



Konferans Bildirisi

Tek Proseste Kompaund Elde Edebilen Tandem Bir Sistemle Yapılan Termoplastik Geri Dönüşümünün Çevreye ve Dünyaya Faydaları

Altuğ Bakırcı^{1*}, Cem Koçak², Özgür Yamaç³, Mustafa Cemal Çakır⁴

¹ Monomer Extruder Mak. Müh. San. ve Tic., Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-0438-6337>,
altugbakirci@gmail.com,

² Monomer Extruder Mak. Müh. San. ve Tic., <https://orcid.org/0009-0006-2046-4111>,
cem@monomex.com,

³ Monomer Extruder Mak. Müh. San. ve Tic., <https://orcid.org/0009-0001-8494-7722>,
dizayn@monomex.com,

⁴ Bursa Uludağ Üniversitesi, Orcid ID: 0000-0003-0816-4029, cemal@uludag.edu.tr,

* Sorumlu Yazar: altugbakirci@gmail.com

(First received October 30, 2023 and in final form December 17, 2023)

**3rd International Conference on Design, Research and Development
(RDCONF 2023)
December 13 - 15, 2023**

Reference: Bakırcı, A., Koçak, C., Yamaç, Ö., Çakır, M., C. Tek Proseste Kompaund Elde Edebilen Tandem Bir Sistemle Yapılan Termoplastik Geri Dönüşümünün Çevreye ve Dünyaya Faydaları. Orclever Proceedings of Research and Development,3(1), 647-658.

Özet

Polimerlerin üretimlerinin kolay oluşu maliyetlerinin düşük olması ve iyi kimyasal ve fiziksel özellikleri karşılarken hafif oluşları 1900'lü yıllardan bu yana devasa bir plastik üretimine sebep olmuştur. Sürekli artan plastik kullanımı beraberinde doğaya, canlılara ve insan sağlığına zarar vermeye başlaması geri dönüşüm ve bertaraf problemlerini beraberinde getirmiştir. Termoplastiklerin geri dönüşüm sırasında istenilen özelliklerde bir malzeme üretilmek istendiğinde iki kez ergitilmesi gerekmektedir. Bu durum plastiklerin mekanik geri dönüşüm çevrim sayılarının kısıtlı olmasından dolayı termoplastiğin ömrünün iki kat hızlı bir şekilde ömrünün tamamlanmasına sebep olur. Önerilen tandem geri dönüşüm prosesinde geri dönüştürülen atığın tek bir ergime ile ileri dönüşümü sağlanabilmektedir. Bu sayede atık termoplastiğin tekrar kullanılabilirlik sayısı artırılmış olur. İkincil bir ısıtma işlemi olmamasından dolayı enerji tasarrufu sağlanır ve maliyetlerin düşürülmesinde önemli bir etki sağlar.



Anahtar: Geri dönüşüm, ileri dönüşüm, çift vidalı ekstrüder

Conference Article

Benefits of Thermoplastic Recycling to the Environment and the World using a Tandem System that can Produce Compound in a Single Process

Abstract

The manufacture of polymers has experienced significant growth since the 1900s due to their favorable attributes such as ease of manufacturing, cost-effectiveness, desirable chemical and physical qualities, as well as their lightweight nature. The escalating utilization of plastic has begun to inflict damage upon the environment, organisms, and human well-being, hence giving rise to challenges pertaining to recycling and waste management. In the process of recycling, it is necessary to subject thermoplastics to two cycles of melting in order to get the correct material characteristics. As a result of the restricted number of mechanical recycling cycles for plastics, thermoplastics have an accelerated rate of expiration, double the usual timeframe. In the proposed tandem recycling process, a single melting operation can subject the trash that has already undergone recycling to a second round of recycling. By using this approach, the potential for enhancing the reusability of thermoplastic waste is heightened. The absence of an additional heating process results in energy savings, leading to a notable reduction in expenses.

