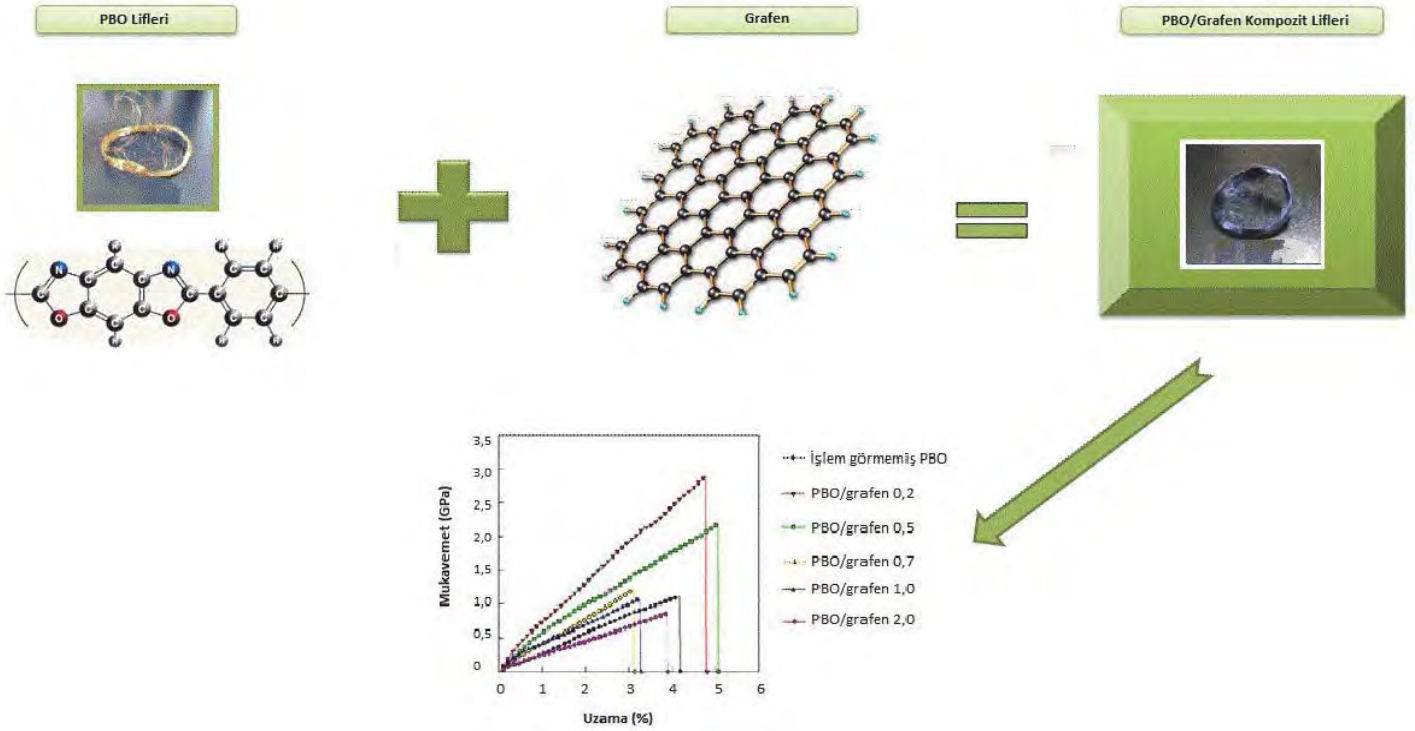
nötralizasyon için kalsiyum hidroksit bulunduğu, koagülasyon banyosunda su ve kalsiyum hidroksite ilaveten bakır hidroksit bulundurulmuş liflerin mavi olabileceği belirtilmektedir [17].

Koagülasyon banyosunun sıcaklığı ve içeriği lifin mekanik özelliklerini ve yapısını etkilediğinden Toyobo tarafından geliştirilen susuz koagülasyon sistemi de PBO lifleri için önem taşımaktadır [9,48,49]. Lif üretimi esnasında yavaş bir koagülasyon işlemi ile liflerin yapısı kontrol altında tutulmaktadır [10].

PBO liflerinin yapılarına karbon nanotüplerin ilavesi de literatürde mümkün olan uygulamalar arasındadır (Şekil 4). Bu şekilde sadece %10 oranında bir karbon nano tüp ilavesi ile oluşturulan yapının mukavemetinde %50 oranında bir artış meydana getirildiği kaydedilmiştir [50]. Aynı zamanda literatürde grafen ile güçlendirilen PBO liflerine rastlamak da mümkündür. Polifosforik asit (PPA) ile PBO/grafen karışımı kuru jet yaş lif çekim işlemi ile lif haline getirilmektedir. %0,2-2 arasında değişen değerlerde grafen içeren PBO liflerinin kopma mekanik dayanımları ve termal kararlılığı karşılaştırıldığında, %0,2 grafen içeren PBO liflerinin kopma mekanik dayanımları ve termal kararlılığında önemli ölçüde artış gösterdiği gözlemlenmiştir [51].

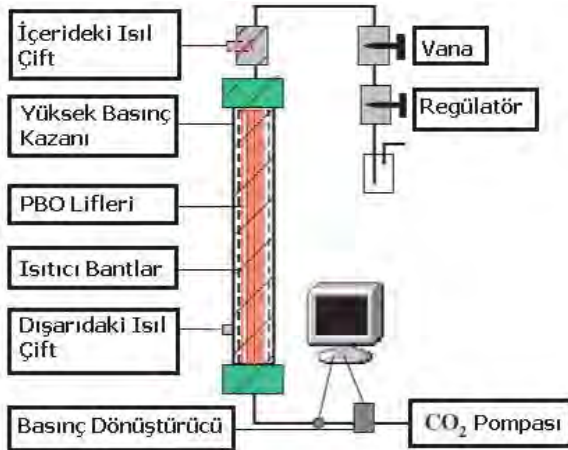


Şekil 3. PBO polimerinden lif çekimi şeması [14]



Şekil 4. Grafen/PBO karışımı ile gerçekleştirilen lif çekimi sonucu elde edilen PBO/grafen kompozit lif özelliklerindeki değişim [27,51,52]

Lif çekim işlemi esnasında kullanılan fosforik asidin işlem sonrasında lif üzerinde kalması ve nemli ortam ve ışık ile bir araya gelerek liflerde bozunma yaratması olasılığına karşın, PBO lifleri için Şekil 5'te ayrıntılı olarak gösterilen süper kritik CO₂ yıkama işlemi de geliştirilmiştir [19].

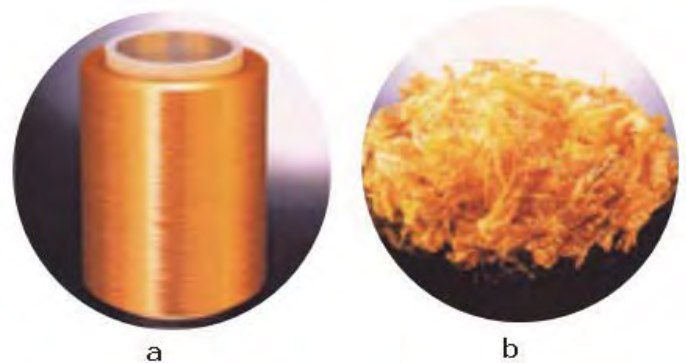


Şekil 5. Süper kritik CO₂ yıkama sistemi [19]

3. PBO LİF ÖZELLİKLERİ

Yüksek performanslı bir lif olan PBO lifleri (Şekil 6), rijit ve lineer olarak simetrik tekrar eden aromatik

yapısı ve bu yapıda alifatik CH gruplarının bulunmaması sayesinde üstün kopma mukavemetine ve modüle sahiptir [2,4,6,11,12,14,17,19,25,28,53-58]. Bunun yanı sıra yüksek alev direnci ve ısı dayanımı gibi özellikleri ile diğer organik liflerden ayrılmaktadır [14,18,21,24]. Bu lifler ayrıca sürünme mukavemeti, kimyasal dayanım, kesilme/aşınma direnci ve yüksek sıcaklık ile aşınma direnci gibi özelliklerinde mükemmel performans sergilemektedir [59]. Fakat neme ve UV ışınlarına karşı aşırı hassasiyetinin yanında düşük kompresif (sıkıştırma, bastırma, basınç) dayanımı kullanımı sınırlamaktadır [5].



Şekil 6. a) PBO filament lifleri, b) PBO stapel lifleri [59] [60]

İlk üretildiği yıllarda 20-22 g/denye arasında değişen bir mukavemete sahip olan PBO liflerinde zamanla 40 g/denye mukavemete ulaşılmış, Zylon ticari PBO lifinin üretilmesi ile de yaklaşık 45g/denye mukavemete sahip PBO lifleri erişilebilir hale gelmiştir [14]. Literatürde PBO liflerinin mekanik özellikleri ile ilgili farklı değerler veren kaynaklara rastlamak mümkündür. PBO liflerinin yoğunluğu için 1,56 g/cm³ [1,12,24,35,57,61,62], 1,54 g/cm³ [19,63], 1,5 [15] gibi değerler verilirken; mukavemet için 5,8 GPa [53,61,64,65], 3,8-4,8 N/tex [12], kopma mukavemeti için 5,6-5,8 GPa [15,18,66], 40-42 g/denye [14,63,67,68], 3 N/tex [12], 380 cN/tex [57] ve elastisite modülü için, 180-280 GPa [23,35,53,69], 2000 g/denye [14], 180N/tex [12] gibi farklı birim sistemlerinde ifade edilen değerler ile karşılaşılabilmektedir. Kopma anındaki uzaması %1-3,5 [1,15,18,35,57,63,67] arasında değişen bu liflerin özgül hacmi 0,64 cm³/g [24] olarak kaydedilmiştir.

PBO lifleri aramid lifleri, karbon lifleri, cam lifleri, PIPD (polipiridobisimidazol) lifleri gibi diğer yüksek performanslı liflerden daha yüksek kopma mukavemetine ve modüle sahiptir [4,11,17,25,27,54,70]. Özellikle Para-aramid liflerinin neredeyse iki katı bir mukavemete sahip olan PBO lifleri organik lifler arasında en yüksek elastisite modüllerinden birine sahip olmasına karşın, kayma modülü diğer yüksek mukavemetli lifler ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 1) [12,17,27,28,63, 70].

