



FLOROPOLİMERLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ VE SIZDIRMAZLIK SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Ezgi ÖZGÜNERGE FALAY¹, Burcu ÇALIŞKANELLİ², Öz Erman ARUSAN³,
Lütfiye ALTAY⁴, Mehmet SARIKANAT⁵

¹ Dr. Çevre Mühendisi, ARNES Mekanik Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Tasarım Merkezi,
ORCID: 0000-0001-6264-2795

² Kimya Mühendisi, ARNES Mekanik Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Tasarım Merkezi,
ORCID: 0000-0001-9188-8145

³ Makine Mühendisi, ARNES Mekanik Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Tasarım Merkezi,
ORCID: 0000-0002-6312-8533

⁴ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir,
ORCID: 0000-0003-4946-3615

⁵ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0001-7535-6819

Anahtar kelimeler

Öz

Floropolimerler, PTFE, PFA, geri dönüşüm, sürdürülebilirlik, sıfır atık

Floropolimerler, üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalarından dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal stabilite, kimyasal inertlik, düşük yüzey sürtünmesi, hava koşullarına mükemmel dayanıklılık ve oksidasyona karşı direnç gibi üstün özelliklere sahip olmaları nedeni ile otomotiv, havacılık, kimya, petrokimya, elektrik-elektronik gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Floropolimerlerin pek çok çeşidi bulunmakla birlikte endüstriyel uygulamalarda en çok PTFE (Politetrafloroetilen) ve PFA (Perfloroalkoksi) kullanımı tercih edilmektedir. Sızdırmazlık sektöründe kullanılmaları durumunda ekipmanın ve sızdırmazın faydalı ömrünü uzatmakta, bakım-onarım maliyetini azaltmaktadırlar. Bu nedenle piston keçesi, boğaz keçesi, toz keçesi ve yataklama elemanı malzemesi olarak

¹ Sorumlu yazar; e-posta: ezgif@jetseal.com.tr
doi : muhendismakina.1319160

yaygın olarak tercih edilirler. Ülkemizde floropolimer malzeme tedarikinin büyük bir kısmı yurtdışından sağlanmaktadır ve ithalat işlemi oldukça maliyetlidir. İşletmelerde PTFE ve PFA floropolimerleri kullanıldıktan sonra ortaya çıkan atıklar uygun geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilir. Bu sayede floropolimer malzeme tedarikinde yurtdışı bağımlılığı azaltılmış ve atıkların sürdürülebilirliği sağlanarak sıfır atık oluşmuş olacaktır. Bu bildiriye, PTFE ve PFA floropolimerlerinin sızdırmazlık sektöründeki kullanım yerleri ve üretimde hammadde olarak kullanılmalari sonucunda oluşan atıklarının geri dönüşüm yöntemleri incelenmiştir.

RECYCLING OF FLUOROPOLYMERS AND APPLICATIONS IN THE SEALING INDUSTRY

Keywords

Fluoropolymers,
PTFE, PFA, recycling,
sustainability, zero waste

Abstract

Fluoropolymers are generally used in industrial applications due to their excellent physical and chemical properties. It is used in automotive, aerospace, chemistry, petrochemistry and electrical-electronic industries due to its excellent properties such as thermal stability, low surface friction, chemical inertness, excellent resistance to weather conditions and resistance to oxidation. Although there are many types of fluoropolymers, PTFE (Polytetrafluoroethylene) and PFA (Perfluoroalkoxy) are mostly preferred in industrial applications. If they are used in the sealing industry, they extend the useful life of the equipment and the sealant, and reduce the maintenance repair costs. For this reason, they are widely preferred as piston seal, rod seal, scrapers and bearing element materials. A large part of the fluoropolymer material supply in our country is provided from abroad and the process is quite costly. Generated waste after the use of PTFE and PFA fluoropolymers in production can be converted into high value-added products by using appropriate recycling methods. In this way, foreign dependency in the supply of fluoropolymer materials will be reduced and zero waste will be created by ensuring the sustainability of waste.

Derleme Makalesi

Başvuru Tarihi : 07.12.2022

Kabul Tarihi : 15.02.2023

Review Article

Submission Date : 07.12.2022

Accepted Date : 15.02.2023

Extended Abstract

Introduction

Fluoropolymers are polymeric materials containing fluorine atoms in their chemical structure and are partially or fully fluorinated olefinic polymers. Their chemical inertness allows them to be used in hard working environments and in most industrial processes. Fluoropolymers are used in various industries such as automotive, aerospace, electrical-electronics due to their excellent properties such as thermal stability, chemical inertness, low surface friction, excellent resistance to weather conditions and resistance to oxidation. Although there are many types of fluoropolymers, PTFE (Polytetrafluoroethylene) and PFA (Perfluoroalkoxy) are mostly preferred in industrial applications. PFA has similar physical and chemical properties to PTFE. Its chemical resistance and thermal stability are comparable to PTFE. PFA is a member of the high performance fluoropolymer family and was developed as an easily molded or extruded thermoplastic with outstanding properties to expand the usage of fluoropolymers.

Objectives/ Research Purpose

PTFE and PFA are usually used raw materials in the production of sealing elements by machining. The amount of waste generated in the machining of PTFE and PFA raw materials is 10%-25%. These wastes are both an economic loss and an environmental problem. However, the disposal of fluoropolymer wastes creates an additional cost for companies. It is foreseen as an effective solution method for businesses to carry out studies on the recycling of raw materials used in order to prevent environmental damage and material loss. In this paper, general information is specified about the usage areas of PTFE and PFA fluoropolymers in the sealing technologies and the recycling methods of wastes generated as a result of their use as raw materials in production.

Results/ Findings

Recycling studies have started within the scope of the Solid Waste Control Regulation, which has been implemented in Turkey since 1991. These studies have been continued for more than 20 years. The idea of "use-throw" has changed over time to "use-recycle-reuse" in the world. The situation is improving for polymers, which are the materials where the "use-throw" routine is mostly applied with recycling studies. High rates recycling of polymers, which have existed in nature for thousands of years without being destroyed, will ensure the protection of our natural resources.

The recycling rate in Turkey is 22.4% for all waste materials. This rate continues to rise with the recycling projects carried out in Turkey. Within the scope of Zero Waste Project, which was begun a few years ago in our country, savings are achieved in terms of both energy and raw material needs by recycling the waste materials generated in the enterprises and reusing them as raw materials in new products. Considering the possibility of running out of natural resources, it is necessary to pay attention to their efficient use and recycling of wastes. Accordingly, the importance of zero waste studies developing in our country is increasing.

