



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Derleme Makale

Biyokütlenin Torrefaksiyonunda Güneş Enerjisi Kullanımı

Gizem ÖZER^{*1}, Neslihan DURANAY²,

¹Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği ABD, 23200, Elazığ, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 23200, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: 9314gizem@gmail.com

Öz: Yüzyıldan kısa bir süreçte yenilenebilen, çeşitli atıkları ve bitkileri içeren biyokütle, çevresel sorunları ve enerji ihtiyacını karşılayabilen bir enerji kaynağıdır. Ancak biyokütlenin düşük enerji yoğunluğu ve güçlü hidrofobik yapı gibi dezavantajları vardır, bu da yüksek biyokütle dönüşümü ve nakliye maliyetlerine neden olur. Bu nedenle torrefaksiyon ön işlemi, biyokütlenin kalitesini ve yakıt olarak kullanılabilirliğini artırmak için gerekir. Torrefaksiyon, genellikle fosil yakıtların yakılmasıyla sağlanan enerji kaynağına ihtiyaç duyar. Enerjinin yenilenemez enerji kaynakları tarafından sağlanması, torrefaksiyon işleminin enerji verimliliğini etkiler. Bu sorun güneş enerjisinin kullanılmasıyla çözülebilmektedir. Solar torrefaksiyon olarak adlandırılan bu ön işlem, herhangi bir karbonlu ham maddenin güneş enerjisi kullanılarak katı, sıvı ve gaz halindeki ürünlere dönüşmesini sağlar. Solar ve elektrikli torrefaksiyonda katı ve enerji verimi yüzdeleri birbirine yakındır. Bir literatür örneğine bakıldığında ortalama katı veriminin elektrik ısıtmalı torrefaksiyonda %43.2, solar torrefaksiyonda %42.9 ve enerji veriminin elektrikli torrefaksiyonda %50.8, solar torrefaksiyonda %51.3 olduğu görülmüştür. Her iki sistemde verimler birbirine yakın iken solar torrefaksiyonun öne çıkan avantajı enerji tasarrufudur. Kaynak olarak güneş enerjisinin kullanıldığı solar torrefaksiyon enerji ve yakıt üretmek için karbon açısından zengin atıkları kullandığından son zamanlarda oldukça dikkat çekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyokömür üretimi, Solar torrefaksiyon, Yenilenebilir enerji

Use of Solar Energy in Torrefaction Biomass

Abstract: Biomass, which can be renewed in less than a century and includes various wastes and plants, is an energy source that can meet environmental problems and energy needs. However, biomass has disadvantages such as low energy density and strong hydrophilic structure, which causes high biomass conversion and transportation costs. Therefore, torrefaction pretreatment is required to increase the quality of biomass and its usability as fuel. Torrefaction generally requires an energy source provided by burning fossil fuels. The provision of energy by non-renewable energy sources affects the energy efficiency of the torrefaction process. This problem can be solved by using solar energy. This pretreatment, called solar torrefaction, allows any carbonaceous raw material to be converted into solid, liquid and gaseous products using solar energy. In solar and electric torrefaction, solid and energy efficiency percentages are close to each other. When a literature example is examined, it is seen that the average solid efficiency is %43.2 in electrically heated torrefaction, %42.9 in solar torrefaction and the energy efficiency is %50.8 in electrical torrefaction and %51.3 in solar torrefaction. While the efficiencies in both systems are close to each other, the prominent advantage of solar torrefaction is energy saving. Solar torrefaction, which uses solar energy as a source, has recently attracted considerable attention because it uses carbon-rich waste to produce energy and fuel.

Keywords: Biochar production, Renewable energy, Solar torrefaction

Gönderilme Tarihi: 29.08.2024

Kabul Tarihi: 05.12.2024

Nasıl atıf yapılır: Özer, G., & Duranay, N. (2025). Biyokütlenin torrefaksiyonunda güneş enerjisi kullanımı. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(1), 377-395. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1540415>

1. Giriş

Dünyanın enerji talebi son yıllarda istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Bunun nedeni sanayileşmenin ve nüfusun hızla artması ve sonuç olarak toplumların yaşam standartlarını yükseltme arayışlarıdır. Enerji talebindeki artış, küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine sebep olarak, çevre üzerinde geri dönüşü olmayan bir tahribata neden olmuştur. Modern toplumlar, temiz enerji kaynağı arayışlarında fosil kaynaklardan yenilenebilir enerjiye (rüzgâr, güneş, gelgit, jeotermal ve biyokütle gibi) geçişin gerekli olduğunu vurgulamaktadırlar. Bu yenilenebilir enerji kaynakları, fosil enerji kaynaklarının tersine zamanla tükenmez ve kömür, petrol, doğalgaz gibi yenilenemeyen enerjilere alternatiflerdir.

Biyokütle, organik formda karbon içeren tüm malzemeleri tanımlamak için kullanılan terimdir. Bu organik karbon formu, güneş enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijen gibi diğer elementlerle bağlar oluşturarak fotosentez yoluyla inorganik hale dönüştürülür. Bu bağların (moleküllerin) fiziksel veya biyolojik yollarla yıkılması, döngünün kapanmasına ve CO₂'nin yeniden oluşmasına neden olur. Bu oluşum esnasında diğer enerji biçimlerine dönüştürülebilen enerji açığa çıkar. Bu nedenle, üretim ve kullanım arasında bu denge korunduğu sürece, biyokütle yenilenebilir veya tükenmez bir enerji kaynağıdır (Garba, 2020).

Biyokütlenin, küresel enerji ihtiyacının yaklaşık %10-15'lik bölümünü karşılayacak potansiyele sahip enerji türü olması beklenmektedir. Bununla birlikte biyokütle, gelişmekte olan ülkelerin uzak ve kırsal bölgeleri için toplam enerji ihtiyacının yaklaşık %90'lık bölümünü karşılamaktadır. Bu nedenle, dünya nüfusunun yaklaşık %90'ının 2050 yılına kadar gelişmekte olan ülkelerde yaşaması beklendiğinden, biyokütlenin bu ülkeler için gelecekteki lider enerji kaynağı olmaya devam etmesi muhtemeldir (Bhavanam & Sastry, 2011).

Biyokütleyle gazlaştırma, piroliz, anaerobik bozundurma, fermentasyon ve transesterifikasyon gibi işlemler uygulanarak sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülür. Ayrıca biyokütle hiçbir ön işlem uygulanmadan katı yakıt olarak ısı ve güç üretiminde kullanılabilir. Bununla birlikte, biyokütlenin doğal dezavantajları, kapsamlı kullanımını engeller. Düşük enerji ve kütle yoğunlukları ile büyük hacimli olması uzun mesafe taşımacılığını olumsuz etkiler (Rousset ve ark., 2011); yüksek nem içeriği, buharlaşma nedeniyle termokimyasal dönüşüm maliyetlerini artırır (Haykiri Acma ve ark., 2016); hidrofilik yapısı uzun süreli depolamaya engel olur; lifli yapı, öğütme için enerji tüketimini artırır; zayıf küresel şekil, düşük akışkanlığa ve zayıf akışkanlaştırma davranışına yol açar (Yang ve ark., 2019). Belirtilen dezavantajlardan dolayı biyokütlenin, herhangi bir işlem uygulanmadan yakıt olarak kullanılması zordur. Bu dezavantajları azaltmak için bazı biyokütle iyileştirme (dönüşüm) metodları geliştirilmiştir. Katı yakıt üretimi için uygulanan piroliz ve torrefaksiyon işlemi de bu metodlardan biridir. Piroliz, torrefaksiyon işlemine göre daha yaygın ancak bunun yanında torrefaksiyon çalışmaları da gün geçtikçe artmaktadır.

Piroliz, oksijensiz ortamda biyokütleden karbon bazlı materyaller üretmek için yapılan termal bozunma işlemidir. Piroliz işlemi, kömürden sıvı yakıt üretiminde kullanılan klasik bir yöntemdir. Halen, atık plastik ve lignoselülozik atıkları değerli ürünlere dönüştürmek için kullanılmaktadır. Torrefaksiyon ise bir düşük sıcaklık pirolizidir. Pirolizin aksine asıl amaç katı madde üretimini en üst düzeye çıkartmaktır. Bu işlem ile biyokütlenin neminin uzaklaştırılması ve ısı değeri artırılması amaçlanmaktadır. Torrefaksiyon işlemi sonucunda biyokütlenin enerji yoğunluğunun ve suya karşı direncinin arttığı, O/C ve H/C oranlarının azaldığı, öğütülebilirliğinin arttığı ve biyokütleyle daha uniform özellikler kazandırdığı belirtilmiştir. Ayrıca torrefaksiyon işlemi uygulanan biyokütlenin nem oranı azaldığı için kısa sürede tutuştuğu, uçucu bileşikler ayrıldığı için yanma esnasında daha az duman oluştuğu ve sabit karbon oranı arttığı için daha uzun sürede yandığı tespit edilmiştir (Chen ve ark., 2021).

Biyokütleyle uygulanan termokimyasal dönüşüm proseslerinden olan torrefaksiyonda harici ısı kaynakları gerekir. Bu harici enerji girdisi genellikle çevre üzerinde olumsuz etkisi olan yenilenemeyen bir kaynaktan elde edilir. Torrefaksiyon işlemi için kullanılan bu harici ısı kaynağı aynı zamanda maliyetin artmasına da neden olur (Chen ve ark., 2022). Bu nedenden dolayı yapılacak çalışmalarda alternatif bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin kullanılmasının ekonomik olarak faydalı olacağı düşünülür. Açıkça, en bol bulunan iki enerji kaynağı olan güneş ve biyokütleyi birleştiren bir solar torrefaksiyon teknolojisi oldukça cazip olacaktır.

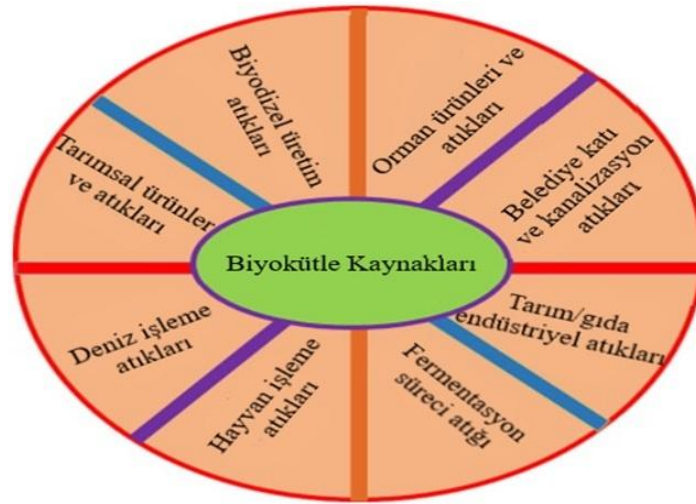
Solar biyokütle torrefaksiyonu, gerekli ısınn konsantre güneş enerjisi ile sağlandığı atmosferde biyokütlenin dönüştürülmesinin endotermik bir işlemidir. Doğrudan güneş ışığı, konsantre edilir ve bir optik sistem tarafından pirolitik reaktöre yönlendirilir. Bu konsantre enerji, reaktörün ve biyokütlenin pirolitik sıcaklıklara ulaşmasını sağlar.