Tablo 1. Oda sıcaklığında çeşitli yüksek performans liflerin Elastisite Modülleri [23,69]

Lifler	Elastisite Modülü (GPa)
Polietilen Lifleri (Dyneema)	80-130
Aramid Lifleri (Kevlar, Twaron)	100-150
PBO Lifleri (Zylon)	180-280
M-5 Lifleri (polypiridobisimidazol, PIPD)	300-330
Poliimid	2,5
Seramik Lifleri (Nicalon™)	210

Altın rengine yakın bir renkte üretilen PBO lifleri aşırı yüksek mekanik özelliklerine rağmen, oldukça hafiftir, esnektir ve yumuşak bir tutuma sahiptir [14,27, 36,59]. Neme karşı boyutsal olarak kararlı [59] olan,

ancak nem geri kazanımları oldukça düşük olan bu lifler için literatürde %0,6 ile %3 arasında değişen nem geri kazanımları değerleri verilmektedir [11,15, 27,59,63].

PBO liflerinin özellikleri, ticari PBO liflerinin iki farklı türü olan Zylon-AS (As Spun-ekstra germe çekme işlemi uygulanmamış) ve Zylon-HM (High Modulus-yüksek modüllü) olarak incelendiğinde aynı termal ve yanma parametrelerinin aynı değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir [2,12,31]. Ancak Tablo 2'den de anlaşılacağı gibi gerilme modülü, nem geri kazanımı gibi bazı özelliklerinde farklılıklar tespit edilmiştir [20,29].

Tablo 2. Zylon lifinin iki farklı türünün özellikleri arasındaki farklılıklar [18,20,29,62,65,71]

	Zylon-HM	Zylon-AS
Yoğunluk (g/cm ³)	1,56	1,54
Nem geri kazanımı (%)	0,6	2,0
Kopma anındaki uzama (%)	2,5	3,5
Gerilme Modülü (cN/dtex)	1720	1150
Isıl genleşme katsayısı	-6×10 ⁻⁶	-

3.1. Termal özellikleri

PBO lifleri sahip olduğu rijit yapısı sayesinde, yüksek mukavemet ve modülün yanı sıra mükemmel termal dayanıma sahiptir [15,25,27,28,36,54,72]. PBO lifleri erimez ve ısı iletimleri de oldukça hızlıdır [73].

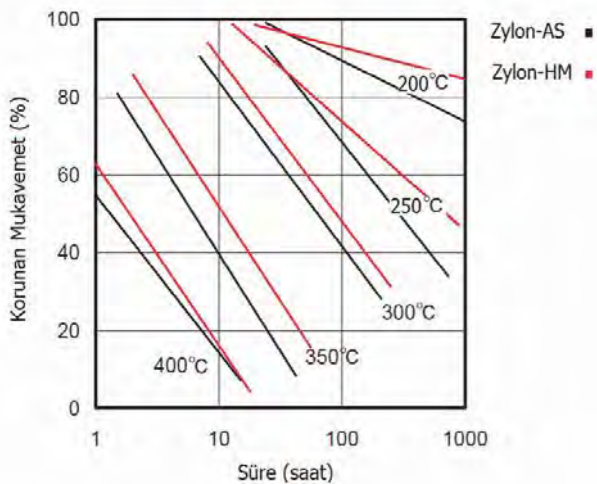
PBO liflerinin bozunmaya başlama sıcaklığı için literatürde farklı sıcaklıklar verilmiştir; 550C'den itibaren [35] ya da 650-700°C arasında değişen sıcaklıklarda bozunmaya başladığı bildirilmiştir [7,14,15, 18,20,39,53,57,74,75]. Bu bozunma sıcaklığı hava ya da argon gazı bulunan ortamlarda değişiklik göstermektedir. Hava bulunan ortamda 700°C'de ağırlığının yaklaşık %80'inini korurken, argon gazı bulunan ortamda ağırlığının %100'üne yakın bir kısmını korumayı başarmaktadır [7,8,12]. Hava bulunan ortamda sıcaklık 1000°C'e çıkartıldığında PBO liflerinin ağırlıklarının sadece %28'ini kaybettiği gözlemlenmiştir [39].

Aramid lifleri ile karşılaştırdığımızda 700°C' de hava bulunan ortamda %100'üne yakın kısmını kaybeden

aramid lifleri argon gazı bulunan ortamda ağırlıklarının sadece %50'ye yakın bir kısmını koruyabilmektedirler. Özellikle 500°C'den sonra aramid ve PBO lifleri arasında ciddi bir ağırlık kaybı farkı gözlemlenmektedir [20]

Termogravimetrik analiz yöntemi kullanılarak PBO liflerinin de için de bulunduğu bazı yüksek performans liflerin (Terlon®, UHMW-PE (ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen), para-aramidler, Twaron®) hava ve nitrojen gazı bulunan atmosferlerde termal dayanımlarındaki değişim izlenmiştir. Bu gözlem sonucunda PBO'nun en yüksek termal bozunma sıcaklığına sahip olduğu fakat aktivasyon enerjisinin hem hava hem de nitrojen bulunan ortamda en yüksek olmadığı kaydedilmiştir [76].

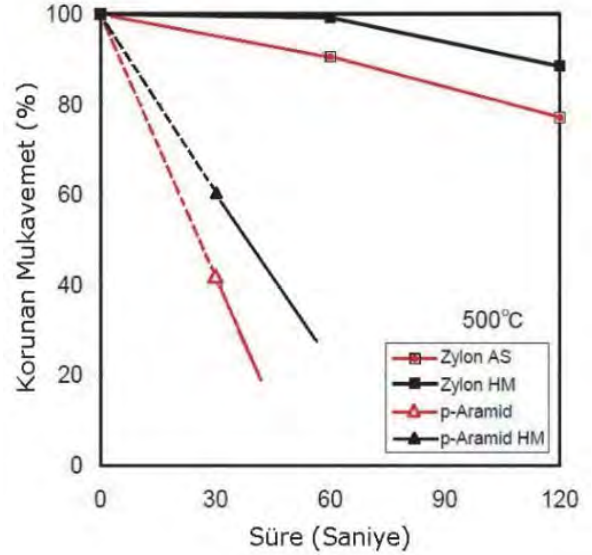
PBO liflerinin iki farklı türü olan Zylon-AS (As Spun-ekstra germe çekme işlemi uygulanmamış) ve Zylon-HM (High Modulus-yüksek modüllü) liflerinin ısıya karşı dayanımlarını karşılaştırmak amacıyla yapılan bir çalışmada, hava bulunan bir ortamda 1000 dakikaya kadar bir sürede farklı sıcaklıklarda ısıl işlem gören liflerinin korunan mukavemet dayanımları incelenmiştir. Zylon-HM liflerinin Zylon-AS liflerinden bir miktar daha yüksek ısı direnci gösterdiği bildirilmiştir (Şekil 7) [20].



Şekil 7. Zylon-AS ve Zylon-HM liflerinin süreye ve sıcaklığa göre korunan mukavemet yüzdelerinin karşılaştırılması [8,20]

PBO liflerinin 400°C sıcaklık ile bir saatten fazla işlem görmesi sonucu mukavemetlerinde ciddi bir

kayıp yaşadıkları gözlemlenmektedir. 400°C'den yüksek bir sıcaklıkta fakat bir saatten daha kısa sürelerde PBO liflerinin ve diğer aramid liflerinin mukavemetlerindeki değişim Şekil'de 8 verilmiştir [8].



Şekil 8. 500°C sıcaklık altında işlem gören PBO ve aramid liflerinin korunan mukavemet yüzdeleri [8,20]

Yüksek sıcaklık altında çok az büzülen PBO liflerinin ortaya çıkarttığı tehlikeli gaz miktarı aynı sınıftaki diğer liflere kıyasla çok daha azdır [7,8,20,26].

Tablo 3'de PBO liflerinin 500 °C ve 750 °C'de ürettiği HCN, NO_x, SO_x gibi tehlikeli gazların miktarı verilmiştir.

Tablo 3. PBO liflerinin yüksek sıcaklıklarda ürettiği tehlikeli gaz miktarları [8,20]

Sıcaklık	500 °C	750 °C
HCN	1,48 mg/g	0,57 mg/g
HCl	<0,01 mg/g	<0,01 mg/g
NO _x	0,15 mg/g	0,16 mg/g
SO _x	<0,01 mg/g	0,1 mg/g
CO	6,9 mg/g	1 mg/g >
CO ₂	35,8 mg/g	2660 mg/g
NH ₃	0,35 mg/g	0,05 mg/g >

3.2. Alev dayanımı

PBO lifleri oldukça yüksek bir alev dayanımı sergilemektedir [15,72]. LOI değeri %68 olan PBO liflerinin (Tablo 4) [11,12,26,27,35] Japon Endüstriyel Standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen dikey

yanma testine (JIS L1091 A-4) göre de hem atkı hem de çözgü yönünde neredeyse sifira yakın kömürleşme mesafesi elde edilmiştir [7,20].

Tablo 4. Bazı yüksek performanslı liflerin LOI değerlerinin karşılaştırılması [2,20,35,77,78]

Lif tipi	LOI (%)
PBO	68
p-Aramid	29
PBI	41
HPPE (Yüksek performanslı polietilen)	20'den az
M-5 Lifleri (polypiridobisimidazol, PIPD)	50'den fazla

3.3. Nem dayanımı

PBO liflerinin nem dayanımları oldukça zayıftır. Düşük sıcaklıklarda dahi nemli ortamlardan etkilenen bu lifler ortamda kaldığı süre boyunca mukavemetini zamanla kaybetmektedir [12,20,79]. 25°C'de %5 bağıl nem bulunan bir ortamda 500 gün kalan PBO liflerinin mukavemetlerinin %40'ına yakın bir kısmını kaybettiği gözlemlenmiştir [19,79].

Hem yüksek nem hem de aşırı yüksek sıcaklığa aynı anda maruz kalan PBO liflerinin 180°C' de doymuş buhar ile 50 saatlik bir işlem sonrasında mukavemetlerinin olumsuz etkilediği, korunan mukavemet değerinin ortalama %50-60 oranında olduğu kaydedilmiştir. Bu değer p-aramid lifleri için yaklaşık %20 civarında iken copoly-aramid lifleri için %70 civarındadır [20].

Neme karşı bu kadar hassas olan PBO liflerinin ve bu liflerden elde edilen yüzeylerin gerek kaplama gerek kılıf gibi çeşitli yöntemler kullanılarak nemli ortam şartlarından korunması gerekmektedir [12,20,72,79].

3.4. Kimyasal dayanımı

Oda sıcaklığında organik çözücülerin ve alkali çözeltilerin çoğuna dayanıklı olan PBO lifleri, güçlü asitlere maruz bırakıldığında mukavemet kaybına uğramaktadır [11]. Tablo 5'de oda sıcaklığında bazı organik ortamlarda 100 saat boyunca işlem gören PBO liflerinin kopma mukavemetinde yaşanan kayıp yüzdesi verilmiştir. PBO liflerinin organik ortamlara dayanıklı olduğu söylenebilmektedir [15,20].