Fluoropolymers are generally used in industrial applications due to their excellent mechanical and chemical properties. Fluoropolymers, especially PTFE and PFA, are highly preferred because they have similar superior chemical and physical properties such as high chemical resistance, hydrophobicity, wide operating temperature range, and high abrasion resistance. For this reason, it has application areas in many different sectors such as automotive, aerospace, electrical-electronics, medical, energy conversion. Due to their superior lubricating properties, high wear resistance and ability to operate at high temperatures, they have the potential to be widely used, especially in sealing technologies. After using PTFE and PFA materials in enterprises, fluoropolymer wastes can be converted into high value-added products by using appropriate recycling methods. In this way, foreign dependency in the supply of fluoropolymer materials will be reduced and zero waste will be created by ensuring the sustainability of waste.

1. Giriş

Floropolimerler, 1938 yılında New Jersey'deki DuPont's Jackson Laboratuvarı'nda kimyager Dr. Roy J. Plunkett tarafından yeni kloroflorokarbon soğutucuları araştırılırken bulunmuştur. Araştırmalar sırasında 100 pound tetrafloroetilen gazı üretilmiş ve klorlama öncesinde küçük silindirler içine konularak çok düşük sıcaklıklarda saklanmıştır. Hazırlanan silindirlerden biri kontrol edildiğinde, dışarıya gaz çıkmadığı halde silindirin gaz yokken sahip olduğu ağırlığı koruduğu, silindir açıldığında ise içerisinde beyaz bir toz olduğu görülmüştür. Araştırmalar sonucunda, bu maddenin ısıya karşı dirençli, kimyasal olarak inert ve çok düşük yüzey sürtünmesine sahip olan floropolimer olduğu sonucuna varılmıştır (Ebnesajjad, 2017).

Floropolimerler, kimyasal yapılarında flor atomları bulunan polimerik malzemeler olup genellikle kısmen veya tamamen florlanmış olefinik polimerlerdir (Ebnesajjad, 2017). Floropolimerler, perflorlu ve kısmen florlu polimerler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Bazı floropolimerler, karbon veya flor elementleri dışında az miktarda farklı elementler de içerebilir. Etilen tetrafloroetilen kopolimer (ETFE), tetrafloroetilen (TFE), politetrafloroetilen (PTFE), perfluoroetilenpropil kopolimer (FEP), perfloroalkoksi (PFA), poliklorotrifloroetilen (PCTFE), etilen trifloroetilen kopolimer dâhil birçok çeşit floropolimer vardır. Floropolimerler; termal stabilite, kimyasal inertlik, düşük yüzey sürtünmesi, hava koşullarına mükemmel dayanıklılık ve oksidasyona karşı direnç gibi üstün özelliklere sahip olmaları nedeniyle otomotiv, havacılık, elektrik-elektronik gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (Ameduri, 2018).

2. Floropolimerlerin Özellikleri ve Kullanım Alanları

2.1 Floropolimerlerin Özellikleri

Floropolimerler, üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalarından dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal inertlik özelliğine sahip olmaları zorlu çalışma ortamlarında ve çoğu endüstriyel işlemde kullanılabilmelerini sağlamaktadır. Floropolimer malzemeler sert olarak kabul edilmezken, (-200)°C'lerde sertliklerini koruma, kimyasal inertlik, elektrik yalıtım ve alev geciktirme özellikleri bu malzemeleri elektrik endüstrisinin vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir (Şekil 1). Floropolimerlerin pek çok çeşidi bulunmakla birlikte endüstriyel uygulamalarda en çok PTFE (Politetrafloroetilen) ve PFA (Perfloroalkoksi) kullanımı tercih edilmektedir. Teflon, PTFE polimerinin ticârî adı olup, florlanmış etilen polimeri olan bir politetrafloroetilendir. Isıya, kimyasallara, neme ve sürtünmeye karşı dayanıklı olan PTFE hiçbir malzemeye yapışmaz.



Şekil 1. Floropolimer hammaddelere bazı örnekler

PTFE ve PFA floropolimerleri yaklaşık olarak 260°C sürekli çalışma sıcaklığına sahiptir. Erime noktaları ise sırasıyla yaklaşık olarak 320°C ve 305°C'dir. 260°C üzerindeki sıcaklıklarda PTFE'nin kimyasal yapısı bozulmaya başlar, 350°C civarında ise kimyasal yapı tamamen bozulur. Bu nedenle, 290°C'ye kadar olan sıcaklıklarda verimli bir şekilde kullanılabilmektedir. Düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olması PTFE'yi aşınmaya ve kimyasallara karşı dirençli bir hale getirmektedir (Akıncı, Akbulut ve Yılmaz, 2003). PFA, PTFE ile benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Kimyasal direnci ve termal stabilitesi PTFE ile karşılaştırılabilir seviyededir. PFA, yüksek performanslı floropolimer ailesinin bir üyesi olup, floropolimerlerin kullanım aralığını genişletmek amacı ile olağanüstü özelliklere sahip, kolayca kalıplanmış veya ekstrüde edilmiş bir termoplastik olarak geliştirilmiştir. Özellikle yüksek ve düşük sıcaklık gerektiren ortamlarda kullanım için mükemmel kimyasal kararlılığa, elektriksel özelliklere ve mekanik dayanıklılığa sahip bir termoplastiktir. Yaklaşık 300°C - 310°C gibi yüksek erime sıcaklıklarına sahip bir malzeme olup, kolay üretilebilme, yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özellikler sergileyebilme avantajlarına sahiptir (Ebnesajjad, 2015). PFA, yaklaşık 260°C gibi yüksek sıcaklıklarda özelliğini kaybetmeden kullanılabilir. PFA, pişirme sırasında malzeme yüzeyinde porozitesiz ve kaygan bir yüzey tabakası oluşturmaktadır. Bu özelliğinden dolayı kimyasal direncin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılabilir. PFA, hem sıvı hem de toz şeklinde bulunmaktadır. Yüksek yalıtım özelliğinden dolayı kablo ve tel kaplamalarında, yapışmayan yüzey uygulamalarında, korozyon direncinin yüksek olmasını gerektiren ekipmanlarda film veya tüp şeklinde kullanılabilir. 1970'lerde Avrupa'da yağlama gerektirmeyen boğaz keçelerinin ilk defa üretilmesi ile eş zamanlı olarak katkılı PTFE'ler yağ keçesi malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2). Bununla birlikte floropolimerlerin sızdırmazlık sektöründe kullanımı günden güne artmaktadır (Ebnesajjad, 2017).

