

# TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ

## Bölüm 4: Tehlikeli Atıkların Yakılması

Prof. Dr. Güray Salihoğlu

*SALİHOĞLU, G., 2019, Tehlikeli Atık Yönetimi, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, 510 sayfa, Ankara. ISBN: 978-605-312-330-9.*

## Bölüm 4

### TEHLİKELİ ATIKLARIN YAKILMASI

#### Öğretmen Kılavuzu

#### Öğrenme Amaçları

Bu bölümün sonunda okuyucular,

1. Temel yanma reaksiyonları, tam yanma ve eksik yanma olayları hakkında bilgi sahibi olacak,
2. Atığın ısıl değerinin önemini kavrayacak,
3. Yakma tesislerini oluşturan üniteleri öğrenecek,
4. Yakma tesislerinin işletme koşullarını ve bu koşulları sürdürmenin önemini kavrayacak,
5. Yakma fırını tipleri, özellikle döner fırın ve akışkan yataklı fırın hakkında bilgi sahibi olacak,
6. Yakma tesisinde enerji kazanım süreci hakkında bilgi sahibi olacak,
7. Yakma sisteminden kaynaklanan atıkları öğrenecek ve bu atıkların olası çevresel etkileri hakkında fikir sahibi olacak,
8. Yakma sürecinde oluşan partikül madde ve gaz kirleticilerin kontrolü için kullanılabilecek - teknolojileri öğrenecek,
9. Atıkların yakılmasını ilgilendiren yasal mevzuat hakkında bilgi sahibi olacaktır.

#### Düşünülmesi Gereken Sorular

1. Tehlikeli atıkların yakılması gerekli midir?
2. Bütün tehlikeli atık türlerinin yakılması mümkün müdür?
3. Tehlikeli atıkların yakılma sürecinde ne tür tehlikeler ortaya çıkabilir?
4. Yakma tesislerinin işletiminde belirli sıcaklık seviyelerinin sağlanması neden önemlidir?
5. Yakma sistemlerinden kaynaklanan atıklar çevreye zararsız hale getirilebilmekte midir?
6. Yakma süreci sonunda çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek bir baca gazı çıkışı yapmak mümkün müdür?
7. Çimento fırını gibi beraber yakma tesislerinde tehlikeli atık yakılmasına neden izin verilmektedir?
8. Baca gazında hangi parametrelerin sürekli izlenmesi teknik açıdan mümkündür? Diğer parametrelerin sürekli izlenememesi insan sağlığı açısından tehdit oluşturmakta mıdır?

# İçindekiler

Bölüm 4 .....	1
TEHLİKELİ ATIKLARIN YAKILMASI.....	2
Öğretmen Kılavuzu .....	2
Düşünülmesi Gereken Sorular.....	2
1.GİRİŞ .....	4
2. YANMA BİLİMİ .....	4
2.1.Temel Yanma Reaksiyonları .....	5
2.2. Tam Yanma .....	6
2.3. Piroliz ve Gazifikasyon .....	7
2.4. Atığın Isıl Değeri.....	10
3. ATIK YAKMA TESİSLERİ .....	12
3.1. Tasarımda Dikkate Alınması Gereken Faktörler.....	15
3.2. Yakma Tesisi İşletiminde Dikkate Alınması Gereken Faktörler .....	18
3.3. Yakma Fırınları .....	21
3.3.1.Döner Fırınlar .....	21
3.3.2. Akışkan Yataklı Yakma Fırınları.....	28
3.4. Atık Isı Oluşumu ve Enerji Kazanım Sistemleri .....	30
3.5. Yakma Sistemlerinden Kaynaklanan Atıklar .....	33
3.5.1. Katı Atıklar ve Kalıntılar .....	33
3.5.2. Atıksu.....	35
3.5.3. Baca Gazları .....	36
3.6. Hava Kirleticilerinin Kontrolü .....	38
3.6.1. Emisyon Standartları .....	39
3.6.2. Emisyon Kontrol Üniteleri .....	40
3.6.3. İzleme .....	51
4. BERABER YAKMA TESİSLERİ.....	52
Özet ve Değerlendirme .....	55
Kaynaklar .....	57
Konu Sonu Soruları ve Çözüm Setleri .....	59
Test .....	61

## 1.GİRİŞ

Tehlikeli atık yönetiminde yaygın olarak kullanılan teknolojilerden biri de "Yakma" dır. Atık yakma, Atık Yönetimi Yönetmeliği'nde (AYY, 2015) bir bertaraf yöntemi olarak D10 koduyla (Karada yakma) yer almaktadır. Atıkların yakılması esnasında enerji üretimi yapılıyorsa, atık yakma, yönetmelikte bir geri kazanım işlemi olarak R1 koduyla tanımlanmaktadır: "Atık yakma: Enerji üretimi amacıyla başlıca yakıt olarak veya başka şekillerde kullanma" (AYY, 2015).

Tehlikeli atıkların yakılması, özellikle organik tehlikeli atıkların çoğu için ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından mevcut en iyi teknolojiler arasında sıralanmaktadır (LaGrega ve diğ., 2001). Uygun koşullarda ve etkin bir şekilde gerçekleştirildiğinde yakma yöntemi, tehlikeli atık içerisindeki zararlı bileşenleri kontrol edilebilir hale getirebilmekte, atık hacmini azaltabilmektedir.

Yakma yöntemiyle atıklar kül, baca gazı ve ısıya dönüşmektedir. Kül, genellikle atık içerisinde yer alan inorganik maddelerden ve baca gazıyla birlikte taşınan partikül maddelerden kaynaklanmaktadır. Oluşan baca gazlarının atmosfere taşınmadan önce partikül ve gaz formundaki kirleticilerden temizlenmesi gerekir. Yakma prosesiyle oluşan ısı, elektrik enerjisi elde etmek amacıyla kullanılabilir.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığına yapılan atık beyanlarına göre 2015 yılında 1.357.340 ton tehlikeli atık oluşmuştur (TCÇŞB, 2017). Bu atıkların %83'ünün yakma işlemi de dahil olacak şekilde geri kazanılmak üzere atık işleme tesislerine gönderildiği, %12,32'sinin bertaraf edilmek üzere sterilizasyon, düzenli depolama ve yakma tesislerine gönderildiği belirtilmektedir (TCÇŞB, 2017).

Yakma sistemleri, atık içerisindeki organik bileşenleri parçalamak için tasarlanırlar (LaGrega ve diğ., 2001). Ancak, tehlikeli atıkların çoğu içerik açısından homojen değildir; hem yanabilir organik maddeler hem de yanmayan inorganik maddeler içerebilirler. Atık içerisindeki organik fraksiyon parçalanarak karbondioksit ve su buharına dönüştükçe atık hacmi azalır.

## 2. YANMA BİLİMİ

Yanma, yanıcı maddenin ısı yardımı ile oksijenle birleşmesi sonucu ortaya çıkan kimyasal oksitlenme olayıdır. İyi yanma, organik bileşenlerin iyi bir şekilde okside olması yoluyla gerçekleşir. Bunu sağlayabilmek için, hacimce %21 oranında oksijen içeren havanın, atık içerisindeki karbon ve hidrojenle teorik (stokiyometrik) oranda karbondioksit ve su ürünlerini oluşturmak üzere iyice karıştırılması gerekir. Ancak havanın içerisinde %79 oranında bulunan azot da yanma sürecine dahil olur.

Yanmanın iyi bir şekilde gerçekleşmesi için türbülans, sıcaklık, zaman (TZS kuralı) şartlarının sağlanmış olması gerekmektedir (Şekil 1). Tam karışımı gerçekleştirmek için gerekli zamanın ve türbülansın sağlandığı homojen bir sistemde, karbon ve hidrojenin tam oksidasyonu ancak belli bir sıcaklık altında gerçekleşir. Bu faktörlerden birinin eksikliği durumunda diğer iki faktörün artırılması gerekir (LaGrega ve diğ., 2001)

Tam yanma için tutuşma sıcaklığının üstüne çıkılması, yanan elementlerin hava ile temasının iyi olması ve yanmanın tamamlanması için gerekli zamanın geçmesi gereklidir.



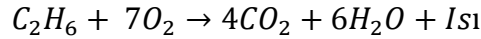
Şekil 1. Tam yanmanın gerçekleşme şartları: TZS Kuralı

Yakma fırınları için yapılan yasal düzenlemelerde TZS kuralındaki faktörlerin optimize edilmesi için şartlar tanımlanmakta, beslenen atığın tam yanması bu yolla garanti altına alınmaya çalışılmaktadır (Saft, 2007). 06.10.2010 tarih ve 27721 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (YakYön, 2010) de bu şartlara ilişkin özel hükümler içermektedir.

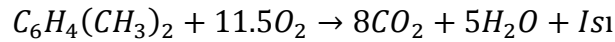
## 2.1. Temel Yanma Reaksiyonları

Yakma fırınlarında kontrollü bir yakma gerçekleşir. Atık, yakma fırınına sürekli veya kesikli olarak beslenebilir. Atıklar ısıtıldıkça, fiziksel olarak katıdan sıvıya ve gaza doğru dönüşüme uğrarlar. Çoğu organik olan bu gazlar, yakma fırınlarında kimyasal bağları kırılıncaya kadar ısıtılırlar (Saft, 2007). Açığa çıkan atomlar oksijen ve hidrojenle birleşerek kararlı son ürünleri, bir başka ifadeyle karbondioksit ve suyu oluştururlar. Kararlı son ürünler daha sonra baca gazı olarak sistemden ayrılır.

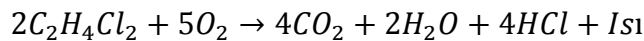
Organik maddelerin yanması aslında temel ürünlerle sonlanan karmaşık bir dizi reaksiyon içermektedir. Ancak basitçe göstermek gerektiğinde, temel bir alkan olan etanın yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi özetlenebilir (Saft, 2007):



Aromatik reaksiyonlar da ksilenin reaksiyonuna benzer şekilde gerçekleşir:

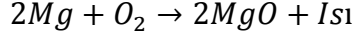


Halojenli hidrokarbonların yanması esnasında ise ilgili halojen asitleri oluşur. Bu asitlerin baca gazıyla sistemden ayrılmadan önce arıtılmaları gerekmektedir. Klorlu bir hidrokarbonun yanma reaksiyonuna örnek olarak dikloretan verilebilir (Saft, 2007):



Atık kompozisyonuna bağlı olarak, yanma esnasında çeşitli oranlarda azotoksitler, kükürtoksitler ve diğer gazlar oluşabilir. Eğer tam yanma gerçekleşmemişse elementel karbon (C) ve benzopiren gibi bileşikler oluşabilir. Yasal düzenlemelerde eksik yanma ürünleri için sınır değerler belirlenmiştir.

Doğaldır ki bütün yanma reaksiyonları CO<sub>2</sub> ve su oluşumuyla sonuçlanmaz. Magnezyum metalinin yanma reaksiyonu örnek olarak verilebilir:

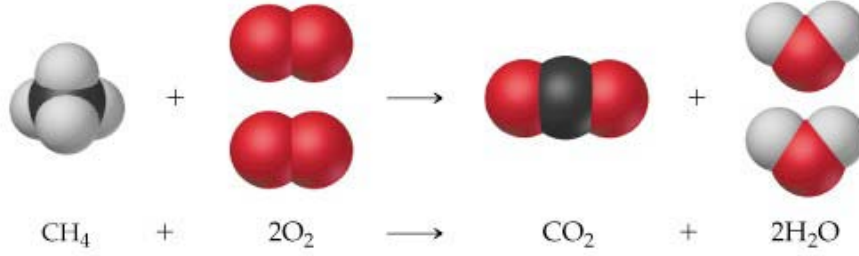


Atıkla birlikte gelen inorganik bileşenler parçalanamamakta, sadece oksitlenmektedirler. Bu inorganik bileşenler, çoğunlukla metaller, yanma sürecinden metaloksit olarak çıkacaklardır. Metal, yanma sürecine, kaynama noktası yakma fırını sıcaklığından düşük olan bir metal tuzu olarak girerse, oksitlenmeden buharlaşabilir. Bu durumda baca gazıyla birlikte sistemi terk edecektir. Örneğin kurşun klorürün kaynama noktası 950°C'dir. Yakma fırınına klorür olarak giren kurşun, baca gazı kontrol ünitesinde yoğuşmaz ise baca gazıyla birlikte çıkacaktır. Bunun yanında kurşunoksit, uçucu değildir ve dip külünde kalacaktır. Metal bileşiklerinin çoğu dip külünde birikecektir; ancak arsenik, antimon, kadmiyum, cıva gibi belirli metallerin uçuculuğu baca gazında bulunmalarına neden olacaktır. Yüksek metal içerikli atıklar yakma süreçleri için iyi atık adayları değildir (LaGrega ve diğ., 2001); uygun hava kirliliği kontrol ekipmanı yardımıyla bu metallerin giderilerek atmosfere salımı için yasal düzenlemelerle belirlenmiş sınır değerlerin sağlanması gerekmektedir.

## 2.2. Tam Yanma

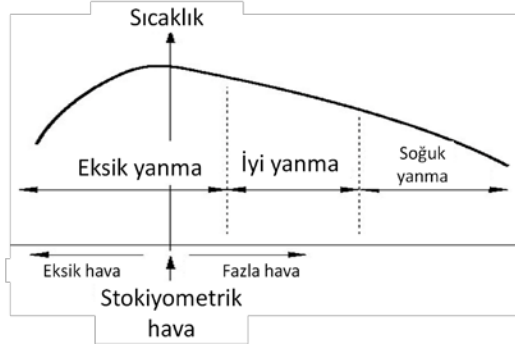
Madde içerisindeki hidrokarbonun yeterli miktardaki oksijenle tepkimeye girerek karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve su (H<sub>2</sub>O) oluşturması durumuna tam yanma denilmektedir.

Bu sırada yakıt hava içerisinde tamamen yanmakta, içerisindeki tüm karbonlar karbondioksite, tüm hidrojenler su moleküllerine dönüşmektedirler (Şekil 2). Hidrokarbonun yetersiz havayla reaksiyona girerek karbonmonoksit (CO) ve su (H<sub>2</sub>O) oluşturmasına ise eksik yanma denir. Eksik yanma sonucunda tam yanmaya göre çok daha az enerji üretilmekte, istenmeyen yanma artıkları oluşmakta ve bu artıklar çevre kirliliğine neden olmaktadır. Eksik yanmanın olmaması için ortama yeterli miktarda oksijenin temin edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2. Hidrokarbonun tam yanma tepkimesi

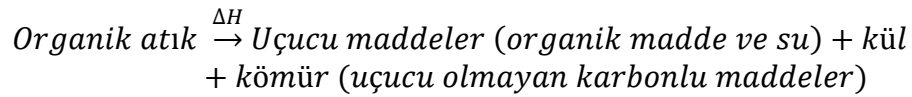
Tam yanma gerçekleştiğinde, oluşan ürünler içerisinde oksijenin bulunmaması gerekir (LaGrega ve diğ., 2001). Bu durum, ticari yakma fırınlarında oluşması mümkün olmayan "ideal yanma" veya "mükemmel yanma" olarak da adlandırılır (LaGrega ve diğ., 2001). Mükemmel yanma, aşırı hava yanması ve eksik hava yanması (eksik yanma veya piroliz) arasındaki sonsuz incelikteki çizgiyi ifade eder (Şekil 3). Yakma fırınlarının, yanmayı sağlamak için aşırı havayı kullanmaları gerekir. (LaGrega ve diğ., 2001).



Şekil 3. Yanma havası eğrisi (LaGrega ve diğ., 2001)

### 2.3. Piroliz ve Gazifikasyon

Piroliz, oksijen yokluğunda yapılan ısıtma sonucu gerçekleşen kimyasal değişim veya parçalanma olarak tanımlanır (Shah ve diğ., 1989). Ekzotermik olan yanmanın tersine piroliz endotermiktir. Pirolize bu nedenle parçalayıcı damıtma da denilmektedir. Ancak bu tanım, piroliz sürecindeki reaksiyonların yalnızca bir kısmını ifade eder. Piroliz bir dizi karmaşık kimyasal reaksiyondan oluşur. Piroliz reaksiyonu genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Shah ve diğ., 1989):



Pirolizin tehlikeli atık yönetimindeki uygulaması iki aşamalı bir proses yoluyla gerçekleştirilir. İlk aşamada atıklar ısıtılır; bu şekilde uçucu bileşenler (yanabilir gazlar, su buharı vb.) uçucu olmayan kömür ve külden ayrılır. İkinci aşamada, uçucu bileşenler uygun şartlar altında yakılarak bütün tehlikeli bileşenlerin yakılması garanti altına alınmaya çalışılır (Shah ve diğ., 1989). Enerji

geri kazanımı, uçuculardaki ve/veya katılardaki değerli bileşenlerin geri kazanımı gibi adımları içerecek şekilde prosesin farklı uygulamaları bulunmaktadır (Shah ve diğ., 1989).

Piroliz prosesinde organik maddeler ısıtma yoluyla parçalanmakta ve gaz faza geçirilmektedir. Piroliz ürünleri gaz, sıvı ve katı kömürden oluşmaktadır. Bu ürünlerin oranları uygulanan piroliz yöntemine, sıcaklık, basınç ve bekleme süresi gibi reaksiyon parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Saft, 2007). Düşük sıcaklıklar sıvı ürünün fazla olmasına, yüksek sıcaklıklar ise singaz adı verilen gazın fazla miktarda oluşmasına neden olmaktadır. Ancak daha sonraki işlemler esnasında bir ürün diğerine dönüşebilmektedir (Saft, 2007).

Aşırı hava varlığında tam yanmanın sağlandığı yakma sistemlerinde (insineratörler) ekzotermik süreçler gerçekleşmektedir; işletme sıcaklıkları 800-1370°C aralığındadır. Sıcaklık atık besleme oranı ve ilave yanma havasının sağlanmasıyla kontrol edilmektedir. Piroliz yönteminin ilk aşaması ise endotermik şartlarda, 425-760°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Tehlikeli organik bileşikler bu düşük sıcaklık şartlarında buharlaştırılmakta, kalıntının temiz kalması sağlanmaya çalışılmaktadır. İkinci aşamada uçucular bir gaz yakıcı içerisinde yakılarak parçalanmaktadır. Piroliz özellikle aşağıdaki atık tipleri için uygun olduğu belirtilmektedir (Shah ve diğ., 1989):

1. Suyu kolaylıkla akıtılamayan ve varillerde biriktirilmiş atıklar
2. Yüksek kül içeriği olan, uçucu inorganikler içeren (örn. NaCl, FeCl<sub>2</sub>, Zn ve Pb gibi), yüksek klor, kükürt ve azot içeren çamurlar ve sıvılar

Pirolizden çıkan katıların hacminin beslenen malzeme hacminden düşük olacağı belirtilmektedir.

Piroliz, bütün katı ve sıvı karbonlu maddenin gaz bileşenlere, sabit karbon ve kül içeren katı bileşenlere dönüşümünü içeren termal bir dönüşüm prosesidir. Saf piroliz, oksijen eksikliğinde bir reaksiyon gerçekleştirecek şekilde “dolaylı ısıtma” yoluyla sağlanmaktadır. Pirolizin değiştirilmiş (modifiye) formları, havanın ve yakıtın fırın içerisinde teorik oranda doğrudan ateşlenmesi yoluyla uygulanabilmektedir. Isıtmanın doğrudan veya dolaylı olarak gerçekleştirilmesiyle ilgili seçim, oluşan baca gazının ısı geri kazanım sürecinde nasıl kullanılacağıyla ilgili bir karardır. Pirolizdeki havasız ve oksijensiz ortam yerine, teorik hava ihtiyacının altında eksik hava ile yapılan piroliz benzeri uygulamaya ise Gazifikasyon adı verilmektedir. Tablo 1’de piroliz, gazifikasyon ve yanma ürünleri karşılaştırılmaktadır.