Tablo 5. PBO liflerinin bazı organik maddeler ile muamelesi sonucu kopma mukavemetinde gözlemlenen kayıp yüzdesi [15]

Madde	Konsantrasyon (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Kopma mukavemetindeki kayıp (%)
Metiletilketon	100	25	100	9
Asetik asit	100	25	100	1
Kerosen	100	25	100	4
Gazolin	100	25	100	0,1
Fren hidroliği	100	121	100	2

Oda sıcaklığında yapılan değerlendirmelerde çeşitli inorganik asit ve bazlara karşı genellikle dayanıklı olan PBO lifleri sıcaklık arttırıldığında hem asitlerden hem de bazlardan olumsuz etkilenmektedir (Tablo 6) [20,80]. Örneğin, 75°C'de %5 konsantrasyonda H₂SO₄ ile 250 saat işlem gördüğünde mukavemetini yaklaşık yüzde 70 oranında kaybetmektedir ya da 75°C' de %10 konsantrasyonda kostik çözeltisi ile 250 saat boyunca muamele edilen PBO lifleri mukavemetlerinin sadece yüzde 20'e yakın bir kısmını koruyabilmektedirler [15,20].

Tablo 6. PBO liflerinin çeşitli inorganik maddeler ile işlemi sonrasında korunan mukavemet yüzdesi [15,20]

Bileşik	Konsantrasyon (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Korunan mukavemet yüzdesi (%)
H ₂ SO ₄	5	75	250	20-40
H ₂ SO ₄	70	25	100	24
HCl	20	25	500	80-100
HCl	37	25	100	62
HNO ₃	20	25	500	80-100
NaClO	5	25	400	80-100
NaOH	20	25	500	90-100
NaOH	10	75	250	≈ 20

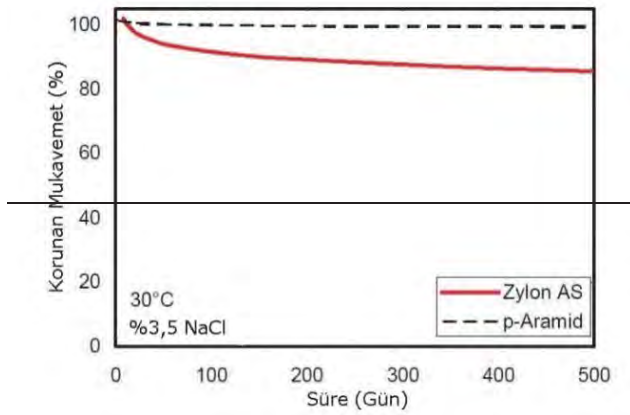
3.4. Sünme direnci

Oldukça iyi sürünme direncine sahip PBO lifleri çok az süner ya da hiç sünmezler [24,81]. İplikler uzun süreli sabit çekmeye yüküne maruz bırakıldığında, geri döndürülebilir ve geri döndürülemez olarak iki farklı şekil değişikliği gözlemlenmektedir. PBO (Zylon-HM) liflerinin geri döndürülemez şekil değişikliğinin, kopma kuvvetinin yarısı kadar bir kuvvet

altında 100 saat bir süreden sonra %0,03'den daha az olduğu gözlemlenmiştir [20].

3.5. Deniz suyu ve ışık haslıkları

PBO liflerinin deniz suyu ile işlem görmesi sonucunda yüksek nem bulunan ortamlardakine benzer bir mukavemet kaybı gerçekleşmektedir [27]. %3,5'lik tuz oranında 30°C'de 500 saat boyunca işlem gördüğünde mukavemetinde %10-20 arasında bir azalma gerçekleşmektedir [20] (Şekil 9).



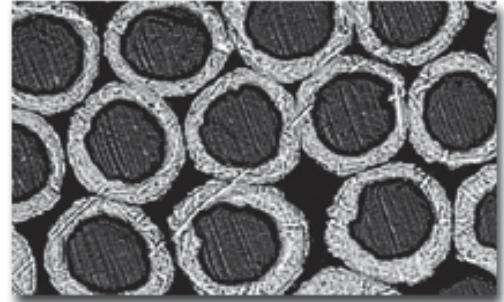
Şekil 9. Deniz suyu ile işlem gören PBO (Zylon AS) ve p-aramid liflerinin korunmuş mukavemetleri [20]

PBO lifleri güneş ışınlarına karşı da oldukça hassastır [11,19,27,30,56,82,83]. Özellikle de sıcaklığın fazla olduğu ortamlarda ışınlar ciddi bir mukavemet kaybına neden olmaktadır. Xenon ışığına karşı dayanımını ölçmek amacıyla yapılan bir değerlendirmede, 83°C sıcaklıkta ışığa maruz kalan liflerin ilk 100 saatte mukavemetlerinin ortalama %50'sini, 500 saatte sonra mukavemetlerinin %60'tan fazlasını kaybettiği gözlemlenmiştir [82]. Bu lifler sadece morötesi ışınlardan değil aynı zamanda görünür bölge ışınlarından (400-700 nm) da etkilendiğinden, lifler her türlü ışıktan korunmalıdır [27,30,82,83]. Bu koruma gerçekleştirilmediği takdirde 6 ay boyunca güneş ışığına maruz kalan (45°C'de) PBO lifleri mukavemetlerinin sadece %35'ini koruyacaktır [19,20]. Lifler 800 saat boyunca 150 cm uzaklıkta floresan lamba ışığına maruz bırakıldığında ise %20-30 oranında bir mukavemet kaybı yaşamaktadır [20].

4. PBO POLİMERİ VE LİFLERİNİN KULLANIM ALANLARI

Yüksek gerilim özelliklerine sahip PBO lifleri, üstün termal dayanımı ve alev karşı korumadaki başarısı sayesinde, elyaf, lif, kumaş, tel, dokusuz yüzey, lif/reçine ve kompozit (güçlendirilmiş kompozitler) gibi çeşitli formlarda başta koruyucu teknik tekstiller olmak üzere farklı birçok alanda kullanılabilirler [5,29,62,72,84-88].

Havacılık, ordu, spor, minyatür elektronik ve sağlık gibi alanlarda elektro-tekstil uygulamalarında kullanılmak amacıyla Syscom Technology Inc., Columbus, Ohio tarafından geliştirilen, PBO (Zylon) liflerinin metal ile kaplanması ile elde edilen özel bir yöntem bulunmaktadır. AmberStrand lifleri adı verilen bu özel kullanım bilindik tüm iletken metallere daha hafif, çok daha esnek, mukavemetli ve sağlamdır [89] (Şekil 10).



Şekil 10. Metal ile kaplanmış PBO liflerin kesit alanı [89]

4.1. Koruyucu teknik tekstiller

PBO lifleri; balistik koruma [5,6,25,33,63,67,72,86,90-94], bıçak darbelerine karşı koruma [95,96], sıcak ya da alevden koruma [21,27,36,97] sağlamak amaçlarıyla kullanılabilir. PBO liflerinin balistik koruması üzerine yapılan çalışmalarda literatürde birçok başarılı sonuç göze çarpmaktadır. PBO liflerinin bu başarılı balistik korumasını daha da geliştirmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Şekil 11) [93,95]. Aramid gibi balistik koruma sağlayan birçok liften daha üstün koruma sağladığından [98] 1998-2003 yılları arasında U.S. polislerinin balistik koruyucu yeleklerinde kullanılmıştır [17,99]. Fakat 2003 yılının sonlarına doğru yaşanan, iki polis memurunun farklı zamanlarda koruyucu yelek giymelerine rağmen ciddi yaralanmaları ile sonuçlanan talihsiz olaylar, PBO

liflerinden üretilen koruyucu yeleklere karşı tüm güvenin sarsılmasına neden olmuştur [17]. Bu olayı aydınlatmak amacıyla birçok araştırma gerçekleştirilmiş ve sonucunda; PBO liflerinin güneş ışığından ve nemden etkilendiği bu sebeple liflerin zamanla bozunduğu, ilk gün sahip olduğu koruma potansiyelini zamanla kaybettiği rapor edilmiştir [17,99,100]. Ayrıca bu liflerin tıpkı Kevlar ve UHMWPE (ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen) liflerinde olduğu gibi yüksek hızla çarpan merminin liflerde kesilme meydana getirdiği gözlemlenmiştir [90,94]. Bu tespitten ardından PBO (Zylon) içeren tüm yelekler piyasadan toplatılmıştır [100]. 2005' in başlarında mevcut PBO lifleri ile üretilen yelekler tekrar gündeme gelmiş ve kullanım ömürleri 60 aydan 30 aya düşürülmesine rağmen bu yeterli olmamış aynı yılın ağustos ayında USA'de PBO içeren yeleklerin üretimi durdurulmuştur [99].

PBO liflerinin güneş ışığından ve nemden korunduğu takdirde balistik koruma özellikleri oldukça iyidir [12,17,41,67,101]. Bu sebeple PBO liflerinin ömürlerini uzatmak amacıyla nano-parçacık (ZnO, Silica ve CNT) takviyesi ve yüzey kaplama yöntemleri gibi bazı çalışmalar mevcuttur [81].

Balistik korumanın yanı sıra patlama sonucu ortaya çıkan parçacıklardan da koruma sağlayan PBO lifleri, savaş malzemelerini şarapnel parçalarından ya da sivil uçakları motorlarının patlaması durumunda oluşabilecek parçacıklardan koruyan yapıların üretiminde kullanılabilir [102,103]. Mesela Amerikan ordusunun LOSAT KEM adını verdiği tanksavarlarını şarapnel parçacıklarından koruyan bir kaplama yüzeyi

geliştirmek amacıyla yapılan bir çalışmada, PBO ya da aramid liflerinden elde edilmiş dokusuz yüzeylerin dokuma ile elde edilmiş kumaş yüzeylerden daha üstün bir parçacık koruması sağladığı rapor edilmiştir (Şekil 12) [25].

Koruyucu tekstiller olarak motor sporlarında yaygın bir kullanıma sahip olan PBO lifleri, özellikle yarış arabası ve motor sürücülerinin giysilerinde [21,36], kasklarında [105], eldivenlerinin darbe olasılığı yüksek bölgelerinde (Şekil 13) [106] sıkça kullanılmaktadır (Şekil 13-14). PBO liflerinin Formula 1'de ve Indy araba yarışları liginde kullanımı ilk olarak sürücü kokpitlerinin bu lifler ile kaplanması ile başlamış, bunu arabaların gövdelerinde ve iskeletlerinde darbeye dayanmayı geliştirmek amacıyla PBO liflerinden elde edilen yüzeylerin kullanımı takip etmiştir [27].