PTFE ile PFA talaşlı imalat yöntemi ile sızdırmazlık elemanı üretiminde en çok kullanılan hammadde türlerindedir. PTFE ve PFA hammaddelerinin talaşlı imalat ile işlenmesinde ortaya çıkan atık miktarı %10-25 oranındadır. Bu atıklar hem



Şekil 2. Sızdırmazlık elemanlarına örnekler

ekonomik olarak bir kayıptır hem de çevresel açıdan sorun yaratmaktadır. Bununla birlikte PTFE talaşı atıklarının bertarafı firmalara ilave bir maliyet oluşturmaktadır. Çevresel zararı ve maddi kaybı önlemek amacıyla kullanılan hammaddelerin geri dönüşümü ile ilgili çalışmalar yapmak işletmeler için etkili bir çözüm yöntemi olarak öngörülmektedir. Bu bildiride, PTFE ve PFA floropolimerlerinin sızdırmazlık sektöründeki kullanım yerleri ve üretimde hammadde olarak kullanılmaları sonucunda oluşan atıklarının geri dönüşüm yöntemleri hakkında genel bilgilendirme yapılmaktadır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.2 Floropolimerlerin Kullanım Alanları

Floropolimerler çok çeşitli alanlarda kullanılmakla birlikte en yaygın kullanım alanları robotlar, bilgisayarlar, hava taşıtlarındaki elektrikli sistemler, kablo kılıfları ve her türlü elektronik bileşenlerdir. Yüksek elektrik yalıtkanlığına sahip oldukları için son yıllarda devre sistemlerinde de yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde en yeni savunma sistemlerinde kullanılan yüksek hızlı radar, yüksek frekanslı iletişim cihazları ve yeni nesil ultra hızlı bilgisayarların arkasında bulunan küçültülmüş devre kartlarında da bu malzemeler kullanılmaktadır. Floropolimerlerin sürtünme katsayısı çok düşük olduğundan aşınmaya neden olan ortamlarda kullanılması durumunda, aşınmaya karşı oluşan direncin azaltılabilmesi için dolgu malzemeleri eklenmesi gerekmektedir. Günümüzde yüksek performanslı otomobil, hava taşıtı yataklamaları ve contaları yaygın şekilde floropolimerlerden yapılmaktadır. Ayrıca, köprülerde taşıyıcı ayak olarak da genellikle PTFE kullanılmaktadır. Floropolimerler, bakım gerektirmeden uzunca bir süre dış mekânlarda kullanılabilirler. Floropolimerler, biyomedikal alanında kateterlerde, tanılama ve terapötik işlemler gerçekleştiren parçalarda kullanılır. Floropolimerler benzine karşı yüksek direnç gösterir ve bu özelliğinden dolayı otomotiv sektöründe üretilen parçalarda kullanılır. Tablo 1’de floropolimer türlerinin özellikleri ve kullanım alanları gösterilmiştir (Ameduri, 2018).

Tablo 1. Floropolimerlerin Kullanım Alanları (Ameduri, 2018)

Uygulama Alanı	Temel Özellikler	Kullanım Alanları	Kullanılan Floropolimer
Kimya / Petrokimya Endüstrisi	<ul style="list-style-type: none"> • Kimyasal dayanım • İyi mekanik özellikler • Termal kararlılık • Kriyojenik özellikler 	<ul style="list-style-type: none"> • Contalar, gemi gömlekleri, pompalar • Valf ve boru gömlekleri, borular • Kaplamalar • Isı eşanjörleri 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE, PFA/MFA • ETFE, ECTFE • FEP • FKM, FFKM • TFE-P
Elektrik / Elektronik Endüstrisi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük dielektrik sabiti • Yüksek yüzey direnci • Yüksek dielektrik bozulma gerilimi • Alev direnci, termal kararlılık • Düşük kırılma indeksleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Tel ve kablo izolasyonu • Konektörler, optik fiberler • Baskılı devre kartı 	<ul style="list-style-type: none"> • FEP, PTFE, PFA, MFA • ETFE, ECTFE • PCTFE • Amorf FP
Otomotiv / Havacılık Endüstrisi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük sürtünme katsayısı • İyi mekanik özellikler • Kriyojenik özellikler • Kimyasal direnç • Düşük geçirgenlik özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Contalar, o-ringler, hortumlar • Otomotiv hidrolik direksiyon • Aktarımlar ve klima • Rulmanlar, sensörler • Yakıt sistemleri 	<ul style="list-style-type: none"> • FKM, PTFE • FFKM • THV
Kaplama Uygulamaları	<ul style="list-style-type: none"> • Termal/hava kararlılığı • Düşük yüzey enerjisi • Kimyasal direnç 	<ul style="list-style-type: none"> • Tencere kaplamaları • Metal yüzey kaplamaları • Toz boyalar 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE • PVDF, ETFE • FEVE, PFA
Medikal Uygulamalar	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük yüzey enerjisi • Kararlılık, saflık • Mükemmel mekanik özellikler • Kimyasal direnç 	<ul style="list-style-type: none"> • Kardiyovasküler greftler • Kalp yamaları • Bağ replasmanı • Tıbbi ürünler için ambalaj filmleri 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE • PCTFE
Kumaş / Film Uygulamaları	<ul style="list-style-type: none"> • Hava koşullarına dayanıklılık • Alev direnci • Şeffaflık • Düşük yüzey enerjisi • Bariyer özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Binalar/çatılar için kaplamalı kumaşlar ve filmler, güneş enerjisi uygulamaları için ön/arka filmler 	<ul style="list-style-type: none"> • ETFE, PTFE, PVDF • PCTFE, PVE, THV

