



Konferans Bildirisi

Aynı Yöne Dönen Çift Vidalı Ekstrüderli Tandem Bir Termoplastik Geri Dönüşüm Sisteminde Vida Yapılanmasının İncelenmesi

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

¹ Monomer Extruder Mak. Müh. San. ve Tic., Orcid ID: 0000-0003-0438-6337, altugbakirci@gmail.com,

² Monomer Extruder Mak. Müh. San. ve Tic., Orcid ID: 0009-0006-2046-4111, cem@monomex.com,

³ Monomer Extruder Mak. Müh. San. ve Tic., Orcid ID: 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

3rd International Conference on Design, Research and Development
(RDCONF 2023)

December 13 - 15, 2023

Reference: Bakırcı, A., Koçak, C., Yamaç, Ö., Çakır, M., C. Aynı Yöne Dönen Çift Vidalı Ekstrüderli Tandem Bir Termoplastik Geri Dönüşüm Sisteminde Vida Yapılanmasının İncelenmesi. Orclever Proceedings of Research and Development,3(1), 659-671.

Özet

Polimerler düşük maliyet, hafiflik ve üstün performansa sahip olmaları sayesinde hızla kendilerinden önce kullanılan camların, seramiklerin, metallerin ve organik kumaşların yerini almıştır. Bununla beraber polimerlerin kimyasal yapıları sebebiyle doğada çözünmeleri uzun yıllar almaktadır, dolayısıyla keşiflerinden itibaren plastik atıklar insan sağlığını ve doğal yaşamı tehdit edecek boyutlara gelmiştir. Termoplastik atıklar geri dönüştürüleceklerinde, kompaund elde edilmek amacıyla, iki kez ergitilmeleri gerekmekte, bu durumda sınırlı bir geri dönüşüm ömrü olan termoplastiklerin geri dönüşüm sayılarını yarı yarıya azaltmaktadır. Bu çalışmada tandem bir geri dönüşüm prosesi tasarlanmış ve bu prosesle ergimiş atık polimerler, direkt olarak, eş yöne dönen çift vidalı ekstrüdere beslenmiştir. Diğer yöntemlerden farklı olarak ergimiş malzeme direkt olarak çift vidalı sisteme besleyen bir prosese bağlı vida düzeni geliştirilmiştir. Proses sonucunda %80 atık termoplastikten elde edilen ürünün orijinal ürünle kıyaslanması yapılmıştır. Bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerde saf Polipropilene yakın özellikler elde edilmiştir.

Anahtar: Geri dönüşüm, ileri dönüşüm, çift vidalı ekstrüder



Conference Article

Investigation of Screw Configuration of A Tandem Thermoplastic Recycling System with Co-Rotating Twin Screw Extruders

Abstract

Polymers have rapidly replaced the utilization of glasses, ceramics, metals, and organic textiles due to their cost-effectiveness, lightweight nature, and enhanced functionality. Nevertheless, as a consequence of their chemical composition, polymers undergo a protracted degradation process in natural environments, resulting in a significant accumulation of plastic waste since their inception. This accumulation has now reached a critical threshold, posing a substantial risk to both human well-being and the preservation of natural ecosystems. In the recycling process of thermoplastic wastes, it is necessary to subject them to two rounds of melting in order to obtain compounds. This practice results in a reduction of the recycling numbers associated with thermoplastics, which possess a finite recycling lifespan, by 50%. The present work involved the construction of a tandem recycling process, wherein molten waste polymers were immediately introduced into a co-rotating twin screw extruder. In contrast to alternative approaches, a process-dependent screw configuration has been devised for the twin-screw system employed in the delivery of molten material. The product derived from 80% waste thermoplastic was thereafter compared to the original product as an outcome of the aforementioned procedure. Properties similar to those of pure Polypropylene were seen in some physical and chemical characteristics.