Bu tarz yarışlarda çok sık yaşanan problemlerden biri tekerleğin kopması ve hızdan dolayı savrulmasıdır ki bu izleyenler için ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Bu sorunu önlemek için yapılan bir çalışmada araç ve tekerlek süspansiyonları içerisine gizlenmiş PBO liflerinden elde edilen bir halat ile bağlanmış ve kopma anında tekerleğin savrulmasının engellenmesi amaçlanmıştır. Fakat 5500 kgs'den büyük kuvvetlere dayanabilen bu halatların hala yeterli olmadığı gözlemlenmiştir [27]. Bunlara ek olarak 2009 yılında yaşanan bir kazadan sonra, sürücü kasklarında ilave bir koruma önlemine ihtiyaç duyulmuş ve bu koruma PBO liflerinin kask ve güneşliği arasında bir şerit halinde kullanılması ile sağlanmıştır [63,99,105].



Şekil 11. a) Darbe hasarı sonrası 3 katmanlı iki boyutlu PBO (Zylon) lifli kumaş, b) Darbe hasarı sonrası PBO lif içeren balistik koruma sağlayan yelek [100], c) 3 boyutlu ortogonal PBO (Zylon) lifli kumaş [81,95]



Şekil 12. Amerikan ordusunun geliştirdiği LOSAT KEM isimli tanksavarları [104]

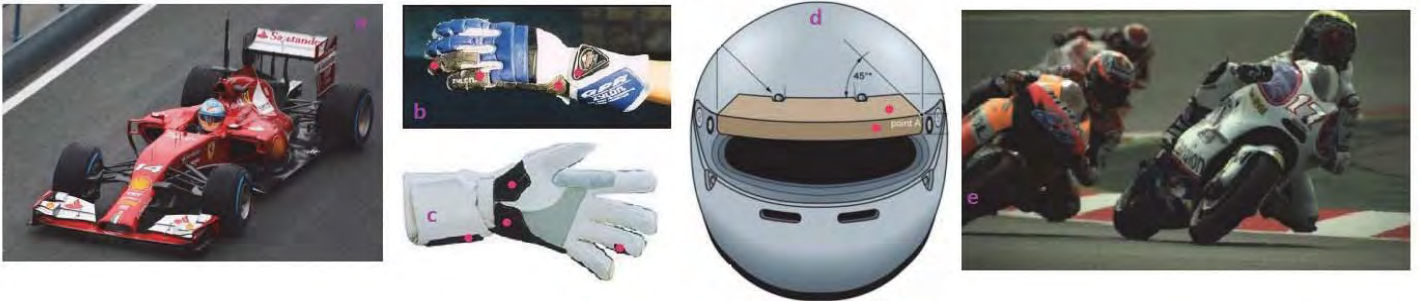
PBO liflerinin motor sporlarında profesyonel amaçlarla kullanımının yanı sıra amatör kullanımı da bulunmaktadır. %3 ile %7 arasında değişen oranlarda PBO (Zylon) lifleri içeren kot (Jean) pantolonlar ile darbeye dayanıklılık arttırılmakta, aynı zamanda çoğunluğunun pamuk olmasından dolayı günlük kullanıma elverişli olmaktadır [107].

PBO lifleri yüksek alev ve termal dayanımları sayesinde itfaiyeci kıyafetlerinde, endüstri işçileri için tasarlanan koruyucu giysilerde [21,33,36,72,108] de kullanılabilirler (Şekil 14). PBO lifleri ve aramid liflerinin karışım halde kullanılarak üretilen özel kumaş ve ürünlere rastlamak mümkündür. Örneğin Tencate Millenia™ dünyadaki en güçlü ve en

hafif koruyucu giysi olarak pazarlanmaktadır. Bu ürün itfaiyeci giysilerinde, endüstriyel kullanımda, ordu malzemelerinde ve diğer tehlikeli alanlarda kullanılabilir. %60/%40 Para-aramid/PBI lifli ve %60/%40 Para-aramid/PBO lifli karışım kumaşların ısı iletkenliklerini karşılaştırmak amacıyla yapılan bir çalışmada PBO liflerinin PBI liflerine göre ısıya biraz daha hızlı iletildiği sonucuna ulaşılmıştır [73,109]. Fakat PBO içeren birçok üründe olduğu gibi bu üründe de UV ışınlarına karşı korunma gerektiği belirtilmektedir [108].

4.2. Spor ve serbest zaman teknik tekstilleri

PBO liflerinin diğer bir kullanım alanı ise spor teknik tekstilleridir (Şekil 15). Genellikle tenis [27,110-112], badminton [113] ve masa tenisi raketlerinde [114, 115], kayak tahtalarında [116] ve sopalarında [112], golf sopalarında [117], oltalarda [118] veya yaylarda [119] güçlendirme amaçlı kullanılabilen bu lifler bunlara ilaveten bisiklet tekerleklerinin tellerinde [36] de kullanılmaktadır. 360° Koruma PBO liflerinin grafitten daha yüksek kopma mukavemeti ve modülüne sahip olması ayrıca oldukça hafif bir malzeme olmasından dolayı tekstil katkı spor malzemelerinin üretiminde tercih edilmektedir [112]. Özellikle PBO ile üretilen raketlerde daha üstün bir manevra kabiliyeti ve iskelet dayanımında gelişme sağlanmaktadır [112].



Şekil 13. PBO liflerinin kullanıldığı motor sporları ve yardımcı elemanları; a) Formula 1 yarış araçları ve sürücülerinin giysilerinde, b-c) Motor sporlarında kullanılan PBO ile güçlendirilmiş eldivenlerde (pembe noktalar ile gösterilmiş kısımlar) [106], d) Formula 1 için geliştirilen PBO içeren kask (pembe nokta ile gösterilmiş kısımlar) [105], e) motorların tekerlerinde ve yarışçıların giysilerinde.



Şekil 14. PBO liflerinin koruyucu teknik tekstiller olarak kullanımı; a) Endüstriyel koruyucu giysi, b) İtfaiyeci kıyafeti, c) Yarış arabası sürücülerinin giysi, eldiven ve kaskları [97]

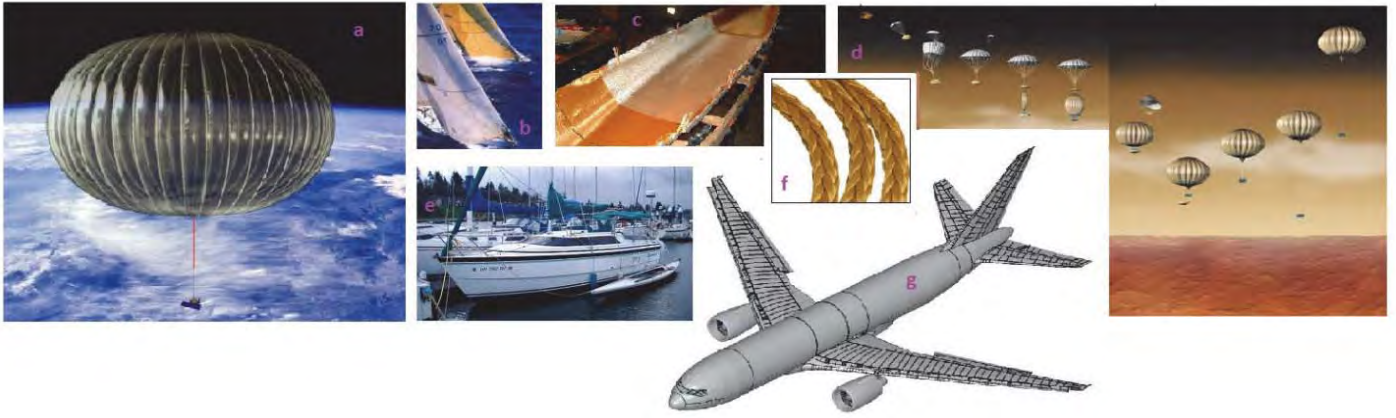
4.3. Taşımacılık teknik tekstilleri

Hava, kara, deniz taşıma araçlarında ve uzay sanayiinde kullanılan teknik tekstillerinin genel adı olarak bilinen taşımacılık teknik tekstillerinin [17,56,72,120] üretiminde ve yardımcı elemanlarında kullanılan teknik tekstil liflerinden biri de PBO lifleridir. Sahip olduğu iyi kopma mukavemeti ve yüksek modülü sayesinde güçlendirilmiş yapılarda kullanılmaya oldukça uygundur [35,57,121].

Bu lifler hem hafif, hem de oldukça sağlam olduğundan özellikle yat ve botların gövdelerinde [112], kanoların iç kısımlarında [120,122], uçakların kanat kuyruk gibi kısımlarında, paraşütlerde, balonlarda güçlendirme maksadıyla yaygın şekilde kullanılmaktadırlar [121,123-125]. Bu liflerin ayrıca yelkenlilerde [56] ve yatlarda kullanılan halatlarda da geniş bir kullanımı bulunmaktadır [36,56]. Yüksek performans sergilemesi ve uzun ömürlü olması sayesinde PBO halatlar geçtiğimiz on yıl içerisinde çok tercih edilmiştir [59].



Şekil 15. PBO (zylon) lifleri kullanılarak üretilen spor malzemeleri; a) raketlerde PBO liflerinin kullanımı, b) olta [118], c) golf sopası [116,117], d) kayak tahtası [116], e) Japonlara özgü bir yay türü (Kyudo) [116,119], f) masa tenisi raketleri, g) badminton, tenis, squash raketleri [116], h) kayak sopaları [116], i) bisiklet tekerlekleri [116]



Şekil 16. a) NASA'nın atmosferik gözlem yapan bal kabağı şekilli balonlarında [14], b) yelkenlilerde [116], c) kanolarda iç kısımlarında güçlendirmelerde, d) NASA'nın gezegen gözlemlerinde kullanılan balonlarda [27,124,126], e) yat ve kanolarda [127], f) deniz taşımacılığında kullanılan halatlarda [128], g) uçakların kanat kuyruk vb. kısımlarında [129]

Hafif ve dayanıklı olması PBO liflerini uçaklarda ve uçak parçalarında kullanımı için ideal hale getirmektedir. Şekil 16'de görülen uçak üzerinde taralı alanlar (kanatlar ve kuyruk) PBO liflerinden elde edilen 'mesh' adı verilen yüzeyinin güçlendirme amaçlı kullanıldığı bölgeleri göstermektedir [129]. Bu 'mesh'lerin yanı sıra membran yapılar olarak da uçaklarda kullanılabilen PBO lifleri gövdede kullanıldığında, termal dayanımı sayesinde ısı bariyeri oluşturmakta uçak içerisinde uzun süreli iklimlendirilme sağlanmasına yardımcı olmaktadır [12,123].