Polimer Katkı İlavesi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük sürtünme katsayısı • Alev direnci • Aşınma direnci • Yapışmazlık özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüzey kusurlarını önlemek ve daha hızlı üretim için poliolefin işleme • Mürekkepler, kaplamalar, yağlayıcılar, damlama önleyici maddeler için katkı maddeleri 	<ul style="list-style-type: none"> • THV, FKM • PVDF, PTFE
Polimer Katkı İlavesi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük sürtünme katsayısı • Alev direnci • Aşınma direnci • Yapışmazlık özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüzey kusurlarını önlemek ve daha hızlı üretim için poliolefin işleme • Mürekkepler, kaplamalar, yağlayıcılar, damlama önleyici maddeler için katkı maddeleri 	<ul style="list-style-type: none"> • THV, FKM • PVDF, PTFE
Yarı İletken	<ul style="list-style-type: none"> • Kimyasal direnç • Yüksek saflık • Yapışma önleyici, yalıtım, bariyer özellikleri • Termal kararlılık 	<ul style="list-style-type: none"> • Proses yüzeyleri • Levha taşıyıcıları • Borular, vanalar, pompalar ve bağlantı parçaları • Depolama tankları • Elektrotlar için bağlayıcı • Ayırıcılar • İyon seçici membranlar • Contalar, membranlar • Fotovoltaik filmler • Rüzgâr değirmeni kanatları için kaplamalar 	<ul style="list-style-type: none"> • PFA, ECTFE • PCTE, PTFE • Amorf FP
Enerji Dönüşümü / Depolama / Yenilenebilir Enerji	<ul style="list-style-type: none"> • Kimyasal/ısı direnç • İyon taşıma • Hava koşullarına dayanıklılık • Yüksek şeffaflık • Korozyon direnci 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrotlar için bağlayıcı • Ayırıcılar • İyon seçici membranlar • Contalar, membranlar • Fotovoltaik filmler • Rüzgâr değirmeni kanatları için kaplamalar 	<ul style="list-style-type: none"> • PVDF • PFSA, THV, ETFE • ECTFE, PTFE, FEP • PVF

2.2.1 Politetrafloroetilen (PTFE)

PTFE'nin mekanik özellikleri; çekme dayanımı, çekme modülü, birim şekil değiştirme, darbe dayanımı, eğilme dayanımı, eğilme modülü, süneklik, sertlik ve kalıplama kabiliyetinin incelenmesi ile belirlenir. PTFE'nin en önemli avantajları; mükemmel kimyasal direnç ve düşük sürtünme katsayısıdır. PTFE'nin yaygın kullanım yerlerinden bazıları; yalıtım bantları, contalar, pompalar, yapışmayan yüzey kaplamaları, jeneratörler, transformatörler, laboratuvar araç ve gereçleri, karmaşık otomobil parçalarıdır. Kimyasallara karşı mükemmel direnç göstermesi endüstride bazı filtrelerin yapımında kullanılmasını olanaklı kılmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıpları, yapışmayı ve kalıp aşınmasını önlemek için PTFE malzeme ile kaplanmaktadır. PTFE kaplamaların yüksek performansı, birçok endüstride kullanılmalarını sağlamaktadır. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisindeki özel uygulamalar için PTFE kaplamalar tercih edilmektedir (Akıncı ve diğ., 2003).

PTFE, tribolojik açıdan sahip olduğu benzersiz özellikleri nedeni ile en çok tercih edilen floropolimerlerden biri olup, iyi performans gerektiren uygulamalar için çok idealdir. PTFE'nin, bütün kimyasallara karşı direnci yüksektir ve diğer floropolimerler arasında bilinen en kaygan malzemedir. Düşük yüzey enerjisi nedeni ile üstün hidrofobik yapı sergiler. Yüzeyinin süperhidrofobik olması ve yüzey temas açısının çok düşük olması malzemeye mükemmel dayanıklılık ve bariyerlik özellikleri kazandırır. Aşınma genel olarak malzemenin mekanik özellikleri ile ilişkili olup, PTFE'nin aşınma özelliği, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı ile bağlantılıdır (Dhanumalayan ve Joshi, 2018). PTFE, diğer polimerlerden daha düşük sürtünme özelliğine sahip olmasına rağmen, yapısına dolgu maddesi ilavesi ile iyileştirilerek iyi sürtünme direnci gerektiren ortamlarda kullanıma uygun hale getirilebilmektedir. Kendinden yağlamalı yataklamalarda PTFE malzemesi mükemmel kayma performansı sergilemektedir. PTFE bileşiminde, flor atomlarının birbirine çok yakın bir şekilde bağlanmış olmasından dolayı malzemede pürüzsüz ve silindirik bir yüzey oluşmaktadır (Şekil 3) (Dhanumalayan ve Joshi, 2018).



Şekil 3. PTFE hammaddesi ve malzemeden elde edilen ürünlere örnekler

PTFE sünek bir malzeme olup, diğer polimerler ile karşılaştırıldığında sünekliği diğerlerinden daha düşük kalmaktadır. Bu nedenle PTFE'ye çeşitli katkı maddeleri eklenerek mekanik cihaz parçalarının yapımında kullanılabilir hale getiril-

mektedir. PTFE'nin kendine özgü en iyi özelliği yüksek kimyasal dirence sahip olmasıdır. PTFE, birbirine güçlü bir şekilde bağlı karbon-flor atomlarına sahip olması nedeniyle reaktif değildir ve hidroflik, hidroklorik ve klorosülfonik asitler gibi yaygın reaktiflerde çözünmez. Yüksek moleküler ağırlık, PTFE'nin kimyasal açıdan inert davranış sergilemesini sağlamaktadır. PTFE florokarbon ve diğer moleküller arasındaki etkileşim kuvvetlerinin çok daha az olmasından dolayı hidrokarbonlar, klorlu hidrokarbonlar, ester ve fenol gibi organik çözücülerde çözünmez (Dhanumalayan ve Joshi, 2018). PTFE'nin termal iletkenlik performansı geniş sıcaklık aralığında diğer polimerlerden çok daha iyidir. Termal kararlılık, yaklaşık 320°C'lik yüksek bir erime noktası gösteren karbon-flor atomlarının lineer yüksek kristal yapıda bulunmasından kaynaklanmaktadır. PTFE molekülündeki F atomu simetriktir, molekülün tamamı nötr olup mükemmel dielektrik özelliklere ve elektriksel yalıtıma sahiptir (Dhanumalayan ve Joshi, 2018).

