

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE TEKNOLOJİLERİ Dersi 10

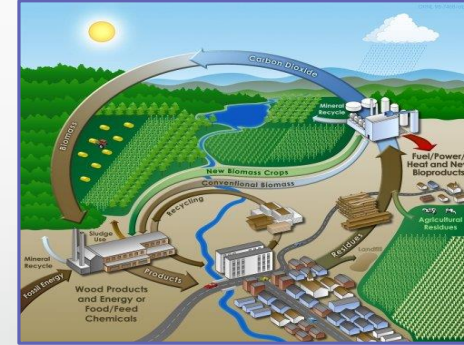
- 9 BİYOKÜTLE ENERJİSİ
- 9.1 Biyokütle Kaynakları
- 9.2. Biyokütle Dönüşüm İşlemleri ve Teknolojileri
- 9.2.1 Termokimyasal işlemler

Prof. Dr. Ayten ONURBAŞ AVCIOĞLU
E-mail: onurbas@agri.ankara.edu.tr
Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi
Tarım Makinaları Ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü

2017

Biyokütle enerjisi

- Biyokütle; biyolojik kökenli, fosil olmayan organik madde kütlesidir.
- **Biomass: Fitomass + Zoomass**
- Bitkiler güneş enerjisini fotosentez aracılığıyla tutarlar.
- Bitki ve hayvan atıkları → biyokütle enerjisi
- Klasik biyokütle: odun, tezek
- Modern biyokütle: enerji bitkileri yetiştiriciliği, kentsel, endüstriyel, tarımsal atıklar



- Biyokütle, biyolojik kökenli tüm maddeleri ifade etmek için kullanılan geniş kapsamlı bir terimdir. Biyokütle tanımı içerisinde; gıda endüstrisi artık ve atıkları, orman artıkları, arman endüstrisi atıkları, suda ve toprakta yetişen tüm bitkiler, hayvansal artık ve atıklar ve şehir atıkları bulunmaktadır. Tüm bu maddelerin ortak özelliği yüz yıldan kısa bir sürede yenilenebilir olmalarıdır.
- Bir başka tanımlamada; fotosentez yoluyla güneş enerjisini kimyasal enerjiye çevirerek bünyesinde depolayan biyolojik kütleler yani yeşil bitkiler biyokütle olarak adlandırılmaktadır (Karaosmanoğlu, 2006; Mutlu, 2012).
- Biyokütle oluşumunun ana basamağı aşağıdaki eşitlikte verilen fotosentez tepkimesidir.
- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{güneş ışığı} + \text{klorofil} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$
- CH_2O temel organik yapıdır ve güneş enerjisi bu organik yapı içerisinde kimyasal enerji olarak depolanmaktadır. CH_2O yapıtaşı ile gösterilen karbonhidratın oluşumu için yaklaşık 470 kJ'luk enerji absorbe edilmektedir.
- Fotosentezin moleküler mekanizması ile ilgili hala yanıtlanamamış pek çok soru bulunmasına karşın, taze biyokütle gelişimi için gerekli olan koşullar iyi bir şekilde belirlenmiştir. Bunlar; karbondioksit, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesindeki ışık, klorofil katalizörü ve bir canlı bitkidir. Güneş ışığının biyokütle tarafından tutulma veriminin üst limitinin % 8-15 arasında değiştiği tahmin edilmekte; ancak birçok gerçek durumda bu değer % 1 veya daha küçük olduğu ileri sürülmektedir (Yilmazer, 2012).

- Enerji amaçlı kullanılan biyokütle, kullanım yeri ve amacına göre, **geleneksel ve modern biyokütle** olmak üzere ikiye ayrılır. Geleneksel biyokütle, evsel amaçlı kullanılan ve gelişmekte olan ülkelerde daha yaygın olan, soba ile ocaklarda yakılan odun, tezek, tarımsal atıklardan v.b. oluşmaktadır. Geleneksel biyokütle gelişmekte olan ülkelerde küçük ölçekte kullanılmaktadır. Modern biyokütle ise, daha büyük ölçekte kullanılan ve konvansiyonel enerji kaynaklarının yerini alması düşünülen kaynaklardır. Odun ve tarımsal atıklar, enerji bitkileri, kentsel atıklar ve biyogaz gibi biyoyakıtları içerir. Modern biyokütlenin kullanıldığı uygulamalarda, odun ve atıkların yanı sıra “enerji bitkileri” adı verilen ve enerji üretim amacıyla hasat edilen ürünlerden de faydalanılmaktadır (Ulu, 2011).
- Klasik olarak biyokütleden yararlanma çok eski çağlara kadar gitmektedir. Ateşin bulunmasından sonra, yemek yapmak ve ısınmak için biyokütle (odun) kaynaklardan yararlanıldığı bilinmektedir. Modern anlamda biyokütle enerjisinden Asurlular ve Perslerin banyo ısıtılmasında biyogaz şeklinde yararlandıkları bilinmektedir (Akova, 2008). İngiltere’de 1800’li yıllarda fosseptik gazlarının sokakların aydınlatılmasında kullanıldığı bildirilmiştir (Uğurlu, 2006; Adıyaman, 2012).
- **Ana bileşenleri karbonhidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm doğal maddelerden üretilen enerji “Biyokütle Enerjisi”** olarak adlandırılmaktadır. Bu enerji ormanlardaki ağaçlar, tarımsal ve endüstriyel atıklar, insan veya hayvan atıkları gibi bitkisel ve hayvansal maddelerden elde edilmektedir (Demirbaş, 2001; Mutlu, 2012).

- Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde büyük paya sahip olan biyokütle enerjisi ısı, elektrik ve ulaşım için yakıt tüketiminde genişleyici bir üretim potansiyeline sahip bulunmaktadır. Dağıtımın ötesinde biyokütle enerjisi dikkatli bir şekilde yönetildiği takdirde şu katkıları verebilecek potansiyele sahiptir (Yapar, 2014):
-
- **Küresel ölçekte enerji arzında daha büyük sağlayıcı olma,**
- **Sera gazı emisyonlarında önemli azalma ve diğer çevresel yararlar,**
- **Enerji güvenliğini arttırmak ve fosil yakıtların ithal edilmesinin yerini yerel biyokütle enerjisi üreterek ödemeler dengesini iyileştirme,**
- **Kırsal kesimde ekonomik fırsatlar ve sosyal kalkınma,**
- **Atıkları imha problemini azaltma ve kaynakları daha iyi kullanma.**

9.1 Biyokütle Kaynakları

- Enerji üretiminde kullanılacak **biyokütle kaynakları dört grup altında toplanabilir**. Bunlar; orman ürünleri, tarım ürünleri, endüstriyel atıklar ve kentsel atıklardır.
- **Orman ürünleri**; söğüt, kavak, okaliptüs gibi hızlı büyüyen ağaçları, odun parçaları, talaş vb orman yan ürünlerini içermektedir.
- **Tarım ürünleri**; genel olarak tüm bitkisel ve hayvansal ürünleri içermektedir. Miscanthus, kamış gibi kuru lignoselülozik bitkiler, yağ, nişasta, şeker içeren bitkiler, sap, saman, budama artıkları, hayvan dışkıları, hayvan kesim artıkları.
- **Endüstriyel artıklar**; biyolojik kökenli tüm artık ve atıkları kapsamaktadır. Tarıma dayalı endüstriyel atıklar, orman endüstrisi atıkları, kağıt sanayi atıkları vb.
- **Kentsel atıklar**; çim, yaprak gibi park-bahçe artıkları, kanalizasyon atıkları, organik kökenli belediye atıkları, evsel çöpler.