Keywords: Recycling, upcycling, twin screw extruder

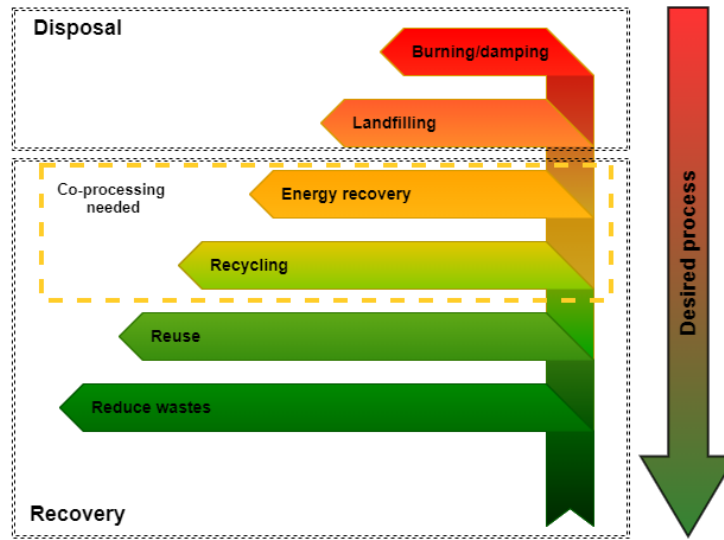


1. Giriş

Polimerin ilk sentezlenmesiyle beraber 1900'lü yılların başından bu yana, polimer uygulamaları hayatın her alanında görülmeye başlanmıştır. Bununla beraber polimerler, geleneksel cam, metal, seramik gibi diğer ürünlerin de yerini almaktadır. Bu değişiklik ve ilgi, polimerlerin hafif ve dayanıklı olmaları, iyi yalıtkan olmaları, düşük ısı iletkenlikleri, yüksek darbe ve korozyon direncine sahip olmaları, çoğu kimyasal saldırılara karşı dirençli olmaları, şekillendirilmelerinin kolay olması, şekillenmesinin çeşitli olması gibi mükemmel özelliklerinden ve bununla beraber maliyetlerinin de düşük olmasından dolayıdır. Son istatistiksel veriler, son on yılda küresel polimer üretiminin ortalama %37 oranında arttığını göstermektedir ki bu, yaklaşık 100 milyon metrik ton polimerik malzeme artışına eşittir. Finansal veriler, küresel plastik pazarının 2020 yılı büyüklüğünün yaklaşık 579,7 milyar ABD doları olduğunu ve son beş yılda yaklaşık %15,5 değer artışına işaret ettiğini göstermektedir. Tahminlere göre, küresel plastik pazarının değerinin 2028 yılına kadar 750,1 milyar ABD dolarına ulaşması ve 2021-2028 yılları arasında yıllık bileşik büyüme oranının %3,4 olması beklenmektedir. 1950 ila 2015 yılları arasında 8.300 Mt işlenmemiş plastik üretildiği tahmin edilmektedir. Ancak bunların 6.300 Mt'u plastik atık haline gelmiş ve %79'u çöplüklerde veya su yolları ve okyanus gibi doğal ortamda birikmiştir. Plastik, petrol türevinden, çok yüksek yatırımlarla, petrokimya tesislerinde elde edilmektedir. Üretilen plastiklerin hemen hepsi doğada çözünmemekte ve kara ve denizleri kirletmektedirler. Zamanla atık plastikler mikron seviyesinde çözünerek insan ve canlıların besin zincirine karışmaktadır. Yıllık üretim hâlâ artmakta ve bu artışın sürmesi beklenmektedir: Bu ise daha fazla plastiğe sahip bir gelecek planlamanın zorunlu olduğu anlamına gelmektedir [1, 2].

Polimerik malzemeler bozunmaları uzun zaman alması nedeniyle çevre kirliliğini engelleyebilmek için imha edilirler, ancak bu uygulama zehirli gazların atmosfere yayılması demektir. Bu sebeple imha etmek yerine geri dönüştürülmüş polimerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olacak katkı maddelerinin eklenmesi, bunu sağlayacak geri dönüşüm süreçlerinin ortaya çıkması hem çevre hem maliyet açısından olumlu bir yaklaşım olmaktadır. 1950'den bu yana sadece %9 u geri dönüştürülmüş ticari plastiklerin, ekonomik bir endüstriyel süreç yoluyla ileri dönüştürülmesi, plastik bertarafında önemli çıkış yollarından biri olarak görülmektedir [1, 3].

Avrupa Komisyonu'nun Atık Çerçeve Direktifi tarafından önerilen sıfır atık hiyerarşisini benimsemek kontrollü büyümeyi sağlayacaktır. Ekonomi Paketi 1'de belirlenen iddialı hedefler 2025 yılına kadar tüm ambalaj atıklarının %65'inin geri dönüştürülmesi hedeflemektedir. AB geri dönüşüm hedefinin sonraki eylem planları göz önüne alındığında ise 2030 a kadar %75'ini geri dönüştürülmesi beklenmektedir. Bu durum sürekli genişleyen bir endüstriyel ilgi alanını da ortaya çıkarmaktadır. Özellikle plastik ambalajlara yönelik %55 geri dönüşüm hedefi vardır. İkincil geri dönüşüm, genellikle daha kötü özelliklere sahip yeni malzemelerin oluşturulduğu tüketici sonrası atıklarla ilgilidir. Ancak bu ikincil dönüşüm malzemenin çeşitli teknolojilerle ileri dönüşüm haline getirilerek tekrar kompaund haline getirilebilmesi anlamına gelmektedir [4, 5].