Keywords: Recycling, upcycling, twin screw extruder



1. Giriş

Geri dönüşüm prosesi sırasında ısıl işlemler sonucu plastiklerin yapısı bozulmakta ve ikinci kalite olarak veya daha düşük özelliklerde bir ürüne çevrilmektedirler. Yüksek maliyetli ve yüksek enerji gerektiren bu prosesler sonucu geri dönüşüm çevrimi sayısına bağlı olarak ortaya çıkan malzemenin mekanik özellikleri orijinal hammaddenin yarısından bile düşük olmaktadır [1– 3]. Geri dönüştürülmüş malzeme, verilen enerji ve iş gücü de düşünülduğünde ortaya düşük katma değerli bir iş çıkmaktadır. Plastiklerin bertarafı için son çare olan yakma prosesinde ise hava kirliliği ve küresel ısınma tehdidi problemleriyle karşılaşmaktadır [4, 5]. Plastiklerin geri dönüşümü genellikle mekanik, termal ve kimyasal olarak üç şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlara ek olarak biyolojik geri dönüşümü sağlayabilmek için de çalışmalar yapılmaktadır. Literatür araştırmasına göre mekanik yaklaşımda enerji tüketimi minimum düzeydedir. Termal geri dönüşüm yaklaşımında ise enerji tüketimi orta düzeyde olup, kimyasal geri dönüşüm durumunda maksimum enerji tüketilmektedir. Ancak tüm bu modern geri dönüşüm yaklaşımlardaki enerji tüketimi hala geleneksel depolama ve yakma yaklaşımlarından daha iyidir [6, 7].

Mekanik geri dönüşüm için çift vidalı ekstrüder kullanımı yaygındır. Çift vidalı ekstrüderin katkıların ve geri dönüştürülecek malzemelerin karışmasını sağlanması, topakların ve büyük parçaların parçalanarak ufaltılması ve bu işlemlerin rahat bir şekilde gerçekleşebilmesi için uygun sıcaklıklarda prosesin devam ettirilmesi ile homojen yeni bir malzeme oluşturulur. Mekanik parçalanma ve malzeme iletimi ekstrüder içerisinde farklı geometrilerdeki vida tipleriyle yapılır. 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 sağlama vidaları olarak sınıflandırılabilir. Çift vidalı ekstrüder üretilecek malzeme özelinde bu farklı vidaların sıralanmasıyla oluşur [8, 9].

Termoplastik malzemelerin geri dönüşümü esnasında kompaund eldesi iki ayrı prosesle gerçekleştirilir ki bu durum geri dönüştürülen plastiğin, iki kez ergitilmesi ve geri dönüşümü nedeniyle, ömrünü kısaltır. Bu çalışmada termoplastik malzemelerin geri dönüşümünde direkt olarak kompaund elde edilmesini sağlayan tandem yapıdaki bir geri dönüşüm prosesi geliştirilmiş ve ergimiş halde getirilen atık polimerler bir diverter



tarafından çift vidalı ekstrüdere beslenmiştir. Bu aşamada ergimiş plastiğe çeşitli katkılar yapılarak geri dönüşüm prosesinin ileri dönüşüm prosesi haline getirilmesi de sağlanmaktadır. Çalışma kapsamında proses gereksinimlerine bağlı olarak çift vidalı ekstrüder vidalarının özellikleri üzerine durulacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Taşıma vidaları, ekstrüder içerisinde alınan malzemelerin çıkış kalıbına doğru akışını etkin biçimde sağlamakla görevli vidalardır. Bu vidalar ayrıca iletimi sağlayacak plastik malzemelerin proses bölgelerinde işlem göreceği zamanı ayarlama işlevini de yerine getirir. Boşluk hacmi yüksek, kendi kendini temizleme (self-cleaning) özellikleri yüksektir. Ürünlerin vida üzerinde kalma süresi düşüktür [10–12].

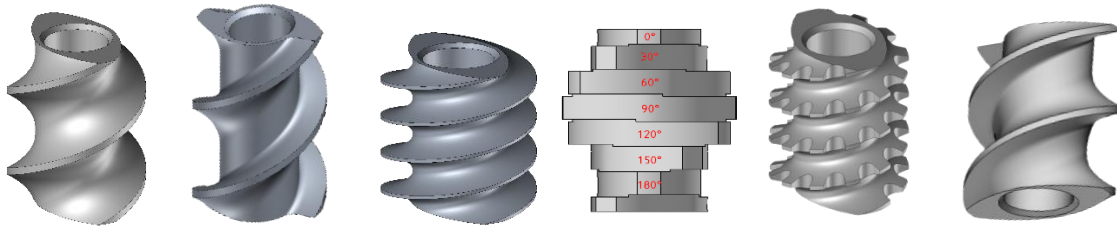
Besleme vidaları, ana besleme ve yan besleme girişlerinde, atmosferik gaz çıkışlarında ve cebri gaz emişi yapılan bölgelerde kullanılır. İletim kanatlarından bir tanesi boşluk hacmini artırmak ve basınç düşümünü sağlamak için düz biçimde yapılandırılır. Sıkıştırılarak basınç artışı yapılan bölgelerden sonra basınç dengeleme amaçlı kullanılırlar. Boşluk hacmi yüksek, kendi kendini temizleme (self-cleaning) özellikleri düşük seviyededir. Ürünlerin vida üzerinde kalma süresi iletim vidalarına göre daha uzundur [13].