9.1.1 Enerji bitkileri

- **Tarım insan gereksinimlerini karşılamak üzere yapılan hammadde üretimidir.** İnsan gereksinimleri içerisinde gıda, giyim, barınma maddeleri almaktadır. Fakat son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle de biyokütle enerjisinin gündeme gelmesi ve önem kazanmasıyla enerji tarımı da söz konusu olmuştur.
- **Enerji tarımı içerisinde hızla büyüyen, her türlü toprak koşullarında yetişebilen enerji bitkileri yer almaktadır.** Bu bitkilerin özellikleri genlerinde yapılan çalışmalarla değiştirilerek daha fazla verim alınması da sağlanmaktadır. Üzerinde en fazla durulan enerji bitkileri arasında; **sorgum, mısır, tütün, endüstriyel kenevir, miscanthus, tatlı süpürge otu, şeker kamışı ve çeşitli yabancı otlar** yer almaktadır (Barbour vd, 1999; Severoğlu, 2010).
- **Enerji bitkileri C₄ bitkileri olarak da isimlendirilmektedir.** Bu bitkiler; kuraklığa dayanıklı olup güneş ışınlarını enerjiye dönüştürme yetenekleri çok iyidir. Ayrıca su gereksinimleri de düşüktür.
-

- Bitkilerin büyük bir kısmı havadaki CO₂ miktarı belirli bir değerin altına düştüğünde solunum işlevini yitirmektedirler. C₄ bitkileri ise atmosferde var olan her CO₂ molekülünü soğurabilme özelliğine sahiptir.
-
- Biyokütlenin önemli özelliklerinden biri; biyoyakıt olarak yakıldığında atmosfere saldığı CO₂'i yetiştirilmesi sırasında fotosentezde kullanmasıdır. Enerji bitkileri yetişmeleri sırasında hektar başına havadan 30-45 ton CO₂ almaktadırlar (Türe 2001).
-
- Dolayısıyla küresel ısınma ve iklim değişikliğinin yoğun olarak yaşandığı günümüzde enerji bitkileri yetiştiriciliğinin büyük katkılar sağlayabileceği düşünölmelidir.
-
- C₄ bitkileri pek çok enerji ürünü hammaddesi olarak kullanılabilir. Endüstriyel anlamda kullanılan bu ürünler içerisinde; çeşitli bitkilerin işlem görmesi sonucunda kalan posası, sentetik gaz, mangal, kalitesi yükseltilmiş yakıtlar, pirolitik yağ, etanol sayılabilmektedir. Biyokütleden elde edilen elektrik enerjisinin maliyeti yüksek olmakla beraber, C₄ bitkilerinin yetiştirilmesinde verimin daha da arttırılmasıyla bu maliyetin azaltılabileceği düşünölmektedir. AB ölkelerinde C₄ bitkileri içerisinde en fazla rağbet gören tatlı sorgumdur. Ölkemizde bu bitki yanında miscanthus ile ilgili çalışmalara da devam edilmektedir (Türe, 2001; Severoğlu, 2010).

9.2 Biyokütle Dönüşüm İşlemleri ve Teknolojileri

- Biyokütleyle uygulanan işlemler üç grup altında toplanabilir. Bunlar;
- **1. Fiziksel işlemler:**
- Su giderme ve kurutma,
- Boyut küçültme,
- Yoğunluk artırma,
- Ayırma.

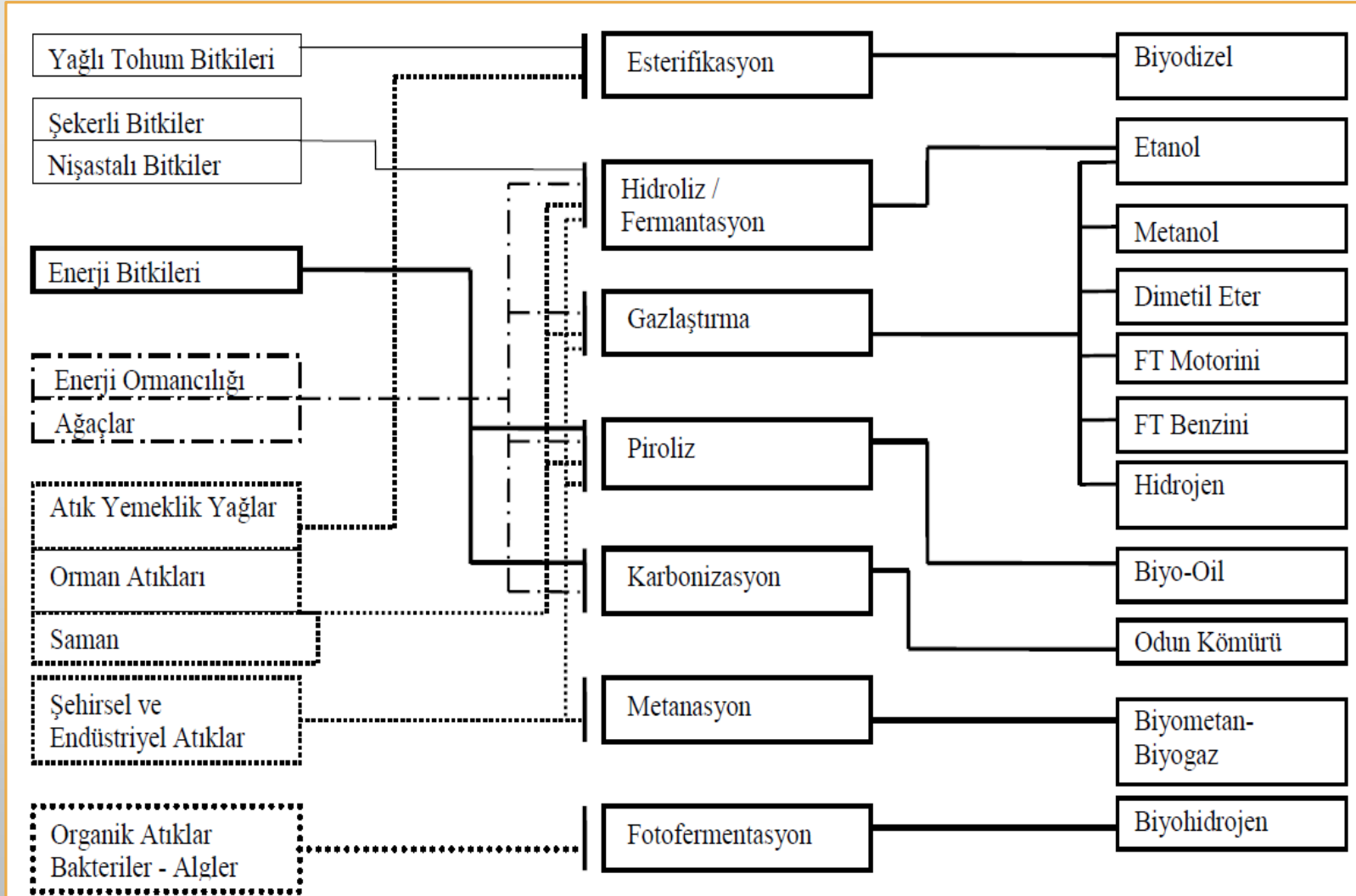
2. Termokimyasal işlemler:

Doğrudan yakma,
Gazlaştırma,
Piroliz,
Sıvılaştırma.

