

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ATY KULLANIMI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayça ÖZEL

Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği

Programı : Çevre Bilimleri ve Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ATY KULLANIMI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayça ÖZEL

(501081703)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 6 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kadir ALP (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erdem GÖRGÜN (İTÜ)

Prof. Dr. Ayşen ERDİNÇLER (BÜ)

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Çimento sektörü, kullandığı fosil kaynakların tükenebilir olması ve enerji temininin gittikçe maliyetli bir hale gelmesi nedeni ile enerjiyi sürdürülebilir ve verimli kullanabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir.

Dünyada çimento sanayinin kullanmakta olduğu yakıt türlerinden biri olan atıklardan türetilmiş yakıtlar (ATY), Avrupa ülkelerinin bir kısmının 1990 yıllarından bu yana kullanmakta olduğu yakıtlardır. Böylece, gerçekleştirilmiş olan bu atık yönetimi sayesinde katı atık depolama alanlarındaki büyüme sınırlandırılmış, aynı zamanda da depolama için yeni bir alan kurulma ihtiyacı ortadan kalkabilmiştir.

Bu amaçla, bu çalışmada, ATY'nin tanımı yapılarak, kalite standartlarını belirlemeye ve Türkiye'de yapılan çalışmalarla bu yakıtların üretim tekniklerini inceleyerek, çimento sektöründe bu yakıtların kullanılmasının çevreye ve son ürün olan betona etkisinin araştırılmasına çalışılmıştır.

Yüksek Lisans tez çalışmama başladığım ilk günden beri, sistem içerisinde çalışmalarımızı düzenli yürütmemizi sağlayan değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Kadir ALP'e, birlikte çalıştığımız süre boyunca tüm deneyimi ile yanımda olup benden yardımlarını esirgemeyen Çimsa Çimento Alternatif Yakıt ve Alternatif Hammadde Müdürü Sayın İsmail BOZ'a, öğrettikleri her kelime ve tüm destekleri için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca kararlarımda beni her zaman özgür bırakan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok sevgili aileme; aşıladıkları güven duygusu ve sonsuz sevgi için babam Şerif ÖZEL ve annem Meral ÖZEL'e, göstermiş olduğu ilgi ve yardımlardan ötürü biricik kardeşim Arda ÖZEL'e, benimle beraber yürüdükleri için teşekkür ederim.

Her zaman, desteğini, sabrını ve sevgisini esirgemeyen Burak BİRERDİNÇ'e, moral ve motivasyona her ihtiyacım olduğunda yanımda olan değerli arkadaşım Tunca ÖZAKYOL'a kalpten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2011

Ayça ÖZEL

Çevre Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
2. ATY TANIMI, STANDARTLARI, ÜRETİM TEKNİKLERİ, TESİS MALİYETLERİ, TÜRKİYE’DE ÜRETİM POTANSİYELİ, DÜNYADAKİ UYGULAMALAR	3
2.1 Atıklardan Türetilmiş Yakıtların (ATY) Tanımı	3
2.2 Ülkelere Göre ATY Tanımları	4
2.3 ATY’yi Oluşturan Atıklar ve Kalite Standartları.....	6
2.4 ATY Üretimi	11
2.4.1 Katı atık yakıt hazırlama teknikleri.....	12
2.4.1.1 Niteliklerine göre derecelendirme (ayıklama)	13
2.4.1.2 Demirli metallerin ayrılması	14
2.4.1.3 Demir dışı metallerin ayrılması	16
2.4.1.4 Döner tambur elekler.....	17
2.4.1.5 Bitişik kızılötesi spektroskopisi	18
2.4.1.6 Otomatik toplama ve ayırma.....	19
2.4.1.7 Kurutma	19
2.4.1.8 Granül haline getirme.....	20
2.5 ATY Tesisi Kurulum Maliyetleri.....	21
2.5.1 Karışık evsel katı atıktan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri	21
2.5.2 Evsel atık içermeyen karışık ve nemli atıklardan ATY üretimi ve bu tesiste kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri	22
2.5.3 Evsel atık içermeyen karışık atıklardan ATY üretimi (kurutma işlemi gerektirmeyen) ve bu tesiste kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri	24
2.5.4 Tek tip atıktan ATY üretimi (kurutma işlemi gerektirmeyen) ve bu tesiste kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri	25
2.5.5 ATY üretim hatları yaklaşık işletme giderleri	26
2.6 Atıktan Türetilmiş Yakıtların Türkiye’deki Üretim Potansiyeli.....	27
2.7 Dünyada Atık Yönetimi ve Atıktan Türetilmiş Yakıtların Durumu	32
3. ÇİMENTO ÜRETİMİ VE TÜRKİYE’DE ÇİMENTO SEKTÖRÜ	37
3.1 Çimento Üretimi	39
3.1.1 Ocaktan hammadde temini ve kırma.....	40

3.1.1.1 Ocak işletmesi	41
3.1.2 Hammadde homojenizasyon	42
3.1.3 Hammadde öğütme	43
3.1.4 Pişirme.....	45
3.1.5 Klinker öğütme.....	49
3.1.5.1 Çimento katkı maddeleri	49
3.1.6 Paketleme ve sevkiyat	50
3.2 Çimento Üretiminde Oluşan Emisyonlar ve Kontrol Teknikleri	50
3.2.1 Azot oksit emisyonları	52
3.2.1.1 Azot oksit emisyonları kontrol teknikleri.....	54
Alev soğutma.....	54
Düşük NO _x brülörü kullanmak.....	54
Aşamalı yanma	55
Fırın ortasından ateşleme	55
Mineralize klinker kullanımı	55
SNCR (Selective Non Catalitic Reaction) teknolojisi.....	56
3.2.2 Karbonmonoksit emisyonları	56
3.2.3 Kükürt oksit emisyonları.....	56
3.2.3.1 Kükürt oksit emisyonları kontrol teknikleri	58
Absorban eki	58
Kuru yıkayıcılar.....	59
Islak yıkayıcılar	59
Aktif karbon kullanımı	59
3.2.4 Toz emisyonları.....	59
3.2.4.1 Toz emisyonları kontrol teknikleri.....	60
Elektrostatik çöktürücüler	61
Torbali filtreler	61
3.2.4.2 Kaçak tozun azaltılması	62
3.2.5 Toplam organik karbon ve uçucu organik bileşik emisyonları	63
3.2.6 Poliklorlu Dibenzo Dioksin ve Dibenzo Furan Emisyonları	63
3.2.7 Ağır metaller ve bileşikleri.....	64
3.3 Türkiye’de Çimento Sektörü.....	65
3.3.1 Türkiye’deki genel durum.....	65
3.3.2 Sektörün dış ticareti.....	67
3.3.3 Sektör maliyet kalemleri	67
4. ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATIK KULLANIMI	69
4.1 Çimento Sektöründe İklim Değişikliği	75
5. ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATY KULLANIMININ ETKİLERİ.....	79
5.1 ATY Kabul Kriterleri	81
5.2 ATY Besleme Noktaları.....	83
5.3 ATY Kullanımının Potansiyel Etkileri.....	86
5.3.1 ATY kullanımı sırasında ağır metaller salımları.....	91
5.3.2 Çimento prosesinde ATY kullanımı sonucunda klorun ısıl davranışı	99
5.4 ATY Kullanımının Çimento ve Beton Üzerine Etkileri.....	105
5.4.1 Çimento ve beton içeriğindeki ağır metallerin araştırılması	106
5.4.1.1. Ağır metallerin çimento içerisine giriş yolları	114
5.5 Risk Değerlendirme.....	117
6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	121
KAYNAKLAR.....	127
ÖZGEÇMİŞ.....	131

KISALTMALAR

ATY	: Atıktan Türetilmiş Yakıt
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
HCl	: Hidroklorik Asit
HF	: Hidroflorik Asit
KKA	: Kentsel Katı Atıklar
MBT	: Mekanik ve Biyolojik Aıtma Tesisleri
NCV	: Net Kalorifik Değer
MSW	: Evsel Atıklar
NO_x	: Azot Oksitler
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Araç Lastikleri
PCDD	: Dibenzo-p-dioksin
PCDF	: Dibenzo-furan
RDF	: Refused Derived Fuel
SO_x	: Kükürt Oksitler
SRF	: Katı atıktan geri kazanılmış yakıt
TÇBM	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Katı atıklardan geri kazanılmış yakıtlar için kalite standartları.	6
Çizelge 2.2 : Çimento tesislerinde kullanılan geri kazanılmış yakıtlar için şartname. 7	7
Çizelge 2.3 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf I.	9
Çizelge 2.4 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf II.	9
Çizelge 2.5 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf III.	9
Çizelge 2.6 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf IV.	10
Çizelge 2.7 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf V.	10
Çizelge 2.8 : Çimento tesislerinde kullanılan geri kazanılmış yakıt içerikleri.	10
Çizelge 2.9 : Karışık evsel katı atıktan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.	22
Çizelge 2.10 : Evsel atık içermeyen karışık ve nemli atıklardan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.	23
Çizelge 2.11 : Evsel atık içermeyen karışık atıklardan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.	24
Çizelge 2.12 : Tek tip atıktan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.	25
Çizelge 2.13 : ATY tesisi işletme verileri.	26
Çizelge 2.14 : ATY tesisi gelir gider analizi.	26
Çizelge 2.15 : Tesis ünitelerindeki oniki aylık atık profili ortalamaları.	28
Çizelge 2.16 : Çimento üretimi yapılan illerimizdeki atık miktarları.	31
Çizelge 2.17 : Avrupa’da çimento endüstrisinde kullanılan ATY miktarları.	36
Çizelge 3.1 : NO _x emisyonunu azaltma teknikleri.	54
Çizelge 3.2 : SO ₂ emisyonlarını azaltıcı teknikler.	58
Çizelge 3.3 : Toz emisyonu kontrol teknikleri.	60
Çizelge 3.4 : Türk çimento sektörü üretim ve tüketim miktarları.	66
Çizelge 3.5 : Bölgelere göre tesis dağılımları.	67
Çizelge 3.6 : Çimento sektörü maliyet kalemleri.	68
Çizelge 4.1 : Türkiye’de çimento sektöründe 2008 yılında kullanılan atık miktarları.	71
Çizelge 4.2 : Türkiye’de çimento sektöründe 2009 yılında kullanılan atık miktarları.	71
Çizelge 4.3 : Çimento şirketleri PCDD/PCDF Ölçümleri ng I-TEQ/m ³	74
Çizelge 4.4 : Türkiye’de çimento sektörü için verilen emisyon limit değerleri.	75
Çizelge 4.5 : Klinker üretiminde oluşabilecek yaklaşık karbondioksit miktarları. ...	76
Çizelge 5.1 : ATY için ülkelerdeki talep ortalamaları.	82
Çizelge 5.2 : Çimento fırınlarında kullanılabilir ATY’nin besleme noktasına göre kalite parametreleri.	85
Çizelge 5.3 : PASi yakıtı kullanıldığında oluşan HCl emisyonları.	88
Çizelge 5.4 : PASi yakıtı kullanıldığında ağır metal emisyonları.	88
Çizelge 5.5 : PASi yakıt uygulandığında toz emisyonları.	89

Çizelge 5.6 : PASi ve PASr kullanımı sırasında klinkere ait ağır metal içeriği.	90
Çizelge 5.7 : Eysel arıtma çamurları ile kömürün birlikte yakılması durumunda kirletici-salım değerleri.....	93
Çizelge 5.8 : ATY'nin çimento fırınlarında birlikte yakılması durumunda ATY içindeki kirleticilerin atık gaz akımına aktarılma faktörleri.	94
Çizelge 5.9 : ATY ve çimento üretiminde kullanılan yakıtların bileşenleri.	96
Çizelge 5.10 : Geleneksel ve alternatif yakıtlar arasında ağır metal konsantrasyonlarının karşılaştırılması.	97
Çizelge 5.11 : Çimento fırınına farklı yakıtların beslenmesine bağlı olarak değişen ağır metal emisyonları.	98
Çizelge 5.12 : CRDF'in elementel bileşim analizi.	101
Çizelge 5.13 : CRDF'in yanması ve pirolizi sonucunda oluşan organik klor türleri	104
Çizelge 5.14 : Hesaplanan eser elementlerin literatür ile karşılaştırılması.	107
Çizelge 5.15 : 'Toplam' ve 'Mevcut' eser element konsantrasyonları bağıntısı.	109
Çizelge 5.16 : Çimentoların ağır metallerin içerikleri.	110
Çizelge 5.17 : Betonlardan sızma testi ağır metal konsantrasyonu (64 gün).....	110
Çizelge 5.18 : Betonlardan sızma testi ağır metal konsantrasyonu (64 gün / pH=4'lü sıvı ortamı).....	111
Çizelge 5.19 : Kırılmış betonlardaki ağır metal konsantrasyonları.	113
Çizelge 5.20 : Çalışmada kullanılan sınıflar ve malzemeler.	114
Çizelge 5.21 : Eser elementlerin kategorileri ve tanımlamaları.....	115
Çizelge 5.22 : Portland Çimentosu içeriğinde bulunan eser elementler ve çimentoya giriş şekilleri.	116
Çizelge 5.23 : Değişik senaryolar için risk karakterizasyonu.....	119

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Katı atıklardan ATY üretim şeması.....	12
Şekil 2.2 : Döner tambur elekler.....	17
Şekil 2.3 : Karışık evsel katı atıktan ATY üretim tesisi genel akım şeması.....	21
Şekil 2.4 : Evsel atık içermeyen karışık ve nemli atıklardan ATY üretim tesisi genel akım şeması.....	23
Şekil 2.5 : Evsel atık içermeyen karışık atıklardan ATY üretim tesisi genel akım şeması.....	24
Şekil 2.6 : Tek tip atıktan ATY üretimi.....	25
Şekil 2.7 : İBB İSTAÇ kompost ve geri kazanım tesisi diyagramı.....	27
Şekil 2.8 : KAAP projesi atık kompozisyonu belirleme çalışması sonucu.....	29
Şekil 2.9 : Türkiye’deki çimento fabrikaları haritası.....	30
Şekil 3.1 : Çimento üretimi şeması.....	40
Şekil 3.2 : Konkasöre sevk.....	42
Şekil 3.3 : Örnek bir homojenizasyon sistemi.....	43
Şekil 3.4 : Hammadde öğütme prensibi.....	45
Şekil 3.5 : Bir çimento fabrikası fırın grubu çalışma prensibi.....	46
Şekil 4.1 : Birlikte işlemenin CO ₂ emisyonu azaltımına katkısı.....	77
Şekil 5.1 : Çimento üretiminde sıcaklık ve kalma süreleri.....	83
Şekil 5.2 : Muhtemel atık besleme noktaları.....	84
Şekil 5.3 : CRDF ürünü görünümü.....	100
Şekil 5.4 : CRDF’in yanması işlemine ait klor salınım oranı.....	101
Şekil 5.5 : CRDF’in piroliz işlemine ait klor salınım oranı.....	102
Şekil 5.6 : CEM I (damıtılmış su (d.w.) ve deniz suyu (s.w.)) ağır metal konsantrasyonları.....	112
Şekil 5.7 : CEM II (damıtılmış su (d.w.) ve deniz suyu (s.w.)) ağır metal konsantrasyonları.....	112
Şekil 5.8 : Kategori II; Portland Çimentosu içeriğindeki antimonun bireysel giriş yolları için göreceli payları.....	115
Şekil 5.9 : Kategori I; Portland Çimentosu içeriğindeki çinko bireysel giriş yolları için göreceli payları.....	116

ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ATY KULLANIMI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

ÖZET

Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY), evsel, endüstriyel ve tehlikeli atıklardan uygun yöntemlerle elde edilen ve ısıl değeri olan bir atık türüdür. Atıkların geri dönüşümü, yeniden kullanımı ve ısıl değere sahip olanların kullanılması depolamaya gönderilecek atık miktarında ciddi oranda azalmaya imkan vermekte ve bu uygulama atık yönetimi alanında Avrupa Birliği tarafından geliştirilen strateji ile uyumlu bir yönetime imkan vermektedir. ATY üretimi ve kullanımının bu çerçevede yeniden ele alınarak şekillendirilmesi ve standardize edilmesi gerekmektedir.

Tüm dünyada çok sayıda çimento fabrikasında alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Günümüzde, dünyadaki bir çok çimento fabrikası atıklardan türetilmiş yakıtları (ATY) alternatif yakıt olarak kullanmakta, bu sayede de yakıt maliyetlerinden tasarruf ederek topluma ve çevreye büyük katkılarda bulunmaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle ATY'nin ülkelere göre tanımlarına bakılmış, ATY üretim teknikleri incelenmiş, tesis kurulum maliyetleri ve Türkiye'deki atık potansiyeli irdelenmiş ve en önemli kullanıcı durumunda olan çimento sektöründe bu tür yakıtların kullanılmasının çevreye ve son ürün olan betona etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

Çimento sektöründe ATY kullanılmasının başlıca ürün kalitesi ve özellikleri üzerindeki etkisi ele alınmış, takiben çevresel olarak hava, toprak ve yer altı suyu kirlenmesi üzerindeki etkileri bakımından incelenmiştir. ATY'nin farklı kullanımları için risk değerlendirme çalışması yapılmıştır.

ATY kullanımının ve etkilerinin, ATY özelliklerine ve üretim tekniklerine bağlı olduğu ve bir standardizasyon ile kalorifik değer, nem, klor, sülfür ve ağır metal içeriklerine göre yapılmakta olduğu görülmektedir.

ATY kullanımından kaynaklanan en önemli etkilerin başında ağır metaller gelmektedir. Bazı metallerin hemen hemen tamamı, fırın sisteminden klinkerin içinde kararlı bir şekilde tutulmuş olarak çıkmaktadır. Tl (Talyum) ve Hg (Cıva) ise tam olarak klinkerde tutulamamakta, bu sebeple özellikle bu metallerin ATY içerisinde sisteme girişinin kontrol edilmesi gerekmektedir.