Sunulan çalışmada tükenme sınırına gelen ve sera gazı etkisiyle çevre kirliliğine sebep olan fosil kaynaklara alternatif olarak temiz yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Bunun yanında yenilenebilir enerji kaynaklarını verimli kullanılabilmek için biyokütleyle uygulanabilecek dönüşüm prosesleri incelenmiştir. Özellikle, önümüzdeki dönemlerde kullanımı artacak olan güneş enerjisinin, torrefaksiyon üzerindeki etkisi ve kaliteli katı yakıt üretimi üzerinde uygulanabilirliği sunulmuştur.

2. Biyokütle

Biyokütle, enerji kaynağı olarak kullanılabilecek malzeme ve bitki atıklarını tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Selüloz, hemiselüloz, lignin, nişasta, proteinler, lipitler ve karbonhidratlardan oluşur. Coğrafi konuma ve kaynağa bağlı olarak bu bileşenler ve oranları değişebilir. Şekil 1’de gösterildiği gibi tarım ürünleri ve atıkları, enerji bitkileri ve bunların yan ürünleri, odun atıkları, belediye atıkları, su bitkileri ve algler dahil olmak üzere çok sayıda biyokütle kaynağı mevcuttur (Deora ve ark., 2022).

Farklı biyokütle formlarının kimyasal ve elementel bileşimlerinin belirlenmesiyle, biyokütleden oluşan hidrokarbonların yapısı ve içeriği kesin olarak tahmin edilebilir. Bitkiler, fotosentez süreci yoluyla güneş enerjisinden dönüştürülen kimyasal enerjiyi biriktirirler. Sonuç olarak biyokütle enerjisi güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal enerjinin yanı sıra yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Günümüzde biyokütleden elde edilen enerji, ısıtma ve pişirme, elektrik üretimi ve ulaşım yakıtı da dahil olmak üzere dünyanın artan enerji gereksinimlerini karşılamak için yaygın olarak kullanılır. Proximate (kısa) ve elementel analiz verilerine göre biyokütle, az miktarda klor ve kükürt içeren değerli bir karbon, hidrojen, oksijen ve azot kaynağıdır (Mishra ve ark., 2019).



Şekil 1. Başlıca biyokütle kaynaklarının şematik sunumu (Deora ve ark., 2022).

Biyokütleyle uygulanan gazlaştırma, piroliz vs gibi termokimyasal süreçler biyokütleyi biyoenerjiye dönüştürmenin yanı sıra, birçok petrokimya endüstrisi ürünlerini üretmek amacıyla da kullanılabilir. Elde edilebilecek ürünlerin verimi ve bileşimi açısından en yüksek esnekliğe sahip termokimyasal işlemlerden biri torrefaksiyondur.

2.1. Biyokütlenin yapısı

Biyokütle esas olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşur. Uygulanan termokimyasal işlem sonucu oluşan ürünlerinde, her bir bileşenin varlığı ve içeriği önemli bir rol oynar. Selüloz içeriği ne kadar yüksek olursa o kadar fazla sıvı ürün elde edilir; hemiselüloz içeriği ne kadar yüksek olursa, o kadar fazla gaz ürünü üretilir; lignin içeriği ne kadar yüksek olursa, o kadar fazla katı ürün üretilir (Kumar ve ark., 2020).

Selüloz, D-glikoz içeren en bol doğal doğrusal karbonhidrat polimeridir ve bitkinin hücre duvarıdır. Selüloz içindeki hemiselüloz ve ligninin kovalent çapraz bağlanma etkileşimi, lignoselüloz biyokütlesinin herhangi bir dış biyolojik ve kimyasal saldırıya karşı direnmesine yardımcı olur (Zheng ve ark., 2014). Selüloz aynı zamanda kendine özgü mekanik güce ve kimyasal kararlılığa sahip susuz glikopiranozun bir polisakkariti olarak da tanımlanır (Dhyani & Bhaskar, 2018). Selülozun kimyasal formülü $(C_6H_{10}O_5)_n$ 'dir (Bandgar ve ark., 2022).

Çeşitli dallanmış polisakkaritlerin birleşiminden oluşan hemiselüloz, selüloz liflerini çevreler ve selüloz ile lignini birbirine bağlar. Hemiselüloz amorfudur, zayıf asitler, bazlar ve enzimler tarafından kolayca hidrolize edilir ve kimyasallara daha az dayanıklıdır. Glikoz, galaktoz, mannoz, ksiloz, arabinoz ve glukuronik asit içeren monomerlerden oluşur. Kovalent etkileşimlerinin ve birbirleriyle hidrojen bağlarının bir sonucu olarak hemiselülozlar, termokimyasal ön işleme tabi tutulduğunda monosakkaritlere daha kolay parçalanır. Hücre duvarının sertliği ve esnekliği, hemiselüloz ve selüloz arasındaki hidrojen bağlantısından etkilenirken selüloz, lignine kovalent olarak bağlanır (Chen ve ark., 2023). Hemiselüloz, selüloza kıyasla seyreltilmiş asitler, bazlar veya enzimler tarafından kolayca çözülür ve selüloza göre daha az fiziksel güce sahiptir (Kumari & Singh, 2018).

Lignin, karmaşık yapıya sahip çapraz bağlı polimerler ve fenolik monomerlerin bileşimini içeren karmaşık bir makromoleküler yapıdır. Lignoselülozik biyokütlerde lignin daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptir (Yu ve ark., 2016). Lignin, yapısal sertlik için eşit olmayan şekilde konumlandırılmış fenilpropan birimleri tarafından bir araya getirilmiş, karbonhidrat olmayan kompleks aromatik bir polimerdir (Dhyani & Bhaskar, 2018). Selüloz ve hemiselüloza bağlanır ve hücre duvarına güç ve sağlamlık kazandırır. Aynı zamanda suya dayanıklı, mikrobiyal saldırılara karşı fiziksel ve kimyasal dirence sahip, aşılmaz bir duvar oluşturur. Lignin hidrofobiktir ve suda çözünmez (Zhang ve ark., 2021).

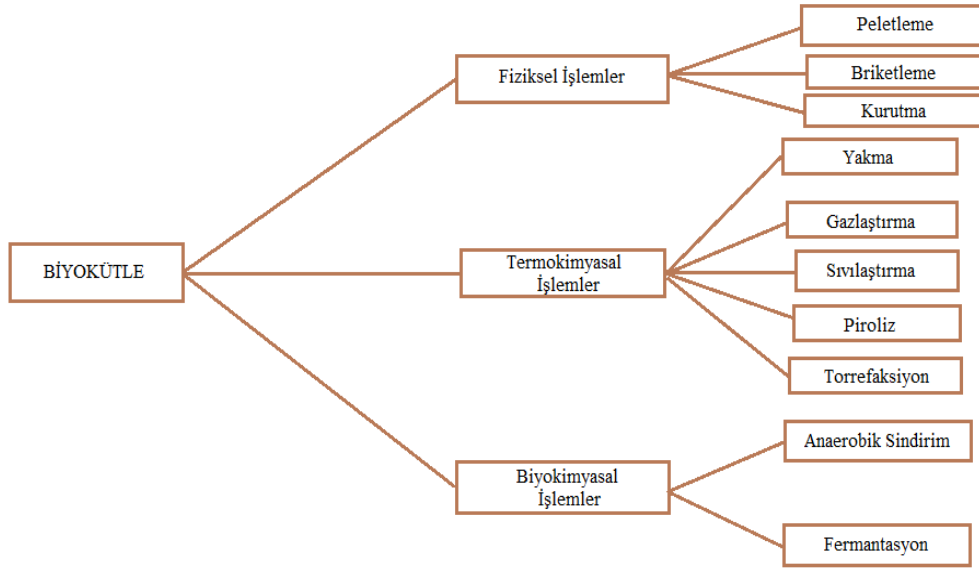
Biyokütlerdeki selüloz, hemiselüloz ve ligninin ayrıntılı içeriği ve termal bozunma sıcaklıkları Şekil 2'de gösterilmektedir (Bui ve ark., 2015).



Şekil 2. Lignoselülozik biyokütlerde genel selüloz, hemiselüloz ve ligninin içerikleri (Bui ve ark., 2015).

3. Biyokütleye Uygulanan Dönüşüm Prosesleri

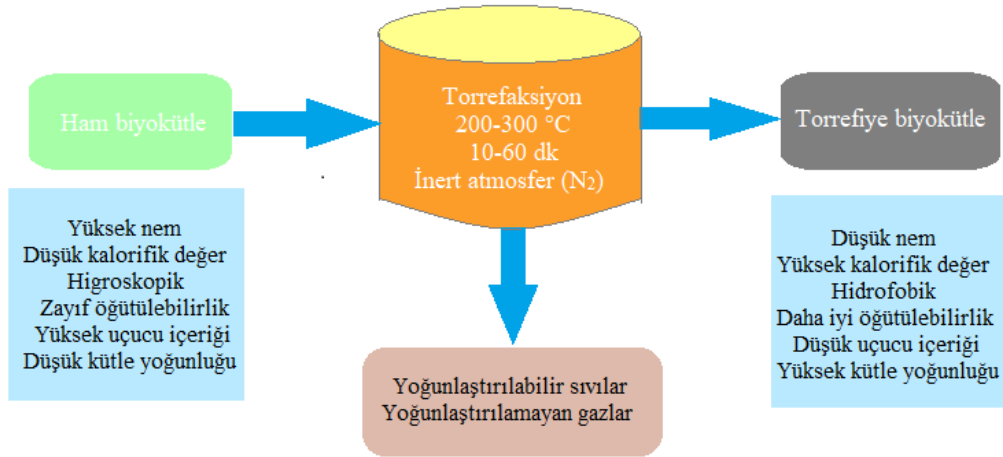
Biyokütle, enerji üretimi ve kimyasallar için çeşitli yararlı ürünlere dönüştürülür. Bu dönüşüm süreçlerinde birçok proses kullanılır. Kullanılan prosesler fiziksel, biyokimyasal ve termokimyasal olmak üzere üç ana başlıkta toplanmaktadır. Ancak biyokütleye uygulanacak bu dönüştürme teknolojilerinin seçimini etkileyen bazı faktörler vardır. Bu faktörler, biyokütle kalitesi ve miktarını, mevcudiyetini, nihai ürünlerin seçimini, proses ekonomisini ve çevresel sorunları içerir. Biyokütlenin dönüşüm prosesleri Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Biyokütle dönüşüm prosesleri (Ong ve ark., 2019).