3. Biyokimyasal işlemler:

Fermantasyon,
Anaerobik fermantasyon,
Mekanik Ekstraksiyon.

Biyokütle kaynakları, biyokütle dönüşüm süreçleri ve elde edilen biyoyakıtlar Şekil 9.1'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Biyoyakıt teknolojileri ile elde edilen bu yakıtlar arasında en yaygın ve ticari biyoyakıtlar motor biyoyakıtlarından olan biyodizel ve bioetanol ile biyogaz ve odun kömürüdür. Şekilde de görüldüğü gibi yağlı tohum bitkileri ve atık yemeklik yağlardan esterifikasyon ile biyodizel; şekerli ve nişastalı bitkiler, şekerli ve endüstriyel atıklar, orman atıkları, saman, ağaçlar ve enerji ormancılığı gibi kaynaklardan hidroliz veya fermentasyon ile bioetanol; şekerli ve endüstriyel atıklardan metanasyon ile biyometan/biyogaz; enerji bitkilerinden karbonizasyon ile odun kömürü; organik atıklar, algler ve bakterilerin fotofermentasyonu ile biyohidrojen gibi biyoyakıtlar elde edilebilmektedir (İşler, 2012).



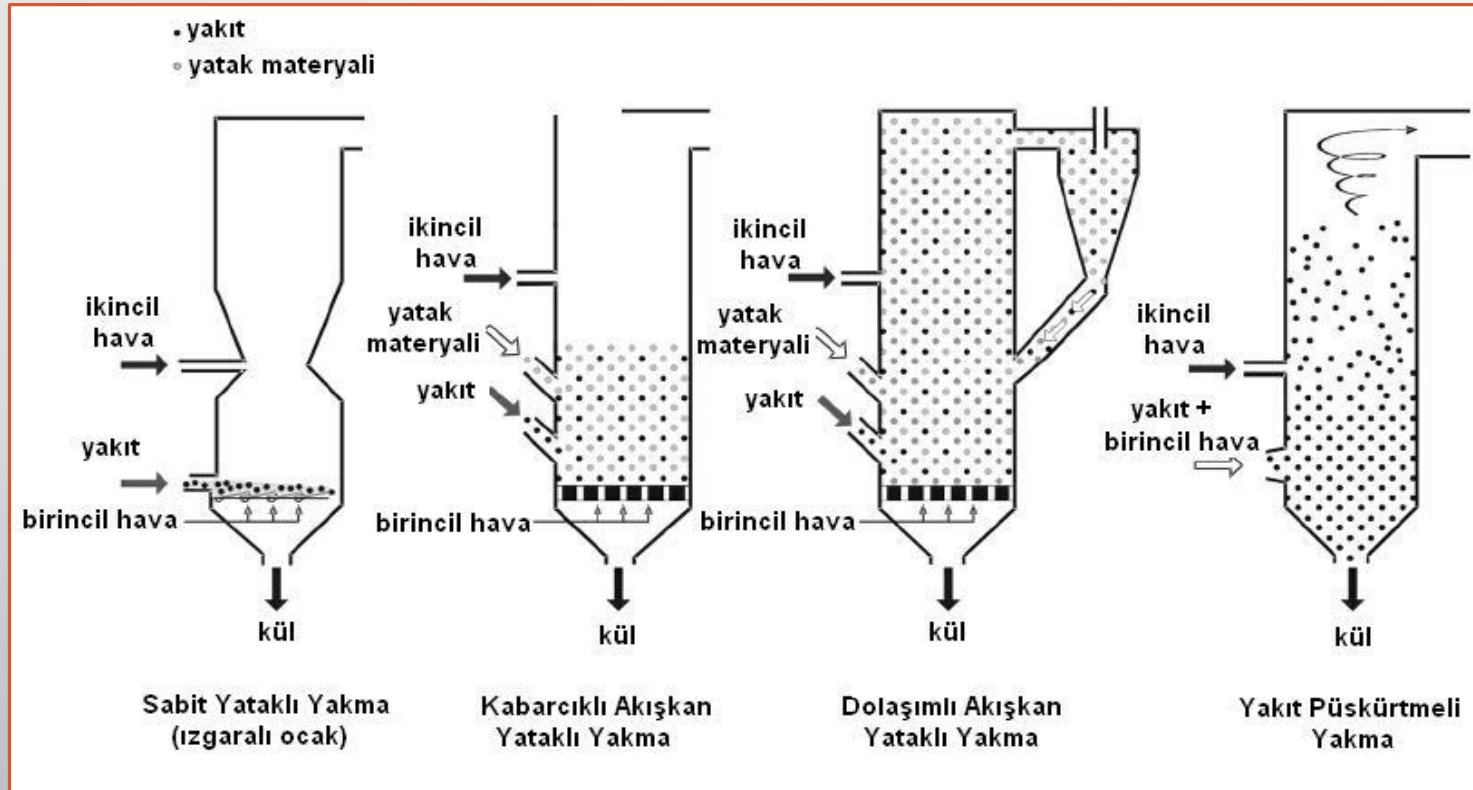
- Birbirinden farklı biyokütlerin nem, kül ve ısı değerlerinin farklılık göstermesi, biyokütlenin dönüşüm süreçlerinde bir takım sorunlar meydana getirmektedir. Biyokütlenin dönüşümünde fiziksel olarak gerçekleştirilen boyut küçültme, kurutma ve yoğunlaştırma gibi işlemlerin, termokimyasal veya mikrobiyal dönüşüm süreçleri öncesinde gerçekleştirilmesi, bu yolla gerçekleşen dönüşümlerin uygulanabilirliğini artırmaktadır.
-
- Biyokütleden üretilecek enerji miktarını artırmak için biyokütle kaynağının kurutulması gerekebilmektedir. Kurutma işlemi açık havada güneşin yardımıyla düşük maliyetlerle yapılabildiği gibi; sprey kurutucular, konveksiyon fırınları gibi endüstriyel kurutma yöntemleriyle de kısa sürede, daha etkili bir şekilde de gerçekleştirilmektedir.
-
- Biyokütlenin yakıt olarak kullanılmasında, pelet ve briketlerin oluşturulmasında, boyut küçültme sıklıkla ihtiyaç duyulan bir yöntemdir. Biyokütlenin küçük parçacıklara ayrılmasının depolama hacmini azaltmak, taşıma maliyetlerini azaltmak gibi faydaları da söz konusudur (Yilmazer, 2012).
-
- Biyokütleye uygulanan işlemlerden fiziksel işlemler ve biyokimyasal işlemler biyoyakıtlar bölümünde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