PBO liflerinin yüksek mukavemeti ve termal dayanımı, bu liflerin paraşütlerde [121], özellikle de NASA tarafından geliştirilen gezegenler ile ilgili inceleme yapan balonlarda [14,18,27,68,83,124,126] ya da atmosferik izleme sağlayan balonlarda [68,125] kullanımına olanak vermektedir.

Venus gezegeninin etrafı gezegenin yüzeyinden 48 km mesafede sülfürik asitten oluşan bir bulut ile kaplıdır. Venus'un yüzeyi 460°C iken sülfürik asit bulutunun sıcaklığı -10°C'e kadar düşmektedir. Ayrıca gezegen küçük miktarlarda sülfürik asit gazı içeren fakat genellikle karbondioksitten oluşan bir atmosfere sahiptir. Venus'te inceleme yapan bir balonun topladığı bilgileri dünyaya gönderebilmesi için birçok kez gezegenin yeryüzünden bulutun üzerine inip çıkmak zorundadır ve bu iniş-çıkış hareketi balonun indirilip-şişirilmesi ile kontrol edilmektedir. Tüm bu şartlara uygun balon geliştirilebilmek için esnek, ısıya dayanıklı bir zar yapı (membran) gerekmektedir ve

bunu gerçekleştirebilecek tek adayın PBO kumaş ya da film yapılarının olduğu kaydedilmiştir. Ancak PBO lifleri asitlere karşı zayıf olduğundan altın ile kaplanmış PBO lifleri kullanılmıştır [14].

PBO lifleri aynı zamanda ulaşım araçlarının hava yastıklarında [87] ve gelişmiş araba lastiklerinde [55] de kullanılabilir.

4.4. Bina ve inşaat teknik tekstilleri

PBO lifli kumaşlar ile güçlendirilmiş çimento matrisleri olarak yeni bir binanın inşasında, yıpranmış yapıların güçlendirilmesinde ya da restorasyonlarda kullanılabilmektedir [61,130-133]. Bu matrisler Şekil 17'de gösterilmiştir [133,134]. Başlangıçta karbon lifleri kullanılarak elde edilen bu yapılarda PBO liflerinin kullanılmaya başlanması ile birlikte karbon liflerinden daha mükemmel bir mukavemet ve aramid liflerinin iki katı oranda esnek bir modül elde edilmiştir [61, 130,131,134,135]. Ayrıca çok iyi darbe dayanımına, karbon liflerinden daha iyi enerji emme kapasitesine, yüksek sünme ve alev direncine sahip bu lifler [61, 130,133] çimento harcı ile de oldukça iyi bir kimyasal uyumluluk içerisindedir [132].

Bu lifler güneş ışığına ve neme karşı duyarlı olduğundan, uygulamalar esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta güneş ışığı ve yağmur ile direk temasından kaçınılması gerekmektedir [61,131]. En uygun çalışma sıcaklığı 5-35°C olarak tavsiye edilmektedir [130,131].



Şekil 17. Çimento güçlendirmelerinde kullanılan PBO lifli yapılar [136] [134]

4.5. Endüstriyel teknik tekstiller

PBO ile üretilen kablolar günümüz kablo endüstrisinde, mümkün olan en hafif ve en ince kabloları oluşturmaktadır [36,37,59] (Şekil 20). Mükemmel mukavemeti, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı, alev dayanımı ve boyut stabilitesi, düşük elektrik iletkenliği ve kimyasal dayanıklılığı gibi özelliklere sahip olan bu kablolar PBO liflerinin UV ışınlarına ve neme karşı olan hassasiyeti sebebiyle bir koruyucu çeper altında kullanılmaktadırlar [37]. Aynı zamanda optik kablolar da kullanılan bu lifler genel olarak kuartz optik liflerin en çok karşılaşılan sorunu olan kolay kırılma problemini ortadan kaldırmaktadır. PBO lifleri diğer yüksek performanslı lifler ile karşılaştırıldığında bazılarında 2 kat daha mukavim olduğundan, PBO lifleri ile elde edilen optik kablolar daha ince ve daha

hafif olmaktadır [14]. Örneğin konvansiyonel bir optik kablo 80 mm çapa sahipken, PBO kullanılarak optik kablo 50 mm çapa sahip olabilmektedir.

Yüksek mukavemeti sayesinde genellikle güçlendirme amacıyla kullanılan PBO (Zylon) liflerine manyetik alan laboratuvarlarında kullanılan cihazlarda da rastlamak mümkündür [137-140]. Bu lifler ile güçlendirilmiş parçalar içeren bu cihazlar özellikle Amerika Birleşik Devletleri'ne ait Ulusal Yüksek Manyetik Alan Laboratuvarlarında geniş araştırma konusudur [137].

PBO liflerinin endüstri alanındaki diğer kullanımları ise, 400-550°C'e kadar olan sıcaklıklarda kullanılan dokusuz yüzeylerden elde edilmiş silindirler ve bazı hoparlörlerin içi şeklinde sıralanabilmektedirler. [40,141,142] (Şekil 18).



Şekil 18. PBO lifleri ile üretilen a) kablolar [27], b) hoparlörler[40], c-e) endüstride kullanılan dokusuz yüzey kaplı silindirler [142], d)[141]

4.6. Medikal teknik tekstiller

PBO lifleri görüldüğü gibi teknik tekstillerin birçok alanında kullanılmaktadır. Buna medikal teknik tekstiller de dahildir [27]. Süper yüksek modülü ve mekanik direncinin yanı sıra mükemmel elektrik iletkenliği sayesinde kalp pillerinde ve vücuda yerleştirilebilir sensörlerde kullanılabildiği kaydedilen bu liflerin genellikle altın ile kaplandığı gözlemlenmiştir [71].

Organik ya da inorganik liflerin direk olarak altın ile kaplanması zor olduğundan lifler gümüş ile kaplandıktan sonra akımsız kaplama yöntemi kullanılarak altın kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir [71]. Altın kaplanan liflerin korozyon dayanımında, kopma mukavemetinde ve elastisite modülünde gerçekleşen artış sayesinde; geleneksel metal kalp sensörlerinden çok daha hafif, esnek, sağlam, mukavim ve uygun hale getirilmiş elektrik iletkenliği gibi özellikler kazandırılmaktadır [71]. Asahi Kasei Corporation tarafından geliştirilen 'Planova' adı verilen virüs filtreleri [143] de bulunmaktadır.

5. PBO LİFLERİNE UYGULANAN TERBİYE İŞLEMLERİ

Altın renginde olan PBO lifleri, boyanması kolay olmadığından, genelde ham renginde kullanılmasına rağmen liflere uygulanan bazı ön terbiye ve bitim işlemleri mevcuttur [36].

Ticari PBO liflerinin büyük bir çoğunluğu haşıllanmış ya da bitim işlemi uygulanmış şekilde bulunmaktadır. Lif yüzeyinin dokuma esnasında aşınmasını önlemek amacıyla uygulanan bu işlemler aynı zamanda liflerin polaritesini de etkilemektedir ki bu kompozit malzeme oluşturma esnasında sorun yaratacak bir problemdir [144]. Bu sebeple kompozit malzemede kullanılacak liflerin ilk olarak yüzeylerindeki bu kimyasal tabakanın uzaklaştırılması gerekmektedir. Aseton ve etanol gibi çözücüler kullanılarak lif, yüzeyindeki bu kimyasallardan başarıyla arındırılabilirken; hekzan kullanıldığında lif yüzeyindeki kimyasalların sadece bir kısmından arınabilmektedir [144].

Kaplama, aşılama, ışınlama (irradiation) ya da plazma gibi yöntemlerle lif yüzeyini modifiye ederek PBO liflerinin özelliklerini (kopma mukavemeti, ıslanabi-

lirliği, UV dayanımı, vb.) iyileştirmeyi hedefleyen uygulamalar özellikle de UV ışınlarına ve neme karşı olan hassasiyeti azaltmayı amaçlamaktadır [84,145-150].

ZnO ve SiO₂ nano parçacıkları kullanımı ile lif yüzeyinin modifikasyonu yaygın kullanılan yöntemlerden bir tanesidir [149]. Modifikasyonlar tek bir uygulama ile değil birden çok uygulamanın bir araya getirilmesi şeklinde de yapılabilmektedir. Örneğin, yüzey kaplaması ile kimyasal parçacık aşılama aynı anda kullanılarak lifler hibritlenebilmektedir [145, 149]. Bu uygulamalar sonucunda yüzey enerjisinin arttığı, UV ışınlarına daha dayanıklı hale geldiği, kompozit malzemeler için mekanik kenetlenmenin ve ıslanabilirliğinin geliştirildiği aynı zamanda kopma mukavemetinde bir azalmanın gerçekleşmediği gözlemlenmiştir [84,145].

Kompozit malzemeleri etkileyen diğer bir faktör de yüzeyler arası kayma dayanımıdır. Bu mukavemeti arttırmak için PBO yüzeylere plazma (argon, oksijen) ya da kenetlenme ajanı ile birlikte plazma (argon) işlemleri uygulanabilmektedir [84,146,151-154]. Sadece plazma uygulanan yüzeylerin kayma mukavemetlerinde %42 oranında bir artış gözlemlenirken, kenetlenme ajanı ile birlikte uygulanan plazma işleminde %78'lik bir kayma mukavemeti artışı kaydedilmiştir [146,153]. Bu uygulama aynı zamanda hem liflerin ıslanabilirliğini arttırdığından hem de PBO liflerinin kopma mukavemetinde her hangi bir kayba neden olmadığından tavsiye edilen bir yöntemdir [146,152].

Atmosferik plazma şartlarında gerçekleştirilen elektrostatik aşındırma metodu da literatürde PBO liflerinden elde edilen kompozit yüzeylere uygulanmış bir yöntemdir. Bu yöntemde aşındırma voltajının iyi ayarlanması gerekmektedir. Aksi halde aşındırma gücü fazla gelerek liflere zarar verebilmektedir. Aşındırmanın dengeli bir şekilde gerçekleştirilmesi dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden bir tanesidir. Aşındırma metodu; yaklaşık %10 oranında bir mukavemet kaybı gözlemlenmesine rağmen, temas açısındaki azalma ve lif yüzeyindeki serbest enerjideki artış sayesinde kompozit malzemenin işlenebilirliğine ve ıslanabilirliğine yardımcı olmaktadır [29].