Tablo 1. Piroliz, gazifikasyon ve yanma ürünlerinin karşılaştırılması (Shah ve diğ., 1989)

Proses	İkinci yanmadan çıkan gaz fazı	Katı fazdaki kalıntı	Kullanım
<b>Klasik piroliz (dolaylı ısıtma)</b>	Beslenen atığın buharlaşan ve parçalanmış fraksiyonu	Kömür/kül	Ürün geri kazanımı
<b>Doğrudan ateşlemeli piroliz</b>	Beslenen atığın buharlaşan ve parçalanmış fraksiyonu + yakıcıdan kaynaklanan baca gazı ürünleri	Kömür/kül	Enerji geri kazanımı ve tehlikeli atıkların parçalanması



<b>Eksik hava gazifikasyonu</b>	Beslenen atığın kısmen okside olan ve parçalanmış fraksiyonu + yakıcıdan kaynaklanan baca gazı ürünleri	Kömür/kül	Yanma hızı ve oranının aksatılması
<b>Aşırı hava yanması</b>	Çoğu yanmış yanma ürünleri	Kül	Doğrudan yakma

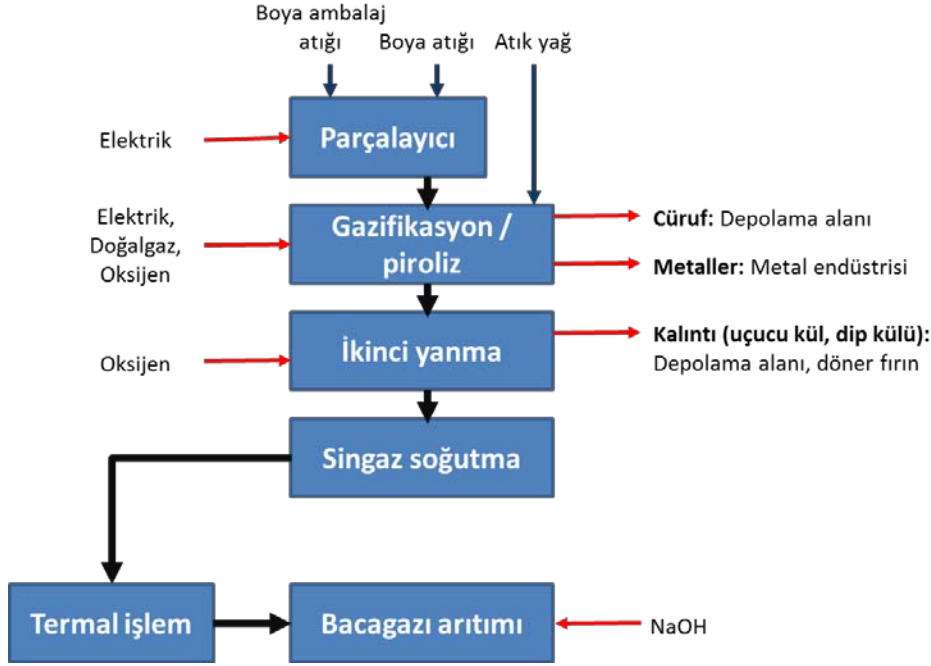
Piroliz prosesinde dolaylı ısıtma uygulanması durumunda, ısı süreçlerinden kaynaklanan baca gazları piroliz reaksiyonundaki uçucu gazlardan ayrılarak çıkışa yönelir. Bu yöntem gaz yakıtın ayrı bir ısı geri kazanım sisteminde kullanılabilmesini sağlayacaktır. Reaksiyon bölgesini başarılı bir şekilde ısıtmak için elektrikle ısıtılmış radyasyon panelleri kullanılabilen, hidrokarbon gazlarının yakıcının baca gazı ürünleriyle kirlenmesinin önüne geçilmektedir.

Fırının doğrudan ateşlendiği değiştirilmiş piroliz süreçleri, ısı geri kazanım ünitesinin piroliz odasıyla birleştirildiği durumlarda etkili olabilmektedir. Hidrokarbonların ilave bir yakıtla doğrudan yakılması ve kısmi oksidasyonu, piroliz reaksiyonu için gereken ısıyı sağlamak için kullanılmaktadır.

Ticari ölçekte bazı yakma fırınlarının piroliz modunda çalıştırıldığı iddia edilse de, bu genellikle eksik havanın kullanıldığı gazifikasyon süreçlerine işaret etmektedir. Gazifikasyon durumunda piroliz reaksiyonunun sunduğu faydaların tamamından faydalanılamamaktadır (Shah ve diğ., 1989).

Piroliz reaksiyonunda oluşan katı formdaki kömür, zenginleştirilerek yakıt olarak kullanılabilir düşük kalitede kömür elde edilebilmektedir. Prosesin sıvı formdaki çıktısı ise rafine edilerek yakıtla dönüştürülebilmektedir. Pirolizin avantajları arasında işletme sıcaklıklarının düşük olması (500°C'yi hiçbir zaman aşmaması) ve prosesin ilave havaya ihtiyaç duymaması sayılabilmektedir. Bu nedenle tam yanmayla kıyaslanınca daha düşük düzeyde bir baca gazı oluşumuna yol açmaktadır. Pirolizin yan ürünlerinin yanabilir özellikte olduğu da avantajları arasında yer almaktadır.

Piroliz reaksiyonlarının dezavantajlarından biri işletme sıcaklığının atığın özelliklerine bağlı olarak değişmesidir. Çok düşük düzeydeki bir sıcaklık kararsız reaksiyonlara neden olabilmekte, bu da oluşan yan ürünlerin yönetimini orijinal atıktan daha zor hale getirebilmektedir. Sıcaklığın çok yüksek olması tam yanmaya neden olabilmekte, eksik yanmanın sağlayacağı faydalara ulaşamamaktadır. Atığın değişiklik göstermesi nedeniyle kararlı bir proses oluşturmak ve sürdürmek çok zordur. Piroliz yalnızca belirli atık türleri için uygun bulunmakta, büyük ölçekte uygulaması genelde bulunmamaktadır (Shah ve diğ., 1989). Şekil 4'te boya atıkları, boya çamurları ve atık yağlar gibi tehlikeli atıkları kabul eden, 60000 ton/yıl kapasiteli tam ölçekli bir piroliz/gazifikasyon tesisinin akış diyagramı verilmektedir. Tesisin yayının yapıldığı tarihte Hollanda'daki tek tam ölçekli piroliz/gazifikasyon tesisi olduğu belirtilmektedir (Saft, 2007).



Şekil 4. Tehlikeli atıklar için uygulanan bir piroliz/gazifikasyon süreci (Saft, 2007)

## 2.4. Atığın Isıl Değeri

Bir yakıtın birim kütlesinin tam yanmasıyla açığa çıkardığı ısı enerjisine ısı değeri denir. Atığın ısı değeri, yakma seçeneği değerlendirilirken göz önünde bulundurulması gereken en önemli özelliklerinden biridir. Kalorifik değer olarak da karşımıza çıkabilen ısı değeri, genellikle bir kalori bombası kullanılarak laboratuvar ortamında tayin edilen bir parametredir (Merrild ve Christensen, 2010). Bilinen miktarda bir atık oksijen varlığında yakılarak açığa çıkan enerji, kalorimetredeki sıcaklık artışıyla belirlenmektedir. Birimi genellikle MJ/kg veya kcal/kg olarak verilmektedir. Yanma esnasında örnek içindeki tüm nem buharlaşmakta ve kalorimetre içinde yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle örneğin enerji çıktısının ve ısı değerinin artmasına neden olmaktadır. Okunan bu değer, üst ısı değeri olarak adlandırılmaktadır. Alt ısı değeri, suyun buharlaşması için gereken enerjinin üst ısı değerinden çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Isı değeri, farklı ağırlıklar esas alınarak ifade edilebilmektedir: ıslak ağırlık, kuru ağırlık, uçucu ağırlık (Merrild ve Christensen, 2010).

Bir yakma tesisinde birim zamanda yakılan yakıt miktarının yakıt alt ısı değeriyle çarpılması sonucu bulunan KW, MW birimleri ile ifade edilen asıl güç değerine de yakma ısı gücü denilmektedir (SKHKKY, 2009).

Atıkların ısı değerleri Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Yönetmeliğinde (SKHKKY, 2009) tesislerin emisyon sınır değerlerinin belirlenmesinde ve tesis tasarımında rol oynamaktadır. Kullanılan yakıt cinsine göre tesisin yakma ısı gücü de farklılık göstermektedir. Tablo 2' de sık kullanılan

yakıtların ısı değerleri verilmektedir. Isıl değer hesabı yapılırken aşağıdaki denklemden yararlanılmaktadır (Merrild ve Christensen, 2010).

$$H_u = H_o - 2450 \cdot (w + 9h) \text{ (kJ/kg)}$$

$H_u$  = Alt ısı değeri

$H_o$  = Üst ısı değeri

$w$  = Yakıtın ağırlık olarak su içeriği

2450 = 293 K'deki suyun buharlaşması için gerekli ısı

$h$  = Yakıtın ağırlık olarak hidrojen içeriği

Organik atıkların ısı değerleri, yanmayı sürdürmeye yetecek düzeyde olmadığına, ilave yakıt ihtiyacı doğmaktadır. Tehlikeli atık yakma uygulamalarının çoğunda atığın ısı değeri düşük olmakta, atığı hem tutuşturmak hem de yanmayı sürdürmek için konvansiyonel bir yakıt gerekli olmaktadır. Ancak bu şekilde atığın içerisindeki organik fraksiyonun hızlı oksidasyonu gerçekleşebilmektedir (LaGrega ve diğ., 2001).

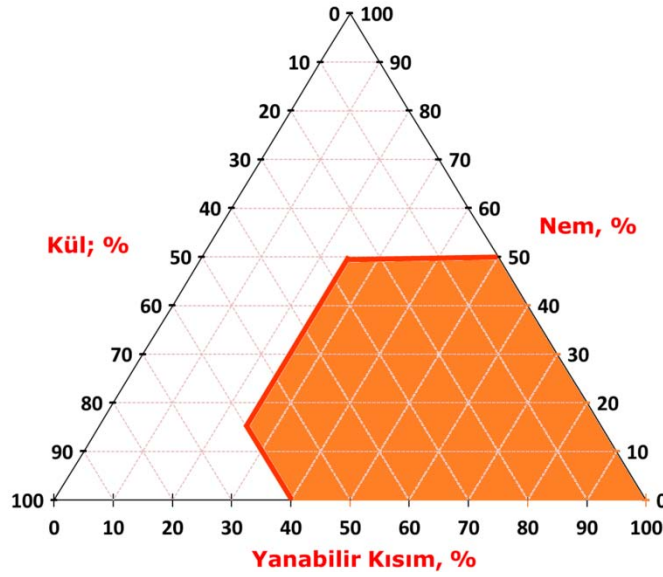
Bunun yanında yeterli ısı değere sahip yüzlerce atık karışımı oluşturulabilmektedir. Çeşitli endüstriyel uygulamalardan çıkan solvent bazlı atıklar bu tür atıklara örnek olarak verilebilir. Bu tür atıkların ısı değerleri ticari yakıtların ısı değerlerine çok yakın olabildiği için yakma fırınlarında yakıt yerine kullanımları da mümkün olmaktadır. Örneğin toluen ve aseton gibi iki ticari solventin ağırlıkça %50 oranında karışımından oluşan bir solvent atığını değerlendirelim. Toluenin ısı değeri 10244 kCal/kg ve asetonun ısı değeri 7288 kCal/kg düzeyindedir. Bu solvent karışımlarının oluşturacağı atığın ısı değeri 8767 kCal/kg düzeyinde olacaktır; bu da yakma fırınları için uygun bir yakıt işlevi görecektir (LaGrega ve diğ., 2001). Bazı yakıtların ısı değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Bazı Yakıtların Isıl Değerleri (ETKB, 2017)

YAKITLARIN ISIL DEĞERLERİ					
		Alt Isıl Değerler		Üst Isıl Değerler	
Yakıt		kCal	kWh	kCal	kWh
<b>Miks LPG</b>	kg	11000	12,76	11900	13,80
<b>(%30 Bütan-%70 Propan)</b>					
<b>Propan</b>	kg	11100	12,87	12000	13,98
<b>Propan</b>	m <sup>3</sup>	21200	23,95	23000	25,93
<b>Doğal Gaz</b>	N m <sup>3</sup>	8250	9,59	9155	10,62

<b>Odun</b>		kg	2500	2,90	2800	3,25
<b>Kömür</b>	<b>Linyit</b>	kg	3000	3,50	3300	3,84
	<b>Soma</b>	kg	5500	6,38	6000	6,96
	<b>İthal</b>	kg	6000	6,98	6500	7,56
<b>Motorin</b>		kg	10200	11,86	10800	12,58
<b>Kalorifer Yakıtı</b>		kg	9700	11,28	10500	12,18
<b>Sanayi Yakıtı ( Fuel Oil )</b>		kg	9200	10,69	10300	11,95
<b>Elektrik</b>		kWh	860	1	860	1

Atığın ilave yakıt ihtiyacı olmadan yakılabilmesi için inorganik madde içeriğinin (kül içeriği), yanabilir madde içeriğinin ve su içeriğinin yüzdeleri Şekil 5'te taralı olarak gösterilen yanabilir bölgede olması gerekmektedir (Merrild ve Christensen, 2010).



Şekil 5. Atığın ilave yakıt ihtiyacı olmadan yanabilmesi için gerekli şartlar

### 3. ATIK YAKMA TESİSLERİ

Isıl yöntemler, yüksek karbon ve hidrojen içeriğine sahip atıklar için uygun olan yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Endüstriyel atıkların yaklaşık %20'si, evsel atıkların ise %30'u

yanamayan niteliktedir (UNEP, 2002). Bu atıkların içerisinde demir ve alüminyum gibi, demirli ve demir dışı metaller de bulunabilmektedir. Bazı durumlarda yakma sürecinin ilk aşaması buharlaştırma aşamasıdır; su gerçek yakma işleminden önce buharlaştırılarak uzaklaştırılmaktadır.

Tehlikeli atıkların ısı işlemlere tabi tutulması, ekonomik değerlendirmeleri, yetişmiş personel ihtiyacını, yüksek düzeyde işletme ve güvenlik standartlarının sürdürülmesini gerekli kılmaktadır. Güvenlik önlemleri arasında, en önemli parametreler sağlanmadığında (örn. gerekli sıcaklık vb.) tesisin kendini otomatik olarak kapatması da bulunmaktadır.

Isıl işlemlerin, atık yönetiminde kabul edilebilir yöntemler olması için, iyi tasarlanmış, iyi işletilen ve kontrol edilen, iyi yanmanın sağlandığı ve baca gazı arıtımının etkin bir şekilde gerçekleştirildiği sistemlere ihtiyaç bulunmaktadır. Bütün bu gereklilikler, yüksek yatırım maliyetini, etkin bir yönetimi, eğitilmiş personeli ve yüksek işletme standartlarını gerektirmektedir. Teknolojinin karmaşıklığı ve nitelikli personel ihtiyacı işletme maliyetlerinin de yükselmesine neden olmaktadır.

Atığın yakma sistemlerindeki davranışı ısı değeri ile karakterize edilmektedir. Bunun yanında önemli bir başka parametre de atığın tutuşma noktasıdır. Patlama riskinden kaçınabilmek için atığın tutuşma noktasının da dikkate alınması gerekmektedir. Atık depolama ve besleme bölmelerinin uygun tasarımını yapabilmek için, atığın viskozitesinin göz önünde bulundurulması gereklidir. Örneğin çamur türü atıkların doğrudan yakıcıya pompası daha uygun olmaktadır (UNEP, 2002). Yakma sürecinin ilerleyişi ve baca gazı kontrol sisteminin tasarımı için ise atığın klor, flor, kükürt ve ağır metal içeriğinin analizine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tam yanma sistemiyle çalışan yakma fırınlarında yeterli hava, türbülans ve doğru sıcaklıkta yeterli bekleme süresinin sağlanması işletme açısından hayati önem taşımaktadır. Atığın mekanik olarak karıştırılması da gerekli olabilmektedir. Atıkların yakma fırınına beslenmeden önce karıştırılması, yakma sürecine yardım etmekte, eşit dağılım ve havalandırma sağlanabilmektedir.

Farklı atık tipleri için, tam yanma ve homojen karışımı sağlamaya yönelik farklı teknolojiler geliştirilmiş ve adapte edilmiştir. Izgaralı fırınlar, akışkan yataklı fırınlar ve döner fırınlar örnek olarak verilebilir.

Yakma ızgaralarının yer aldığı ızgaralı fırınlarda atıklar ızgaralar üzerine beslenmektedir. Izgaralar üzerindeki boşluklardan sisteme hava beslemesi yapılmakta, bu sayede atığın homojen bir şekilde havayla buluşması sağlanmaktadır. Bu yöntem daha çok sıvı, çamur vb. içermeyen evsel atıklar için uygun bulunmaktadır. Şekil 6'da ızgara üzerinde gerçekleşen bir yanma olayı görülmektedir.



Şekil 6. Yakma ızgaraları üzerinde gerçekleşen bir atık yakma olayı

Tehlikeli atıkların yakılması için yaygın olarak kullanılan sistemler ise akışkan yataklı fırınlar ve döner fırınlardır.

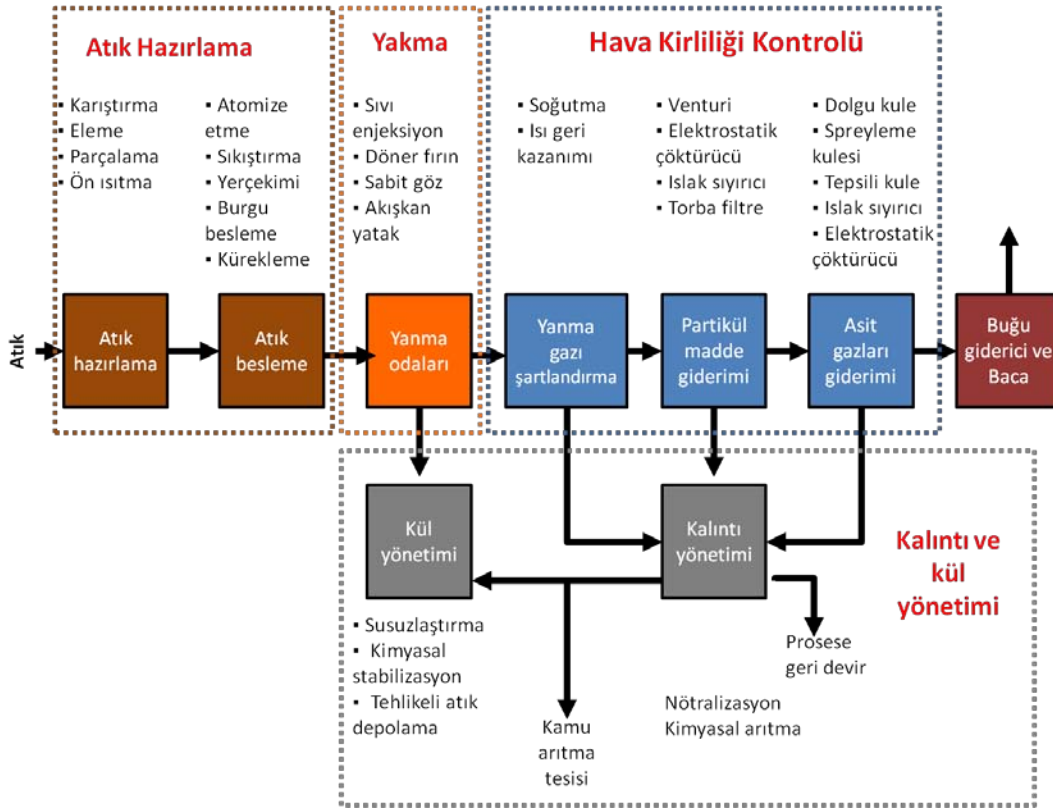
Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmeliğe (YakYön, 2010) göre yakma tesisleri kapsamında aşağıdaki birim ve sistemler bulunmaktadır:

- Atık kabul birimi,
- Geçici depolama birimi,
- Ön işlem birimi,
- Atık besleme ve hava besleme sistemleri,
- Kazan,
- Baca gazı arıtım sistemleri,
- Yakma sonucu oluşan kalıntılar için düzenli depolama alanı,
- Atıksuların arıtılması için arıtma birimi,
- Baca
- Yakma işlemlerini kontrol etmek ve yakma şartlarını izlemek ve kaydetmek için ölçüm cihazları
- Ortaya çıkan yanma ısısını geri kazanım sistemi





Bu alt sistemlerin yerleşimi, proses bileşenlerinin seçenekleriyle birlikte Şekil 8'de gösterilmektedir. Proses bileşenlerinin uygun kombinasyonlarının seçimi atığın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır (Oppelt, 1987).



