Technological Applied Sciences Status : Research Article
ISSN: 1308 7258 Received: 26.12.2024
Article ID: 2A0205 Accepted: 25.04.2025

İkbal Ay Keçeli
Çankırı Karatekin University, iay@karatekin.edu.tr, Çankırı-Türkiye
Bahattin Aydınlı
Kastamonu University, baydinli@kastamonu.edu.tr, Kastamonu-Türkiye

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2025.20.2.2A0205	
ORCID ID	0000-0002-1125-7552	0000-0002-6525-4162
Corresponding Author	İkbal Ay Keçeli	

AYÇİÇEĞİ KÜSPESİNİN PARÇACIK BOYUTUNUN PİROLİZ ÜRÜN VERİMİNE ETKİSİ

ÖZ

Yapılan çalışmada, biyokütle olarak kullanılan ayçiçeği küspesinin elenmesi sonucunda elde edilen farklı boyutlardaki örneklerin 450°C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilen geleneksel piroliziyle elde edilen katı, sıvı ve gaz ürünlerinin verimlerinde parçacık boyutunun etkisi incelenmiştir. Altı farklı boyutta hazırlanan numuneler (150µm den 1.18mm'ye kadar) 450°C'de pirolize edilmiştir. Piroliz sonucunda, parçacık boyutunun ürün dağılımı üzerinde önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar; orta boyutlu (600µm) örneklerde en yüksek biyokömür veriminin (%31.5), en küçük boyutlu numunede (A-150µm) %48 ile en yüksek sıvı ürün veriminin ve en büyük parçacıkta (1.18mm) ise %31.5 ile en yüksek gaz veriminin olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, parçacık boyutunun ısı transferi ve tepkime kinetiğine etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Ayçiçeği küspesi gibi endüstriyel tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesi açısından optimum parçacık boyutunun seçilmesi süreç verimliliğinin ve ürün kalitesinin artmasına sebep olacaktır. Ayrıca, çalışmada atıklardan elde edilen biyokütle kaynaklarının enerjiye kazandırılmasıyla birlikte karbon içeriği yüksek ürünlere dönüştürülerek sürdürülebilir üretim açısından önemli bir katkı oluşturacaktır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Piroliz, Biyokömür, Biyoyağ, Biyogaz

EFFECT OF SUNFLOWER MEAL PARTICLE SIZE ON PYROLYSIS PRODUCT YIELD

ABSTRACT

In this study, the effect of particle size on the yields of solid, liquid, and gas products obtained by conventional pyrolysis of different-sized samples obtained as a result of sieving sunflower meal used as biomass at a constant temperature of 450°C was investigated. Samples prepared in six different sizes (from 1.18mm to 150µm) were pyrolyzed at 450°C. As a result of pyrolysis, it was observed that particle size played an important role on the product distribution. The results showed that the highest biochar yield (31.5%) was in the medium-sized (600µm) samples, the highest liquid product yield was 48% in the smallest sized sample (A-150µm) and the highest gas yield was 31.5% in the largest particle (1.18mm). These findings concluded that particle size affects heat transfer and reaction kinetics. Selecting the optimum particle size for the conversion of industrial agricultural wastes such as sunflower meal into energy will increase process efficiency and product quality. In addition, the study will make an important contribution to sustainable production by converting biomass resources obtained from waste into energy and into products with high carbon content.