9.2.1 Termokimyasal İşlemler

- **Doğrudan yakma**
- Enerji üretimi amacıyla biyokütlenin yakılması, insanlık için bilinen en eski termokimyasal dönüşüm yöntemidir. Gelişen yakma proseslerinden biyokütlenin ısı ve elektrik üretiminde kullanılması için yararlanılmaktadır. Bunlardan küçük ölçekli odun sobaları, düşük emisyon değerleriyle yüksek ısı verim sağlamak için geliştirilirken, orta-büyük ölçekli yakma fırınlarında verimli bir yanma için ısı geri kazanılmaktadır. Modern yakma sistemleri ise sadece odun gibi **katı biyokütle**lerin yakmanın ötesinde, **şehir artıkları** gibi biyokütlelerin de yakılabileceği şekilde geliştirilmiştir (Yilmazer, 2012).
- Doğrudan yakma sistemleri ya **direkt ısı yada buhar üretimi** için kullanılırlar. Otomatik beslemeli ve yakıt hücreli sistemler iki aşamalı kullanılırlar. Birinci aşama kurutma ve kısmi gazlaştırma, ikinci aşaması ise yanmanın tamamlanmasıdır. Bu sistemlerin daha gelişmiş sürümünde su soğutması ile külün uzaklaştırılmasını kolaylaştıran hareketli ızgaralar kullanılmaktadır (Karaca, 2009).
- İkinci grup ise genellikle çok ince tanecikli biyokütle atıkları ve sıvıların kullanıldığı askılı ve akışkan yataklı yakma sistemleridir. Askılı yakma sistemlerinde tanecikler, biyokütle tanecikleri karıştırılmış olan ön ısıtma yapılmış hava dalgasının püskürtülmesiyle askıdayken yanarlar. Bunun içerisinde biyokütle yakıtı eğer parçacık veya akışkan ise ya damla halinde yada püskürtülerek uygulanır. Bu sistemler ızgara ihtiyacını ortadan kaldırır. Fakat havayı ön ısıtmadan geçirmek gerekir (Woods ve Hall, 1994; Karaca, 2009).



- Sabit yataklı yakma sistemleri ızgaralı ocaklar ve alttan yakıt beslemeli (stoker) sistemlerdir. Birincil hava sabit bir yatak arasından geçer. Bu yatakta kurutma, gazlaştırma ve yanma meydana gelir. Oluşan yanıcı gazlar ikinci hava ekleme işleminden sonra yanar.
- Akışkan yataklı yakma sistemlerinde biyokütle yakıtı, gazın kendi karışımında ve yanma gazı alttan giren katı yatak materyali içinde yanar. Akışkanlaştırma hızına bağlı olarak, kabarcıklı akışkan yataklı (BFB) ve dolaşimli akışkan yataklı (CFB) yakma olarak ayrılabilir.
- Yakıt püskürtmeli yakma (PF) küçük parçacıklı (ortalama çapı 2 mm' den küçük) yakıtlar için uygundur. Yakıt karışımı ve birincil yanma havası yanma odasına enjekte edilir. Yanma, yakıt havada asılı iken ve ikinci hava girişinden sonra gaz yanmasının bitmesi esnasında meydana gelir (Şekil 9.2) (Van Loo ve Koppejan, 2008; Karaca, 2009).

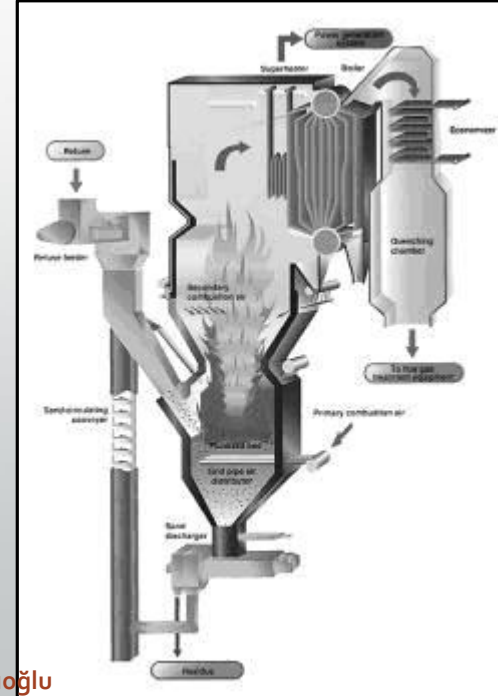


Şekil 9.2 Başlıca biyokütle yakma teknolojileri (Karaca, 2009)

münih



izaydaş



- **Birlikte yakma**
- Biyokütle atıkların enerji piyasasına eski ve ucuz bir girişı olarak izin verilen modern bir uygulamadır. Bu uygulama **fosil yakıtlarla (genellikle kömür) biyokütle atıklarının birlikte yakılmasıdır**. Birlikte yakma uygulaması birkaç üstünlüğe sahiptir. İlk olarak, dönüşüm sistemleri, tarıma dayalı sanayi veya orman ürünleri işleyen fabrikaların yakınında bulunur. Buralarda büyük miktarlarda düşük maliyetli biyokütle atıkları elde edilebilir. İkinci olarak, şu an yaygın olarak kabul görmüş olan fosil yakıt güç santralleri genellikle kükürt, CO₂ ve diğer sera gazları gibi gazlar yayarak büyük bir kirletici durumundadırlar. Daha iyi emisyon hedeflerine ulaşmak için bazı değişikliklerle beraber var olan ekipmanları kullanma ve biyokütle ile birlikte yakma, uygun maliyetli bir yöntem olarak görülebilir. Biyokütle yakıtları kömüre oranla düşük kükürt ve azot içerirler ve çok düşük CO₂ emisyon seviyesine sahiptir. **Böylece birlikte yakma ile fosil yakıtların daha yüksek olan kükürt ve karbon içeriklerinin dengelenmesi sağlanır.** Üçüncü olarak, tarıma dayalı sanayi veya orman ürünleri işleyen fabrika elektrik üretimi ile atıklarını daha verimli kullanabilir. Fakat bu işletmeler zaman açısından yüksek derecede mevsimsel unsurlara sahiptir. Dolayısıyla fosil yakıtlarla birlikte atıkların yakılması, tüm yıl boyunca işletmenin çalışmasını ve elde edilecek elektriğin daha ekonomik olmasını sağlayacaktır (Woods ve Hall, 1994 Karaca, 2009).

- **Gazlaştırma**

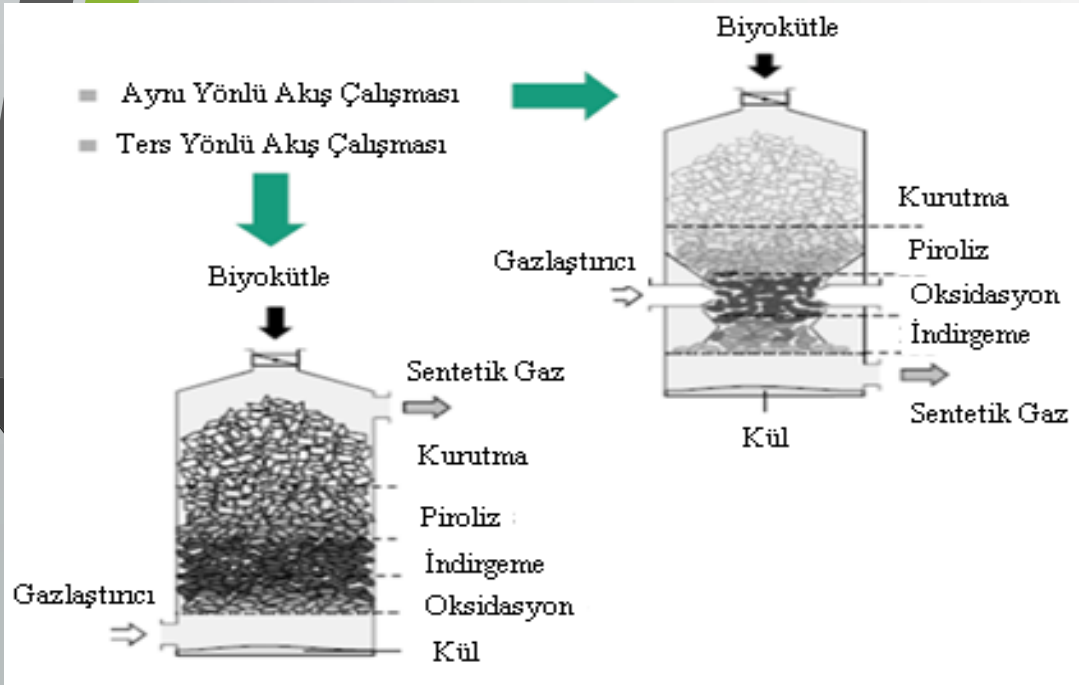
- Gazlaştırma yeni bir teknoloji olmayıp özellikle kömürün gazlaştırılması, doğal gaz gelişmeden önce yıllarca kullanılmıştır. Bu tekniğin biyokütlerde kullanılmasına olan ilgi son yıllarda artmıştır. Bunun sebebi, **orijinal biyokütleden daha temiz bir yakıt ve çok yönlü kullanılabilen bir gaz üretilmesidir.**