Şekil 8. Yakma alt sistemleri

### Atık Hazırlama ve Besleme:

Atığın fiziksel formu uygun besleme yöntemini belirlemekte etkili olmaktadır. Sıvı formdaki atıklar önce karıştırılmakta, daha sonra nozullar veya özel olarak tasarlanmış atomize eden dağıtıcılar vasıtasıyla yanma odalarına aktarılmaktadır. Askıda katı madde içeren atıkların nozulları tıkanmasını önlemek için filtre/elekten geçirilmeleri gerekebilir. Atıklar ısıl değer yanmayı sürdürecektü düzeye getirilecek şekilde karıştırılabilirler. Karıştırma işlemi aynı zamanda beslenen atığın klor içeriğini dengelemek için de kullanılabilir. İşletmelerin çoğu klor içeriğinin %30'un altında kalmasına dikkat etmektedir (Oppelt, 1987). Atığın bu şekilde karıştırılarak hazırlanması yanma sürecinin kontrolüne yardım etmekte ve yanma gazları içerisinde tehlikeli serbest klor gazının oluşma potansiyelini sınırlamaktadır. Çamurlar genellikle



pompalar yardımıyla beslenmektedir. Büyük katı atıkların partikül boyutunun kontrolü açısından parçalanmaları gerekebilmektedir. Bu tür atıklar yanma odasına sıkıştırılarak, yerçekimi kuvvetinden faydalanarak, titreşimli veya burgu besleyiciler yardımıyla veya bant besleyicilerle beslenebilmektedir.

### Yanma Odaları:

Atığın fiziksel formu ve kül içeriği seçilen yanma odasının tipini belirlemektedir. Tablo 3'te atığın fiziksel formlarına göre yakma fırınlarının seçimi ile ilgili değerlendirmeler verilmektedir. Yakma sistemlerinin çoğu yanma odasının tipine göre isimlendirilmektedir.

Tablo 3. Farklı fiziksel formlardaki atıklar için uygun olan yakma fırını tipleri (Oppelt, 1987)

	Sıvı Enjeksiyon	Döner Fırın	Sabit Göz	Akışkan Yatak
<b>Katılar</b>				
Granüler, homojen		X	X	X
Düzensiz, hacimli (paletler vb.)		X	X	
Düşük erime noktası (katran vb.)	X	X	X	X
Eriyen kül bileşenleri olan organik bileşikler		X		
Hazırlanmamış, büyük, hacimli malzemeler		X		
<b>Gazlar</b>				
Organik buhar yüklü	X	X	X	X
<b>Sıvılar</b>				
Yüksek organik yüklü sıvı atıklar	X	X		X
Organik sıvılar				
<b>Katılar/sıvılar</b>				
Halojenli aromatik bileşik içeren katılar	X	X		
Sıvı organik çamurlar		X		X

### Hava Kirliliği Kontrolü

Tehlikeli atıkların yakılmasının ardından, yanma gazlarının hava kirliliği kontrol sistemi içerisinde temizlenmeleri gerekmektedir. Atıkta klor ve diğer halojenlerin varlığı, HCl gibi asitlerin

giderilmesi için sıyırma veya absorpsiyon adımının gerekliliğinin işaretini vermektedir. Atık içerisindeki kül yanma prosesiyle parçalanmayacaktır. Kompozisyonuna bağlı olarak, kül ya dip külü olarak fırının sonundan veya uçucu kül olarak yanma gazı içerisindeki partikül maddeleri tutma ünitesinden çıkış yapacaktır.

Tehlikeli atık yakma sistemlerinin çoğundan kaynaklanan partikül madde emisyonlarında partikül çapı genellikle 1 mikronun altındadır ve yasal emisyon sınır değerlerinin sağlanması için yüksek verimlilikte çalışan tutma sistemleri gerektirmektedir (Oppelt, 1987). Gaz fazındaki tehlikeli kirleticilerin temizlenmesi de ayrıca değerlendirilmelidir. Bu tür sistemlerin amacına uygun çalışması yatırımda doğru kararların alınmasını gerektirmektedir. Verimin sürdürülmesi ise işletme ve bakım şartlarının sağlanıp sağlanmamasına bağlıdır.

### **Kalıntı ve Kül Yönetimi**

Tehlikeli atıkların inorganik bileşenleri yakma yoluyla parçalanamamaktadırlar. Bu maddeler, yanma odası sonunda dip külü olarak, sıyırıcı atıksuyundaki kirleticiler olarak, diğer hava kirliliği kontrol kalıntıları olarak ve bacadan çıkan emisyonlar olarak sistemden ayrılmaktadırlar. Taşıdıkları yoğun tehlikeli potansiyeli nedeniyle bu kalıntı ve kirleticilerin yönetiminin yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmeleri gerekmektedir.

Atık yakma tesisi projelerinin tasarımında aşağıdaki hususların da sağlanması gerekmektedir (Öztürk ve diğ., 2015)

- İyi planlanmış bir entegre atık yönetim sistemi,
- Atıkların iyi işletilen ara depolama tesislerinde depolanıyor olması,
- Yanabilir özellikteki atığın sürekli temin garantisi,
- Yakılacak atığın ortalama ısıl değerinin asgari 7 MJ/kg civarında olması ve hiçbir şekilde 6 MJ/kg altına düşmemesi,
- Yakma tesislerini işletecek kalifiye teknik personelinin bulunabilmesi,
- Yakma tesisi projeleri ile ilgili asgari 15 yıl ve üzerinde master planlamalarının yapılması,
- Tesisin işletilmesi için bakanlıklardan uygun izin ve lisansların alınması

Bunların dışında bir yakma tesisinin işleticisi lisans almadan önce tesiste yakılacak atığı analiz etmek, atık besleme hızına bağlı olarak ortaya çıkacak emisyon ve atık sularla ilgili standartları sağladığını ispat etmek amacıyla sürekli ölçüm cihazı ile üç ay süresince deneme yakması yapmakla yükümlüdür (YakYön, 2010).

Yakma tesisleri, bertaraf edilecek atıkların türüne ve kategorisine göre tasarlanmalı, uygun donanımda olmalı ve çevre mevzuatına uygun işletilmelidir. Tesisin toplam atık yakma veya beraber yakma kapasitesi başlangıçta belirtilmelidir. Tehlikeli atıklar yalnızca lisanslı tehlikeli atık yakma veya beraber yakma tesislerinde yakılmalıdır.

### **3.2. Yakma Tesisi İşletiminde Dikkate Alınması Gereken Faktörler**

T.C. Çevre Mevzuatındaki Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmeliğe (YakYön, 2010) göre, aşağıda belirtilen atıklar atık yakma veya beraber yakma tesislerinde yakılamamaktadır:

- Tarım ve ormancılık kaynaklı bitkisel atıklar,
- Isı geri kazanımı maksadıyla tesisin kendi bünyesinde yakılan gıda sanayi kaynaklı bitkisel atıklar,
- Ham kâğıt hamuru ve kâğıt üretiminden kaynaklanan ısı geri kazanımının yapıldığı lifli bitkisel veya organik atıklar,
- Özellikle inşaat ve yıkım atıklarından çıkan halojenli organik bileşiklerin kullanıldığı tahta atıklar,
- Cam şişeler vb. yerlerde kullanılan mantar tıplar,
- Radyoaktif atıklar,
- Hayvan kadavraları ve hayvan atıkları,
- Petrol ve gaz kaynaklarının aranmasından, işletilmesinden kaynaklanan ve tesis içinde yakılan atıklar.

Yakma işlemiyle ilgili uyulması gereken genel kurallar aşağıdaki gibidir (YakYön, 2010):

- Önce atığın tehlikeli atık olup olmadığı, atık içeriğinde radyoaktif madde bulunup bulunmadığı belirlenmelidir.
- Yakma işlemi sırasında üretilen ısının, elektrik enerjisine dönüştürme, üretim sürecinde kullanma ya da bölgesel ısıtmada kullanma gibi yöntemlerle en elverişli biçimde geri kazanılması esastır.
- Yakma tesisleri, atık kabul ünitesi, laboratuvar, geçici depolama alanları ve atık besleme sistemine sahip olmak zorundadır. Atıkların yakıldığı tesisler, tam yanmanın sağlanabileceği şekilde kurulur ve işletilmelidir.
- Atık kullanımından kaynaklanabilecek kazalara karşı acil durum ve müdahale planları hazırlanır, bu konuda yeterli sayı ve nitelikte eğitilmiş personel ve ekipman bulundurulmalıdır.
- Atıkların taşınması bu iş için lisans almış kişi ve kuruluşlarca atığın özelliğine uygun araçlarla yapılır. Taşıma esnasında Ulusal Atık Taşıma Formlarının kullanılması zorunludur.
- Tesislerden kaynaklanan cüruf ve baca gazı partiküllerinin ayrı ayrı toplanması ve çevreye duyarlı bertarafının lisans almış tesislerde sağlanması zorunludur.
- Baca gazı emisyonları ölçüm teknikleri, su kirleticileri için ölçüm teknikleri yönetmelikte belirtildiği gibi uygulanmalıdır.
- Bir yakma veya beraber yakma tesisine lisans alınabilmesi için, 31/12/2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 2004), 26/11/2005 tarihli ve 26005 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği (76/464/AB)(TehMadSÇ, 2005) , 8/6/2010 tarihli ve 27605 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik (ToprakY, 2010) ve 3/7/2009 tarihli ve 27277 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Sanayi Kaynaklı Hava

Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde (SKHKKY, 2009) belirtilen hükümlere uyulması zorunludur.

- Tesis yetkilisince yakma işlemi ile bertaraf edilecek atıkların kategorileri ve yakıldıklarında ortama verilecek emisyon parametreleri açık bir biçimde listelenmelidir. Atık kategorileri ve kodları ile atığın miktarına ilişkin bilgiler de dahil edilmelidir.
- Atıkların yakılması veya beraber yakılması durumunda asgari ve azami kütle akışı, en düşük ve en yüksek kalorifik değerleriyle, bu atıklardaki PCB, PCP, klor, flor, kükürt, ağır metaller gibi kirleticilerin, azami içeriği belirtilir.

Yine Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmeliğe göre yakma tesislerinin işletme koşulları aşağıdaki gibidir (YakYön, 2010):

- Yakma tesisleri, cüruf ve taban küllerinin toplam organik karbon (TOK) içeriğinin %3'ten veya tutuşma sırasındaki kaybın materyalin kuru ağırlığının %5'inden az olacağı bir yakma seviyesine ulaşacak şekilde işletilir. Gerektiği takdirde, atıkların ön işlemi için uygun teknikler kullanılır.
- Yakma tesisleri işlemden kaynaklanan gazın, ikinci yanma odasında 850 °C sıcaklıkta en az iki saniye kalması zorunludur. Buna göre, yedek brülör ile donatılan ikinci yanma odasında brülörlerinin otomatik olarak devreye girmesi sağlanır.
- Yakma tesisinin her bir hattı en az bir yedek brülör ile donatılır. Yanma havasının en son enjeksiyonundan sonra yanma gazlarının sıcaklığı 850 °C veya duruma göre 1100 °C'nin altına düşerse, bu brülör otomatik olarak devreye girer. Başlama ve kapatma faaliyetleri sırasında ve yanmamış atığın yanma odasında bulunduğu süre boyunca sıcaklığı 850 °C veya halojenli bileşikler için 1100 °C'de muhafaza edilmesini temin etmek amacıyla, bu brülör, tesisin başlama ve kapatma faaliyetlerinde de kullanılır.
- Başlangıç veya kapatma sırasında veya yanma gazının sıcaklığı 850 °C veya duruma göre 1100 °C'nin altına düştüğü zaman, yedek brülörün, doğal gazın yanmasından kaynaklanan emisyonlardan daha yüksek emisyonla neden olacak yakıtlar ile beslenmesi yasaktır.
- Beraber yakma tesisleri, atığın beraber yakılmasından kaynaklanan gazın en elverişsiz koşullarda bile kontrollü ve homojen bir şekilde en az iki saniye için 850 °C sıcaklığa yükselmesine müsaade edecek şekilde tasarlanır, donatılır, inşa edilir ve işletilir. İçeriğinde %1'den fazla halojenli organik maddeler bulunan tehlikeli atıklar beraber yakılırsa, sıcaklığı 1100 °C'ye yükseltilmesi zorunludur.
- Yakma ve beraber yakma tesisleri, atık beslemesini aşağıdaki durumlarda engelleyecek bir otomatik sisteme sahip olmalıdır:
  - a) Başlangıçta, minimum 850 °C veya 1100 °C sıcaklığa ulaşılan kadar,
  - b) Minimum 850 °C ve 1100°C sıcaklığın muhafaza edilemediği zaman,
  - c) Sürekli ölçümlerde, arıtma cihazlarının arıza yapması veya bozulması gibi nedenlerle herhangi bir kirlenici parametrenin emisyon limit değerinin aşıldığının belirlenmesi durumunda,
- İşletme koşullarındaki değişim, daha fazla kalıntıya veya birinci fıkrada belirtilen koşullarda beklenen kalıntılardan daha yüksek miktarda organik kirlenici madde ihtiva eden kalıntılara neden olmayacak biçimde tasarlanır.

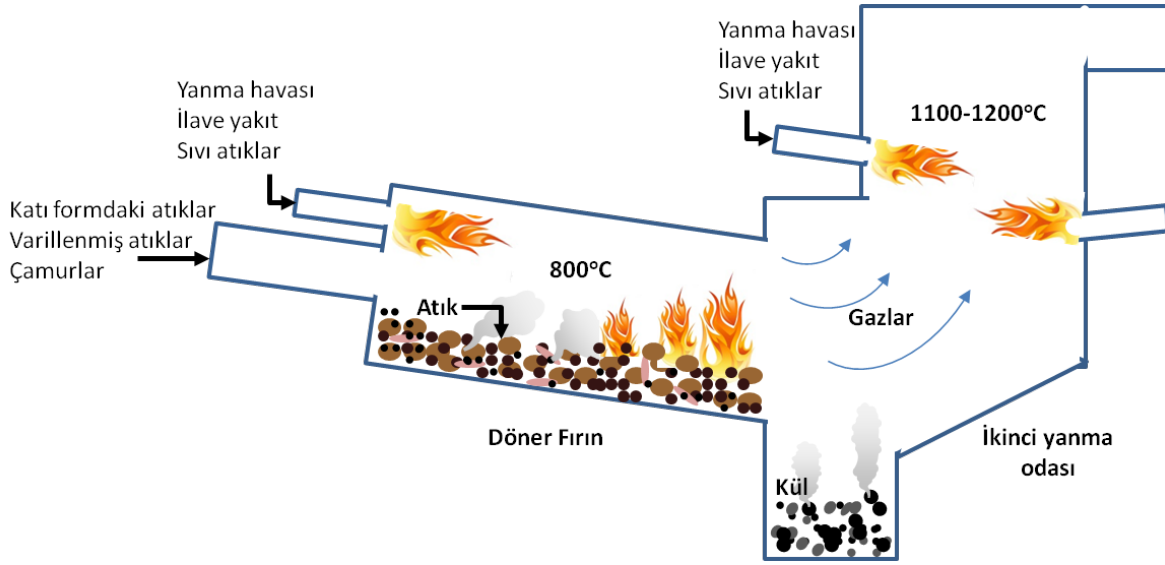
- Yakma ve beraber yakma tesisleri, havaya yapılan emisyonlar zemin seviyesinde Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğine (SKHKKY, 2009) göre hava kirliliğine mahal vermeyecek şekilde tasarlanır, donatılır, inşa edilir ve işletilir. Ayrıca, baca gazı emisyonlarının kontrolü ve tesis anma ısıl güç değeri dikkate alınarak Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğine uygun olarak belirlenecek baca gazı yüksekliğine sahip olur.

### 3.3. Yakma Fırınları

Tablo 3'te atığın fiziksel formlarına göre yakma fırınlarının seçimi ile ilgili değerlendirmelere bakıldığında, en yüksek çeşitlilikte atık türünü kabul eden yakma fırını tipinin döner fırınlar olduğu görülecektir. Döner fırınları atık çeşitliliği açısından izleyen ikinci fırın tipi ise akışkan yataklı fırınlardır. Bu nedenle tehlikeli atık yönetiminde en yaygın olarak tercih edilen fırın tipleri döner fırınlar ve akışkan yataklı fırınlardır. Aşağıda sırasıyla bu iki fırın tipi detaylandırılmaktadır.

#### 3.3.1. Döner Fırınlar

Döner fırınlar (Şekil 9), katı, çamur, akışkan, sıvı, varil içerisinde olmak üzere çeşitli atık türlerinin parçalanmasında kullanılabilen çok yönlü yakma fırınlarıdır (Tchobanoglous ve Kreith, 2002). Bu nedenle, bu üniteler ticari ölçekteki yakma tesisi tasarımlarında en çok tercih edilen ünitelerdir. Bu tip yakma tesislerinde atık, iç kısmı yanmaya dayanıklı ateş tuğlaları (refrakter tuğlalar) ile döşenmiş olan çelikten yapılmış döner bir hazne içerisinde yakılır (Öztürk ve diğ., 2015). Ateş tuğlaları, yüksek sıcaklıklara, eriyen malzeme ve sıcak gazlardan dolayı ortaya çıkabilecek sıcaklık değişimlerine karşı dayanımı sağlamak için kullanılmaktadır (UNEP, 2002). Bu ünitenin dönüşü, atığın hem karışmasını hem de fırın içerisinde ilerlemesini sağlamaktadır. Atıkların fırın içerisindeki kalma süreleri genellikle 1-1,5 saat civarındadır (Oppelt, 1987). Bu süre, fırının dönüş hızıyla (dakikada 1-5 dönüş), atık besleme oranıyla, bazı durumlarda silindir içerisinde atığı geciktirecek iç engeller yaparak kontrol edilmektedir. Besleme oranı, fırında işlenen atığın fırın hacminin en fazla %20'sini dolduracak şekilde ayarlanmaktadır. Fırının birinci fonksiyonu katı atıkları gazlara dönüştürmektir; bu süreç bir seri buharlaşma, parçalayıcı damıtma ve kısmi yanma reaksiyonlarından oluşmaktadır. Gaz fazındaki yanma reaksiyonların tamamlanması için bir ikinci yanma odası gerekmektedir (Şekil 9). İkinci yanma odası doğrudan fırının deşarj ucuna bağlanmıştır; burada fırından çıkan gazlar yanma odasına doğru ilerlemektedirler. İkinci yanma odası dikey veya yatay olarak konumlandırılabilir. Hem döner fırın hem de ikinci yanma odasında istenen işletme sıcaklıklarını sağlayabilmek için ek yakıt ateşleme sistemi bulunmaktadır.



Şekil 9. Döner fırın ve ikinci yanma odası

Döner fırınlarının avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Pichtel, 2014):

- Çeşitli atıkların yakılabilmesine imkan verir (Arıtma çamurları, atık yağlar, variller vb.)
- Atıkların ön işlemden geçirilme ihtiyacı minimumdur.
- Metal varillerle doğrudan besleme yapılabilmektedir.
- Atığın fırında kalma süresi kontrol edilebilir.
- Atıklar yüksek türbülans sayesinde hava ile maksimum temas sağlar.

Döner fırınların dezavantajları ise,

- Atık gaz içerisinde partikül madde taşınımı yüksek düzeydedir.
- Organik gazların imhası için ikinci yanma odası gerekliliği bulunmaktadır.
- Fırın boyunca şartların kontrolü zordur.
- Hava ihtiyacı yüksek düzeydedir.
- Cüruf deşarjı esnasında önemli bir ısı kaybı meydana gelmektedir.
- Etkili bir sızdırmazlığın sağlanması zor olmaktadır.
- Sistemin her sene durdurulup bakıma (ateş tuğlalarının değişmesi gibi) alınması gerekmektedir. Bakım maliyetleri yüksektir (Pichtel, 2014).

Türkiye'de tehlikeli atıkların yakılması amacıyla kurulmuş ilk tesis olan İzmit Atık ve Artıkları Arıtma, Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ) döner fırın sistemiyle çalışan bir yakma tesisidir. Şekil 10'da İZAYDAŞ döner fırını görüntüsü verilmektedir.



Şekil 10. Yakma Tesisi Döner Fırını (İZAYDAŞ Örneği)

İZAYDAŞ'ta yakma prosesi, alevle ya da yanan atıklarla başlatılmaktadır. Döner fırında yakma havası, fanlar aracılığıyla atıkların bekletildiği bunker kasetlerinin üstünden veya atmosferden sağlanmaktadır. Fırın sıcaklıklarının istenilen düzeyde tutulabilmesi için yakıcı (brülör) aracılığıyla, fırın ağır yağ ve fuel oil ile beslenmektedir. Döner fırın 400°C'de döndürülmeye başlanır, 850°C'de katı atık, 1200°C'de sıvı atık beslemesi yapılır. Fırın döndükçe yakıt, atık ve havanın karışımı sağlanmaktadır. Atığın döner fırın içerisinde yaklaşık 2,5 saat kaldığı belirtilmektedir. Yanma sonucu cüruf veya dip külü halini alan atıklar döner fırının ikinci yanma odasına bağlantı noktasından ıslak tip cüruf konteynırına dökülerek bertaraf edilmek üzere toplanmaktadır. Şekil 11'de İZAYDAŞ'ta döner fırından çıkan cürufu toplama konteynırları görülmektedir.