Beton atıklarının sızma etkisine bakıldığında, üretimlerinde kullanılan ATY ve benzeri atıklardan gelen ağır metallerin önemli bir çevresel kirlenme oluşturmadığı görülmüştür.

USING RDF ON CEMENT PRODUCTION AND ITS EFFECTS ON THE ENVIRONMENT

SUMMARY

Refuse-Derived Fuel (RDF) is a fuel type that is obtained by proper methods out of domestic waste, industrial waste and toxic waste, and has calorific value. Recycling waste, reuse of waste and use of those that have calorific value allows significant decrease in the waste amount that will be sent for storage, and such practice enables a management that complies with the strategy developed by European Union in the subject of waste management. RDF production and use needs to be reformed and standardized within this scope.

Alternative fuels are in use in many cement factories throughout the world. Today, many cement factories in the world use refuse-derived fuel (RDF) as alternative fuel, and therefore save fuel costs and contribute to the environment.

In this study, the definitions of RDF based on countries were viewed, RDF production techniques were inspected, facility foundation costs and the waste potential in Turkey were examined, and a research on the effect of using such fuel in the cement industry on the environment and the cement as the end product, was aimed for.

The primary product quality and effects of use of RDF in the cement industry on the specifications of the product were approached, and following that, its effects on air, soil and underground water pollution were examined. A risk assessment study was carried out regarding different uses of RDF.

The use and effects of RDF are dependent on the specifications and production techniques of RDF, and they are done according to the calorific value, moisture, chlorine, sulfur and heavy metal content with standardization.

Heavy metals are among the most important effects resulting from RDF use. Almost all of the metals come out of the kiln system as reserved in the clinks. On the other hand, Tl (Thallium) and Hg (Mercury) are not completely reserved in the clinks; therefore, the entry of these metals into the system needs to be managed.

Taking into consideration the leaching effect of concrete waste, heavy metals resulting from RDF and similar wastes did not create significant environmental pollution.

1. GİRİŞ

Dünyada enerji üretimi ve tüketimi için kullanılan fosil kaynakların tükenebilir olması ve enerji eldesinin gittikçe maliyetli bir hale gelmesi, enerjinin sürdürülebilir üretim ve tüketiminin sağlanmasını, bir yandan enerjiyi verimli kullanmayı ve bir diğer yandan da yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi gerektirmektedir.

Türkiye çimento sanayi yılda yaklaşık 60 milyon ton çimento üretmekte olup bu rakamın 18 milyon tonunu ihraç etmektedir. Yurt genelinde 2010 yılı itibariyle toplam 65 çimento fabrikasının olduğunu göz önüne aldığımızda alternatif yakıtların bu sanayide kullanımının ne kadar dikkate önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Atıkların alternatif yakıt olarak kullanılması, atıkların değerlendirilmesi için güvenli bir yöntemdir. Atıkların içindeki organik unsurlar çimento fırınındaki yüksek ısı, uzun işlem süresi ve oksitleyici ortam nedeniyle tamamen ortadan kalkarlar.

Ömrünü tamamlamış araç lastikleri (ÖTL), atık kâğıtlar, atık yağlar, ahşap atıkları, arıtma çamuru, plastikler, yüksek kalorifik değere sahip atıktan türetilmiş yakıtlar (ATY) ve etkinliği kaybolmuş solventler çimento sanayinin alternatif yakıt olarak kullanmakta olduğu başlıca atıklardır.

Çimento sanayinin, çeşitli katı atıkları alternatif yakıt olarak kullanması bir yandan fosil yakıtlardan tasarruf sağlarken bir yandan da atıkların değerlendirilmesi ve çevrenin korunması yoluyla ulusal atık sorununa katkıda bulunabilme imkânını sağlamaktadır.

Bu şekilde gerçekleştirilen atık yönetimi sayesinde katı atık yakma ve bertaraf tesislerinde daha az atık üretilecek ya da bu tesislere daha az katı atık gönderilmiş olacaktır. Bu durum bu türden yeni sahaların sayısını azaltırken mevcut saha sayısında büyümeyi sınırlandıracak, sonuç olarak da yeni katı atık yakma ve bertaraf tesislerinin kurulmasına gerek kalmayacaktır.

1.1 Amaç

Çimento döner fırınları, alternatif yakıtların güvenli bir ortamda değerlendirilebileceği ve yakılabileceği ideal tesislerdir. Atıkların içindeki organik unsurlar çimento fırınındaki yüksek ısı, uzun işlem süresi ve oksitleyici ortam nedeniyle tamamen ortadan kalkarlar. İnorganik unsurlar ise fırındaki hammaddelerle birleşir ve süreçten çimentonun bir parçası olarak çıkarlar.

Fırının yüksek ısı kapasitesi sayesinde acil durum nedeniyle işletimin durması halinde dahi sıcaklıkta belirgin bir değişim olması için dakikalar geçmesi gerekmekte yani fırında herhangi bir bozulma durumunda yakıtların tamamen yanması bu şekilde garantiye alınmış olmaktadır.

Atık imha problemlerinin şiddetli artışının bir nedeni, bu atıkların % 70 – 80'inin yeni toplama arazisi için uygun alan kıtlığı yaşayan büyük metropollerde üretilmesidir.

Atık problemini en aza indirebilmek için iki tane çevreye uyumlu seçenek vardır bunlar; atık tüketimini düşürmek ve atık akışının bir kısmını geri dönüşüme tabi tutmaktır. Her iki seçeneğin uygulanması için hayat tarzında ve ekonomide büyük değişikliklerin yapılması gereklidir. Geriye kalan kentsel katı atık için iki metot kullanılabilir. Bunlardan birincisi kütle yakımı: işlenmemiş ham atıkların fırında yakılması ve yanma prosesi sonucu buhar üretmek için kullanılır. İkincisi ise; ham katı atıktan daha homojen bir yakıt ürünü elde etmek için ön işlemden geçirilmiş olan katı atığın organik kısmını içeren, ATY ürünü kullanımıdır.

Bu çalışmada çimento döner fırınlarının normal işletme koşullarında, ek yakıt olarak ATY kullanımının araştırılması, ATY üretim teknikleri ve ATY kullanımının çevreye ve ürüne olan potansiyel etkileri hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

2. ATY TANIMI, STANDARTLARI, ÜRETİM TEKNİKLERİ, TESİS MALİYETLERİ, TÜRKİYE'DE ÜRETİM POTANSİYELİ, DÜNYADAKİ UYGULAMALAR

2.1 Atıklardan Türetilmiş Yakıtların (ATY) Tanımı

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) anlamına gelen RDF (Refused Derived Fuel) teriminin herhangi bir resmi tanımı mevcut değildir ve ülkeden ülkeye farklı şekilde yorumlanmaktadır. Atıktan türetilmiş yakıtlar, evsel ya da endüstriyel katı atıkların, geri kazanılabilen malzemeleri (plastik, cam, metal vb...) ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan yanabilir durumdaki geri dönüşümsüz malzemeden elde edilen alternatif bir katı yakıt türüdür. Yüksek kalorifik değere sahip bu yakıtlar, çimento fabrikalarında, enerji üretim tesislerinde alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır.

ATY terim olarak kentsel katı atıktan yanmayan malzemenin ayrılıp; yanabilir malzemeden elde edilen bir yakıttır. ATY üretimi; öğütme, sınıflandırma, metallerin ayrıştırılması gibi işlemlerden geçer. Daha sonra yapılan işlem ise numuneleri tek tip boyuta getirmek için peletleme prosesi ve son olarak da depolamadır. Peletleme, tanelerin diğer küçük taneler üzerinde yuvarlanarak büyüüp bir araya getirilmesi şeklinde bir granül haline getirme işlemidir (Sika, 2007). ATY peletleri kömür ile kıyaslandığında, temiz olması, enerji verimliliği, kömüre göre çevre dostu olması ve daha az toz çıkarmasından dolayı avantajlıdır.

ATY geleneksel yakıtlara göre daha ucuz bir yakıt olup; kalorifik değeri yaklaşık 4100 kcal/kg'dır. Kalorifik değerinin yüksek olması ayıklanamayan yakıt karakteristiğinde bulunan plastik, kağıt, mukavva gibi bileşenlerden kaynaklanır. Koşullar atık yakma talimatlarına uyarsa yardımcı yakıt olarak kullanılabilirlik potansiyeli vardır. Ayrıca biokütle değeri yüksektir (Sika, 2000).

ATY, SRF (Katı atıktan geri kazanılmış yakıt) olarak da adlandırılmakta olup; MSW (Evsel atıklar)'nin öğütülmesi ya da otoklavda buhar basıncı ile proses edilmesiyle elde edilebilir. Bu prosesin avantajı zararlı kirleticilerin ve ağır metallerin uzaklaşmasını sağlamasıdır. ATY kentsel katı atık kullanarak mekanik-ısı, mekanik-biyolojik davranış veya atığın otoklavlaşması ile çıkarılmış olur. ATY tek başına

fırlarda, ocaklarda enerji üretmek için kullanılabilir. Atıkların geri kazanımı konusunda çalışan güç santral kazanlarında kömür yerine 9:1 oranında ATY kullanılabilir (FOTW, 2008).

ATY'nin fosil yakıtlarla değişimini etkileyen asıl parametre biokütledir. ATY'nin kullanmasındaki başlıca sorun çimento fırınında klor içeriğidir. Çimentonun klor içeriği %1 ile sınırlı olduğundan kullanılacak alternatif yakıtın bu özelliğe zarar vermemesi gerekmektedir. Çünkü klor çimentoyu güçsüzleştirir ve döner fırında bir takım problemlere yol açabilir. Buna karşın ATY kullanımı ile çimento endüstrisi bütçesine % 20'lerde artış sağlanarak çimento fırınında ısı direnci artmıştır.

İngiltere'de bulunan Cardiff Üniversitesi'nin yaptığı bir araştırmaya göre; ATY yakıtın kalorifik değeri diğer kentsel atığa göre çok daha yüksektir. Örneğin Roma ATY'nin enerji içeriği 4895 kcal/kg iken Dudley yakma tesisinde bu değer 2388 kcal/kg'dır (Soylu, 2006).

ATY teknolojisini ve kütle yanısını içeren atık çevrim sistemleri, ülkenin yıllık enerji talebi miktarının % 3'ünü sağlayabilecek potansiyele sahiptir. Ayrıca, ferro metal, cam ve alüminyum gibi inorganiklerin geri dönüşümü gelecekteki toplam enerji kullanımımızı ilave %1 kadar daha düşürecektir. Bu değerler önemsiz görünüyorsa da bu potansiyel enerji kaynağı, değeri olmadığı için pahalıya mal olan bir işleme yok ediliyor olacaktır.

ATY prosesi ile geri dönüşümlü malzemelerin satışı ile gelir sağlanabilmektedir (Soylu, 2006).

2.2 Ülkelere Göre ATY Tanımları

Bazı ülkelerde kullanılan Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY) terimi, genellikle, kentsel katı atıkların, ticari atıkların veya endüstri proseslerinden çıkan atıkların içinden ayrılmış yüksek ısı değere sahip kısmı için kullanılmaktadır.

Bu terim dışında, 'İkincil (yardımcı) Yakıt, İkame Yakıt, İkame Sıvı Yakıt (SLF)' ifadeleri, homojen veya şartnameye göre karışım yapılmış olabilen işlenmiş endüstriyel atıklar için kullanılmaktadır. Bu tür yakıtlara örnek olarak, atık araç lastikleri, atık yağlar, kullanılmış çözücüler, kemik unu, hayvansal yağlar, kanalizasyon çamuru (örneğin, boya tortusu ve kağıt çamuru) sayılabilmektedir. Bu terimler aynı zamanda, zararsız ambalaj malzemeleri veya endüstriyel/ticari

kaynaklardan gelen diğerk artıklar (örneğin; plastik, kağıt ve tekstil atıkları), biokütle, hurda arabaların parçalanmasından gelen yanabilir artıkları da kastedebilmektedir.

İtalya'da 1998 yılına kadar İngilizce RDF terimi kullanıldı, sonra İtalyanca çevirisi olan 'Combustibili derivato di rifiuti – CDR' onun yerini aldı. Hollanda'da, biokütle ile diğerk yüksek ısıl değeri haiz atıklar arasında ayırım yapmak için ATY kullanılmıştır.

Birleşik Krallıkta ise, ATY terimi veya 'lif yakıt', genel olarak, kentsel katı atıkların işlenmiş kağıt/mukavva/plastik kısımlarını veya endüstriyel atıkları kastetmek için kullanılır ve bu atıklar, atıktan enerji olarak yararlanma amaçlı ATY tesislerinde yakılabilmektedir.

Birleşik Krallıkta 'cemfuel' terimi çimento endüstrisi için şartnameye göre imal edilmiş ikame yakıt SLF'yi (Secondary Liquid Fuel – İkame Sıvı Yakıt) tanımlamak için kullanılmıştır. Profuel Birleşik Krallıkta kullanılan diğerk bir terimdir ve kâğıt, plastikler ve halı kırıntılarından hazırlanan işlenmiş bir yakıtı ifade etmektedir.

Avusturya ve Almanya'da 'Brennstoff aus Müll – BRAM' ifadesi İngilizcedeki ATY terimine eşdeğer kabul edilebilir. 'Ersatzbrennstoff' ikame yakıt terimi daha yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Diğerk 'Substitutbrennstoff' ve 'Sekundärbrennstoff' ikincil yakıt gibi, terimlere de rastlamak mümkündür. Finlandiya'da 'REF' terimi, genellikle, daha çok, özel niteliği olan, müstakil evlerden toplanan işlenmiş atıkları kastetmek için kullanılır. İsveç'te, 'Specialbränsle A' ve 'Lattbränsle' terimleri, çimento endüstrisi şartnamelerine göre hazırlanan atıktan türetilmiş yakıtları ifade etmek için kullanılmaktadır. İspanya'da COMBSU terimi, SLF'yi kastetmektedir, GDF, kentsel katı atıklardan türetilmiş yakıtları ve TDF (Tired-Derived Fuel) ise, araba lastiklerinden türetilen yakıtları kastetmektedir.

Ülkelere genel olarak baktığımızda, kentsel katı atıklar ile birlikte, ticari ve endüstriyel atıkların birlikte işlenerek hazırlanmış olan yakıtlar genel olarak ATY tanımı kapsamına girmektedir (EC, 2003).

2.3 ATY'yi Oluşturan Atıklar ve Kalite Standartları

Atıktan türetilmiş yakıtların minimum kalite koşullarını belirleyerek, endüstriyel proseslerde kullanılan ikincil yakıtların kullanılmasını teşvik edecek ve böylece çevresel kirlenmenin yükünü azaltacak ulusal girişimler mevcuttur. Almanya'da a²⁹²³ sertifika etiketi tanıtılmış ve devreye sokulmuştur ve Finlandiya, İtalya'da (Çizelge 2.1) ve Hollanda'da ATY ile ilgili kalite standartları uygulanmaya başlanmıştır (EC, 2003).

Çizelge 2.1 : Katı atıklardan geri kazanılmış yakıtlar için kalite standartları.

Karakteristik	Birim	İtalya	DL ⁷	Finlandiya ¹		
				Kalite Sınıfı		
				I	II	III
Su miktarı	%	<25				
Isıl değeri	KJ/kg	15.000				
Kül miktarı	%	20				
Klor miktarı	%(m/m) ²	0,9	0,01	<0,15	<0,5	<1,5
Kükürt miktarı	%(m/m) ²	0,6	0,01	<0,2	<0,3	<0,5
Azot miktarı	%(m/m) ²	-	0,01	<1	<1,5	<2,5
Potasyum ve sodyum miktarı ³	%(m/m) ²	-	0,01	<0,2	<0,40	<0,5
Alüminyum miktarı	%(m/m) ²	-	0,01	- ⁴	- ⁵	- ⁶
Cıva miktarı	Mg kg ⁻¹	-	0,1	<0,1	<0,2	<0,5
Kadmiyum miktarı	Mg kg ⁻¹	-	0,1	<1	<4	<5
Kurşun	Mg kg ⁻¹	200				
Bakır	Mg kg ⁻¹	300				
Manganez	Mg kg ⁻¹	400				
Krom	Mg kg ⁻¹	100				
Çinko	Mg kg ⁻¹	500				
Nikel	Mg kg ⁻¹	40				
Arsenik	Mg kg ⁻¹	9				
Kadmiyum+Cıva	Mg kg ⁻¹	7				

Notlar:

- 1) Sınır değeri, miktarı ≤ 1000 m³ olan yakıtı veya bir aylık süre içinde üretilen ve teslimatı yapılan yakıt miktarına aittir, ve en azından herbiri için belirli aralıklarda sağlanması yapılacaktır.
- 2) % (m/m) ağırlıkça yüzdeyi ifade eder.
- 3) Kuru maddenin suda-çözünür ve iyon alışverişi yapabilir toplam (K+Na) miktarıdır.
- 4) Metalik alüminyuma izin verilmez, fakat raporlama kesinlik sınırları içinde kabul edilir.
- 5) Metalik alüminyum, kaynağında-ayırma yoluyla ve yakıt üretimi prosesi ile dışarı alınır.
- 6) Metalik alüminyum miktarı üzerinde anlaşma ayrıca yapılacaktır.
- 7) DL: Algılama sınırı

Örneğin İsveç'te (Çizelge 2.2) ve Birleşik Krallık'ta uygulamaya konulan, prosesle ilgili nedenler dolayısıyla, çimento endüstrisi tarafından şart koşulmuş ikincil yakıtlara ait kalite standartları bulunmaktadır. Belçika'da Flamanların bulunduğu bölgede, klinker üretiminde atık yakıtın üretilmesi ve kullanılması için, Avrupa Atık İşleme Tesisleri Federasyonu – EURITS tarafından yayımlanan standartlar uygulanmaktadır (EC, 2003).