- Gazlaştırma biyokütlenin tipik olarak 800–900 °C arasında değişen yüksek bir sıcaklıkta **kısmi oksidasyon** ile yanabilir bir gaz karışımına dönüştürülmesidir. Bu gazlaştırma sonucunda ana olarak **CO ve H₂ elde edilirken, bir miktar CO₂, metan içeren ağır hidrokarbonlar ve su buharı da** elde edilir. Biyokütlenin hızlı pirolizi ile elde edilen kömür gazlaştırıcı kullanarak gazlaştırılabilir. Gazlaştırma reaksiyonlarında ana olarak; hava, oksijen ve buhar gazlaştırıcı olarak kullanılmaktadır. Bunların reaksiyona etkileri, kısaca aşağıda özetlenmektedir (Kalıncı, 2011):

- Hava ile gazlaştırma: Bu yöntem ucuz olmasından dolayı yaygındır. Oksijen elde etmek gerekmediği için yüksek verimli bir dönüşümdür. Ancak bu yöntemle üretilen ürün gazı su buharı, CO₂, hidrokarbonlar, zift ve nitrojen gazı da içerecektir. N₂ içeriği % 60 değerlerine çıkmaktadır, bu durumda ürün gazının ısı değeri düşük olup 4–6 MJ/Nm³ dür. Reaktör sıcaklıkları ise 900–1100 °C aralığındadır (Saxena vd, 2008).
-
- Oksijen ile gazlaştırma: Isıl değeri 10–15 MJ/Nm³ olan daha kaliteli bir gaz üretmektedir. Bu proseste sıcaklıklar 1000–1400 °C` ye ulaşır. Oksijen kullanımının dezavantajları ise maliyetinin yüksek olması ve güvenlik problemleridir (Saxena et al., 2008).
-
- Buhar ile gazlaştırma: Biyokütlenin buhar ile gazlaştırılması ile ana olarak H₂, CO, CO₂, CH₄ ve hafif hidrokarbonlar, kömür ve zift içerikli bir gaz üretilmektedir. Bu metot korozyon ve kataliz zehirlenmesi gibi dezavantajlara sahiptir (Saxena vd, 2008). Ancak amaç gaz değil hidrojen üretmek olunca buharla gazlaştırma ön plana çıkmaktadır.
-
- Ayrıca gazlaştırıcılar; gazlaştırıcı yatak durumuna göre, sabit yataklı, akışkan yataklı, sürüklemeli olarak ayrılabilir. Bunlara yeni bir gazlaştırma tekniği olarak bahsedilen plazma gazlaştırma ve özellikle sulu biyokütleler için önemli olan ve araştırmaların yoğunlaştığı bir diğer gazlaştırma tipi SCWG da eklendiğinde beş farklı sistem ortaya çıkmaktadır.

- **Sabit yataklı gazlaştırma:**

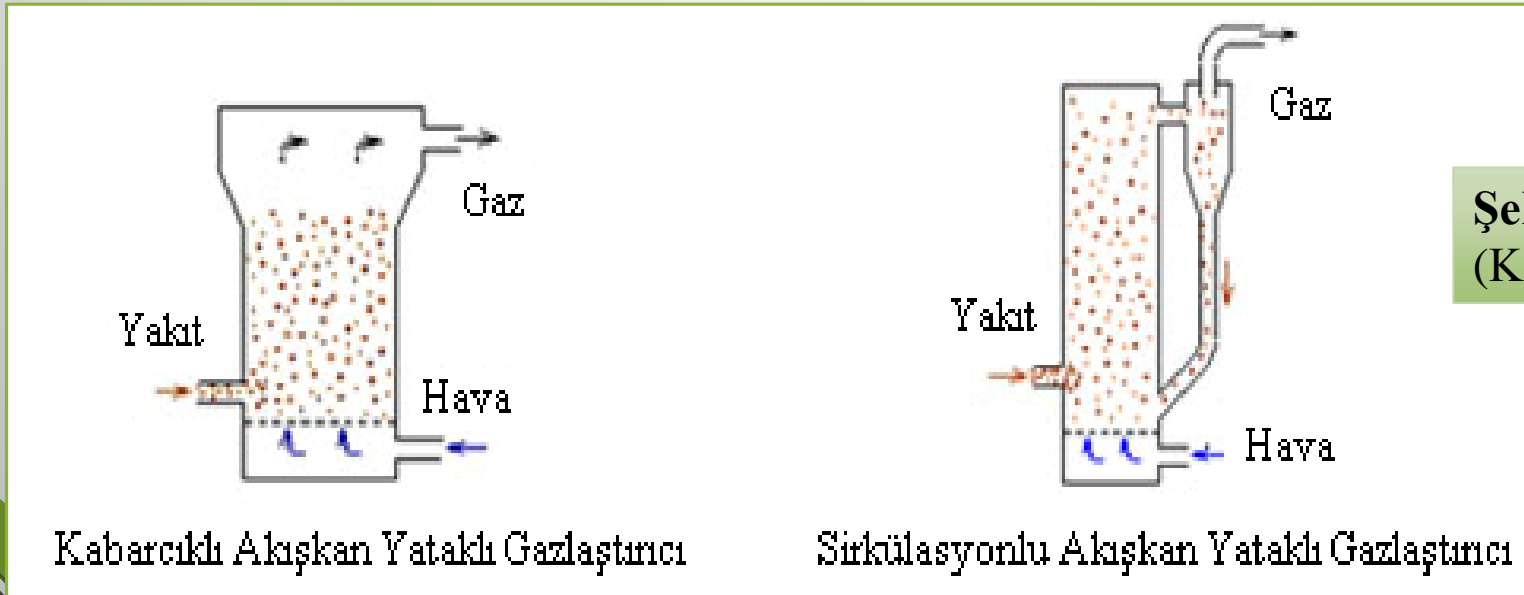
- Sabit yataklı gazlaştırıcılarda yakıt yavaşça aşağıya doğru akmaktadır. Genellikle bir ters akış düzeni vardır. Buna göre, aşağıya doğru yakıt inerken oluşan gazlar yukarıya doğru çıkarken, yakıtın ön ısıtılmasını ve piroliz işlemini gerçekleştirmektedirler. Bu tip gazlaştırıcılarda, oksijen kullanımı düşüktür, fakat ürün gazın içinde piroliz ürünleri mevcut olup, genellikle gazın çıkış sıcaklığı düşüktür (400–600 °C). Bu tip gazlaştırıcılarda yakıtın belli boyutlara küçültülmesi gerekmektedir. Bu gazlaştırıcı tipleri gerçekte kömür tabanlı tesisler için uygun değildir (Cormos, 2009). Şekil 9.3'de verildiği gibi sabit yataklı gazlaştırıcılarda, hava ve yakıt girişi yönüne göre birlikte akış ve ters yönlü akış sistemleriyle karşılaşmaktadır.