Keywords: Biomass, Pyrolysis, Biochar, Biooil, Biogas

How to Cite:
Ay Keçeli, İ. ve Aydınlı, B., (2025). Ayçiçeği küspesinin parçacık boyutunun piroliz ürün verimine etkisi. Technological Applied Sciences, 2025, 20(2):53-60, DOI: 10.12739/NWSA.2025.20.2.2A0205.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nüfusun artması ile birlikte son yıllarda ki enerji ihtiyacı fosil yakıtların sınırlı olması ve çevreye olan olumsuz etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ihtiyacı arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının aynı zamanda sürdürülebilir olması da önem arz etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan ve son yıllarda önemi giderek artan biyokütle, özellikle çevresel olumsuzlukları ortadan kaldırmak, ekonomik açıdan da fayda sağlamak ve endüstride kullanılan tarım ürünlerinden doğan atıkları değerlendirmek anlamında önem kazanmaktadır. Aynı zamanda atmosfere salınan karbon miktarının dengelenmesi ve kaynak olarak kolay erişilebilir olması da tercih sebeplerindendir [1 ve 2]. Biyokütle; tarımsal artıklar, odun içeren malzemeler, hayvansal atıklar ve endüstriyel bitkisel kalıntılar gibi organik maddeleri içeren karbon temelli malzemeler olarak tanımlanabilir [2]. Selüloz, hemiselüloz ve lignin içeren ayçiçeği küspesi, pirinç sapı, çeltik kabuğu, zeytin prinası gibi gıda endüstrisi ile oluşan atıklar biyokütle kaynaklarından bazıları olmakla birlikte yüksek potansiyel sergilemektedir [3].

Ayçiçeği küspesi, yağ üretiminden sonra atık olarak kalan ve çoğunlukla hayvan yemi olarak değerlendirilen bir yan üründür. İçerdiği yüksek organik madde, selüloz, hemiselüloz ve lignin oranları sayesinde biyokütle olarak da enerji üretimi açısından büyük bir etkiye sahiptir. Ayçiçeği küspesi, özellikle biyokütle pirolizinin yanı sıra gazlaştırma ve yanma gibi termokimyasal işlemlerde de kullanılmak üzere değerlendirilmektedir [4]. Biyokütleyi enerjiye dönüştürmek için kullanılan en önemli işlemlerden biri olan piroliz, oksijensiz ortamda gerçekleştirilen termokimyasal bir yöntemdir. Piroliz yöntemiyle yüksek sıcaklıklarda biyokütlenin parçalanmasıyla katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilir ve bu ürünlere biyoyağ (biooil), biyogaz ve biyokömür (biochar) denir. Pirolizde bekleme süresi, ısıtma hızı ve ısıtma sıcaklığı aralığına göre türlere ayrılır. Bunlar yavaş, hızlı ve flaş olarak isimlendirilir [5 ve 6]. Yavaş piroliz genellikle düşük sıcaklıkta (300-500°C) ve uzun bekletme süresiyle (dakikalar-saatler) daha fazla biyokömür sağlarken, hızlı piroliz daha yüksek ısıtma hızı ve sıcaklıklarda (450-550°C) ve kısa sürelerde (saniyeler) daha fazla sıvı ürün elde edilmesini hedeflemektedir [7]. Flaş piroliz de ise daha kısa sürelerde (milisaniyelerde) ve daha yüksek sıcaklıkta (800-1000°C) daha yoğun bir gaz üretimi sağlamaktadır [8].

Piroliz işlemi esnasında kullanılan biyokütlenin partikül boyutu da piroliz ürün verimini etkileyen önemli bir parametredir. Aynı zamanda reaktör içindeki homojenlik ve ısı iletimi de ürün kalitesini etkileyen diğer faktörlerdendir [9 ve 10]. Küçük parçacıklar daha hızlı ısınırlar ve reaksiyonun daha aktif gerçekleşmesini sağlarlar fakat bu durum biyo-yağ ve biyogaz verimini artırırken biyokömür oranını azaltabilmektedir [10]. Bu da parçacık boyutunun piroliz kinetiği üzerindeki etkisinin önemini açıkça göstermektedir [11].

Bu çalışmada endüstriyel tarımsal atıkların literatürdeki bilgiler ışığında biyokütle kaynağı olarak pirolizi sonucunda enerjiye dönüştürülürken parçacık boyutunun biyo ürünlerin verim ve kalitesine etkileri sistematik açıdan araştırılmaktadır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yeni bir boyut kazandırmak ve buna bağlı olarak endüstriyel tarımsal atıkların değerlendirilmesiyle sürdürülebilirlik açısından kalkınma hedeflerine katkı sağlamak aynı zamanda da fosil yakıtlar gibi çevreye olan olumsuz etkilerden kurtularak çevreci bir kaynak araştırmasına girmek zorunlu bir hal almıştır. Endüstriyel tarımsal atıklar bu konuda gelecek vadetmektedir. Biyokütle sınıfına giren bu atıklar piroliz yöntemi ile termokimyasal olarak