2.2.2 Perfloroalkoksi (PFA)

PFA, perfloroalkoksinin kısaltması olup, PTFE'nin özellikleri ile benzerlik gösteren bir floropolimerdir (Şekil 4). PFA'nın fiziksel ve mekanik özellikleri, bazı durumlarda farklılık gösterse de genel olarak PTFE'ninkilere benzerdir. PFA'nın en avantajlı özellikleri düşük sürtünme katsayısı ve yüksek kimyasal dirence sahip olmasıdır. Düşük sürtünme katsayısına sahip olması nedeniyle olağanüstü yapışmazlık özelliğine sahiptir. PFA, esnek bir polimer olmasının yanı sıra hemen hemen tüm solventlere ve kimyasallara karşı dirençlidir. Olağanüstü alev direnci, kimyasal kararlılık ve yüksek dielektrik mukavemeti sunar. Yüzey kalitesi ve esneme ömrü, PTFE'ninkinden daha iyidir (Ebnesajjad, 2017). Bununla birlikte, PFA'nın aşınma direnci PTFE'den daha düşüktür. Hem yüksek hem de düşük sıcaklık uygulamaları için uygun olan PFA, (-268)°C ile (+260)°C sıcaklık aralığında kullanılabilir. Bu sıcaklık aralığı, PTFE'nin çalışma sıcaklığı aralığına çok benzemektedir, ancak PFA 305°C'de erir. İçeriğindeki alkoksi polimerinin eriyik halinde işlenebilmesinden dolayı PFA'nın eritilerek işlenebilir olma avantajı vardır. PFA floropolimeri, diğer polimer malzemeler gibi, çekme ve basma gerilmelerine maruz kaldığında deformasyona uğrar. Bu deformasyon, polimerin akma noktasının çok altında meydana gelir ve bu durum özellikle floropolimerler için önemlidir. PFA floropolimerinin sertliği 55-57 durometredir. Sıvı nitrojen ortamında yapılan testler, PFA'nın kriyojenik uygulamalarda çok iyi performans sergilediğini göstermektedir (Ebnesajjad, 2015). Tablo 2'de PFA floropolimerinin kriyojenik özellikleri belirtilmiştir (DuPont, 2021).

Tablo 2. PFA Floropolimerinin Kriyojenik Özellikleri (DuPont, 2021)

Özellikler	ASTM Standardı	Birim	Oda Sıcaklığı (23°C)	Kriyojenik Sıcaklık (-196°C)
Akma Dayanımı	D1708 ^a	MPa	15	Akma yok
Maksimum Çekme Dayanımı	D1780 ^a	MPa	18	129
Uzama	D1708 ^a	%	260	8
Eğilme Modülü	D790-71 ^b	MPa	558	5790
Çentik Darbe Dayanımı	D256-72a ^c	J / m	Kırılma yok	64
Basma Dayanımı	D695	MPa	24	414
Basma Gerinimi	D695	%	20	35
Elastik Modülü	D695	MPa	69	4690

a Çapraz hız B, 1.3 mm/dk; daha doğru bir kıyaslama için iki sıcaklık değerinde de kullanılmıştır.

b Metot 1, Prosedür B

c Metot A, Kafa Ağırlığı 4,5 kg (23°C), 9 kg (-196°C)

Sıcakta eriyen ince film yapıştırıcılar olarak kullanılan PFA floropolimer reçineleri; suya son derece dayanıklı, termal olarak dirençli ve güçlü bağlar içermektedir. Kullanım uygulamalarına ekstrüde edilmiş tel kaplamalar, ısıtıcı kabloları, kalın cidarlı borular ve kablo kılıfları örnek olarak verilebilir. PFA floropolimer reçineler, kimyasal maddeler tarafından bozulmaz. Güçlü mineral asitlere, inorganik bazlara, inorganik oksitleyici ajanlara ve tuz çözeltilerine karşı inerttir. Organik asitler, anhidritler, aromatikler, alifatik hidrokarbonlar, alkoller, aldehitler, ketonlar, eterler, esterler, kloroflorokarbonlar, florokarbonlar ve yukarıdaki bileşiklerin karışımları gibi organik bileşiklere karşı da etkisizdir (Ebnesajjad, 2015).

PFA'nın yanma direnci mükemmeldir ve Sınırlayıcı Oksijen İndeksi (LOI) değeri 95'ten büyüktür, bu da ortamda serbest yanmayı desteklemek için %95'in üzerinde oksijen bulunması gerektiği anlamına gelmektedir. PFA yandığında, yanma ısısı son derece düşüktür, salınan duman miktarı minimumdur ve bozunma gazları çok düşük aşındırıcılığa sahiptir. PFA, PTFE ile aynı dielektrik katsayısı ve dağılım faktörüne sahip olmasına rağmen, PTFE'den 4 kat daha yüksek dielektrik yalıtım direnci göstermesi ile etkileyici bir elektriksel özellik sergilemektedir. Bu nedenle binaların elektrik tesisatındaki kablolarda kullanılarak yangınların neden olacağı hasar en aza indirilir. PFA, gıda ile temasa da uyumludur ve ilaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PFA, güneş ışığına, ozona ve genel

hava koşullarına karşı iyi bir aşınma direncine sahiptir. PFA, tüm polimerlerin içerisinde hem UV hem de görünür dalga boylarındaki en düşük kırılma indekslerinden birine sahiptir ve iyi ışık geçirgenliği ile yüksek şeffaflık gösterir. PTFE ile PFA floropolimerlerinin karşılaştırılması Tablo 3'te gösterilmiştir (Leivo, Wilenius, Kinon, Vuoristo ve Mantyla, 2003).



Şekil 4. PFA hammaddesi ve malzemeden elde edilen ürünlere örnekler

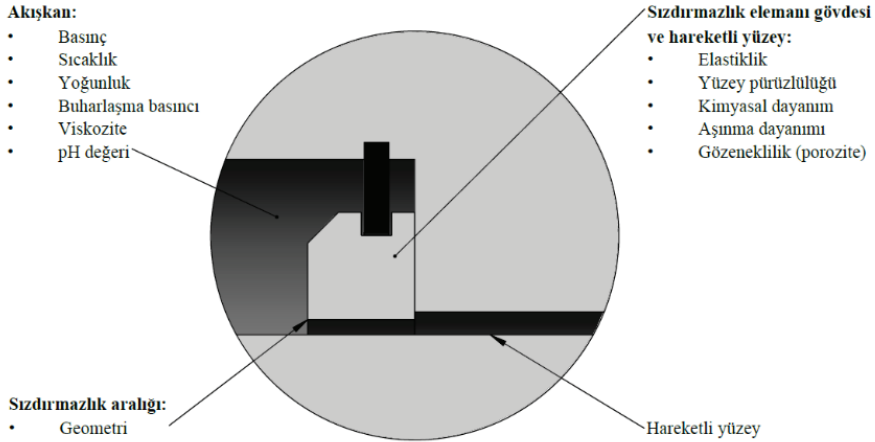
Tablo 3. PTFE ile PFA Floropolimerlerinin Karşılaştırılması (Leivo ve diğ., 2003)