Şekil 1: AB Atık Çerçeve Direktifine Dayalı Polimer Atık Kullanım Ömür Sonu Seçenekleri [5].

Genel olarak atık plastikler iki şekilde geri dönüştürülebilir bunlar mekanik ve kimyasal olarak sınıflandırabiliriz. Mekanik geri dönüşüm fiziksel geri dönüşüm olarak da bilinir. Plastik öğütülür ve daha sonra yeniden işlenir ve orijinal kullanımıyla aynı olabilecek veya yeni bir bileşen üretmek üzere birleştirilir. Kimyasal geri dönüşüm de ise polimer atıkları, yeni polimer üretimi ve petrokimya endüstrisi için hammadde olarak kullanılabilen poliolefinler, polyesterler ve poliamidler uygun kimyasal çözücüler kullanılarak monomerler halinde yağ/hidrokarbon bileşenine veya saf polimerlere dönüştürülür. Maliyetler ve kolaylık göz önüne alındığında mekanik geri dönüşüm daha yaygın tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalarda ekstrüzyon döngüsünün artmasıyla polimerin mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Fakat çeşitli harmanlama



teknikleriyle orjinaline yakın ve orjinalden daha üstün özelliklerin elde edilmesi olasıdır [6–8].

Geri dönüşüm prosesi sırasında ısı işlemler sonucu plastiklerin yapısı bozulmakta ve ikinci kalite olarak veya daha düşük özelliklerde bir ürüne dönüşmektedirler. Yüksek maliyetli ve yüksek enerji gerektiren bu prosesler sonucu, geri dönüşüm çevrimi sayısına bağlı olarak ortaya çıkan, malzemenin mekanik özellikleri orijinal hammaddenin %30 u değerine kadar düşebilmekte ve çok daha düşük katma değerli malzemeye dönüşmektedir. Plastiklerin yok edilmesi için son çare olan yakılma sonrasında ise hava kirliliği sorunu ortaya çıkmaktadır [6, 9, 10].

Mekanik geri dönüşüm için çift vidalı ekstrüder kullanımı yaygındır. Çift vidalı ekstrüder sayesinde, katkıların ve geri dönüştürülecek malzemelerin karışmasını sağlanması, toprakların ve büyük parçaların parçalanarak ufaltılması ve bu işlemlerin rahat bir şekilde gerçekleşebilmesi için uygun sıcaklıklarda prosesi devam ettirmesi ile homojen yeni bir malzeme oluşturabilir. Mekanik parçalanma, dağıtım ve iletimi ekstrüder içerisindeki vidaların farklı geometrik tipleriyle yapılabilmektedir. Temel olarak vidalar plastik malzemelerin ekstrüder içerisinde istenilen nitelikleri kazanmasını sağlayan, iletim, karıştırma, sıkıştırma, yoğurma gibi fonksiyonları yerine getiren parçalardır. Farklı geometrileriyle vidalar: taşıma vidaları, besleme vidaları, sıkıştırma vidaları, yoğurma vidaları, karıştırma vidaları, akış geciktirme vidaları, geçiş sağlayıcı vidalar olarak sınıflandırılır. [11, 12].

Plastik atıkların toplanarak geri dönüştürülmesi konusunda yasal zorunluluklar getirilmiştir. Plastik sektörünün avantajları yanında çözülmesi gereken en büyük sorunu geri dönüşümdür. Örneğin Otomotiv Sektörü araçlarda en az %95 geri dönüştürülebilir malzeme kullanılmasını istemektedir. Geri dönüşüm sürecinden elde edilen nitelikli plastikler iki aşamadan oluştuğu için ürün iki kere eritilmekte, bu ise yüksek enerji sarfiyatı, işçilik, nakliye, depolama gibi ek maliyetlerden dolayı hem düşük kaliteye hem de yüksek maliyete sebep olmaktadır. Yüksek maliyetlerden dolayı ikinci kalite olarak satılmakta veya katma değeri az ürünlere dönüştürülmektedir. Geri dönüşüm için kullanılan tek vidalı ekstrüder, direkt çift vidalı ekstrüdere debi düzensizliğinden dolayı entegre edilememektedir. Bu çalışmada orijinal malzemeye eşdeğer malzeme ve ileri dönüşüme olanak veren tek aşamalı bir geri dönüşüm süreci geliştirilmiştir.

