

Biyokütle Teknolojisi

Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÜÇGÜL, Dr. Gökçen AKGÜL*†*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama
Merkezi, Batı Yerleşkesi, 32260 Çünür- Isparta

Dünyanın en önemli birincil enerji kaynağı petroldür. Petrolü, %25 ile kömür, % 20 ile doğalgaz % 7 ile nükleer ve %14 ile yenilenebilir enerji kaynakları izlemektedir.

Ana enerji kaynağı petrol, giderek azalmaktadır. Buna ek olarak, fosil kaynakların kullanımı sonucu oluşan hava kirliliği ve devamında oluşan iklim değişikliği gibi artan çevresel sorunlardan dolayı, tüm dünyada atmosfere daha az karbondioksit salan, fosil kaynaklara alternatif, çevreyi daha az kirleten, yenilenebilir enerji kaynakları aranmaktadır. Biyokütle bunlardan biridir.

Biyokütle terimi çok geniş anlamda yaşayan organizmalardan üretilen madde anlamına gelir. Örneğin, odun, tarımsal atıklar (saman, mısır kocanları, pamuk atıkları v.b.), şehir kanalizasyon atıkları, endüstriyel organik atıklar (kağıt endüstrisindeki siyah likör, şeker sanayisinden küspe) v.s. Geleneksel olarak biyokütle, birkaç bin yıldır enerji kaynağı olarak zaten bilinmektedir. Örneğin, odunun direkt yakılmasıyla elde edilen ısı enerjisi yemek pişirmede ve ısınmada zaten kullanılmaktadır. 21. yüzyılda biyokütlenin modern kullanımı ise enerji yoğunluğunun artırılarak fuel yakıtı çevrilmesini içerir.

Genel olarak biyokütlenin modern enerji formları katı (ağaç, pellet vb.), sıvı (etanol, biyodizel vb.) ve gaz (biyogaz, hidrojen vb.) olarak gruplandırılabilir. Biyokütle; termal, biyolojik ve fiziksel proseslerle hidrojen, etanol, metanol veya metan gibi çeşitli enerji kaynaklarına çok çeşitli tekniklerle dönüştürülebilir. Biyogaz teknolojisi, biyokütle gazlaştırılması ve piroliz ile sıvı ve gaz yakıt formları elde edilebilir. Bu makalede öncelikle biyokütleden enerji üretim teknolojileri özetlenmekte ve Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde biyokütle ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: biyokütle, enerji, teknoloji

* Süleyman Demirel Üniversitesi, YEKARUM, E-mail: iucgul@mmf.sdu.edu.tr

*† Süleyman Demirel Üniversitesi, YEKARUM, E-mail: gokcenakgul@yahoo.com

Biomass Technology

*İbrahim ÜÇGÜL**, *Gökçen AKGÜL*†*

Süleyman Demirel University, Research and Application Center for Renewable Energy
Resources, West Campus, 32260 Çünür- Isparta / TURKEY

The world's most important primary energy source is petrol. The following sources are coal with 25%, gas with 7%, and renewable energy resources with 14 % .

Because of reducing petrol sources and increasing environmental problems such as climate change, air pollution; alternative renewable energy resources to fossil fuels are sought. Biomass is one of renewable energy resources.

The term of biomass covers a broad range of materials that as fuels or raw materials being all derived from the living organism. For example poultry litter, sewage sludge, agricultural residues such as straw from grains, stalks from maize, baggase from sugar cane.

Historically, biomass has been already known as energy source for several thousand years. Wood has been used by direct combustion for generating heat for domestic cooking. The modern usage of biomass contains increasing its energy density and converting it to fuel. Biomass can be converted into fuel via various conversion technologies. This article gives information about these technologies from biomass and researches performing at Süleyman Demirel University, Renewable Energy Research and Application Center about biomass.

Keywords: biomass, energy, technology

* Süleyman Demirel University, YEKARUM, E-mail: iucgul@mmf.sdu.edu.tr

*† Süleyman Demirel University, YEKARUM, E-mail: gokcenakgul@yahoo.com

1. Biyokütleden Enerji Üretim Teknolojileri

Çürümeye terk edilen biyokütle, yenilenebilir alternatif bir enerji kaynağıdır ve dünya ekonomisine kazandırılabilir. Modern çağda özellikle atık konumundaki biyokütle, bazı proseslerle işlenerek enerji yoğunluğu artırılarak kullanılır. Bu prosesler, bu makalede özetlenmiştir.

1.1. Fiziksel Prosesler

1.1.1. Kurutma

Kurutmanın en önemli amacı, biyokütlenin bozulmadan uzun süre depolanabilmesidir. Sıcak hava ile kurutma, güneşte kurutma, vakumla kurutma gibi kurutma işlemleri uygulanabilir. Mikrodalga, rotari kurutma gibi gelişmiş teknolojileri kullanarak yapılan kurutma işlemleri de vardır.^{1,2}

1.1.2. Öğütme

Kuru biyokütlenin parçacık büyüklüğü, kullanıldığı proses öncesi miller, bıçaklar, bilyeler gibi çeşitli öğütme teknikleri kullanılarak istenilen büyüklüğe ayarlanır.³

1.1.3. Pelletleme ve Biriketleme

Pellet, odun artıklarının kurutulup, öğütülerek talaş haline getirildikten sonra yüksek basınçla sıkıştırılmasıyla çapı 6-10 mm boyutlarında oluşturulan maddedir. Briket ise 5-20 cm arasında değişen boyutlarda üretilir.