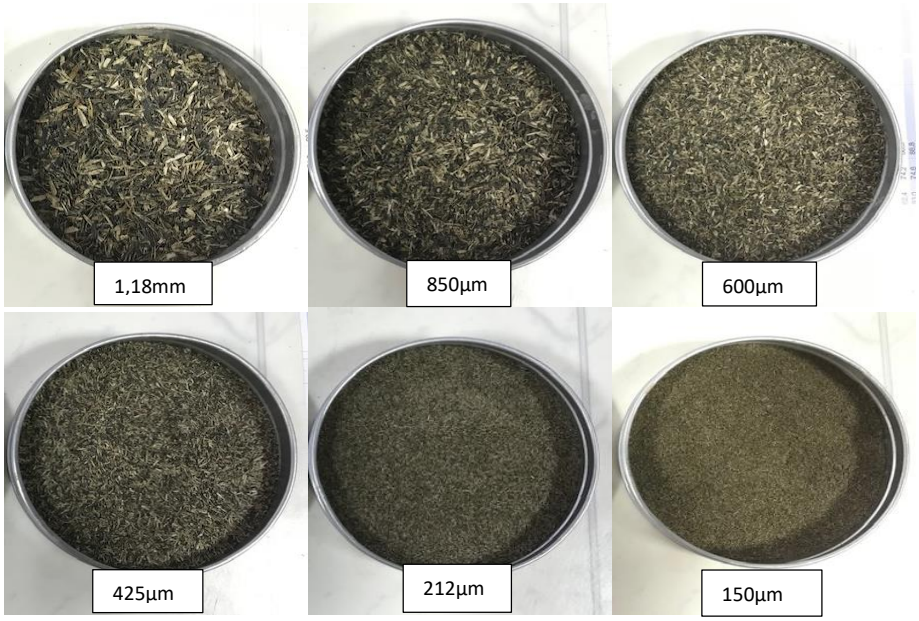
dönüştürülerek önemli ürünler elde edilmektedir. Fakat piroliz işleminin süreç verimliliği, kullanılan biyokütlenin fiziksel özelliklerine yani özellikle de parçacık boyutuna bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Bu nedenle, çalışmanın amacı; endüstriyel tarımsal atık olarak değerlendirilmek istenen biyokütlelerin piroliz yoluyla yani termokimyasal olarak dönüştürülerek enerjiye çevrilmesinde parçacık boyutunun ürün verim dağılımına etkilerinin deneysel ve teorik olarak incelenmesidir. Hedef ise optimum parçacık boyutunun belirlenmesiyle piroliz sürecinin performansını arttırıp, enerji verimliliğini yükselterek sürdürülebilir bir kaynak olan biyokütle teknolojisine katkı sağlamaktır. Elde edilen bulgularla hem akademik literatüre katkı sağlanacak hem de uygulamalı olarak enerji sistemlerinin tasarımına ışık tutacaktır.

Önemli Noktalar (Highlights):

- Endüstriyel tarımsal atığın biyokütle olarak kullanıldığı pirolizden elde edilen ürünlerin verimliliği biyokütlenin parçacık boyutuna bağlı olması bakımından incelenmiştir.
- Hızlı piroliz için oluşturulan koşulların en uygun parçacık boyutları belirlenerek verimi artırmadaki öneriler geliştirilmiştir.
- Sürdürülebilirlik açısından atıklardan elde edilen biyokütlenin enerji kaynağı olarak değerlendirilmesiyle hem atık yönetimine hem de yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Endüstriyel tarımsal atıklar sonucunda ek ürün sayılabilecek nitelikteki atık olan ayçiçeği posası ya da diğer bir deyişle ayçiçeği küspesi Trakya bölgesinde bulunan özel bir yağ üretim tesisinden temin edildi.