Bu çalışmada plastik atıkların orijinal performans değerinde ürüne geri dönüşümü hedeflemektedir. Katkılar eklenerek ileri dönüşüm elde edilmek istenmektedir. Normalde geri dönüşüm proseslerinde atık plastik kompaund elde edilmek için iki kere



ergitilmektedir. Çalışmada atık plastiğin iki kere ergitilmesinin önüne geçilmesi için tandem bir sistem tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla PE, PP veya PA gibi plastik atıklar önce tek vidalı bir ekstrüderde eriyik halde filtre edilecek, sonra katılaşmadan eriyik halde çift vidalı bir ekstrüdere beslenerek düşük maliyetlerde, yüksek kalitede ürün elde edilebilecektir. Bu yöntemle plastik defalarca termal gerilime uğramayacağından ürünün tekrar geri dönüştürülebilme sayısı en az iki katına çıkacaktır. Ayrıca tek vidalı ekstrüderin direkt olarak çift vidalı ekstrüdere entegrasyonundaki debi düzensizliği problemi, bu çalışmada, ergitme işleminin tek prosese indirgenebilmesi için tek vidalı ekstrüder ile çift vidalı ekstrüderin debi hızlarının ayarlanması ile çözülecektir. Temizlenmiş eriyik malzemenin belirli bir debide dozajlanabilmesi için, akan malzeme debisi, tek/çift ekstrüder vidası özelliklerine, plastik tipine ve proses parametrelerine göre değişen, motordan çekilen akıma bağlı olarak, kontrollü bir şekilde ayarlanacaktır.

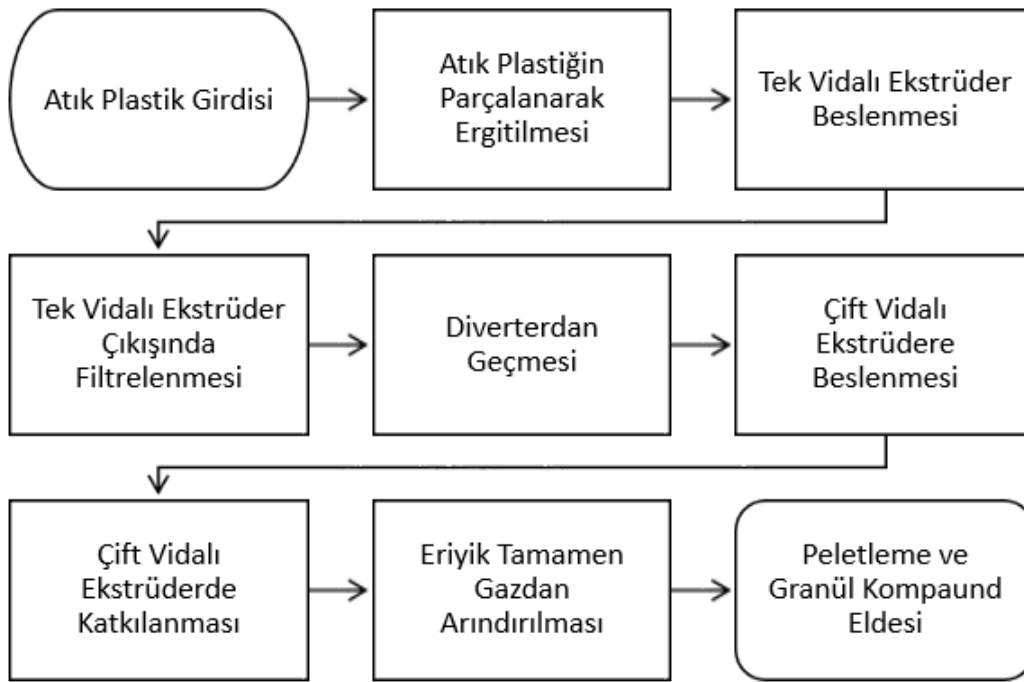
2. Materyal ve Yöntem

Hâlihazırda yapılan geri dönüşüm prosesinde işlem agromel edilmiş atık plastiğin soğutulup granül haline getirdikten sonra tekrar ısıtılarak dozajlı bir şekilde çift vidalı ekstrüdere beslenmesine, tekrar ergimesine ve katılanmasına dayanır. Bu iki kere ergitmeli plastik geri dönüşüm yapısı, geri dönüşüm çevrimini ve plastik kalitesini düşürmektedir. Dolayısıyla, özellikleri geliştirilmiş termoplastik malzeme üretimi için atık plastikleri rekabetçi maliyetlerde ekstrüde ederek geri dönüşümden tek proseste direkt kompaund elde edecek, tandem çalışan bir sisteme ihtiyaç vardır.