PBO lif yüzeylerini aşındırmak için ışınlama (irradiyon) ($x-\gamma$) işlemi de uygulanabilmektedir. Bu işlem ile liflerin yüzey özelliklerinde değişiklikler meydana getirmekte ve lif yüzeyinde ki serbest enerji miktarında ve lifin polar yapılarında bir artış sağlanmaktadır. Lif yüzeyindeki bu değişiklikler ile lifler yumuşak halden daha pürüzlü bir hale getirilmektedir [147].

6. SONUÇ

PBO lifleri rijit polimer yapısından gelen üstün mukavemet, yanma ve alev dayanımı sayesinde teknik tekstillerin neredeyse tüm alanlarında kullanılabilirler. Balistik, alev, yüksek sıcaklık, çarpma, darbe, patlama vb. sıra dışı durumlarda başarılı bir koruma yeteneğine sahip bu lifler koruyucu teknik tekstillerin yanı sıra, uzay araçları dâhil her türlü taşıma araçlarında, spor malzemelerinde, günlük kullanılan hoparlörlerden endüstride kullanılan silindirelerde hatta medikal teknik tekstillerde çok geniş bir kullanıma sahiptir. Bu lifler güneş ışınları ve neme karşı fazla hassas olduğundan liflerin bozunmasını engellemek ve kullanım ömrünü uzatmak için liflerin kuru ve ışıksız ortam şartlarında depolanması, uygulama esnasında ortam şartlarının özenle seçilmesi ya da koruyucu bir tabaka ile korunması gerekmektedir. Liflerin bu hassasiyetinin azaltılması ya da giderilmesini hedefleyen çalışmalar hala devam ettiğinden, PBO liflerinin üstün özellikleri ile gelecekte çok daha geniş bir kullanıma sahip olacağı düşünülmektedir.

Bugün teknik tekstiller başta olmak üzere teknolojinin birçok alanında karşımıza çıkan yüksek performanslı lifler ülkemizde de gün geçtikçe daha önemli hale gelmektedir. Konvansiyonel tekstil ürünlerinin yanı sıra katma değeri yüksek tekstil ürünler de elde etmeyi hedefleyen Türk tekstil sektörü tarafından PBO gibi üstün özelliklere sahip yüksek performans liflerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu derleme çalışmasında bir yüksek performans lifi olan PBO liflerinin yapısı, özellikleri, kullanım alanları konusunda bilinirliğin artırılması ve yüksek performans liflerine karşı farkındalık yaratmak hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Erdoğan Ü.H., (2012), *Yüksek Mukavemetli Lifler Ve İplikler*, TSE Standard Ekonomik ve Teknik Dergi, 51, (602), 57-65.
2. Hearle J.W., (2001), *High-Performance Fibres*, CRC Press, Cambridge.
3. Horrocks A.R., (2005), *Tekstilde Yeni Ufuklar “ Teknik Tekstiller”*, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
4. Kitagawa T., Yabuki K., Young R., (2001), *An Investigation into the Relationship between Processing, Structure and Properties for High-Modulus PBO Fibres. Part 1. Raman Band Shifts and Broadening in Tension and Compression*, Polymer, 42, (5), 2101-2112.
5. Sikkema D.J., Northolt M.G., Pourdeyhimi B., (2003), *Assessment of New High-Performance Fibers for Advanced Applications*, MRS bulletin, 28, (08), 579-584.
6. Cunniff P.M., *The Performance of Poly (Para-Phenylene Benzobisoxazole) (PBO) Fabric for Fragmentation Protective Body Armor*, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, 814-821, 1999.
7. Bourbigot S., Flambard X., (2002), *Heat Resistance and Flammability of High Performance Fibres: A Review*, Fire and Materials, 26, (4-5), 155-168.
8. Kuroki T., Tanaka Y., Hokudoh T., Yabuki K., (1997), *Heat Resistance Properties of Poly (P-Phenylene-2,6-Benzobisoxazole) Fiber*, Journal of Applied Polymer Science, 65, (5), 1031-1036.
9. Kitagawa T., Murase H., Yabuki K., (1998), *Morphological Study on Poly-P-Phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fiber*, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 36, (1), 39-48.
10. Bunsell A.R., (2009), *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
11. Houcks M.M., (2009), *Identification of Textile Fibers*, Woodhead Publishing Limited, Oxford.
12. Scott R.A., (2005), *Textiles for Protection*, CRC Press, Cambridge.
13. Meyers R.A., (1987), *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Academic Press, Orlando.
14. Hongu T., Takigami M., Phillips G., (2005), *New Millennium Fibers*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
15. Orndoff E., (1995), *Development and Evaluation of Polybenzoxazole Fibrous Structures*, National Aeronautics and Space Administration.
16. Chae H.G., Kumar S., (2006), *Rigid-Rod Polymeric Fibers*, Journal of Applied Polymer Science, 100, (1), 791-802.
17. O'Neil J.M., (2006), *Factors Contributing to the Degradation of Poly (P-Phenylene Benzobisoxazole)(PBO) Fibers under Elevated Temperature and Humidity Conditions*, master, Texas A&M University,

18. Afshari M., Sikkema D.J., Lee K., Bogle M., (2008), *High Performance Fibers Based on Rigid and Flexible Polymers*, Polymer Reviews, 48, (2), 230-274.
19. Hu X., Lesser A.J., *Post-Treatment of Poly-P-Phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fibers Using Supercritical Carbon Dioxide*, 227th American Chemical Society National Meeting, Anaheim, CA, 2004.
20. *PBO Fiber Zylon*, (2005), Toyobo Co., LTD. http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/Technical_Information_2005.pdf, Ağustos 2014
21. Elsasser V.H., (2005), *Textiles: Concepts and Principles*, Fairchild Publications, Inc., New York.
22. Ward D.T., (2001), *Techtextil: World's Biggest Technical Textiles Event*, International Textile Bulletin: Nonwovens, Industrial Textiles, 47, (3), 37-42.
23. Jacobs M., (1999), *Creep of Gel-Spun Polyethylene Fibres*, Ph. D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven,
24. Hearle J.W., Morton W.E., (2008), *Physical Properties of Textile Fibres*, CRC Press, Cambridge.
25. Wilusz E., (2008), *Military Textiles*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
26. Chapman R., (2010), *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, Elsevier Science, Burlington.
27. *Zylon (PBO)*, <http://www.formula1-dictionary.net/zylon.html>, Eylül 2014
28. Mizuno T., Nakai T., Mihara M., Ito T., (2012), *Facile Sulfur-Assisted Carbonylation of Diaminoresorcinol with Carbon Monoxide*, Heteroatom Chemistry, 23, (1), 111-116.
29. Wu G., Shyng Y., (2006), *Surface Modification of PBO Fiber by Electrostatic Discharge for Composites*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 17, (1-2).
30. Lee Rainwater E., McLaughlin J., Seely L.G., *The Effects of Oxygen Upon Strength Degradation of PBO Cordage*, AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Forum 2003, November 17, 2003 - November 19, 2003, 2003, Denver, CO, United states. AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Forum, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
31. Young R., Day R., Zakikhani M., (1990), *The Structure and Deformation Behaviour of Poly (P-Phenylene Benzobisoxazole) Fibres*, Journal of materials science, 25, (1), 127-136.
32. Benga G., (2005), *10 Th Cluj-Napoca International Symposium of 2 Molecular Medicine, Society and Public Health Celebrating Professor Claude Matasa, Dce, Dsc, Dhc (USA)*.
33. Ran S., Burger C., Fang D., Cookson D., Yabuki K., Teramoto Y., Cunniff P., Viccaro P., Hsiao B., Chu B., (2001), *Structure Formation in High-Performance PBO Fibers*, NSLS Activity Report, 2-147.
34. Journee M.J.G., (2012), *Foam of Polymers*, US Patent US 20120165423A1.
35. Lewin M., (2010), *Handbook of Fiber Chemistry*, CRC Press, New York.
36. Collier B.J., Tortora, Q.C., (2001), *Understanding Textiles*, Prentice Hall, New Jersey.
37. *PBO Cable and Zylon Manufacturing*, <http://www.applied-fiber.com/pbo-cable-and-zylon-manufacturing>, Ağustos 2014
38. Krause S.J., Haddock T.B., Vezie D.L., Lenhert P.G., Hwang W.F., Price G.E., Helminiak T.E., O'Brien J.F., Adams W.W., (1988), *Morphology and Properties of Rigid-Rod Poly(P-Phenylene Benzobisoxazole) (PBO) and Stiff-Chain Poly(2,5(6)-Benzoxazole) (Abpbo) Fibres*, Polymer, 29, (8), 1354-1364.
39. Mark J.E., (2007), *Physical Properties of Polymers Handbook*, Springer, New York.
40. <http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/>, Ağustos 2014
41. Pan N., Sun, G., (2011), *Functional Textiles for Improved Performance, Protection and Health*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
42. Abe Y., Yabuki K., (2012), *5.19 - Lyotropic Polycondensation Including Fibers*, In: Möller KM (ed) *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Elsevier, Amsterdam, 469-495.
43. Choe E.W., Kim S.N., (1981), *Synthesis, Spinning, and Fiber Mechanical Properties of Poly(P-Phenylenebenzobisoxazole)*, Macromolecules, 14, (4), 920-924.
44. Sperling L.H., (2005), *Introduction to Physical Polymer Science*, John Wiley & Sons.
45. Wolfe J.F., Arnold F., (1981), *Rigid-Rod Polymers. I. Synthesis and Thermal Properties of Para-Aromatic Polymers with 2, 6-Benzobisoxazole Units in the Main Chain*, Macromolecules, 14, (4), 909-915.
46. Chenevey E.C., Helminiak T.E., (1986), *Process for Preparing Shaped Articles of Rigid Rod Heterocyclic Liquid Crystalline Polymers*, Google Patents.
47. Rosenberg S., Quarderer G.J., Sen A., Nakagawa M., Faley T.L., Serrano M., Teramoto Y., Chau C.C., (1994), *Method for Rapid Spinning of a Polybenzazole Fiber*, Google Patents.
48. Kitagawa T., Yabuki K., (2000), *An Investigation into the Relationship between Internal Stress Distribution and a Change of Poly-P-Phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fiber Structure*, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 38, (22), 2901-2911.
49. Kitagawa T., Yabuki K., (2000), *A Relationship between the Stress Distribution and the Peak Profile Broadening of Meridional X-Ray Diffraction from Poly-P-Phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fiber*, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 38, (22), 2937-2942.