Helisel yapıya sahip olan sıkıştırma vidaları, malzeme iletimini yavaşlatma ihtiyacı duyulan bölümlerde kullanılırlar. Malzemelerin ilk erime bölgelerinde, giren ürünlerin yavaşlayarak erime sıcaklığına ulaşmasına yardımcı olurlar. Karıştırma ve yoğurma bölgelerine yakın konumlandırıldıklarında ise kırıcı ve yoğurucu elementlerin performanslarını tam anlamıyla yerine getirmelerine olanak sağlarlar. Çıkış kalıbına yakın eklenen elemanlar ise kalıp basınç dengesinin ve sıcaklığının stabil durumda kalmasında önemli bir rol alırlar. Kanal boşluk hacimleri ve iletim hızları helisel vidalara göre düşük, self-cleaning kapasiteleri yüksektir. Ürünlerin vida üzerinde kalma süresi diğer helisel yapıya vidalara göre daha fazladır [14, 15].

Yoğurma vidaları, helisel yapıda olmayıp malzemelerin en iyi biçimde dağıtılmasını sağlamak için kullanılır. Malzeme iletim kapasiteleri düşüktür. Kanatlar arasındaki açı büyüdükçe iletim kapasitesi azalır, yoğurma kapasitesi artar. Eriyik malzemelerin en çok deformasyona uğrattığı vida tipidir. 30°, 45°, 60° kanat açıklığındaki vidalar kısmi olarak malzeme iletimi sağlarken 90° vidaların malzeme iletim kabiliyetleri hiç yoktur. Sadece akış yönünde taşınan malzemenin etkisi ile üzerinden malzeme akışı sağlanır [16]–[18].

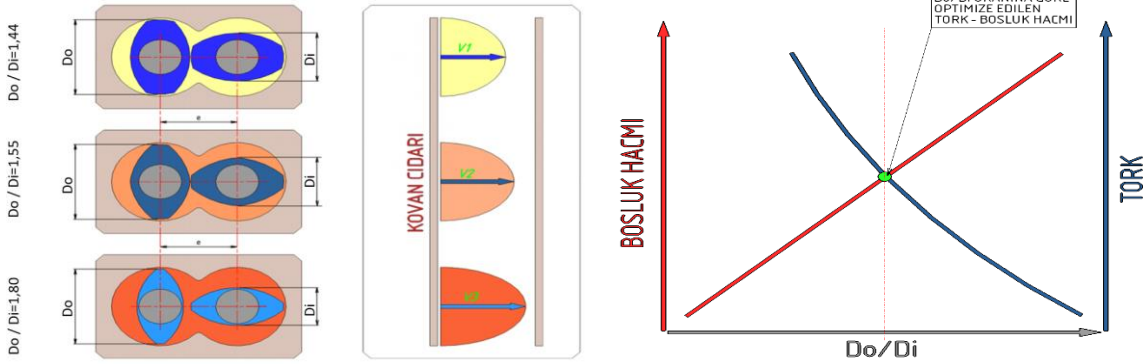
Karıştırma vidaları helisel yapılıdır ve vidalar üzerine açılan kanallar ile evrilmiş karıştırma vida tipidir. Genellikle yoğurucu bloklar arasına konumlandırılırlar. Üzerindeki kanallar vasıtasıyla eriyik malzemeye kesme etkisi yaratarak yoğurucu elementlerin işlevlerini etkin biçimde gerçekleştirmesinde yardımcı olurlar. Üzerindeki kanallar, malzemelerin karışımındaki dağılma etkisini artırırken aynı zamanda bir akış kanalı oluşturarak akışı kabiliyetini artırır. Self-cleaning kabiliyeti taşıma elemanlarına göre düşüktür veya yoktur. Diğer karıştırma elemanlarına göre daha az enerji tüketimi sağlarlar. Farklı malzeme tiplerine ve karakteristiklerine göre farklı tipte karıştırma vidaları mevcuttur [19, 20].