Şekil 9.3 Sabit yataklı gazlaştırma sistemlerinde akım yönleri (Kalıncı, 2011)

Elde edilen gaz kalitesinin çoğunlukla iyi olduğu sabit yataklı sistemin çalışması için, biyokütlenin belirli biçim, boyut ve nem içeriğinde (%20'nin altında) olması gereklidir. Bu gazlaştırıcılar 1 MW'ın altındaki elektrik tesisleri için uygundur (Kalıncı, 2011).

- **Akışkan yataklı gazlaştırma:**
- Bu gazlaştırma sistemlerinde; boyutları küçültülmüş biyokütlenin yatağa girişi alttandır. Gazlaştırma yatağı sabit, silika veya seramik parçalarla kaplanmıştır. Alt kısımdan yüksek hızda verilen hava yakıtın yatağa doğru itilmesini sağlamaktadır. Burada ısıtılmış yatağın sıcaklığı biyokütlenin kısmi havayla yanmasını sağlamaktadır. İyi bir gazlaştırma işlemi için biyokütle boyutu en fazla 10 cm, nem içeriği de en yüksek %65 olmalıdır. Bu sistemde elde edilen gaz içerisindeki katran miktarı düşük olmakla beraber, partikül miktarı yüksektir.
- Akışkan yataklı gazlaştırıcıların kabarcıklı ve sirkülasyonlu olmak üzere iki ayrı tipi vardır (Şekil 9.4).
- Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcılarda materyal boyutu ve nem içeriği daha toleranslıdır. Sıcaklık daha iyi kontrol edilebilmektedir. Enerji dönüşüm oranı daha yüksektir. Katalitik işlemler uygulanabilmektedir. Sirkülasyonlu akışkan yataklı gazlaştırıcılar büyük kapasiteli sistemler (10 MW'dan büyük) için uygundur. Bu gazlaştırıcılarda gaz kalitesi kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcılara göre daha yüksek olmaktadır.
- Akışkan yataklı gazlaştırıcıların büyüklüğü, hammadde-biyokütle miktarına yada kurulduğu bölgenin enerji gereksinimine göre belirlenmektedir. Gazlaştırıcılarda atmosfer basıncındaki hava kullanılmasıyla beraber, büyük tesislerdeki (100 MW'dan büyük) türbinlerde basınçlı hava kullanılmalıdır. Gazlaştırma işleminin düşük sıcaklıkta (850 °C) yapılması nedeniyle tam yanmanın gerçekleşmemesi ve kül miktarının diğer sistemlere göre yüksek olması olumsuz özellikleridir (Kalıncı, 2011).



Şekil 9.4 Akışkan yataklı gazlaştırıcılar (Kalıncı, 2011)

- **Sürüklemeli gazlaştırma:**

- Yakıtlar ve ürünler aynı doğrultuda akmaktadır. Reaktörde besleme zamanı birkaç saniye olup komple yanmayı sağlamak için, partikül boyutu 100 μm veya daha altında olması gerekir. Bu gazlaştırıcı tipleri içindeki sıcaklıklar 1250–1600 $^{\circ}\text{C}$ arasındadır ve iyi bir karbon dönüşümü sağlamaktadır. Reaksiyon bölgesindeki yüksek sıcaklıktan dolayı ürün gazının içindeki metan içeriği çok düşüktür. Yakıtın gazlaştırıcıya verilmesi özel bir dizayn ile olur. Tüm ticari kanıtlanmış tasarımlarda kömür ve oksijen verimli karıştırılmaktadır. Bu yakıt partikülleri gazlaştırıcıya bir nitrojen akımı ile verilmektedir (Örneğin, Shell, Siemens) (Kalıncı, 2011).

- **Plazma gazlaştırma:**

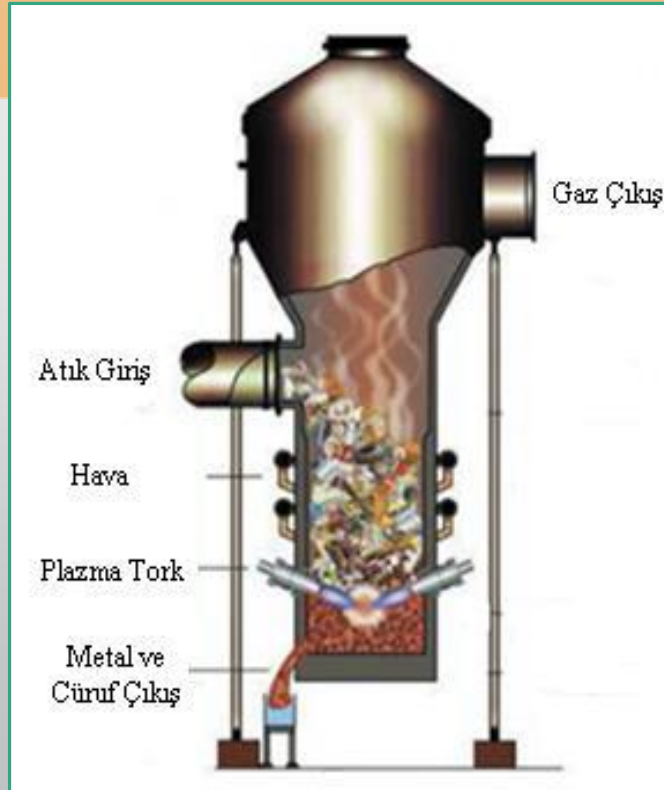


- Yeni bir gazlaştırma tekniği olan plazma; maddenin dördüncü hali olarak düşünülmektedir, elektriksel olarak nötr olmasına rağmen, elektron, iyon ve nötr partiküllerin bir karışımından ibarettir. Bir plazmanın iyonlaşma derecesi, elektronlarını kaybeden atomların oranıdır. Plazma teknolojisi, manyetik alan kırılması olarak bahsedilen bir süreçte bir gazın içinden elektrik akımının geçmesi ile sürekli bir elektrik arkının yaratılmasını içerir. Bu sisteme karşı elektriksel dirençten dolayı, önemli miktarda ısı üretilir, bu ısı gaz moleküllerinden elektronları soyarak iyonize olmuş bir gaz akımı veya plazma meydana getirmektedir. Gaz molekülleri 2000 °C` de atomik duruma ayrışır ve sıcaklık 3000 °C` ye arttığı zaman gaz molekülleri elektronlarını kaybetmekte ve iyonlaşmaktadır. Bu durumda gaz atmosferik basınçta bir sıvı gibi viskoziteye sahiptir ve serbest elektrik akımı oldukça yüksek, metallere yakın, bir elektriksel iletkenlik sunmaktadır (Gomez vd, 2009; Kalıncı, 2011).



