



Plastik Atıkların Granül ve Elyaf Olarak Geri Dönüşümü

Öznur İskender^{1*}, Sena Arslan Atmaca²

¹ Formfleks Otomotiv A.Ş., Bursa, Türkiye

² Formfleks Otomotiv A.Ş., Bursa, Türkiye

E-Posta: oznur.iskender@ff-rd.com, sena.arslan@ff-rd.com

Gönderim 03.06.2024; Kabul 24.06.2024

Özet: 21. yüzyıl itibariyle, insanlık tarihinin en yüksek plastik tüketim seviyesine ulaşmıştır. Kullandığımız plastik ürünler biyolojik olarak parçalanabilir ürünler değildir, dolayısıyla doğada çözünemezler. Bu nedenle plastik atıklar küresel plastik kirliliğine neden olmaktadır. Son yıllarda plastik kirliliği büyük ölçüde gündeme gelmiştir. Bu nedenle bilim çevreleri plastik kirliliği ve atık yönetimi konularına daha fazla ilgi göstermektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ve araştırmalar, atık yönetiminin günlük hayatta etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Plastik tüketiminin en fazla gerçekleştiği yerlerden biri olan ofis ortamlarında etkin bir plastik atık yönetimi uygulanabilir. Bu çalışmada, plastik atıkların seri üretim sistemlerinde işlenmek üzere granül ve elyaf olarak geri dönüşümü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Plastik geri dönüşümü için öncelikle yatırım gereklilikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, NPV (Net Bugünkü Değer) ve Maksimum Pişmanlık Değeri yöntemlerinin entegre kullanımıyla gerçekleştirilen bir karar verme metoduyla en uygun yatırım seçilmiş ve gerçekleştirilmiştir. Ardından, granül ve lif elde etme işlemi uygulanmıştır. Bu çalışma, plastik geri dönüşümünün çevreye ve ekonomiye nasıl yardımcı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Plastik geri dönüşümü, yeşil teknoloji, plastik elyaf, plastik granül, plastik atık.

Recycling of Plastic Waste as Granules and Fiber

Received 03.06.2024; Accepted 24.06.2024

Abstract: In the 21st century, humanity has reached the highest level of plastic consumption in history. These plastic products are not biodegradable and therefore do not decompose in nature, causing global plastic pollution. Recently, plastic pollution has garnered significant attention, leading the scientific community to focus on plastic pollution and waste management. Studies have shown that effective waste management can be implemented in daily life with appropriate actions. One of the major consumers of plastic is the office environment, where efficient plastic waste management can be realized. This study successfully demonstrates the recycling of plastic waste into granules and fiber for use in mass production systems. The necessary investments for plastic recycling were determined, and the optimal investment was selected using the Net Present Value (NPV) and maximum regret value methods. Subsequently, the processes for obtaining granules and fibers were carried out. This study highlights the environmental and economic benefits of recycling plastic.

Key Words: Plastic recycling, green technology, plastic fibre, plastic granules, plastic waste.

GİRİŞ

Monomerler karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen ve diğer organik veya inorganik elementler gibi petrokimyasalların oluşturduğu basit yapılardır. Plastik, monomerlerin bağlarının kırılması ve polimer adı verilen uzun zincirli yapılara dönüştürülmesi ile sentezlenen malzemeleri ifade eder [1]. İlk plastik polimerin 20. yüzyılın başlarında icat edilmesinden bu yana, plastik polimerlerin gelişimi ve çeşitliliği sürekli olarak artmıştır [2]. Günümüzde plastikler, başta ambalaj sektörü olmak üzere beyaz eşya, otomotiv, yapı, elektronik ve medikal gibi çeşitli endüstrilerde önemli bir rol oynamaktadır. Buna bağlı olarak da sektörün gerekliliklerine uygun farklı özelliklerde plastikler kullanılmaktadır. Kullanım oranına göre en yaygın plastikler, PP (polipropilen) %19, LD&LLD-PE (düşük yoğunluklu ve doğrusal düşük yoğunluklu polietilen) %17, PVC (polivinil klorür) %13, HD-PE (yüksek yoğunluklu polietilen) %12, PETE (polietilen tereftalat) %7, PS & EPS (polistiren ve genişmiş polistiren) %7, PUR (poliüretan) %6 ve PC (polikarbonat) ve PMMA (polimetil metakrilat) gibi diğer plastikler %19 şeklindedir [3].