	FLOROPOLİMERLER	PFA	PTFE
Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,12 - 2,17	2,15
	Su Emilimine Dayanım (%)	≤ 0,030 (Süre: 86400 saniye)	≤ 0,010
	Sertlik, Shore D	55 - 60	≥ 54
	Çekme Dayanımı (Mpa)	24,99 - 27,6	37,9
Mekanik Özellikler	Kopma Noktasındaki Uzunlaşma (%)	300%	≥ 200%
	Elastik Modülü (Gpa)	0,621	0,496
	Basma Dayanımı (Mpa)	24,1	7,00
	Çentik - Darbe Dayanımı (J/cm)	≤ NB	1,89
	Sürtünme Katsayısı	0,21	0,060 - 0,080
	Hacim Özdirenci (ohm. cm)	1E+18	1E+18
	Birim Yüzey Direnci (ohm)	1E+17	≥ 1E+18
Elektriksel Özellikler	Dielektrik Sabiti	2,03 - 2,1 (Sıklık: 6E+7 Hz)	2,1 (Sıklık: 1E+6 Hz)
	Dielektrik Dayanım (kV/mm)	78,7 (Kalınlık: 10 mm)	18
	Dağılma Faktörü	0,0001 (Sıklık: 6E+7 Hz)	≤ 0,00010 (Sıklık: 1E+6 Hz)
	Ark Dayanımı (saniye)	≥ 180	≥ 300

T e r m a l Özellikler	Isıl Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m}/\text{mC}^\circ$)	140 (Sıcaklık: 21 - 100 C°)	124 (Sıcaklık: 25 - 100 C°)
	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,19	0,25
	Erime Noktası (C°)	305	327
	Maksimum Çalışma Sıcaklığı, Hava (C°)	260	260
	Minimum Çalışma Sıcaklığı, Hava (C°)	-196	-268
	Alevlenebilirlik, UL94	V0	V0

3. PTFE ve PFA'nın Sızdırmazlık Sektöründe Kullanımı

Endüstriyel uygulamalarda sistemde mevcut basınçlı akışkanın veya yağlayıcı akışkanın çalışma sırasında sistemden istenmeyen bir şekilde sızmasının önlenmesi gerekmektedir. Bu görevi yerine getirecek şekilde geliştirilmiş elemanlara sızdırmazlık elemanları denir. Sızdırmazlık elemanları, hidrolik ve pnömatik silindirlerin ve sistemlerin tasarımı, işlevi ve hizmet ömrü üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Sızdırmazlık elemanlarının performansını etkileyen faktörler Şekil 5'te gösterilmiştir.

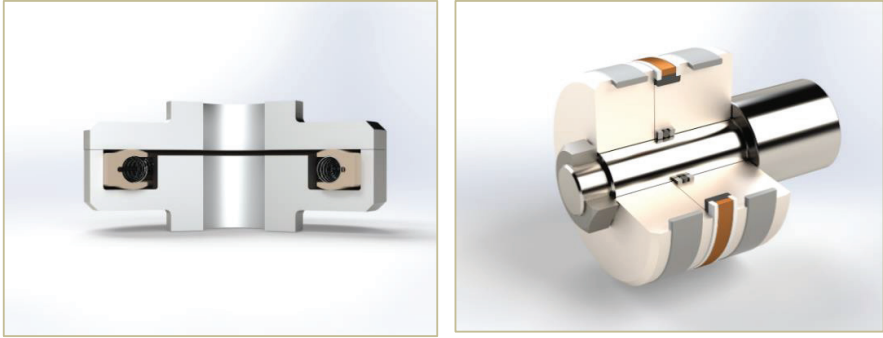


Şekil 5. Sızdırmazlık performansını etkileyen faktörler

Floropolimerler, üstün mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle özellikle sızdırmazlık uygulamalarında aktif olarak kullanılmaktadır (Şekil 6).

PTFE ve PFA floropolimerleri, geniş aralıktaki çalışma sıcaklığı, yüksek kimyasal dayanım, hidrofobiklik, yüksek aşınma dayanımı gibi üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle sızdırmazlık elemanının performansını etkileyen faktörleri elimine edebilmektedir. Böylece kullanılan ekipmanın ve sızdırmazlığın faydalı ömrünü uzatmakta, bakım-onarım maliyetini düşürmektedir. Bu nedenle piston keçesi, boğaz keçesi, toz keçesi ve yataklama elemanı malzemesi olarak en çok tercih edilen floropolimerlerdir.

Bir işlem sırasında yağlama, sistemin sürtünmeden dolayı oluşan ısıdan etkilenmesini engeller ve hasarları önler. Geleneksel sızdırmazlık sistemleri yağlama amacıyla yağ veya gres gerektirir. PTFE ve PFA, düşük yüzey enerjisi özelliklerinden dolayı kendinden yağlamalı sızdırmazlık elemanları olarak kullanıldığından harici yağlama gerektirmezler. Bu nedenle, bu iki floropolimer türü, sızdırmazlık sektöründeki yağlama gerektiren uygulamalarda kullanılmaya oldukça elverişlidir. Esneklikleri, kimyasal inertlikleri ve optik saydamlıklarından dolayı bu floropolimerler, kritik ve yoğun aşındırıcı prosesler içeren borulama işlerinin sızdırmazlığında oldukça tercih edilmektedir. Bir diğer yaygın kullanım alanları da kimyasal ekipmanların astarlanmasıdır. PTFE / PFA astar malzemesi, kimyasal ekipmanı korozyona karşı korumaktadır. PTFE / PFA kaplı sütunlar, tanklar, reaktörler ve borular aşırı konsantre asitlerin olduğu ortamlara dayanabilmektedir. Bu floropolimerlerin sızdırmazlık sektöründeki diğer uygulama alanları; filtrasyon gövdeleri, ısı eşanjörleri, pompa gövdeleri ve bağlantı parçaları olarak sıralanabilir.



Şekil 6. Sızdırmazlık elemanlarının montaj hali

4. Floropolimerlerin Geri Dönüşüm Yöntemleri

Dünyada her yıl 2.1 milyar ton atık ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar, potansiyel olarak 4.5 milyar varil petrol eşdeğeri enerji içermekte olup, söz konusu enerji miktarı dünya elektrik tüketiminin %10'unu karşılayabilecek seviyelerdedir (Ye-

şiltay, 2018). Türkiye'de 2010 yılına kadar % 35 olan geri dönüşüm oranı, 2012 ve sonrasında % 40 oranına yükselmiştir. Geri dönüştürülen atıkların % 43'ünü kâğıt, % 27'sini plastik, % 12'sini cam, % 8'ini tekstil ürünleri, % 4'ünü de metal grubu oluşturmaktadır. Türkiye'de tüm atık gruplarının geri dönüşüm oranı ortalama % 7 seviyesinde iken, ambalaj grubunun geri dönüşüm oranı % 20'lerde ve ilk sırada yer almaktadır (Yeşiltay, 2018).