Özellikle tarım ve orman artıklarının homojen olmamaları ve çok fazla hacim kaplamaları nedeniyle direkt yakıt olarak kullanılmaları oldukça zordur. Bu problem, bu tür biyokütlenin kompakt ve düzenli bir şekilde yoğunluğunun artırılmasıyla yani pellet veya biriket haline getirilmesiyle çözülebilir.⁴ Bunun için kullanılan teknolojiler, bir piston veya vida yardımıyla basınç uygulanarak biyokütlenin istenilen şekil ve büyüklüklerde kesilmesine dayanır.⁵

Odun pelletleri genellikle kimyasal bağlayıcı maddeler eklenmeden yüksek basınçla oluşturulurlar. Biyokütlenin içerisindeki doğal moleküller bağlayıcı görevi de görmektedir.⁶

Pellet veya biriket haline getirilmiş biyokütlenin yakılarak enerjisinden faydalanılabilir.⁷ Odun briketi aynı ağırlıktaki yakacak oduna göre daha fazla ısı verir, daha temizdir ve daha uzun süre yanar.

Biyokütlenin pellet veya biriket haline getirilmesinin yararları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Odunsu artıkların ileri termo-kimyasal dönüşümler için kullanımının sağlanması
- Depolama alanının azaltılması
- İşleme biçiminin ve taşımanın kolaylaştırılması ve masrafların azaltılması
- Enerji yoğunluğu / hacim oranının artırılması
- Fermantasyon nedeniyle oluşan madde kaybının ortadan kaldırılması

1.2. Biyolojik ve Kimyasal Prosesler

1.2.1. Biyogaz

Doğal olarak oluşmuş bataklıklarda milyonlarca yıldır mikroorganizmalar, oksijensiz veya sınırlı oksijenli ortamda kendi metabolik faaliyetleri için organik ve inorganik maddeler kullanarak metan, karbon dioksit ve eser miktarda hidrojen, azot ve hidrojen sülfür içeren bir gaz karışımı oluştururlar. Bu gaz, bataklık gazı, gübre gazı veya biyogaz gibi isimlerle anılmaktadır. Bu proses, insanoglunun çok sonra dikkatini çekmiş ve biyogaz üretim teknolojileri gelişmiştir. Biyogaz oluşumunda yaş biyokütle, mikrobiyolojik bakteri faaliyetleri ile parçalanır, oksijensiz ortamda biyokimyasal fermantasyon gerçekleşir.

Biyogaz üretimi sırasındaki aşamalar aşağıda sıralanmıştır⁸

1. Sıvılaşma aşaması (Asitojen veya hidroliz): Yaş biyoküttele bulunan lipitler, proteinler, karbonhidratlar, suda çözünen şeker, yağ asidi, amino asit, gliserin, alkol, karbonhidrat monomerleri gibi moleküllere parçalanır.

2. Asetojen aşaması: İkinci aşamada alkoller, uzun yağ asitleri ve asetatlar gibi bileşiklerin olduğu fermantasyon başlar. Bakteriler, sıvılaşma aşamasının ürünleriyle beslenerek uçucu yağ asitleri, sirke asidi, hidrojen ve karbon dioksit oluştururlar.

3. Üçüncü ve son aşama, metanojenesis aşamasıdır ve çoğunluğu metan ve karbondioksitten oluşan gaz ürünler oluşur.

1 m³ lük biyogazın ortalama hacimsel bileşimi, %54-80 CH₄, %20-45 CO₂, %0-1 N₂, %1-10 H₂, %0.1 CO, %0.1 O₂, eser miktar H₂S şeklindedir.⁹

Elde edilen biyogaz; gaz motoru ve jeneratör yardımıyla ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Ancak, kullanıma sunulmadan önce korozif etkisi olan ve motor için uygun olmayan H₂S, CO, CO₂ gibi gazlardan arındırılmalıdır.

Biyogaz teknolojisi ile üretilen metan gazı yandığı zaman geleneksel fuel yakıtlara göre çok daha az miktarda CO₂ emisyonu yapar, dolayısıyla çevreye dost bir yakıttır. Ayrıca, biyokütlenin çürümeye terkedilmesi sırasında oluşacak metan gazının, CO₂'ye göre kat kat fazla olan sera gazı etkisi de ortadan kaldırılmış olur.

Biyogaz teknolojisi; tarım atıkları, kanalizasyon atıkları, zirai atık sular, hayvan gübreleri, evsel biyolojik atıklar ve küspe gibi nem içeriği yüksek atıklar için daha uygundur.⁹ Hidrojen üreten bakteriler kullanılarak, biyogaz üretim yöntemleri ile çok önemli bir enerji kaynağı olan hidrojen de üretilebilir.^{10,11}

1.2.2. Biyoetanol

Biyokütle içerisinde yüksek oranda şeker bulunuyorsa bu çeşit biyokütle, enerji kaynağı olan alkol üretimi için kullanılabilir. Oksijensiz ortamda fermantasyon yoluyla alkol üretimi yapılır.