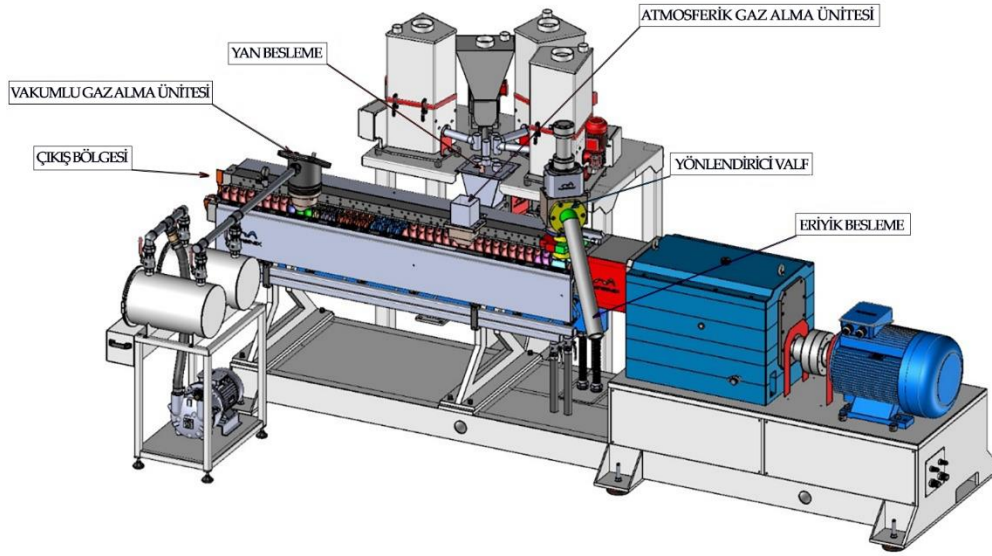
Bu çalışmada, plastiğin ömrü normal prosese göre 2 kat uzatacak, direkt katılanabilmesi sayesinde özelliklerini orijinal hammaddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine yükseltecek bir tandem geri dönüşüm prosesi geliştirmiştir. İki ekstrüderle çalışan bu sistemde tek vidalı olan ilk ekstrüderde agromel edilerek filtreleme ve gaz alma ile temizlenen termoplastik atık, çift vidalı ikinci ekstrüdere eriyik olarak beslenecektir. İkinci ekstrüderde katkılarla orijinal haline dönüştürülebileceği gibi ileri dönüşüm uygulanarak istenen ek performans özelliklerine de kavuşturulabilecektir. Tasarlanan sistemde 9 kısım vardır.

Sistemin çalışma prensibi şu şekildedir: ilk adımda atık malzeme besleme hattıyla atık plastik saflaştırma tankına alınır. Daha sonra ikinci adımda kesici/kompaktörde malzeme kesilir, karıştırılır, gazdan arındırılır, yoğunlaştırılır. Üçüncü adımda teğetsel olarak bağlanmış ekstrüder sürekli olarak sıcak, önceden sıkıştırılmış malzeme ile doldurulur. Ekstrüder vidasında malzeme plastikleştirilir, çok iyi vakum edilerek gazı alınır. Daha

sonra dördüncü adımda tam otomatik kendi kendini temizleyen filtrede en üst seviyede temizlenir, içindeki yabancı maddeler ayrılır. Beşinci adımda eriyik hale gelen ve temizlenen plastik diverterden geçer ve geri dönüştürülmüş eriyik malzeme altıncı kısımdaki aynı yöne dönen, kendi kendini temizleyen çift vida ekstrüdere gelmiş olur. Mükemmel karıştırma ve gaz alma özelliklerine sahip olan bu kısım kompaund malzemenin oluşturulacağı kısımdır. Yedinci kısımda çift vidalı ekstrüdere çift vidalı yan besleme makinesi ile çeşitli katkı maddeleri, yüksek dolgu maddeleri ve takviye edici maddeler gravimetrik dozajlamalarla akıtılarak karıştırılır ve kompaund elde edilir. Sekizinci kısım olan gaz giderme bölgesinde eriyik kompaund gazdan arındırılır ve dokuzuncu adımda kesim sistemine girerek son kullanıcının istediği en üst kalitede nihai granül kompaund elde edilir. Bu 9 kısmın akış şeması Şekil 2’de verilmiştir. Plastiğin çift vidalı ekstrüderdeki uğradığı işlem adımları Şekil 3.’te gösterilmiştir.



