

TEKSTİL MATERYALLERİ İÇİN YENİLİKÇİ GÜÇ TUTUŞURLUK UYGULAMALARI

Innovative Flame Retardant Applications for Textile Materials

Bengi Kutlu

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, Buca - İZMİR

ÖZET

Bu çalışmada, tekstil materyalleri için son dönemde gerek çevreyi gerekse teknolojik gelişmeleri göz önünde bulundurarak öne çıkan güç tutuşurluk maddeleri ve aplikasyon yöntemleri hakkında bilgi verilecek ve bu yenilikçi uygulamalar değerlendirilecektir. Yenilikçi aplikasyon yöntemi olarak nano kaplamalara olanak veren layer-by-layer tekniği, uygulama ve büyük ölçeğe uyarlanabilirlik açısından kolaylık sağlayan emdirme ya da daldırarak bekletme yöntemleri güncel araştırmalarda yer almaktadır. Bunun yanında biyo-esaslı ve nanoparçacık halindeki güç tutuşurluk maddeleri son yılların gözde araştırma konuları olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tekstil, Güç tutuşurluk, Çevre, Yenilikçi.

ABSTRACT

In this study, information about flame retardants and application methods for textile materials, which have recently gained importance considering both the environment and technological developments, will be given and these innovative applications will be evaluated. Innovative application methods such as layer-by-layer technique allowing nano-coatings, impregnation or immersion methods in terms of application and adaptability to large scale are included in current research. In addition, bio-based and nanoparticulate flame retardants are the favorite research topics of recent years.

Key Words: Textile, Flame retardant, Environment, Innovative.

1. GİRİŞ

Evlerde, iş yerlerinde, ortak alanlarda (sinema vb.) kullanılan döşemelik perde vb ve giysilerde kullanılan konvansiyonel tekstil materyallerinin hammaddeleri gerek doğal kaynaklı olsun gerekse sentetik kaynaklı olsun yanıcılığı yüksek malzemelerdir. Bunlar arasında pamuk, keten, poliester, poliamid, viskoz sayılabilmektedir Yapısı itibarıyla diğerlerine göre güç tutuşurluğu iyi olan tek konvansiyonel lif yün lifidir. Günümüzde kullanımları süren güç tutuşurluk maddelerinin sağlık ve çevre açısından çeşitli dezavantajları olduğu için yenilikçi çevre dostu alternatifler için araştırmalar sürmektedir. Bu araştırmalarda öne çıkan konular incelendiğinde, biyo-esaslı güç tutuşurluk maddelerin kullanımı ve nanoparçacıklar ve nano kaplamalar elde edilebilen aplikasyon yöntemlerini içerdikleri görülmektedir^[1].

2. TEKSTİL MATERYALLERİNİN YANMASI VE GÜÇ TUTUŞURLUK MEKANİZMASI

Tekstil materyalleri doğal ya da sentetik kaynaklı olan polimerik malzemelerdir. Doğal kaynaklı lifler arasında doğrudan lif olarak elde edilen pamuk, keten, yün ve ipek gibi doğal lifler ve viskoz, lyocell, kazein gibi rejenere lifler sayılabilir. Rejenere lifler de doğal lifler gibi doğal polimerlerden oluşmaktadır. Sentetik kaynaklı lifler ise monomerlerden çeşitli polimerizasyon reaksiyonları sonucu üretilen polimerlerden elde edilen liflerdir ve örnek olarak poliester, poliamid, poliakrilonitril (akrilik) lifleri verilebilir. Tekstil malzemeleri, giysiler başta olmak üzere, insan hayatının geçtiği birçok yapıda ve alanda yer alan perdeler, koltuklar, yer kaplamaları, duvar kaplamaları, vb ürünlerdir. Evler çok çeşitli tekstil ürününün bir arada bulunduğu yapılardır. Ülkemizde 2018 yılında yapılan bir araştırmaya [2] göre 2008-2012 ve 2013-2017 yılları arasındaki 5 yıllık sürelerde İstanbul'da çıkan yapısal yangınların en yüksek miktarda çıkış nedeni konutlar ve bunun yanında fabrika ve araçlar dışındaki birçok yapı türünü içeren yapıları içeren "diğer bina"lardır. İkinci 5 yılda konut yangını sayısı % 11,8 artış göstermiştir [2]. Ev yangınlarının en önemli çıkış nedeninin tekstil materyalleri özellikle de yatak ve yatak tekstilleri olduğu belirtilmektedir [3]. Bu bağlamda tekstil ürünlerinin güç tutuşur özellikte üretilmesinin önemi anlaşılmaktadır. Bunlara ek olarak son yıllarda güç tutuşurluk ile ilgili düzenlemelerin sıkı bir şekilde uygulanıyor olması güç tutuşurluk bitim işlemlerine ilgiyi artırmıştır.