Biyoetanol üretimi için yapısında karmaşık karbonhidrat polimerleri içeren biyokütle de kullanılabilir. Lignoselülozik veya odunsu biyokütle; selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi polimer karbonhidratlarınca zengindir. Selüloz, glikoz birimlerinden oluşan bir polimerdir. Bu maddeler hidrolize olduklarında basit şekerleri oluştururlar ve daha sonra fermente olduklarında etanol üretirler.

Selülozik maddelerin yapılarında içerdikleri hidrojen bağları nedeniyle basit şekerlere dönüşümleri biraz zordur. Ancak, sakkarifikasyon denilen işlem uygulanarak su ve asit varlığında hidroliz gerçekleştirilir.¹²

Hemiselüloz; faklı şeker birimlerinden oluşmuş dallanmış bir yapıya sahiptir ve hidrolizi selüloza göre daha kolaydır. Lignin ise alkol gruplarını da içeren çok daha karmaşık bir yapıya sahip olduğundan fermantasyonu oldukça zordur.

Biyokütlenin çeşidine göre içerdiği selüloz, hemiselüloz ve lignin miktarları da çeşitlilik gösterir. Sonuç olarak hemiselüloz ve basit şeker içeriği yüksek olan biyokütleden etanol üretim verimi yüksektir. Biyokütle içerisinde basit şeker oranı ne kadar yüksek ise etanol

üretimi için gereken teknoloji de o kadar basittir.

Fermantasyon sırasında “*Clostridium beijerinckii*” gibi bakteriler kullanılarak farklı alkoller de üretilmiştir.¹³

1.2.3. Biyodizel

Bitkisel ve hatta hayvansal yağlar biyodizel olarak kullanılmaktadır. Yağlar, yağ asitlerinin gliserin ile oluşturduğu esterlerdir, trigliseritlerdir. Trigliseritlerin hidrolizinden elde edilen doymuş ya da doymamış yağ asitleri, metanol veya etanol ile trans-esterifikasyon işlemine tabi tutulur.¹⁴ Oluşturulan yağ asidi metil-etil esterleri doymuş ya da doymamış hidrokarbon zinciri içerir. İşte bu hidrokarbon zinciri, kimyasal enerjinin çoğunu depolar.

Bu amaçla kullanılan yağlar; ayçiçeği yağı, soya yağı, hurma yağı, fındık yağı, kanola yağı, hayvansal yağlar gibi yağlardır.¹⁵ Atık mutfak yağlarının biyodizel olarak değerlendirilmesi mümkündür. Hatta yosunlar dahi biyodizel için kullanılmaktadır.¹⁶

Trans-esterifikasyon ile yağlar, mevcut araç motorları ve yakıt sistemleri için uygun yakıt durumuna getirilir.^{17,18}

Biyodizel, kendi başına yakıt olarak kullanılabilmesi gibi geleneksel olarak kullanılan dizel yakıtlarla beraber de kullanılarak enerji üretilebilir.

1.3. Termokimyasal Prosesler

1.3.1. Yakma

Selülozik biyokütle, düşük kül ve düşük kükürt içeriği ile çevreci bir yakıttır. Ayrıca, geleneksel yakıtların yanmasıyla oluşan NO_x, SO_x ve poliaromatik hidrokarbon emisyonları da düşüktür.¹⁹

Orman biyokütlesinin yakılmasıyla elde edilen enerji, ısı ve elektrik üretiminde kullanılabilir. Ancak enerji değeri kömür ve petrole göre düşüktür. Bu yüzden diğer enerji kaynakları ile karıştırılarak da yakılabilir.^{20,21} Ağaç kabukları, tarımsal atıklar, kanalizasyon atıkları ve kağıt sanayi atıkları, kömür gibi enerji değeri daha yüksek enerji kaynakları ile beraber yakılarak gereken enerjiye ulaşılabilir.^{22,23,24,25}

Beraber-yakma teknolojisinin en önemli özelliği, fosil yakıt gereksinimini azaltmasıdır. Üstelik NO_x, SO_x ve CO₂ emisyonları da azalmaktadır.

Biyokütle yakma teknolojisinde mekanizmalar tam olarak aydınlatılmadığı

için kömür yakma teknolojisi bilgi birikiminden faydalanılmaktadır. Yine de en uygun yakma teknolojisi akışkan yatak olarak görünmektedir.^{26,27,28,29,30} Akışkan yatakta yakma sırasında parçacık kayıplarını önlemek için ise akışkan yatak teknolojisi modifiye edilmiştir.^{31,32}

Yakma sonucu kalan kül gibi kararlı atıklar, erime ve katılaştırma, çimento ile katılaştırma, kimyasal kullanılarak kararlı hale getirme, asit veya diğer solventleri kullanarak ekstrakte etme işlemleriyle bertaraf edilebilmektedir. Bertaraf etmenin diğer bir yöntemi, çok yüksek sıcaklıklarda eritmek ve tekrar soğutarak katılaştırmaktır.³³ Katılaştırılan yakma atıkları, yollara parke taşı olarak döşenebilir, arazi alanlarının ıslahında kullanılabilir.

1.3.2. Piroliz

Piroliz (Pyrolysis) kelimesi yunanca bir kelime olup pyr = Ateş; olysis = ortaya çıkmak anlamına gelmektedir. Piroliz, biyokütleden oksijensiz ortamda organik moleküllerin parçalanmasıyla gaz elde etme işlemidir. Kimyasal bağlar, oksijensiz ortamda termal olarak bozunurlar. En tanınmış piroliz prosesi odun kömürü üretimidir. Bu bir yavaş pirolizdir, degazifikasyon olarak da bilinir.