Şekil 11 . Islak Cüruf Toplama Konteynerları (İZAYDAŞ Örneği)

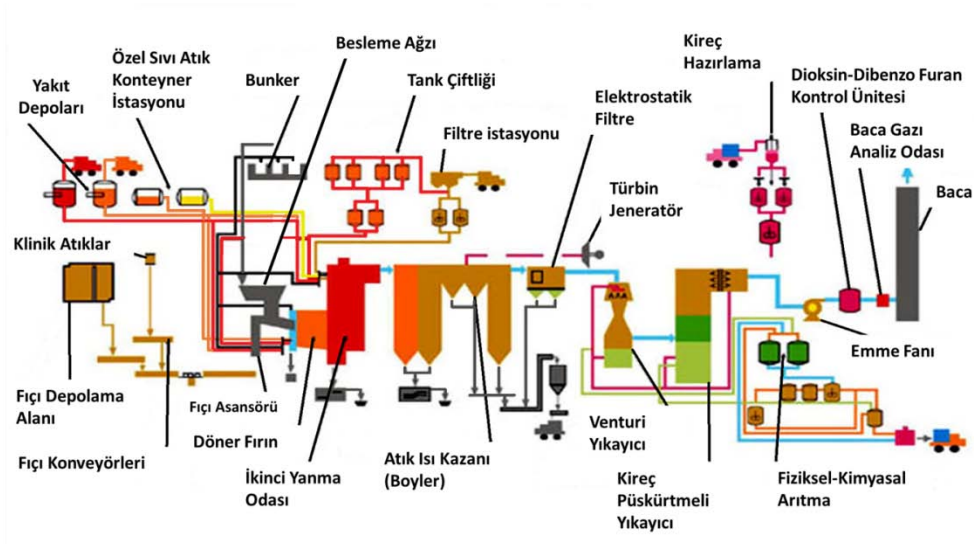
Döner fırından çıkan gazlar 1250-1300°C'deki 2. yanma odasına geçmekte ve burada 3 saniye süreyle alıkonmaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. Yakma Tesisi İkinci Yanma Odası (İZAYDAŞ Örneği)

Sıcaklığı yaklaşık olarak 180-200°C'ye düşen atık gaz, elektrostatik çöktürücüden geçirilerek partikül madde giderimi sağlanmaktadır. Elektrostatik çöktürücüden çıkan gaz, %10 konsantrasyonlu kireç çözeltisinin kullanıldığı ventüri yıkayıcıdan geçirilmektedir. Ventüri yıkayıcıda pH= 1-2 aralığında tutularak HF, HCl gibi asit gazlar giderilmektedir. Ventüri yıkayıcıyı kireç püskürtmeli yıkayıcı ve dioksin-furan kontrol ünitesi izlemektedir. Şekil 13'te İZAYDAŞ yakma tesisini oluşturan bileşenler akış diyagramı üzerinde gösterilmektedir.





Şekil 13. İZAYDAŞ Yakma Tesisi Genel Akış Şeması

Şekil 14'te İZAYDAŞ yakma tesisi genel görünümü ve tehlikeli atık depolama ve besleme sistemi fotoğrafları yer almaktadır.





a) Yakma tesisi genel görünümü



b) Araçların güvenlik ve radyasyon kontrolü



c) Aracın kantara girmesi ve numune alma bölgesi





d) Ara depolama sahası



e) Bunker kasetleri, parçalayıcı ve bunker içi



f) Tank Çiftliği ve Özel Sıvı Besleme Sistemleri



g) Varil Besleme Sistemi

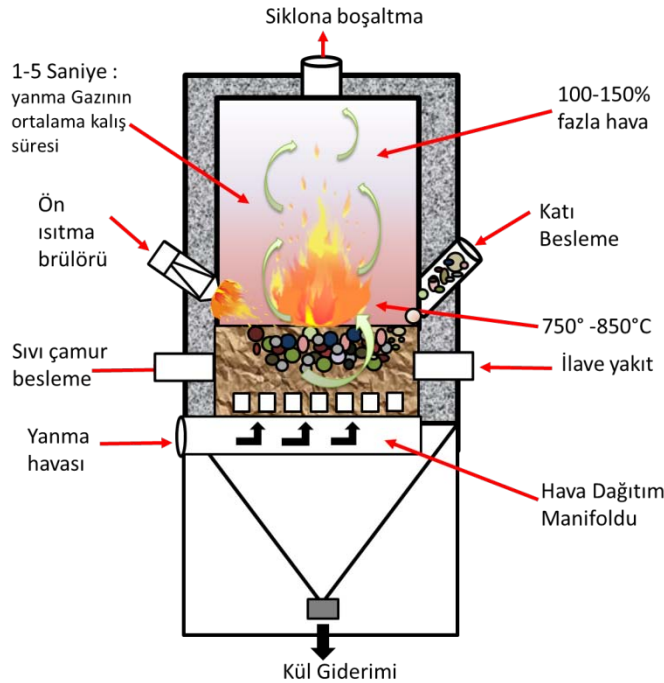
Şekil 14. Mini fotoğraf albümü: tehlikeli atık yakma tesisi genel görünümü, atık depolama ve besleme sistemleri (İZAYDAŞ Örneği): a) Yakma tesisi genel görünümü , b) Araçların güvenlik ve radyasyon kontrolü, c) Aracın kantara girmesi ve numune alma bölgesi, d) Ara depolama sahası, e) Bunker kasetleri, parçalayıcı ve bunker içi, f) Tank Çiftliği ve Özel Sıvı Besleme Sistemleri, g) Varil Besleme Sistemi

### 3.3.2. Akışkan Yataklı Yakma Fırınları

Bu yakma fırınında kum veya alüminyum oksit içeren ve akışkan halde tutulan bir yanma odası bulunmaktadır. Atık askıda tutulan kum yatağı üzerine beslenmektedir. Gözenekli bir yüzey üzerine döşenmiş bir kum yatağı, alttan sağlanan hava akışıyla hareketlendirilerek akışkan hale getirilmektedir. Sağlanan havanın hızı kum yatağını askıda tutacak kadar yüksek, ancak sistemden kaçıp gitmesine imkan vermeyecek kadar düşüktür (LaGrega ve diğ., 2001).

Akışkan yatak üzerine enjekte edilen atık, çamur, sıvı atık veya düzenli bir partikül boyut dağılımı ve yoğunluğu olan katı atık formunda olmalıdır. Kum yatağını akışkan hale getirmek için kullanılan hava, atığı tutuşturacak sıcaklığa gelinceye kadar ısıtılmaktadır. Bu şekilde atık yatak üzerinde okside olmaya, yanmaya başlamaktadır. Bu sistemde külün çoğu yatak içerisinde kalmakta, bir kısmı fırından çıkarak hava kirliliği kontrol sisteminde tutulmaktadır. Sistemden çıkan sıcak gazlar döner fırın içeren sistemlerde olduğu gibi kazanlarda geri kazanılabilmekte veya yanma havasının ön ısıtmasını sağlamak için kullanılabilir (LaGrega ve diğ., 2001).

Akışkan yataklı fırınlar, kabarcıklı ve dolaşimli (geri devirli) olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. İki tipinde de refrakter tuğlayla örülmüş, kısmen kum, alüminyum oksit gibi maddelerle doldurulmuş yanma odaları içermektedirler (Şekil 15). Kabarcıklı yöntemde yanma havası, fırının tabanında yer alan dağıtıcı tepsi yardımıyla, kum yatağını kabarcıklı hale getirecek şekilde dengelenmiş bir hızla fırına verilmektedir. Dolaşimli (geri devirli) yöntemde ise hava hızları daha yüksek tutulmakta ve kum tanecikleri yanma odasının üst kısmından çıkmaktadır. Bu tasarımda yanma odasından ayrılan kum tanecikleri bir siklon içerisinde tutulmakta ve tekrar yanma odasına geri devredilmektedir. İşletme sıcaklıkları 750-850°C aralığında tutulmakta, ilave hava ihtiyacı %100-150 oranında olmaktadır (Oppelt, 1987).



Şekil 15. Akışkan yataklı fırın

Akışkan yataklı fırınlar daha çok çamurlar veya parçalanmış katı materyaller için uygundur. Atık malzemelerin yatak içerisinde iyi bir şekilde dağılmasını ve yatakta kalan kalıntıların yataktan uzaklaştırılmasını sağlamak için, katıların bir ön eleme veya 5 cm çap sağlanacak şekilde parçalama işlemine tabi tutulmaları gerekmektedir (Oppelt, 1987). Akışkan yataklı yakma fırınları yüksek gaz/katı oranları, yüksek ısı transfer verimi, gaz ve katı fazlarda yüksek türbülans, yatak boyunca eşit dağılan sıcaklık ve asit gazlarının kireç veya karbonat ilavesiyle yerinde

nötralize edilebilmesi avantajlarını sunmaktadır. Ancak beslenen atık içerisinde tuzlar varsa yatak üzerinde katı birikimi olabilmekte ve küçük partiküllerin bekleme süresi kısa olabilmektedir.

Seçilen yakma fırını tipine bakılmaksızın, yanma odasının boyutunu ve işletme koşullarını (sıcaklık, ilave hava ihtiyacı, debi vb.) atığın kimyasal ve termodinamik özellikleri belirlemektedir. Bu özellikler aynı zamanda hava kirliliği kontrol sistemi ve kül/kalıntı bertaraf sistemi seçiminde de etkili olmaktadır. Stokiyometrik yanma havası ihtiyacını belirleyebilmek için elementel kompozisyon ve nem içeriği gibi verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler yanma gazı kompozisyonunu tahmin etmek için de gereklidir.

### 3.4. Atık Isı Oluşumu ve Enerji Kazanım Sistemleri

Yanma gazları, döner fırından ikinci yanma odasına geçerler. Yasal düzenlemeler, yanma gazlarının tam yanmasını sağlamak amacıyla ikinci yanma odasındaki sıcaklığın 1100°C seviyesinde olması ve bu sıcaklığın yanma havasının son enjeksiyonundan itibaren en az 2 saniye sürdürülmesi gerektiğini belirtirler. Bu sıcaklığa ulaşılmadan yakma fırınına atık beslemesinin yapılmaması, sıcaklık seviyesi düştüğünde ise atık beslemesinin durdurulması gerekmektedir.

CO ve toplam organik karbon (TOK) emisyonunun oluşması doğrudan yanma sürecinin kalitesiyle ilişkilidir. Uygun olmayan fırın tasarımı veya işletme koşulları, düşük yanma sıcaklıklarına, oksijen eksikliğine veya yüksek sıcaklıkta çok kısa bekleme süresine neden olmaktadır. Bunun sonucunda da CO ve TOK için sağlanması gereken sınır değerler aşılmaktadır. CO ve TOK içeriği bu nedenle yanma sürecinin etkinliği için iyi göstergelerdir.

Isınmış baca gazı duvarlara, fırının ve ısı kazanının (boylarin) yüzeyine değerek radyasyon ve konveksiyon yoluyla soğumaktadır. Isı kazanı içinde basınçlandırılmış su ısıtılır (eğer yüksek basınçlı ısı kazanı kullanılıyorsa buharlaştırılır), veya buhar aşırı ısıtılır (doyma sıcaklığının üzerine çıkarılabilir). Buradaki amaç, buharın enerji içeriğinin bir buhar türbini içerisine genleşmesidir. Buhar türbini bir güç jeneratörüne bağlıdır. Birleşik bir ısı ve güç santralinde, buharın enerji içeriğinin ancak %25'i, elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Hulgaard ve Vehlow, 2011). Kalan enerji, türbinden çıkan egzoz buharının bir ısı dönüştürücüde yoğunlaştırılması yoluyla geri kazanılır. Böylelikle ısıtma amacıyla kullanılacak sıcak su elde edilmiş olur. Isısı alınmış su, ısı kazanında kullanılmak üzere besleme tankına geri devrettirilir. Böylece kapalı bir çevrim içerisinde su ve ısı geri kazanımı sağlanmış olur. Yüksek basınçlı ısı kazanında gerçekleşen su ve buhar çevrimine Rankin çevrimi adı verilir. Tipik bir atıktan enerji elde etme tesisinde ısıl girdinin %20-25'i oranında güç üretimi gerçekleşmektedir. Bu oran kömürle çalışan termik santrallerde %50 oranındadır (Hulgaard ve Vehlow, 2011).

Rankin çevrimi güç santrallerinde yaygın olarak kullanılan bir süreçtir. Bu çevrim içerisinde su, dönüşümlü olarak buharlaştırılır ve yoğunlaştırılır. Önce su, besleme suyu pompasıyla adiyabatik olarak basınçlandırılır (çevreyle ısı değişimi olmaksızın). Daha sonra su, ısı kazanı içerisinde buharlaştırılır ve sabit bir basınç altında aşırı ısıtılır (aşırı ısıtma, doymuş buhar basıncı üzerinde ısıtma anlamına gelmektedir). Buhar, ısı kazanından türbine aktarılır; burada genleşerek dönme



enerjisi oluşturur. Bu enerji jeneratörde güce dönüştürülür. Buhar genleştiği zaman soğur ve basınç düşüşü gerçekleşir. Çevrimdeki son adım buharın yoğuşması ve yoğuşan buharın besleme suyu tankına döndürülmesidir. Birleşik bir ısı ve güç santralinde, buharın yoğuşması esnasında açığa çıkan ısı, merkezi ısıtma sistemine yönlendirilir.

Rankin çevrimindeki enerji dengesi, ısı kazanındaki su/buhar çevrimine ısı girdisi ( $Q_H$ ) ve yoğuşmayla gerçekleşen ısı çıktısı,  $Q_L$ 'yi kapsamaktadır. Sisteme sağlanan güç(iş)  $W_S$  olarak kabul edildiğinde sürecin verimi ( $\eta$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Hulgaard ve Vehlow, 2011).

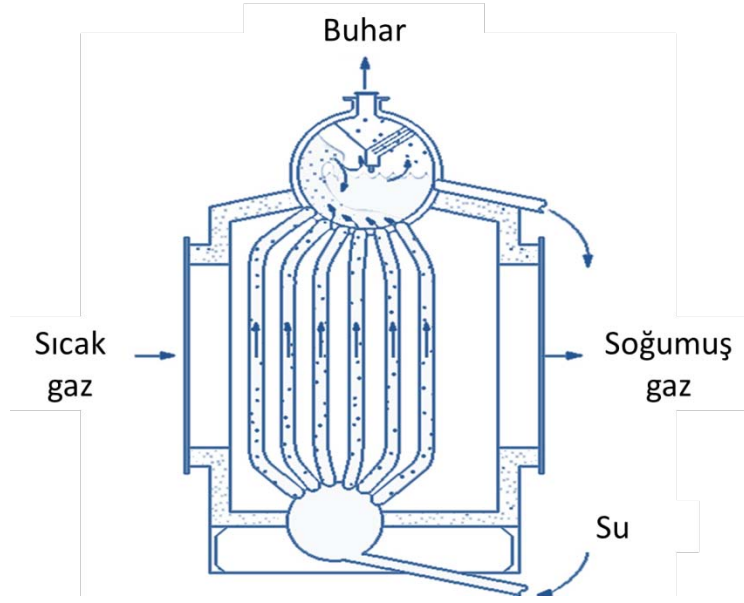
$$\eta = W_S / Q_H = (Q_H - Q_L) / Q_H = 1 - Q_L / Q_H$$

$Q_H$  arttıkça ve  $Q_L$  azaldıkça verimin de artacağı açıktır. Çeşitli kayıplar nedeniyle üretilen güç genellikle  $Q_H - Q_L$  farkından daha düşüktür. Yakıtın  $Q_H$ 'a dönüşümü esnasında çeşitli çıktılar nedeniyle (örn. sıcak baca gazları, sıcak dip külü, radyasyon ve konveksiyon vb.) kayıplar olmaktadır.

Buhar ısıtma sıcaklığının yaklaşık 400°C olduğu birleşik bir ısı ve güç çevrim santralinde, tek aşamalı bir türbin, 80-90°C'de iki aşamalı bir yoğuşma bölümü ve buharı 130°C'de bir ön ısıtmaya tabi tutan besleme suyu bulunmaktadır. Bu durumdaki güç verimi yaklaşık %20-25 oranındadır. Bu durumda yoğuşma ısı ısıtma için kullanılmakta, böylelikle toplam enerji verimi %90'a çıkmaktadır (Hulgaard ve Vehlow, 2011).

Su/buhar çevrimi içindeki optimum basınç, istenen buhar ve yoğuşma sıcaklıklarıyla ve türbindeki genleşme oranıyla belirlenmektedir. Modern bir güç santralinde tipik basınç 200-300 bar düzeyinde, bir atık yakma tesisinde basınç 40-50 bar düzeyinde olacaktır (Hulgaard ve Vehlow, 2011).

Tehlikeli atık yakma fırınlarında ısı geri kazanımı için genellikle boyler adı verilen özel olarak tasarlanmış kazanlar kullanılmaktadır (Şekil 16). Bu kazanlar genelde "su tüpü" tipinde tasarlanmaktadır. Bu kazanların yüksek sıcaklığa, yüksek miktarda partikül maddeye ve yüksek asit içerikli baca gazına dayanıklı olmaları gerekmektedir.



Şekil 16. Atık ısı kazanı (LaGrega ve diğ., 2001)

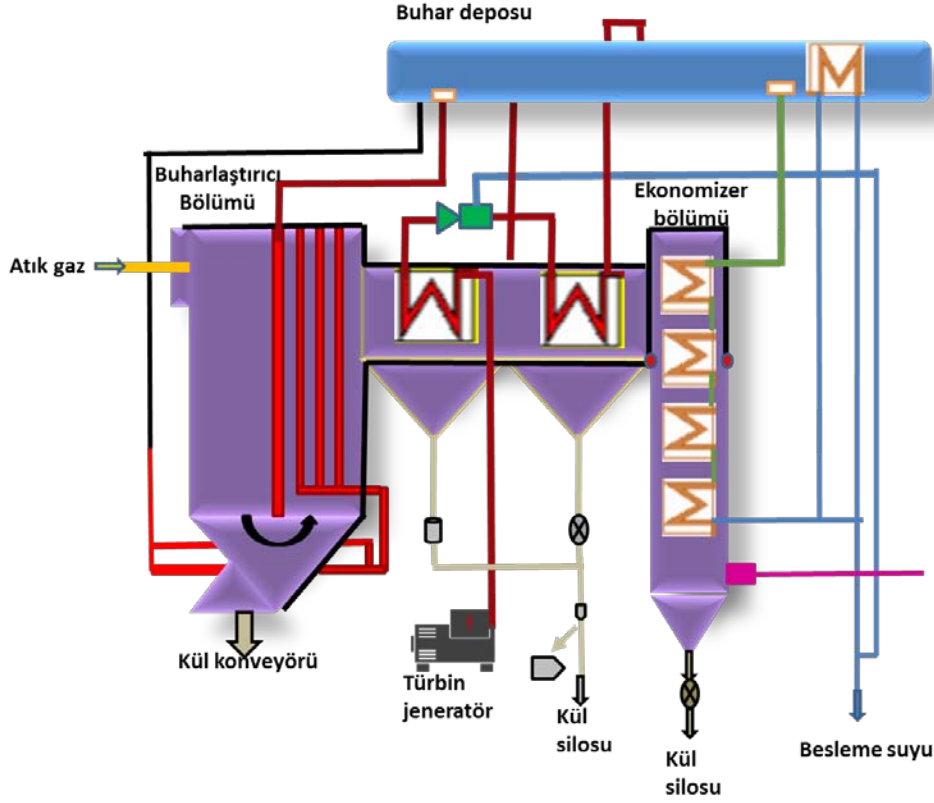
İşletme esnasında kazanın içi ve su tüplerinin dış duvarları, partikül madde birikimi nedeniyle kirlenir ve ısı transferi azalmaya başlar. Partikül birikimini önlemek için yüzeyler yüksek hızda hava ve buhar yardımıyla sıyırılır; ayrılan partiküller yine hava akımıyla birlikte hava kirliliği kontrol ünitesine yönlendirilirler (Pichtel, 2014).