50. Özdoğan E., Demir A., Seventekin N., (2006), *Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamaları*, Tekstil ve Konfeksiyon, 16, (3), 160-168.
51. Jeong Y.G., Baik D.H., Jang J.W., Min B.G., Yoon K.H., (2014), *Preparation, Structure and Properties of Poly (P-Phenylene Benzobisoxazole) Composite Fibers Reinforced with Graphene*, Macromolecular Research, 22, (3), 279-286.
52. Barron A.R., Yan Z., *Characterization of Graphene by Raman Spectroscopy*, <http://cnx.org/contents/f06226c5-c2a4-4798-9c75-b016acea73cd@2/characterization-of-graphene-by-raman-spectroscopy>, Eylül 2014
53. Shishoo R., (2002), *Recent Developments in Materials for Use in Protective Clothing*, International Journal of Clothing Science and Technology, 14, (3/4), 201-215.
54. Jayaraman S., Kiekens P., Grancaric A.M., (2006), *Intelligent Textiles for Personal Protection and Safety*, IOS press, Zadar.
55. Shishoo R., (2008), *Textile Advances in the Automotive Industry*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
56. Doyle B., (2000), *Aramid, Carbon, and PBO Fibers/Yarns in Engineered Fabrics or Membranes*, Journal of Industrial Textiles, 30, (1), 42-49.
57. Shishoo R., (2005), *Textiles in Sport*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
58. Bower D.I., (2002), *An Introduction to Polymer Physics*, Cambridge University Press.
59. *Future Fibres-Tomorrow's Innovation*, <http://www.futurefibres.com/Rigging/Technology/Core-Technology/Core-Fibres/PBO.html>, Ağustos 2014
60. *Products*, <http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/meigara.htm>, Eylül 2014
61. *Ruredil X Mesh Gold*, (2006), Ruredil X Mesh Gold, Eylül 2014
62. Huang Y.K., Frings P.H., Hennes E., (2002), *Mechanical Properties of Zylon/Epoxy Composite*, Composites Part B:Engineering, 33, (2), 109-115.
63. Horrocks A.R., Anand S.C., (2000), *Handbook of Technical Textiles*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
64. Cunniff P.M., Auerbach M.A., Vetter E., Sikkema D.J., *High Performance "M5" Fiber for Ballistics/Structural Composites*, 23rd. Army Science Conference, 2002. Citeseer.
65. Davies P., Bunsell A.R., Chailleux E., (2010), *Tensile Fatigue Behaviour of PBO Fibres*, Journal of materials science, 45, (23), 6395-6400.
66. Sorensen K., (2003), *Momentum Exchange Electrodynamic Reboost (Mxer) Tether Technology Assessment Group Final Report*, NASA/MSFC In-Space Propulsion Technology Office, Huntsville, AL, 4.
67. Çay A., Süpüren G., Kanat Z.E., Gülümser T., Tarakçoğlu I., (2007), *Balistik Lifler (Bölüm 1)*, Tekstil & Konfeksiyon, 17, (4), 232-237.
68. Zhai H., Euler A., *Material Challenges for Lighter-Than-Air Systems in High Altitude Applications*, AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference, 2005, Virginia.
69. Rice B., Quinzi J., Lund L., Ulreich J., Shoup M., (2014), *Measurement of Young's Modulus and Damping of Fibers at Cryogenic Temperatures*, Cryogenics, 63, (0), 43-48.
70. Yamashita Y., Kawabata S., Okada S., Tanaka A., (2003), *Mechanical Characteristics of PBO Single Fiber*, Carbon (T-300, PAN), 234, (6.03), 18.12.
71. Lobodzinski S., Laks M., (2009), *New Material for Implantable Cardiac Leads*, Journal of electrocardiology, 42, (6), 566-573.
72. Purkayastha S., Timble N.B., Shah N.A., (2009), *Insight to Probable Mechanism of Hydrolytic Degradation of PBO Fiber*, Chemical Fibers International, 59, (1), 30-32.
73. *PBI Vs. PBO Thermal Conductivity Explained*, (2013), <http://www.youtube.com/watch?v=eO-4NuAfGRg>, Eylül 2014
74. Albrecht W., Fuchs H., Kittelmann W., (2006), *Nonwoven Fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes*, John Wiley & Sons, Weinheim.
75. Buckley R.W., (2003), *Polymer Enhancement of Technical Textiles*, Rapra Technology Limited.
76. Hu J., (2008), *Fabric Testing*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
77. Kalaycı E., Avinç O., Yavaş A., (2014), *Polibenzimidazol (PBI) Lifleri*, 2014 (Cilt: 21), 96.
78. Bourbigot S., Flambard X., Ferreira M., Devaux E., Poutch F., *Characterisation and Reaction to Fire of "M5" Rigid Rod Polymer Fibres*, 2187-2194, 2003. Journal of Materials Science, Kluwer Academic Publishers.
79. Chin J., Forster A., Clerici C., Sung L., Oudina M., Rice K., (2007), *Temperature and Humidity Aging of Poly(P-Phenylene-2,6-Benzobisoxazole) Fibers: Chemical and Physical Characterization*, Polymer Degradation and Stability, 92, (7), 1234-1246.
80. Mittal V., (2011), *High Performance Polymers and Engineering Plastics*, John Wiley & Sons, New Jersey.
81. Yumak N., Pekbey Y., Aslantaş K., (2013), *Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması*, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10, (4), 1-21.
82. Liu X., Yu W., *The Degradation of PBO Fiber by Heat and Light*, 2005 International Conference on Advanced Fibers and Polymer Materials, ICAFP 2005, October 19, 2005 - October 21, 2005, 343-348, 2005, Shanghai, China. "New Century, New Materials and New Life" - Proceedings of 2005 International Conference on Advanced Fibers and Polymer Materials, ICAFP 2005, China Press.

83. Said M., Dingwall B., Gupta A., Seyam A., Mock G., Theyson T., (2006), *Investigation of Ultra Violet (Uv) Resistance for High Strength Fibers*, Advances in space research, 37, (11), 2052-2058.
84. Mäder E., Melcher S., Liu J.-W., Gao S.-L., Bianchi A., Zherlitsyn S., Wosnitza J., (2007), *Adhesion of PBO Fiber in Epoxy Composites*, Journal of materials science, 42, (19), 8047-8052.
85. Hua Y., Ni Q.-Q., Yamanaka A., Natsuki T., *Development of High Performance Fiber Reinforced Composite with Negative Thermal Expansion Property*, Multi-functional Materials and Structures - International Conference on Multifunctional Materials and Structures, July 28, 2008 - July 31, 2008, 89-92, 2008, Hong Kong, P.R., China. Advanced Materials Research, Trans Tech Publications.
86. Larsson F., Svensson L., (2002), *Carbon, Polyethylene and PBO Hybrid Fibre Composites for Structural Lightweight Armour*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33, (2), 221-231.
87. Butler N., (2002), *Techtextil North America - Fibres, Transport and Protection*, Technical Textiles International, 11, (7), 19-26.
88. Wang B., Jin Z., Qiu Z., Liu M., (2001), *Experimental Study of Basic Properties of PBO Organic Fiber*, Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University, 35, (11), 1189-1192.
89. *Syscom Introduces Amberstrand Fiber*, http://www.textileworld.com/Issues/2005/January/Fiber_World/Syscom_Introduces_AmberStrand_Fiber, Ağustos 2014
90. Çerkez İ., Ulçay Y., *Kolloidal Silika Dispersiyonunun Polietilen Dokusuz Yüzeyin Enerji Absorbsiyonuna Olan Etkisi*.
91. Chae H.G., Kumar S., *Next Generation Ballistic Materials*, 50th International SAMPE Symposium and Exhibition, May 1, 2005 - May 5, 2005, 2623-2633, 2005, Long Beach, CA, United states. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering.
92. Işık H., Değirmenci E., Evci C., (2013), *Örgülü Kumaşların Balistik Darbe Enerji Sönümleme Mekanizmalarının İncelenmesi*, Savunma Bilimleri Dergisi, 12, (2), 145-162.
93. Frame B.J., Hansen J.G.R., *Fire Resistant Composite Materials for Energy Absorption Applications*, 47th International SAMPE Symposium and Exhibition, May 12, 2002 - May 16, 2002, 542-555, 2002, Long Beach, CA, United states. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering.
94. Cheeseman B.A., Bogetti T.A., (2003), *Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates*, Composite Structures, 61, (1-2), 161-173.
95. Behera B., Dash B., (2013), *An Experimental Investigation into Structure and Properties of 3d-Woven Aramid and PBO Fabrics*, The Journal of The Textile Institute, 104, (12), 1337-1344.
96. Shin H.-S., Erlich D.C., Shockey D.A., (2003), *Test for Measuring Cut Resistance of Yarns*, Journal of Materials Science, 38, (17), 3603-3610.
97. *The Next Generation Super Fiber for Firefighter Ppe*, <http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo2/>, Ağustos 2014
98. Oğlakçioğlu N., Ertekin G., Marmaralı A., (2014), *Yüksek Performanslı İpliklerden Üretilen Örmeye Kumaşların Mekanik Etkilere Karşı Dayanımlarının İncelenmesi*, 2014 (Cilt: 21), 95.
99. *Zylon*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Zylon>, Ağustos 2014
100. *Second Chance Body Armor to Replace Bulletproof Vests Containing Zylon*, <http://news.softpedia.com/news/Second-Chance-Body-Armor-to-Replace-Bulletproof-Vests-Containing-Zylon-3592.shtml>, Ağustos 2014
101. Cunniff P.M., Auerbach M.A., (2003), *High Performance" M5, Fiber For Ballistic/Structural Composites*, Entire Article, Published Prior to Sep, 17.
102. Shockey D.A., Erlich D.C., Simons J.W., *Lightweight Fragment Barriers for Commercial Aircraft*, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas, 1999.
103. Simons J., Erlich D., Shockey D., (2001), *Finite Element Design Model for Ballistic Response of Woven Fabrics*, SRI International, 9.
104. Helmer G., (2002), *Military News*, <http://www.combatsim.com/cnews/arch1/cnews-arc361.htm>, Eylül 2014
105. (Auto123.com) A.c., (2013), *F1: Max Chilton Saved by the Zylon Visor in Germany*, <http://www.auto123.com/en/racing-news/f1-max-chilton-saved-by-the-zylon-visor-in-germany?artid=157666>, Ağustos 2014
106. *For Those of You with a Taste for the Finer Things in Life, There Is Kushitani*, (2000), <http://www.motorcycle.com/products/kushitani-gpr-ii-2968.html>, Ağustos 2014
107. *Kushitani Zylon Jeans*, (2006), <http://www.advrider.com/forums/showthread.php?t=75066&page=7>, Eylül 2014
108. *The World's Strongest and Lightest Outer Shell*, (2014), http://www.tencate.com/emea/Images/EN_MI918028-24336.pdf, Eylül 2014
109. *Polybenzimidazole Fibers*, http://en.wikipedia.org/wiki/Polybenzimidazole_fiber, Ağustos 2014
110. *La Corda-High Performance Fiber Strings*, <http://www.powercordz.com/lacorda-1/lacorda-Zylon-18-half-set>, Ağustos 2014
111. *Babolat: Pure Power Zylon 360*, <http://www.wabango.com/OnlineCatalog/displayitem?currentComponentID=46&offset=0&type=Tennis&mfg=Babolat>, Ağustos 2014
112. *Babolat Pure Control Zylon 360 Tennis Racquet Review*, <http://www.tennis-warehouse.com/REVIEWS/BPCZ/BPCZReview.html>, Ağustos 2014