Çizelge 2.2 : Çimento tesislerinde kullanılan geri kazanılmış yakıtlar için şartname.

Parametre	Kriterler	
	“Özel Yakıt A”	“Hafif Yakıt”
Isıl değeri	5.708 – 7.500 kcal/kg	5.995 – 7.500 kcal/kg
Parlama noktası	< 21°C	< 21°C
Özgül yoğunluk, 15°C sıcaklıkta	0,9 – 1,1 kg/dm ³	0,80 – 0,95 kg/dm ³
Viskozite	Pompalanabilir	1 - 5 cst, 50°C sıcaklıkta
Kül miktarı	5 - 10 %	0.6 - 0.8 %
Su	< 30 %	< 10 %
Cl	< 1 %	< 1 %
S	N/A	< 0.5 %
Cr	< 300 ppm	< 30 ppm
V	N/A	< 50 ppm
Z	N/A	< 300 ppm
Zn	< 2000 ppm	N/A
Cd	< 10 ppm	< 5 ppm
Pb	< 350 ppm	< 100 ppm
Ni	N/A	< 10 ppm
Hg	N/A	< 5 ppm
PCB	N/A	< 5 ppm

Bu veriler, Avrupa Birliği'nin birkaç üye ülkesinde üretilen yakıtların analiz değerleri temel alınarak oluşturulmuştur.

Kentsel Katı Atıklardan (KKA) türetilmiş ATY, seçilmiş ticari atıklardan türetilmiş ATY'ye nazaran genellikle daha düşük Net Isıl Değer'e (NCV – Net Calorific Value) sahiptir. KKA'dan türetilmiş ATY için cıvanın (Hg) değeri daha yüksektir. Bununla beraber, Hg için elde edilen maksimum değer, ticari atıklardan türetilmiş ATY'nin Hg değerine göre kayda değer bir fazlalık göstermemiştir. Çimento fırınları için üretilen ATY'in her türlü özelliği geniş bir aralıkta değişir, bu da çimento fırınlarının ne kadar esnek bir tesis olduğunu ispat etmektedir.

İkincil yakıtlar, aynı zamanda hammaddelerin ikame edilmesine katkıda bulunur. Bu, çimento fırınlarında ikincil yakıtlar kullanıldığında sık rastlanan bir durumdur. Bundan dolayı da, iki çeşit ATY kategorisi sunulmuştur; birinin kül miktarı düşük, diğerininki ise yüksektir. Yüksek kül oranına sahip ATY türlerinin kalorifik değeri düşüktür.

ATY Üretiminde kullanılabilen atık türleri aşağıda verilmiştir:

- A.Evsel Katı Atıklar
- B.Endüstriyel Atıklar
- Plastik Ve Kağıt/Karton Atıkları (Ticari Ve Endüstriyel Faaliyetlerden Kaynaklanan)
 - Ambalaj Atıkları
 - Üretim Atıkları
 - Atık Lastikler
- Biokütle Atıkları
 - Bitkisel Atıklar (Sap, Saman, Kabuk Vb)
 - Kontamine Olmamış Ahşap Atıkları
 - Kağıt Ve Kağıt Üretimi Atık Çamurları
 - Kurutulmuş Evsel Atıksu Arıtma Çamurları
 - Tekstil Atıkları
 - Hayvansal Atıklar
- Araçların Parçalanmasından Oluşan Atıklar (Automotive Shredder Residues - ASR)
- Yüksek Kalorifik Değere Sahip Tehlikeli Atıklar
 - Atık Yağlar
 - Endüstriyel Çamurlar
 - Emprenye Edilmiş Ağaç Talaşları
 - Atık Solventler
 - Halı Atıkları Ve Kırpıntılar

- Tekstil Atıkları
- Çocuk Bezi Üretim Atıkları

Ülke koşullarına göre ATY üretiminde kullanımına izin verilecek atıkların kodları belirlenmelidir. Çizelge 2.3 – Çizelge 2.7’de bu amaçla önerilen 5 ana kategori halinde atık kodları verilmiştir (RAL, 2001).

Çizelge 2.3 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf I.

I. Sınıf Atıklar: Ahşap, kağıt, karton, mukavva kutular.

02 01 03	Bitki dokusu atıkları
02 01 07	Ormancılık atıkları
03 01 01	Ağaç kabuğu ve mantar atıkları
03 03 01	Ağaç kabuğu ve odun atıkları
03 03 02	Yeşil sıvı çamuru (pişirme sıvısı geri kazanımından)
03 03 07	Atık kağıt ve kartonun hamur haline getirilmesi sırasında mekanik olarak ayrılan ıskartalar
15 01 01	Kağıt ve karton ambalaj
15 01 03	Ahşap ambalaj
17 02 01	Ahşap
20 01 01	Kâğıt ve karton

Çizelge 2.4 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf II.

II. Sınıf Atıklar: Tekstil, elyaf.

04 02 09	Kompozit malzeme atıkları (emprenye edilmiş tekstil, elastomer, plastomer)
04 02 10	Doğal ürünlerden oluşan organik maddeler (örneğin yağ, mum)
20 01 10	Giysiler
20 01 11	Tekstil ürünleri

Çizelge 2.5 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf III.

III. Sınıf Atıklar: Plastikler.

02 01 04	Atık plastikler (ambalajlar hariç)
12 01 05	Plastik yongalar ve çapaklar
12 01 13	Kaynak atıkları
15 01 02	Plastik ambalaj
15 01 05	Kompozit ambalaj
15 01 06	Karışık ambalaj
17 02 03	Plastik

Çizelge 2.6 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf IV.

IV. Sınıf Atıklar: Diğer Malzemeler.	
09 01 07	Gümüş veya da gümüş bileşenleri içeren fotoğraf filmi ve kağıdı
09 01 08	Gümüş veya gümüş bileşenleri içermeyen fotoğraf filmi ve kağıdı
09 01 10	Pilsiz çalışan tek kullanımlık fotoğraf makineleri
19 09 04	Kullanılmış aktif karbon
19 09 05	Doymuş ya da kullanılmış iyon değtirme reçinesi

Çizelge 2.7 : ATY üretiminde kullanılabilir atık kodları sınıf V.

V. Sınıf Atıklar: Karışık Atıklardan Kalorifik Değeri Yüksek Olan Atıklar.	
19 05 01	Belediye ve benzeri atıklarının kompostlanmamış fraksiyonları
19 05 02	Hayvansal ve bitkisel atıklarının kompostlanmamış fraksiyonları
19 05 03	Standart dışı kompost
20 01 08	Biyolojik olarak bozunabilir mutfak ve kantin atıkları
20 02 01	Biyolojik olarak bozunabilir atıklar
20 02 03	Biyolojik olarak bozunamayan diğer atıklar
20 03 01	Karışık belediye atıkları
20 03 02	Pazarlardan kaynaklanan atıklar
20 03 03	Sokak temizleme kalıntıları

Bu kategorilere göre ayrılmış olan atıkların, net kalorifik değeri, klor (Cl) ve Cıva (Hg) bileşenlerini içeren analizleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8 : Çimento tesislerinde kullanılan geri kazanılmış yakıt içerikleri.

Sınıflandırılacak Özellik	İstatistiksel Ölçü	Birim	I	II	Sınıflar III	IV	V
Net Kalorifik Değer (NCV)	Ortalama değer	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Klor (Cl)	Ortalama değer	% (d)	I ≤ 0.2	II ≤ 0.6	Sınıflar III ≤ 1.0	IV ≤ 1.5	V ≤ 3
Cıva (Hg)	Medyan Yüzde (80nci dereceden)	mg/MJ (ar)	I ≤ 0.02 ≤ 0.04	II ≤ 0.03 ≤ 0.06	Sınıflar III ≤ 0.08 ≤ 0.16	IV ≤ 0.15 ≤ 0.30	V ≤ 0.50 ≤ 1.00

2.4 ATY Üretimi

Farklı türde atık yakıt hazırlama prosesi, o yakıtı kullanacak yanma prosesinin teknik ayırt edici niteliklerini hesaba katmaktadır (Ör.; çimento tesisi, kireç işletmesi, elektrik santrali). Bu yanma prosesleri teknik olarak farklı niteliklere sahiptirler.

Atık arıtma işleminin mertebesi, atık yakıt uygulamasına bağlıdır. Bazı örnekler:

- a. Atık yakıtı hazırlamak için kullanılan atığın türü;
- b. Atık yakıt depolamak için kullanılan teknikler;
- c. Fırınının beslenme şekli (dökme malzeme, püskürterek besleme);
- d. Yanma prosesinde kullanılan yakıt karışımı;
- e. Yanma prosesinin türü;
- f. Atık yakıtın beslenme şekli;
- g. Bazı bileşen toleransları: Örneğin, klor içeriği $<0,3$, aynı zamanda yakıt karışımına da bağlıdır;

Zararsız atıklardan hazırlanabilen katı atık yakıt türleri, tipik olarak aşağıdaki kategorilerden birinin içine girebilir

- Kentsel Katı Atıklardan (ağırlıklı olarak evsel atıklar),
- Ticari, büyük hacimli atık, dökme evsel atık ve diğer atıkların karışımından,
- Tek kuru atık kanalından veya seçilmiş homojen atık kanallarından,
- Filtre pastası, çamurlar ve diğer ıslak atıklardan.

Bertaraf prosesi, hazırlanan atık yakıtın fizikokimyasal karakteristiklerini değiştirir. Örnek olarak; ufalama işlemi, katı atık yakıt istenilen tanecik boyutuna gelineceye uygulanabilir. Diğer bir örnekte şudur; temizleme prosesi, mekanik işleme ve ufalama yoluyla, malzemenin çöp içeriğini ve yabancı maddelerini ayırabilir. Böylece, su ve kül oranlarıyla oynayarak, %100'den %x'e kadar yakıt kalitesi aralığına ve yakıt verimliliğine ulaşmak mümkün hale gelir.

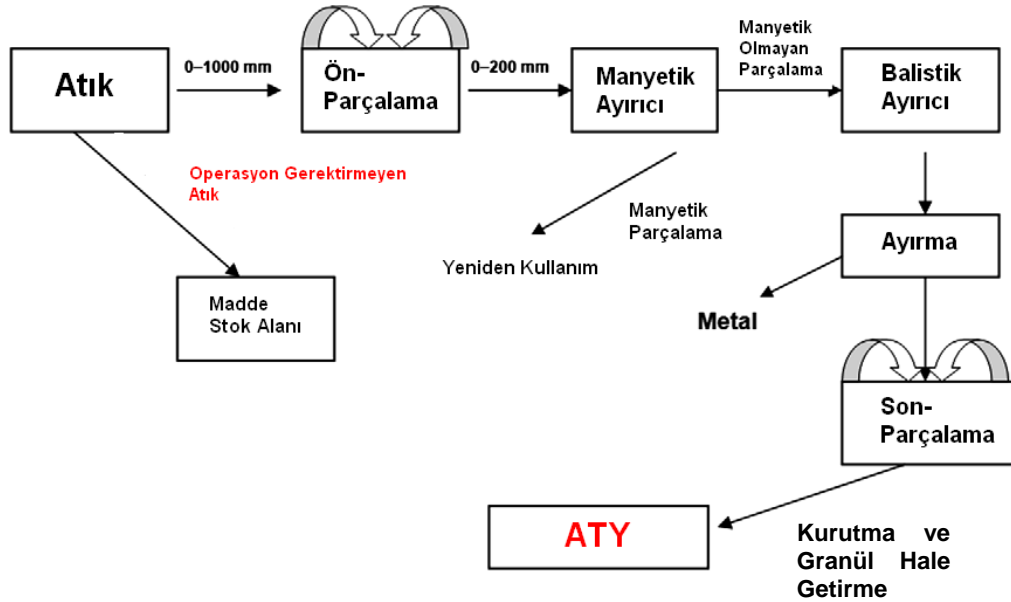
Belirli bir atık yakıtı hazırlamak için kullanılan teknoloji, girdi malzemenin ayırt edici niteliklerine ve kullanıcıların isteklerine göre değişir. Örneğin; mekanik ve

biyolojik işlemde geçirmenin derecesi, atıkların çıkış kaynağına göre şekillenir. Değişik çıkış noktalarından gelen bir atık türü, farklı niteliklere sahip olabilir.

2.4.1 Katı atık yakıt hazırlama teknikleri

Bazı tekniklerin içinde şunlar bulunur (Şekil 2.1):

- Katı atığı tasnif etme (örneğin; evsel atık) ve ayıklama (niteliklerine göre sıralama) işleminden önce hacimli kısımları kırma ve parçalama,
- Manyetik ayıklayıcı kullanma,
- Karıştırma ve eleme işlemlerini kapalı alanlarda gerçekleştirme,
- Son Parçalama
- Kurutma ve Granül Haline Getirme (Peletleme) (Kara, 2009).



Şekil 2.1 : Katı atıklardan ATY üretim şeması.

Tasnif etme ve ufalama, tatminkar ayıklama sonuçlarına ulaşmak ve sonraki ısı işlemleri kolaylaştırmak için temel işlemlerdir. Diğer sebepler ise; bu teknikler dolaylı kaçak toz ve uçucu organik bileşik salımlarına engel olabilmektedirler.

Boyut-küçültme, yüksek maliyetlerde çok enerji gerektirir, fakat büyük hacimli malzemelerin olduğu durumda bu kaçınılmazdır.

Zararsız atık hazırlanmasından kaynaklanan bazı özel atıklar, yukarıda bahsedilen özel tekniklerden bazılarında ihtiyaç duymayabilir. Burada açıklanan bazı örnekler, kaynağında ayrılmış atık kanallarını kullanarak atık yakıt üreten tesislerdir, örneğin;

plastik imalatından veya atık kağıdın işlenmesinden gelen kırpıntı atıklar. Bununla beraber bu istisnai durum, atık arıtma işletmecisinin özel atıklarla ilgili tecrübesine bağlı olarak değişir. Bu, şu anlama gelir: Atık-arıtma işletmecisinin müşterilerini, işlemde geçmiş atığın bileşenini ve müşterinin atığı toplama usulünü oldukça iyi tanıması onun yararına olur. Atık arıtma tesisinde veya üretilen atık yakıtın kalitesinde problem çıkaracak parçalardan kaçınılması, yalnızca bu şekilde mümkün olabilecektir (EIPPC, 2006).

2.4.1.1 Niteliklerine göre derecelendirme (ayıklama)

İki tane proses stratejisi bulunmaktadır; bunlar, pozitif ve negatif derecelendirme. Kentsel katı atıklardan katı atık yakıt üretilmesinde uygulanan bu proseste istenilen kalite seviyesine göre, negatif veya pozitif derecelendirme uygulanır. Eğer yüksek miktarda atık ham malzeme isteniyorsa, negatif derecelendirme tavsiye edilir, ve pozitif derecelendirmeye nazaran ürün için kazanılan malzeme daha fazladır, fakat üretilen çıktının miktarı daha az olur.

a. Pozitif derecelendirme şu anlama gelir: malzeme akışından, yalnızca yüksek kalori değerine sahip arzu edilen malzemelerin ve zararsız maddelerin seçilmesidir. Bu strateji, daha yüksek miktarlarda malzemenin çöp doldurma sahasına gitmesine, fakat daha yüksek kalitede atık yakıtın üretilmesine yol açar.

b. Negatif derecelendirme stratejileri ise, yalnızca üründe istenmeyen malzemeleri seçip alır (örneğin; atıklar yakıldığında veya ortaklaşa-yakıldığında sorunlara neden olabilecekleri için atık malzemelerin içinden klorlu maddelerin azaltılması zorunluluğu, diğer bir ihtimal de atık malzemelerin içindeki plastik PVC malzemesinin oran olarak azaltılması). Bu strateji ile, çöp doldurma sahasına gidecek malzemelerin miktarı azaltılabilir, zira yüksek miktarda zararlı madde bulundurma ihtimali olan diğer malzemeler ürünün içine karışır.

Ayrılan atıkların kalitesi yüksektir veya belirli bazı atık malzemelerin üzerine ilave işlem yapılması halinde sorun çıkmamasına yardımcı olur.

Bazı kirletici maddeler ise seçilip alınamaz, çünkü onlar malzemeye sıkıca tutunmuş veya içinde gizlenmiştir, öyleki tarayıcılar bile onları tespit edemez.

Üzerine uygulanan proseslerin yoğunluğuna ve katı atık yakıttan beklenen niteliklere bağlı olarak, çöp doldurma sahasına gönderilecek malzemelerin miktarı oldukça geniş aralıkta değişir.

Bazı atık stratejileri sadece tepkimesiz malzemeleri ve metalleri ayırır ve aynı zamanda organik madde ve nem miktarlarını da düşürür. Geride kalan malzeme doğruca ürünün içine gider ve böylece, kendiliğinden çöp doldurmaya gönderilecek malzeme miktarını azaltır (Pretz ve ark., 2003).

2.4.1.2 Demirli metallerin ayrılması

Bu kapsamdaki bazı tekniklerin içinde şunlar bulunur:

- a. Malzemenin akış yolunun tam üzerine ve konveyör bantının üstüne uzunlamasına olacak şekilde bir bant üstü manyetik ayıklayıcı koymak.
- b. Manyetik tamburlu ayıklayıcı veya manyetik tambur kullanarak malzemeyi tekrardan ayıklama, çünkü küçük demir parçacıklar hala manyetik olmayan katmanın altında kalabilmektedir.
- c. Bant üstündeki malzemenin yüksekliğini azaltmak için taşıyıcı bantın hızını artırmak.
- d. Manyetik tamburlu ayıklayıcı için malzemeyi yukarıdan besleme düzeninin kullanılması.