Isı kazanlarında üretilen buhar, türbinler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Katı atıklar buhar üretiminde kullanılabilen düşük dereceli yakıtlardır. Bu buhar, türbinleri çevirme açısından yeterlidir, ancak kalan buharın endüstride kullanımı ise çok kısıtlıdır. Genellikle kalan buhar yoğunlaştırılarak suya dönüştürülmektedir. Oluşan su soğutulmakta, tekrar enerji tesisinde kullanılmakta veya çevreye sıcak su olarak verilmektedir (Öztürk ve diğ., 2015).

Kazan suyunun sadece bir kez kullanımı genellikle çok pahalı olduğundan, artırılıp tekrar kullanılmaktadır. Bu suyun çok azı (%10'dan daha az), çözünmüş katı madde miktarını düşük tutmak için geri devir suyuna temiz su olarak eklenir. Atık buharın su ile soğutulmasından elde edilen sıcak suyun (soğutma suyu) çevreye verilmesi durumunda, akarsu, nehir ve körfezler üzerinde çeşitli zararlı etkiler (termal kirlenme) oluşabilmektedir (Öztürk ve diğ., 2015).

İZAYDAŞ örneği incelendiğinde, ikinci yanma odasından gelen 1250-1300°C sıcaklığındaki atık gaz radyasyon, kızdırıcı ve ekonomizer bölümlerinden oluşan atık ısı kazanına (boylar) geçmekte ve burada yaklaşık olarak 1000°C'lik bir ısı bırakmaktadır. Isıtma yüzeyleri işletme sırasında otomatik olarak çalışan yüzey temizleme sistemleri ile temizlenmektedir. Şekil 17'te kullanılan kazan sistemi şematize edilmiştir.





Şekil 17. Atık Isı Kazanı (Boylar) Şematik Gösterimi (İZAYDAŞ Örneği)

### 3.5. Yakma Sistemlerinden Kaynaklanan Atıklar

Yakma sistemlerinden kaynaklanan atıklar katı, sıvı veya gaz fazda olabilmektedirler. Baca gazları, cüruf, kül, baca gazı arıtma sisteminden kaynaklanan kalıntılar ve atıksular bu atıkları oluşturmaktadırlar.

#### 3.5.1. Katı Atıklar ve Kalıntılar

Yakma tesislerinden çıkan üç katı atık, dip külü veya cüruf, uçucu kül, hava kirliliği kontrol sistemi kalıntıları olarak sıralanabilmektedir.

- "Dip külü veya cüruf" terimi, yanma sonrası oluşan katı kalıntıları ifade etmektedir.
- "Uçucu kül" terimi, baca gazı esaslı çok küçük boyuttaki partikül maddeler için kullanılmaktadır. Atık ısı kazanında birikebilmekte, elektrostatik çöktürücüler, torba filtreler gibi partikül madde tutma sistemleriyle tutulmaktadır.
- "Hava kirliliği kontrol sistemi kalıntıları", baca gazlarının temizlenmesi esnasında kullanılan ve daha sonra atık haline gelen kalıntılar için kullanılmaktadır. Harcanmış kireç, aktif karbon, yıpranmış torba filtre malzemesi vb. bu tür atıklara örnek olarak verilebilir.

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelikte "kalıntı" ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (YakYön, 2010):

*"Kalıntı: Yakma veya beraber yakma işlemi, baca gazı veya atıksu arıtımı ile yakma veya beraber yakma tesisi içindeki diğer işlemler sonucu ortaya çıkan; yakma fırınlarından kaynaklanan taban külü, cüruf, uçucu kül ve kazan tozu, gaz arıtımından kaynaklanan katı reaksiyon ürünleri, atık suların arıtılmasından çıkan arıtma çamuru, kullanılmış katalizörler veya kullanılmış aktif karbon dâhil olmak üzere her türlü sıvı veya katı madde"*

Bu atıkların yönetimiyle ilgili yasal düzenlemeler farklılık gösterebilmektedir. Uçucu kül, tehlikeli bir atık olarak sınıflandırılmakta ve depolanmadan önce bir işlemde geçirilmesi zorunlu olmaktadır. Bunun yanında dip küllerinin depolanmasına, hatta yapı malzemesi olarak geri kazanımına (örn. yol inşaatında agrega olarak) izin verilebilmektedir (UNEP, 2002).

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik'e göre yakma (YakYön, 2010) tesislerinden kaynaklanan cüruf ve baca gazı partiküllerinin ayrı ayrı toplanması ve çevreye duyarlı bertarafının lisans almış tesislerde sağlanması zorunludur. Baca gazı külü, kazan tozu, yanma gazlarının arıtımından çıkan kuru kalıntılar ve toz halindeki kuru kalıntıların taşınması ile ara depolaması, çevreye yayılmalarını engelleyecek şekilde kapalı sistemle yapılmalıdır.

Arsenik, baryum, berilyum, krom, kadmiyum, kurşun, cıva, nikel ve çinko gibi metaller, hem birçok tehlikeli atıkta bulunduğu hem de olumsuz sağlık etkilerine neden oldukları için endişe konusudurlar. Yakma, atık içerisindeki metal fraksiyonlarını değiştirmekte ancak parçalayamamaktadır. Sonuçta, metallerin yanma bölgesinden girdikleri miktarda çıkmaları beklenmektedir (Oppelt, 1987). Bu nedenle, bu metallerin hangi kalıntıda kendilerini gösterdikleri endişe konusu olmaktadır. Dip külü olarak mı, hava kirliliği kontrol kalıntısında mı yoksa bazı gazı emisyonlarında mı?

Tablo 4'te tipik bir yakma tesisi külü içerisinde bulunan maddeler verilmektedir.

Tablo 4. Tipik bir yakma tesisi külü içerisinde bulunan maddeler (IBRD, 1999)

Madde	Birim	
O	g/kg	-
Si	g/kg	150
Ca	g/kg	100
Fe	g/kg	25
Al	g/kg	70
C	g/kg	-
Na	g/kg	30
K	g/kg	35
Mg	g/kg	15
S	g/kg	25
Cu	g/kg	1,2

Zn	g/kg	30
Cl	g/kg	75
Pb	g/kg	10
F	mg/kg	-
Cr	mg/kg	650
Ni	mg/kg	150
As	mg/kg	150
Cd	mg/kg	400
Hg	mg/kg	8

Yakma sonucu oluşan ve düzenli depo sahasında depolanacak olan dip külünün/cürufun dünyada yol temel malzemesi olarak, yapı malzemesinde dolgu olarak, çakıl drenaj hendeklerinde drenaj malzemesi olarak, maden sahalarının üstünün kaplanmasında örtü olarak, yapı malzemesi yapımında agrega olarak kullanılabilirdiği bilinmektedir. Ancak bu kullanımlardaki temel belirleyici taban külünde yapılan analizler sonucu ölçülen ağır metal düzeyleri olmaktadır.

### 3.5.2. Atıksu

Uygulanan baca gazı arıtma teknolojisine bağlı olarak, yakma tesislerinden atıksu çıkışı olabilmektedir. Baca gazı yıkama teknolojileri kullanılmışsa (örn. venturi yıkayıcı) oluşan atıksu miktarı arıtmayı gerektirecek büyüklükte olabilmektedir. Normalde oluşan atıksuyun ayrılarak atıksu arıtma tesisine yönlendirilmesi gerekmektedir. Kuru ve yarı-ıslak baca gazı temizleme tekniklerinde atıksu oluşumu daha az olacaktır.

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (YakYön, 2010), bu tür atıksuların deşarjıyla ilgili aşağıdaki hükümlere benzer hükümlerle düzenlemektedir:

- Atıksuların alıcı ortama deşarj kriterleri yönetmelikte verilen sınır değerleri aşamaz. Deşarj, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 2004) gereğince deşarj iznine tabidir.
- Limit değerlerine uymak amacıyla atıksuların seyreltilmesi yasaktır.

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik'e (YakYön, 2010) göre baca gazı emisyonlarının temizlenmesinden gelen atıksuların deşarjı için limit değerler Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Baca gazı emisyonlarının temizlenmesinden gelen atıksuların deşarjı için limit değerleri

Kirletici maddeler	Deşarj limit değerleri	
Toplam askıdaki katı maddeler	% 95	% 100

	30 mg/l	45 mg/l
Cıva ve bileşikleri (Hg)	0,03 mg/l	
Kadmium ve bileşikleri (Cd)	0,05 mg/l	
Talyum ve bileşikleri (Tl)	0,05 mg/l	
Arsenik ve bileşikleri (As)	0,15 mg/l	
Kurşun ve bileşikleri (Pb)	0,2 mg/l	
Krom ve bileşikleri (Cr)	0,5 mg/l	
Bakır ve bileşikleri (Cu)	0,5 mg/l	
Nikel ve bileşikleri (Ni)	0,5 mg/l	
Çinko ve bileşikleri (Zn)	1,5 mg/l	
Dioksinler ve furanlar	0,3 ng/l	

### 3.5.3. Baca Gazları

Termal proseslerden kaynaklanan emisyonların tipi ve miktarı, atık içerisindeki kirleticiye, proses teknolojisine ve işletmenin verimine bağlıdır. Atıkların yakılması esnasında, yakılan atığın kilogramı başına 6-7 m<sup>3</sup> baca gazı oluştuğu bilinmektedir (UNEP, 2002). Bu oran atığın kimyasal kompozisyonu gibi belirli parametrelere bağlı olarak değişim göstermektedir.

Son yıllarda pek çok ülkede yakma fırınlarının kontrolüyle ilgili yasal düzenlemeler artırılmış, sınır değerler daha düşük seviyelere çekilmiştir. Sınır değerlerdeki değişiklikler, teknoloji ve işletme uygulamalarında da değişiklikler yapılmasına neden olmuştur. Özellikle baca gazı kontrol teknolojisindeki gelişmeler, atıkların yakılma maliyetinin artmasına neden olmuştur (UNEP, 2002).

Yakma tesislerinde oluşan hava kirleticileri, genel olarak gazlar ve partikül maddeler olarak sınıflandırılmaktadır. Diğer bir sınıflandırma ise, birincil kirleticiler ve ikincil kirleticiler olarak yapılmaktadır. Birincil kirleticiler, yakma prosesinin ürünleridir ve ortama verildiklerinde zararlı etkiler oluşturmaktadırlar. İkincil kirleticiler ise, birincil kirletici emisyonlarının bir sonucu olarak atmosferde oluşan kirleticilerdir.

Yakma işlemi sonucunda partikül madde (ağır metaller içeren), karbonmonoksit, kükürtdioksit ve azotoksit, hidroklorik asit, hidroflorik asit, dioksin, furan, poliaromatik hidrokarbon (PAH) gibi kirleticiler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yakılan atık türüne bağlı olarak koku oluşumu da söz konusu olabilir (TCÇŞB, 2009).

Yasal düzenlemelerle kontrol altına alınmaya çalışılan bazı kirleticiler aşağıdaki gibidir:

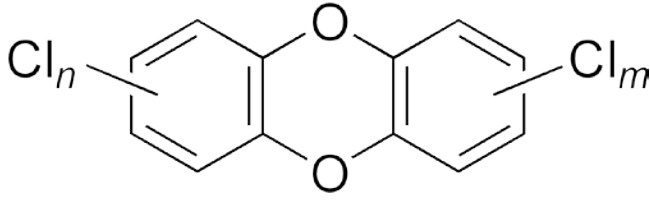
Partikül madde: Bu kirleticilerin kontrolü için genellikle elektrostatik çöktürücüler veya torba filtreler kullanılmaktadır.

Klor: Klorun kalsiyumla (genelde kireç formunda) veya sodyum hidroksitle nötralize edilmesi gerekmektedir. Bunun için kuru, yarı-ıslak veya ıslak sıyırma yöntemlerinden biri kullanılmaktadır. Islak sıyırma yöntemi bu yöntemler içinde en etkili olanıdır, ancak daha yüksek ekipman maliyeti vardır ve pH seviyesi düşük olan ve deşarjdan önce nötralize edilmesi gereken bir atıksu oluşturmaktadır.

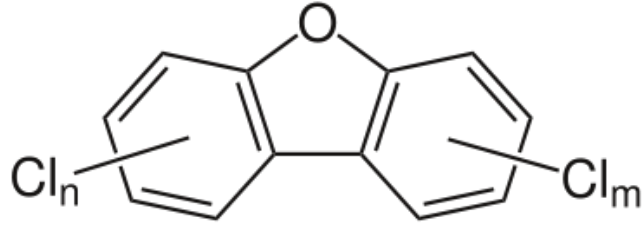
Kükürt: Kükürtün önemli bir kısmı klor tarafından etkisiz hale getirilmektedir ancak yine de emisyon sınır değerlerine ulaşmak için ilk yıkamadan daha yüksek bir pH düzeyiyle ikinci bir yıkama adımı gerektirmektedir. Bu da her ıslak yıkama adımının yaptığı gibi süreci daha karmaşık hale getirmektedir. İlave ekipman ve şartlandırma ihtiyacı ortaya çıkmakta ve arıtılması gereken bir atıksu oluşumuna yol açmaktadır. Yüksek sıcaklıkta, atıktaki kükürt, oksijenle birleşerek kükürt dioksiti oluşturur. Kükürt dioksit, bir birincil kirleticidir ve solunum problemlerine sebep olduğu gibi eşyaların korozyon sonucu zarar görmesine de yol açar. Ancak kükürt, aynı zamanda ikincil bir kirletici de olabilir. Bu durum, ortamda su buharı ve oksijenin olması durumunda kükürt dioksitin, kükürt trioksite yükseltgenmesi ile gerçekleşir. Kükürt trioksit daha sonra suda çözünerek sülfürik asidi oluşturur. Sülfürik asit, klorlu bileşiklerin reaksiyonu sonucu oluşan hidroklorik asit ve azot oksitlerden oluşan nitrik asit ile birlikte asit yağmurlarını oluşturur (Öztürk ve diğ., 2015).

Dioksin: Atığın tam yanması gerçekleşmemişse ve proses iyi yönetilmemişse istenmeyen yan ürünler ortaya çıkabilmektedir. Bunlardan en çok bilineni dioksinlerdir. Dioksinler, çevrede yayılı durumda bulunmaktadır; giren atığın içerisinde yer almaktadırlar; güç santrallerinden orman yangınlarına, mangal kullanımına kadar her türlü yanma olayında eser miktarlarda oluşmaktadırlar. Yakmanın 3T kuralı atık içerisindeki dioksinin parçalanmasını sağlamak, aynı zamanda yanma bölgesinden ayrılan gazda yeniden dioksin oluşumunu engellemeye çalışmak içindir. Yanma gazlarının kritik sıcaklık aralığındaki bekleme sürelerinin azalması, uçucu kütle temasının sınırlanması dioksinin yeniden oluşmasına neden olabilmektedir (UNEP, 2002). Yasal düzenlemelere göre izin verilen dioksin seviyesi oldukça düşüktür; yanma sürecinin dikkatli kontrolünün yanı sıra ileri düzeyde gaz temizleme prosedürlerinin uygulanması gerekli olmaktadır. Baca gazlarının aktif karbon içerisinden geçirilmesi bu amaca yönelik uygulamalardan biridir. Aktif karbon filtresi civa kontrolünde de etkilidir.

Dioksinler gibi furanlar da, genellikle yanma prosesleri sonucunda oluşan, hem gaz hem de partikül halde olabilen, düşük konsantrasyonlarda bile toksik olan kirleticilerdir. Poliklorlu dibenzodioksin (PCDD) ve Poliklorlu dibenzofuran (PCDF) C, H, O ve Cl içeren renksiz, kokusuz aromatik bileşiklerdir.



Dioksinler



Furanlar

Şekil 18. Dioksin ve furanın Kimyasal Yapısı

Yakma tesislerinde dioksin/furan emisyonlarının oluşumu, döner fırın ve ikinci yanma odasında tam yanma koşullarının (yüksek sıcaklık, yeterli kalma süresi, türbülans) sağlanmasına ve soğuk bölgede uygun baca gazı kontrol sistemlerinin işletilmesine bağlıdır. Atığın yanma bölgesinde yeterli sürede kalması için, döner fırın ve ikinci yanma odasının doğru olarak tasarlanması gerekmektedir. Özellikle modern teknoloji ile işletilen yakma tesislerinde, sıcak bölgede bu bileşiklerin oluşumu kontrol edilebilmekte, oluşabilecek kirleticiler de ileri baca gazı kontrol sistemlerinin (aktif karbon enjeksiyon sistemi, aktif karbon reaktörü gibi) işletilmesiyle baca gazından uzaklaştırılabilmektedir. Plastik ve metallerin kaynağında ayrılması, atıkların yakma tesisine gelmeden önce geri dönüşüm ünitelerinden geçirilerek metal ve plastiklerin ayrılması (evsel atık yakma tesisleri için) ile dioksin/furan oluşumu minimize edilebilmektedir (Güneş ve Ertürk, 2009).

Adsorban enjeksiyon yönteminin, kullanımının kolay olması, giderim veriminin yüksek olması ve maliyetinin düşük olması nedeniyle diğer yöntemlere göre daha avantajlı olduğu belirtilmektedir (Güneş ve Ertürk, 2009). Bu proseste önemli olan optimum adsorban dozunun belirlenmesidir. Aşırı adsorban kullanımının giderim verimine etkisi olmadığı gibi, torbalı filtrede basınç kaybının artmasına neden olduğu bilinmektedir. Artan basınç kaybı, torbalı filtre üzerinde iğne deliği olarak adlandırılan deliklerin artmasına ve partiküllerin filtreden sızmasına neden olmaktadır. Bu nedenle partikül üzerinde adsorbe olmuş dioksin/furan bileşiklerinin giderim verimi düşmektedir. Aynı zamanda artan basınç kaybı ile torbalı filtrelerin temizlenme periyodu sıklaşacağından, filtre malzemesi zarar görmekte ve enerji tüketimi artmaktadır (Güneş ve Ertürk, 2009).

### 3.6. Hava Kirleticilerinin Kontrolü

Yakma tesislerinde yaygın olarak kullanılan hava kirliliği kontrol üniteleri Tablo 6'te verilmektedir. Genellikle bu ünitelerin birkaçı seri şekilde kullanılmaktadır. En yaygın sıralamalardan biri gaz soğutma ve şartlandırmadan sonra, partikül madde için yüksek enerjili venturi sıyırıcı, asit gaz giderimi için de adsorpsiyon kulesidir (Oppelt, 1987).

Tablo 6. Yakma tesislerinde yaygın olarak kullanılan hava kirliliği kontrol üniteleri

Kirletici	Hava Kirliliği Kontrol Ünitesi
<b>Partikül Madde</b>	Siklonlar
	Torba Filtreler
	Elektrostatik Çöktürücüler
	Islak Yıkayıcılar
<b>Gazlar</b>	Termal yakma
	Islak Yıkayıcılar
	Seçici Katalitik İndirgeme
	Adsorpsiyon Kuleleri

### 3.6.1. Emisyon Standartları

Ülkemizde yakma tesislerinin sağlaması gereken emisyon sınır değerleri Atıkların Yakılması Yönetmeliği'nde (YakYön, 2010) belirtilmektedir. Buna göre yakma tesisleri, yönetmelikte belirtilen hava emisyonu limit değerlerini (Tablo 7) aşmayacak şekilde tasarlanmalı, donatılmalı, inşa edilmeli ve işletilmelidir.

Yönetmeliğe göre azot oksitler (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO), toplam toz, toplam organik karbon (TOK), hidroklorik asit (HCl), hidrojen florür (HF), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) gibi kirleticiler sürekli ölçüm cihazı ile belirlenmelidir. Ağır metal, dioksin ve furan konsantrasyonlarının periyodik ölçümleri her yıl iki kez yapılmak zorundadır (YakYön, 2010).

Tablo 7. Baca gazı emisyon sınır değerleri (günlük ortalama değerler)

Parametre	Emisyon Sınır Değeri
Toplam toz (partikül madde)	10 mg/m <sup>3</sup>
Gaz ve buhar halindeki organik maddeler (toplam organik karbon)	10 mg/m <sup>3</sup>
Hidrojen klorür (HCl)	10 mg/m <sup>3</sup>
Hidrojen florür (HF)	1 mg/m <sup>3</sup>
Kükürt dioksit (SO <sub>2</sub> )	50 mg/m <sup>3</sup>
Azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO <sub>2</sub> )	200 mg/m <sup>3</sup>

Yakılan atıkların tür ve miktarlarına (tesisin kapasitesine) bağlı olmaksızın, baca gazından çıkan dioksin ve furanların konsantrasyonları  $0,1 \text{ ng/Nm}^3$  TE (toksikite eşdeğeri) sınır değerini aşmamalıdır (YakYön, 2010). Ağır metal konsantrasyonları  $0,05 \text{ mg/Nm}^3$  sınır değerini aşmamalıdır. Yanma gazlarında karbon monoksit (CO) konsantrasyonları için günlük ortalama emisyon limit değerleri  $50 \text{ miligram/m}^3$  düzeyindedir (YakYön, 2010). Yönetmelikte emisyon sınır değerleri günlük ortalama, yarım saatlik ortalama, asgari 30 dakika ve azami 8 saatlik bir örnekleme süresi boyunca ortalama değerler olarak verilmektedir.