Çevre kirliliği açısından büyük bir tehdit oluşturan plastik atıkların önlenmesi ve azaltılması, dünya gündeminde önemli bir yer tutmaktadır. Plastik atıkların önlenmesi ve azaltılması için önemli adımlar atan Türkiye, bu konudaki hedefleri açısından AB ülkelerinin önünde yer almaktadır. Türkiye'de, hali hazırda % 54 olan plastik atığı geri dönüşüm hedefi, 2020 sonrası için % 55 olarak belirlenmiş durumdadır. AB ülkelerinde yürürlükteki hedef % 22,5 ve % 55 hedefi ancak 2025'de, Türkiye'den 5 yıl sonra geçerli olacaktır. Türkiye, bu konuda Avrupa'nın en az 5 yıl gerisinde kaldığından kısa sürede yüksek hedefleri tutturmak için atık dönüşümü konusundaki çalışmalarını hızlandırmalıdır (İmer, 2022). AB'de plastik atıklara karşı alınan yasal önlemler ile ilgili olarak malzeme esasına dayalı yaşam döngü yaklaşımı uygulanmaktadır. Uygulanan strateji gereği AB düzeyinde ölçülebilir hedefler konulmuştur. Bu hedeflerden birisi, 2030 yılına kadar AB piyasasına sürülen tüm plastik atıkların tekrar kullanılabilir ya da geri dönüştürülebilir olmasıdır. AB ülkelerinde geri dönüşüm hedeflerini sağlayabilmek için üretimde belirli oranlarda geri dönüştürülmüş plastik malzeme kullanım zorunluluğu getirilmiştir. Bu oranlar üretim bazlı ve kullanılacak polimer bazlı olarak değişkenlik göstermektedir (İmer, 2022).

Ülkemizde kullanılan floropolimerlerin büyük bir kısmı yurtdışından sağlanmaktadır ve oldukça maliyetlidir. Floropolimer malzeme kullanılarak üretim yapılan işletmelerde, açığa çıkan atık geri dönüşüm yoluyla üretime geri kazandırıldığında ekonomik açıdan fayda sağlanacaktır. Floropolimerler, doğru koşullar altında



Şekil 7. Floropolimerlerin talaşlı imalat yöntemi ile işlenmesi ve açığa çıkan talaş atıkları

geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilir. Ön şekillendirme, kalıplama, işleme, tornalama ve kesme gibi proseslerden sonra işletmelerde floropolimer atığı oluşmaktadır. Bu prosesler sonucunda oluşan atık miktarı kullanılan floropolimer malzeme miktarının %10 - %25'i oranında değişiklik göstermektedir (Şekil 7). Floropolimer üretim atıkları, spesifikasyonları karşılamayan malzemeler olup, amacına uygun olarak kullanılamazlar. Floropolimer malzemenin yüksek katma değerli olmasından dolayı, atığının geri dönüştürülmesi işletmelere ekonomik olarak katkı sağlayan bir süreçtir.

Genel olarak floropolimer atıklarından ürün elde edilmesi üç kademe gerçekleştirilmektedir. Bunlar; polimer atıkların kesme/kırma ile istenen boyutlara küçültülmesi, yıkama - kurutma ve daha sonra uygun proses ile istenilen geri dönüşüm ürününün üretilmesidir. Geri dönüştürülmüş floropolimer atıkları ince toz haline getirilerek mürekkep ve boya gibi ürünlerin içerisinde kullanılabilir. Geri dönüştürülemeyen floropolimerler ise tercihen enerji geri kazanımı amacıyla lisanslı yakma tesislerinde yakılmaktadır. Bu atıkların lisanslı deponi alanlarında bertaraf edilmesi de mümkündür.

Floropolimerlerin özelliklerine göre uygulanabilecek geri dönüşüm metodu da değişmektedir. PTFE ve PFA atıklarının geri dönüşüm prosesi için uygun yöntem belirlenirken iki floropolimerin özellikleri dikkate alınmalıdır. Örneğin PFA, içeriğinde alkoksi olması nedeniyle ekstrüzyon prosesi ile eriyik halinde işlenebilmektedir. PTFE ise, viskozite özellikleri nedeniyle ekstrüzyon prosesi ile üretilmemektedir ve eriyik halde işlenmemektedir. Bu nedenle PTFE'nin işlenmesi için araştırılacak alternatif üretim yöntemleri olarak soğuk ekstrüzyon, basınçlı kalıplama ve izostatik kalıplama yöntemleri değerlendirilebilir. Ekstrüzyon prosesinde polimer malzeme, içerisinde ısıtıcı ve basınçlı vida bulunan ekstrüderde eritilip vida yardımıyla ekstrüder çıkışında bulunan formlu kalıp içerisinden geçirilerek şekillendirilir. Bir sonraki aşamada malzemeye soğutma işlemi uygulanır ve malzeme son şeklini alır. Soğutma işleminde ekstrüde edilen polimer, soğutma havuzu içerisinden geçirilerek soğutulur. Sonraki aşamada polimer kesilerek nihai ürün elde edilir (Kaya, 2018). Isıyla sertleşen diğer floropolimerlerin aksine, PTFE ürünleri yüksek sıcaklıklarda ısıtıldığında erimez, sadece 320°C'nin üzerinde yumuşar. Bu nedenle, PTFE'nin geri dönüştürülmesi için ekstrüzyon proselinin kullanılması uygun olmamaktadır (Leivo, 2015).