İlk defa, dünyada petrol krizi olduğunda biyokütlenin ve talaşın sıvılaştırılması ve gazlaştırılması ile piroliz, önemli hale gelmiştir.

Piroliz sonucunda katı, sıvı ve gaz ürünler oluşur. Genellikle piroliz yöntemi ile biyokütle sıvılaştırılarak 'biyo-yağ'a çevrilir.³⁴ Bu sıvı yağ, organik bileşiklerin bir karışımıdır (Furfural türevleri, fenol türevleri vb.).³⁵ Biyokütlenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen bu sıvı, türbin veya motorlarda direkt olarak kullanım için uygun değildir. Elde edilen bu sıvı, petrol naftası gibi işlemlere tabi tutularak kullanılır hale getirilir.

Biyo-yağ, kömürün gazlaştırılmasında kullanılan tekniklerle geride kül ve cüruftan başka bir şey bırakmayacak şekilde hidrojen ve karbon monoksit yönünden zengin olan sentez gazına dönüştürülebilir. Sentez gazından Fischer-Tropsch sentezi ile etanol, metanol gibi değerli kimyasallar üretilebilir.

Biyo-yağın kalori değeri, aynı miktardaki biyokütleden çok daha fazladır.³⁶ Depolanması ve taşınması daha kolaydır. Daha az kükürt içerir.

Pirolizde elde edilen katı, sıvı ya da gaz ürünlerden hangisinin veriminin en fazla

olacağı, biyokütlenin çeşidine, süreç parametrelerine ve reaktör tipine bağlıdır.³⁷ Yakma proseslerinden farklı olarak pirolizde gereken enerji dışarıdan karşılanır.

Üç çeşit piroliz vardır:

a) Torrefaksiyon (Torrefaction)

Torrefaksiyon, oksijensiz ortamda ılımlı piroliz anlamında kullanılmaktadır. Örneğin odun biyokütlesinin pirolizi dört karakteristik bölgeye ayrılmaktadır. Birinci bölge 200 °C'a kadar olan sıcaklık bölgesi olup burada su, CO₂, formik asit ve asetik asit açığa çıkar. İkinci bölge 200-280 °C sıcaklık bölgesi olup; su buharı, formik asit, asetik asit, bir miktar CO ve glikoz açığa çıkar. Üçüncü bölge 280-500°C arasında olup yoğun bir ekzotermik reaksiyon başlar. Dördüncü bölge 500°C'in üstü olup burada reaksiyonlar yoğun bir şekilde devam eder. Burada torrefaksiyon bölgesi ikinci bölge olup, sadece uçucu bazı organik maddelerin uzaklaştırılmasını ve reaktif hemiselüloz fraksiyonunun bozunmasını içerir. Biyokütlenin karbon içeriği ve kalori değeri artar, kuruma işlemi gerçekleşir.

Bu proses, gazlaştırma öncesi biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırmada önemli bir aşamadır.³⁸

Odununda bulunan selüloz fraksiyonu 300-375 °C, hemiselüloz tabakası 200-300 °C, lignin tabakası 300-500 °C' de bozunmaktadır.³⁹ Böylece farklı sıcaklıklarda bozulan fraksiyonlardan farklı yakıt eldesi mümkün olabilecektir. Piroliz konusunda literatürde çok fazla çalışma varken, piroliz reaksiyonları, mekanizması ve kinetiğinin daha iyi anlaşılması için torrefaksiyon hakkında daha fazla çalışma gerekmektedir.

b) Yavaş piroliz

Odun, turba, maden kömürü gibi organik maddeler havasız ortamda ve sabit yatak reaktörlerde, 300 °C civarındaki sıcaklıklarda, uzun ısıtma zamanlarında katı ve sıvı ürünlere dönüştürülürler.^{40,41}

c) Hızlı piroliz

Hızlı piroliz ile biyokütle, yüksek sıcaklıkta ve akışkan yatak reaktörlerde hızla gazlaştırılır. Oluşan gaz, reaksiyon sisteminden hızla uzaklaştırılır ve soğutulur. Soğuyan gaz yoğunlaşarak katranımsı bir sıvı oluşturur.⁴² Bu sıvı, fenol ve furfural türevlerince zengindir.^{43,44,45}

Biyokütleden en fazla sıvı ürün elde etmek, hızlı pirolizin temel amacıdır. Yüksek verim için hızlı ısıtma, reaktörde oluşan gazın kısa alıkonma zamanı ve yoğunlaşabilen gazın hızlıca soğutulması esastır. Hızlı ısıtma ile kömürleşme önlenir. Bunun için de biyokütlenin tanecik boyutunun olabildiğince küçük olması gerekir. Gaz oluşumundan sonra soğutmaya kadar geçen zaman, daha başka yan reaksiyonları önlemek için oldukça az olmalıdır. Hızlı soğutma ile de kondenzasyon rekasyonlarının önüne geçilir.⁴⁶

Proses sonrası biyo-yağın işlenmeden bekletilmesi, içerisinde bulunabilecek kül ve kok gibi maddelerin katalitik etkisiyle başka kimyasal reaksiyonların oluşmasına neden olabilir.^{47,48} Bu nedenle bekletilmeden en son ürüne işlenmesi uygundur.