### 3.6.2. Emisyon Kontrol Üniteleri

Baca gazı arıtma teknolojileri en genel haliyle 3 gruba ayrılmaktadır: temel (minimum), orta ve ileri düzey. Temel düzeydeki üniteler, sadece partikül madde kontrolünü içermektedir. Partikül madde giderimi sürecinde, elektrostatik çöktürücüler ve torba filtreler kullanılmaktadır. Baca gazındaki bazı tehlikeli kirleticiler de partikül maddelere tutunarak ortamdan uzaklaşmış olmaktadır. Partikül madde giderimine ilave olarak uygulanan kuru veya ıslak gaz yıkayıcılar orta düzeydeki arıtıma örnektir. İleri düzeydeki baca gazı arıtma sistemleri, orta düzeyde kontrol sistemine ek olarak  $\text{NO}_x$ , Sb, Co, Tr, V ve dioksin giderimini içermektedir (Öztürk ve diğ., 2015) (Tablo 8).

Tablo 8. Emisyon Kontrol Seviyeleri (Öztürk ve diğ., 2015)

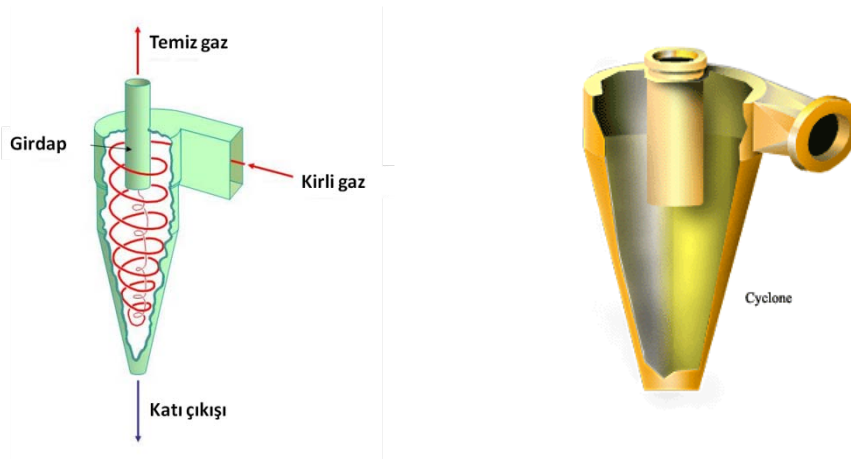
Emisyon kontrol seviyesi	Kontrol edilen parametreler
<b>Temel</b>	Partikül giderimi ( $\text{PM} < 30 \text{ mg/Nm}^3$ )
<b>Orta seviye</b>	Partikül giderimine ilave olarak HCl, HF, $\text{SO}_2$ ve ağır metallerin giderimi
<b>İleri seviye</b>	Partikül madde, HCl, HF, $\text{SO}_2$ ve ağır metaller ilave olarak $\text{NO}_x$ , Sb, Co, Tl, V ve dioksin giderimi

#### 2.6.3.1. Partikül Madde Kontrolü

##### *Çökeltme Odaları (Siklonlar)*

Partikül maddelerin kontrolünde kullanılan en basit üniteler çökeltme odalarıdır. Siklon olarak da adlandırılmaktadırlar. Siklona gelen kirli hava, merkezi konik silindire çevreden teğet olarak gönderilir. Koni içerisinde şiddetli bir girdap oluşur ve bu sayede ağır maddeler, merkezkaç kuvvetlerin etkisinde silindirin cidarlarına gelerek, çarpmanın etkisiyle yavaşlarlar ve konik kısma doğru kayarak siklonun dip kısmından dışarı atılırlar (Vallero, 2008).



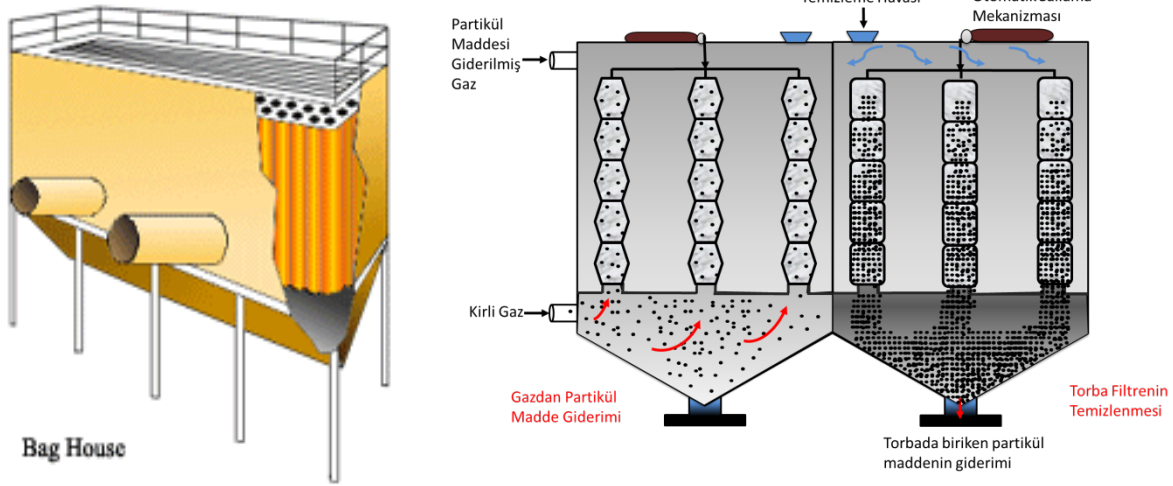


Şekil 19. Çökeltme odası (siklon) genel görünümü

Siklonlar küçük partikül maddelerin (çapı  $<5 \mu$ ) giderilmesinde çok etkin olmadıklarından, diğer partikül madde giderici ekipmanlarla birlikte kullanılmalıdır (Öztürk ve diğ., 2015). Düşük yatırım maliyeti, bütün işletme koşullarında kullanılabilme, çeşitli malzemelerden üretilme imkanı ve hareketli parçası olmadığı için düşük bakım maliyeti siklonların avantajları arasındadır. Küçük partikül madde gideriminde düşük verim, yapışkan maddeleri giderememe ve yüksek basınç kaybına neden olmaları siklonların dezavantajları arasındadır.

### **Torba Filtreler**

Partikül maddelerin gideriminde kullanılan bir başka ünite torba filtrelerdir. Partikül madde, torba filtre içerisinde biriktirilir ve belli aralıklarla temizlenir. Torba filtrelerde, filtre malzemesinin gözenek çapından büyük partiküller tutulmaktadır. Bu üniteler genelde 16-20 cm çapında seri halinde filtrelerden oluşmaktadır. Yüksek ısıya dayanıklı fiberglas malzemeler yaygın kullanılmaktadır. Tutulan partiküllerin filtre gözeneklerini tıkayabileceği unutulmamalıdır. Torba filtreler su tahribatına ve korozyona karşı hassastırlar. Asit gazların önceden temizlendiği kuru gaz akımları için daha uygundur. Bu nedenle genelde asit giderimi yapan spreylendirme-kurutucu adsorpsiyon sistemleriyle birlikte kullanılırlar. Şekil 20'de torba filtreler şematize edilmektedir.

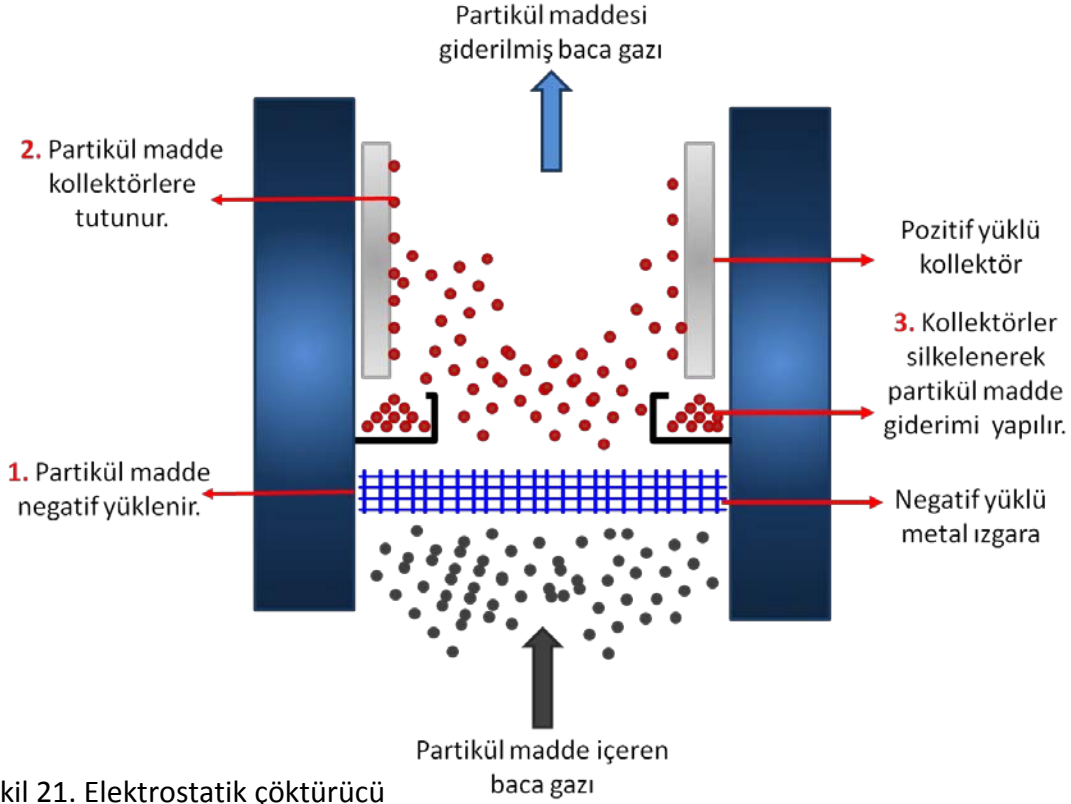


Şekil 20. Torba filtreler

Torba filtrelerdeki basınç düşüşünün izlenmesi önemlidir. Torbaların delik olmadığından ve filtre tozlarının zeminde biriktiğinden emin olmak gereklidir. Yüksek giderim verimi, çeşitli gaz debilerinde işletilme imkanı, modüler tasarım seçeneği ve yerinde inşa edilebilir olması torba filtrelerin avantajları arasındadır. Geniş alan gereksinimi, filtre kumaşların yüksek sıcaklıklarda tahrip olması ve korozif gazları taşıyamaması, nemli gaz akımlarına karşı yüksek hassasiyetleri, potansiyel bir yangın tehlikesi sunmaları bu ünitelerin dezavantajları arasındadır. Torba filtre tasarımında basınç düşüşü, hava-kumaş oranı, toz tutma verimi, kumaş cinsi, temizleme mekanizması, sıcaklık kontrolü, torbaların yerleştirilme sıklığı, alan ve maliyet gibi faktörler değerlendirilmelidir (Vallero, 2008).

### **Elektrostatik Çöktürücü**

Bu ünite, yüklü elektrotlar ince kablolar halinde üniteye giren kirli gazın yolu üzerine yerleştirilirler. Yüklü elektrotlar, güçlü bir elektriksel alan oluşturur ve bu alan içerisinde geçen partikülleri yüklemiş olurlar. Kirli gaz akımı içerisindeki partikül madde, elektrotların oluşturduğu bu elektriksel alandan geçtiğinde negatif yüklü hale gelmektedir. Yüklü partiküller, pozitif yüklü kollektör tabakalara yönlendirilerek kollektör tabakalar üzerinde biriktirilirler. Kollektör tabakalar zaman zaman silkenerek veya yıkanarak partiküllerden arındırılırlar. Yüksek verimde çalıştırılabilmeleri, gaz akımı üzerinde değil de partiküller üzerinde etkili oldukları için düşük düzeydeki basınç kayıpları, yüksek kapasiteleri, yüksek sıcaklıklarda işletilebilmeleri, düşük işletme maliyetleri elektrostatik çöktürücülerin avantajları arasındadır. İlk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu, farklı işletme şartları için tasarlanabilmelerine rağmen, bir kez kurulduktan sonra işletme koşullarındaki değişikliklere karşı esnek olmayışları, direnci yüksek partikülleri tutamamaları bu ünitelerin dezavantajları arasındadır (Vallero, 2008). Şekil 21'de elektrostatik çöktürücü şematize edilmektedir. Şekil 22'de bir tehlikeli atık yakma tesisinde kullanılan elektrostatik çöktürücü fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 21. Elektrostatik çöktürücü



Şekil 22. Tehlikeli atık yakma tesisinde kullanılan bir elektrostatik çöktürücü (İZAYDAŞ örneği)

### **Islak Yıkayıcı**

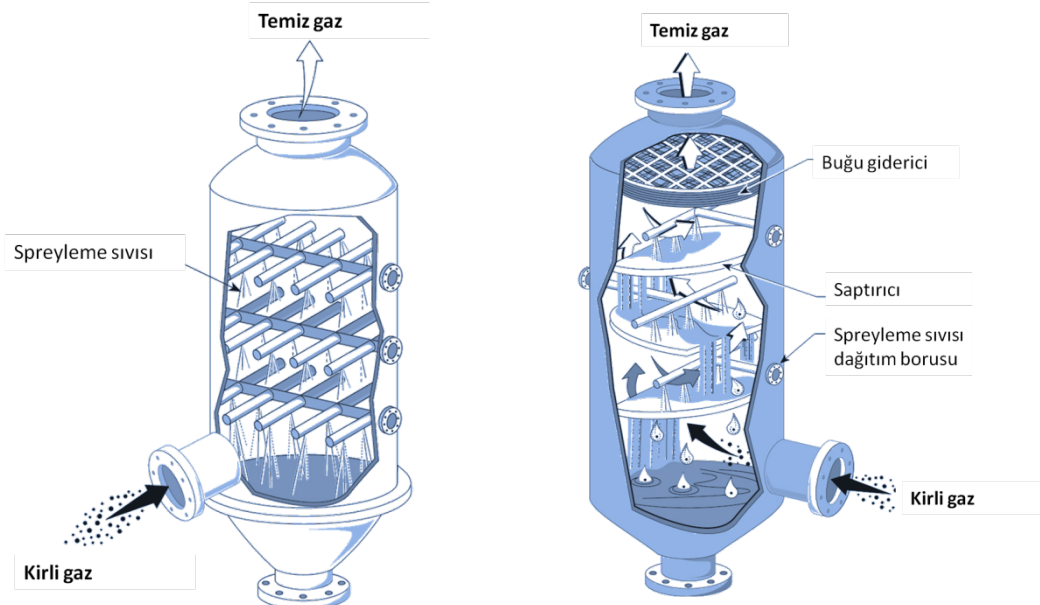
Partikül madde gideriminde tercih edilen bir başka ünite de ıslak sıyırıcıdır. Bu ünite de partikül madde giderimi yanında gaz fazdaki bazı kirleticilerin giderimi de yapılabilmektedir. Islak yıkayıcılarda, gelen gaz/partikül akımı üzerine sıvı damlacıklar spreylenecektir. Sıvı damlacıklar

partikülleri bünyelerine almakta ve oluşan atıksu arıtma tesisine yönlendirilmektedir. Islak yıkayıcı, nozulların yer aldığı dikdörtgen veya dairesel bir odadan oluşmaktadır. Nozullar gelen gaz akımı üzerine sıvı damlacıklar spreyledikleri için tıkanmamaları önemlidir. Damlacıklar, partikül maddelerle temas ederler ve onları sorplarlar. Bu nedenle damlacık boyutlarının optimize edilmesi gereklidir. Damlacıklar küçüldükçe daha iyi bir giderim sağlanmaktadır, ancak bu durumda onları temizlenen gazdan ayırmak daha da zor olmaktadır. Kirlenen atıksu içerisindeki partiküller çöktürülerek ayrıldıktan sonra sıvı sisteme geri devrettirilebilmektedir (Vallero, 2008).

Islak yıkayıcıların avantajları:

- Yüksek sıcaklıklardaki gaz akımlarına dayanıklıdır. Sıcaklık kontrol ekipmanına ayrıca ihtiyaç duyulmaz.
- Yüksek partikül yüklerine yanıt verebilirler.
- Yüklemedeki salınımlar giderim verimini etkilemez.
- Patlayıcı gazlara düşük bir riskle dayanabilirler.
- Aynı ünite içerisinde hem gaz adsorpsiyonu hem de partikül toplama işlemi gerçekleştirilebilmektedir.
- Korozyif gaz ve tozlar nötralize edilebilmektedir.

Korozyif maddelerden kaynaklanabilecek tahribatın ilave bakım maliyeti getirmesi ve atıksu problemi sunması bu ünitelerin dezavantajları arasındadır (Vallero, 2008). Şekil 23'te iki farklı tipte ıslak sıyırıcı şematize edilmiştir.

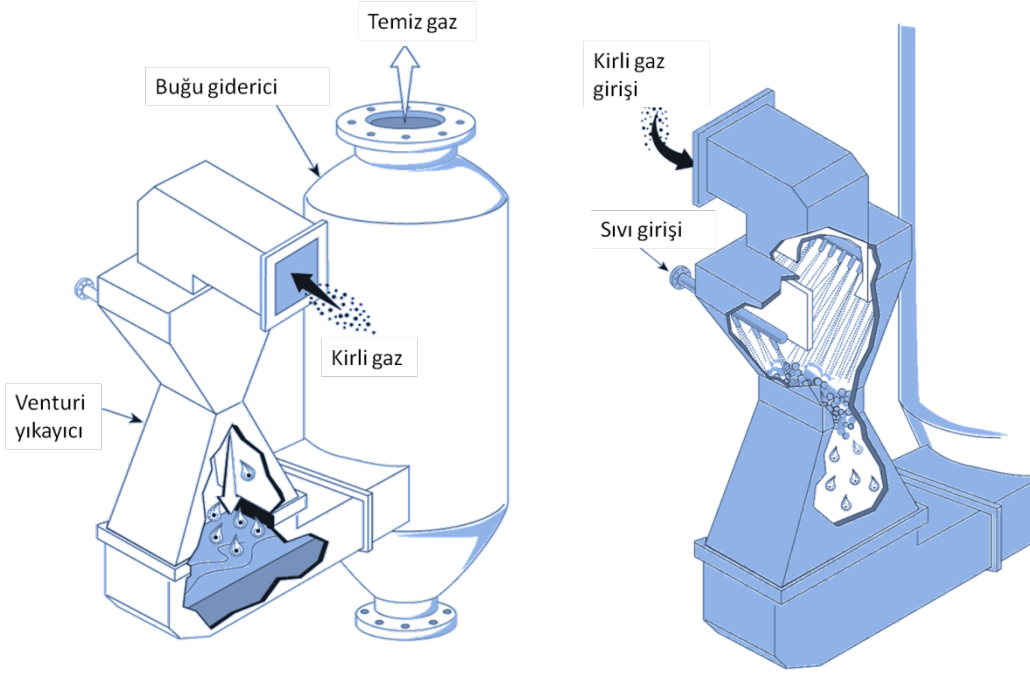


Şekil 23. Farklı tiplerde ıslak sıyırıcılar

### **Venturi Yıkayıcı**

Venturi yıkayıcı ıslak sıyırıcıların bir başka tipidir. Yıkayıcının dar kesitli bir boğaz bölümü ve gazın giriş hızı bu üniteye arıtma verimini artırmaktadır. Kirli gaz, yüksek giriş hızlarıyla arıtma

odasına verilir. Venturi yıkayıcının iç boğazında düşük basınçtaki sıvı, gaz akımına püskürtülür. Yüksek gaz hızıyla bu su atomize edilir. Sıvı damlacıklar, gaz içerisindeki partiküllerle birleşir. Su ve partiküller daha sonra giderilmek için çökelirler. Daralan boğazın sağladığı yüksek gaz hızı, birim zamandaki damlacık-partikül madde buluşmasını artıracak için bu ünitelerin verimi yüksek olmaktadır. Venturinin daralan boğazındaki basınç düşmesi yüksektir (Vallero, 2008). Venturi yıkayıcının buğu gidericisi genellikle siklonik ayırıcı adı verilen ayrı bir ünite dir. Şekil 24'te venturi yıkayıcı şematize edilmektedir.