- Son yıllarda askeri ve sivil amaçlı araştırma-geliştirme yapılan teknolojilerin başında plazma teknolojisi gelmektedir. Plazma teknolojisi 1950 yılından beri radar ve füzyon (nükleer parçalanma) araştırmalarında, uzay sanayisinde, elektronik cip yapımında, iletişim teknolojilerinde, otomobil ve uçak endüstrisi gibi pek çok dalında kullanılmaktadır. Ayrıca Mars veya diğer gezegenlere seyahat için plazma motorları üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bunun dışında biyoloji, biyomedikal, kâğıt endüstrisi, malzeme aşındırma veya sertleştirme teknolojisinde, metallerde kesme ve kaynak yapımında, tekstil endüstrisinde, elmas yapımında, inşaat ve otomobil teknolojilerinde, optik sistemlerde, su ve tehlikeli atıkların arıtılmasında kullanılmaktadır. Plazmayı altı tipe ayırmak mümkündür: ideal, gayri ideal, düşük sıcaklıklı, yüksek sıcaklıklı, dengeli, dengesiz plazma. Genellikle düşük sıcaklıklı plazma dengesiz, yüksek sıcaklıklı plazma dengeli süreçten oluşmaktadır

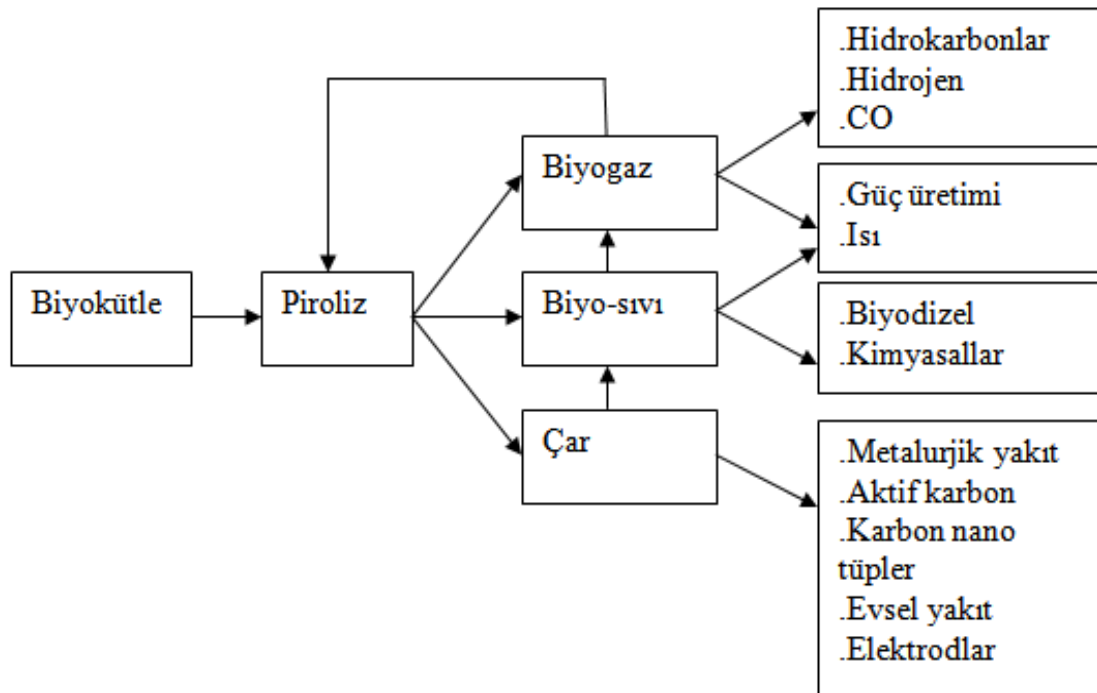
- Tipik bir gazlaştırma örneği Şekil 9.5'de verilmektedir. Plazma torkları vasıtası ile oluşan plazma bölgesindeki yüksek sıcaklıktan dolayı atıklar hemen gazlaşmakta, gazlaşmayan metal, kül gibi içerikler yine yüksek sıcaklıktan dolayı bir akışkan cüruf halinde gazlaştırıcının altından dışarı çıkmaktadır. Bu cüruf ayrıca soğutulup şekillenerek, yapı malzemesi olarak kullanılabilir.
- Laboratuvar ölçekli plazmalar iki ana grupta incelenebilir: birincisi yüksek sıcaklıklı füzyon plazmalar (elektron, iyon, nötr partiküller) termodinamik denge durumundadır ve ikincisi düşük sıcaklıklı plazmalar veya gaz akımlarıdır. Ayrıca düşük sıcaklıklı plazmalar kendi içinde ısı ve soğuk plazma olarak ayrılabilir. Isıl plazmalar yarı denge durumunda oluşur (yüksek elektron yoğunluğu ve $2 \cdot 10^3 < T \text{ plazma} < 3 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{C}$). Soğuk plazmalar dengede değildir (Tendero vd, 2006; Huang ve Tang, 2007; Kalıncı, 2011).
- Bu plazma türleri içinde ısı plazmalar atık malzemelerin iyileştirilmesi için en uygun olanıdır çünkü organik bileşenler yüksek sıcaklıklarda yapı elementlerine ayrışır ve inorganik malzemeler (cam, metal, silika, ağır metaller) eritilir ve yoğun, eylemsiz, ayrıştırılmayan camlaştırılmış bir cüruf haline dönüştürülmektedir (Minutillo vd, 2009; Kalıncı, 2011).



Şekil 9.5 Plazma gazlaştırma (Kalıncı, 2011)

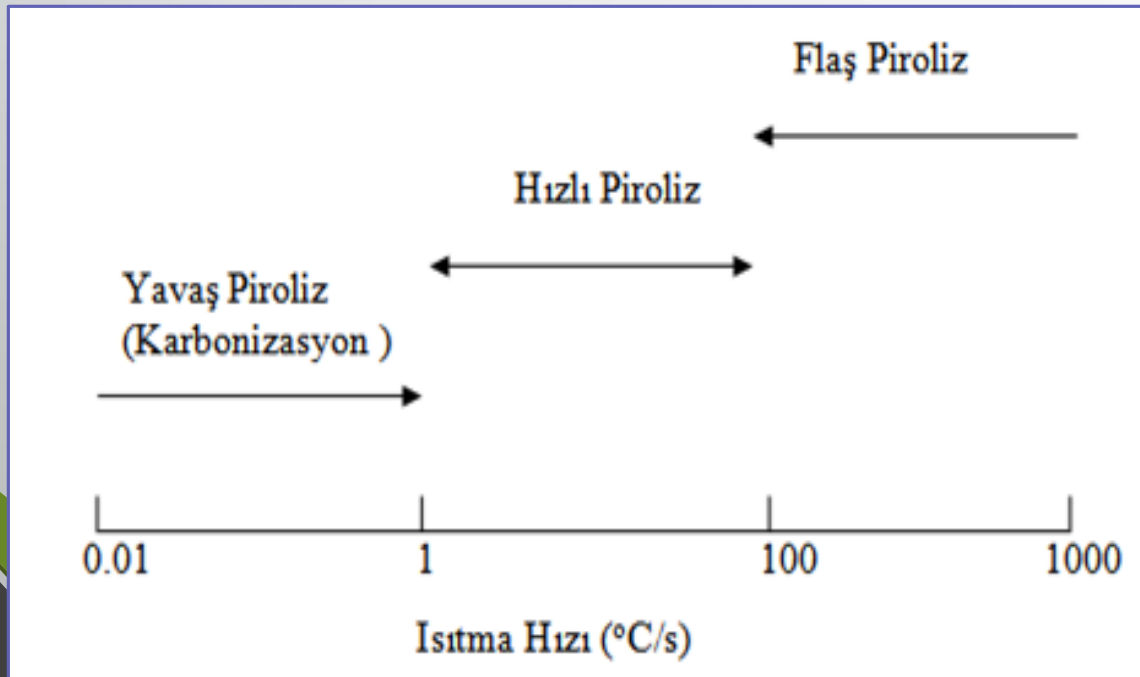
- **Süper kritik su ile gazlaştırma (SCWG):**
-
- Suyun kritik noktası özellikleri gazlaştırma prosesinde önemli bir rol oynamaktadır. Suyun kritik noktasının altında sıvı ve gaz fazlar farklı özellikler gösterirken, sıcaklık arttıkça bu özelliklerin benzerlikleri artmaktadır. Sonunda kritik noktaya varıldığında sıvı ve gaz fazların ikisinin de özellikleri aynı olmaktadır. Bu noktanın üzerinde süper kritik su organik maddeleri çözebilmektedir. Bu yöntemle biyokütlelerin gazlaştırılması bazı avantajlara sahiptir. Öncelikle yüksek nem içerikli biyokütleler (>% 50) direk kullanılabilir ve biyokütlenin kurutma basamağından kaçınıldığı için sistem enerji verimi artmaktadır (Yong vd, 2007; Kalıncı, 2011). Özellikle yüksek nem içerikli biyokütleler için kullanılan bir yöntemdir.