Manyetik ayıklayıcıları bir çözüm aracı olarak, demir ve çelik malzemeleri ayırmak için kullanılabilirler, örneğin; hafif ambalajlardan teneke kutuyu ayırabilirler. Bu teknikler aynı zamanda, atıktan her demirli malzemeyi ayırmak gibi önemli bir hizmet vermek üzere de kullanılır. Ve böylece takibeden işlemlerde muhtemel sorunları engeller ve ürün kalitesini artırır, örneğin; kablo atıkların geri dönüşümü prosesinde herhangi bir demirli metali ayırmak için, döner parçalayıcıların bıçaklarının körleşmesini veya sıkışmasını engellemek için ve daha sonraki bakır ürünün temizlenmesi için önceden manyetik ayıklayıcılar kullanılır.

Yerleşim olarak banta göre boylamasına bir hizada düzen tercih edilir ve akan malzeme içinden gevşek parçaların verimli bir biçimde ayıklanmasına yardımcı olur. Eğer mıknatıs malzemeye göre enlemesine hizalanırsa (yani, taşıyıcı banta çapraz ve üstünde asılı), boylamasına hizalamaya nazaran, mıknatısın gücünün birkaç kat daha

fazla olması gerekir, çünkü bazan manyetik olmayan parçalar demirli malzemelerin üstünde bulunur ve mıknatısın gücünün önce onları aşması gerekir.

Belirli miktarda büyük yüzey alanlı plastikleri içinde bulunduran kentsel katı atıkları (KKA) ayıklarken, bant üstü manyetik ayıklayıcılar, kaçınılmaz olarak bu plastikleri demirli parçalarla birlikte dışarı atacaktırlar. Bunun miktarını azaltmak için, bantın hızının artırılması tavsiye edilir. Genellikle, bant üstü manyetik ayıklayıcılar çok yüksek verimlere ulaşabilmektedirler.

Manyetik tamburlu ayıklayıcılarda yukarıdan beslemeli tasarımın avantajları; demirli parçalar doğrudan en yüksek manyetik alanla yüz yüze gelirler ve sonuç olarak ince taneli ve az da olsa manyetik hale gelebilen parçacıklar da ayıklanabilir.

Atıklarda ancak demirli metal malzemeler varsa kullanılır. Manyetik ayıklayıcılar genelde paslanmaz çelikleri ayıramazlar. Çünkü paslanmaz çelikler ya hiç manyetik değildir veya sadece çok az derecede olabilirler.

Manyetik ayıklama yönteminin uygulanması, işlenecek atıkların türüne ve atık yakıtın talep edilen özelliklerine bağlıdır. Bazı örnekler:

- Aşınmayı azaltmak için demirli (ve demir-dışı) metalleri ayıklamaya olan ihtiyaç, eğer ürünün gereken özellikleri için doğrayarak bir ufalama gerekiyorsa yardımcı olacaktır,
- Demirli veya demir-dışı malzeme ayıklama ve/veya eleme yoluyla ince kısmın ayrılması, eğer kül miktarı sınırlandırılmışsa, yardımcı olacaktır,
- Yanma teknolojisi, katı atık yakıt içinde sadece çökme hızı düşük parçacıklara müsaade ediyorsa, havalı tasnif ekipmanı ile zenginleştirme gereklidir.

Boyut küçültmede faaliyetlerinde havayla çalışan ekipmanlardan yararlanmak, boşaltılan malzemenin havalı sistemler yardımıyla işleminden geçirilmesidir. Bu sistem, son ürün içindeki istenmeyen aşırı incelikteki malzeme miktarını azaltır. Enerji tüketimini azaltır ve malzemenin taşınmasına yardımcı olur. (Pretz ve ark., 2003).

2.4.1.3 Demir dışı metallerin ayrılması

Konuyla ilgili bazı teknikler içinde şunlar bulunur:

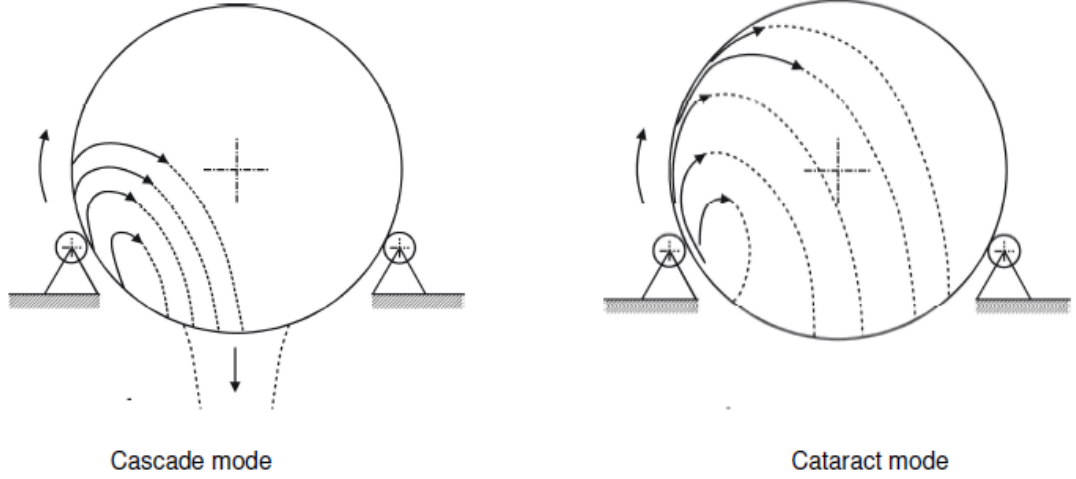
- a. Foucault (Eddy) Akımlı ayıklayıcı tarafından ayrılmadan önce, atığın demir dışı elementlerinin tanecik boyutunu 3 mm ile 150 mm arasında olacak biçimde hazırlanması gerekmektedir.
- b. İnce tanecikli demir dışı metalleri ayırma işlemini daha da iyileştirmek için yüksek frekansla değişen manyetik alan kullanılması gerekmektedir.
- c. Manyetik kutup sistemini merkezden kaçık olarak konumlandırmak gereklidir.
- d. Ayıklama işleminden iyi sonuçlar elde etmek amacıyla, tek tanecik katmanı oluşturan titreşimli oluklar kullanılabilir.
- e. (Eddy) Foucault Akımı öncesi, üstten-beslemeli düzende manyetik tambur ile ince tanecikli demirli parçacıkların ayrılması sağlanabilir.

Foucault Akımlı ayıklayıcılar, parçacık boyutu 3 ile 150 mm arasındaki demir-dışı parçaları dışarı çıkarır. Böyle olunca, atıklardan demir dışı metallerin ayrılmasını daha verimli yapmak için malzemeyi bir ön-elemeye tabi tutmak yararlı olacaktır.

Aluminyum folyo ve bakır tel gibi uzunca veya geniş-yüzeyli malzemeleri ayırması zordur, çünkü bu malzemelerdeki Foucault akımı zayıftır (Mutz ve ark., 2001).

2.4.1.4 Döner tambur elekler

Tamburun dönüş hızına bağlı olarak, farklı çalışma koşulları oluşturmak mümkündür. Kademeli (dalga dalga, cascade) veya çağlayan biçiminde (cataract), farklı çalışma koşullarıdır. Şekil 2.2’de döner tambur eleklerin konumları görülebilmektedir.



Şekil 2.2 : Döner tambur elekler.

Elek tamburu çağlayan konumunda iken, kritik hızın % 70’i olan bir dönüş hızında en iyi sonuçları sağlar. Kademeli konumun dezavantajı, elekte ayıklanması çok zor yumrular ve ince-malzemeler oluşturur.

Verimliliği artırmak için, elek içine malzemeyi alıp yukarı kısımlara taşıyacak parçalar eklenmiştir, bu şekilde malzeme yukarıdan elekteki boş alanlara düşer. Yüksek oranlarda kaba tanecikli (yaklaşık 100-250 mm) malzemenin eleğe yüklenmesi, çoğunlukla sorunlara yol açar, elek gözleri tıkanır, böylece verimliliğin düşmesine ve yoğun miktarda ince tanecikli fazlalıkların oluşmasına yol açar.

Avantajları, ayırma verimini arttırması, işlem için titreşimli ekipmanlara gerek duyulmaması, yüksek oranda homojenlik sağlaması, çoğunlukla yüksek oranda ağır metal maddeleri ihtiva eden parçacıkların yapıştığı yüzeylerin temizlenmesidir.

Elek üzerine kaynamış malzeme yapışmalarını ve tıkanmanın engellenmesinin ispat edilmesi ile prosesin verimliliği ispatlanmıştır (Pretz ve ark., 2003).

2.4.1.5 Bitişik kızılötesi spektroskopi

Ayırılması gereken malzemenin sisteme beslenmesi çoğunlukla taşıyıcı bantlar tarafından yerine getirilir. Taşıyıcılar genellikle yüksek hızda hareket ederler, ve neredeyse bir nevi yalıtım perdesi oluştururlar. Taşıyıcı bantın üst kısmına halojen lambalar ve algılayıcı yerleştirilir. Algılayıcının üzerinde bir bitişik kızılötesi spektroskopi (NIR) sensörü bulunur ve bu sensör tüm eni genişliğince bantı tarar ve edindiği farklı malzemelerin karakteristik spektrumlarını, veri olarak işlemciye gönderir. Bu sinyaller veri tabanı ile mukayese edilir. Analiz, taşıyıcı bant üstündeki gerçek durumun hesaplanmasını dikkate alır ve ölçümler saniyenin çok küçük bir bölümünde sonuçlanır. Ve akabinde, boşaltma ucunun ön tarafına yerleştirilmiş hava püskürtme nozülleriyle, derecelendirme işlemi başlar. Biribirinden yaklaşık 30 mm uzak yerleştirmiş birkaç tane tekli hava püskürtme nozülü bir nozül-grubu oluşturur. Herbir püskürtme nozülü, basınçlı bir hava tankından beslenir ve manyetik valflerle yönlendirilir. Eğer parçacık pozitif algılandığında, püskürtme nozülü onu dışarı atacaksa, veri işlemcisi bir sinyal gönderir. Burada bir veya birden fazla püskürtme nozülü harekete geçirilebilir. Basınç dalgası akan malzemedan parçacığı alır ve bir ayırıcı plakayla ayrılmış bölmeye atar.

Bu uygulama, meşrubat kartonları, kağıt, mukavva, polietilen (PE), polipropilen (PP), polstren (PS), polietilen terefalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) gibi karışık plastikler için uygun bir ayırma işlemidir. Aynı zamanda akan malzemedeki ağır metal (ör. Sb, Cd, Pb) ve Cl oranını da düşürür, çünkü bu bileşenleri taşıyan özel atıklar bu sistem ile ayrılabilir.

Bu tekniğin uygulanması, arıtılması gereken yüksek oranda klor ve ağır metaller içeren atıkları meydana getirir. Sistemde, koyu kahverengi ve siyah malzemelerin ayrılması imkansızdır, çünkü NIR'in ışığının neredeyse tamamı bu renkler tarafından yutulur ve böylece sensöre herhangi bir geri ışık yansımaları olmaz.

Bu teknik, atık yakıt içindeki bazı bileşiklerin oranının azaltılması için uygulanır ve böylece üretilen atık yakıtın istenilen kalitesi sağlanmış olur.

Klor muhtevası, geri kazanılmış yakıt sınıfını belirlemek üzere kullanılan parametrelerden birisidir ve bu sistem atık yakıt içindeki ağır metal ve klor miktarının düşürülmesi için kullanılabilir. Bu konuda CEN TC 343 WG 2 tarafından bazı standartlar oluşturulmuştur ve üzerinde konuşulan klor oranı % 3

cıvarındadır, yani içinde organik klor bulunduran plastikler, örneğin özellikle PVC, sınırlı bir oranda kabul edilebilmektedir (Pretz ve ark., 2003).

2.4.1.6 Otomatik toplama ve ayırma

Malzeme, taşıyıcı bantı besleyen bir titreşimli oluktan geçer. Taşıyıcı bantın altında bir metal algılayıcı yerleştirilmiştir, algılayıcı her bir parçanın özel verilerini bilgisayar ünitesine gönderir. Ayrıca, taşıyıcı bantın üst kısmında renkli bir kamera bulunur ve parçacıklar hakkındaki verileri toplayarak bilgisayar ünitesine gönderir. Her iki bilgi akışı da özel bir yazılım tarafından analiz edilir, ancak ondan sonra bilgisayar hangi parçacığın dışarı çıkarılacağını ve hangi parçanın kalacağını (pozitif veya negatif derecelendirme) bildirmek üzere nozüllere impulslar gönderir. Kabul edilen ve reddedilen ürünler, ayrı ayrı bantlarla bir sonraki işleme veya depolanmaya gönderilir. Bu ayırma sistemi, atıkların içindeki farklı malzemelerin tasnif edilmesindeki verimliliği artırır.

Beslenen malzemenin niteliğine bağlı olarak, 1200 mm genişliğinde bir bantla, tanecik boyutu 3 – 250 mm arasında değişen bir malzemede, 2 – 8 t/sa işleme kapasitesine ulaşmak mümkündür.

Otomatik ayırma prosesi, atık işleme sektöründe, gittikçe artan bir ün kazanmaktadır, ve özellikle bir üründen belirli özellikler talep edildiği zaman söz konusudur (Pretz ve ark., 2003).

2.4.1.7 Kurutma

Atıkların suyunu giderme işleminin ilk adımı, atığın içindeki su miktarı ve fiziksel nitelikleri doğrultusunda uygulanır. Bu işlem şu seçeneklerden bir tanesinden oluşabilir; yerçekimiyle koyulaştırma, merkezkaçla koyulaştırma, yüzdürmeyle koyulaştırma, yerçekimli bant ve döner-tamburlu koyulaştırma. Bazı tekniklerde şunlar bulunur;

a. Malzemenin Kurutulması İçin Isıyı Kullanma: Isı yayımlı kurutucularda, ısıtıcı ortamla kurutulacak ürün arasında doğrudan bir temas vardır. Yakıttaki nem ısıtıcı ortam tarafından uzaklaştırılır. Isı geçirimsiz kurutucularda, ısıtıcı ortamla kurutulacak ürün arasında herhangi bir temas yoktur. Isı transferi ısıtıcı yüzeyler aracılığıyla gerçekleşir. Nem, ısı yayımlı proseste kullanılan taşıyıcı gazın yaklaşık

% 10 u kadar olan bir miktarda gaz tarafından uzaklaştırılır. Bu yüzden ısı-geçirimli kurutucular, toz içerikli ve kokulu atıklar için tercih edilebilir.

b. **Biyolojik Bozunma/Kurutma Sistemini Kullanma:** Uygulanan prosese bağlı olarak, bozunma aşağı yukarı bilinen bir prostedir; bu yüzden bazen dikkatler kurutma üzerine odaklanır. Uygulanan sisteme bağlı olarak, biyolojik bozunma esnasında ortaya çıkan proses sularının, su kanalına salınmadan önce temizlenmesi gerekecektir. Biyolojik faaliyeti sürdürmek için, sisteme hava takviye edilir. Egzoz havası bir araya toplanır ve sonuç olarak onun da temizlenmesi gereklidir.

Bu işlemler, katı atığın kalori değerini yükseltir ve bazı durumlarda, tatminkar ayıklama işlemi sonuçları sağlar. Kurutmanın ısıyla yapılması durumunda, ısı enerjisinin kullanılması sözkonusudur. Bir çalışma şunu göstermiştir; kanalizasyon çamurunu kuruturken, ısıl kurutma işlemindeki enerji geri-kazanımı daha yüksektir. Sebepleri şunlardır: biyolojik kurutma için gerekli olan enerji daha yüksek olacak ve atık yakıtın kalori değeri düşmeye daha yatkın olacaktır.

Katı atıkları kurutmak için ışınlı (radyan) kurutucular kullanılmaz. Bu tip kurutucular su süzme ve çamurların kurutulmasında kullanılırlar. Biyolojik kurutma ise daha çok zararsız atıklara uygulanmaktadır (IPPC, 2006).

2.4.1.8 Granül haline getirme

Diskli topaklayıcıların metal bir gövdesi ve içinde bir veya birden fazla diskleri bulunur. Malzemeyi çok daha iyi karıştırmak için özel bir biçime sahip diskler, dönmeye başladığında sürtünme enerjisini sürtünme ısısına dönüştür. Malzeme bir taraftan karıştırma dolayısıyla homojen hale gelirken, diğer taraftan artan sürtünme ısısı dolayısıyla da erimeye başlar. Malzeme plastikleşmeye başladığı anda, enerji tüketimi artar ve tepkime kabının boşaltılması için bir sinyal gönderilir. Proses sonunda, malzemenin soğutulması gerekir. Bu durum ile ürünlerin yoğunlukları artırılır.

Tam olarak erime sözkonusu olduğu için, bu prosesin enerji tüketimi, boncuk şekline sokmaya harcanan enerjiye nazaran çok daha fazladır. Çıkış kısmına eklenen ekipmana bağlı olarak, granül haline getirilebilir

Böyle sistemler bazı atık bileşenlerinin eritilmesine dayalı bir proses oldukları için, sadece bu tür bileşenlerin mevcudiyetinde uygulanma fırsatı bulabilirler (Örneğin, plastikler) (Pretz ve ark., 2003).