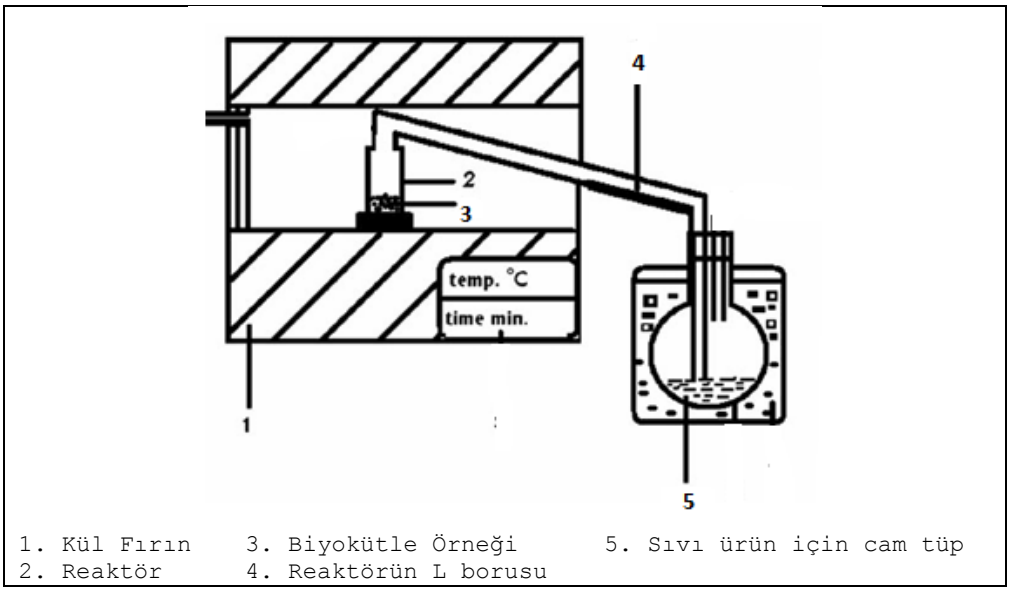


Şekil 1. Farklı boyutlardaki elekler üzerinde kalan biyokütle örnekleri
(Figure 1. Biomass samples retained on sieves of different sizes)

Ayçiçeği küspesi ilk olarak nemli olma durumu söz konusu olduğundan 7-10 gün boyunca oda sıcaklığında kurutuldu. Küspe içerisinde büyük boyutlu posalar olduğu için kurutulduktan sonra seramik havan ile

öğütüldü. Daha sonra da elek analizi setinde dane boyutuna ayrılacak şekilde elendi. Eleme işleminde 1.18mm-850µm-600µm-425µm-212µm-150µm ölçekli elekler kullanıldı. Şekil 1'de görüldüğü gibi tane boyutuna göre elekler üzerinde kalan hammadde ayrı ayrı kaplara konarak ortam sıcaklığında muhafaza edildi.

Piroliz işlemi özel tasarlanmış bir reaktör ile gerçekleştirildi. Yüksekliği 127.0mm, iç çapı 17.0mm ve dış çapı 25.0mm olan paslanmaz çelik silindirik reaktörün [12] önceden ısıtılmış 450°C deki kül fırınına dikey olarak yerleştirilmesiyle dönüşüm başlamış oldu. İlk olarak 1,18mm gözenek çaplı elek üzerinde kalan numuneden başlandı ve daha sonra sırayla 850µm; 600µm; 425µm, 212µm ve150µm elekleri üzerinde kalan biyokütleler 450°C sıcaklıkta pirolize tabi tutuldu.



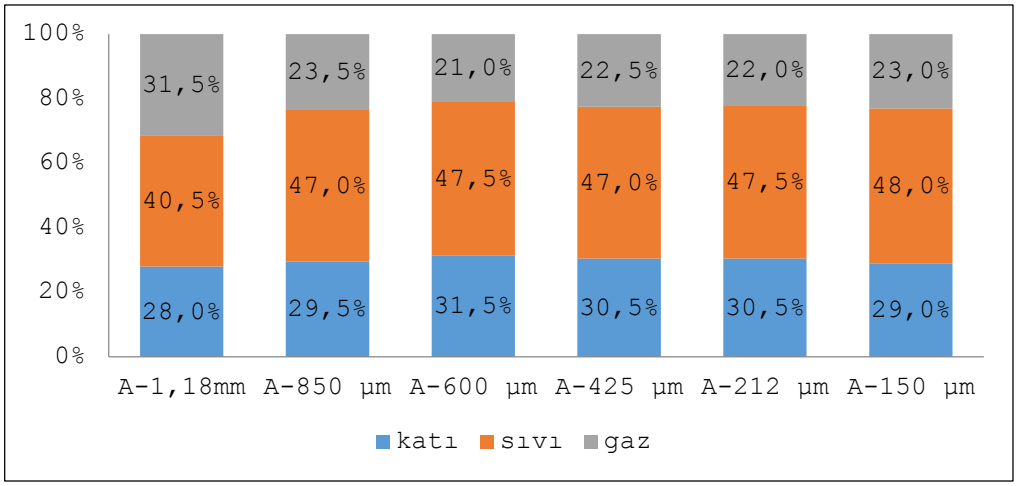
1. Kül Fırın 3. Biyokütle Örneği 5. Sıvı ürün için cam tüp
2. Reaktör 4. Reaktörün L borusu