Akış geciktirme vidalar ters vidalar olarak da adlandırılır. Normal akış yönünde iletim yapan vidaların alın düzlemine göre simetrisi alınarak tasarlanan vidalardır. Görevleri ekstrüder içerisine alınan malzemelerin iletimini durdurucu yönde kuvvet uygulayarak erimenin gerçekleşmesi gereken yerde eritme, karışma ve yoğurmanın gerçekleşmesi gereken bölgelerde karışım ve yoğurma etkinliğini artırmaktır. Yapısal olarak uzunlukları, diğer iletim vidalarının yarısı olacak biçimde tasarlanırlar. Geçiş sağlayıcı vidalar, malzemelerin iletimi yönünde akışı engelleyici biçimde set oluşturacak vidaların geometrilerini tümleyen vidalardır. Sıklıkla tercih edilmeyen özel vidaların birbirleri arasındaki geçişi sağlayan türleri de mevcuttur. Self-cleaning özellikleri orta seviyede olup akış iletimini iyi ölçüde sağlarlar [9, 15, 21].



Şekil 1: Sırasıyla; Taşıma Vidası, Besleme Vidası, Sıkıştırma Vidası, Yoğurma Vidası, Karıştırma Vidası ve Geçiş Sağlama Vidası Örnekleri

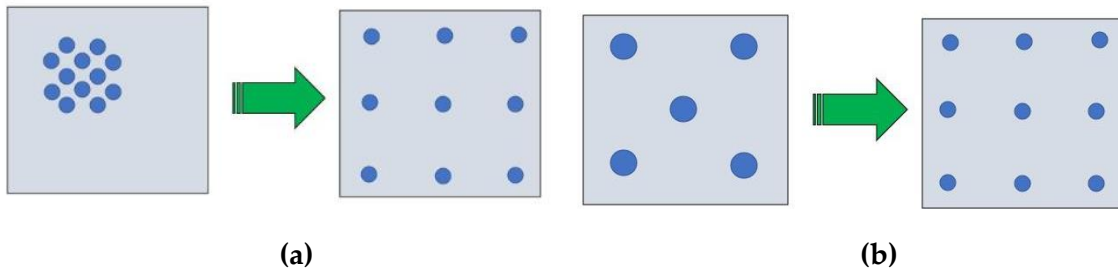
Vidalardaki D_o/D_i oranı ekstrüderlerin yapısını belirleyen önemli bir faktördür. Vida D_o/D_i oranı arttıkça ekstrüderin kapasitesi artar, karıştırma kabiliyeti azalır. SME (Spesifik Mekanik Enerji - kWh/kg) azalır, enerji tüketimi azalır [22, 23].



Şekil 2: D_o/D_i Oranı ve Tork İlişkisi

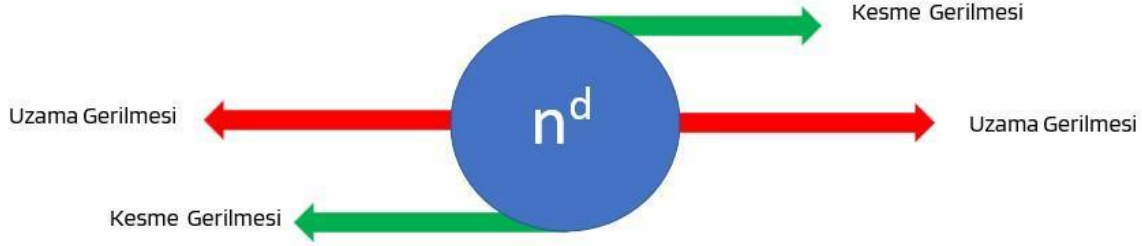
İşleme sıcaklığı, rotor hızı ve karıştırma süresi gibi işlem koşullarının değiştirilmesinin de polimer karışımının uyumluluğu üzerinde etkisi vardır. Çoğu durumda, erime işlemi sırasındaki termodinamik etkiler, makro alanları parçalar ve polimer karışımlarının gerçek homojenliğini sağlar. Uyumlaştırıcının uygulanmasına ek olarak, ekstrüzyon sırasında hem sıcaklığın hem de kayma hızının artırılması oldukça yaygındır. Eriyik akışı ve arayüzey yapışması gibi özellikleri ayarlayabilen ve böylece mekanik mukavemet ve sertlik, darbe direnci ve nihai malzemelerin dayanıklılığı gibi ilgili temel mekanik özellikleri iyileştirebilen katkı maddeleri ve işleme teknikleri mevcuttur [24].