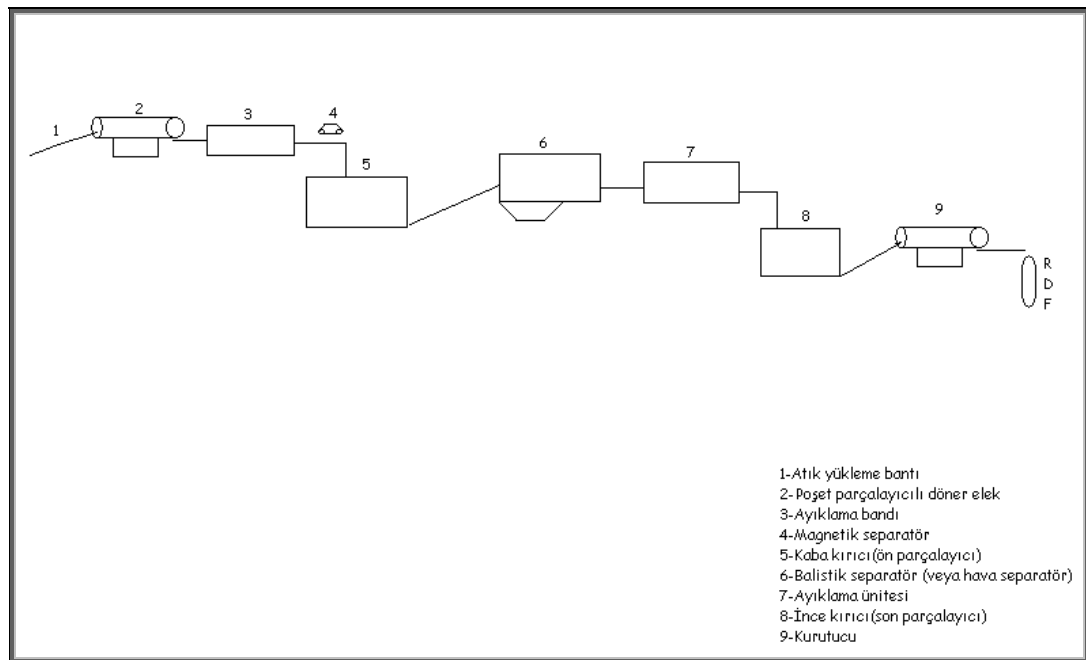
2.5 ATY Tesisi Kurulum Maliyetleri

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) İSTAÇ ATY Tesisi 3.100 m² kapalı alana sahip olup, beton zemin üzerine çelik konstrüksiyon malzemeden inşa edilmiştir. Tesiste kompost ve geri kazanım tesisinden çıkan ve ATY olarak kullanılabilen atıklardan ATY üretilmektedir.

Kompost ve Geri Kazanım Tesisine günde yaklaşık 700 ton atık gelmektedir. Bu atıklardan yaklaşık 200 ton kompost elde edilmektedir. Geri kazanım sonrası ATY üretimi için kalan kısımdaki plastik türevli malzeme oranı %27'dir yani ATY tesisine günde ortalama 300 ton gelmekte ve bu atıklardan, yaklaşık 80 tonundan sadece plastik türevli ATY elde edilebilmektedir. ATY tesisi inşaatı yaklaşık maliyeti 750.000-850.000 €'dur. Tesis elektrik işlerinin maliyeti ise yaklaşık 200.000-250.000 €'dur.

2.5.1 Karışık evsel katı atıktan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri

Karışık evsel atıktan ATY üretim tesisi genel akış şeması Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 : Karışık evsel katı atıktan ATY üretim tesisi genel akış şeması.

ATY tesisinde kullanılacak ekipmanların seçiminde, atığı işleyebilecek özellikte ekipman teminine dikkat edilmelidir. Seçilecek ekipmanın kapasitesi, teknik özellikleri, marka ve modeli ekipman fiyatlarının değişken olmasına yol açar. Elde edilmek istenilen ATY'nin kalitesine ve miktarına göre de tesiste kullanılan ekipmanlar çeşitlendirilebilir veya sayıca/kapasitece artırılabilir.

ATY tesisinde oluşabilecek tozların tutulması için uygun yerlere torba filtreler yerleştirilebilir. Bunun da yaklaşık maliyeti 150.000 € - 200.000 €' civarındadır.

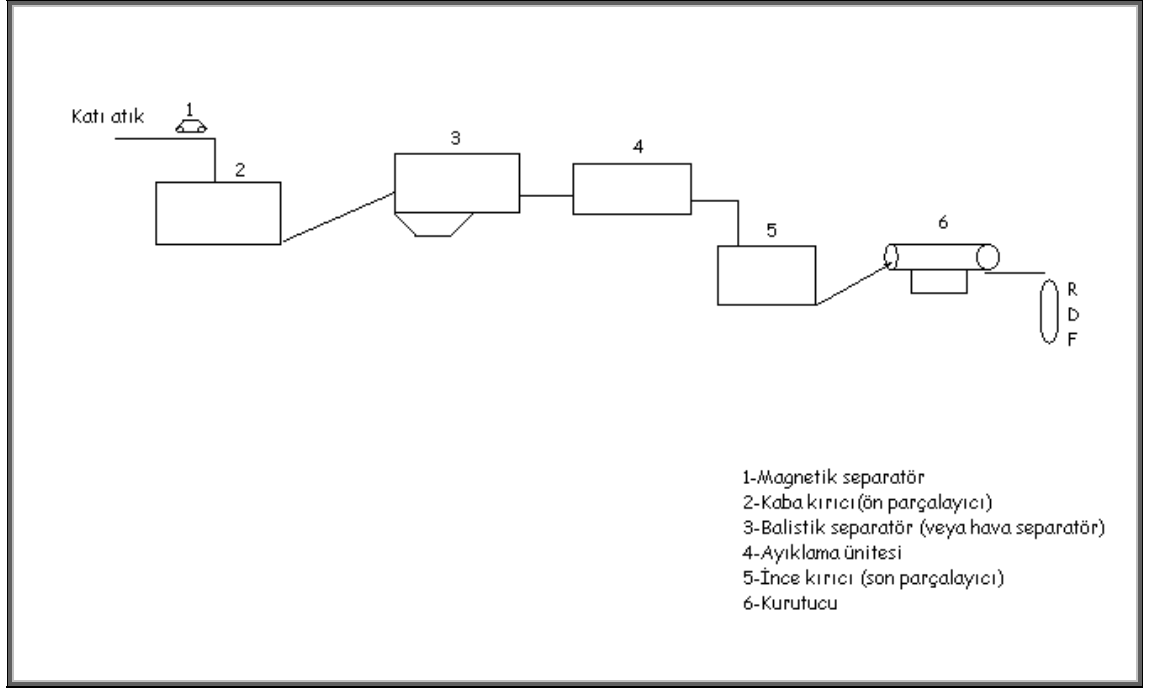
Aşağıda bulunan Çizelge 2.9'da karışık evsel atıklardan ATY üretiminde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları verilmiştir. Ancak bu fiyatlara elektrik ve panolar, mekanik ve elektrik montajı, nakliye ve işletmeye alma hizmetleri ile tesisin yapılacağı arazi ve tesisin inşaat giderleri dahil değildir.

Çizelge 2.9 : Karışık evsel katı atıktan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.

Kullanılan Ekipmanlar	Yaklaşık Fiyatları
Poşet parçalayıcı döner elek	250.000 € - 450.000 €
Kaba kırıcı (ön parçalayıcı)	240.000 € - 395.000 €
Magnetik separatör	15.000 € - 45.000 €
Balistik separatör	195.000 € - 300.000 €
Son parçalayıcı	225.000 € - 475.000 €
Kurutucu	500.000 € - 1 M €
Konveyörler	750 €/m - 2.000 €/m
Vibration Cüte	75.000 € - 120.000 €
Hava sınıflandırıcı	60.000 € - 110.000 €
Manyetik separatör	20.000 € - 50.000 €
TOPLAM	1.75 M € - 3 M €

2.5.2 Evsel atık içermeyen karışık ve nemli atıklardan ATY üretimi ve bu tesiste kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri

Evsel atık içermeyen karışık ve nemli atıklardan ATY üretim tesisi genel akış şeması Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 : Evsel atık içermeyen karışık ve nemli atıklardan ATY üretim tesisi genel akım şeması.

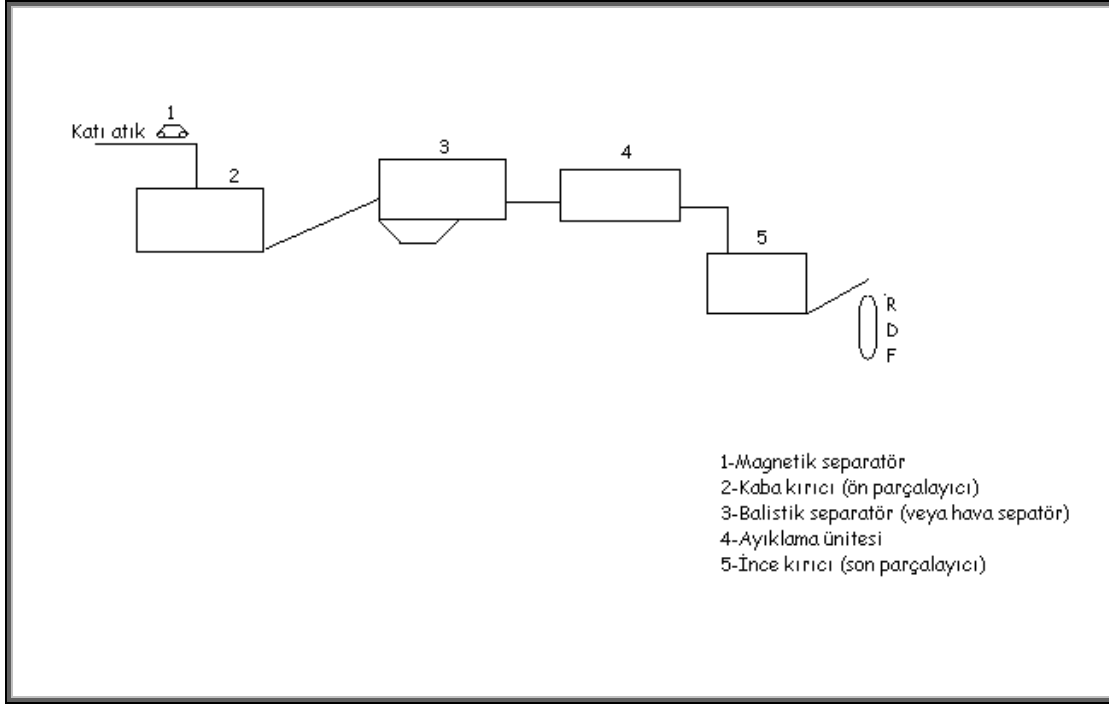
Aşağıda bulunan Çizelge 2.10’da karışık evsel atıklardan ATY üretiminde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları verilmiştir. Ancak bu fiyatlara elektrik ve panolar, mekanik ve elektrik montajı, nakliye ve işletmeye alma hizmetleri ile tesisin yapılacağı arazi ve tesisin inşaat giderleri dahil değildir.

Çizelge 2.10 : Evsel atık içermeyen karışık ve nemli atıklardan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.

Kullanılan Ekipmanlar	Yaklaşık Fiyatları
Kaba kırıcı (ön parçalayıcı)	240.000 € - 395.000 €
Magnetik separatör	15.000 € - 45.000 €
Balistik separatör	195.000 € - 300.000 €
Son parçalayıcı	225.000 € - 475.000 €
Kurutucu	500.000 € - 1 M €
Konveyörler	750 €/m - 2.000 €/m
Vibration Cüte	75.000 € - 120.000 €
Hava sınıflandırıcı	60.000 € - 110.000 €
Manyetik separatör	20.000 € - 50.000 €
TOPLAM	1.5 M €- 2.5 M €

2.5.3 Evsel atık içermeyen karışık atıklardan ATY üretimi (kurutma işlemi gerektirmeyen) ve bu tesiste kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri

Evsel Atık İçermeyen Karışık Atıklardan ATY Üretimi tesisi genel akış şeması Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5 : Evsel atık içermeyen karışık atıklardan ATY üretim tesisi genel akım şeması.

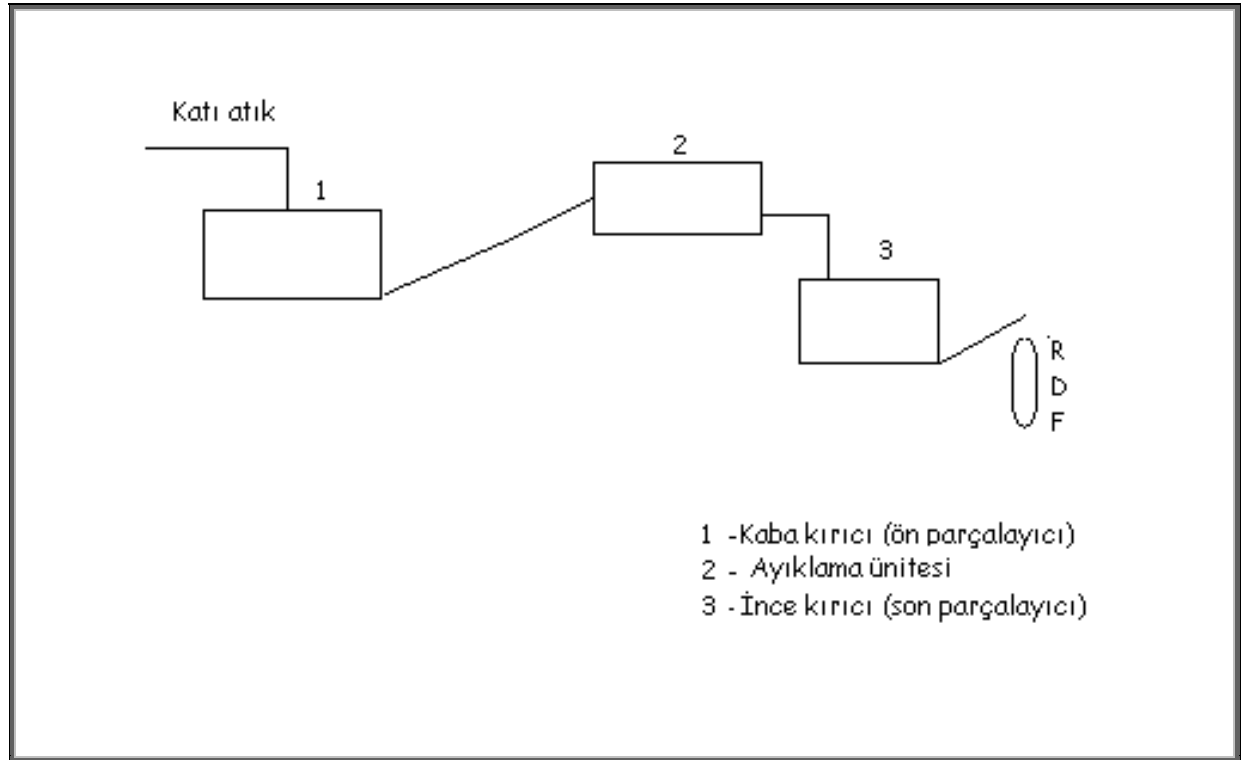
Aşağıda bulunan Çizelge 2.11’de karışık evsel atıklardan ATY üretiminde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları verilmiştir. Ancak bu fiyatlara elektrik ve panolar, mekanik ve elektrik montajı, nakliye ve işletmeye alma hizmetleri ile tesisin yapılacağı arazi ve tesisin inşaat giderleri dahil değildir.

Çizelge 2.11 : Evsel atık içermeyen karışık atıklardan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.

Kullanılan Ekipmanlar	Yaklaşık Fiyatları
Kaba kırıcı (ön parçalayıcı)	240.000 € - 395.000 €
Magnetik separatör	15.000 € - 45.000 €
Balistik separatör	195.000 € - 300.000 €
Son parçalayıcı	225.000 € - 475.000 €
Konveyörler	750 €/m - 2.000 €/m
Vibration Cute	75.000 € - 120.000 €
Hava sınıflandırıcı	60.000 € - 110.000 €
Manyetik separatör	20.000 € - 50.000 €
TOPLAM	1. M € - 1.5 M €

2.5.4 Tek tip atıktan ATY üretimi (kurutma işlemi gerektirmeyen) ve bu tesiste kullanılan ekipmanlar ve yaklaşık maliyetleri

Tek tip atıktan ATY üretimi tesisi genel akış şeması Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6 : Tek tip atıktan ATY üretimi.

Aşağıda bulunan Çizelge 2.12’de karışık evsel atıklardan ATY üretiminde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları verilmiştir. Ancak bu fiyatlara elektrik ve panolar, mekanik ve elektrik montajı, nakliye ve işletmeye alma hizmetleri ile tesisin yapılacağı arazi ve tesisin inşaat giderleri dahil değildir.

Çizelge 2.12 : Tek tip atıktan ATY üretim tesisinde kullanılan ekipmanların yaklaşık fiyatları.

Kullanılan Ekipmanlar	Yaklaşık Fiyatları
Kaba kırıcı (ön parçalayıcı)	240.000 € - 395.000 €
Son parçalayıcı	225.000 € - 475.000 €
Konveyörler	750 €/m - 2.000 €/m
TOPLAM*	0.5 M € - 0.9 M €

2.5.5 ATY üretim hatları yaklaşık işletme giderleri

ATY Üretim tesisinin ekipmanları, kapasiteleri işletme giderleri ve buna bağlı olarak hesaplanmış olan ATY üretim maliyetleri Çizelge 2.13’de verilmiştir (Nithikul, 2007).

Çizelge 2.13 : ATY tesisi işletme verileri.