Plastik ürünlerin yaygın kullanımına paralel olarak küresel plastik kirliliği de gün geçtikçe önemli düzeyde artırmaya başlamıştır. Plastik kirliliği, plastik ürünlerin çeşitli boyutlarda (mikro, mezo veya makro) birikmesini içermekte ve tüm ekosistem taksonlarını olumsuz etkilemektedir [4-5]. Küresel bir

*İlgili E-posta / Corresponding E-mail: oznur.iskender@ff-rd.com (ORCID: 0009-0007-0858-6201)

perspektiften bakıldığında, plastik kirliliğinin birçok etkisi olduğu açıkça söylenebilmektedir. Atık plastiklerin geri dönüştürülmesine yönelik stratejilerin ve eylemlerin etkin bir şekilde entegre edilmesi bu olumsuz etkileri azaltabileceği ön görülmektedir.

Plastiklerin geri dönüşümü hem kimyasal hem de fiziksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm, monomerlere tam depolimerizasyon veya oligomerlere kısmi depolimerizasyon için hidroliz, metanoliz, aminoliz ve glikoliz gibi işlemleri içermektedir [6-13]. Bununla birlikte, piroliz, hidrojenasyon ve gazlaştırma gibi yüksek sıcaklık ve yüksek basınca dayanan bazı kimyasal geri dönüş teknikleri de kullanılmaktadır [14]. Öte yandan, fiziksel geri dönüşüm, literatürde ve endüstride en yaygın kullanılan geri dönüşüm yöntemidir. Fiziksel geri dönüşümün gerçekleştirilmesi için toplama, ön işlem ve yeniden ekstrüzyon adımlarını içeren belirli bir yol vardır [15]. Bu adımlar, geri dönüşüm hedeflerine göre uyarlanabilmektedir.

Plastik atıkların toplanması fiziksel geri dönüşüm sürecinin ilk adımıdır. Bir sonraki adım olan ön işlem, kendi içinde ayıklama, sınıflandırma, iklimlendirme, temizleme, peletleme vb. gibi çeşitli alt adımlara sahip olabilmektedir. Bu alt adımlar, ihtiyaçlara ve ana hedefe bağlı olarak artırılabilir ve geliştirilebilir [2]. Son işlem adımı ise plastik aglomerlerin ekstrüzyonunu içeren yeniden ekstrüzyondur. Bahse konu yeniden ekstrüzyon, granüller, elyaflar, keçeler, dokumasız kumaşlar vb. gibi farklı nihai ürünleri yeniden üretmek için çeşitli işleme prosedürlerinde gerçekleştirilebilmektedir.

Ofis ortamında plastik şişeler, kaplama filmleri, tek kullanımlık içecek kapları, pipetler, çatal bıçak takımları vb. gibi çok sayıda plastik atık bulunmaktadır. Dolayısıyla plastik atık miktarına paralel olarak geri dönüşüm ve geri kazanım potansiyeli de ortaya çıkmaktadır. Sürdürülebilirlik ve yeşil teknoloji adına plastiğin geri dönüşümü için ofis ortamında alınacak birtakım aksiyonlar bulunmaktadır ancak, her şirketin kendi işleyiş mekanizmaları olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle her şirket kendine özgü sürdürülebilirlik eylemleri geliştirmeli ve kullanım dışı kalan geri dönüştürülebilir atık malzemeleri çeşitli geri dönüşüm yöntemleri ile ham madde olarak tekrar imalat süreçlerine kazandırılmalıdır.