Şekil 2. Deneysel aşamaların şematik gösterimi [13]
(Figure 2. Schematic representation of the experimental stages)

Şekil 2'de şematik olarak gösterilen piroliz düzeneğinde önceden ısıtılmış 1 numaralı kül fırınına 2 gr'lık biyokütle numunesinden tartılıp yerleştirildi. Şekil 1 de görülen önceden tartılmış 2 numaralı reaktöre yerleştirildi. Yine önceden tartılmış 4 numaralı L boru reaktörle birleştirildi ve daha sonra fırına dikey konumda yerleştirildi. Sıvı ürünün toplanabilmesi için önceden tartılmış tüp L borunun çıkış ucuna konumlandırıldı ve oksijensiz ortamda piroliz işlemine başlandı. Deneme için yapılan piroliz işlemlerinde sıvı ürün çıkışı neredeyse 20 dakikaya kadar devam ettiği gözlendiğinden piroliz işlemi için bekletme süresi 20 dakika olarak belirlenmiştir. İşlem sonunda sıvı ürünü toplandığı tüp tekrar tartılarak başlangıçtaki kütlesi ile arasındaki fark alınarak sıvı ürün miktarı tespit edildi. Katı ürün için reaktör oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Gaz ürün toplanmadı fakat ürün miktarı sıvı ve katı ürün miktarlarının toplanıp başlangıçtaki ürün kütlesinden çıkartılarak sadece miktarı tespit edildi. Reaktör soğuduktan sonra L boru reaktörden ayrılarak reaktör içindeki katı ürün miktarının kütlesi tartılarak bulundu. L boruda pirolizden önce ve sonra tartılarak içerisindeki kalan sıvı kütlesi tespit edildi. Bu işlem farklı boyuttaki diğer numune için de tekrarlandı. Ürünlerin kütleleri başlangıçtaki numune miktarına ayrı ayrı bölünerek katı, sıvı, gaz ürünlerin yüzdelik oranları hesaplandı.

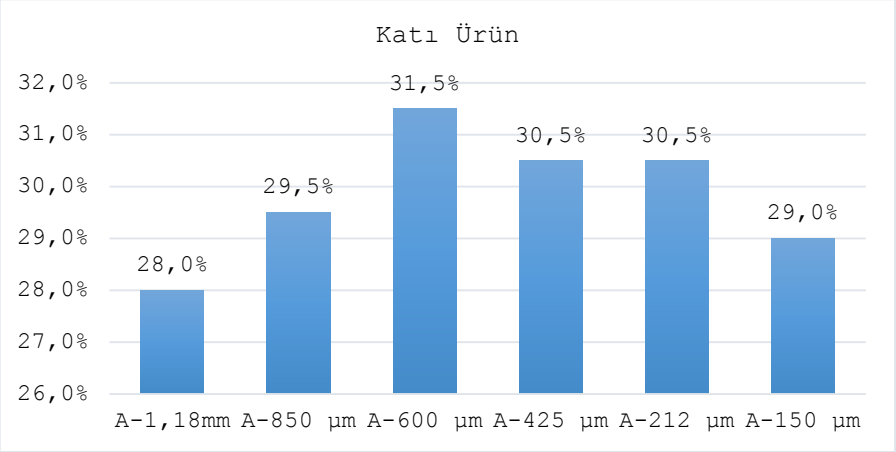
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