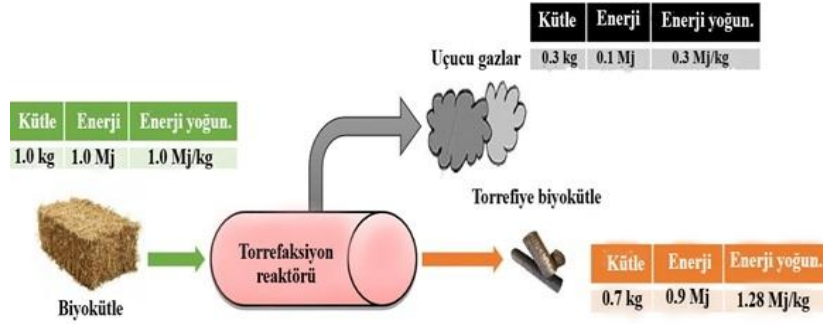
4. Torrefaksiyon

Torrefaksiyon, biyokütleyi orijinal enerjisinin %90'ına kadar muhafaza eden bir katı ürüne yükseltmek için kullanılan termokimyasal bir dönüşüm prosesidir (Thengane ve ark., 2022). İşlem, düşük ısıtma hızlarında ve 350°C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen piroliz işlemidir. Proses ürünleri orijinal biyokütlenin yanı sıra reaksiyon sıcaklığı, ısıtma hızı, kalış süresi ve reaksiyon ortamı gibi farklı parametrelere de bağlıdır. Torrefiye biyokütle, ham biyokütle ile karşılaştırıldığında çeşitli avantajlara sahip mükemmel bir katı enerji taşıyıcısıdır. Torrefaksiyon sonucu biyokütle özelliklerinin değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir (Sarker ve ark., 2021).



Şekil 4. Ham biyokütle ve torrefiye biyokütle arasındaki ayrımlar (Sarker ve ark., 2021).

Torrefaksiyon, biyokütlerdeki hidrojen ve oksijen içeriğini azaltırken karbon içeriğini artırır, bu da uçucu maddenin kısmen ortadan kaldırılmasıyla sonuçlanır ve böylece enerji yoğunluğunu artırır (Acharya & Dutta, 2016). Torrefaksiyon, yavaş pirolize göre daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa kalma süresinde çalıştığı için de daha az işletme maliyeti gerektirdiğinden, katı ürünün kalitesini artırmak için daha uygundur. Torrefaksiyona maruz kalan biyokütlenin kütle ve enerji değişimleri Şekil 5'te verilmiştir (Negi ve ark., 2020).



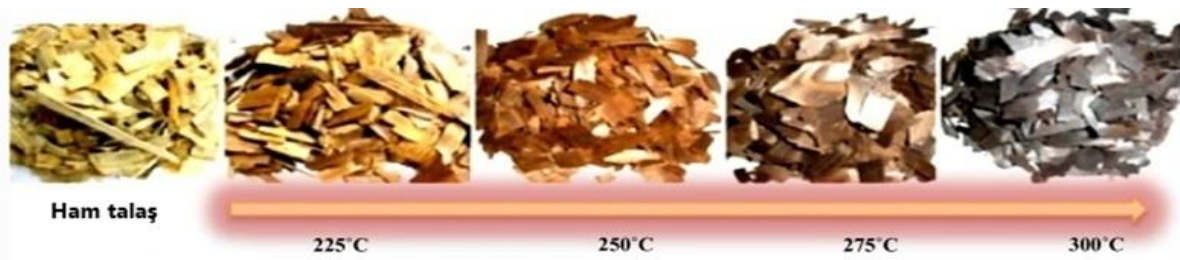
Şekil 5. Torrefiye biyokütlenin kütle ve enerji değişimi (Negi ve ark., 2020).

Torrefiye biyokütlenin genellikle enerji ve hacim olarak daha yoğun, daha kırılğan, hidrofobik ve mikrobiyal ayrışmaya dirençli olduğu tespit edilmiştir (Zhang ve ark., 2020). Bu faktörler, torrefiye biyokütlenin depolanması ve uzun mesafeli nakliyesi veya katı yakıt peletlerinin üretimi için oldukça fayda sağlar (Zhang ve ark., 2019). Ayrıca piroliz, gazlaştırma ve yakma gibi diğer termokimyasal dönüşüm teknolojileri için torrefaksiyon bir ön işlem olarak kullanılabilir. Torrefaksiyon, biyokütlenin doğal yapısal kimyasını zayıflatır, böylece diğer termokimyasal dönüştürme teknolojilerinde termal olarak bozunmasını kolaylaştırır.

Torrefaksiyon prosesinin performansı sıcaklık, süre, taşıyıcı gaz akış hızı ve bileşimi, parçacık boyutu, katalizör türü vb. gibi bazı faktörlerden etkilenir. Bu parametrelerin torrefaksiyon prosesi üzerindeki etkileri aşağıda açıklandığı şekildedir.

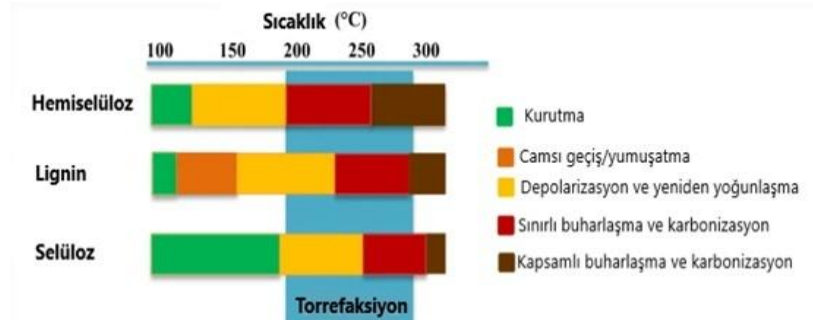
Torrefaksiyon sıcaklığı, çalışma parametreleri arasında en önemli parametredir. Hemiselüloz ve selülozun termal ayrışma sıcaklıkları sırasıyla 220-315°C ve 315-400°C aralığındadır ve torrefaksiyon 200-300°C sıcaklıklarda çalıştırılırken, çalışma sıcaklığının torrefaksiyon sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Torrefaksiyon, çalışılan sıcaklığa göre hafif torrefaksiyon (200°C ile 235°C), orta torrefaksiyon (235°C ile 275°C) ve şiddetli torrefaksiyon (275°C ile 300°C) olarak kategorize edilir. Hafif torrefaksiyon sırasında, biyokütledeki nem ve uçucu maddeler serbest bırakılır. Biyokütledeki hemiselüloz, selüloz ve lignin arasında en aktif bileşenlerdir. Hemiselüloz, hafif torrefaksiyon sırasında termal olarak belirli bir ölçüde parçalanırken, selüloz ve lignin yalnızca hafif etkilenir veya neredeyse hiç etkilenmez. Bu nedenle, hafif torrefaksiyondan sonra biyokütlenin ağırlık kaybı belirgin değildir ve enerji yoğunluğu veya kalorifik değeri yalnızca biraz artar. Biyokütle hafif torrefaksiyona uğradığında, hemiselülozların ayrışması ve uçucu maddelerin serbest bırakılması kolaylaşır. Hemiselüloz önemli ölçüde, selüloz ise belirli bir ölçüde parçalanır. Şiddetli torrefaksiyon durumunda, hemiselüloz neredeyse tamamen tükenir ve selüloz büyük ölçüde termal olarak parçalanır. Bileşenler arasında, lignin termal olarak parçalanması en zor olanıdır ve torrefaksiyon sıcaklık aralığındaki ağırlık kaybı düşüktür. Hemiselüloz ve selüloz, biyokütlenin ana bileşenleridir. Şiddetli torrefaksiyonla biyokütleden hemiselüloz ve selülozun önemli ölçüde uzaklaştırılması nedeniyle, yakıtın enerji yoğunluğu büyük ölçüde artırılmış olmasına rağmen, biyokütlenin ağırlığı ve enerji verimi genellikle şiddetli bir şekilde azalır (Chen & Kuo, 2011).

Torrefaksiyon sıcaklığının ham biyokütle malzemesinin görsel görünümleri üzerindeki etkisi Şekil 6'da gösterilmektedir (Phanphanich & Mani, 2011).



Şekil 6. Torrefaksiyon sıcaklığının çam talaşlarının fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi (Phanphanich & Mani, 2011).

Şekil 7, ısıtma işlem sırasında lignoselülozik malzemenin ayrışması üzerinde sıcaklığın etkisini göstermektedir (Christoforou & Fokaides, 2016).



Şekil 7. Torrefaksiyon mekanizması (Christoforou & Fokaides, 2016).

Sıcaklığın yanı sıra, torrefaksiyon süresi, torrefaksiyon performansını değerlendirmede bir diğer önemli faktördür. Torrefaksiyon düşük ısıtma hızları (<50°C/dk) kullanılarak ve hammaddenin türüne bağlı olarak birkaç dakikadan birkaç saate kadar değişebilir (Christoforou & Fokaides, 2018; Ho ve ark., 2018). Torrefaksiyon süresinin artmasıyla, elde edilen katı yakıt veya biyokömürün kalorifik değeri ve karbon içeriği artar. Örneğin, 250°C'de 0.5, 1 ve 1.5 saat gerçekleştirilen odun briketlerinin torrefaksiyonu sonucunda biyokütlenin kalorifik değerlerinin 20.0 kJ/kg'dan 22.7 kJ/kg'a çıktığı tespit edilmiştir (Chen ve ark., 2021).

Isıtma hızının lignoselülozik polimerlerin parçalanması üzerinde önemli bir etkisi vardır. Daha yüksek ısıtma hızı, biyokütlenin daha fazla depolimerizasyonuna neden olur ve kütle verimini önemli ölçüde azaltır. Isıtma hızı yavaş olduğunda, yoğunlaşabilir uçucu maddeler reaktörde son torrefaksiyon sıcaklığına ulaşana kadar yani süre olarak daha fazla kalır. Uçucu maddelerin reaktörden kademeli olarak uzaklaştırılması, ikincil bozunma reaksiyonlarını kolaylaştırır ve böylece son katı, sıvı ve gaz ürün dağılımlarını etkiler (Mundike ve ark., 2016; Persson & Yang, 2019).

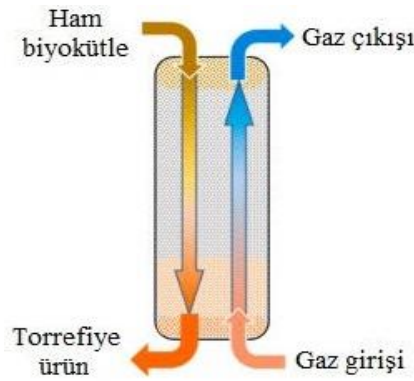
Bir diğer parametre olan parçacık boyutu, torrefaksiyon işlemi sırasında reaktördeki ve biyokütle içindeki iletken ısı transferini etkiler (Medic ve ark., 2012; Nhuchhen ve ark., 2014; Wang ve ark., 2017). Bu nedenle, parçacık boyutu azaldıkça biyokütle, birim kütle başına daha fazla yüzey alanına sahip olur. Bunun sonucunda parçacık boyutu ne kadar küçükse, ısı transfer hızı o kadar iyi olacak ve bu da nemin ve bazı uçucu maddelerin daha iyi uzaklaştırılmasıyla sonuçlanacaktır. Böylece son torrefaksiyon üründe O/C ve H/C atom oranları minimum olacak, aynı zamanda ürün daha yüksek kalorifik değere sahip olacaktır (Rudolfsson ve ark., 2015).