Bu çalışmada, verimli plastik geri dönüşümü için yeni bir bakış açısı ortaya koymak üzere, ofis ortamındaki kullanım dışı kalan plastik ürünlerin verimli bir şekilde geri dönüştürülerek kullanıma hazır hale getirilmesini amaçlayan, ideal geri dönüşüm sistemi ve işleyişini içeren teorik yöntem ile deneysel yöntemi bir arada kullanan bir süreç ele alınmıştır. İdeal geri dönüşüm sistemi “ofisten toplanan plastik atıkları düşük enerji tüketimi ile seri üretim malzemesine dönüştüren bir sistem” olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla sistemin ana yapısı literatürde benzer şekilde toplama, ön işlem ve yeniden ekstrüzyon olarak belirlenmiştir [15]. İdeal geri dönüşüm sisteminin alt adımları ise ıskartaların toplanması, türlerine göre ayrıştırılması, kirliliklerden arındırmak için yıkama, kurutma, parçalama ve aglomerasyon, yeniden ekstrüzyon olarak belirlenmiştir [2, 14]. Bu adımlar ile ofiste oluşturulacak geri dönüşüm sistemi tasarlanmıştır. Ancak sistem, yeniden üretilen malzemelerin nakliyesi ve bunların seri üretimde kullanılması ile üretim-besleme ile sürdürülecektir. Yeşil teknoloji ve maliyet analizi perspektifinde sistemden beklenen teorik katkılar öngörülmüştür. Tahmin hesaplamaları için net bugünkü değer (NPV) ve maksimum pişmanlık değeri yaklaşımı kullanılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Plastik atıkların toplanması ve sınıflandırılması

Başlangıçta, plastik kirliliği ve ofisin geri dönüşüm potansiyeli hakkında insanları bilgilendiren çeşitli talimatlar, özellikle de Ar-Ge üyelerinin bir arada bulunabileceği ve en çok plastik malzemeleri kullanabilecekleri toplantı odaları, salon, teras, oturma odası vb. gibi yerlere asılmıştır. Ar-Ge üyelerinin plastik atıklar konusunda daha bilinçli hale geldiği gözlemlenmiştir. Daha sonra plastik kirliliği ve plastik geri dönüşümü hakkında bir dizi farkındalık sınıfı düzenlenmiştir. Bu faaliyetlerin temel amacı, tüm Ar-Ge üyelerinin geri dönüşüm sürecine katılmasını sağlamaktır. Böylece, plastik atıkların toplanması tüm üyeler tarafından gerçekleştirilmiş ve elde edilen atık kütlesi artmıştır.

Çalışmanın ikinci aşaması olan ön arıtma süreci, plastik atıkların türlerine göre ayrıştırılması, kirliliklerden arındırmak için yıkanması ve kurutulmasını içermektedir. Plastik atıkların ayrıştırılması geri dönüşüm sisteminde kritik bir etkiye sahiptir. Çünkü her plastik türünün kendine özgü yeniden işleme koşulları bulunmaktadır. Örneğin, polietilen tereftalatın 70 °C'de kurutulması uygunken, düşük yoğunluklu polietilenin kurutma işlemi en fazla 50 °C ile sınırlandırılmalıdır. Ayrıca, polietilen tereftalat elyaf ekstrüzyona uygunken selofan granülasyon için uygundur. Bu nedenle, öncelikli olarak atıkların

türlerine göre ayrıştırılması yapılmıştır. Ayrıştırılan plastik atıkların tamamı %96 saflıkta izopropanol ile yıkanarak kurutma fırınlarına yerleştirilmiştir. İzopropanol ile yıkama işlemi antimikrobiyal ve antiviral olarak uygulanmıştır. Kurutma işlemi sonrasında, plastik ürünler yaklaşık %11 aktif klor içeren sodyum hipoklorit çözeltisi ile tekrar yıkanmıştır. Bu uygulama ile de atıkların diğer kirliliklerden arındırılması amaçlanmıştır. Çift yıkama işleminden sonra atıkların pH'ını nötralize etmek için saf su ile son bir yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Akabinde yapılan kurutma işlemi ise her plastik türünün özel koşullarına uygun bir kurutma fırınında gerçekleştirilmiştir. Plastik türlerine göre kurutma koşulları tablo 1'de verilmiştir. Son aşamada plastik atıklar, işlenmelerini kolaylaştırmak için bir parçalayıcıda parçalanarak yeniden ekstrüzyon işlemi için eritilerek belirlenen ağırlıklarda aglomere edilmiştir.