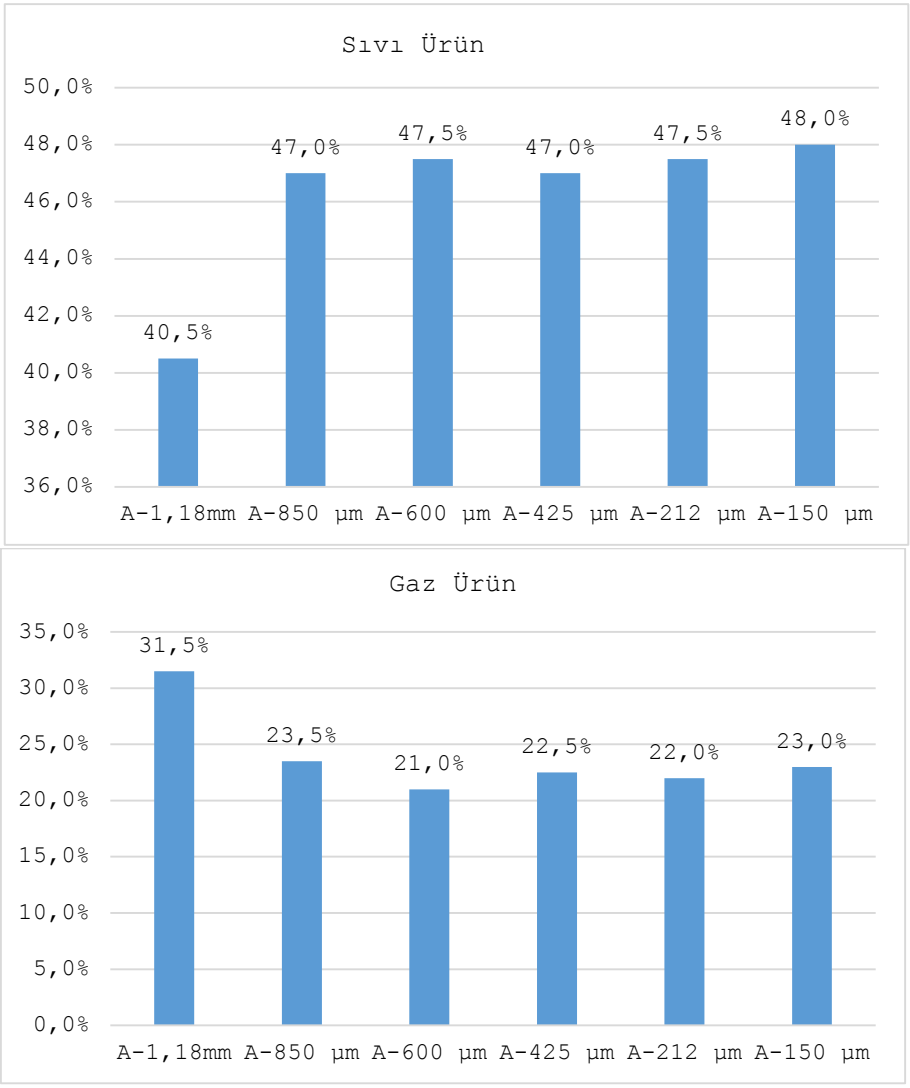
Biyokütle boyutunun 450°C sıcaklıkta gerçekleştirilen pirolizlerinin ürün verimine etkisini incelemek amacıyla hazırlanmış olan 1.18mm-850µm-600µm-425µm-212µm-150µm gözenek boyutlu elekler üzerinde kalan ayçiçeği küspesi örneklerinin pirolizleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz işlemlerinden sonra elde edilen ortalama ürün verimleri Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Farklı boyutlardaki piroliz ürün verimleri
(Figure 3. Pyrolysis product yields of different sizes)