Birlikte dönen çift vidalı ekstrüder, yüksek bir karıştırma kalitesine sahiptir. Yani ekstrüder aslen bir karıştırıcıdır. Dağıtıcı karıştırmanın amacı, ekstrüde ürünlerin nihai homojen bir bileşimini elde etmektir. Şekil 3 bu kavramı açıkça göstermektedir. İyi bir yayılma karışımının elde edilmesi çok daha zordur ve aglomerelerin veya erimiş polimer damlacıklarının boyutunu belirli boyutlara indirmeyi amaçlar [25, 26].



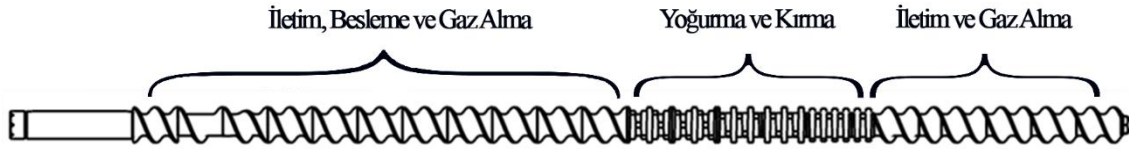
Şekil 3: Gri Alan Polimer, Mavi Daireler Karıştırılacak Parçacıklardır. A) Dağıtıcı Karıştırma: Vidaların Yapıları Sayesinde Öbekleşmelerin Homojen Olarak Polimer Matriste Dağılması; B) Dispersif Karıştırma: Vidalar Sayesinde Parçaların Daha Ufak Parçalara Ayrılması

Geri dönüştürülmüş malzemelerin işlenmeleri için genellikle farklı reolojiye sahip iki tür sıvının (erimiş formdaki plastikler) karıştırılması gerekir. Ekstrüzyon vidaları vasıtasıyla, kesme gerilmesi ve uzama gerilmesi, dağıtılması gereken malzeme parçacıklarına aktarılır [20, 26]. Şekil 4' de gösterilen mekanik etkilerle polimer yoğrulur ve katkılar polimer içerisine dağıtılır.



Şekil 4: Vidaların Ergimiş Polimere ve Katkılarına Uyguladığı Mekanik Etkiler

Uygulanan gerilmeler partikül kohezyon kuvvetlerinden daha yüksekse, damlacık deforme olur ve kırılarak daha küçük partikül boyutu (dispersiyon) oluşturur. İstenen gerilimin yoğunluğu, gerilme tipine (kesme/ uzama) ve karıştırılacak plastiklerin viskozite oranına bağlıdır. İyi tanımlanmış bir taşıma ve yoğurma elemanları dizisinden oluşan birlikte dönen çift vidalı ekstrüderin modüler vidaları, makine eksenine boyunca, kesme ve uzama gerilmelerinin yoğunluğunun doğru bir şekilde kalibrasyonunu mümkün kılar. Geri dönüştürülmüş plastik için tipik bir helezon konfigürasyonu malzeme besleme, eritme, dağıtıcı karıştırma ve yayıcı karıştırma bölümlerini içerir. Şekil 5'de ergimiş olarak gelen geri dönüştürülmüş plastiğin vidalarda izlediği yol verilmiştir.



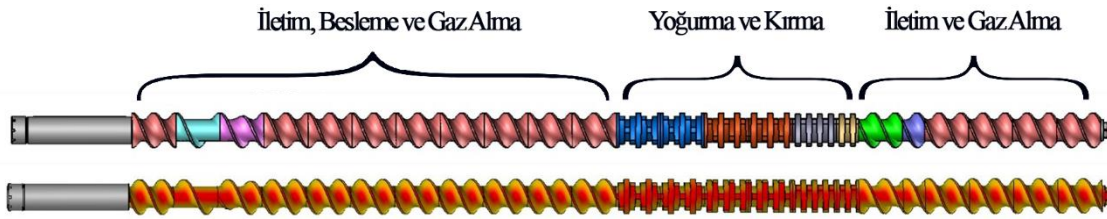
Şekil 5: Bu Çalışmada Belirlenen Vida Konfigürasyonu