Biyokütle çeşitlerinin ısı, kül ve su içerikleri ve hızlı piroliz sonucundaki ürünlerin kok/kül, kondensat ve gaz değerleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır.⁴⁹ Ayrıca, biyokütlenin ihtiva edebileceği tuzların (Na_2CO_3 , K_2CO_3 gibi) piroliz işlemlerine katalizör etkisi de vardır.

Üretilen yağ, asit özelliği taşır. Bu nedenle özellikle yüksek sıcaklıklarda korozyona neden olur. Proseslerde polimerleşme dolayısı ile tıkanma problemleri de ortaya çıkabilmektedir. Günümüzde kullanılan mevcut piroliz teknolojisinde bu sorunlar yoğun olarak yaşanmaktadır.

2007 yılında tamamlanan "BIOTOX" adlı Avrupa birliği projesi ile piroliz yağının toksik etkileri ve çevreye olan etkileri incelenmiştir. "Material Safety Data Sheets" madde güvenliği prototipi hazırlanmıştır.⁵⁰

Proliz kondensatı ısı ve elektrik üretiminde kullanılabilir ve ya ekstraksiyon ile kimyasallar elde edilebilir.⁵¹ Sentez gazı eldesi için ileri gazlaştırılabilir.⁵²

Hızlı pirolizdeki güncel araştırma alanları ve firmaların bazı projeleri Aston üniversitesi tarafından koordine edilmektedir (www.pyne.co.uk).

1.3.3. Gazlaştırma ve Hidrotermal Prosesler

Biyokütle iki grupta incelenir; ıslak biyokütle (melas, nişastalılar, gübre, meyve sanayi atıkları) ve kuru biyokütle (odun, zirai atıklar gibi).

Biyokütle gazlaştırılması hem yağ hem de kuru biyokütle için uygulanan termokimyasal bir teknolojidir.

Kuru biyokütle için genellikle yukarıda anlatıldığı gibi piroliz edilir. Daha sonra elde edilen kondensat aşırı ısıtılır. Sıcak yağ su püskürtülmesi ile kömür gazlaştırmada olduğu gibi gazlaştırma gerçekleştirilir ve çok değerli olan sentez gazı elde edilir.⁵³

Yağ biyokütle ise yüksek basınçta (>220 atm) ve yüksek sıcaklıklara (>300°C) ısıtılınca gazlaşır.^{54,55} Elde edilen gaz genel olarak CH_4 , H_2 , CO ve CO_2 içerir. Bileşenin yüzdesi, kullanılan biyokütlenin ve teknolojinin türüne göre değişir. Bu süreçte suyun yüksek sıcaklık ve yüksek basınç özelliklerinden yararlandığı için "hidrotermal" terimi kullanılır.

Hidrotermal koşullarda suyun termofiziksel özellikleri çok değişmektedir. Örneğin, dielektrik sabiti yüksek sıcaklıklarda azalır.⁵⁶ Dolayısıyla olağan koşullarda polar su ile apolar organik maddeler ve gazlar karışmazken süperkritik koşullarda su, apolar maddeler için iyi bir çözücü haline gelebilmektedir. Üstelik su, kimyasal reaksiyonlarda aktif reaktant olarak da rol alabilir.⁵⁷ Suyun iyonik karakteri arttığı için asit-baz ile katalizlenen reaksiyonları kolaylaştırabilir.⁵⁸

Birçok gazlaştırma prosesinde biyokütlenin su içeriği istenmeyen bir özellik iken yüksek su içeriği hidrotermal prosesin önemli bir avantajıdır. Biyokütlenin kurutmaya gerek kalmadan değerli gazlara dönüştürülmesi için geliştirilmiş bir teknolojidir. Özellikle temiz enerji kaynağı hidrojen üretiminde gittikçe önem kazanmaktadır.^{59,60}

Kuru madde içeriği ağırlıkça %1.8-5.4 (gerisi su) olan havuç ve patates ezmesi, 500 °C, 300-500 bar basınçta gazlaştırılmıştır.⁶¹ Gaz ürün, genel olarak H_2 ve CO_2 'den oluşmaktadır. Sıvı faz ise aldehitler, karboksilik asitler, fenoller, furfurallar ve alkoller gibi değerli organik maddeler içermektedir.⁶²

Diğer yandan, süperkritik su ile oksidasyon, atıkların bozunmasına yönelik kullanılan hidrotermal bir prostestir. Süperkritik koşullarda oksijen, su ve organik madde tek bir fazda iyice karışabilir ve tam oksidasyon sağlanabilir. Molekül içindeki hetero atomlar, mineral asitlere dönüşürken organik kısımlar parçalanarak gazlaşır. Örneğin oksijensiz ortamda süperkritik gazlaşmaya karşı kararlı olan amonyak ve metanol, süperkritik su oksidasyonu ile parçalanır.^{63,64} Ayrıca, patlayıcı maddeler bu teknoloji ile parçalanarak yok edilebilir.⁶⁵

2. Sonuç ve Değerlendirme

Biyokütle, uygun teknolojiler ve uygun yöntemler kullanılarak enerjiye dönüştürüldüğünde, çevreye zararı az, yenilenebilir ve güvenli bir enerji kaynağıdır.