Ayrıca çalışmalarda kullanılan reaktör tipi ve taşıyıcı gazda önemlidir. Genel olarak torrefaksiyon, N₂ atmosferinde gerçekleştirilir. Ancak inert ortam torrefaksiyonun ekonomikliğini olumsuz yönde etkilediğinden bununla ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca ortamın içerdiği O₂'den dolayı yanma ve tutuşma gibi bazı durumlar da söz konusudur. Son zamanlarda bazı çalışmalarda hava, baca gazı, CO₂ vb. gibi farklı taşıyıcı gazların torrefaksiyon performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Thanapal ve ark., 2014). CO₂ ile muamele edilmiş biyokütle, N₂ ile muamele edilmiş biyokütle ile karşılaştırıldığında numunelerdeki gözenek yüzey alanında daha fazla artış olduğu görülmüştür.

Torrefaksiyonda kullanılan O₂ miktarı çoğunlukla %15'ten azdır (Chen ve ark., 2014; Uemura ve ark., 2015; Chen ve ark., 2016). Genel olarak atmosferdeki havanın %21'i O₂'den oluşur. Yüksek O₂ yüzdesi, torrefaksiyon işleminden ziyade yanmaya yol açar. O₂ eklemenin asıl amacı, torrefaksiyon reaksiyonunu hızlandırmaktır. Biyokütlenin oksidatif torrefaksiyonu, yalnızca biyokütlenin termal ayrışmasını ve buharlaşmasını değil aynı zamanda ekzotermik oksidasyon reaksiyonlarını da içerir (Chen ve ark., 2014; Chen ve ark., 2016; Wang ve ark., 2018). Oksidasyon reaksiyonlarının reaksiyon hızları normalde ayrışma reaksiyonları ve buharlaşma reaksiyonlarından daha hızlı olduğu için bu da torrefaksiyon süresinin azalmasına yol açar (Wang ve ark., 2018). Oksijen konsantrasyonlarının (%2, %6, %10, %21) 240 ve 280°C'de torrefaksiyon üzerindeki etkileri Rousset ve ark. (2012) tarafından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, oksijen miktarının katı verimi ve torrefaksiyon ürünü özellikleri üzerindeki etkilerinin, 280°C'lik bir torrefaksiyon sıcaklığı altında daha belirgin olduğunu göstermiştir.

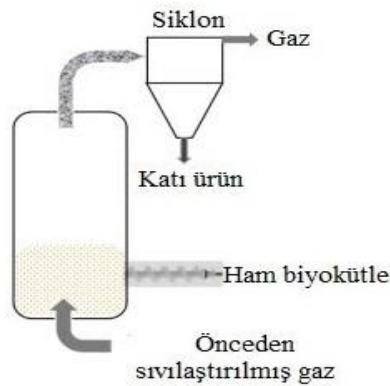
Torrefaksiyona etki eden parametreler arasında sayılan reaktör tipleri ise; hareketli yataklı, akışkan yataklı, döner tambur, çok ocaklı fırın, mikrodalga, vidalı konveyör, auger ve sabit yataklı reaktördür.

Hareketli yataklı bir reaktördeki temel özellik, kimyasal reaksiyon boyunca hem sıvı hem de katı fazların hareketleridir. Torrefaksiyon, sıcak gazlar reaktöre alttan girdikten sonra yukarı doğru hareket ettiğinde gerçekleşir. Gaz halindeki yan ürünler reaktörün üst kısmında geri kazanılırken, torrefiye biyokütle altta toplanır ve soğutulur. Katı ve sıvının yönlerine bağlı olarak bu teknik, çapraz akış, eş zamanlı veya karşı akımlıdır. İşlem sıcaklığı yaklaşık 250–300°C ve kalma süresi 30–60 dakikadır. Ancak, bu parametreler gereksinimlere göre ayarlanır (Negi ve ark., 2020; Thengane ve ark., 2020). Bu reaktör, biyokütlenin tüm reaktör haznesinde tutulması nedeniyle diğerlerine göre daha fazla dolar. Hareketli yataklı reaktördeki başlıca sınırlama, biyokütlenin düzgün bir şekilde karıştırılamamasından dolayı, ısı transfer işleminde genellikle homojen olmamaya eğilimli olmasıdır. Bu homojen olmama durumu özellikle dolaylı bir ısıtma yönteminde (örn: yan veya alt duvarlardan) söz konusu olur (Şekil 8).



Şekil 8. Hareketli yatak reaktörü (Thengane ve ark., 2022).

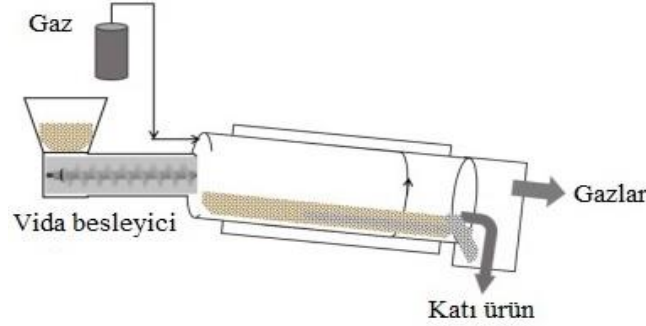
Akışkan yataklı reaktörlerde, biyokütleyi akışkanlaştırmak için reaktörün tabanından sıcak inert gazlar beslenir. Ham biyokütle boyutu, reaktörün yatak içinde sabit sıcaklık dağılımını korumasına izin vermek için akışkanlaştırılmadan önce daha küçük parçacıklara küçültülür. Biyokütlenin küçültülmesi amacıyla gerçekleştirilen öğütme işlemi sırasında kullanılan enerji miktarı, öğütme boyutu ve nem içeriğiyle dolaylı olarak bağlantılıdır. Genellikle minimum akışkanlaştırma hızından daha büyük olan yeterli bir inert gaz hızı, akışkanlaştırma kriterlerini karşılamak için kullanılır. Laboratuvar ölçekli deneyler, bu tür reaktörler için torrefiye biyokütle ince tanelerde önemli kayıpların olduğunu göstermiştir (Li ve ark., 2012). Sonuç olarak, ısı ve kütle transfer oranları, daha hızlı ve daha etkili işlem sağlayan diğer reaktör türlerinden daha yüksektir (Şekil 9).



Şekil 9. Akışkan yatak sistemi (Thengane ve ark., 2022).

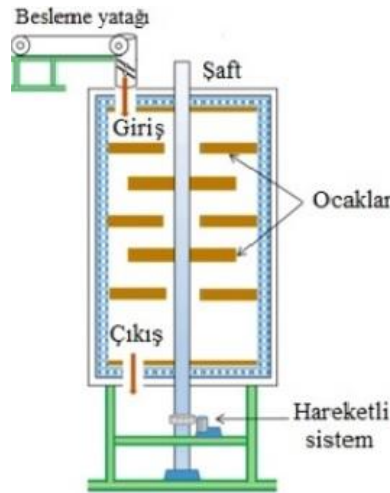
Döner tambur reaktörü biyokütleye uygulanan termal süreçlerin gerçekleştiği, dolaylı veya doğrudan aşırı ısıtılmış buhar veya uçucu kimyasalların salınımının kullanıldığı sürekli bir reaktördür

(Piersa ve ark., 2022). Bu reaktörler bir tamburun sabit bir nokta etrafında dönmesine yardımcı olmak için dönen bir şaft kullanır. Tambur dikey veya eğimli olarak yönlendirilir. Biyokütle parçacıkları, parçacıklar arasında kütle ve ısı transferi sağlayan tamburun dönüşü sonucunda sıcak gaz akımları altında yuvarlanır. Reaktörün uzunluğu, sıcaklık, dönüş hızı ve eğim gibi işlem faktörlerini doğru bir şekilde değiştirerek torrefaksiyon işleminin etkinliğini artırmak mümkündür. Ham biyokütle, inert gaz yüksek hızda kullanıldığında sıvıya benzer şekilde davranır. Yüksek termal verimlilik ve kontrollü bir şekilde yönetilen sistem sıcaklığı bu tür reaktörlerin sadece birkaç avantajıdır. Öte yandan, döner tambur tasarımının bir yararı, biyokütle kurutma ve piroliz gibi diğer uygulamalarla nispeten kanıtlanmış bir teknoloji olmasıdır. Bu nedenle, Avrupa'daki şirketlerin çoğu, ya mevcut döner tambur tedarikçilerini kullanarak ya da özel olarak tasarlanmış parçalar geliştirerek, döner tambur tasarımına dayalı torrefaksiyon teknolojileri geliştirmeyi tercih etmiştir (Şekil 10) (Benanti ve ark., 2011).



Şekil 10. Döner tambur sistemi (Thengane ve ark., 2022).

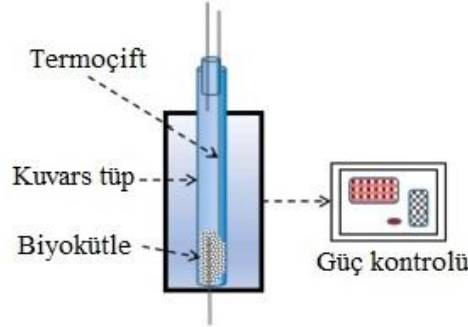
Herreshoff firmı adının yanı sıra çoklu ocak fırını olarak da bilinen bu reaktör, bir merkez şaft etrafında yatay bir düzlemde dönen dairesel ocaklar içeren refrakterle kaplı dikey bir silindirdir. Biyokütle, çok küçük bir alandan geçer ve üst taraftan alta bulunan ocaklara beslenir ve ocak sayısına bağlı olarak reaktör içinde 0.5 ile 3 saat tutulur. Reaktörün çoklu katmanları, düzgün karıştırma ve kademeli ısıtmaya yardımcı olur. Birinci katmandan sonra, sonraki katmanlarda biyokütlenin sıcaklığı kademeli olarak artar, örneğin 200°C'den 300°C'ye. Çoklu ocak reaktörlerinin çapı 8 m'ye kadar çıkar. Çoklu ocak teknolojisi, talaş tozundan daha büyük talaşlara ve hatta torrefaksiyon uygulaması için çok küçük parçalara kadar çeşitli hammadde parçacık boyutlarını işler (Şekil 11) (Acharya ve ark., 2012).



Şekil 11. Çoklu ocak fırını (Thengane ve ark., 2022).