Ekipman	(a) Kapasite (t/h)	(b) Amortisman (Euro/h)	(c) İşletme Gideri (Euro/h)	Üretim Maliyeti [(b)+(c)]/ (a) (Euro/ton)
Yoğunlaştırıcı (Tane Küçültücü)	6	4,73	3,62	1,39
Hava Separatör	5	0,95	0,87	0,36
Kurutucu	6	7,09	10,12	2,87
Belt Konveyör	-	0,35	0,43	-
Çekiçli Öğütücü	6	3,55	21,69	4,21
Peletleyici	4	4,73	3,62	2,09
Eddy Akımlı Separatör	15	1,14	0,48	0,11
Magnetik Separatör	15	0,34	0,16	0,03
Ayıklama Ünitesi (El İle)			23,65	
Kırıcı (Parçalayıcı)	15	2,96	3,62	0,44
Döner Elek	15	2,36	1,45	0,25

Evsel atık içermeyen karışık atıklardan oluşturulmuş yaklaşık kapasitesi 80 ton/gün olan bir ATY üretim tesisi için yaklaşık kurutma hariç bir gelir-gider analizi tablosu Çizelge 2.14’de verilmiştir.

Çizelge 2.14 : ATY tesisi gelir gider analizi.

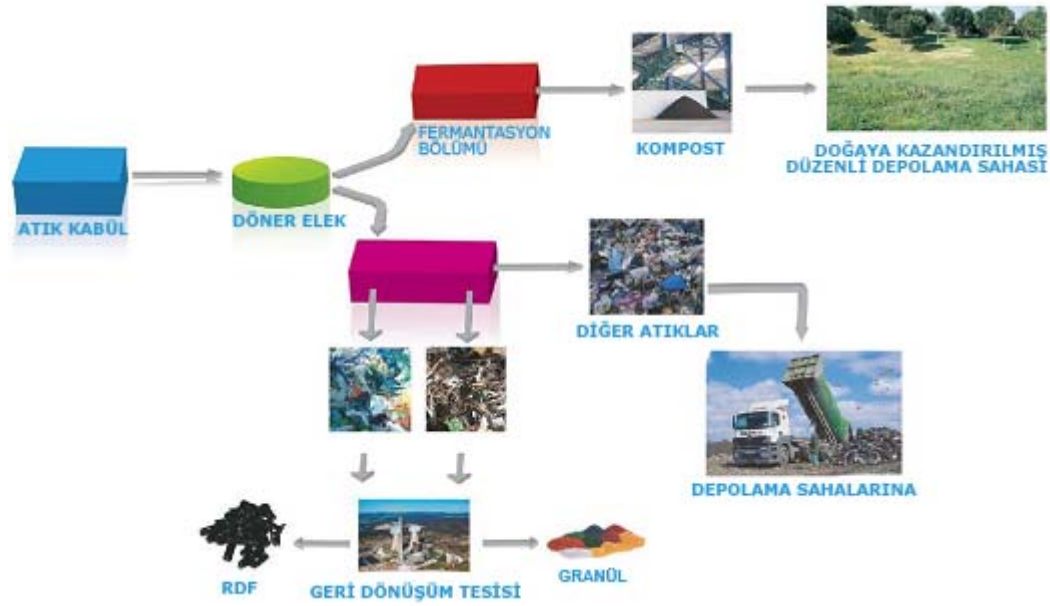
	Birim	Açıklama	Maliyet (TL/ay)
Giderler	Elektrik		50.440
	1	815 kw/saat	Tesisin kurulu gücü
		0,17 TL/saat	Saatlik Elektrik Enerjisi Tüketim Bedeli
		138,5 TL/saat	26 gün, 14 saat/gün- Aylık Elek. Enerji Tüketimi
	Bakım		5.000
	2.	1 TL/ton	Kaba kırıcı bakım maliyeti
		1 TL/ton	İnce kırıcı bakım maliyeti
		0,5 TL/ton	Diğer ekipman
	Personel		3.000
	3.	1.500 TL/kişi/ay	1 Personel Aylık Ücret
2 kişi		Çalışan Personel Sayısı	
Gider		Toplam Ton Başına Gider	28 (TL/ton)
Gelir	ATY Satışı	Ton Başına Gelir	40 (TL/ton)

2.6 Atıktan Türetilmiş Yakıtların Türkiye'deki Üretim Potansiyeli

Kompostlaştırma ve Geri Kazanım Tesisi'nde günde 700 ton karışık kentsel katı atık işlenerek bir yönüyle katı atıkları bertaraf edilirken, diğer yönüyle üreticilerinin kurtulmak istedikleri bu atıklardan yeni bir ekonomik değer olarak 200 ton kompost ürünü elde edilmektedir.

Eleklerden gelen $\Phi 80$ mm üzeri katı atıklar geri kazanım bantlarına alınarak içerisindeki plastik, metal, kâğıt ve bunların türevi malzemeler ayıklanmakta ve preslenerek ekonomiye kazandırılmaktadır. Geri kazanım miktarı ise yaklaşık 25 ton/gün'dür.

Ayırma ünitesinde ayrılan bu geri dönüşümlü atıkların dışında kalan atıklar (plastik poşetler, çocuk bezleri, tahta parçaları, kâğıt atıklar, tekstil atıkları, bazı plastik atıklar, organik vb.) günlük olarak yaklaşık 300 – 400 ton civarındadır. Bu atıklar ise konveyörle ATY tesisine taşınmaktadır.



Şekil 2.7 : İBB İSTAÇ kompost ve geri kazanım tesisi diyagramı.

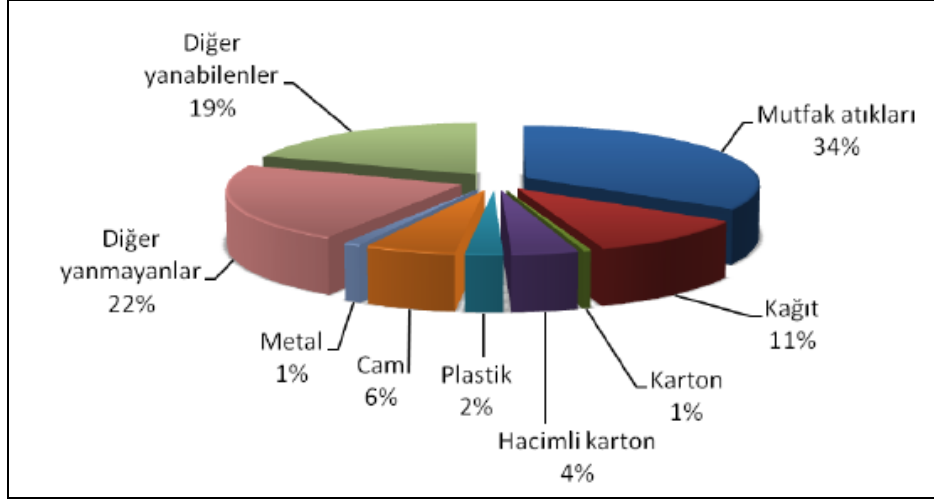
İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Kompostlaştırma ve Geri Kazanım Tesisi'nde 7 farklı üniteye yapılan 8 atık profili çalışması sonuçları her bir birim için mevsimsel olarak ortaya konmuş, Çizelge 2.15'de tesisin ilk beş birimine ait atık profili değerleri verilmiş olup, beslenen malzemenin tesiste akışı hakkında bilgi vermektedir

Çizelge 2.15 : Tesis ünitelerindeki oniki aylık atık profili ortalamaları.

Bileşenler	Atık Kabul Bölümü		Ø80 mm Elek Altı		Ø80 mm Elek Üstü Açık Poşet		Ø80 mm Elek Üstü Kapalı Poşet		Ø80 mm Elek Üstü Toplam		Geri Kazanım Sonrası	
	Ort. (%)	Std.S. (%)	Ort. (%)	Std.S. (%)	Ort. (%)	Std.S. (%)	Ort. (%)	Std.S. (%)	Ort. (%)	Std.S. (%)	Ort. (%)	Std.S. (%)
Kağıt – Karton	16,35	4,03	9,35	3,21	25,85	5,07	12,00	6,41	23,82	4,52	24,78	9,25
Cam	3,49	1,98	4,21	1,69	0,91	1,25	2,59	2,21	1,18	1,17	0,97	0,93
Pet	0,90	0,50	0,10	0,17	2,02	0,93	0,83	0,79	1,85	0,84	0,60	0,47
Poşet	8,25	1,41	1,08	0,70	15,99	4,46	13,71	3,39	15,43	3,82	15,59	3,47
Plastik	2,74	0,98	1,54	0,77	4,38	1,53	2,28	2,35	4,08	1,51	2,69	1,06
Çuval	0,11	0,21	0,00	0,00	1,05	1,43	1,63	2,85	1,13	1,23	0,34	0,59
Aluminyum	0,24	0,25	0,29	0,54	0,72	0,55	0,31	0,72	0,68	0,52	0,37	0,33
Diğer Metaller	1,04	0,96	0,40	0,54	2,29	2,29	1,34	3,51	2,20	2,24	0,66	0,46
Mutfak Atıkları	49,54	7,78	73,85	7,93	10,63	4,90	50,20	15,12	16,88	5,27	19,67	6,47
Çocuk Bezi	5,07	2,41	0,43	0,59	4,57	2,33	4,15	5,48	4,49	1,39	7,79	2,98
Tahta	1,01	0,86	0,68	0,69	2,15	1,73	0,51	1,19	1,92	1,61	1,82	1,25
Elk.-Elektronik A.	0,18	0,39	0,00	0,00	0,18	0,50	0,12	0,41	0,18	0,47	0,07	0,25
Pil-Akü	0,01	0,03	0,17	0,55	0,00	0,00	0,12	0,23	0,02	0,03	0,00	0,00
Tekstil	4,63	1,74	3,93	2,34	18,30	5,26	2,25	2,54	15,72	4,13	16,86	4,39
Tetrapak	0,61	0,28	0,05	0,08	1,26	0,88	0,73	1,27	1,14	0,64	1,27	0,68
Diğer Yanabilir	2,30	1,04	1,82	1,80	5,55	4,86	4,93	5,31	5,35	4,25	3,77	2,13
Park ve Bahçe A.	0,67	1,21	0,00	0,00	0,60	1,30	0,00	0,00	0,53	1,14	0,78	1,65
Taş	1,37	1,64	1,57	1,07	2,51	3,53	1,15	3,79	2,30	2,99	1,45	1,82
Kemik	0,85	1,44	0,53	0,93	1,05	1,64	1,15	3,49	1,11	1,77	0,54	0,69
Diğer	0,65	1,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Toplam	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0

Çizelge 2.15’den anlaşılacağı üzere geri kazanım sonrası plastik türevli malzeme oranı %27’dir. Buda ATY tesisine giren 300 ton atıktan yaklaşık 81 ton plastik türevli ATY oluşabileceğini göstermektedir.

Ülkemizde yıllık atık miktarı yaklaşık 28,7 milyon tondur. Katı Atık Ana Planı (KAAP) Projesi kapsamında 2006 yılında yapılan katı atık kompozisyon belirleme çalışmasının sonucu aşağıdaki Şekil 2.8’de verilmektedir.



Şekil 2.8 : KAAP projesi atık kompozisyonu belirleme çalışması sonucu.

Bu atıkların tamamını İstanbul örneğinde verildiği üzere entegre bir geri kazanım tesisinde işlendiği (kompost, geri kazanım, ATY) kabul edilirse, kompost ve geri kazanım işlemlerinden sonra günde yaklaşık 11.000 ton ATY elde edilebilir. Buda yılda 4 milyon ton ATY demektir.

Bir diğer durum da Türkiye’de bölgelerde bulunan çimento fabrikalarının alternatif yakıt kullanım potansiyelleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çimento üretiminde yakıt olarak ithal taş kömürü, petrol koku ve yerli kömür kullanılmakta, enerji maliyetleri toplam maliyetin %35–45’ini temsil etmekte ve bilinen en iyi teknolojiler ile yakıt giderleri en fazla %2 oranında düşürülebilmektedir. Büyük oranda petrol koku ve doğal gaz da kullanılmaktadır.

Çimento sanayi, çeşitli atıkları alternatif yakıt olarak kullanarak fosil yakıtlardan tasarruf sağlamakta ve maliyetlerini düşürebilmektedir. Avrupa Çimento Sektörünün alternatif yakıt kullanım oranı %20 olmakla beraber bu rakam ülkemizde % 3 civarındadır (TÇMB, 2011). Ülkemizde çimento fabrikalarında zararlı veya zararsız atıklar işlenerek, ek yakıt olarak veya hammadde ile karıştırılarak kullanılmaktadır.

Türkiye’de 2011 yılı itibariyle 48’i entegre, 17’si öğütme ve paketlenme olan toplam 65 çimento fabrikası bulunmaktadır. Türkiye’de bulunan çimento fabrikalarının haritası Şekil 2.9’da verilmiştir (TÇMB, 2011). Ayrıca ülkemiz genelinde çimento fabrikalarının yer aldığı 42 ildeki toplam atık miktarı yaklaşık 19,6 milyon tondur. Çizelge 2.16’da Türkiye İstatistik Kurumunun (TÜİK) 2008 yılına ait verileri ile çimento üretimi yapılan illerimizdeki atık miktarları verilmiştir.



Şekil 2.9 : Türkiye'deki çimento fabrikaları haritası.

Çizelge 2.16 : Çimento üretimi yapılan illerimizdeki atık miktarları.

Çimento Üretilen İller	Toplam Nüfus	Belediye Nüfus	Toplam Miktar (ton/yıl)	Kişi Başı (kg/kişi gün)
Adana	2.006.650	1.798.916	771.361	1,18
Adıyaman	582.762	378.554	152.023	1,13
Afyon	701.572	550.886	237.860	1,24
Ankara	4.466.756	4.365.555	2.165.987	1,37
Antalya	1.789.295	1.511.383	837.728	1,52
Aydın	946.971	688.430	373.721	1,49
Bartın	182.131	73.092	38.834	1,50
Bolu	270.417	167.629	87.472	1,43
Burdur	251.181	179.946	70.851	1,08
Bursa	2.439.876	2.198.068	848.534	1,06
Çanakkale	476.128	307.161	152.373	1,36
Çorum	549.828	376.282	157.049	1,16
Denizli	907.325	736.379	279.919	1,04
Diyarbakır	1.460.714	1.078.864	360.275	0,93
Edirne	396.462	293.517	192.750	1,81
Elazığ	541.258	438.834	142.422	0,91
Erzurum	784.941	523.363	204.979	1,08
Eskişehir	724.849	657.347	273.231	1,14
Gaziantep	1.560.023	1.405.420	410.554	0,8
Hatay	1.386.224	1.093.666	402.555	1,01
Isparta	419.845	345.267	136.037	1,08
İstanbul	12.573.836	12.460.170	5.215.122	1,15
İzmir	3.739.353	3.467.834	1.351.376	1,07
Karabük	218.463	168.797	60.609	1,01
Kars	312.205	140.277	63.951	1,25
Kayseri	1.165.088	1.049.128	423.959	1,12
Kırklareli	333.256	261.321	136.612	1,43
Kocaeli	1.437.926	1.346.092	480.415	0,99
Konya	1.959.082	1.753.490	643.493	1,03
Mardin	745.778	530.789	165.463	0,89
Mersin	1.595.938	1.386.814	599.112	1,19
Nevşehir	280.058	223.284	114.139	1,43
Niğde	331.677	269.541	147.367	1,59
Balıkesir	1.118.313	777.740	415.498	1,46
Samsun	1.228.959	835.575	291.599	0,98
Siirt	291.528	197.437	61.434	0,86
Sivas	638.464	477.233	206.976	1,23
Şanlıurfa	1.523.099	997.759	269.658	0,75
Trabzon	740.569	565.643	139.001	0,75
Van	979.671	567.440	181.976	0,88
Yozgat	492.127	359.003	149.515	1,21
Zonguldak	615.890	411.504	159.093	1,08
Toplam	55.166.488	47.415.430	19.572.883	ort. 1.2

Bu atıkların tamamını İstanbul örneğinde verildiği gibi entegre bir geri kazanım tesisinde işlendiği (kompost üretimi, geri kazanım, ATY üretimi) kabul edilirse, kompost ve geri kazanım işlemlerinden sonra günde yaklaşık 8.000 ton ATY elde edilebilir. Buda yılda 3 milyon ton ATY demektir.

2.7 Dünyada Atık Yönetimi ve Atıktan Türetilmiş Yakıtların Durumu

Avrupa Topluluğu (AT) ve üye ülkelerin mevzuatlarında, çöp depolama sahasına gönderilecek kentsel katı atıklar (KKA) artan bir oranda sınırlandırılırken, bazı ülkelerdeki, birleştirilmiş atık yönetim politikasının bir stratejik parçası olarak KKA üretiminden elde edilen ATY ve ondan yararlanılma durumu gösterilmiştir:

Danimarka ve Hollanda'da kentsel atıkların çöp doldurma sahasına gönderilmesinin üzerindeki yasaklar hala devrededir. Bununla beraber, gerçek hayatta, Danimarka'da hacimli atıklar ve Hollanda'da atık yakma fırınlarının kapasitesinin üstünde bir miktarda olan atıklar gibi KKA'ların hala çöp doldurma sahasına gönderilmesine şahit olunmaktadır.

Hollanda'da dikkate değer bir odun atığı mevcuttur. Fakat diğer biokütle kaynakları oldukça azdır. ATY peletlerinde endüstriyel atık karışımlarının ön işlemini amaçlayan yeni bir endüstri ortaya çıkmıştır. ATY peletlerinin bir kısmı Belçika ve Almanya'ya çimento fabrikalarında ve küçük bir kısmı da İsveç'e ısıtma sistemlerinde kullanılması için ihraç edilmektedir (Kara ve ark., 2009).

Almanya ve Avusturya'da, buharlaşan katı miktarı ve toplam organik karbon miktarı, her biri %5'ten büyük atıklar için, atık alanına gönderilme yasakları 2005 yılında uygulamaya başlanmıştır.

İtalya benzer mevzuatları oluşturmuştur ve böyle bir mevzuat Veneto Bölgesinde yürürlüğe konulmuş durumdadır.

Belçika Flanders'da, birtakım malzemeler ve özellikle kaynağında tasnif edilmiş olanlar için çöp depolama sahasına gönderme yasakları mevcuttur.