2.1 Tekstil Materyallerinde Yanma

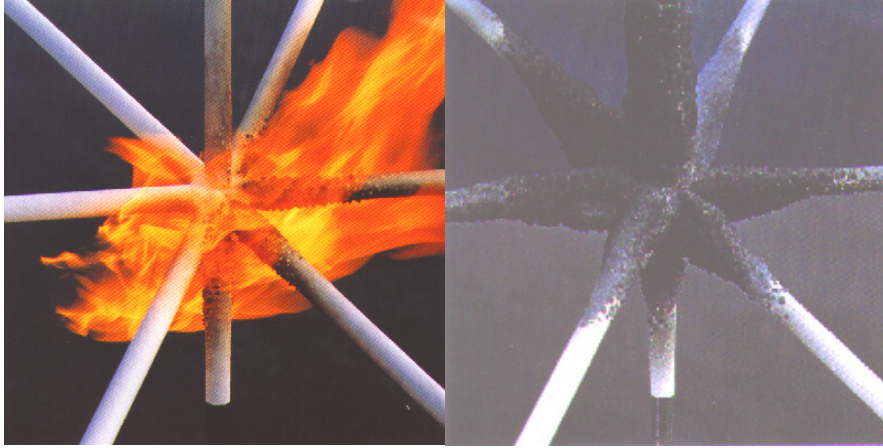
Tekstilleri de meydana getiren polimerler hızlı tutuşan ve kolay yanan malzemelerdir. Çoğu polimerin yanmasını sürdürmek için gerekli oksijen miktarı olan sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) değeri % 21'in altındadır. Bu da atmosferik ortamda tutuşan polimerlerin yanmayı sürdürmeleri için yeterli oksijen bulunduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca tekstil materyallerinin yanarken açığa çıkardıkları ısı miktarı da oldukça yüksektir [1,3]. Bu da yangının devam etmesine, yayılmasına neden olan olumsuz bir faktördür. Tekstil materyallerinde yanma şu şekilde olmaktadır: Bir ısı kaynağının varlığında, ilk önce tekstil materyalinin sıcaklığı yükselmektedir. Ardından belirli bir sıcaklığa ulaştığında polimer zincirlerinde kırılmalar meydana gelmeye ve **yoğun fazda** (condensed phase) tekstillerin yüzeyinde karbonlaşmış kömür oluşumu başlamaktadır. Kömürün yapısına bağlı olarak, daha sonra bozunarak uçucu bileşikler oluşumuna neden olabildiği gibi, yanmayı yavaşlatıcı özellikte de olabilir. Eş zamanlı olarak **gaz fazında** da zincirde oluşan kırılma bölgelerinden polimer hava oksijeni ile serbest radikal oluşturarak reaksiyona girmektedir. Oluşan bu radikaller tekrar oksijenle reaksiyona girerek daha yanıcı hatta yanmadaki yakıt görevi gören ve daha çok ısı açığa çıkararak yanmayı sürdürmeyi sağlayan türlere dönüşmektedir[1]. Aynı zamanda zehirli gazlar da (karbon monoksit, karbon dioksit, halojenli gazlar v.b.) açığa çıkabilmektedir. Yanma reaksiyonunda açığa çıkan ısı kendi kendini besleyecek düzeye ulaştığında, artık dışarıdan bir ısı kaynağına gerek olmamaktadır. Bu andandan itibaren, yanmanın üç bileşeni olan ısı, yakıt ve oksijen (oksitleyici maddeler) yanmanın kendi kendine ürettiği bileşenlerdir.

2.2 Tekstil Materyallerinde Güç Tutuşurluk Mekanizmaları

Güç tutuşurluk maddeleri yanmayı kontrol altına almak için fiziksel ve / veya kimyasal etki gösteren kimyasal aditif bitim işlem maddeleridir. Bu kimyasal maddeler, kimyasal yapılarına ya da etki mekanizmalarına göre sınıflandırılabilirler. Güç tutuşurluk maddelerinin etki mekanizmaları fiziksel ise yanıcı gazın seyreltilmesi, endotermik soğutma, kömürleşme ya da seramizasyon ile fiziksel bariyer etkisi gösterirken, kimyasal olduğunda alevlenmeyi engelleme, kömürleşme, köpürme – kabarma, erime yoluyla damlayarak uzaklaştırma etkisini göstermektedir. Fiziksel etki mekanizmasına sahip kimyasallar genellikle sadece fiziksel etki gösterirken, kimyasal etki mekanizmasına sahip kimyasalların fiziksel etki de gösterdikleri bilinmektedir [1].