113. *Adidas Adizero Pro Badminton Racket*, <http://www.sweatband.com/adidas-adizero-pro-badminton-racket.html>, Ağustos 2014
114. *ZL/PBO Fiber Sanwei Yew Wood Gold Dragon L1 Table Tennis Blade / Ping Pong Blade , 5 Plywood + 2 Zl Fiber Off*, <http://www.aliexpress.com/item/ZL-PBO-Fiber-SANWEI-Yew-Wood-Gold-Dragon-L1-Table-Tennis-Blade-ping-pong-blade/958537029.html>, Ağustos 2014
115. *Kinetic Supreme*, http://www.gotabletennis.com/Andro_Kinetic_Supreme_Zylon_Kiso_Hinoki_OFF_p/10225100.htm, Ağustos 2014
116. , <http://www.extremecarving.com/forum>, Eylül 2014
117. Weiss D., (2002), *Golf Equipment*, <http://www.worldgolf.com/products/zevo-driver.htm>, Eylül 2014
118. *Sportex Zylon 3.0lb 12' 0" 2 Piece Carp Rod*, <http://www.ebay.com/itm/SPORTEX-ZYLON-3-0lb-12-0-2-piece-Carp-Rod-/300555225650>, Eylül 2014
119. *Kyudo*, <http://sagajet.com/leisure/cultural-pursuits/>, Eylül 2014
120. Mecit D., Ilgaz S., Duran D., Başal D., Gülümser T., Tarakçıoğlu I., (2007), *Teknik Tekstiller Ve Kullanım Alanları (Bölüm 2)*, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 17, (3), 154-161.
121. Canbolat M.F., (2011), *Parachute Industry & Its Dynamics*, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5, (1), 72-83.
122. , (2008), <http://clearstreamwood.com/WordPress/projects/200801-azure-njord-nh/azure-njord-laminating-the-inside-with-zylon-and-s-glass>, Ağustos 2014
123. Nakadate M., Maekawa S., Kurose T., Kitada T., *Investigation of Long Term Weathering Characteristics on High Strength and Light Weight Envelope Material Zylon*, 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, including the AIAA Balloon Systems Conference and 19th AIAA Lighter-Than-Air Technology Conference 2011, September 20, 2011 - September 22, 2011, 2011, Virginia Beach, VA, United states. 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, including the AIAA Balloon Systems Conference and 19th AIAA Lighter-Than-Air Technology Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
124. Hall J.L., Pauken M.T., Kerzhanovich V.V., Walsh G.J., Fairbrother D., Shreves C., Lachenmeier T., *Flight Test Results for Aerially Deployed Mars Balloons*, AIAA Balloon Systems Conference, 2007, May 21, 2007 - May 24, 2007, 262-274, 2007, Williamsburg, VA, United states. AIAA Balloon Systems Conference, 2007, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
125. Seely L., Zimmerman M., McLaughlin J., (2004), *The Use of Zylon Fibers in Uldb Tendons*, *Advances in Space Research*, 33, (10), 1736-1740.
126. Kerzhanovich V.V., Cutts J.A., Cooper H.W., Hall J.L., McDonald B.A., Pauken M.T., White C.V., Yavrouian A.H., Castano A., Cathey Jr H.M., Fairbrother D.A., Smith I.S., Shreves C.M., Lachenmeier T., Rainwater E., Smith M., (2004), *Breakthrough in Mars Balloon Technology*, *Advances in Space Research*, 33, (10), 1836-1841.
127. *Bonkers & Knockoffs*, (2004), <http://www.ybw.com/forums/showthread.php?38026-Motor-Sailer-Macgregor-26X/page7>, Eylül 2014
128. *Yacht Fitters*, <http://yachtfitters.com/products/hampidjan/>, Eylül 2014
129. <http://www.ara.com/Projects/SVO/model.htm>,
130. *Ruredil X Mesh Gold: PBO (Poliparafenilenbenzobisoksazolo) Mesh in a Stabilised Inorganic Matrix for Flexural and Shear Strength Reinforcement of Concrete*, (2012), http://english.ruredil.it/SchedeProdottoENG/RuredilXMeshGOLD_ing_1.pdf, Ağustos 2014
131. Fallis G.J., (2009), *International Concrete Abstracts Portal the International Concrete Abstracts Portal Is an Aci Led Collaboration with Leading Technical Organizations from within the International Concrete Industry and Offers the Most Comprehensive Collection of Published Concrete Abstracts. Title: Innovation for Renovation*, *Concrete international*, 31, (04), 62-64.
132. Ombres L., (2012), *Debonding Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fibre Reinforced Cementitious Mortar*, *Engineering Fracture Mechanics*, 81, (0), 94-109.
133. Paliga C., Real M., Campos Filho A., (2013), *Numerical Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with High Strength Cement-Based Composite Material*, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 6, (2), 211-226.
134. *Textile Reinforced Mortar Structural Strengthening Systems at Elevated Temperature*, <http://trmstrengtheningsystems.weebly.com/frcm.html>, Ağustos 2014
135. *Ultra High Mechanical Performance Polyparaphenylene Benzobisoxazole (PBO) Fibre Mesh, with a Stabilised Inorganic Matrix, for Structural Reinforcement of Concrete*, (2006), <http://www.bob-fr.com/Doko/8cf032a0-ce97-4e8a-87f4-885dae215984.pdf>, Ağustos 2014
136. *PBO Reinforcing Mesh*, <http://www.archiproducts.com/en/products/71449/pbo-reinforcing-mesh-ruregold-ruredil.html>, Ağustos 2014
137. Swenson C.A., Marshall W.S., Gavrilin A.V., Han K., Schillig J., Sims Jr J.R., Schneider-Muntau H.J., (2004), *Progress of the Insert Coil for the Us-Nhmf1 100 T Multi-Shot Pulse Magnet*, *Physica B: Condensed Matter*, 346-347, (0), 561-565.
138. Rosseel K., Herlach F., Boon W., Bruynseraede Y., (2001), *Zylon-Reinforced High Magnetic Field Coils for the K.U. Leuven Pulsed Field Laboratory*, *Physica B: Condensed Matter*, 294-295, 657-660.

139. Zherlitsyn S., Bianchi A.D., Herrmannsdoerfer T., Pobell F., Skourski Y., Sytcheva A., Zvyagin S., Wosnitza J., (2006), *Coil Design for Non-Destructive Pulsed-Field Magnets Targeting 100 T*, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, 16, (2), 1660-1663.
140. Herlach F., Peng T., Vanacken J., *Elements of Pulsed Magnet Design*, Journal of Physics: Conference Series, 599, 2006. vol 1, IOP Publishing.
141. *Biwako-Roll®*, http://www.toho-yogyo.co.jp/biwako_e.html, Eylül 2014
142. *PBO Rollers*, <http://www.northerninnovations.net/about.html>, Eylül 2014
143. Matsuo T., (2001), *Overview and Trend of Technical Textile Technologies in Japan*, International Textile Bulletin: Nonwovens, Industrial Textiles, 47, (1), 46-48.
144. Tamargo-Martínez K., Villar-Rodil S., Paredes J.I., Martínez-Alonso A., Tascón J.M., Montes-Morán M.A., (2003), *Surface Characterization of PBO Fibers*, Macromolecules, 36, (23), 8662-8672.
145. Chen L., Hu Z., Liu L., Huang Y., (2013), *A Facile Method to Prepare Multifunctional PBO Fibers: Simultaneously Enhanced Interfacial Properties and Uv Resistance*, RSC Advances, 3, (46), 24664-24670.
146. Liu D., Hu J., Zhao Y., Zhou X., Ning P., Wang Y., (2006), *Surface Modification of PBO Fibers by Argon Plasma and Argon Plasma Combined with Coupling Agents*, Journal of Applied Polymer Science, 102, (2), 1428-1435.
147. Zhang C.H., Huang Y.D., Zhao Y.D., (2005), *Surface Analysis of Γ -Ray Irradiation Modified PBO Fiber*, Materials Chemistry and Physics, 92, (1), 245-250.
148. Wu Z., Iwashita K., Hayashi K., Higuchi T., Murakami S., Koseki Y., (2003), *Strengthening Prestressed-Concrete Girders with Externally Prestressed PBO Fiber Reinforced Polymer Sheets*, Journal of reinforced plastics and composites, 22, (14), 1269-1286.
149. Zhang C.H., Huang Y.D., Yuan W.J., Zhang J.N., (2011), *Uv Aging Resistance Properties of PBO Fiber Coated with Nano -Zno Hybrid Sizing*, Journal of applied polymer science, 120, (4), 2468-2476.
150. Song B., Fu Q., Liu X.-Y., Zhuang Q.-X., Han Z.-W., (2011), *Study on the Photolysis and Stabilization of PBO Fiber*, Gutu Huojian Jishu/Journal of Solid Rocket Technology, 34, (3), 378-383+392.
151. Park J.-M., Kim D.-S., Kim S.-R., (2003), *Improvement of Interfacial Adhesion and Nondestructive Damage Evaluation for Plasma-Treated PBO and Kevlar Fibers/Epoxy Composites Using Micromechanical Techniques and Surface Wettability*, Journal of Colloid and Interface Science, 264, (2), 431-445.
152. Tamargo-Martínez K., Martínez-Alonso A., Montes-Morán M.A., Tascón J.M.D., (2011), *Effect of Oxygen Plasma Treatment of Ppta and PBO Fibers on the Interfacial Properties of Single Fiber/Epoxy Composites Studied by Raman Spectroscopy*, Composites Science and Technology, 71, (6), 784-790.
153. Wu G.M., Shyng Y.T., Kung S.F., Wu C.F., (2009), *Oxygen Plasma Processing and Improved Interfacial Adhesion in PBO Fiber Reinforced Epoxy Composites*, Vacuum, 83, Supplement 1, (0), S271-S274.
154. Wu G.M., (2004), *Oxygen Plasma Treatment of High Performance Fibers for Composites*, Materials Chemistry and Physics, 85, (1), 81-87.