Şekil 2: Tandem Geri Dönüşüm Prosesinin Akış Şeması



Şekil 3: Geri Dönüştürülmüş Eriyik Plastiğin Çift Vidalı Ekstrüderdeki Akışı

Geri dönüştürülmüş malzemede bulunan uçucu maddelerin kütle kotası sabit olamaz. Bu nedenle hat işletme koşullarının oluşturulmasında esneklik sağlanmalıdır. Örneğin OPP ambalajları, lamine PP esaslı otomotiv tekstil ürünleri, çocuk bezi gibi atıkların içinde yer alan %5-10 oranındaki PET malzemelerin ürün içindeki olumsuz etkilerini bertaraf etmek için EPDM, elastomer vb. reaktif uyumlaştırıcıların formülasyona girerek mekanik geri dönüşümün tek seferde yapılabildiği sistem oluşturulmuştur. Bu sistem ile plastomer esaslı malzemelere kalsit, talk gibi dolgu malzemeleri de aynı formülasyon ile işlenerek tek seferde nihai ürün elde edilebilir.

Geri dönüşüm esnasında PET içindeki hidrolitik oksidasyon en tehlikeli bozunma şeklidir. Bu bozunma moleküler ağırlıkta, viskozitede ve dolayısıyla malzemenin mekanik özelliklerinde ciddi bir azalmaya neden olur. PET, hava nemini hızla emen son derece higroskopik bir malzemedir. Ekstrüzyon işlemi sırasında, vidalar tarafından aktarılan gerilmeyi sınırlamak gerekir (mekanik bozunma), ancak hidrolitik bozunma işlemi başlamadan önce malzemenin neminin çıkarılması çok önemlidir. Normalde PET nem alma işlemi ayrı olarak yapılır ve bu durumda kurutucunun içinde yumuşamasını önlemek için önceden malzemenin kristalleştirilmesine ihtiyaç duyulur ($T_g = 75^\circ \text{C}$). Bu çalışmada Monomex çift vidalı ekstrüder kullanılmış ve nem alma işlemi, bu ekstrüderin bir özelliği olarak, ayrı bir prosese ihtiyaç duymadan, ekstrüderin içinde gerçekleştirilmiştir. PE, PP veya PA gibi plastik atıklar önce tek vidalı bir ekstrüderde eriyik halde filtre edilmiş, sonra eriyik halde çift vidalı bir ekstrüdere beslenerek düşük maliyetlerde, yüksek kalitede ürün elde edilmiştir.



Çıkan debi ayarlanırken tek/çift ekstrüder vidası özelliklerine, plastik tipine, katkıların türüne, dozajların miktarına ve proses parametrelerine göre motorlardan akım çekilmektedir. Geri dönüşüm malzemesi geri dönüşüm tankından tek vidalı bir ekstrüderle aktarmakta ve sabit debide eriyiği çift vidalı ekstrüdere besleyebilmektedir. Fakat dozajlamalar istenilen ürüne göre farklılık gösterebilmektedir. Bu sebeple çekilen akıma bağlı tork kontrolü ile çift vidalı ekstrüderin debisi ayarlanmaktadır. Debiyi sınırlayıcı unsurlar sistemin kaldırabileceği tork ve sistemin dayanabileceği akım değerleridir. Malzeme yığılması olması durumunda çekilen akımda artış görülecektir. Çekilen akımın artması ise gücün artması anlamına gelmektedir. Motor gücene bağlı yapılan tork hesapları sonucunda torktaki dalgalanmalar önlenmekte ve buna bağlı çıkan malzeme debisi belirlenmektedir.