2.2.1 Yoğun Fazda Güç Tutuşurluk Etkisi: Bu fazda ana etken **kömür oluşumu** ile polimeri dışarıdaki etkiden koruyan ve polimerden yanmayı destekleyen gazların, bileşiklerin açığa çıkmasını engelleyen bariyerin oluşmasıdır. Her polimer kömür oluşturmamakla birlikte eğer güç tutuşurluk maddesi ile işlem görmüş ise polimer yapısında çift bağların oluşması kolaydır ve bu bağlar kömür oluşumunu artırmaktadır. Özellikle fosfor içeren güç tutuşurluk maddeleri, yapısında oksijen ve azot olan polimerlerde kömürleşmeyi desteklemektedir. **Köpüren güç tutuşurluk maddeleri** (Şekil 1) üç bileşen yani bir asit kaynağı, bir kömürleşme bileşeni ve bir köpük oluşturucu varlığında kabarmış kömür tabakası oluşturmaktadır. Isı açığa çıkararak bozulan ve bozunurken su açığa çıkaran magnezyum hidroksit gibi maddeler, endotermik soğutmayı sağlamaktadır. Böylece yanmayı sürdürmek için gerekli

ısı oluşmamakta, yanma bölgesinin sıcaklığı düşmektedir. Böylece yanma yavaşlamakta hatta sönebilmektedir. Ayrıca nano boyutlu parçacıkların oluşturduğu bariyer tabakası da polimerin içerisinden dışarıya gaz çıkışını zorlaştırmakta yani difüzyon yardımıyla polimerden gazların çıkış yolunun uzamasına neden olmaktadır. Nanopartikül güç tutuşurluk maddeleri, foliküllerden bir ağ halini alarak polimerin karbonlaşmış kömür tabakası ile birleşmekte ve alevlerle polimer arasında koruyucu bir izolasyon bariyeri oluşturmaktadır. Yoğun faz **eriyip damlamayı** da içeren bir mekanizmadır. Bazı güç tutuşurluk maddeleri lif polimer zincirlerinin parçalanmasını hızlandırarak eriyerek damlama ile yanıcı polimerin ortamdaki uzaklaşmasını sağlamaktadır. Ancak burada eriyerek ve yanarak alevli damlalarla damlayan polimer söz konusu olursa yangının yayılma riski olmaktadır [1].



Şekil 1. Köpüren güç tutuşurluk maddesi örneği By Achim Hering - Own work, CC BY-SA 3.0, [4]

2.2.2 Gaz Fazında Güç Tutuşurluk Etkisi: Gaz fazındaki mekanizmalardan bir tanesi yanıcı olmayan su buharı gibi gazlar açığa çıkararak ortamdaki yanıcı gazların konsantrasyonunun azaltılmasıdır. Su buharı açığa çıkaran güç tutuşurluk maddeleri özellikle metal hidroksitlerdir. Bu aynı zamanda yanıcı gaz açığa çıkaran polimerin gaz açığa çıkarma oranını da azaltarak gerçekleşebilmektedir. Yanıcı gazlar azaldığında yanma hızı düşmektedir. Diğer bir mekanizma ise serbest radikal (Hidrojen ve hidroksil radikalleri) yakalama mekanizmasıdır. Serbest hidrojen radikali ve hidroksil radikali yanmayı sırasıyla daha çok serbest radikal açığa çıkmasını sağlama ve karbon monoksiti ve karbon dioksiti yükseltgeyerek daha yanıcı gazlar açığa çıkmasına neden olarak desteklemektedir. Özellikle halojenli güç tutuşurluk maddeleri radikal yakalayıcı olarak görev yapmaktadır. Yanma ile oluşan halojen radikalleri hidrojen ve hidroksil radikalleri ile reaksiyona girerek hidrojen halojenürler oluşturarak radikallerin etkisiz kalmasını sağlamaktadır. Bu mekanizma ile yanmanın yakıt oluşumu sekteye uğratılmış olmaktadır [1].