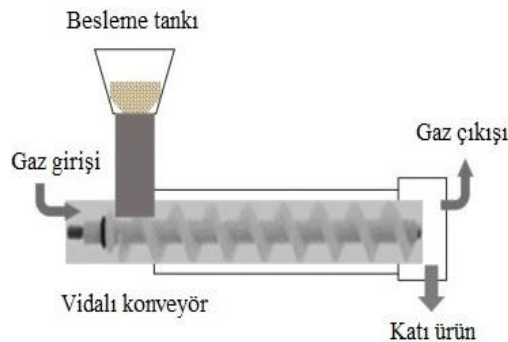
Kullanılan bir başka reaktör olan mikrodalga reaktörlerinde kullanılan ısı kaynağı, biyokütlenin biyoyakıtlara dönüşümünü gerçekleştiren mikrodalga radyasyonudur (Aziz ve ark., 2024). Biyokütle, dış ısı kaynaklarından gelen ısı iletimine dayanan tasarımlara kıyasla daha hızlı ve

genel olarak daha eşit şekilde ısıtılır. Elektromanyetik radyasyon, su moleküllerinin titreşmesine neden olarak, kavurmayı destekleyen biyokütlenin iç enerjisini artırır. Mikrodalga reaktörü tipik olarak 300 MHz ile 300 GHz arasındaki frekanslarda çalışır (Satpathy ve ark., 2014). Mikrodalgadan hızlı ve üniform ısıtma nedeniyle (Ren ve ark., 2012), katı kalma süresi ve belirli bir katı verimi için reaktör boyutu azaltılabilir (Huang ve ark., 2012). Bununla birlikte bu reaktörlerin kalın biyokütle parçacıklarında şiddetli parçacık içi sıcaklığa ve torrefaksiyon homojensizliğine neden olduğu belirtilmiştir. Mikrodalga reaktör kullanmanın bir diğer önemli dezavantajı, gereken radyasyon enerjisinin en kolay şekilde elektrik enerjisinden sağlanmasıdır. Isıdan veya torrefaksiyon işleminden salınan uçucu gazların içerdiği kimyasal enerjiden elektrik üretmek çok zordur. Mikrodalga radyasyonu ile gerçekleştirilecek büyük ölçekli tasarımlarda genellikle en önemli problem yüksek sermaye maliyeti ve işletme giderleridir (Şekil 12).



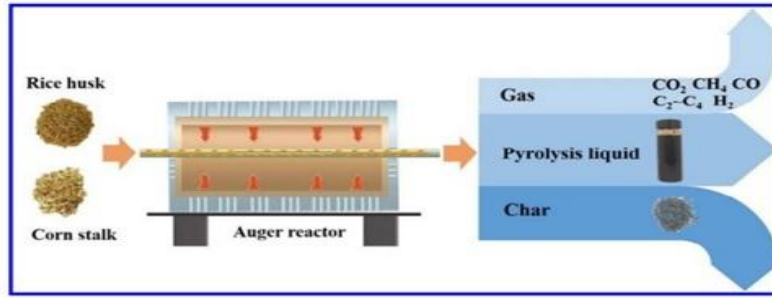
Şekil 12. Mikrodalga reaktörü (Thengane ve ark., 2022).

Bir vidalı konveyörde bir veya daha fazla spiral kullanılır ve bunlar bir tüp veya U şeklinde oluğun içine yerleştirilir. Sonuç olarak, biyokütle hareket eden spiral önünde birikip ve vida döndükçe kanaldan itilir. Bazı çalışmalarda yatay veya dikey olarak yerleştirilebilen ve çeşitli malzeme ve akış hızı gereksinimlerine uyum sağlayabilen çeşitli vida tasarımları bulunur. Reaktörde kalma süresini hesaplamak için dönme hızları ve vida uzunluğu kullanılır. Biyokütle, eritilmiş tuz, sıcak yağ ve sıcak buhar gibi daha büyük sıcaklık ısı transfer ajanları kullanılarak vidalı konveyör kurutucusunun ceketli konveyöründe aynı anda kurutulur ve ısıtılır. Vidalı konveyörlerde genellikle minimum alan gereksinimiyle daha iyi bir ısı iletim alanı sağlayan dolaylı bir ısıtma yöntemi kullanılır (Piersa ve ark., 2022). Ancak, çift vidalı bir konveyör sistemi kullanılarak reaktör doğrudan ısıtılabilir. Dolaylı ısıtma için bu reaktörün dezavantajı, çoğu durumda, yetersiz ısı değişimi, yüksek bakım maliyetleri ve ısıtma alanı için karbonize malzeme geliştirilmesini içerir. Bazı avantajlar, iyileştirilmiş biyokütle akışı, makul derecede uygun fiyatlı bir reaktör ve çeşitli biyokütle parçacıklarının kurutulmasıdır (Şekil 13) (Acharya ve ark., 2012).



Şekil 13. Vidalı konveyör (Thengane ve ark., 2022).

Auger reaktör hem biyokömürün hem de biyo-yagın büyük miktarlarda üretimi için kullanılan bir piroliz teknolojisidir (Şekil 14). Farklı ürün verimleri ve özellikleri için çalışma koşulları değiştirilebilmektedir.



Şekil 14. Auger piroliz reaktörü (iç cap 26 mm, uzunluk 50 cm, inert gaz N₂ ve katının geçiş hızı 0.35 kg/h) (Yu ve ark., 2016).

Auger piroliz reaktörleri, birçok küçük ve orta ölçekli endüstrilerde artan bir ilgi görmektedir. Bu teknoloji, yapım ve çalıştırma kolaylığı nedeniyle son zamanlarda pek çok alanda ilgi çekmektedir. Bir Auger reaktöründe, biyokütle sürekli olarak tek veya çift vidaya beslenir ve ardından burgu dönüşü, ürünü ısıtma bölgesinin sonuna kadar eksen boyunca hareket ettirir. Biyokütle ayrıştıkça, gazlar ve organik uçucu maddeler reaktörü terk eder ve biyokömür altta toplanır. Auger piroliz reaktörlerinin çalıştırılması basit, çok az taşıyıcı gaz gerektiren veya hiç gerektirmeyen ve az enerji tüketen bir reaktördür. Ayrıca, bu reaktörlerin önemli bir avantajı da, ısıtılmış bölgede biyokütlenin kalma süresinin ve vidanın dönüş hızının değiştirilmesiyle kolaylıkla kontrol edilebilmesidir (Brassard ve ark., 2017).

Sabit yataklı reaktör, en yaygın kullanılan torrefaksiyon reaktörlerinden biridir (Yang ve ark., 2018; Szufa ve ark., 2021; Han ve ark., 2021). Basit kurulumu ve düşük fiyatı endüstrilerde çokça kullanılmasını sağlamaktadır. Sabit yataklı reaktörlerde esas olarak ham biyokütleyi yerleştirmek için cam veya paslanmaz çelik silindirik bir tüp, ısıyı sağlamak için bir fırın, biyokütle ve reaktör sıcaklık rejimlerini bulmak için termoçift gibi ekipmanlar kullanılmaktadır. N₂ tipik olarak sürekli torrefaksiyon bağlamında oksidatif olmayan bir atmosfer hazırlamak için taşıyıcı gaz olarak uygulanır. Sabit yataklı reaktörün çeşitli endüstriyel uygulamaları vardır; örneğin Cheng ve ark. (2022), sabit yataklı bir reaktörde, 250-350°C sıcaklık değişiminde, inert bir ortam altında, günde 150 ıslak ton kapasiteli, tam ölçekli bir arıtma çamuru torrefaksiyon tesisinde cıva (Hg) aktivitelerini değerlendirmiştir. Sukiran ve ark. (2020) tarafından yapılan daha ileri bir çalışma, sabit yataklı bir reaktörde torrefaksiyona tabi tutulmuş boş meyve salkımlarının kullanılmasıyla, yaklaşık 25.73 kJ/kg'lık önemli bir üst ısı değerine sahip yüksek kaliteli kömür üretilbildiğini kanıtlamıştır.

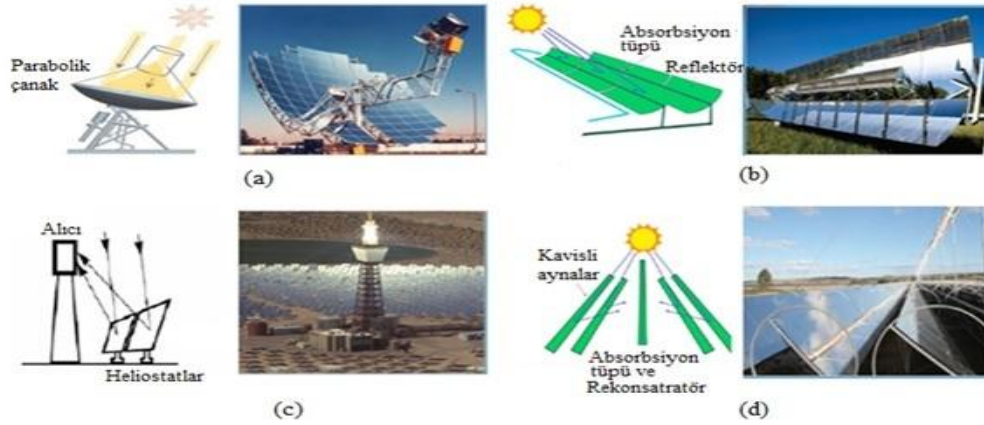
5. Solar Torrefaksiyon

Güneş enerjisi, potansiyel olarak net sıfır karbon ayak izine sahip, çekici ve sınırsız bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyokütle ile birlikte değerlendirildiğinde, her iki kaynağın da gelecekteki enerji arzını güvence altına almada önemli bir rol oynayacağı tahmin edilmektedir. Biyokütlenin güneş enerjisi ile termokimyasal dönüşümü, biyokütleyi yüksek yoğunluklu yakıtlara dönüştürürken uzun süreli güneş depolaması sağlar. Bu yüzden endotermik biyokütle termokimyasal reaksiyonunu yürütmek için konsantrasyonlu bir güneş ısısının kullanılması ve bu enerjinin gaz ve biyokömüre ek olarak biyo-yag şeklinde yüksek yoğunluklu bir enerji üretebileceği önerilmektedir (Bashir ve ark., 2017).

Solar torrefaksiyon, bir termo-solar sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bir termo-solar sistemi, bu enerjiyi bir ısıtma kaynağı olarak kullanmak için güneş radyasyonunu geniş bir alandan daha küçük bir alana yoğunlaştırıp, yönlendirir. Termo-solar sistemleri, güneş yoğunlaştırıcı, güneş kollektörü ve destekleyici yapı olmak üzere üç ana parçadan oluşur.

Çalışma sıcaklığına ulaşmak için güneşten gelen seyreltik güneş radyasyonunu yoğunlaştırmak gereklidir ve bunun için çeşitli yoğunlaştırıcı sistemler geliştirilmiştir. Yoğunlaştırıcının performansı, güneş radyasyon açısına, güneş yoğunluğuna ve güneşin ve reaktörün göreceli konumuna bağlıdır. Karbonlu malzemelerin termokimyasal bozunması için kullanılan yoğunlaştırıcı, optik özelliklerine göre genel olarak dört ana kategoride

sınıflandırılır. Bunlar Şekil 15’de gösterilen parabolik çanak, parabolik oluk, heliostat alan ve doğrusal Fresnel yoğunlaştırıcılarıdır.

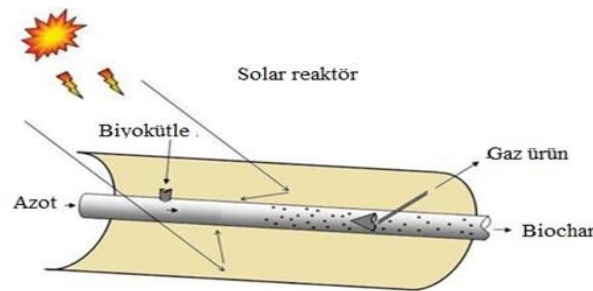


Şekil 15. Çeşitli güneş yoğunlaştırıcı türlerinin şematik ve resimli gösterimi (a) parabolik çanak, (b) parabolik oluk, (c) heliostat alanı, (d) doğrusal Fresnel (Rahman ve ark., 2021).