Basınçlı kalıplama prosesinde ise granül/toz halindeki floropolimer malzeme, önceden ısıtılmış kalıplara konular ve basınç uygulanır (Şekil 8). Daha sonra kalıtlaşması için belirli bir süre bekletilerek kalıptan çıkartılıp soğumaya bırakılır. Basınçlı kalıplama prosesinde sıcaklık 120°C ile 260°C arasındadır. Bu sıcaklık aralığı hem PFA hem de PTFE'nin maksimum servis sıcaklığını aşmamaktadır. Proses herhangi bir eritme işlemi gerektirmemesi nedeni ile her iki floropolimer türünden elde edilen toz malzemenin işlenmesi için kullanılabilir olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 8. Floropolimerlerin basınçlı kalıplama yöntemi ile üretilmesi

Diğer bir yöntem olan izostatik presleme, maksimum yoğunluk ve mikro yapı homojenliği sağlayan bir toz kompaktı üzerine her yöne eşit basınç uygulayan bir toz metalurjisi oluşturma işlemidir. İzostatik presleme işlemi soğuk veya sıcak olarak uygulanabilir. Soğuk izostatik presleme (CIP), toz haldeki floropolimer malzemeleri ortam sıcaklıklarında sıkıştırmak için kullanılırken, sıcak izostatik presleme (HIP), yüksek sıcaklıklarda malzemeleri tam olarak birleştirmek için kullanılır. Sıcak izostatik presleme, sinterlenmiş bir toz malzemede oluşan gözenekliliği ortadan kaldırmak için de kullanılabilir. Soğuk izostatik presleme yöntemi, presleme için kullanılacak kalıpların maliyetinin çok yüksek olması, kalıp boyutlarının çok büyük olması veya kompakt karışımların kullanılması gerektiği durumlarda kullanılmaktadır. Sıcak izostatik preslemede ise metallerde, seramiklerde, polimerlerde ve kompozit malzemelerde gözenekliliği ortadan kaldırmak ve yoğunluğu artırmak için yüksek sıcaklık ve izostatik gaz basıncını kullanan bir üretim sürecidir. Bu, malzemenin mekanik özelliklerini ve potansiyel olarak işlenebilirliğini geliştirir. Sıcak izostatik presleme aynı zamanda sinterleme işleminin bir parçası olarak, basınç destekli sert lehimleme ve metal matrisli kompozitlerin imalatı için de kullanılabilir.

5. Genel Değerlendirmeler

Türkiye’de geri dönüşüm çalışmaları, 1991 yılından beri uygulanmakta olan Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği kapsamında yürütülmektedir. Bu çalışmalar, 20 yılı aşkın süredir artarak devam etmektedir. Dünya genelinde “kullan-at” düşüncesi zamanla “kullan-geri dönüştür-yeniden kullan” olarak değişmiştir. Geri dönüşüm çalışmaları ile “kullan-at” alışkanlığının en çok uygulandığı malzeme olan polimerler için durum gelişme kaydetmektedir. Doğada binlerce yıl yok olmadan kalabilen polimerlerin geri dönüştürülüp tekrar kullanılabilmesi doğal kaynaklarımızın korunmasını sağlayacaktır.

Türkiye’de geri dönüşüm oranı, tüm atık malzemeler için % 22,4’tür. Bu oran Türkiye’de yapılan geri dönüşüm projeleri ile artmaya devam etmektedir. Ülkemizde 2017 yılında başlatılan Sıfır Atık Projesi kapsamında, işletmelerde oluşan atıkların geri kazanımı ve üretilen yeni ürünlerde ham madde olarak yeniden kullanımı ile enerji ve hammadde ihtiyacı açısından tasarruf sağlanmaktadır. Doğal kaynakların tükenme ihtimali göz önünde bulundurularak verimli kullanılmalarına ve atıkların geri dönüştürülmelerine özen gösterilmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak ülkemizde gelişen sıfır atık çalışmalarının önemi gittikçe artmaktadır.

Floropolimerler, üstün mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Floropolimerler arasında PTFE ve PFA; yüksek kimyasal dayanım, hidrofobiklik, geniş çalışma sıcaklığı aralığı, yüksek aşınma dayanımı gibi benzer üstün kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olduklarından dolayı oldukça tercih edilmektedir. Bu nedenle otomotiv, havacılık, elektrik- elektronik, medikal, enerji dönüşümü gibi birçok farklı sektörde uygulama alanına sahiptir. Üstün yağlama özellikleri, yüksek aşınma dayanımları ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilmelerinden dolayı özellikle sızdırmazlık teknolojilerinde yaygın kullanım potansiyelleri vardır. İşletmelerde PTFE ve PFA malzemeler kullanıldıktan sonra ortaya çıkan floropolimer atıkları uygun geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilir. Bu sayede floropolimer malzeme tedarikinde yurtdışı bağımlılığı azaltılmış ve atıkların sürdürülebilirliği sağlanarak sıfır atık oluşmuş olacaktır.

Kaynakça

- Akinci, A., Akbulut, H. ve Yılmaz, F. (2003). Floropolimer (PTFE) Kaplamaların Yapı ve Özellikleri, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, 17, 53 – 64. Erişim adresi: https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi133/d133_5359.pdf
- Ameduri, B. (2018). Fluoropolymers: The Right Material for the Right Applications, *Chemistry–A European Journal*, 24(71), 18830 - 18841. <https://doi.org/10.1002/chem.201802708>
- Dhanumalayan, E. ve Joshi, G.M. (2018). Performance Properties and Applications of Polytetrafluoroethylene (PTFE) - A Review, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247 - 268. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- DuPont. (2021). Teflon PFA Properties Handbook. Erişim adresi: https://www.extremecoatingsolutions.com/wp-content/uploads/2021/06/Teflon_PFA_Handbook.pdf
- Ebnesajjad, S. (2017). Applied Plastics engineering handbook: Introduction to

fluoropolymers. UK: *Elsevier*. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00003-1>

Ebnesajjad, S. (2015). Fluoropolymers: Properties and structure. ABD: *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3199-2.00004-5>

İmer, M. (2022). Türkiye Plastik Ambalaj Geri Dönüşüm Hedefi Konusunda Avrupa'dan En Az 5 Yıl İleride. Erişim adresi: <https://www.plastik-ambalaj.com/tr/plastik-ambalaj-urunler/2786-tuerkiye-plastik-ambalaj-geri-doenuesuem-hedefi-konusunda-avrupa-dan-en-az-5-y-l-ileride>

Kaya, Ö. (2018). *Polimer malzemelerin ekstrüzyon prosesinin modellenmesi ve analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa. <http://hdl.handle.net/11452/2648>

Lakshmanan, A. (2015). *Sintering techniques of materials*, India: InTech DTP Team <https://doi.org/10.5772/58496>

Leivo, E., Wilenius, T., Kinoshita, T., Vuoristo, P. ve Mantyla, T. (2003). Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF, ECTFE, PFA and FEP coatings, *Progress in Organic Coatings*, 49, 69-73. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.08.011>

Yeşiltay, M. (2018). Geri Dönüşüm Sektörünün Dünya'daki Genel Görünümü ve Türkiye'deki Durumu. Erişim adresi: <https://www.yesiltaylar.com.tr/tr/blog/geri-donusum-sektorunun-dunyadaki-genel-gorunumu-ve-turkiyedeki-durumu>