Tablo 1. Plastik türlerine göre kurutma koşulları

Plastik türleri	Kurutma koşulları (°C)	Kurutma süresi (saat)
Polietilen tereftalat (PET)	70	1
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)	60	1
Polivinil klorür (PVC)	40	1
Düşük yoğunluklu/lineer-düşük yoğunluklu polietilen (LD/LLD-PE)	50	1
Polipropilen (PP)	60	1
Polistiren (PS)	70	1
Selofan	40	1

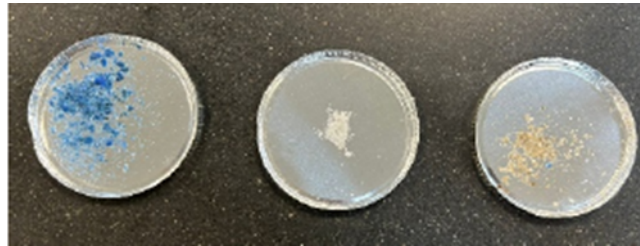
Ekstrüzyon işlemi

Bu çalışma kapsamında iki tür yeniden ekstrüzyon yöntemi bulunmaktadır: granülasyon ve elyaf ekstrüzyonu. Yeniden ekstrüzyon işlemi, malzemelerin uygun yeniden ekstrüzyon yöntemine göre sınıflandırılmasıyla başlamış ve sınıflandırma Tablo 2'de paylaşılmıştır. Yeniden ekstrüzyon işlemleri eritilmiş plastik aglomerler ile gerçekleştirilmiştir. Her bir plastik türünün erime noktası tablo 2'de görülebilmektedir.

Tablo 2. Plastik türlerine göre uygulanabilecek ekstrüzyon yöntemi ve erime noktası

Plastik türleri	Yeniden ekstrüzyon yöntemi	Erime noktası (°C)
Polietilen tereftalat (PET)	Elyaf ekstrüzyonu	260
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)	Elyaf ekstrüzyonu	~125
Polivinil klorür (PVC)	Granülasyon	~180
Düşük yoğunluklu/lineer-düşük yoğunluklu polietilen (LD/LLD-PE)	Granülasyon	~130
Polipropilen (PP)	Elyaf ekstrüzyonu, Granülasyon	~160
Polistiren (PS)	Granülasyon	~230
Selofan	Granülasyon	~175

Plastik aglomerların eritilmesi, üst toleranslarla erime noktalarına yakın bir yerde gerçekleştirilmiştir. Eritme işleminden sonra, ekstrüzyon işlemi granülatör veya fiber-ekstrüder ile gerçekleştirilmiştir. Geri dönüştürülmüş LLDPE, propilen ve selofan granülleri Şekil 1'de, geri dönüştürülmüş HDPE elyafı Şekil 2'de görülebilmektedir.



Şekil 1. Sırasıyla soldan sağa geri dönüştürülmüş LLDPE granülleri, polipropilen granülleri, selofan granülleri,



Şekil 2. Geri dönüştürülmüş HDPE elyaf

Granüllerin boyutları seri üretim ihtiyacına göre belirlenmiştir. Örneğin, üretim sisteminde laminasyon için kullanılan granüller, yaklaşık 1 mm çapında bir yapıya sahipken tabaka yapımı için kullanılan granüller, yaklaşık 3 mm çapında yapılandırılmıştır. Benzer şekilde, elyaf ekstrüderi de üretim sorumlusunun taleplerine göre ayarlanmıştır. Örneğin, katkı maddesi olarak kullanılacak elyaflar, keçelerin hammaddesi olarak kullanılacak olan elyaflar göre daha az l/d (uzunluk/çap) oranıyla yapılandırılmıştır. Yıkama işlemlerinde kullanılan kimyasallar isteğe bağlıdır. Bu nedenle, tesislerin imkan ve beklentilerine göre kimyasallar değişebilmektedir. Örneğin, sodyum hipoklorit yerine hidrojen peroksit kullanılabilir. Yıkama için sodyum hipoklorit yerine hidrojen peroksit gibi isteğe bağlı kimyasallar kullanılabilir ve bu da sonuçları değişken bir şekilde etkileyebilir.