Çalışmada, prosesten çıkan ürün ile orijinal ürünün kıyaslanması da yapılmıştır. Bu kıyaslamada belirli standartlar dikkate alınmıştır. Geri dönüşüm sonrası elde edilen örneklerin termal özellikleri ve bu özelliklere bağlı yapısal bileşimlerinin tayini ISO 11357-3:2018 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Mekanik özellikler (çekme mukavemeti, elastisite modülü ve kopma uzaması) Zwick/Roell Z020 cihazı kullanılarak ISO 527-2:2012 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Örneklerin fiziksel özellik analizleri, eriyik akış indeksi (MFI) değerleri ISO 1133-1:2012 standardına, yoğunluk ölçümleri ISO 1133-1:2019 standardına, sertlik ölçümleri ise ISO 868:2003 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarını karşılaştırmak için Petkim'in Ürün Teknik Özellikleri tablosundaki orijinal ürün değerleri kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Proje çerçevesinde, enerji tasarrufu kapsamında, geri dönüşüm yapıp granül oluşturulduktan sonra tekrar kompaund elde etmek için bu granüllerin tekrar ısıtılıp karışıma dahil edildiği ve geri dönüştürülen plastiğin iki kere eritildiği bir sistemden, tek ısıtmalı ve geri dönüşmüş plastiğin direkt kompaund elde edilmek üzere karışımların eklendiği bir sisteme geçilmiş; ısıtma işlemi tek ısıtmaya düşürülmesinden dolayı %40 oranında bir enerji tasarrufu sağlanmıştır. Tandem proses sayesinde geri dönüştürülmüş malzeme direkt çift vidalı ekstrüdere besleme yapıldığından tekrar ısıtılmamış ve plastiğin geri dönüşüm ömrü uzatılmıştır. Termoplastikler her ergimeye maruz kaldıklarında özelliklerinde belirli oranda azalma görülmektedir. Önceki çalışmalarda tekrar eritilen polimerlerin zincirlerinin kısaldığı, geri dönüşüm ömürleri ve malzeme performanslarının azaldığı rapor edilmiştir [6, 9, 10].



Prosesin tandemleştirilmesi ile geri dönüştürülmüş malzeme kullanılması ve geri dönüştürülmüş malzemenin katkılarla kompaund elde edilmesiyle ileri dönüşümünün de sağlanması hammadde maliyetinin orijinal hammaddeye göre satış fiyatını düşürmüştür. Termoplastik atıkların fiziksel ve kimyasal değerleri orijinale yakın bir hale getirilmiştir.

Bu çalışma sayesinde geri dönüştürülerek kompaund hale getirilmiş üründe atık oranı da yüksek olabilmektedir. Çıkan numunelerin %80 atık malzemeden oluşması sağlanmıştır. Ayrıca önemli noktalardan biri olarak bu prosesle balyalardan başlayarak düşük yığın yoğunluklu malzeme beslemeleriyle güçlendirilmiş bir malzeme elde edilebilmiş olmasıdır.

Tablo 1’de Petkim’in saf polipropilen değerleri ile bu çalışma sonucunda ortaya çıkan polipropilen esaslı ürünün mekanik karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 2 den de görülebileceği üzere benzer sertlik değerleri elde edilmiş ve orijinale yakın akma gerilmeleri tespit edilmiştir. Bu çalışmada üretilen malzeme enerji darbe sönümlemesi açısından daha iyi sonuçlar vermiştir.

Tablo 1: Mekanik Özellikler

	PETOPLEN EH161 Polipropilen (PP)	Bu çalışma	Standard
Akma dayanımı (MPa)	36	18-25	ASTM D638
Elastisite (MPa)	1460	1500-1900	TS EN ISO 178
Izod çentik darbe (J/m) (23°C)	25	27-45	ASTM D256
Rockwell R-Scale	75,6	71-74	ISO 868

Üretilen ürünün fiziksel özellikleri göz önünde bulundurulduğu akış hızlarının aynı olduğu görülebilmektedir. Yoğunluk açısından katkılama sebebiyle daha yoğun bir malzeme elde edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2: Fiziksel Özellikler

	PETOPLEN EH161 Polipropilen (PP)	Bu çalışma	Standard
Erime Akış Hızı (230°C/2.16 kg) (g/10 min)	16	14-18	ASTM D1238
Yoğunluk (g/cm ³)	0,905	1,24-1,28	ASTM D1505



Tablo 3'te %80 geri dönüştürülmüş malzemenin içeriğinde en fazla milyonda bir görülen (ppm) kimyasal içerikler verilmiştir.

Tablo 3: Çalışma Sonucunda Ortaya Çıkan Ürünün Kimyasal İçerik Tablosu

	Cd	Cr	Hg	Pb	Br	Sb	Co	Cl
Max içerik (ppm)	40	100	0,5	90	100	200	100	2000

4. Sonuçlar

Termoplastikler her ergitildiklerinde zincir yapılarında bozulmalar gerçekleşmektedir. Bu durumda malzemeden beklenen özellikler de düşüş göstermekte ve sürekli ergiyip katılaşan termoplastik, nihayetinde istenilen malzeme özelliklerini karşılayamaz duruma gelmektedir. Geri dönüşüm proseslerinde atık plastik ergitilip kompaund oluşturulma sırasında kullanılmak üzere granül haline getirilerek piyasaya sürülmektedir. Bu sebeple geri dönüştürülmüş plastik kompaund elde edilmesi sırasında tekrardan ergitilmektedir. Bu çalışma, geri dönüştürülmüş plastiğin, eriyik halde, kompaund elde edileceği prosese alınarak direkt olarak geri dönüşüm prosesinin ileri dönüşüm prosesine çevrildiği tandem bir sistem ile ilgilidir. Bu sayede geri dönüştürülmüş termoplastiğin güçlendirilmek üzere katkılanması için tekrar ergitilmesine gerek kalmaz ve geri dönüşüm ömrü uzatılmış olur. Bu proses sayesinde: atık termoplastiğin geri dönüşüm sırasında ergime sayısı düşürülmüş ve böylece tekrar geri dönüştürülebilirlik sayısı uzatılmıştır.