İsveç de 2002'den beri ayrışmış yanabilen atıklarını çöp depolama alanına göndermemektedir.

Fransa, 2002 yılında sadece ve sadece "nihai çöplerin" atılabilmesi ile ilgili bir yasak getirmiştir.

Finlandiya, biyolojik bozunan kısmı kaynağında ayrılmadıkça, KKA'nın çöp doldurma sahasına gönderilmesini 2005 yılından itibaren yasaklamıştır.

1995 yılına kadar kaynağında ayırmada en büyük ilerlemeyi kaydeden ülkelere en iyi örnekler Avusturya ve Almanya'dır. Sadece kaynağında ayırma ile çöp depolama sahasına gidecek biyolojik bozunabilen kentsel atıkların miktarının düşürülmesi hedeflerine ulaşmak için daha az zorlanacak ve atığın geri kalan kısmının bertaraf edilmesini iyileştirmekle uğraşacaklardır.

Hali hazırda geri dönüştürme ve gübreye dönüştürmede göreceli olarak yüksek seviyelere ulaşan Avusturya, Almanya, Hollanda, ve Finlandiya ülkelerinde ATY üretimi en verimli ve en ortak nokta olarak görünmektedir. Çünkü kaynağında ayırma işleminin yüksek miktarlarda yapılması geride sadece ATY üretimi için uygun geri dönüştürülemeyen artık malzemeler bırakmaktadır.

Bu bağlamda, mekanik ve biyolojik atık arıtma tesisleri (MBT), Çöp Depolama Sahası Yönergesiyle uyum içinde olmasını sağlayacak bir yol olarak, kalan atığın biyolojik-bozunur kısmını kararlı hale getirme gibi daha özel bir amaçla kullanılabilir. Böyle koşullarda, kalan atığın biyolojik-bozunmaz olan bileşeni, geri dönüştürülebilir, yeniden kullanılabilir veya yardımcı yakıt olarak yakılabilecektir. Ve kararlı hale getirilmiş biyolojik atık, bozunabilirliğindeki azalma dolayısıyla Çöp Depolama Sahası Yönergesindeki hedeflerin kapsamından çıkacak ve çöp depolama sahasına gönderilebilecektir.

MBT'nin kitlesel atık yakma hususunda daha esnek bir çözüm olarak önerilmesi için iyi nedenler de mevcuttur. Karışık atığın işlenmesini bırakıp, sadece prosesin biyolojik arıtma safhası yani kaynağında ayrılmış atığı gübreye çevirme işlemine dönmeyi mümkün kılmak, aynı zamanda ortaklaşa-yakma tesislerinde ATY'nin kullanılmasını ve yoğun sermaye gerektiren özel atık yakma tesislerine yatırım yapma ihtiyacını ortadan kaldırabilmektedir.

ATY'nin termik tesislerde ortaklaşa yanması da, kitlesel atık yakma kapasitesinin sınırlı olduğu ülkelerde örneğin Finlandiya'da geniş uygulama alanları bulabilmektedir (EC, 2003).

Katı maddeler yaygın olarak kullanılan yakıtlardır. Bunların bileşimi, yoğunluğu, ısı değeri ve diğer özellikleri atıktan atığa değişmektedir. Katı atık ya da bir yakıtın enerji kaynağı olarak kullanımı, yakıtın niceliği, pazara yakınlığı gibi çok sayıda

etkenlere bağlıdır. Atık ya da yakıtın değerini belirleyen en önemli etken bileşimleridir. Atıkların çeşidi, bir yakma sisteminin seçimi ve işletimi için anahtar kriterdir (Küçükgül 2004).

Atıklardan üretilen yakıtlar Fransa yada Birleşik Krallık gibi birçok Avrupa ülkesi yanı sıra Kanada, Birleşik Devletler ve Japonya'da bulunan birçok çimento fabrikasında kullanılmaktadır.

Avrupa çimento fabrikalarında alternatif yakıtların yanma işlemlerine dair veriler Avrupa Çimento Birliği Cembureau tarafından toplanmakta ve sunulmaktadır. 1998 yılına ait en yüksek alternatif yakıt kullanım miktarları Hollanda yaklaşık %53; Fransa yaklaşık %41 ve İsviçre'de yaklaşık %35 olarak ölçülmüştür.

Çimento fabrikalarında atıklardan üretilen yakıtların kullanımı yalnızca endüstri için değil aynı zamanda toplum için de ekonomik faydalar sunmaktadır. Bu şekilde gerçekleştirilen atık yönetimi sayesinde atık yakma tesislerinde daha az atık üretilecek ya da bu tesislere daha az atık gönderilmiş olacaktır. Bu durum çöp depolama sahalarının sayısını azaltırken mevcut saha sayısında da büyümeyi sınırlandıracak, sonuç olarak da yeni atık yakma tesislerinin kurulmasına gerek kalmayacaktır (Mokrzycki ve ark., 2003).

Avrupa'da çimento endüstrisi farklı türde malzemeleri yakan 100'den fazla fırın ile ikincil yakıtlar açısından büyük bir tüketicidir.

Bazı çalışmalarda Avrupa'da bulunan çimento fırınlarında 1997 yılında 1.8 milyon ton/yıl miktarında ikincil yakıt yakıldığı ve bu rakamın 2003 yılında %15 oranında artması beklendiği rapor edilmektedir. Çimento endüstrisine ait strateji yüksek enerji faturasını alternatif kaynaklara dayanarak azaltmak (enerji masrafları Portland çimentoya ait imalat masraflarının %30-40'ını temsil eder) ve yanı sıra sürdürülebilir gelişme sağlamaktır. Bu durum karbondioksit emisyonları ve buna bağlı karbon emisyon kredisinden fayda sağlama olasılığı açısından bakıldığında önemli bir değerlendirmedir.

Tehlikeli atıklar (1 milyon ton/yıl) ve lastikler (550.000 ton/yıl) en sık kullanılan ikincil yakıtları teşkil etmektedir. Ancak, geleceğe dönük olarak karbon emisyon kredisinden atık kağıt ve evsel arıtma çamuru dahil olmak üzere biokütle bazlı yakıtlara dikkat gösterilmelidir. Avrupa'da çimento sektöründe ATY kullanımına

yönelik ülke bazında kullanım kapasiteleri Çizelge 2.17'de verilmiştir (Genon ve Brizio, 2008).

Avrupa'daki çimento fırınlarında genel olarak ticari ve endüstriyel atık ambalajlar (350,000 ton/yıl miktarında kağıt ve plastik), kemik unu (350,000 ton/yıl) ve evsel arıtma çamuru (50,000 ton/yıl) yakılan atıklar arasında sayılabilir.

Çimento endüstrisinde ikincil yakıtlar ile ilgili olarak Avrupa enerji ikamesi oranı 1995 yılı için %39 petrol koku, %42 kömür ve %9 fuel oil ve gaza karşı %10'luk bir kullanım oluşmasını sağlamıştır.

Hollanda'da %72, İspanya'da %2, Almanya'da %30 ve İtalya'da %5 olmak üzere farklı ülkelerde ısı ikame oranları farklı kaydedilmiştir.

Birleşik Krallık çimento endüstrisine ait beklentileri gösteren bir teknik-ekonomik çalışmada, çimento üretim büyümesine (%0'dan %20'ye doğru beklenen bir değişim aralığı) ve enerji etkinliğine dair iyileştirmelere bağlı olarak, ısı ikamenin %5'ten %10'a ve ikame atık yakıt kullanımının 125.000 ton/yıl'dan 600.000'e yükselmesi ön görülmüştür (Genon ve Brizio, 2008).

Çizelge 2.17 : Avrupa'da çimento endüstrisinde kullanılan ATY miktarları.

İkincil yakıtlar (ton/yıl)	AT	BE	DK	FI	FR	DE	GR	IR	IT	LU	NL	PO	ES	SE	UK	Toplam
Lastikler	30	25		8	200 ^e	240					-	6,5	13		25	550
Atık yağ	30	^{b,i}			520 ^{b,c}	180							9	6	120	1000
Solvent	7.5				25						10					
Evsel Arıtma Çamuru		15	7.5								30					50
Plastik / Kağıt	25		10		290											350
Kemik unu / Hayvan yağı	10	220			100				ⁱ							350
Ahşap				>0.5	80								2+5 ^g			100
Diğer	40 ^a	^{c,i}	22 ^d		115						>5 ^f		10	^{h,i}		200
Toplam	142,5	NI	40	8	820	930	0	0	(NI)	(NI)	>45	6,5	39	6	(>55)	2600
İkame oranı (%)	26	40	7		24	23			1,5	5-10			1.2	13		

Parantez içinde verilen sayılar eksik olarak rapor edilen miktarlardır.

^a Kağıt fiber atıkları.

^b Talaş yada başka bir emici madde ile karıştırılmış yeniden yapılandırılmış yakıtlar.

^c Otomotiv öğütücü atıkları ve halı/tekstil topakları.

^d Atık tekstil parçaları ve bazı zararsız belirsiz atıklar.

^e Tahmini.

^f Kağıt çamuru ve atık kauçuklar.

^g Talaş.

^h Kağıt, plastik ve halı kesikleri içeren çeşitli kaynaklardan türetilmiş pro-yakıt.

ⁱ Miktar mevcut değil.

3. ÇİMENTO ÜRETİMİ VE TÜRKİYE'DE ÇİMENTO SEKTÖRÜ

Çimento kelimesi; Latince de bağlayıcı anlamına gelen “Kementum” kelimesinden türetilmiştir. Çimento havada ve suda sertleşebilen ve sertleştikten sonra belirli sabit bir dayanımı ve hacmi olan “Hidrolik Bağlayıcı”dır. Burada bahsedilen Hidrolik Bağlayıcı ifadesinden, su ile karıştırıldığında sertleşebilen bağlayıcılar anlaşılmalıdır.

Çimento çeşitlerine bakıldığında, çoğunluğu Portland çimentoları veya Portland çimentosu klinkeri ile belirli oranlarda katkıların karıştırılması ile elde edilen çeşitlerdir.

Günümüzde piyasada bulunan çimentolar PÇ 32.5 (Portland çimento), TÇ 32.5 (Traslı çimento), KÇ 32.5 (Katkılı çimento) ve yüksek dayanımlı Portland çimentoları olan PÇ 42.5 ve PÇ 52.5' tur. PÇ 32.5 – PÇ 42.5 – PÇ 52.5 salt Portland çimento klinkeri içerirler. TÇ 32.5 ve KÇ 32.5'da ise, çimento klinkeri dışında belirli oranlarda katkı vardır.

Çimento üretim metot ve teknolojisinde en önemli farklılıklar döner fırın ünitelerinde kendini göstermektedir. Kuru ve yaş sistem dedigimiz iki türlü ana dizayn şekli olup, yaş sistemde farin adı verilen öğütülmüş ve homojenize edilmiş hammadde karışımı fırına verilmeden önce suyla karıştırılarak balçık halinde verilir. Bunun amacı, farin karışımını sulayarak toz emisyonlarını yok etmektir, bu sistemde siklonlar yoktur. Ancak yaş sistem maliyet açısından kuru sisteme göre dezavantajlı olduğundan günümüzde pek kullanılmamaktadır. Elektrik enerjisi tüketiminde yaş metodun 20 kWh/ton-çimento mertebelerinde bir avantaj göstermesine karşın, kuru metot ısı enerjisi tüketiminde yaş metoda göre üstünlük göstermektedir. Yaş sistemde gerekli tahsisler yapıldıktan ve homojenize edildikten sonra zincirli uzun fırınlara sevk edilen çamur giriş tarafındaki zincir bölgesinde nemini kaybeder, orta bölgede kalsine olur, çıkış tarafındaki sinter bölgesinde klinkerize olur ve soğutucuya dökülür. Bu sistem ancak hammaddenin çok rutubetli ve sedimanter marn ve kilden oluşması halinde ekonomik olabilir (Cembureau, 1999).

Kuru sistemli çimento üretimi ise konkasörde kırılmış hammaddenin farin değirmeninde öğütülerek homojenize edilmesi ile çalışır. Öğütme işlemi sırasında farin, fırından alınan yanma gazları ile siklonlardan geçirilerek kurutulur. Kuru sistem fırınlarda yalnızca kalsinasyon ve sinterleme işlemleri yapılmaktadır. Ön ısıtıcı ünitesinde döner fırın çıkışındaki gaz siklon kademelerinden geçerken enerjisini vererek soğur, homojene edilmiş farin ise ters yönde geçerken bu enerji ile ısınır ve kısmen kalsine olur. Kademe sayısı 4 veya daha fazla olabilmektedir. Kademe sayısı arttıkça ısı tasarrufu da artar.

Kuru sistem fırınların ön kalsinasyon sistemini de içermesi durumunda yakıt döner fırınından başka kalsinatörde de yakılmaktadır. Kalsinatöre sekonder hava olarak soğutmadan sıcak gaz alınmaktadır. Ön ısıtıcılı kuru sistem döner fırında, fırına girişteki kalsinasyon en fazla %40 iken, ön kalsinatörlü sistemlerde bu değer %80-90 oranına ulaşmaktadır. Ön kalsinatörlü döner fırınlarda kalsinatörde düşük kalorili kömür kullanımı sağlanabildiği gibi, ısı tüketimi düşer (%5-10) ve fırın kapasitesi artar.

Çimento üretiminde kuru ve yaş sistemler için dört ana işleme sürecinden bahsedebiliriz; kuru, yarı-kuru, yarıyaş ve yaş süreçler.

- Kuru süreçte hammaddeler öğütülür ve toz biçiminde farin olarak kurutulur. Kuru farin ön ısıtıcıya veya ön kalsinatöre veya nadiren de olsa uzun kuru fırına verilir.
- Yarı-kuru süreçte kuru farin su ile peletlenir fırından önce ızgaralı ön ısıtıcıya veya uzun fırına sürülür.
- Yarı-yaş süreçte çimento harcı filtre preslerde susuzlaştırılır. Filtre hamuru küçük topak olarak çıkartılır ve ızgaralı ön ısıtıcıya veya farin üretimi için doğrudan filtre hamuru kurutucusuna verilir.
- Yaş süreçte (genelde yüksek nem içerikli) hammaddeler pompalanabilir çimento harcı üretmek için suda öğütülür. Çimento harcı doğrudan fırına verilir veya harç kurutucusuna besleme yapılır.

Süreç seçimi büyük ölçüde hammaddelerin durumuna göre yapılır. Yaş süreçler çok daha fazla enerji tüketir ve sonuç olarak da daha maliyetlidir. Yarı-kuru süreçler ile işleyen fabrikalar da büyük bir yenileme durumunda kuru teknolojilere geçiş yapacaklardır (Cembureau, 1999).

Portland Çimentosu, dünyada ve Türkiye de en çok kullanılan ve üretilen çimentolardır.

İngiltere yakınlarında “Portland” adasından çıkarılan ve portland taşı adı verilen malzemeden üretilmesi nedeniyle “Portland Çimentosu” adını almıştır. Bugün değişik türlerde ve amaçlarda üretimi yapılabilmektedir.

Portland Çimento Çeşitleri:

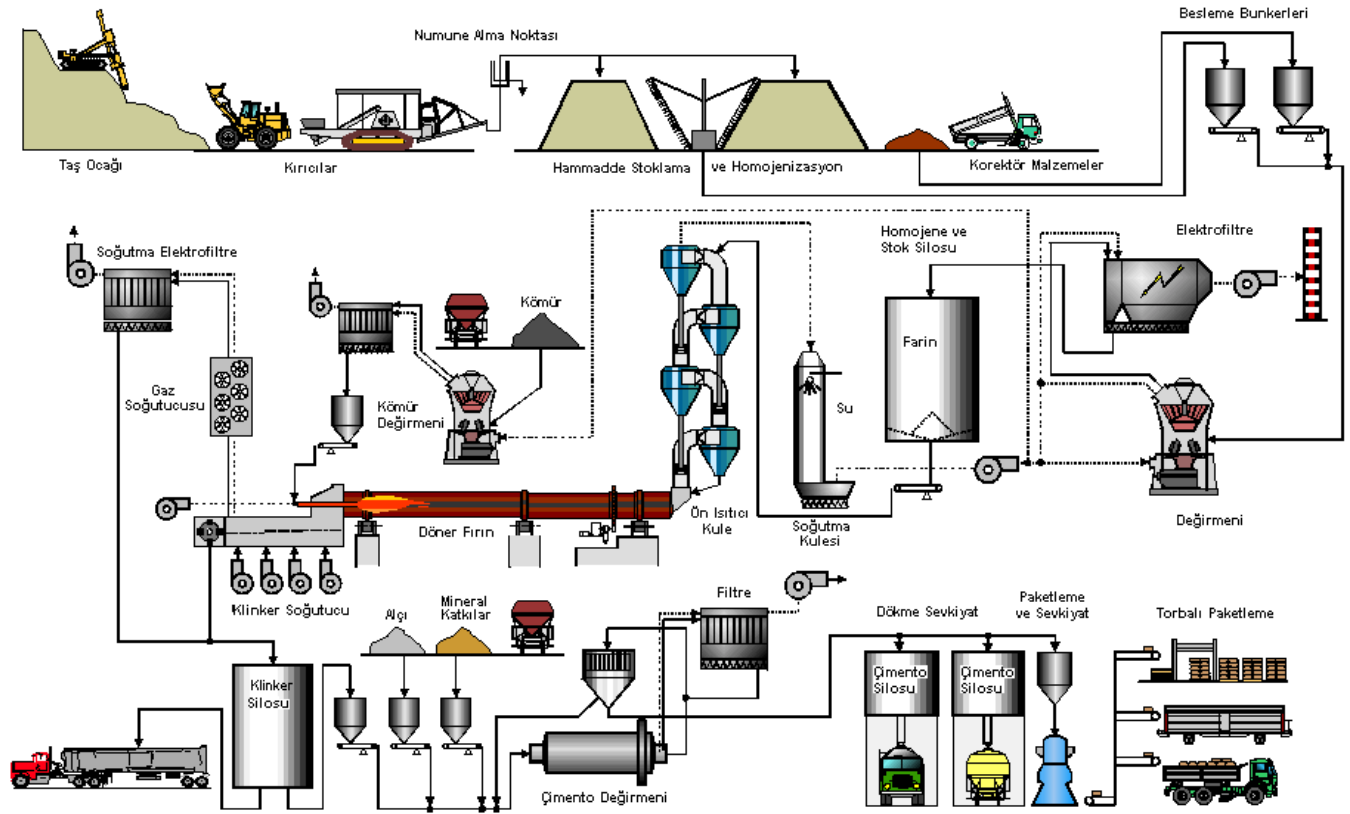
- Çabuk Sertleşen Portland Çimentosu
- Çabuk Donan Portland Çimentosu
- Demirli Portland Çimentosu
- Beyaz Portland Çimentosu
- Boksitli Portland Çimentosu
- Normal Portland Çimentosu (Gri Portland Çimentosu)
- Renkli Portland Çimentosu
- Suya Dayanıklı Portland Çimentosu

3.1 Çimento Üretimi

Gri portland çimentosunun katkılı ve katkısız olmak üzere genel anlamda iki türü vardır. Katkılı çimento, katkısız çimentonun içerisine bazı katkı maddeleri katılarak elde edilir. Değişik katkıları katılarak bu katkılı çimentonun ismi, katılan katkı türüne göre TÇ (Traslı Çimento),CÇ (Curufllu Çimento), PKÇ (Portland Kompoze Çimento) gibi isimler alırken katkı katılmayan gri çimento kısaca PÇ olarak bilinir ve aralarındaki tek fark da budur.