Ürün verimlerine bakıldığında 450°C'de farklı boyuttaki elekler üzerinde kalan biyokütle örneklerinin pirolizi sonucunda elde edilen ürün oranlarının parçacık boyutuyla nasıl değiştiği grafikte görülmektedir. Grafiğe göre, parçacık boyutu küçük olan örneklerde ısı daha hızlı ve daha homojen bir şekilde iletildiği için pirolizin daha etkili bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu da uçucu gaz maddelerin çıkışını hızlandırıp, gaz ve sıvı ürün veriminin artmasına, katı ürün veriminin ise azalmasına neden olabilir. Büyük parçacık boyutlu örneklerde ise ısı iletimi daha yavaş olduğundan parçacıkların iç kısmına daha geç iletilir ve bu da pirolizin tam olarak gerçekleşmemesine yol açabilmektedir. Piroliz için 450°C orta sıcaklık değeri olduğundan küçük boyutlu biyokütlelerin pirolizi sonucundaki sıvı ve gaz ürünler bakımından iyi bir değerdir. Büyük boyutlu biyokütlelerde ise yavaş bir dönüşüm olacağından daha yüksek karbon içeriği yani katı ürün gözlenebilir.





Şekil 4. Farklı boyutlardaki katı, sıvı ve gaz ürün verimi
(Figure 4. Solid, liquid and gas product yields of different sizes)

Şekil 4 de ayrıca çizilmiş katı ürün grafiğine bakıldığında 450°C'deki en yüksek ürün verimi A-600µm gözenek boyutlu elekte kalan numunede görülmektedir. A-425µm ve A-212µm boyutundaki sonuçlarda katı ürün oranı dengede kalmakla birlikte daha sonra parçacık boyutu küçüldükçe katı ürün verimi düşmektedir. Katı ürün veriminin en yüksek olduğu A-600µm gözenek boyutlu elekte kalan numunede gözlemlenmesinin sebebi bu boyuttaki biyokütlelerin ısıyı daha düzgün ve dengeli almasıyla karbonlaşmanın daha verimli bir şekilde gerçekleşmesidir.

Sıvı ürün grafiğinde parçacık boyutu küçüldükçe pirolizde sıvı ürün oranları artmaktadır. En yüksek sıvı ürün oranı A-150µm boyutlu elek üzerinde kalan numunede görülmektedir. Aslında parçacık boyutu µm düzeyine düştükten sonra sıvı ürün veriminin arttığı gözlenmektedir. Bu da parçacık boyutu küçüldükçe piroliz esnasındaki uçucu sıvıların maksimum düzeyde çıkabildiğini göstermektedir.

En yüksek gaz ürün verimi parçacık boyutu en büyük olan örnekte görülmektedir. Parçacık boyutu küçüldükçe gaz verimi azalmaktadır. Parçacık boyutu büyük olan numunelerde ısının parçacığın merkezine geç ulaşması sonucu karbonlaşma ve buna bağlı olarak artan gaz çıkışı oranının diğerlerine göre daha fazla olduğu düşünülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Çalışmada 450°C sabit sıcaklıkta farklı boyuttaki elekler üzerinde kalan biyokütle örneklerinin pirolizinden elde edilen ürünlerin (katı, sıvı ve gaz ürünler) verimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar; parçacık boyutunun ısı transferini etkilediği katı, sıvı ve gaz ürünlerin çıktısı olan oranlardan görülmektedir. Büyük boyutlu parçacıklarda ısının merkeze kadar transferinin geç olması ürün verimlerinden gözlenmektedir [14].

A-600 µm boyutlu elekte kalan biyokütleden elde edilen katı ürün (biyokömür) oranının %31.5 olduğu gözlemlenmiş ve bu durumda bu boyutun karbonlaşma için ideal bir parçacık boyutu olabileceğini düşündürmektedir.

Biyoyağ için en yüksek verim %48 olduğu parçacık boyutu A-150 µm olan elek üzerinde kalan biyokütleden elde edilmiştir. Sonuç literatürle de desteklenmektedir. Hou vd. 2021 [15] de yapmış olduğu çalışmada küçük parçacık boyutlu biyokütlelerin daha kısa süredeki ısı transferi sayesinde uçucu maddelerden daha büyük parçacık boyutlarına göre çok daha hızlı ve verimli bir şekilde dönüşmesine olanak tanıdığını desteklemektedir.

Biyogaz için ise verimin en yüksek olduğu %31.5 ile A-1.18mm'lik elek üzerinde kalan biyokütlede gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum büyük parçacık boyutlu biyokütlelerin ısı transferindeki gecikmenin gaz ürün verimini arttırabileceği şeklinde açıklanabilir olması Di Blasi vd. 2007'de [16] yapmış oldukları çalışmada da görülmektedir.