Şekil 24. Venturi yıkayıcı

Baca gazı içerisindeki ağır metaller genellikle partikül maddelerle birlikte giderilmektedir. Ancak cıva buhar fazda kalmaktadır.

### 2.6.3.2. Gaz Fazındaki Kirleticilerin Kontrolü

Gaz fazındaki kirleticiler, termal yöntemler, bir sıvı içerisine absorpsiyon (ıslak yıkayıcılar), katı bir yüzeye adsorpsiyon ve seçici katalitik indirgeme gibi yöntemlerle daha az kirletici olan veya kirletici olmayan bir gaza dönüşüm yoluyla kontrol edilmektedir (Vallero, 2008).

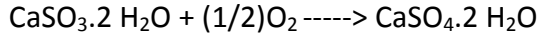
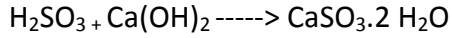
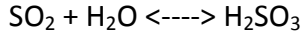
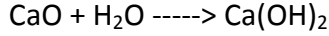
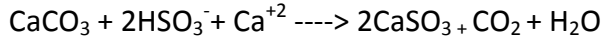
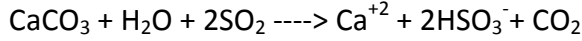
#### **Termal Yöntemler**

Organik gaz emisyonlarının kontrolünde en yaygın kullanılan sistem yanabilir bileşenlerin oksidasyon yoluyla su ve karbondioksit'e dönüştürülmeleridir. Tehlikeli atık yakma fırınlarında bu genellikle ikinci yanma odasında yüksek sıcaklık, hava ve ilave yakıt sağlanarak gerçekleştirilmektedir.

## Absorpsiyon Üniteleri

Kirletici gazların absorpsiyonu, ıslak yıkayıcıda veya dolgu kulede seçici bir sıvı kullanılarak sağlanmaktadır. Absorpsiyon yoluyla kontrol edilen kirletici gazlar genelde kükürtdioksit, hidrojen sülfür, hidrojen klorür, klor, amonyak, azotoksitler ve kaynama noktası düşük olan hidrokarbonlardır. Yıkama sıvısı, giderilmek istenen gaza göre belirlenmelidir. Yıkama sıvısındaki gaz çözünürlüğünün yüksek olması sıvı sarfiyatının sınırlı tutulmasını sağlayacaktır. Spesifik bir gazı gidermek için suyun asit veya bazla muamele edilmesiyle istenen yıkama sıvısı hazırlanabilmektedir.

Kükürtdioksit suda çok az, ancak alkali bir çözeltide iyi derecede çözündüğü için yıkama çözeltilerinin alkali olması sağlanır. Kükürt giderimi için (desülfürizasyon) ıslak yıkayıcıda kireçli karışım püskürtülerek absorpsiyon sağlanmaktadır. Bu süreçte aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir:



Klor, hidrojen klorür, hidrojen florür gibi gazlar suda iyi derecede çözündükleri için suyla yıkama etkili olmaktadır. Bu tür asit gazlar alkali bir çözeltiyle (kireç, NaOH, amonyak vb.) nötrale edilir. Gaz absorbe oldukça, su buharlaşır ve geride kuru bir atık toz bırakır. Bu şekilde kurumuş toz, üniteyi takip eden partikül giderim sistemiyle (torba filtre veya elektrostatik çöktürücü) uzaklaştırılır.

İZAYDAŞ yakma tesisinde atık gazların temizlenmesi için Venturi yıkayıcı kullanılmaktadır. Elektrostatik çöktürücüden çıkan baca gazı, ıslak yıkama sisteminin ilk aşaması olan venturi yıkayıcısına girer. Yıkayıcıda atık gazın asidik karakterinden dolayı sisteme % 10'luk kireç çözeltisi beslenmektedir. Su sirkülasyonu ile işletilen ekipmanda halojenli bileşikler ve ağır metallerin de absorbe edildiği belirtilmektedir. Venturi yıkayıcısında sirkülasyonun ani kesilmesi durumunda ekipmanı sıcaklığa karşı koruma amaçlı kurulmuş bir adet 10 m<sup>3</sup>'lük su tankı ve iki adet püskürtme nozulünden oluşan acil su sistemi bulunmaktadır.

Venturi yıkayıcısından çıkan baca gazı, kireç püskürtmeli yıkayıcıya girmektedir. Ekipmanda, % 10'luk kireç sütü beslemesi yapılarak sirkülasyon sıvısı pH'nın 5,5-6 civarında tutulması sağlanarak atık gaz içindeki SO<sub>2</sub>'nin giderimi yapılmaktadır. Üniteden çıkan gaz, damlacık tutuculardan geçerek yıkayıcıyı terk etmektedir. Yıkama çözeltisi sürekli olarak hidrosiklona



gönderilmekte ve kirlilik yükü istenen değerden yüksek olduğunda fiziksel ve kimyasal atık su arıtma ünitesine yönlendirilerek yıkama çözeltilsinin yenilenmesi sağlanmaktadır. Şekil 25'te İZAYDAŞ yakma tesisi asit gazları için uygulanan Venturi yıkayıcı ve kireç püskürtmeli yıkayıcı sistemlerin genel görünümü verilmektedir.

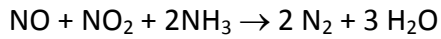


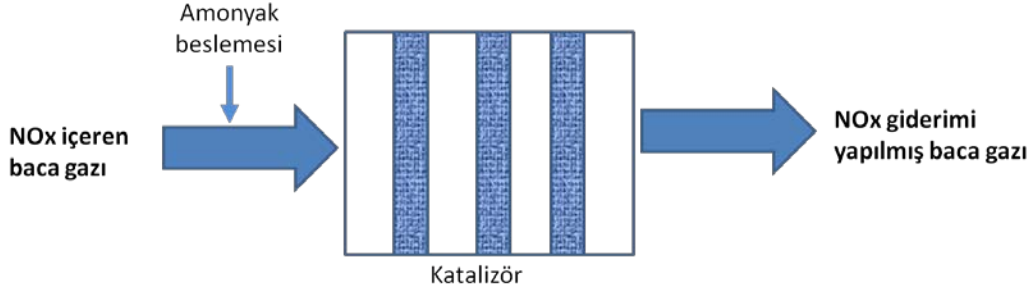
Şekil 25. İZAYDAŞ yakma tesisi Venturi yıkayıcısı ve kireç püskürtmeli yıkayıcısının genel görünümü

### ***Seçici Katalitik İndirgeme***

Azotoksitlerin giderimi için uygulanan yöntemlerden biri amonyak enjeksiyonuyla seçici katalitik indirgeme yöntemidir. Hava-amonyak karışımı kirli gaz üzerine enjekte edilerek katalizör üzerinden geçirilir. Amonyak ve azot reaksiyona girerek su ve N<sub>2</sub> oluşturur. Bu üniteler genellikle asit gaz ve partikül madde gideriminden sonra konur. Katalizörün fonksiyonu açısından etkin işletim sıcaklığı 130-400°C aralığındadır. Bu nedenle bu üniteler sıcaklık düşmesinin olmadığı elektrostatik çöktürücülerden sonra tercih edilirlerse tekrar ısıtma ihtiyacı ortadan kalkmaktadır.

Azotoksit ve havanın reaksiyona girmesi sonucu aşağıdaki reaksiyon uyarınca azot gazı ve su oluşmaktadır. Bu şekilde baca gazı temizlenmektedir. Şekil 26'da seçici katalitik indirgeme yöntemi şematize edilmektedir. Gerçekleşen reaksiyon aşağıdaki gibidir:

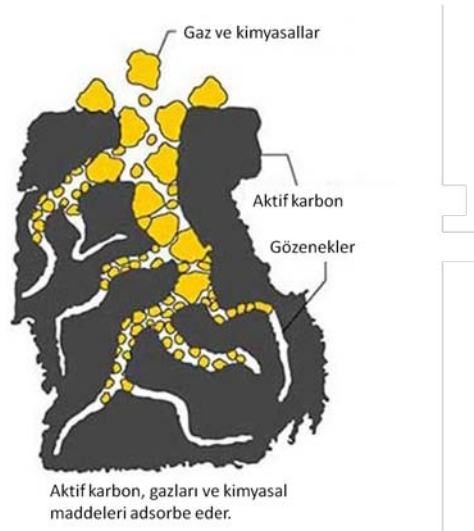




Şekil 26. Azotoksit giderim sistemi: seçici katalitik indirgeme

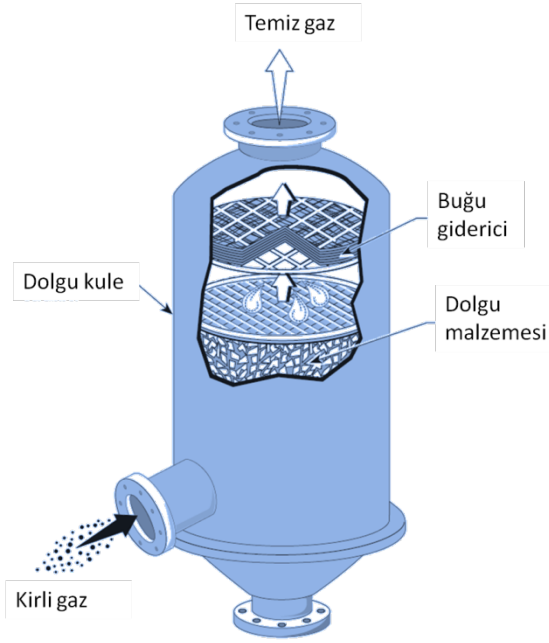
### Adsorpsiyon Üniteleri

Kirletici gazların bazıları adsorban olarak hazırlanan aktif karbon vb. katıların gözeneklerinde tutulduğunda adsorpsiyon olayı gerçekleşir (Şekil 27). Proses sadece moleküler kuvvetlerin egemen olduğu yüzeysel bir olay şeklinde gerçekleşebileceği gibi, gaz ve adsorban teması esnasında kimyasal bir reaksiyonun gerçekleşmesiyle kemisorpsiyona da dönüşebilmektedir.



Şekil 27. Aktif karbon gözeneklerinde gaz moleküllerinin tutunması

Adsorban olarak kullanılan katı maddeler çok gözenekli, yüksek yüzey/hacim oranı olan malzemelerden seçilmektedir. Aktif karbon, alüminyum oksit ve silika jel gazların tutulması için yaygın olarak kullanılan adsorban malzemelerin başlıcalarıdır. Örneğin aktif karbon, kokulu olabilecek hafif hidrokarbon moleküllerinin gideriminde çok etkilidir. Polar bir malzeme olan silika jel ise polar gazların tutulmasında işlevseldir. Su buharı giderimindeki etkinliği iyi bilinmektedir. Seçilen katı adsorbanların bir dolgu kule içerisinde tutulması yapısal olarak mümkün olmalıdır; parçalanması, rejenerasyonu ve gaz molekülleriyle doymun hale geldikten sonra tekrar kullanılabilmeleri mümkün olmalıdır. Şekil 28'de adsorpsiyon olayının gerçekleştiği bir dolgu kule görülmektedir.



Şekil 28. Adsorpsiyonun gerçekleştiği dolgu kule

Adsorpsiyon sadece dolgu kulelerde değil, enjeksiyon yoluyla da gerçekleştirilebilmektedir. Kirli gaz torba filtre veya elektrostatik çöktürücü ünitelerine gelmeden önce, aktif karbon enjeksiyonu yapılır. Bu sayede aktif karbona tutunan kirleticiler, aktif karbonla birlikte bir sonraki üniteye partikül madde olarak tutulabilmektedir. Dioksinler ve furanlar gibi kirleticileri gidermek için en etkili yöntem aktif karbon adsorpsiyonudur.

İZAYDAŞ yakma tesisinde elektrostatik filtre ve yıkayıcılardan geçen baca gazı ,son aşama olarak dioxin ve furan kontrol ünitesinden geçmektedir. Bu üniteye aktif karbon püskürtülerek adsorpsiyon sağlanmaktadır. Şekil 29'da İZAYDAŞ yakma tesisinde kullanılan dioksin ve furan kontrol ünitesi görülmektedir.



Şekil 29. İZAYDAŞ yakma tesisi dioksin ve furan kontrol ünitesi

Bu aşamadan geçen gazlar baca gazı analizi yapılarak bacadan deşarj edilmektedir. Şekil 30 ve Şekil 31'de sırasıyla İZAYDAŞ yakma tesisi kontrol odası ve bacaya ait fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 30. Yakma tesisi kontrol odası (İZAYDAŞ örneği)



Şekil 31. Yakma tesisi bacası (İZAYDAŞ örneği)



### 3.6.3. İzleme

Uygun işletme koşullarının sağlanarak emisyonların yasal sınır değerlerin altında deşarj edildiğinden emin olmak amacıyla belirli parametrelerin sürekli izlenmesi gerekmektedir. İzleme ve raporlamayla ilgili şartlar genellikle lisans almanın ön şartı olarak sunulmaktadır. Ancak ölçümler esnasında bazı zorlukların ortaya çıkabileceği unutulmamalıdır (Vallero, 2008):

- Ölçümü yapan ekipman hatalı olabilmektedir.
- Örnekleme esnasında hatalar yapılabilmektedir. Analizi yapılan örnek, ortaya çıkan bütün gaz hacmi düşünülüğünde çok küçük kalmaktadır. Örnek bütün baca gazını temsil edici olmayabilmektedir.
- Standart sapma ve hata payı oldukça yüksek seviyelere çıkabilmektedir.

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (YakYön, 2010), izleme ile ilgili şartları aşağıdaki gibi belirlemiştir:

- Yakma veya beraber yakma işleminde parametrelerin, koşulların ve kütle konsantrasyonlarının izlenebilmesi amacıyla, uygun ölçüm sistemi kurulur ve uygun teknikler kullanılır.
- Ölçüm şartları, deneme yakması sonuçlarına göre Bakanlıkça verilen lisansta belirtilir.
- Atıkların yakılması sonucunda havaya, suya verilen emisyon ve kirletici parametreler için sürekli izleme sistemi kurulur ve işletilmesi, yıllık gözetim testleri ile denetlenir. Söz konusu sistemin kalibrasyonu, TS EN 14181 Sabit Kaynak Emisyonları-Otomatik Ölçüm Sistemlerinin Kalite Güvencesi standardına göre yapılır.
- Örnekleme veya ölçüm noktaları, akredite olmuş ölçüm kuruluşlarınca deneme yakması aşamasında belirlenir.
- Hava veya suya verilen kirletici parametrelerin periyodik ölçümleri, yönetmelik eklerine uygun olarak yürütülür.
- Lisans alan tesisler, lisans aldıkları tarihten itibaren, tesise kabul edilen atık türü, miktarı, kimden alındığı, kullanım miktarı, bakiye atık oluşuyor ise bertaraf amacıyla nereye verileceği gibi bilgileri içeren kütle denge tablosu ve atık temin edilen kişi veya kuruluştan alınan atığa ilişkin Bakanlıktan yetki almış laboratuvarlarca yapılan analiz sonuçları ile ulusal atık taşıma formlarını ve faturaları aylık olarak Bakanlığa gönderirler.
- Yakma ve beraber yakma tesisi, baca gazı ve atık su emisyon değerlerinin Bakanlık ve gerektiğinde kamuoyu tarafından izlenmesini teminen gerekli sistemi kurar (YakYön, 2010).



Şekil 32. İZAYDAŞ yakma tesisi baca gazı ölçüm cihazı

#### 4. BERABER YAKMA TESİSLERİ

Tehlikeli atıklar, amacı atık yakma olmayan ancak ürününü üretirken yüksek sıcaklıklarda fırın işleten tesislerde de lisans almak kaydıyla yakılabilmektedir. Atıkların yakılmasına ilişkin mevzuat atıkları ek yakıt olarak kullanan tesisleri beraber yakma tesisi olarak anmakta ve aşağıdaki gibi tanımlamaktadır:

“**Beraber yakma tesisi:** Ana gayesi enerji üretimi veya ürün imal etmek olan, atıkları alternatif veya ek yakıt olarak kullanan veya atığı termal olarak bertaraf eden, atık kabul ünitesi, geçici depolama birimi, ön işlem ünitesi, atık besleme ve hava ikmal sistemleri, kazan, baca gazı arıtım üniteleri, yakma sonucu oluşan kalıntıların geçici depolama ve atıksuların arıtılması için tesis içinde yer alan üniteler, baca, yakma işlemlerini kontrol etmek, yakma şartlarını kaydetmek, izlemek için kullanılan ölçüm cihazları ve sistemler de dahil olmak üzere, beraber yakma tesisinde yer alan bütün üniteleri kapsayan her türlü tesis (ancak beraber yakma işlemi ürün veya enerji üretimi değil de atıkların termal olarak bertarafını hedefliyorsa yakma tesisi olarak kabul edilir)” (YakYön, 2010).

Ülkemizde atıkların ek yakıt olarak kullanılması bir tebliğle düzenlenmiştir. Tebliğe göre aşağıdaki atıklar ek yakıt olarak kullanılabilir (ATY, 2014):

1. Kullanılmış lastikler
2. I. ve II. kategori atık yağlar (Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliğine (AYK, 2008) göre)
3. Boya çamurları
4. Solventler
5. Plastik atıklar
6. Bakanlık tarafından uygun görülecek diğer atıklar



Ülkemizde beraber yakma tesisi denilince daha çok çimento fırınları akla gelmektedir. Çimento fırınları, tıpkı tehlikeli atık yakma fırınlarında olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda işletilmektedir, ancak asıl amaçları atık yakmak değil çimento üretmektir. Şekil 33'te çimento üretim tesislerinde kullanılan bir döner fırın örneği ve Şekil 34'te çimento döner fırınına beslenen atık lastikler görülmektedir.



Şekil 33. Çimento üretim tesisi döner fırını genel görünümü



Şekil 34. Kullanılmış lastiklerin çimento fırınının orta noktasından beslenmesi

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (YakYön, 2010) gereği, beraber yakma tesisleri, atığın beraber yakılmasından kaynaklanan gazın en elverişsiz koşullarda bile kontrollü ve homojen bir şekilde en az iki saniye için 850 °C sıcaklığa yükselmesine müsaade edecek şekilde tasarlanır, donatılır, inşa edilir ve işletilir. İçeriğinde %1'den fazla halojenli organik maddeler bulunan tehlikeli atıklar beraber yakılırsa, sıcaklığın 1100 °C'ye yükseltilmesi zorunludur. Yakma ve beraber yakma tesisleri, bu işletme koşulları sağlanmadığında ve herhangi bir kirletici parametrenin emisyon limit değerinin aşıldığının belirlenmesi durumunda, atık beslemesini engelleyecek bir otomatik sisteme sahip olmalıdır.

Beraber yakma tesisleri, baca gazı emisyonları, yönetmelikte belirlenen emisyon limit değerlerini aşmayacak şekilde tasarlanmalı, donatılmalı, inşa edilmeli ve işletilmelidir. Bir tesis, ortaya çıkan yakıt anma ısıl güç değerinin %40 veya daha azını atıktan sağlıyorsa "beraber yakma tesisi" olarak, yakıt anma ısıl güç değerinin %40'dan fazlasını atıktan karşılıyor ise, "yakma tesisi" olarak değerlendirilir. Şekil 35'te bir beraber yakma tesisinde ek yakıt olarak kullanılmak üzere kalorifik değeri dengelenerek hazırlanmış, atıktan türetilmiş yakıt örneği görülmektedir.

Beraber yakma tesislerinde aşağıdaki parametrelerin sürekli ölçümleri yapılmalıdır (YakYön, 2010):

- Toplam toz
- Karbon monoksit (CO)
- NOx
- Hidrojen Florür (HF)
- Hidrojen Klorür (HCl)
- Toplam Organik Karbon (TOC)
- Kükürt dioksit (SO2)
- Oksijen, basınç ve sıcaklık

Bunun dışında, ağır metaller yılda en az iki kez, dioksin ve furan ise yılda 1 kez ölçülmelidir.