Çalışma kapsamında ortaya çıkan ürünlerin mekanik özelliklerinin tayini (çekme mukavemeti, elastisite modülü ve kopma uzaması) Zwick/Roell Z020 cihazı kullanılarak ISO 527-2:2012 standardına göre yapılmıştır. Örneklerin fiziksel özellik analizleri altında, eriyik akış indeks (MFI) değerleri ISO 1133-1:2012 standardına, yoğunluk ölçümleri ISO 113-1:2019 standardına, sertlik ölçümleri ise ISO 868:2003 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Geri dönüşüm sonrası elde edilen örneklerin termal özellikleri ve bu

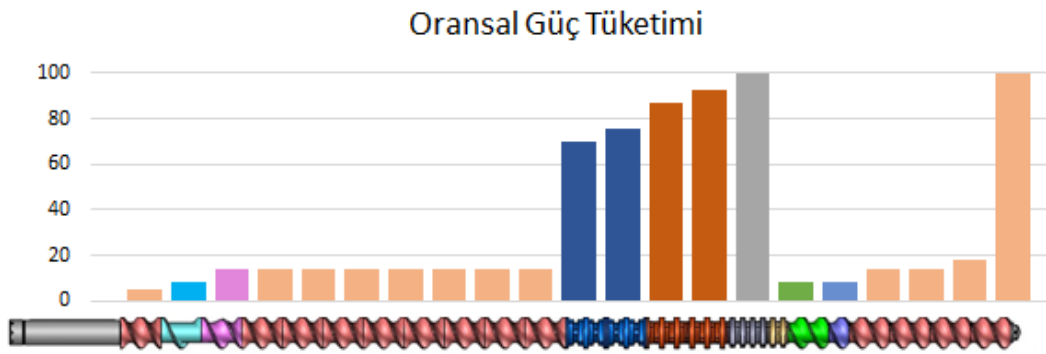
özelliklere bağlı yapısal bileşimlerinin tayini ISO 11357-3:2018 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Test Sonuçlarını karşılaştırmak için Petkim in “Ürün Teknik Özellikleri” tablosundaki orijinal ürün değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Tek vidalı sistemlerde vidanın enerji tüketimi ekstrüder çıkışına kadar sürekli olarak artış göstermektedir. Çift vidalı ekstrüderde ise bazı vida bölümleri diğer vida bölümlerine göre daha fazla enerji harcaması yapmaktadır. Şekil 6’da çalışma kapsamında belirlenen vida konfigürasyonunda hangi vida tiplerinde daha fazla zorlanma olduğu kırmızı yoğun bölgeler ile gösterilmiştir. Buna bağlı olarak enerji tüketimleri de vida bölgelerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Karıştırma, kırma ve yoğurma gibi özellikleri olan vidalar daha fazla güç tüketimi yapmaktadır. Bu durumdan bağımsız olarak ekstrüder çıkışında basınç birikmesi olarak bu alandaki vidalarında fazla güç tüketime sebep olduğundan bahsedilebilir. Şekil 7.’de çift vidalı ekstrüderin oransal olarak güç sarfiyatı olan bölgeleri verilmiştir.



Şekil 6: Kullanılan Vida Tiplerine Bağlı Olarak Kırmızı Alanlar Daha Fazla Tork İhtiyacının Olduğu Bölgeleri Göstermektedir.



Şekil 7: Çift Vidalı Ekstrüderde Vida Konfigürasyonuna ve İç Basıncılara Bağlı Olarak Güç Tüketen Bölgeler (Oransal Olarak)



Tablo 1' de %80 oranında atık plastikten elde edilmiş ürünün mekanik özellikleri Petkim kataloglarındaki benzer içerikli saf Polipropilen ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda akma dayanımlarında değerler saf Polipropilene yaklaşabilmiştir. Sertlik değerlerinde ve darbe emme özellikleri bakımından aynı veya daha üstün özellikler bulunmuştur. Tablo 2 'de fiziksel özellikler üzerine bir karşılaştırma tablosu gösterilmiştir. Geri dönüştürülebilirlik verisi olarak akış hızı önemli parametrelerden biridir ve bu noktada saf malzemeye benzer bir akış hızı elde edildiği görülmektedir. Yoğunluk olarak %13'lere varan bir artış gözlemlenmiştir. Tablo 3 'te katkılama sonucunda numune içeriğinin kimyasal analizi verilmiştir.