- **Piroliz**
- **Piroliz, materyalin havasız ortamda, yüksek sıcaklıkta (773°K) hızla ısıtılarak ayrıştırılması ve buharlaştırılması işlemidir.** Elde edilen buhar soğutulduğunda sıvı yakıt olarak yoğunlaşmaktadır. Bu işlem biyokütle pirolizi olarak adlandırılmaktadır (Yılmaz, 2012). Piroliz ürünleri **katran, karbonca zengin çar ve düşük molekül ağırlıklı gazlardır.**
- Gaz ürün **hidrokarbonlar, hidrojen, CO, CO₂ ve H₂O** içerir. Biyogazlar ısı ve elektrik üretmek için doğrudan yakılabilir ya da doğal gaz yerine kullanılabilir. Sıvı ürün yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlardan oluşmuş kompleks bir karışımdır. Sıvı ürünler elektrik üretimi için ısı üretiminde veya gazlaştırmayla hidrojen içeren biyogazlara dönüşebilir. Piroliz katı ürünü olan çar, endüstriyel ve evsel amaçlı kullanılan karbonca zengin bir yakıttır. Gözenekli yapısı nedeniyle aktif karbon olarak filtrasyonda kullanılmaya uygundur (Şekil 9.6) (Ulu, 2011).



Şekil 9.6 Biyokütle pirolizinin enerji dönüşüm süreci (Ulu, 2011)

- Yakıt çeşidi, sıcaklık, basınç, ısıtma hızı, reaksiyon süresi gibi değişkenler oluşan ürünün miktarını ve çeşidini etkiler. Pirolitik ürünlerin verimi ve kompozisyonu; ısıtma hızı, maksimum sıcaklık, reaktörde kalma süresi, partikül boyutu, atmosfer basıncı gibi şartlara bağlı olarak değişir. Piroliz çeşitleri Şekil 9.7’de görüldüğü gibi ısıtma hızlarına bağlı olarak yavaş piroliz, hızlı piroliz ve flaş piroliz olmak üzere üç gruba ayrılır. Düşük ısıtma hızı çar üretimini artırır ve bu proses karbonizasyon olarak adlandırılır. Yüksek ısıtma hızı ise sıvı ürün üretimini artırır (Ulu, 2011).



Şekil 9.7 Isıtma hızına dayalı piroliz çeşitleri (Ulu, 2011)

- Yukarıda açıklanan termokimyasal yöntemlerin çalışma şartları, elde edilen ürünler ve bu ürünlerin kullanıldığı alanlar açısından yapılan karşılaştırma çalışması Çizelge 9.1'de verilmektedir. Bu çizelgeye göre, yakma ve gazlaştırma sıcaklıkları 1300°C ve 1500°C' lere çıkabilirken, piroliz işlemleri daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Yakma için hava yakıt oranının 1'in üzerinde iken, gazlaştırma için ise 0.2–0.5 aralığında olduğu görülmektedir. Elde edilen ürün olarak piroliz basamağında katı karbon, sıvı ve gaz ürünler üretilmektedir. Hangisine ağırlık verileceği tamamen çalışma parametreleri ile ayarlanmaktadır. Gazlaştırmada amaç sentetik bir gaz üretmek iken yakma işleminde ise ısı üretmektir. Elde edilen ürünlerin kullanım alanlarına bakıldığında ise, piroliz sıvısı, kimyasal, ısı, elektrik üretmek için ve taşıt yakıtı olarak kullanılabilir. Piroliz gazı yine kimyasal, ısı ve elektrik üretiminde kullanılabilir. Gazlaştırmadan elde edilen gaz, ısı ve elektrik üretiminde kullanılırken, kimyasallar ve özellikle hidrojen üretimi için kullanılabilir (Kalıncı, 2011).

Çizelge 9.1 Piroliz, gazlaştırma ve yakma proseslerinin karşılaştırılması (Kalıncı, 2011)

| | Piroliz | Gazlaştırma | Yakma |
|------------------------|--|--|--|
| Reaksiyon sıcaklığı °C | 400-700 | 600-1500 | 800-1300 |
| Hava-yakıt oranı | Teorik:0 Pratik: <0.2 | 0.2-0.5 | >1 |
| Reaksiyon | Biyokütle + ısı → odun kömürü + sıvı yakıt + gaz (CO, CO ₂ , H ₂ , H ₂ O, CH ₄ , C ₂ H ₂) | Biyokütle + sınırlı oksijen/buhar → gaz ürün (CO, CO ₂ , H ₂ , H ₂ O, CH ₄ , diğer HC) | Biyokütle + stokiyometrik oksijen → CO ₂ + H ₂ O |
| Metotlar | Karbonizasyon, geleneksel, hızlı, hızlı-sıvı, hızlı-gaz, ultra, vakum, hidropiroliz, metanpiroliz | Gazlaştırıcıya göre: hava, oksijen, buhar, hava/buhar, oksijen/buhar ile gazlaştırma | |
| Ürün kullanım alanları | Piroliz sıvısı: Kimyasal, ısı, elektrik, taşıt yakıtı Gaz ürün: Kimyasal, ısı, elektrik | Gaz ürün: Kimyasal, ısı, elektrik | Isı: elektrik |
| Teknolojik durum | Ticari | Ticari | Ticari |

- **Sıvılaştırma**

- Sıvılaştırma esas olarak pirolize benzeyen bir işlemdir. Her iki yöntemde de biyokütlenin sıvıya dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Sıvılaştırmanın prensibi; materyalin uzun molekül yapısının katalizör yardımıyla bozularak kısa molekül yapısına dönüştürülürken sıvı yakıt elde edilmesidir. Piroliz yüksek sıcaklıklarda ($923-1073^{\circ}\text{K}$) gerçekleşirken sıvılaştırma işlemi daha düşük sıcaklıklarda ($798-873^{\circ}\text{K}$) olabilmektedir. Prosesin basıncı ise; pirolizde $0.1-0.5$ MPa, sıvılaştırmada ise $5-20$ MPa arasında değişmektedir. Sıvılaştırma işlemi yüksek basınç altında ve hidrojen atmosferinde uygulanmaktadır.
-
- Biyokütlenin sıvılaştırılmasıyla pek çok avantaj sağlanabilmektedir. Böylece, enerji içeriği yüksek, daha az yer kaplayan, kolayca depolanabilen, pompalanan, başka kimyasal ve yakıtların üretilmesi için kullanılan yağlar üretilmektedir (Özay vd, 2014).