Şekil 35. Ek yakıt olarak kullanılmak üzere hazırlanmış atıktan türetilmiş yakıt

## Özet ve Değerlendirme

Tehlikeli atık yönetiminde yaygın olarak kullanılan teknolojilerden biri "Yakma" dır. Atıkların yakılması esnasında enerji üretimi yapılıyorsa, atık yakma, yönetmelikte bir geri kazanım işlemi olarak tanımlanmaktadır. Yakma yöntemiyle atıklar kül, baca gazı ve ısıya dönüştürülmektedir. Kül, genellikle atık içerisinde yer alan inorganik maddelerden ve baca gazıyla birlikte taşınan partikül maddelerden kaynaklanmaktadır. Oluşan baca gazlarının atmosfere salınmadan önce partikül ve gaz formundaki kirleticilerden temizlenmesi gerekmektedir. Yakma işlemi sırasında oluşan ısı, elektrik enerjisi elde etmek amacıyla kullanılabilir.

Yanma, yanıcı maddenin ısı yardımı ile oksijenle birleşmesi sonucu ortaya çıkan kimyasal oksitlenme olayıdır. Yanmanın iyi bir şekilde gerçekleşmesi için türbülans, sıcaklık, zaman (TSZ Kuralı) şartlarının sağlanmış olması gerekmektedir. Tam yanma için tutuşma sıcaklığının üstüne çıkılması, yanan elementlerin hava ile temasının iyi olması ve yanmanın tamamlanması için gerekli zamanın geçmesi gerekmektedir.

Madde içerisindeki hidrokarbonun yeterli miktardaki oksijenle tepkimeye girerek karbondioksit ( $CO_2$ ) ve su ( $H_2O$ ) oluşturması durumuna tam yanma denilmektedir. Bu sırada yakıt hava içerisinde tamamen yanmakta, içerisindeki tüm karbonlar karbondioksite, tüm hidrojenler su moleküllerine dönüşmektedirler. Hidrokarbonun yetersiz havayla reaksiyona girerek karbonmonoksit ( $CO$ ) ve su ( $H_2O$ ) oluşturmasına ise eksik yanma denilmektedir.

Bir yakıtın birim kütlelerinin tam yanmasıyla açığa çıkardığı ısı enerjisine ısıl değer denilmektedir. Atığın ısıl değeri, yakma sistemleriyle yönetme seçeneği değerlendirilirken göz önünde bulundurulması gereken en önemli özelliklerinden biridir. Organik atıkların ısıl değerleri, yanmayı sürdürmeye yetecek düzeyde olmadığına, ilave yakıt ihtiyacı doğmaktadır.

Isıl işlemlerin, atık yönetiminde kabul edilebilir yöntemler olması için, iyi tasarlanmış, iyi işletilen ve kontrol edilen, iyi yanmanın sağlandığı ve baca gazı arıtımının etkin bir şekilde gerçekleştirildiği sistemlere ihtiyaç bulunmaktadır. Tehlikeli atıkların yakılması için yaygın olarak kullanılan sistemler ise akışkan yataklı fırınlar ve döner fırınlardır.

Döner fırın içeren yakma tesislerinde atık, iç kısmı yanmaya dayanıklı ateş tuğlaları (refrakter tuğlalar) ile döşenmiş olan çelikten yapılmış döner bir hazne içerisinde yakılır. Bu fırınlar çeşitli atıkların yakılabilmesine imkan verir (arıtma çamurları, atık yağlar, fiçılar vb.). Akışkan yataklı fırınlarda, kum veya alüminyum oksit içeren ve akışkan halde tutulan bir yanma odası bulunmaktadır. Atık, askıda tutulan kum yatağı üzerine beslenmektedir. Gözenekli bir yüzey üzerine döşenmiş bir kum yatağı, alttan sağlanan hava akışıyla hareketlendirilerek akışkan hale getirilmektedir.

Yakma sistemlerinden kaynaklanan atıklar, katı, sıvı veya gaz fazda olabilmektedirler. Baca gazları, cüruf, kül, baca gazı arıtma sisteminden kaynaklanan kalıntılar ve atıksular bu atıkları oluşturmaktadırlar.

Baca gazları içerisinde partikül madde (ağır metaller içeren), karbonmonoksit, kükürtdioksit ve azotoksit, hidroklorik asit, hidroflorik asit, dioksin, furan, poliaromatik hidrokarbon (PAH) gibi kirleticiler bulunabilmektedir.

Partikül madde halindeki kirleticiler, siklonlar, torba filtreler, elektrostatik filtreler ve ıslak yıkayıcılar yardımıyla tutulabilmektedir. Gaz fazındaki kirleticiler, termal yöntemler, bir sıvı içerisine absorpsiyon (ıslak yıkayıcılar), katı bir yüzeye adsorpsiyon gibi yöntemlerle tutulabilmekte, seçici katalitik indirgeme gibi yöntemlerle daha az kirletici olan veya kirletici olmayan bir gaza dönüştürülebilmektedir.

Tehlikeli atıklar, amacı atık yakma olmayan ancak ürününü üretirken yüksek sıcaklıklarda fırın işleten tesislerde de lisans almak kaydıyla yakılabilmektedir. Atıkların yakılmasına ilişkin mevzuat atıkları ek yakıt olarak kullanan tesisleri beraber yakma tesisi olarak tanımlamaktadır (YakYön, 2010).

Ülkemizde beraber yakma tesisi denilince daha çok çimento fırınları akla gelmektedir. Çimento fırınları, tıpkı tehlikeli atık yakma fırınlarında olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda işletilmektedir.

Tehlikeli atıkların yakılması oldukça karmaşık süreçlerdir. Yakma tesisleri uygun tasarlanıp işletilmediklerinde çevre ve insan sağlığı için tehdit oluşturabilmektedirler. Tehlikeli atık yakan beraber yakma tesislerinin de aynı tehdidi oluşturduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle bu tür tesislerde hem işletme şartlarının kontrolü hem de oluşan katı, sıvı ve gaz atıkların kabul edilebilir düzeye gelinceye kadar arıtımı son derece önemlidir. Baca gazlarının arıtımı için kurulan sistemin başlangıçta sunacağı arıtma veriminin ilerleyen zamanlarda sürdürülemeyeceği açıktır. Bu nedenle bu ünitelerin devamlı bakım ve kontrolünün yapılması hayati önem taşımaktadır. Zaman içerisinde ünitelerde meydana gelebilecek tahribat, arıtma verimini doğrudan etkileyecektir. Sürekli ölçüm sistemi ile ancak bazı parametrelerin ölçümü yapılabilmektedir. Ancak dioksin, furan ve ağır metaller gibi tehlikeli kirleticilerin izlenmesi için yılda sadece 2 analizin zorunlu tutulması, diğer zamanlar için bir belirsizlik durumu getirmektedir. Yakma tesislerinin çevresel etkileri düşünüldüğünde, sadece yakmanın gerçekleştiği üniteler değil sistemi oluşturan tüm bileşenler birlikte düşünülmelidir. Tehlikeli atıkları taşıyan araçların izledikleri güzergah da düşünülmesi gerekenler arasındadır. Bu nedenle yakma tesislerinin yerleşim alanlarından mümkün olduğunca uzak bölgelere inşa edilmeleri, yetişmiş personel tarafından işletilmeleri ve personelin eğitiminin sürekliliği önemlidir.



## Kaynaklar

- ATY, 2014. ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT, EK YAKIT VE ALTERNATİF HAMMADDE TEBLİĞİ. Resmi Gazete Tarih/ Sayı: 20.06.2014 / 29036.
- AYK, 2008. ATIK YAĞLARIN KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ. Resmi Gazete Tarih/ Sayı: 30.06.2008 / 26952.
- AYY, 2015. ATIK YÖNETİMİ YÖNETMELİĞİ. Resmi Gazete Tarih/ Sayı: 2.4.2015 / 29314.
- ETKB, 2017. Bazı Yakıtların Isıl Değerleri www.eie.gov.tr , Erişim Tarihi: 17.4.2017.
- Güneş, G., Ertürk, F., 2009. İZAYDAŞ Tehlikeli Atık Yakma Tesisi ve İSTAÇ Tıbbi Atık Yakma Tesisinde Dioksin/Furan Oluşumunun ve Gideriminin İncelenmesi. Ekoloji 18 Dergisi 70, 67-73.
- Hulgaard, T., Vehlow, J., 2011. Incineration: Process and Technology in Solid Waste Technology & Management, Edited by Christensen, T.H. Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-17517-3, 1022 p.
- IBRD, 1999. Municipal Solid Waste Incineration, WORLD BANK TECHNICAL GUIDANCE REPORT. The International Bank for Reconstruction and Development / THE WORLD BANK, Washington, D.C., U.S.A.
- LaGrega, M.D., L.Buckingham, P., C.Evans, J., 2001. Hazardous Waste Management
- Merrild, H., Christensen, T.H., 2010. Introduction to Waste Economics. Solid Waste Technology & Management, Edited by Thomas H. Christensen 1, 1001.
- Oppelt, E.T., 1987. Incineration of Hazardous-Waste - a Critical-Review. Japca J Air Waste Ma 37, 558-586.
- Öztürk, İ., Arıkan, O., Altınbaş, M., Alp, K., Güven, H., 2015. Katı Atık Geri Dönüşüm ve Arıtma Teknolojileri. Türkiye Belediyeler Birliği.
- Pichtel, J., 2014. Waste Management Practices: Municipal, Hazardous and Industrial, Second Edition. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton.
- Saft, R.J., 2007. Life cycle assessment of a pyrolysis/gasification plant for hazardous paint waste. Int J Life Cycle Ass 12, 230-238.
- Shah, J.K., Schultz, T.J., Daiga, V.R., 1989. Pyrolysis Processes. in Standard Handbook of of Hazardous Treatment and Disposal, Editor: Harry M. Freeman McGraw-Hill, USA.
- SKHKY, 2009. SANAYİ KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ. Resmi Gazete Tarihi: 03.07.2009, Resmi Gazete Sayısı: 27277.
- SKKY, 2004. SU KİRLİLİĞİ KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ. Resmi Gazete Tarihi: 31.12.2004 Resmi Gazete Sayısı: 25687.
- TCCŞB, 2009. Çevresel Etki Değerlendirmesi Sektörel Rehberi-Atık Bertaraf Tesisleri. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- TCCŞB, 2017. Tehlikeli Atık İstatistikleri Bülteni (2015). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, ÇED,İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, Çevre Envanteri ve Bilgi Yönetimi Dairesi Başkanlığı, 06.01.2017 6.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F., 2002. Handbook of Solid Waste Management
- TehMadSÇ, 2005. Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği (76/464/AB), 26/11/2005 tarihli ve 26005 sayılı Resmî Gazete.
- ToprakY, 2010. Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 8/6/2010 tarihli ve 27605 sayılı Resmî Gazete.

UNEP, 2002. Training Resource Pack for Hazardous Waste Management in Developing Economies, Chapter 6.5:Thermal Treatment. United Nations Environment Programme, UNEP, Erathprint.

Vallero, D.A., 2008. Fundamentals of Air Pollution, fourth edition. Elsevier, USA ISBN 978-0-12-373615-4 967 p.

YakYön, 2010. Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik. Resmi Gazete Tarih/ Sayı: 06.10.2010 / 27721.



## Konu Sonu Soruları ve Çözüm Setleri

### 1. Tehlikeli atıklarda yakma sürecinin istenen verimde gerçekleşmesi için hangi parametreler kontrol edilmelidir?

#### Yanıt

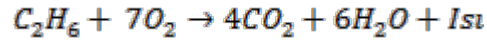
Yanmanın iyi bir şekilde gerçekleşmesi için türbülans, sıcaklık, zaman (3T kuralı) şartlarının sağlanmış olması gerekmektedir.

### 2. Organik maddelerin ve metallerin tam yanması sonucu oluşacak ürünler nelerdir?

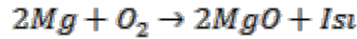
#### Yanıt

Madde içerisindeki organik maddenin yeterli miktardaki oksijenle tepkimeye girerek tam yanması durumunda son ürün karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve su (H<sub>2</sub>O) olacaktır.

Organik maddeye örnek olarak etanın yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir:



Atıkla birlikte gelen metaller yanma ortamında parçalanmamakta, sadece oksitlenmekte, yanma sürecinden metaloksit olarak çıkmaktadırlar. Magnezyum metalinin yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir:



### 3. Piroliz nedir? Piroliz ve gazifikasyon arasında nasıl bir fark bulunur?

#### Yanıt

Piroliz, oksijen yokluğunda yapılan ısıtma sonucu ortaya çıkan kimyasal değişim veya parçalanma olarak tanımlanmaktadır. Parçalayıcı damıtma adı da verilmektedir. Piroliz prosesinde organik maddeler ısıtma yoluyla parçalanmakta ve gaz faza geçirilmektedir. Pirolizdeki havasız ve oksijensiz ortam yerine, teorik hava ihtiyacının altında eksik havayla yapılan piroliz benzeri uygulamaya ise gazifikasyon adı verilmektedir.

### 4. Isıl değer nedir? Atığın ısı değeri neden önemlidir?

#### Yanıt

Bir yakıtın birim kütlesinin tam yanmasıyla açığa çıkardığı ısı enerjisine ısı değeri denilmektedir. Atığın ısı değeri, yakma sistemleriyle yönetme seçeneği değerlendirilirken göz önünde bulundurulması gereken en önemli özelliklerinden biridir. Organik atıkların ısı değerleri, yanmayı sürdürmeye yetecek düzeyde olmadığında, ilave yakıt ihtiyacı doğmaktadır. Bu nedenle atığın ısı değerini bilmek önemlidir.

### 5. Tehlikeli atıkların yakılmasında ızgaralı fırın sistemleri neden tercih edilmemektedir?

#### Yanıt

Izgaralı fırınlarda atıklar ızgaralar üzerine beslenmektedir. Izgaralar üzerinden sıvı, çamur formundaki atıkların beslenmesi mümkün olmamaktadır. Tehlikeli atıklar çok farklı fiziksel formlarda olabileceği için, ızgaralı fırınlar daha çok evsel atıkların yakılmasında tercih edilmektedir.

## **6. Döner fırın tipini esas alan yakma tesislerinde ikinci yanma odasına neden ihtiyaç duyulmaktadır?**

### **Yanıt**

Döner fırının birinci fonksiyonu katı atıkları gazlara dönüştürmektir. Gaz fazındaki yanma reaksiyonların tamamlanması için bir ikinci yanma odası gerekmektedir. İkinci yanma odasına döner fırında yanarak gaz haline gelmiş atıklar taşınmaktadır. Özellikle organik gaz emisyonlarının kontrolünde yüksek sıcaklıklar (1100-1200°C) su ve karbondioksit dönüşümü için gerekli olmaktadır. Bu şartlar ikinci yanma odasında yüksek sıcaklık, hava ve ilave yakıt sağlanarak gerçekleştirilebilmektedir.

## **7. Akışkan yataklı fırın tipi ismini nereden almaktadır?**

### **Yanıt**

Bu yakma fırınında kum veya alüminyum oksit içeren ve akışkan halde tutulan bir yanma odası bulunmaktadır. Atık askıda tutulan kum yatağı üzerine beslenmektedir. Gözenekli bir yüzey üzerine döşenmiş bir kum yatağı, alttan sağlanan hava akışıyla hareketlendirilerek akışkan hale getirildiği için bu fırın tipi akışkan yataklı fırın olarak anılmaktadır.

## **8. Yakma sistemlerinden kaynaklanan atıklar nelerdir?**

### **Yanıt**

Yakma sistemlerinden kaynaklanan atıklar katı, sıvı veya gaz fazda olabilmektedirler. Katı fazdaki atıklar: cüruf/dip külü, uçucu kül, kazan külü; sıvı fazdaki atıklar: baca gazı arıtma sisteminden kaynaklanan atıksular; gaz fazdaki atıklar: partikül madde ve gaz kirleticiler içeren baca gazı olarak karşımıza çıkmaktadır.

## **9. Yakma tesislerinde yaygın olarak kullanılan hava kirliliği kontrol üniteleri nelerdir?**

### **Yanıt**

Partikül madde kontrolü için, siklonlar, torba filtreler, elektrostatik çöktürücüler, ıslak yıkayıcılar; gaz fazındaki kirleticiler için, termal yakma, ıslak yıkayıcılar, seçici katalitik indirgeme ve adsorpsiyon kuleleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

## **10. Beraber yakma tesisleri ne tür tesisleri tanımlamak için kullanılan bir ifadedir?**

Beraber yakma tesisi, ana gayesi enerji üretimi veya ürün imal etmek olan, atıkları alternatif veya ek yakıt olarak kullanan veya atığı termal olarak bertaraf eden tesisler için kullanılan bir ifadedir. Bir tesis, ortaya çıkan yakıt anma ısı güç değerinin %40 veya daha azını atıktan sağlıyorsa beraber yakma tesisi olarak, yakıt anma ısı güç değerinin %40'dan fazlasını atıktan karşılıyorsa ise, "yakma tesisi" olarak değerlendirilir.

## Test

1. Aşağıdakilerden hangisi ortamda bulunmaması tehlikeli atıkların yanmasına engel olmayacaktır?
  - a) Ek yakıt
  - b) Oksijen
  - c) Organik madde
  - d) Sıcaklık
  
2. Aşağıdakilerden hangisi organik maddelerin tam yanması sonrasında oluşacak son ürünlerden biri değildir?
  - a) Karbondioksit
  - b) Metaloksit bileşenler
  - c) Su buharı
  - d) Isı
  
3. Aşağıdakilerden hangisi piroliz için doğru değildir?
  - a) Parçalayıcı damıtma olarak da ifade edilmektedir.
  - b) Ekzotermik bir reaksiyondur.
  - c) Oksijen yokluğunda gerçekleşir.
  - d) Reaksiyon esnasında kimyasal bir değişim gerçekleşmektedir.
  
4. Aşağıdakilerden hangisi kalorifik değer için doğru bir ifadedir?
  - a) Bir atığın birim kütlesinin yanmasıyla ortamda oluşan sıcaklık farkı olarak tanımlanabilir.
  - b) Alt ısı değer ve üst ısı değer toplamı kalorifik değeri verecektir.
  - c) Bir yakıtın birim kütlesinin tam yanmasıyla açığa çıkardığı ısı enerjisine ısı değer denir.
  - d) Organik atıkların ısı değerleri yakıtların ısı değerine eşit düzeydedir.
  
5. Aşağıdaki yakma fırını tiplerinden hangisi tüm formlardaki tehlikeli atıklar için uygundur?
  - a) Akışkan yataklı fırın
  - b) Sıvı enjeksiyon fırını
  - c) Döner fırın
  - d) Izgaralı fırın
  
6. Aşağıdaki ifadelerden hangisi döner fırınlar için geçerli değildir?
  - a) İç kısmı yanmaya dayanıklı ateş tuğlaları ile döşenmiştir.
  - b) Fırın içerisinde dönen bir karıştırıcı yardımıyla atığın türbülansı sağlanmaktadır.
  - c) Bu fırın kullanıldığında, gaz fazındaki yanma reaksiyonların tamamlanması için bir ikinci yanma odası gerekmektedir.

d) Döner fırında ek yakıt ateşleme sistemi bulunmaktadır.

**7. Aşağıdaki ifadelerden hangisi akışkan yataklı fırınlar için geçerli değildir?**

- a) Bu yakma fırınında atık askıda tutulan kum yatağı üzerine beslenmektedir.
- b) Yakma fırınının iç kısmı yanmaya dayanıklı ateş tuğlaları ile döşenmiştir.
- c) Akışkan yatak üzerinde her türlü tehlikeli atığın yakılması mümkündür.
- d) Akışkan yatak fırınlarında yanmanın gerçekleşebilmesi için ilave havaya ihtiyaç duyulmaktadır.

**8. Aşağıdaki ifadelerden hangisi tipik bir yakma tesisinden çıkan atıklar için doğru değildir?**

- a) Tehlikeli atık içerisinde bulunan ağır metalleri uçucu kül içerisinde bulmak mümkündür.
- b) Yakma sisteminden çıkmayacak tek atık türü atıksudur.
- c) Uçucu kül terimi, baca gazı esaslı çok küçük boyuttaki partikül maddeler için kullanılmaktadır.
- d) Yakma sistemlerinden kaynaklanan üç katı atık, dip külü veya cüruf, uçucu kül, hava kirliliği kontrol sistemi kalıntıları olarak sıralanabilir.

**9. Aşağıdaki kirleticilerden hangisi torba filtreler yardımıyla giderilebilecek kirleticilerden değildir?**

- a) Ağır metaller
- b) Partikül maddeler
- c) Dioksinler
- d) Küller

**10. Aşağıdaki yöntemlerden hangisi bir gaz kirletici giderim yöntemi değildir?**

- a) Elektrostatik çöktürücü
- b) Islak yıkayıcı
- c) Adsorpsiyon kulesi
- d) Aktif karbon spreyleme