Proseste kompaund elde edilmesi için geri dönüştürülmüş termoplastiğin tekrar ergitilmesine gerek kalmamakta ve bu sayede %40 oranında enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Enerji tasarrufu sayesinde ise proses sonucu elde edilen granül plastiğin maliyetleri düşmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TUBİTAK TEYDEB 3211310 no'lu "Otomotivde Termoplastik Malzemeleri Geri Dönüştürebilerek Yüksek Performanslı Malzeme Geliştirecek Ekstrüzyon Sisteminin Tasarımı ve Prototip İmalatı" başlıklı proje çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Verilen destek nedeniyle TUBİTAK a teşekkürü bir borç biliriz.

Referanslar

- [1] I. O. Oladele et al., "Modern Trends in Recycling Waste Thermoplastics and Their Prospective Applications: A Review," J. Compos. Sci., vol. 7, no. 5, p. 198, May 2023, doi:



- 10.3390/jcs7050198.
- [2] X. Zhao, B. Boruah, K. F. Chin, M. Đokić, J. M. Modak, and H. Sen Soo, "Upcycling to Sustainably Reuse Plastics," *Adv. Mater.*, vol. 34, no. 25, pp. 1–38, Jun. 2022, doi: 10.1002/adma.202100843.
 - [3] E. M. T. Goutam Prasanna Kar, Mohand Osman Saeda, "Scalable upcycling of thermoplastic polyolefins into vitrimers through transesterificatio," *J. Mater. Chem. A*, vol. 8, no. 45, pp. 24137–24147, 2020, doi: 10.1039/d0ta07339c.
 - [4] K. Ragaert, S. Hubo, L. Delva, L. Veelaert, and E. Du Bois, "Upcycling of contaminated post-industrial polypropylene waste: A design from recycling case study," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 58, no. 4, pp. 528–534, Apr. 2018, doi: 10.1002/pen.24764.
 - [5] J. Flizikowski, W. Kruszelnicka, and M. Macko, "The Development of Efficient Contaminated Polymer Materials Shredding in Recycling Processes," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 5, p. 713, Feb. 2021, doi: 10.3390/polym13050713.
 - [6] K. Hamad, M. Kaseem, and F. Deri, "Recycling of waste from polymer materials : An overview of the recent works," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 98, no. 12, pp. 2801–2812, 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025.
 - [7] S. H. Lee, M. Balasubramanian, and J. K. Kim, "Dynamic reaction inside co-rotating twin screw extruder. II. Waste ground rubber tire powder/polypropylene blends," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 106, no. 5, pp. 3209–3219, Dec. 2007, doi: 10.1002/app.26490.
 - [8] R. Veloso and D. C. Clodoaldo, "Mechanical – Chemical Recycling of Low - Density Polyethylene Waste with Polypropylene," *J. Polym. Environ.*, vol. 28, no. 3, pp. 794–802, 2020, doi: 10.1007/s10924-019-01642-5.
 - [9] T. Chen, C. D. Mansfield, L. Ju, and D. G. Baird, "The influence of mechanical recycling on the properties of thermotropic liquid crystalline polymer and long glass fiber reinforced polypropylene," *Compos. Part B*, vol. 200, no. July, p. 108316, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108316.
 - [10] M. E. M. Mekhzoum, H. Benzeid, D. Rodrigue, A. E. K. Qaiss, and R. Bouhfid, "Recent Advances in Polymer Recycling: A Short Review," *Curr. Org. Synth.*, vol. 14, no. 2, pp. 171–185, 2017, doi: 10.2174/1570179413666160929095.
 - [11] M. Dhaval, S. Sharma, K. Dudhat, and J. Chavda, "Twin-Screw Extruder in Pharmaceutical Industry: History, Working Principle, Applications, and Marketed Products: an In-depth Review," *J. Pharm. Innov.*, vol. 17, no. 2, pp. 294–318, Jun. 2022, doi: 10.1007/s12247-020-09520-7.
 - [12] "Çift Vidalı Ekstrüderler." www.monomex.com