Biyokütle kullanılarak varılmak istenen son ürün, hidrojen olduğunda hidrotermal koşullarda gazlaştırma etkin bir teknolojidir. Hedef metan üretimi ise biyogaz teknolojisi daha uygun olacaktır. Piroлиз ise biyokütlenin sıvılaştırılmasında ve enerji yoğunluğunun artırılmasında etkilidir.

Biyokütleden sadece yakılarak enerji üretilmemelidir. Hidrojen, etanol, metanol, metan, piroliz yağı gibi enerji formlarına dönüştürülerek de kullanılmasıyla ülke ekonomisine ve teknolojik gelişime katkıda bulunulacaktır.

3. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi' nde (YEKARUM) Biyokütle ile ilgili yapılan çalışmalar

3.1. Biyogaz Çalışmaları

Ülkemiz iklim koşullarına en uygun biyogaz teknolojileri mezofilik (≈ 35 °C) ve termofilik (≈ 55 °C) teknolojilerdir. YEKARUM'da yürütülen biyogaz çalışmalarında mezofilik ve termofilik bölgede çalışan biyogaz reaktör teknolojisi geliştirilmiş ve patentleşmiştir (Şekil 1). Termofilik sistemin gerektirdiği ısı, enerjisi güneş enerjisinden karşılanmaktadır.

Şekil 2'de gösterilen laboratuvar ölçekli biyogaz ünitesi ile de farklı tür biyokütlelerden metan gazı üretimi sağlanmıştır.



Şekil 1. Yekarum'daki 10 m³'lük termofilik ve mezofilik çalışabilen biyogaz ünitesi



Şekil 2. Yekarum'daki laboratuvar ölçekli biyogaz ünitesi

3.2. Piroлиз-Gazlaştırma Çalışmaları

Biyokütlenin pirolizi ile ilgili olarak bir kamu kuruluşu ile ortak çalışmalar devam etmektedir.

4. Kaynakça

- (1) Harris, G. A., Torgovnikov, G., Vinden, P., Brodie, G. I., Shaginov, A. Microwave Pretreatment of Backsawn Messmate Boards to Improve Drying Quality: Part 1. *Drying Technology*, 26, **2008**, 579-584
- (2) Xu, Q., Pang, S. Mathematical Modeling of Rotary Drying of Woody Biomass. *Drying Technology*, 26, **2008**, 1344-1350
- (3) Masuda, H., Higashitani, K., Yoshida, H. *Powder Technology Handbook*, third edition, **2006**, 401-503
- (4) Lehtikangas, P. Storage on Pelletised Sawdust, Logging Residues and Bark. *Biomass and Bioenergy*, 19, **2000**, 287-293
- (5) Ryu, C., Finney, K., Sharifi, V. N., Swithenbank, J. Pelletised Fuel Production from Coal Tailings and Spent Mushroom Compost-Part I. Identification of Pelletisation Parameters. *Fuel processing technology*, 89, **2008**, 269-275
- (6) Kaliyan, N., Morey, R. V. Natural Binders and Solid Bridge Type Binding Mechanisms in Briquettes and Pellets Made from Corn Stover and Switchgrass. *Bioresource Technology*, 101, **2010**, 1082-1090
- (7) Prochnow, A., Heiermann, M., Plöchl, M., Amon, T., Hobbs, P.J. Bioenergy from Permanent Grassland – A Review: 2. Combustion. *Bioresource Technology*, 100, **2009**, 4945-4954
- (8) Gülen, J., Arslan, H. Biyogaz. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4, **2005**, 121-129
- (9) Yaldız, O. Biyogaz Teknolojisi, *Akdeniz Üniversitesi Yayınları*, yayın no 78, **2004**, pp.20
- (10) Hallenbeck, P.C. Fermentative Hydrogen Production: Principles, Progress, and Prognosis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **2009**, 1-11
- (11) Das, D., Veziroglu, T. N., Hydrogen Production by Biological Processes: A Survey of Literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, **2001**, 13-28
- (12) Möller, R. Toonen, M., Jan van Beilen, Salentijn E., Clayton, D. Cell Wall Biorefining: Lignocellulose

Feedstocks. *Outputs from the EPOBIO Project, CPL Pres*, April 2007, 28-91

(13) George, H.A., Chen, J.-S. Acidic conditions are not obligatory for onset of Butanol formation by *Clostridium beijerinckii* (Synonym, *C.butylicum*). *Appl. and Env.Microbiology*, 46(2), 1983, 321-327

(14) Ölçüm, T. Biyodizel Teknolojisi, Yıldız teknik üniversitesi, *FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makineleri Programı, Yüksek Lisans Tezi*, 2006

(15) Oğuz, H. Tarım Kesiminde Yaygın Olarak Kullanılan Dizel Motorlarında Fındık Yağı Dizelinin Yakıt Olarak Kullanım İmkânlarının İncelenmesi. *Selçuk Üniversitesi, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Doktora tezi*, 2004

(16) Vijayaraghavan, K., Hemanathan, K. Biodiesel Production from Freshwater Algae. *Energy Fuels*, 23, 2009, 5448-5453

(17) Öztürk, M.G., Bilen, K.B. Kanola Yağı Metil Esteri ve Karışımlarının Dizel Motoru Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi. *Int. J. Eng. Research & Development*, 1(1), January 2009, 35-41