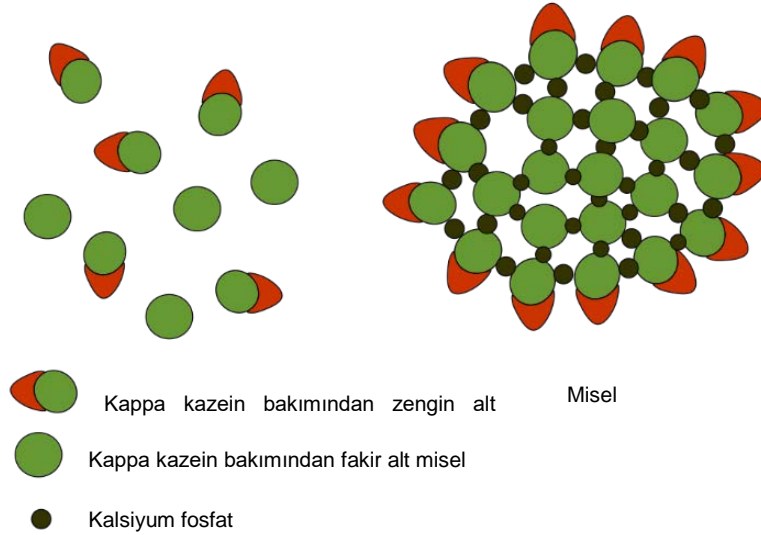
3. YENİLİKÇİ GÜÇ TUTUŞURLUK İŞLEMLERİ

Son yıllarda tekstilere yapılan güç tutuşurluk kazandırma çalışmalarında lif olarak pamuk ve selülozik liflerin oldukça geniş bir yer tuttuğu görülmektedir. Yenilikçi güç tutuşurluk işlemleri incelendiğinde ise doğal esaslı güç tutuşurluk maddeleri ile nano boyutlu güç tutuşurluk maddelerinin dolayısıyla daha "yeşil" güç tutuşurluk kimyasallarının önemli bir yer tuttuğu anlaşılmaktadır. Bunun yanında güç tutuşurluk işlemlerinde yenilikçi yöntem olarak layer-by-layer ve dip-coating gibi kaplama yöntemleri uygulanmaktadır. [1,5]. Güç tutuşurluk özellikte üretilen polimerik tekstil kompozitleri de teknik tekstiller alanında önemli araştırma konularıdır, bununla birlikte bu bildirinin kapsamında bulunmamaktadır. Detaylı bilgi ilgili yayınlardan bulunabilir [6-8]

3.1 Biyo-Esaslı Güç Tutuşurluk Maddeleri

Biyo esaslı güç tutuşurluk maddeleri üzerine araştırmalar son 4 yılda önemli bir artış göstermektedir[9]. Biyo-esaslı güç tutuşurluk maddeleri, fitik asit, bitkisel yağ, nükleik asit, proteinler (kazein vb.), biyo-esaslı aromatik bileşikler (lignin, vb.), sakkarit esaslı maddeler olarak sayılabilmektedir[9,10]. Biyo-esaslı güç tutuşurluk maddelerinin temek güç tutuşurluk etkisi, yoğun faz mekanizması üzerinden ilerlemektedir ve kömür oluşumunu artırmaları ile gerçekleşmektedir.

Protein esaslı maddeler arasında yer alan kazeinin de (Şekil 2) güç tutuşurluk mekanizması özellikle kömürleşmeyi artırma yönündedir^{9,11}. Pamuk liflerine asidik (pH 3) ve alkali (pH 9) koşullarda aplike edildiğinde elde edilen performans özellikleri karşılaştırıldığında, alkali ortamda işlem yapılan numunenin daha yavaş yandığı belirtilmektedir¹¹. Bunun yanında konsantrasyon artışına bağlı olarak yanma daha yavaşlamıştır. Konsantrasyon yüksekliğine bağlı olarak asidik çözeltinin viskozitesinde artış gözlenmiş ve asidik işlem görmüş kumaşın 5 durulamada daha dayanıklı olması ve UV koruyuculuk özelliğinin daha yüksek olması da yüksek viskozite nedeniyle kumaş gözeneklerinin kapanmasına bağlanmıştır¹¹.