En yaygın olarak kullanılan güneş enerjisi yoğunlaştırma teknolojilerinden biri parabolik oluk sistemidir. Bu sistem, güneş ışınımının bir dizi kavisli ayna (parabol) tarafından odak hattı boyunca yer alan küçük bir boru şeklinli alıcı/toplayıcıya yönlendirilmesine dayanır. Parabolik kanallı bir yoğunlaştırıcı odaksal bir radyasyon hattı ürettiğinden, bu cihaz boru şeklindeki reaktörleri biyokütle pirolizi için gereken sıcaklıklara ısıtmak için ideal bir seçenektir (Rahman ve ark., 2021).

Bu tip yoğunlaştırıcı hem düşük sıcaklık hem de yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılır. Elde ettiği maksimum sıcaklık, önemli ısı kayıpları olmaksızın çoğunlukla 400-550°C arasındadır. Bu tip kollektör, Şekil 15 (b) ve Şekil 16’da gösterildiği gibi kollektörün odak hattı boyunca yerleştirilen silindirik bir reaktör üzerine ışığı konsantre eden bir dizi paralel kavisli (parabolik) ayna ile yapılır.

Kollektörler genellikle kuzey-güney veya doğu-batı yönünde monte edilir. Güneşin doğuşundan batışına kadar düzenli güneş ışınımını yakalamak için kollektör kuzey-güney yönünde, mevsimsel radyasyonu yakalamak için kollektör doğu-batı yönünde yerleştirilir. Bu nedenle, reaktör entalpisini yükseltmek ve güneş ışınının eksenine paralel düşmesini sağlamak için tek eksenli bir izleme sistemi yeterlidir. Bu teknoloji son zamanlarda artan bir ilgi görmüştür ancak bir piroliz sistemine entegrasyon şimdiye kadar araştırmacılar için kritik bir işlemdir.



Şekil 16. Solar piroliz reaktörünün ve gaz-katı ayırma mekanizmasının detayları (Bashir ve ark., 2017).

Son zamanlarda biyokütlenin termokimyasal dönüştürülmesi proseslerinde güneş enerjisi toplama sistemlerinden elde edilen enerjinin kullanılması ilgi çekmektedir. Örneğin Chen ve ark. (2022), üç biyokütle malzemesinin torrefaksiyonunu (yer fıstığı kabuğu, soya fasulyesi samanı ve çam ağacı), 200–300°C sıcaklık aralığında, 15-45 dakika süreyle yeni bir güneş enerjisiyle çalışan torrefaksiyon (Solar-T) kullanarak gerçekleştirmiştir. Biyokütlenin elektrikli ısıtmalı torrefaksiyon işlemi (Elektrik-T) için gereken özellik değişimi ve enerji kullanımı karşılaştırma için analiz edilmiş, sonuçlar torrefaksiyon biyokütlenin özelliklerinin hem biyokütle türlerinden hem de torrefaksiyon

yöntemlerinden büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Üç biyokütle malzemesi arasında soya fasulyesi samanının, en şiddetli koşullarda (300°C, 45 dk) en düşük katı verime (Elektrik-T'de %43.2, Solar-T'de %42.9) ve enerji verimine (Elektrik-T'de %50.8, Solar-T'de %51.3) sahip olduğu görülmüştür. Enerji kullanım sonuçları, Elektrik-T sırasında tüketilen elektrik enerjisinin artan torrefaksiyon şiddeti ile arttığını ancak enerji verimliliğinin düştüğünü göstermiştir. Solar-T'nin dikkate değer avantajı enerji tasarrufudur, çünkü Solar-T için elektrik enerjisi gerekmemektedir. Enerji-kütle eş-fayda indeksi göz önüne alındığında, güneş enerjisi ile torrefaksiyon biyokütle numunelerinin, Elektrik-T kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünleri göre daha fazla taşınabilir olduğu görülmüştür. Ülkemizde yapılan önemli çalışmalardan biri [Cellatoğlu & İlkan \(2016\)](#) tarafından gerçekleştirilen, bir parabolik çanak yoğunlaştırıcıdan konsantre güneş enerjisi kullanarak 250°C'de 10 dakika boyunca katı zeytin değirmeni kalıntısının torrefaksiyonudur. Güneş enerjisini yoğunlaştırmak için parabolik çanak anten kullanılmıştır. Deney sonunda artan karbon içeriğine ve daha yüksek üst ısı değerine sahip, oksijeni giderilmiş bir katı yakıt elde edilmiş, güneşle torrefaksiyon ürünlerinin geleneksel torrefaksiyon kullanılarak elde edilenlere benzer özelliklerde olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, torrefaksiyon işleminin güneş termal enerjisi ile yapılabileceğini ve güneş enerjisi kullanımının ham biyokütleyle kıyasla kaliteli katı yakıt üretimi için umut verici olduğunu göstermiştir. Bir başka çalışmada [Tregambi ve ark. \(2019\)](#) tarafından, lignin açısından zengin bir tortunun güneş enerjisiyle çalışan sistemde torrefaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar 250, 275, 300°C sıcaklık ve 30 dk da yapılar, ticari olarak kullanılan odun peletleri büyüklüğündeki silindirik peletlerle deneysel sonuçlar elde edilmiştir. H/C ve O/C atomik oranlarının artan torrefaksiyon sıcaklığı ile düştüğü gözlemlenmiş, bu da beklendiği gibi, malzeme özelliklerinin daha karbonize malzemelere doğru kaydığını göstermiştir. Sonuç olarak, torrefaksiyon şiddetinin ürün özelliklerine etkisinin doğrudan güneş ışınımı kullanılan sistemde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Biyokütle atığı olarak Ashe Juniper tercih eden [Rodriguez-Alejandro ve ark. \(2023\)](#), yeni bir güneş enerjisiyle çalışan termokimyasal dönüşüm reaktörü tasarlamıştır. Torrefaksiyon sıcaklığının ve kalma süresinin biyokütle atığının özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve sonuçlar, torrefaksiyon sıcaklığının, kalma süresinin etkisine kıyasla ürün özelliklerinde daha etkili olduğunu göstermiştir. En yüksek enerji verimi (%90'ın üzerinde) 210°C'de elde edilirken, en yüksek enerji yoğunluğu (~1.51) 360°C'de elde edilmiştir. Ayrıca güneş enerjisiyle çalışan termokimyasal dönüşüm reaktörlerinin, ekonomik (enerji tasarrufu) ve çevresel (CO₂ azaltma etkisi) faydalar açısından endüstriyel uygulamalarda biyokütle atığının torrefaksiyonu için aday olma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. [Parvej ve ark. \(2022\)](#), güneş enerjisini su sümbül biyokütlesini değerli kimyasallara dönüştürmek için hem torrefaksiyonda hem de pirolizde kullanmışlardır. Bu amaçla, maksimum 450°C'lik bir reaksiyon sıcaklığı üretebilen parabolik çanak tipi bir güneş reaktörü kullanılmıştır. TG analizi, bu sıcaklığın hammaddeleri işlemek için yeterli olduğunu doğrulamaktadır. Parçalama sıcaklığındaki bir artış, kömür içeriğini (ağırlıkça %27.4'ten ağırlıkça %59.4'e) büyük ölçüde iyileştirirken, biyo-y yağları (ağırlıkça %40.2'den ağırlıkça %15.3'e) ve sentez gazı verimlerini (ağırlıkça %32.4'ten %15.3'e) azaltmıştır. Bu nedenle, torrefaksiyonun su sümbül biyokütlesinden kömür üretimi için ideal olduğu tespit edilmiştir. Solar piroliz gerçekleştiren bir diğer araştırmacı olan [Rahman \(2020\)](#), numune olarak algleri kullanmış, Bengal Körfezinden topladığı algleri önce yıkayıp daha sonra kurutmuştur. Kurutulmuş alg biyokütlesi 0.5 mm, 0.5-1 mm, 1-1.5 mm, 1.5-2 ve 2-2.5 mm olmak üzere beş farklı boyut aralığında sınıflandırmıştır. Deneyde dikey bir güneş fırını kullanılmış ve odak noktasına sabit yataklı silindirik bir reaktör yerleştirilip, sistemde parabolik yoğunlaştırıcı kullanılmıştır. Biyokütle numunesi (50 g) reaktöre beslenmiş ve ardından reaktör içindeki sıcaklık 50°C'lik artışlarla 250 ile 600°C arasında değiştirilmiştir. Isıtma hızı ve azot gazı akış hızı sırasıyla 50°C/dk ve dakikada 100 mL'de sabit tutulmuştur. Biyoyağ verimleri kademeli olarak 400°C'ye kadar artmış, ancak bu sıcaklığın ötesinde biyoyağ verimleri tekrar düşmüştür. Öte yandan, biyokömür verimlerinin daha düşük bir sıcaklıkta daha yüksek olduğu ve artan sıcaklıkla birlikte kademeli olarak azaldığı tespit edilirken, gaz halindeki ürün (yoğuşmayan gaz) verimlerinde zıt eğilimler gözlenmiştir. [Chintala ve ark., \(2017\)](#), Jatropha tohumlarının sıvı, katı ve gaz halindeki yakıtlara solar termokimyasal piroliz işlemi ile dönüştürülmesi üzerinde çalışmışlardır. Jatropha tohumları biyokütlesinin solar termokimyasal pirolizi, paslanmaz çelik bir piroliz reaktöründe gerçekleştirilmiş ve biyoyağ, biyokömür ve pirolitik gaz olmak üzere üç piroliz ürünü elde edilmiştir. Maksimum biyoyağ verimi %20, biyokömür %51 ve pirolitik gaz %29 olarak tespit edilip, Jatropha tohumları biyokütlesi için pirolitik sıcaklık bölgesi, TGA ve DTG sonuçlarına göre 203°C ile 508°C olarak belirlenmiştir. Genel olarak, bu

çalışma biyokütleden katı, sıvı ve gaz yakıtların üretimi için solar termal işleminin uygun olduğunu göstermiştir. Başka bir çalışma örneğinde ise [Chen ve ark., \(2020\)](#), çalışmada deney materyali olarak sırasıyla yer fıstığı kabuğu, soya samanı ve çam ağacı biyokütlelerini kullanmıştır. Bu üç tip biyokütle ilk önce geleneksel asit yıkama yerine sulu faz biyo-yağı ile ön işleminden geçirilmiş, daha sonra yıkanan numuneler parabolik oluklu bir güneş alıcı sistemi kullanılarak kurutma (100°C, 30 dakika) ve torrefaksiyon (250°C, 30 dakika) ile ön işleminden geçirilmiştir. Sonraki piroliz, parabolik çanak güneş alıcı sistemi kullanılarak 10 dakika boyunca 550°C'de gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, güneş enerjisinin biyokütle kurutma, torrefaksiyon ve piroliz için gerekli sıcaklığı etkili bir şekilde sağlayabileceğini ve böylece geleneksel elektrikli ısıtma veya fosil yakıtlı ısıtmanın yerini alma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

5.1. Solar torrefaksiyonun geleneksel torrefaksiyon sistemine göre avantajları

Geleneksel ototermal reaktörde, ürünleri üretmek için yüksek sıcaklık gereklidir. Bu ısı, fosil yakıtın yanmasından veya tedarik edilen hammaddenin proses verimliliğini azaltan, ürünleri ve çevreyi kirleten bir kısmının yakılmasından gelir. Bununla birlikte, solar torrefaksiyon durumunda, zararlı gazların üretilmesine ilişkin bu tür tehlikeler veya proses verimliliğini düşürme olasılıkları yoktur. Ayrıca, geleneksel ototermal reaktöre kıyasla önemli miktarda CO₂ emisyonunu (~%32.4) azaltır.