SONUÇLAR

Teorik yöntemde, geri dönüşüm süreci için en uygun yatırımı bulmak için NPV (Net Bugünkü Değer) ve Maksimum Pişmanlık Değeri yaklaşımı uygulanmıştır. En büyük NPV ve en küçük Maksimum Pişmanlık Değerinin optimal entegrasyonuna sahip olan ve alternatif anlamına gelen optimal karar, granülatör ve elyaf ekstrüderi yatırımının gerçekleştirilmesi olarak belirlenmiştir. Optimal yatırım sonucu şirketten şirkete değişebilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada paylaşılan sonuç subjektif bir yatırım tavsiyesidir. Bununla birlikte, plastik atıklar seri üretimin taleplerine göre başarılı bir şekilde geri dönüştürülerek yeniden üretime dahil edilmiştir.

Özetle, gerçekleştirilen çalışma sonucunda, bir dizi yatırımla plastik ofis atıkları üzerine bir geri dönüşüm sistemi kurmanın mümkün olduğu ortaya koyulmuştur. Bununla birlikte, çalışma plastik geri dönüşümünün bir Ar-Ge merkezi için uygun ve uygulanabilir olacağını göstermiştir. Dolayısıyla çalışmanın, plastiklerin geri dönüşümü konusunda literatüre ve sektöre katkı sağladığı açıktır. Ayrıca çalışma, benzer çalışmalarda görülmesi zor olan kimyasalları önererek plastik yıkama ve kurutma yöntemine de katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] C. A. Harper, (2006). Handbook of Plastic Processes. Hoboken, New Jersey: Joh Wiley & Sons.
- [2] E. Worrell, M. A. Reuter, (2014). Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts and Scientists, Chap. 13. (s. 179-190).
- [3] A. L. Andrady, M. Neal, (2009). Applications and societal benefits of plastics, Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences. 1977-1984.
- [4] L. Parker, (2018). We made plastic. We depend on it. Now we're drowning in it. <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/plastic-planet-waste-pollution-trash-crisis>. Date of access: June 25,2023.
- [5] R. E. Hester, R. M. Harrison, (2011). Marine pollution and human health, Royal Society of Chemistry. 84-85.
- [6] C.-H. Chen, C.-Y.Chen, Y.-W. Lo, C.-F. Mao, W.-T. Liao, (2001). Studies of glycolysis of poly(ethylene terephthalate) recycled from postconsumer soft-drink bottles, Journal of Applied Polymer Science. 943-948.
- [7] G. Guclu, T. Yalcinyuva, S. Ozgumus, M. Orbay, (2003). Hydrolysis of waste polyethylene terephthalate and characterization of products by differential scanning calorimetry, Thermochimica Acta. 193-205.
- [8] N. E. Ikladious, (2000). Recycling of poly(ethylene terephthalate): identification of glycolysis products, Journal of Elastomers and Plastics. 140-151.
- [9] V. Jankauskaite, G. Macijauskas, R. Lygaitis, (2008). Polyethylene terephthalate waste recycling and application possibilities: a review. Materials Science (Medžiagotyra). 119-127.

- [10] G. P. Karayannidis, D.S. Achilias, (2007). Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate), *Macromolecular Materials and Engineering*. 128-146.
- [11] H. Kurokawa, M. A. Ohshima, K. Sugiyama, H. Miura, (2003). Methanolysis of polyethylene terephthalate (pet) in the presence of aluminium tiisopropoxide catalyst to form dimethyl terephthalate and ethylene glycol, *Polymer Degradation and Stability*. 529-533.
- [12] T. Spychaj, E. Fabrycy, S. Spychaj, M. Kacperski, (2001). Aminolysis and aminoglycolysis of waste poly(ethylene terephthalate), *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 24-31.
- [13] S. R. Shukla, A. M. Harad, (2006). Aminolysis of polyethylene terephthalate waste, *Polymer Degradation and Stability*. 1850-1854.
- [14] V. Goodship, (2007). Plastic recycling, *Science Progress*. 245-268.
- [15] Y. Ulcay, (2004). Improvement of waste recycling in pet fibre production, *Journal of Environmental Polymer Degradation*. 231-237.