Şekil 2. Kazein molekülü By Pancrat - Own work, CC BY-SA 3.0 ^[12]

İyi birer karbon kaynağı olan sakkarit esaslı güç tutuşurluk maddeleri (nişasta, siklodekstrin, kitin vb.) düşük bozunma sıcaklıkları ile köpüren güç tutuşurluk sistemlerinin kömürleşme bileşeni olarak rol oynamaktadır. Örneğin nişasta, 150-280°C'de polioksiasit tuzları oluşturarak bozunmakta ve köpüren kömür oluşumunu desteklemektedir. Oluşan köpürmüş kömür katmanı alttaki polimeri koruyucu bariyer görevi görmektedir⁹. Kitosan hem kömürleşme ajanı hem de poliüretan molekülü ile bağ yaparak doğrudan fosfatlı bileşiklerle polimeri bağlayan güç tutuşurluk maddesi olarak kullanılmaktadır. Lignin, floroglisin gibi aromatik yapıdaki biyo-esaslı güç tutuşurluk maddeleri de yoğun fazda karbon kaynağı olarak rol alırlar ve kömürleşmeyi desteklemektedirler⁹. Nükleik asitler (RNA ve DNA) ise tek başlarına kullanıldıklarında köpüren güç tutuşurluk maddesi görevi görmektedir. Bunun nedeni yapılarında fosfat grupları halinde asit kaynağını, azot içeren moleküller halinde köpük oluşturucuyu ve deoksiriboz ya da riboz üniteleri ile de karbon kaynağını yapılarında içermeleridir⁹.

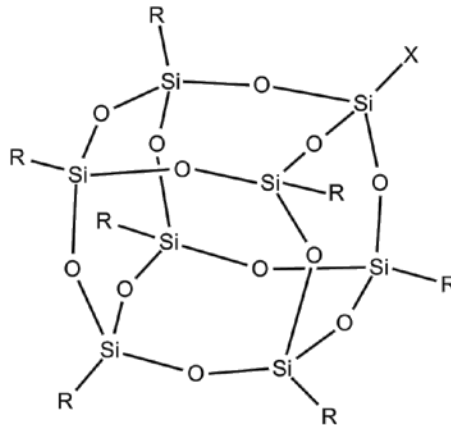
Maddalena ve arkadaşları^[13] selüloz nanokristaller ve dallanmış polietilenimini kombine ettikten oluşan jelimsi polielektrolit maddeyi direkt kaplama yöntemi ile pamuklu kumaşlar üzerine aplike etmişlerdir. İşlem görmüş kumaşlarda kömürleşme oranı yükselmiş ve alev yayılma testinde işlem görmemiş pamuk tümüyle yanıp kül haline dönüşürken, işlem görmüş kumaşlar kendi kendine sönmüştür. Ayrıca durulama sonrası güç tutuşurluk özellikleri neredeyse değişmemiş bir kumaş elde etmişlerdir^[13]. Sentetik liflerin son yıllardaki güç tutuşurluk araştırmaları incelendiğinde üretimin kolaylığı açısından yüzey modifikasyonu yöntemlerinin arttığı gözlemlenmektedir^[14]. Sun ve arkadaşları, 2024 yılında yaptıkları çalışmada silan, fosfor, azot ve kalsiyum içeren bir yüzey kaplamasını poliester kumaşlara uygulamış ve özelliklerini incelemişlerdir. Pentametilsiloksan, fosforoz asit, üre ve kıvamlaştırıcı olarak sodyum aljinat ve diğer kimyasalları içeren reçeteyi baskı patı kıvamında oluşturmuşlar ve polister kumaşın her iki yüzüne ön işlem yapılmadan direkt kaplama yöntemiyle uygulamış ve kurutmuşlardır. Ardından %10'luk kalsiyum klorür çözeltisi ile 30 dakika emdirilmiş ardından 80°C'de kurutulmuşlardır^[15]. İşlem görmüş kumaşların LOI değeri %35,3 değerine ulaşmış ve kömürleşme oranı da %35 olmuştur. Açığa çıkan ısı miktarı da düşmüş ve toplam duman oluşumu azalmıştır. Bunun yanında uyguladıkları 25 yıkama döngüsü sonrasında da iyi sınırlayıcı oksijen indeksi değeri elde etmişlerdir^[15]. Zheng ve

arkadaşları, [16] bazik işlem yapılmış pamuklu kumaşlara lakkaz ve fitik asiti layer-by-layer tekniği ile uygulamışlardır. Her kimyasal birer katman halinde 60 dakika boyunca çözeltide bekletilerek uygulanmıştır. İşlem sonunda pamuklu kumaşın LOI değeri %43,0'e ulaşmış ve dikey alev yayılma testinde kendiliğinden sönmeye özelliği kazanmıştır. Ayrıca yanarken açığa çıkardığı ısı miktarı %88,4 düşmüştür. Kömüleşme oranı ise %39,0 olarak elde edilmiştir. İşlem sonrası ağırlık artışı en çok %15,6 olmuştur. Araştırmacılar bu kombinasyonun hem yoğun faz hem de gaz fazı mekanizması ile güç tutuşurluk sağladığını belirtmektedir^[9,16].