Reaksiyon entalpisinin ürünlere aktarılması nedeniyle hammaddelerin enerji içeriği yükseltilir. Genel olarak, solar torrefaksiyon ürünleri güneş enerjisini kimyasal enerji şeklinde depoladıkları için daha yüksek kalorifik değerler içerir.

Reaktörün yüksek optik absorpsiyon kapasitesi ve pencere camının yüksek geçirgenliği, reaktörün yüksek bir sıcaklığına ulaşılmasına yardımcı olur. Bu nedenle, reaksiyonlar için mevcut olan daha fazla yüzey nedeniyle torrefaksiyonun işlem verimliliği artar. Reaktörün yoğunlaştırıcı ile uygun şekilde entegrasyonu sonucu, maksimum güneşten yakıt dönüşüm veriminin %50'den fazla olduğu bulunmuştur. Bu, güneş torrefaksiyon sisteminin üretim maliyetini üçte bir oranında düşürür ve güneş enerjisi yakıtlarını geleneksel yakıtla karşılaştırıldığında rekabetçi bir maliyetle sunar.

Güneş enerjisinin kesintili doğası, depolanabilir ve taşınabilir yakıt üretilerek kısmen ortadan kaldırılabilir.

Saf oksijenin enerji yoğun işlenmesi ihtiyacı ortadan kalkar.

Solar piroliz sisteminin işletme maliyeti çok düşüktür. Güneş reaktörü ücretsiz olan radyasyon kullanır. Ayrıca, ototermal reaktöre ısı sağlamak için kullanılan belirli bir miktarda enerji/yakıt tasarrufu sağlar.

Geleneksel ısıtma sistemleriyle karşılaştırıldığında, güneş enerjisiyle torrefaksiyon tesislerinin tasarımı ve deneysel kurulumu nispeten daha az karmaşıktır.

Güneş enerjisi reaktörünü yüksek konsantrasyonlu ısı akışı ile hızlı bir şekilde ısıtmak mümkündür ve ayrıca geleneksel reaktörlere kıyasla hızlı kapatma mümkündür.

6. Sonuç

Nüfusun hızlı bir şekilde artması ile birlikte fosil yakıtların, tükenme riskiyle karşı karşıya kalması bilim insanlarını yenilenebilir enerji kaynağı arayışına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, iklim değişikliğine bağlı çevre sorunlarıyla mücadele etmede etkili bir stratejidir. Bu stratejinin sürdürülebilir bir şekilde devam edebilmesi için biyokütle enerjisinin kullanımı oldukça uygundur. Biyokütle atıklarından enerji kullanımının amacı çevre kirliliğini en aza indirmek, sera gazlarına neden olan atıkları yönetmek ve bir yenilenebilir enerji türü olan biyoatıklardan enerji üretmektir. Biyokütlenin işlenmesiyle elde edilebilen biyoyakıtlar sürdürülebilir, çevre dostu ve fosil yakıtlara alternatif kaynaklardır.

Biyokütlenin torrefaksiyon işlemiyle enerji yoğunluğunun artırılması, yüksek kaliteli yakıtların elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak bu işlem, enerji gereksinimi bakımından dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Geleneksel torrefaksiyon yöntemlerinde enerji genellikle fosil yakıtların kullanımıyla sağlanır ve bu durum karbon emisyonlarını artırarak çevresel sürdürülebilirliği olumsuz etkileyebilir. Ortalama olarak, geleneksel torrefaksiyon süreçlerinde enerji

verimliliği %70 ile %90 arasında değişmektedir, ancak sistemdeki enerji kayıpları bu verimliliği düşürmektedir.

Solar torrefaksiyon, enerji ihtiyacını yenilenebilir güneş enerjisiyle karşılamayı hedefleyen çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yapılan araştırmalar, solar torrefaksiyonun enerji tasarrufu ve çevresel etkiler açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, elektrikle ısıtılan torrefaksiyon süreçlerinde enerji verimliliği %50.8 düzeyinde iken, solar torrefaksiyonda bu oran %51.3'e kadar çıkmaktadır. Güneş enerjisinin yenilenebilir, ücretsiz ve karbon nötr bir kaynak olması, bu yöntemi hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı kılmaktadır.

Güneş enerjisi ile çalışan torrefaksiyon sistemleri ile diğer enerji girdileri kullanan sistemlerin performans karşılaştırmasını sunmak için oluşturulan Tablo 1'de, bu sistemlerin enerji verimliliği, karbon emisyonları ve maliyet gibi temel performans parametreleri detaylandırılmıştır.

Tablo 1. Güneş enerjisi ve diğer enerji girdileriyle çalışan torrefaksiyon sistemlerinin karşılaştırılması

Kriter	Güneş Enerjisi ile Çalışan Torrefaksiyon	Diğer Enerji Girdileri ile Çalışan Torrefaksiyon
Enerji Verimliliği (%)	50.0 - 51.3 (Solar sistemlere bağlı)	50.0 - 50.8 (Elektrikli veya fosil yakıtlı sistemler)
Karbon Emisyonu	Çok düşük (Neredeyse sıfır karbon salımı)	Yüksek (Fosil yakıt kullanımı kaynaklı karbon salımı)
Maliyet	Düşük işletme maliyeti, ancak başlangıçta yüksek kurulum maliyeti	Düşük kurulum maliyeti, ancak yüksek işletme maliyeti
Enerji Kaynağının Sürdürülebilirliği	Yenilenebilir ve sınırsız	Sınırlı ve yenilenemez
Çevresel Etki	Pozitif (karbon ayak izi azaltımı)	Negatif (karbon ayak izi artışı)
Sistem Verimliliği	Güneş ışınımına bağlı değişkenlik gösterebilir	Sabit enerji sağlayabilir, ancak fosil yakıtların etkisiyle olumsuz çevre etkisi yaratır
Teknolojik Uygulanabilirlik	İleri teknoloji gerektirir	Mevcut altyapılarla kolayca uygulanabilir

Güneş enerjisi ile gerçekleştirilen torrefaksiyon işlemleri, enerji verimliliği açısından elektrikle çalışan sistemlere benzer sonuçlar elde etmektedir. Bununla birlikte, güneş enerjisinin yenilenebilir ve ücretsiz bir kaynak olması, çevre dostu bir seçenek olarak bu yöntemin öne çıkmasını sağlamaktadır.

Güneş enerjisi kullanan sistemler, sıfır karbon emisyonu hedefiyle çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunurken, fosil yakıt kullanan sistemler enerji üretimi sırasında yüksek karbon emisyonlarına yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, güneş enerjisi ile çalışan sistemlerin ilk kurulum maliyetleri, gerekli ekipmanların teknolojik altyapısı ve sistem entegrasyonu nedeniyle yüksek olabilir. Ancak uzun vadede işletme maliyetlerinin düşük olması, bu yöntemi ekonomik açıdan da sürdürülebilir hale getirmektedir. Buna karşılık, fosil yakıt tabanlı sistemlerin kurulum maliyetleri daha düşük olmasına rağmen, işletme sürecinde enerji kaynağı için sürekli maliyet gereksinimi ve çevresel etkiler, bu sistemlerin dezavantajları arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, güneş enerjisi tabanlı torrefaksiyon sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla çevresel zararları en aza indirirken karbon emisyonlarını azaltma ve enerji maliyetlerini düşürme potansiyeline sahiptir. Bu bulgular, güneş enerjisi kullanımının fosil yakıtlara kıyasla hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Kaynakça

- Acharya, B., Sule, I., & Dutta, A. (2012). A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2, 349-369. <https://doi.org/10.1007/s13399-012-0058-y>
- Acharya, B., & Dutta, A. (2016). Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 6(2), 139-149. <https://doi.org/10.1007/s13399-015-0170-x>
- Aziz, N. A. M., Mohamed, H., Kania, D., Ong, H. C., Zainal, B. S., Junoh, H., Ker, P. J., & Silitonga, A. S. (2024). Bioenergy production by integrated microwave-assisted torrefaction and pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114097. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114097>
- Bandgar, P. S., Jain, S., & Panwar, N. L. (2022). A comprehensive review on optimization of anaerobic digestion technologies for lignocellulosic biomass available in India. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106479. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106479>
- Bashir, M., Yu, X., Hassan, M., & Makkawi, Y. (2017). Modeling and performance analysis of biomass fast pyrolysis in a solar-thermal reactor. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(5), 3795-3807. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02806>
- Benanti, E., Freda, C., Loreface, V., Braccio, G., & Sharma, V. K. (2011). Simulation of olive pits pyrolysis in a rotary kiln plant. *Thermal Science*, 15(1), 145-158. <https://doi.org/10.2298/tsci090901073b>
- Bhavanam, A., & Sastry, R. (2011). Biomass gasification processes in downdraft fixed bed reactors: A review. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2(6), 425-433. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2011.V2.146>
- Brassard, P., Godbout, S., & Raghavan, V. (2017). Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: A review. *Biosystems Engineering*, 161, 80-92. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020>
- Bui, H. H., Tran K. Q., & Chen, W. H. (2015). Pyrolysis of microalgae residues a kinetic study. *Bioresource Technology*, 199, 362-366. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.069>
- Cellatoğlu, N., & İlkan, M. (2016). Solar torrefaction of solid olive mill residue. *Bioresource*, 11(4), 10087-10098. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10087-10098>
- Chen, W. H., & Kuo, P. C. (2011). Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*, 36(2), 803-811. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.036>
- Chen, W. H., Lu, K. M., Lee, W. J., Liu, S. H., & Lin, T. C. (2014). Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass. *Applied Energy*, 114, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.045>
- Chen, W. H., Zhuang, Y. Q., Liu, S. H., Juang, T. T., & Tsai, C. M. (2016). Product characteristics from the torrefaction of oil palm fiber pellets in inert and oxidative atmospheres. *Bioresource Technology*, 199, 367-374. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.066>
- Chen, D., Cen, K., Cao, X., Zhang, J., Chen, F., & Zhou, J. (2020). Upgrading of bio-oil via solar pyrolysis of the biomass pretreated with aqueous phase bio-oil washing, solar drying, and solar torrefaction. *Bioresource Technology*, 305, 123130. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123130>
- Chen, W. H., Lin, B. J., Lin, Y. Y., Chu, Y. S., Ubando, A. T., Show, P. L., Ong, H. C., Chang, J., Ho, S., Culaba, A. B., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82, 100887. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- Chen, D., Cen, K., Gan, Z., Zhuang, X., & Ba, Y. (2022). Comparative study of electric-heating torrefaction and solar-driven torrefaction of biomass: Characterization of property variation and energy usage with torrefaction severity. *Applications in Energy and Combustion Science*, 9, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100051>
- Chen, Z., Chen, L., Khoo, K. S., Gupta, V. K., Sharma, M., Show, P. L., & Yap, P. S. (2023). Exploitation of lignocellulosic-based biomass biorefinery: a critical review of renewable