(18) Günal, Ç. Küçük Tip Biyodizel Yakıt Reaktörlerinin Ekonomikliğinin Araştırılması. Yıldız teknik üniversitesi, Makine Mühendisliği Enerji Makineleri Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2006

(19) Yan, J.H., Chen, T., Li, X.D., Zhang, J., Lu, S.Y., Ni, M.J., Cen, K.F. Evaluation of PCDD/Fs Emission from Fluidized Bed Incinerators Co-firing MSW with Coal in China. *Journal of Hazardous Materials A*, 135, 2006, 47-51

(20) S. van Loo, Koppejan, J. Handbook of Biomass Combustion and Co-firing; *Twente University Press: Twente*, 2002, ISBN 9036517737, pp. 73

(21) Leckner, B., Amand, L.-E., Lucke, K., Werther, J. Gaseous Emissions from Co-combustion of Sewage Sludge and Coal/Wood in a Fluidized bed. *Fuel*, 83, 2004, 477-486

(22) Gayan, P., Adanez, J., Luis F. de Diego, Francisco Garcı'a-Labiano, Cabanillas, A., Bahillo, A., Aho, M., Veijonen K. Circulating Fluidised Bed Co-combustion of Coal and Biomass, *Fuel*, 83, 2004, 277-286

(23) Ghani, W.A.W.A.K., Alias, A.B., Savory, R.M., Cliffe, K.R. Co-combustion of Agricultural Residues with Coal in a Fluidised Bed Combustor. *Waste Management*, 29, 2009, 767-773

(24) Amand, L.-E., Leckner, B. Metal Emissions from Co-combustion of Sewage Sludge and Coal/Wood in fluidized bed. *Fuel*, 83, 2004, 1803-1821

(25) Lee, G. W., Lee, S. J., Jurng, J., Hwang, J. Co-firing of Paper Sludge with High-Calorific Industrial Wastes in a Pilot Scale Nozzle-Grate Incinerator. *Journal of Hazardous Materials B*, 101, 2003, 273-283

(26) Nussbaumer, T. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy & Fuels*, 17, 2003, 1510-1521

(27) Quaak, P. Knoef, H. Stassen, H. Energy from Biomass. A Review of Combustion and Gasification Technologies. *World Bank Technical Paper*, No. 422, 1999, pp. 15

(28) Basu, P. Combustion of Coal in Circulating Fluidized-bed Boilers: A Review. *Chemical Engineering Science*, 54, 1999, 5547-5557

(29) Bain, R. L., Overend, R. P., Craig, K. R. Biomass-Fired Power Generation. *Fuel Processing Technology*, 54, 1998, 1-16

(30) Khiari, B., Marias, F., Zagrouba, F., Vaxelaire, J. Use of a Transient Model to Simulate Fluidized Bed Incineration of Sewage Sludge. *Journal of Hazardous Materials B*, 135, 2006, 200-209

(31) Lin, C. H., Teng J. T., Chyang, C. S. Evaluation of the Combustion Efficiency and Emission of Pollutants by Coal Particles in a Vortexing Fluidized Bed. *Combustion and flame*, 110, 1997, 163-172

(32) Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S. A Novel Cyclonic fluidized-Bed Combustor (ψ -FBC): Combustion and Thermal Efficiency, Temperature Distributions, Combustion Intensity, and Emission of Pollutants. *Combustion and Flame*, 146, 2006, 232-245

(33) Sakai, S., Hiraoka, M. Municipal Solid Waste Incinerator Residue Recycling by Thermal Processes. *Waste Management*, 20, 2000, 249-258

(34) Xianwen, D., Chuangzhi, W., Haibin, L., Yong, C. The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB Reactor. *Energy Fuels*, 14, 2000, 552-557

(35) Torres, A., de Marco, I., Caballero, B.M., Laresgoiti, M.F., Legarreta, J.A., Cabrero, M.A., Gonzales, A., Chomon, M.J., Gondra, K. Recycling by Pyrolysis of Thermoset Composites: Characteristics of the Liquid and Gaseous Fuels Obtained. *Fuel*, 79, 2000, 897-902

(36) Alen, R., Kuoppala, E., Oesch, P. Formation of the Main Degradation Compound Groups from Wood and Its Components During Pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 36, 1996, 137-148.

(37) Onay, Ö., Koçkar, O. M. Slow, Fast and Flash Pyrolysis of Rapeseed. *Renewable Energy*, 28, 2003, 2417-2433

(38) Prins, M. J., Ptasinski, K. J., Janssen, F. J. J. G. Torrefaction of Wood Part 1. Weight Loss Kinetics. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 77, 2006, 28-34

(39) Shafizadeh, F. Pyrolytic Reactions and Products of Biomass, in: R.P. Overend, T.A. Milne, L.K. Mudge (Eds.), *Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion*, Elsevier, London, 1985, pp. 183-217.