3.2 Nanoparçacık Güç Tutuşurluk Maddeleri

Nanoparçacıklar boyutları 100 nm'den küçük olan parçacıklardır ^[5,17,18]. Son zamanlarda, nano boyutta gösterdikleri sıradışı özellikleri (termal stabilite, mukavemet, v.b.) nedeniyle güç tutuşurluk alanında da baskın araştırma konularından birisi haline gelmiştir. ^[19-22]. Ek olarak, normalde makro ya da mikro boyutlarında aynı kimyasal maddeden yeterli özellikleri alabilmek için çok yüksek oranlarda eklemek gerekliken nanoparçacıkların çok daha düşük konsantrasyonlarda (%5 kadar düşük) kullanılması özellikle kombinasyonlar uygulandığında yeterli olmaktadır ^[22].

Nanoparçacık uygulaması, nanoteknoloji uygulamalarının etkilerinin görülebileceği alanlardan bir tanesidir. Nanoparçacıkların arasında silika esaslı nanoparçacıklar, silika nanoküresi, polihedral oligomerik silseskioksan nanoparçacığı (POSS) (Şekil 3), killer (özellikle montmorillonit), karbon esaslı nanoparçacıklar (grafen, karbon nanotüp, vb.) metal esaslı nanoparçacıklar (metal oksit ve hidroksitler, metal organik çerçeveler, MXene, vb.) sayılabilmektedir.^[23,24]. Potansiyel Nanoparçacık güç tutuşurluk maddelerinden beklenen özelliklere bakıldığında, bozunmaları sırasında ısı absorblamaları (endotermik bozunma), dolayısıyla polimerin yanması sırasında düşük ısı açığa çıkarmasını sağlaması, bozunma sıcaklığının liflerin bozunma sıcaklıklarına yakın olması, ağırlığının %25i kadar yanıcı olmayan gaz (su buharı gibi) açığa çıkarması (gaz fazında seyreltme etkisi), düşük maliyet, kolay işlenebilirlik (Nanoparçacıkların lif polimer yapısı ile uyumlu olması, lif polimerinin reolojik özelliklerine (eriyik viskozitesine) etkisi), Nanoparçacık olarak kullanılması amaçlandığı için kullanılan çözücüde çözünmemesi, polimerin olması gerekenden erken bozunmasına sebep olmaması ve etkilenecek alanlarda renk değişimine neden olmaması önemlidir ^[17,22]. Nanoparçacık güç tutuşurluk maddelerinin güç tutuşurluk etki mekanizmaları, türüne, konsantrasyonuna, kullanıldığı polimere vb. bağlı olarak değişebilmekle birlikte özellikle yoğun fazda kömür oluşumunu desteklemek şeklindedir. Oluşan kömür yapısı karbon esaslı ya da seramik esaslı bir koruyucu bariyer olabilir, bu bariyer de ısının life geçmesini ve polimerin yanıcı bozunma ürünlerinin yanmayı desteklemek üzere havaya karışmasını engelleyen bir katman görevi görmektedir. Aralarında bazı nanoparçacıklı güç tutuşurluk maddelerinin gaz fazında etki ettiği de bilinmektedir. polihedral oligomerik silseskioksan nanoparçacığı ya da MXene nanolevhaları gibi son yıllarda önem kazanan maddeler son yıllardaki araştırmalar görülmektedir. Ayrıca kombinasyonlar üzerine çok sayıda araştırma olduğu görülmektedir. Sonraki bölümde bazı yeni araştırmalar hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 3. Polihedral oligomerik silseskioksan molekülü By Sephirothazule - Own work, Public Domain ^[25]

Cheng ve arkadaşları, geri dönüştürülmüş poliester kumaşlara çeşitli konsantrasyonlarda nanomagnezyum hidroksit ve siklik fosfat ester ile yüksek sıcaklıkta basınç altında (HT koşullarda) 135°C'de 60 dakika çektirme işlemi uygulamışlardır ^[26]. İşlem görmüş poliester kumaşlar, düşük ısı