Tablo 1: Mekanik Özelliklerin Kıyaslanması

	PETOLEN 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

Tablo 2: Fiziksel Özellikler

	PETOLEN 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: 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

Bu çalışmada termoplastik malzemelerin geri dönüşüm prosesinde kompaund üretimi için tandem bir yapı geliştirilmiştir. Bu yapıdaki çift vidalı ekstrüderin içindeki vidaların tiplerinden ve bu tiplerin hangi görevle ekstrüderde bulunduğuna değinilmiştir. Ayrıca vidaların amaca uygun yerleşim şekli genel hatlarıyla ortaya konmuştur. Bu vida yerleşiminin güç gereksinimi ve ekstrüderin farklı kısımlarının çektiği enerjiler de (oransal olarak) incelenmiştir. Çalışma sonucunda ortaya çıkan ürünün mekanik



dayanımları ve fiziksel içeriklerinin açısından Petkim kataloglarından alınan saf bir polipropilen ile karşılaştırması yapılmıştır.

Tandem geri dönüşüm sisteminin çıktıları değerlendirildiğinde:

- Atık termoplastikten tek bir ergime ile kompaund üretimi sağlanmış ve atık plastiğin geri dönüşüm ömrü iki kat uzatılmıştır.
- Bu sistemle kompaund elde edilmesi amacıyla atık plastiğin tek sefer ergitilmesi gerektiğinden enerji tüketimi yarı yarıya azaltılmış ve önemli bir enerji tasarrufu sağlanmıştır.
- Enerji tasarrufu sağlanmasıyla elde edilen kompaundun üretim maliyeti düşürülmüştür.
- Ergimiş malzeme direkt olarak sisteme girdiğinden vidalı mil konfigürasyonu kısalmış ve hammadde, ilk yatırım maliyeti ve zaman tasarrufu sağlanmıştır.
- Prosesten çıkan ürünün kıyaslanması sonucunda akma dayanımı değerleri saf Polipropilene yaklaşabilmiştir. Sertlik değerlerinde ve darbe emme özellikleri bakımından ise aynı veya daha üstün özellikler elde edilebilmiştir..

5. Teşekkür

Bu çalışma TEYDEB 3211310 no 'lu "Otomotivde Termoplastik Malzemeleri Geri Dönüştürebilerek Yüksek Performanslı Malzeme Geliştirecek Ekstrüzyon Sisteminin Tasarımı Ve Prototip İmalatı" adlı projede gerçekleştirilmiştir. Verilen destek nedeniyle TÜBİTAK a teşekkürü bir borç biliriz.

Referanslar

- [1] K. Ragaert, L. Delva, and K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste," *Waste Manag.*, vol. 69, no. August, pp. 24–58, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [2] M. Auer *et al.*, "Quality Aspects in the Compounding of Plastic Recyclate," *Recycling*, vol. 8, no. 1, p. 18, Jan. 2023, doi: 10.3390/recycling8010018.
- [3] D. Hidalgo-Carvajal, Á. H. Muñoz, J. J. Garrido-González, R. Carrasco-Gallego, and V. Alcázar Montero, "Recycled PLA for 3D Printing: A Comparison of Recycled PLA Filaments from Waste of Different Origins after Repeated Cycles of Extrusion," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 17, p. 3651, Sep. 2023, doi: 10.3390/polym15173651.



- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. Y. Khalid, Z. U. Arif, W. Ahmed, and H. Arshad, "Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 31, no. September 2021, p. e00382, 2022, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00382.
- [7] G. Kibria, N. Imtiaz, M. Rafat, S. Huy, Q. Nguyen, and M. Mourshed, *Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management*, vol. 17, no. 1. Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/s41742-023-00507-z.
- [8] 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.
- [9] "Çift Vidalı Ekstrüderler." www.monomex.com
- [10] B. Min, X. Gao, H. Sung, and W. Ryol, "Flow modeling for conveying sections in a co-rotating twin-screw extruder based on energy dissipation rate for continuous mixing of lithium-ion battery slurries," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 281, no. July, p. 119113, 2023, doi: 10.1016/j.ces.2023.119113.
- [11] M. Ohara *et al.*, "Experimental and Numerical Simulation Study of Devolatilization in a Self-Wiping Corotating Parallel Twin-Screw Extruder," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 11, p. 2728, Nov. 2020, doi: 10.3390/polym12112728.
- [12] S. Bakalis and M. V Karwe, "Velocity distributions and volume flow rates in the nip and translational regions of a co-rotating, self-wiping, twin-screw extruder," *J. Food Eng.*, vol. 51, no. 4, pp. 273–282, Mar. 2002, doi: 10.1016/S0260-8774(01)00068-1.
- [13] J. M. Justino Netto *et al.*, "Design and validation of an innovative 3D printer containing a co-rotating twin screw extrusion unit," *Addit. Manuf.*, vol. 59, no. October, p. 103192, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103192.
- [14] M. J. Rahimi, H. Sitaraman, D. A. Sievers, J. J. Stickel, E. Akbari, and M. W. Liberatore, "Simulations of biomass compression-screw feeding using a compressible non-Newtonian