Sonuç olarak ürün türüne bağlı olarak piroliz işleminde parçacık boyutunun ürün verimliliğini etkilediği görülmekte ve piroliz sonucundaki araştırılmak istenen ürün fazının optimum sonuç için dikkate alınması gerektiği önerilmektedir. Ayrıca pirolizden daha verimli bir sonuç elde edebilmek için sadece parçacık boyutu değil farklı sıcaklık aralıkları, ısıtma hızı, piroliz süresi ve katalizör eklenmesi gibi diğer parametrelerinde göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi önerilmektedir.

NOT (NOTICE)

Bu çalışma, İkbal Ay Keçeli tarafından Prof.Dr. Bahattin Aydınlı akademik danışmanlığında yürütülen "Borikasit Katkılı Ayçiçek Atığından Elde Edilen Karbon Bazli Malzemelerin Karakterizasyonu" başlıklı Doktora Tezinden türetilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Yazarlar bu çalışma için herhangi bir mali destek almadığını beyan etmiştir.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarları bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Demirbaş, A., (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. Energy Conversion and Management, 42(11), 1357–1378. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0

[2] Mohan, D., Pittman, C.U., and Steele, P.H., (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. Energy & Fuels, 20(3), 848–889. https://doi.org/10.1021/ef0502397.

[3] Aguilar, G., Muley, P.D., Henkel, C., and Boldor, D., (2015). Effects of biomass particle size on yield and composition of pyrolysis bio-oil. AIMS Energy, 3(4):838–850. https://doi.org/10.3934/energy.2015.4.838
[4] Sarıoğlu, S. ve Aktaş, T., (2024). Ayçiçeği Küspesinin Katalizörlü ve Katalizörsüz Koşullarda Hızlı Pirolizinin Ürün Verimleri ve Özelliklerine Etkisi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 21(1):1-14.
[5] Bridgwater, A.V., (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38:68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048
[6] Tripathi, M., Sahu, J.N., and Ganesan, P., (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 467–481. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122
[7] Zhou, H., Li, X., Liu, Q., and Zhang, Z., (2023). Fast pyrolysis of Paulownia wood: Influence of particle size on product yield and characteristics. Energies, 16(3):1104.
[8] Mohan, D., Pittman, C.U., and Steele, P.H., (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. Energy & Fuels, 20(3): 848–889. https://doi.org/10.1021/ef0502397.
[9] Kowalewski, K., Gašparović, M., and Duić, N., (2023). Influence of particle size on the pyrolysis of various biomass types: A kinetic and thermodynamic analysis. Processes, 11(10):2735. https://doi.org/10.3390/pr11102735
[10] Zhang, Y., He, M., and Li, S., (2023). Experimental and modeling investigation of particle size effect in biomass pyrolysis. Energy Conversion and Management, 283, 116935. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116935
[11] Kumar, B.K. and Goyal, H., (2024). Impact of particle-scale models on CFD–DEM simulations of biomass pyrolysis. Reaction Chemistry & Engineering, 9, 2552–2568. https://doi.org/10.1039/D4RE00086B
[12] Çağlar, A. and Demirbaş, A., (2002). Hydrogen rich gas mixture from olive husk via pyrolysis. Energy Conversion and Management, 43(1):109-117.
[13] Caglar, A. and Aydinli, B., (2009). Isothermal co-pyrolysis of hazelnut shell and ultra-high molecular weight polyethylene: The effect of temperature and composition on the amount of pyrolysis products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 86(2):304-309.
[14] Wu, K., Lin, Y., and Zuo, Y., (2023). Pyrolysis characteristics of biomass under varying particle sizes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 173:105701. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105701
[15] Hou, X., Li, Z., and Zhang, Z., (2021). Selectively producing acetic acid via boric acid-catalyzed fast pyrolysis of woody biomass. Catalysts, 11(4):494.
[16] Di Blasi, C., Branca, C., and Galgano, A., (2007). Flame retarding of wood by impregnation with boric acid–pyrolysis products and char oxidation rates. Polymer Degradation and Stability, 92(5):752-764.