açığa çıkarma oranı ve oldukça düşük duman yoğunluğu (özellikle karbon monoksit (CO) ve CO/CO₂ (karbon dioksit) oranı) ve yüksek kömürleşme oranı ve sınırlayıcı oksijen indeksi sergilemiştir. Kopma mukavemeti 5MPa artmıştır ve bunun nanomagnezium hidroksitin kumaşlardaki kusurlu kısımları doldurduğu için olduğu belirtilmiştir. Ding ve arkadaşları^[27] titanyum karbür MXene ve fosfonitrilik klorür trimeri ile modifiye edilmiş zeolitik-imidazol (ZIF-8) metal organik çerçeve kombinasyonunu tek banyolu emdirme yöntemi ile güç tutuşurluk, hareket algılama ve UV koruma özelliği kazandırmak için pamuk/lyocell karışım kumaşlara uygulamışlardır^[27]. %43,5 kömürleşme oranına ve 30,8 LOI değerine ulaşmışlardır. Yapılan işlemin 49°C'de 4 yıkama döngüsüne dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir. Aynı üründe fosfonitrilik klorür trimer kullanılmadan yapılan uygulamada ise, kömürleşme oranı %42.0 ve LOI değeri %23,0 olabilmıştır^[27]. Liang ve arkadaşlarının^[28] yaptıkları çalışmada, pamuklu kumaşlara hidrofobluk için polidimetil siloksan (PDMS) içeren zeolitik imidazol metal organik çerçevesi (ZIF-67 MOF) ve güç tutuşurluk için defosforlanmış okta aminopropil polihedral oligomerik silseskioksan kombinasyonunu applike etmişlerdir. Bu güç tutuşurluk sisteminde siloksan içeren türler seramizasyon ile koruyucu bariyer tabakasını oluşturmaktadır. Fosforlanmış gruplar içeren zeolitik imidazol metal organik çerçevenin fosforlu grupları kömürleşmeyi katalizlerken, azot içeren grupları da yanıcı olmayan gaz açığa çıkararak etkinliğini sergilemektedir. Sonuç olarak, kömürleşme oranı ve LOI değeri artmış, tutuşma süresi katalitik kömürleşme prosesini desteklemek üzere düşmüştür. Bu etkilerin 3 yıkama döngüsü sonrasında neredeyse hiç değişmediği bulunmuştur^[28].

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma ile son yıllarda tekstil materyallerine güç tutuşurluk kazandırmada kullanılan yenilikçi uygulamaların derlenmesi amaçlanmıştır. Burada anlatılan gerek layer-by-layer yönteminin gerek biyo-esaslı kimyasal güç tutuşurluk ajanlarının gerekse nanoparçacık güç tutuşurluk maddelerinin kullanımı günümüzde önemsenen sürdürülebilirlik ve çevre ile sağlığın korunması kavramlarına tam olarak uymaktadır. Son yıllarda hızla artan sayıda araştırmaya konu olan bu yenilikçi (biyo-esaslı ve nano boyuttaki) güç tutuşurluk maddeleri göz önüne alındığında, güç tutuşurluk maddesi kombinasyonlarının kullanılması, güç tutuşurluk maddelerinin bir yönüyle eksik kalması durumunda, diğer bir kimyasal madde ile o yönünün tamamlanmasına olanak vermektedir.

Bunun sonucu olarak, bu derleme çalışmasından çıkarılan sonuç, uygulamada, tasarımda gelişmeler sağlandıkça, ileriki yıllarda kullanım konsantrasyonları daha az olan, güç tutuşurluk özelliklerinde birim miktarla daha iyi etki elde edilen ve yıkamaya dayanıklı, çevre ve insan sağlığına zararlı etki etmeyen alternatif ve başarılı güç tutuşurluk uygulamalarının yaygınlaşacağı ve dolayısıyla sürdürülebilirlikle döngüsel ekonomiye katkıda bulunacağıdır.

KAYNAKLAR

- [1] O. Y. Wen, M. Z. M. Tohir, T. C. S. Yeaw, M. A. Razak, H. S. Zainuddin, M. R. A. Hamid, *Prog Org Coat* **2023**, 175, 107330.
- [2] A. Kılıç, *Yangın ve Güvenlik Dergisi* **2018**, 8–10.
- [3] A. Richard. Horrocks, in *Update on Flame Retardant Textiles : State of the Art, Environmental Issues and Innovative Solutions* (Eds.: Jenny. Alongi, A.Richard. Horrocks, Federico. Carosio, Giulio. Malucelli), Smithers Rapra Publishing, Shropshire, **2013**, pp. 1–18.
- [4] "Intumescent - Wikipedia," can be found under <https://en.wikipedia.org/wiki/Intumescent>, **n.d.**
- [5] G. Vahidi, D. S. Bajwa, J. Shojaeiarani, N. Stark, A. Darabi, *J Appl Polym Sci* **2021**, 138, DOI 10.1002/APP.50050.
- [6] M. Bar, R. Alagirusamy, A. Das, *Fibers and Polymers* **2015**, 16, 705–717.
- [7] A. L. Mohamed, A. G. Hassabo, **2015**, 247–314.
- [8] A. L. Mohamed, A. G. Hassabo, *Engineering Materials* **2015**, 247–314.
- [9] G. Malucelli, *Molecules* **2024**, 29, DOI 10.3390/MOLECULES29133067.
- [10] A. Khandual, *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes* **2016**, 171–227.
- [11] S. Faheem, V. Baheti, M. Tunak, J. Wiener, J. Militky, **2019**, 48, 969–991.
- [12] "Kazein - Wikipedia," can be found under <https://en.wikipedia.org/wiki/Casein>, **n.d.**
- [13] L. Maddalena, J. M. Indias, P. Bettotti, M. Scarpa, F. Carosio, *Polym Degrad Stab* **2024**, 220, 110646.