- bioresource, sustainability and economic views. *Biotechnology Advances*, 69, 108265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108265>
- Cheng, Y., Asaoka, Y., Hachiya, Y., Moriuchi, N., Shiota, K., Oshita, K., & Takaoka, M. (2022). Mercury emission profile for the torrefaction of sewage sludge at a full-scale plant and application of polymer sorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127186. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127186>
- Chintala, V., Kumar, S., Pandey, J. K., Sharma, A. K., Kumar, S. (2017). Solar thermal pyrolysis of non-edible seeds to biofuels and their feasibility assessment. *Energy Conversion and Management*, 153, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.029>
- Christoforou, E. A., & Fokaides, P. A. (2016). Life cycle assessment (LCA) of olive husk torrefaction. *Renewable Energy*, 90, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.022>
- Christoforou, E. A., & Fokaides, P. A. (2018). Recent advancements in torrefaction of solid biomass. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 5, 163-171. <https://doi.org/10.1007/s40518-018-0110-z>
- Deora, P. S., Verma, Y., Muhal, R. A., Goswami, C., & Singh, T. (2022). Biofuels: An alternative to conventional fuel and energy source. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1178-1184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.227>
- Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129, 695-716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
- Garba, A. (2020). Biomass conversion technologies for bioenergy generation: an introduction. In *Biotechnological applications of biomass*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93669>
- Han, J., Yu, D., Wu, J., Yu, X., Liu, F., Wang, Z., & Xu, M. (2021). Co-firing raw and torrefied rice husk with a high-Na/Ca/Cl coal: impacts on fine particulates emission and elemental partitioning. *Fuel*, 292, 120327. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120327>
- Haykiri Acma, H., Yaman, S., & Kucukbayrak, S. (2016). *Combustion characteristics of torrefied biomass materials to generate power*. The 4th IEEE international conference on Smart energy grid Engineering, 226–230. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2016.7589530>
- Ho, S. H., Zhang, C., Chen, W. H., Shen, Y., & Chang, J. S. (2018). Characterization of biomass waste torrefaction under conventional and microwave heating. *Bioresource Technology*, 264, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.047>
- Huang, Y. F., Chen, W. R., Chiueh, P. T., Kuan, W. H., & Lo, S. L. (2012). Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum. *Bioresource Technology*, 123, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.006>
- Kumar, R., Strezov, V., Weldekidan, H., He, J., Singh, S., Kan, T., & Dastjerdi, B. (2020). Lignocellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: A review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109763. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109763>
- Kumari, D., & Singh, R. (2018). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 877-891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
- Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2012). Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *Applied Energy*, 93, 680-685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.002>
- Medic, D., Darr, M., Shah, A., & Rahn, S. (2012). The effects of particle size, different corn stover components, and gas residence time on torrefaction of corn stover. *Energies*, 5(4), 1199-1214. <https://doi.org/10.3390/en5041199>
- Mishra, R. K., Sahoo, A., & Mohanty, K. (2019). Pyrolysis kinetics and synergistic effect in co-pyrolysis of Samanea saman seeds and polyethylene terephthalate using thermogravimetric analyser. *Bioresource Technology*, 289, 121608. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121608>
- Mundike, J., Collard, F. X., & Görgens, J. F. (2016). Torrefaction of invasive alien plants: Influence of heating rate and other conversion parameters on mass yield and higher heating value. *Bioresource Technology*, 209, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.082>

- Negi, S., Jaswal, G., Dass, K., Mazumder, K., Elumalai, S., & Roy, J. K. (2020). Torrefaction: a sustainable method for transforming of agri-wastes to high energy density solids (biocoal). *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 463-488. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09532-2>
- Nhuchhen, D. R., Basu, P., & Acharya, B. (2014). A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, 1-56. <https://doi.org/10.5171/2014.506376>
- Ong, H. C., Chen, W. H., Farooq, A., Gan, Y. Y., Lee, K. T., & Ashokkumar, V. (2019). Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109266. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109266>
- Parvej, A. M., Rahman, M. A., & Reza, K. M. A. (2022). The combined effect of solar assisted torrefaction and pyrolysis on the production of valuable chemicals obtained from water hyacinth biomass. *Cleaner Waste Systems*, 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100027>
- Persson, H., & Yang, W. (2019). Catalytic pyrolysis of demineralized lignocellulosic biomass. *Fuel*, 252, 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.087>
- Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246-1253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- Piersa, P., Unyay, H., Szufa, S., Lewandowska, W., Modrzewski, R., Ślęzak, R., & Ledakowicz, S. (2022). An extensive review and comparison of modern biomass torrefaction reactors vs. biomass pyrolysis—part 1. *Energies*, 15(6), 2227. <https://doi.org/10.3390/en15062227>
- Rahman, M. A. (2020). Valorizing of weeds algae through the solar assisted pyrolysis: effects of dependable parameters on yields and characterization of products. *Renewable Energy*, 147, 937-946. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.046>
- Rahman, M. A., Parvej, A. M., & Aziz, M. A. (2021). Concentrating technologies with reactor integration and effect of process variables on solar assisted pyrolysis: A critical review. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 100957. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100957>
- Ren, S., Lei, H., Wang, L., Bu, Q., Wei, Y., Liang, J., Liu, Y., Julson, J., Chen, S., Wu, J., & Ruan, R. (2012). Microwave torrefaction of Douglas fir sawdust pellets. *Energy & Fuels*, 26(9), 5936-5943. <https://doi.org/10.1021/ef300633c>
- Rodriguez-Alejandro, D. A., Nam, H., Granados-Lieberman, D., Wang, S., Hwang, S.-C., Nam, H., & Capareda, S. C. (2023). Experimental and numerical investigation on a solar-driven torrefaction reactor using woody waste (Ashe Juniper). *Energy Conversion and Management*, 288, 117114. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117114>
- Rousset, P., Aguiar, C., Labbé, N., & Commandré, J. M. (2011). Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. *Bioresource Technology*, 102(17), 8225-8231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.093>
- Rousset, P., Macedo, L., Commandré, J. M., & Moreira, A. (2012). Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 96, 86-91. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.009>
- Rudolfsson, M., Stelte, W., & Lestander, T. A. (2015). Process optimization of combined biomass torrefaction and pelletization for fuel pellet production—A parametric study. *Applied Energy*, 140, 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.041>
- Sarker, T. R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). A review of torrefaction technology for upgrading lignocellulosic biomass to solid biofuels. *BioEnergy Research*, 14, 645-669. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10236-2>
- Satpathy, S. K., Tabil, L. G., Meda, V., Naik, S. N., & Prasad, R. (2014). Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. *Fuel*, 124, 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.102>
- Sukiran, M. A., Daud, W. W., Abnisa, F., Nasrin, A. B., & Loh, S. K. (2020). Effect of torrefaction conditions on physicochemical properties of empty fruit bunches. *IOP Conference Series*:

- Materials Science and Engineering*, 736(2), 022073. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022073>
- Szufa, S., Piersa, P., Adrian, Ł., Czerwińska, J., Lewandowski, A., Lewandowska, W., Sielski, J., Dzikuć, M., Wróbel, M., Jewiarz, M., & Knapczyk, A. (2021). Sustainable drying and torrefaction processes of miscanthus for use as a pelletized solid biofuel and biocarbon-carrier for fertilizers. *Molecules*, 26(4), 1014. <https://doi.org/10.3390/molecules26041014>
- Thanapal, S. S., Chen, W., Annamalai, K., Carlin, N., Ansley, R. J., & Ranjan, D. (2014). Carbon dioxide torrefaction of woody biomass. *Energy & Fuels*, 28(2), 1147-1157. <https://doi.org/10.1021/ef4022625>
- Thengane, S. K., Kung, K. S., Gupta, A., Ateia, M., Sanchez, D. L., Mahajani, S. M., ... & Ghoniem, A. F. (2020). Oxidative torrefaction for cleaner utilization of biomass for soil amendment. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100033>
- Thengane, S. K., Kung, K. S., Gomez-Barea, A., & Ghoniem, A. F. (2022). Advances in biomass torrefaction: Parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. *Progress in Energy and Combustion Science*, 93, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101040>
- Tregambi, C., Montagnaro, F., Salatino, P., & Solimene, R. (2019). Solar-driven torrefaction of a lignin-rich biomass residue in a directly irradiated fluidized bed reactor. *Combustion Science and Technology*, 191(9), 1609-1627. <https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1607847>
- Uemura, Y., Saadon, S., Osman, N., Mansor, N., & Tanoue, K. I. (2015). Torrefaction of oil palm kernel shell in the presence of oxygen and carbon dioxide. *Fuel*, 144, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.050>
- Wang, Z., Lim, C. J., Grace, J. R., Li, H., & Parise, M. R. (2017). Effects of temperature and particle size on biomass torrefaction in a slotrectangular spouted bed reactor. *Bioresource Technology*, 244, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.097>
- Wang, Z., Li, H., Lim, C. J., & Grace, J. R. (2018). Oxidative torrefaction of spruce-pine-fir sawdust in a slot-rectangular spouted bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 174, 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.035>
- Yang, X., Liu, X., Li, R., Liu, C., Qing, T., Yue, X., & Zhang, S. (2018). Co-gasification of thermally pretreated wheat straw with Shengli lignite for hydrogen production. *Renewable Energy*, 117, 501-508. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.055>
- Yangning, N., Yuan, L., Sigi, L., Yang, L., Denghui W., & Shien, H. (2019). Biomass torrefaction: properties, applications, challenges and economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109395. doi:10.1016/j.rser.2019.109395
- Yu, Y., Yang, Y., Cheng, Z., Blanco, P. H., Liu, R., Bridgwater, A. V., & Cai, J. (2016). Pyrolysis of rice husk and corn stalk in auger reactor. 1. Characterization of char and gas at various temperatures. *Energy & Fuels*, 30(12), 10568-10574. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02276>
- Zhang, C., Ho, S. H., Chen, W. H., Fu, Y., Chang, J. S., & Bi, X. (2019). Oxidative torrefaction of biomass nutshells: Evaluations of energy efficiency as well as biochar transportation and storage. *Applied Energy*, 235, 428-441 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.090>
- Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Cen, K., Zhang, J., & Cao, X. (2020). Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 2061-2070. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00666-5>
- Zhang, H., Han, L., & Dong, H. (2021). An insight to pretreatment, enzyme adsorption and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: Experimental and modeling studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110758. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110758>
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35-53. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>