(40) Şensöz, S. Slow Pyrolysis of Wood Barks from *Pinus Brutia* Ten. and Product Compositions. *Bioresource Technology*, 89, 2003, 307-311

(41) Yorgun, S., Şensöz, S., Koçkar, Ö. M. Characterization of the Pyrolysis Oil Produced in the Slow Pyrolysis of Sunower-Extracted Baggasse. *Biomass and Bioenergy*, 20, 2001, 141-148

(42) Fagernäs, L. Chemical and Physical Characterisation of Biomass-based Pyrolysis Oils, Literature Review. *VTT Research Notes*, 1706, *Technical Research Centre of Finland, Espoo*, 1995

(43) Leible, L., Kälber, S., Kappler, G., Lange, S., Nieke, E., Proplesch, P., Wintzer D., Fürmiss B. Kraftstoff, Strom und Waerme aus Stroh und Waldrestholz, *Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7170*, 2007

(44) Beaumont, O. Flash Pyrolysis Products from Beech Wood. *Wood and Fiber Science*, 17(2), 1993, 228-239

(45) Milne, T., Agblevor, F., Davis, M., Deutch, S., Johnson, D. A. Review of the Chemical Composition of Fast-Pyrolysis Oils from Biomass. *Developments in Thermalchemical Biomass Conversion*, 1, 1997, 409-424

- (46) Klaubert, H., Meier, D. Untersuchungen zur Wirbelschichtpyrolyse von Holzpartikeln. *BFH Arbeitsbericht* 2002/1, **2002**
- (47) Adjaye, J.D., Sharma, R.K., Bakhshi, N.N. Characterization and Stability Analysis of Wood-derived Bio-oil. *Fuel Processing Technology*, 31, **1992**, 241-256
- (48) Czernik, S., Johnson, D.K., Black, S. Stability of Wood Fast Pyrolysis oil. *Biomass and Bioenergy*, 7(1-6), **1994**, 187-192
- (49) Henrich, E., Dahmen, N., Dinjus, E. 2007: Das FZK-Projekt. Herstellung von Synthesekraftstoff aus Biomasse. Präsentation auf der Internat. Tagung „Thermo-chemische Biomasse-Vergasung für eine Effiziente Strom-/Kraftstoffbereitstellung – Erkenntnisstand 2007“, 27./28. Februar **2007**, Leipzig.
- (50) Oasmaa, A., Elliott, D.C., Müller, S. Quality Control in Fast Pyrolysis Bio-Oil Production and Use. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), **2009**, 404-409
- (51) Radlein, D., Piskorz, J., Scott, D.S. Lignin Derived Oils from the Fast Pyrolysis of Poplar Wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 12, **1987**, 51-59
- (52) Henrich, E. The Status of the FZK Concept of Biomass Gasification. *2nd European Summer School on Renewable Motor Fuels*, Warsaw, Poland, 29-31 August **2007**
- (53) Wang, Y., Kinoshita, C.M. Experimental Analysis of Biomass Gasification With Steam and Oxygen. *Solar Energy*, 49, **1992**, 3-4,
- (54) Antal, Jr. M. J., Allen, S. G., Schulman, D., Xu, X. Biomass Gasification in Supercritical Water. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, **2000**, 4040-4053
- (55) Elliott, D. C.. Historical Developments in Hydroprocessing. *Bio-oils Energy & Fuels*, 21, **2007**, 1792-1815
- (56) Mousavand, T., Ohara, S., Umetsu, M., Zhang, J., Takami, S., Naka, T., Adschiri, T. Hydrothermal Synthesis and In-situ Surface Modification of Boehmite Nanoparticles in Supercritical Water. *J. of Supercritical Fluids*, 40, **2007**, 397-401
- (57) Antal, Jr. M. J., Brittain, A., DeAlmeida, C., Ramayya, S., Roy, J.C. Heterolysis and Homolysis in Supercritical Water. *Supercritical Fluids*, **1987**, 77-86
- (58) Ramayya, S., Brittain, A., DeAlmeida, C., Mok, W., Antal, Jr. M. J. Acid Catalysed Dehydration of Alcohols on Supercritical Water. *Fuel*, 66, **1987**, 1364-1371
- (59) Demirbaş, A., Çağlar, A. Catalytic Steam Reforming of Biomass and Heavy Oil Residues to Hydrogen. *Energy, Education Science and Technology*, 11, **1998**, 45-52
- (60) Kruse, A., Faquir, M. Hydrothermale Vergasung: Ansätze einer Reaktionstechnischen Optimierung. *Chemie Ingenieur Technik*, 79 (5), **2007**, 544-547
- (61) Kruse, A., Henningsen, T., Sinag, A., Pfeifer, J. Biomass Gasification in Supercritical Water: Influence of the Dry Matter Content and Formation of Phenols. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, **2003**, 3711-3717
- (62) Kechagiopoulos, P. N., Voutetakis, S. S., Lemonidou, A. A., Vasalos, I. A. Hydrogen Production Via Steam Reforming of the Aqueous Phase of Bio-oil in a Fixed Bed Reactor. *Energy&Fuels*, 20, **2006**, 2155-2163
- (63) Anitescu, G., Zhang, Z., Tavlarides, L. L. A Kinetic Study of Methanol Oxidation in Supercritical Water. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, **1999**, 2231-2237
- (64) Ding, Z. Y., Li, L., Wade, D., Gloyna, E. F. Supercritical Water Oxidation of NH₃ Over a MnO₂/CeO₂ Catalyst. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, **1998**, 1707-1716
- (65) Harradine, D. M. et. all. Oxidation Chemistry of Energetic Materials in Supercritical Water. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, 10(2), **1993**, 233-246