- constitutive model," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 281, no. March, p. 119117, 2023, doi: 10.1016/j.ces.2023.119117.
- [15] K. Kohlgrüber, *Co-Rotating Twin-Screw Extruders: Fundamentals*. Munich: Hanser Publications, 2019.
- [16] W. Roland *et al.*, "ScienceDirect Model the Drag-Flow Capacity of Co-Rotating Twin- A Hybrid Approach to Model Kneading Blocks of A Hybrid Approach to Model Capacity Screw Kneading Blocks of Co-Rotating Twin- A Hybrid Approach to Model Capacity Blocks Screw Extruder Kneading," *IFAC Pap.*, vol. 55, no. 20, pp. 121–126, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.082.
- [17] A. Eitzlmayr *et al.*, "Mechanistic modeling of modular co-rotating twin-screw extruders," *Int. J. Pharm.*, vol. 474, no. 1–2, pp. 157–176, 2014, doi: 10.1016/j.ijpharm.2014.08.005.
- [18] H. Li, M. R. Thompson, and K. P. O'Donnell, "Understanding wet granulation in the kneading block of twin screw extruders," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 113, pp. 11–21, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.ces.2014.03.007.
- [19] R. R. Rao *et al.*, "Metamorphosis of Twin Screw Extruder-Based Granulation Technology: Applications Focusing on Its Impact on Conventional Granulation Technology," *AAPS PharmSciTech*, vol. 23, no. 1, p. 24, Jan. 2022, doi: 10.1208/s12249-021-02173-w.
- [20] S. Bandari, D. Nyavanandi, V. Raman, and K. Yadav, "Continuous twin screw granulation – An advanced alternative granulation technology for use in the pharmaceutical industry," *Int. J. Pharm.*, vol. 580, no. March, p. 119215, 2020, doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.119215.
- [21] P. Srinivasan, M. Almutairi, A. A. A. Youssef, A. Almotairy, S. Bandari, and M. A. Repka, "Numerical simulation of five different screw configurations used during the preparation of hot-melt extruded Kollidon® and Soluplus® based amorphous solid dispersions containing indomethacin," *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 85, no. May, p. 104561, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jddst.2023.104561.
- [22] A. Eitzlmayr and J. Khinast, "Co-rotating twin-screw extruders: Detailed analysis of conveying elements based on smoothed particle hydrodynamics . Part 1: Hydrodynamics," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 134, pp. 861–879, 2015, doi: 10.1016/j.ces.2015.04.055.
- [23] P. G. Andersen and F. Lechner, "Co-Rotating Fully Intermeshing Twin-Screw Compounding: Advancement for Improved Performance and Productivity," *Plast. Eng.*, vol. 69, no. 4, pp. 32–38, 2013, doi: 10.1002/j.1941-9635.2013.tb00988.x.
- [24] A. Ghosh, "Performance modifying techniques for recycled thermoplastics," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 175, no. 105887, pp. 1–26, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105887.
- [25] T. Liu, N. Kittikunakorn, Y. Zhang, and F. Zhang, "Mechanisms of twin screw melt



granulation," *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 61, no. August, p. 102150, 2021, doi: 10.1016/j.jddst.2020.102150.

- [26] U. Nandi, V. Trivedi, S. A. Ross, and D. Douroumis, "Advances in Twin-Screw Granulation Processing," *Pharmaceutics*, vol. 13, no. 5, p. 624, Apr. 2021, doi: 10.3390/pharmaceutics13050624.