- [14] C. K. Kundu, Z. Li, L. Song, Y. Hu, *Eur Polym J* **2020**, *137*, 109911.
- [15] L. Sun, C. Yang, H. Wang, X. Jin, X. Li, X. Liu, P. Zhu, C. Dong, *Int J Biol Macromol* **2024**, *259*, 129121.
- [16] X. T. Zheng, Y. Q. Dong, X. D. Liu, Y. L. Xu, R. K. Jian, *J Clean Prod* **2022**, *350*, 131525.
- [17] Peter. R. Hornsby, R. N. Rothon, in *Fire Retardancy of Polymers New Applications of Mineral Fillers* (Eds.: M. Le Bras, C.A. Wilkie, S. Bourbigot, S. Duquesne, C. Jama), The Royal Society Of Chemistry, Cambridge, **2005**, pp. 19–41.
- [18] T. Kashiwagi, in *Fire Retardancy of Polymers New Applications of Mineral Fillers* (Eds.: P.R. Le Bras, C.N. Wilkie, S. Bourbigot, S. Duquesne, C. Jama), The Royal Society Of Chemistry, Cambridge, **2005**, pp. 81–99.
- [19] D.-Y. Wang, Ed. , *Novel Fire Retardant Polymers and Composite Materials*, Woodhead Publishing, **2017**.
- [20] M. Norouzi, Y. Zare, P. Kiany, *Polymer Reviews* **2015**, *55*, 531–560.
- [21] Visakh. P. M., Yoshihiko. Arao, *Flame Retardants: Polymer Blends, Composites and Nanocomposites*, Springer, **2015**.
- [22] Jenny. Alongi, A. Richard. Horrocks, in *Update on Flame Retardant Textiles: State of the Art, Environmental Issues and Innovative Solutions* (Eds.: Jenny. Alongi, A.Richard. Horrocks, Federico. Carosio, Giulio. Malucelli), Smithers Rapra Publishing, Shropshire, **2013**, pp. 239–256.
- [23] S. Faheem, N. Nahid, J. Wiener, B. Tomková, M. Pechociaková, J. Militký, A. Mazari, *Advanced Multifunctional Materials from Fibrous Structures*, Springer Nature Singapore, Singapore, **2023**.
- [24] P. R. Hornsby, <https://doi.org/10.1179/095066001771048763> **2001**, *46*, 199–210.
- [25] "Silsequioxane - Wikipedia," can be found under <https://en.wikipedia.org/wiki/Silsequioxane>, **n.d.**
- [26] X. W. Cheng, J. Zhang, C. Zhang, S. S. Cheng, F. M. Tang, J. P. Guan, G. Chen, *Polym Degrad Stab* **2024**, *226*, DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110827.
- [27] L. Ding, L. Sun, Z. Wang, D. Li, Q. Zhang, X. Liu, Y. Ren, Y. Li, *Chemical Engineering Journal* **2023**, *474*, 145859.
- [28] F. Liang, Y. Xu, S. Chen, Y. Zhu, Y. Huang, B. Fei, W. Guo, *ACS Appl Mater Interfaces* **2022**, *14*, 56027–56045.

ÖZGEÇMİŞ

Doç. Dr. Bengi Kutlu, Yüksek Lisans ve Doktora çalışmalarını Dokuz Eylül Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Halen Dokuz Eylül Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Avrupa Koruyucu Giysiler Birliği yönetim kurulu üyesidir. Araştırmaları, "termal koruyucu giysiler", "güç tutuşur tekstiller" ve "plazma teknolojisiyle yüzey modifikasyonu" konuları üzerinde yoğunlaşmıştır.