Çimento Üretim Aşamaları (Şekil 3.1):

- Ocaktan Hammadde Temini Ve Kırma
- Hammadde Homojenizasyon
- Hammadde Öğütme
- Pişirme
- Klinker Öğütme
- Çimento Paketleme Ve Sevkiyat



Şekil 3.1 : Çimento üretimi şeması.

3.1.1 Ocaktan hammadde temini ve kırma

Portland Çimentosu üretiminde ihtiyaç duyulan elementler, CaO (Kalsiyum Oksit), Fe₂O₃ (Demir 3 Oksit), SiO₂ (Silisyum 2 Oksit) ve Al₂O₃ (Alüminyum 3 Oksit)'dir. Portland Çimentosu üretiminde kullanılan hammaddeler ise kalker (kireçtaşı) ve kıldır.

Kalker (Kireçtaşları), tropik ve yarı tropik iklimlerde yaşayan tatlı su ve denizlerdeki organizmaların iskeletlerinden oluşmuşlardır. Bu tür şartlarda yaşayan organizmalar sudan CaCO_3 (Kalsiyum karbonat) alarak kendi iç ve dış iskeletlerini oluştururlar. Kabuklular, mercanlar, alg ve diğer organizmalar ölünce denizin dibine çökerek hemen tamamı CaCO_3 'ten oluşan sediment (tortul/çökelti) tabakaları meydana getirirler. Geniş alanlara taşınan kabuklular gömüldükten sonra sıkışıp birbirine yapışarak tamamen fosil kabuklardan oluşan kireçtaşlarını meydana getirirler.

Sediment kayalar (kalker) çimento endüstrisi açısından en önemli kayaç grubundandır ve yoğunluğu 2.7gr/cm^3 dür.

Doğada kalkerler çok nadir olarak saf halde yani %100 CaCO_3 olarak bulunurlar. Böyle olanlar kalsit ve aragonittir. CaCO_3 ihtiva eden hareketli yer altı suları hiç bir minerale karışmadan yüzeye çıkarılsa olduğu yere çökelen bu kalsiyum karbonatlar büyük oranda saf olurlar.

Saf kireçtaşları dışındaki yer yüzünde yaygın olarak bulunan gerçek denizel veya gölsel kireç taşları hemen her zaman %3-5 oranında başka mineral veya kırıntılar ihtiva ederler. Başlıcalar, oksit/sülfat gibi demir bileşikleri, magnezyum gibi mineraller, kum taneleri ve killerdir. Bu bakımdan kireç içindeki değişik orandaki minerallerden dolayı renk değişiklik gösterir.

Kil, taşların ve maden kütlelerinin parçalanmalarıyla hasıl olan 4 mikron veya daha küçük boyutlu taneciklerin yığılmasıyla oluşan bir sedimentar (tortul) kayaçtır.

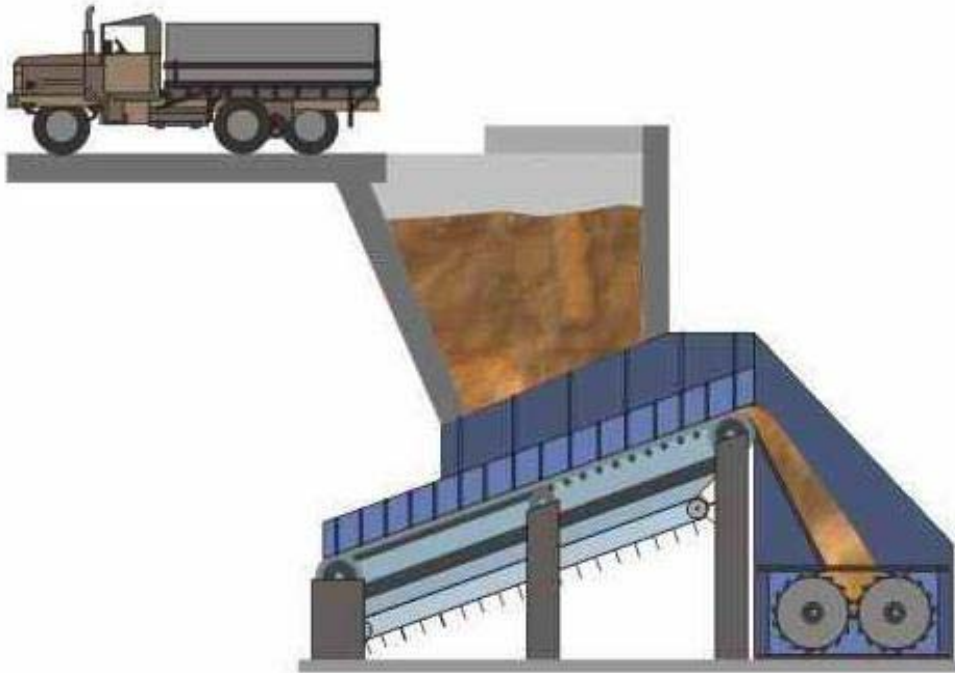
Ufak boyutlara ayrılan taş ve madenlerin büyük kısmı su veya diğer çözücü doğal sıvılar tarafından kimyevi yollarla eritilerek çözüldüklerinden taneli vasıflarını koruyamazlar ve farklı bileşiklere dönüşürler. Bunlardan sadece küçülen ve taneli vasıflarını koruyabilenler kili meydana getirirler. Çözünmeye karşı dayanıklı olanlar başta silisyum (Si), alüminyum (Al) olmak üzere magnezyum (Mg), demir (Fe), titanyum (Ti) gibi dayanıklı elemanlar olup birbirleriyle veya çözülmüş haldeki sodyum (Na), potasyum (K) ve kalsiyum (Ca) iyonlarıyla birleşerek kil minerallerini meydana getirirler (Buldu, 2006).

3.1.1.1 Ocak işletmesi

Çimento klinkeri üretiminde ana girdi olarak kullanılan kalker ve kil fabrika civarındaki ruhsatlı hammadde sahalarından sağlanır. Zira ana hammaddenin uzakta

olması ürüne ciddi anlamda maliyet getirir. Ocaklar açık işletme metodu ile işletilmekte olup malzeme hazırlığında önce lâğım delikleri delinerek içerisine dinamit ve anfodan oluşan patlayıcı madde yerleştirilir. Anfo, % 34,5 değerli amonyum nitrat gübresinin % 6 nispetinde mazotla homojen olarak karıştırılarak elde edilen aynı miktarda iş gören dinamite göre daha ucuz bir patlayıcıdır. Elektrikli kapsül veya katranlı fitil+adi kapsül yardımı ile patlatılarak yerinden çıkarılan malzeme lastik tekerli loder veya beko kepçe yardımıyla kamyonlara yüklenip konkasörlere sevk edilir. Konkasöre sevk Şekil 3.2’de verilmiştir.

Kırıcılarda yalnızca fiziksel işlem gerçekleştirilmektedir. Ortalama 0.5-1.0 m³ boyutundaki malzemeler, 30-40 mm boyutuna düşürülürler. Bunun amacı, taşıma kolaylığı sağlamak, öğütme öncesi ön boyut küçültmeyi sağlamak ve hammaddenin daha kolay karıştırılabilir, homojene edilebilir yapı elde etmektir.



Şekil 3.2 : Konkasöre sevk.

3.1.2 Hammadde homojenizasyon

Kalker hammadde karışımında kullanılan ana bileşen olup, sabit kimyasal komponentlere sahip değildir. Kalkerin kimyasal bileşimindeki sapmalar, farin ve klinker kalitesini dolayısıyla da çimento kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu

nedenle, bu sapmaların asgari düzeye indirilmesi için kalker ön homojenleştirme işlemine tabi tutulur. Örnek bir homojenizasyon sistemi Şekil 3.3'de verilmiştir. Malzeme dalgalanmasının minimize edilmesini ve değirmenlere dolayısıyla fırınlara, daha homojen hammadde beslememize olanak tanınır.



Şekil 3.3 : Örnek bir homojenizasyon sistemi.

3.1.3 Hammadde öğütme

Kalker ve Kil, belirli oranlarda karıştırıldıktan sonra öğütülmek üzere farin değirmenlerine beslenir. Bu karışımın öğütülmüş haline de farin denir. Değirmene beslenen malzemenin kimyasal içerik olarak kontrollü beslenmesi gerekmektedir.

Daha önce bahsedildiği üzere çimento üretiminde gerekli olan CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ karşılamak için kullanılan hammaddeler rasgele karıştırılmaz. Bu maddelerin belirli oranlarda olması gerekir. Bu oranların tayini için bazı değerler geliştirilmiştir:

Silikat Modülü;

$$M_s = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.1)$$

Silikat Modülünün, 2,3 – 2,7 arasında olması gerekir.

Alüminyum Modülü;

$$Ma = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3.2)$$

Alüminyum Modülünün, 1,3 – 1,6 arasında olması istenir.

Kireç Standardı;

$$KS = \frac{100 * CaO}{2,8 * SiO_2 + 1,18 * Al_2O_3 + 0,65 * Fe_2O_3} \quad (3.3)$$

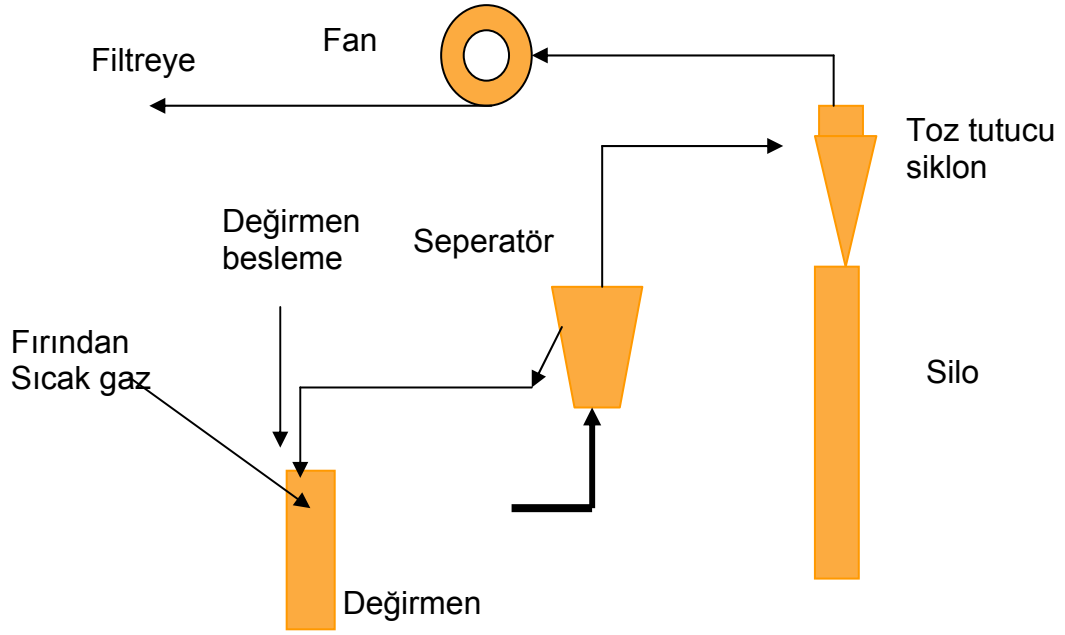
KS'nin 95-99 arasında olması gerekir. İdeal değer 96 dır.

Silikat Modülü, Alüminyum Modülü ve Kireç Standardı değerleri, yukarıda belirtilen sınırlar içinde olacak şekilde kalker ve kil oranları ayarlanır. Genelde işletilen ocağa göre değişebilmekle beraber, yukarıdaki değerleri verebilecek kalker oranı % 70 – 80, kil oranı, % 20 – 30 civarındadır.

Kil içindeki Fe_2O_3 yetmediği durumlarda dışardan demir cevheri, SiO_2 yetmediği durumlarda silis kumu ve Al_2O_3 yetmediği durumlarda ise düşük dozajlarda boksit ilave edilebilir.

Hammadde öğütme için kullanılan iki tip değirmen vardır, bunlardan biri bilyalı değirmenlerdir. Bilyalı Değirmenler, diğer adıyla yatay değirmenler, genel olarak iki kamaradan oluşur. Birinci kamara kurutma kamarasıdır. Burada kalker ve kil karışımı, fırından ve sıcak hava ocağından alınan sıcak gaz ile kurutularak, ikinci kamaraya verilir. İkinci kamara, öğütme kamarasıdır. Bu kamarada belirli miktarda ve değişik çaplarda bilyalar bulunur. Değirmenin dönüşü esnasında bilyalar birbirine çarparak arasındaki malzemeyi öğütür. Öğütülen malzeme, sirkülasyon fanının emişi vasıtasıyla seperatörden geçirilerek istenilen inceliğe ulaşmış olan malzeme yani farin silolara gönderilir, yeterince ince olmayan malzeme ise tekrar öğütülmek üzere seperatör geri dönüş bantı ile değirmene geri gönderilir.

Diğer değirmen tipi ise valsli değirmenlerdir. Valsli değirmenler, diğer adıyla dikey değirmenlerde ise prensip farklıdır. Dönen bir tabla üzerinde ezici valsler vardır. Dönen valsler, altındaki malzemeyi ezmek suretiyle öğütürler. Öğütülen malzeme, aynı şekilde fan emişi vasıtasıyla seperatörden geçirilerek silolara basılır (Şekil 3.4).

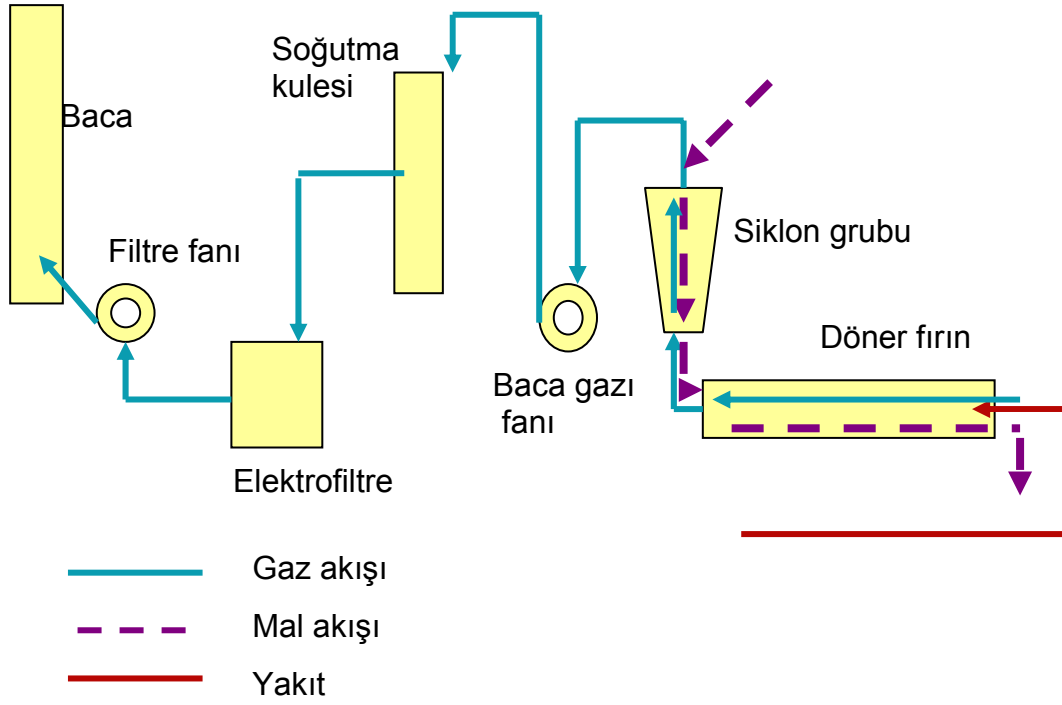


Şekil 3.4 : Hammadde öğütme prensibi.

Farin öğütümü amaçlı bu iki tip değirmeni kıyasladığımızda spesifik güç tüketimi dik değirmenlerde %10-15 daha düşüktür. Malzemenin değirmende kalma süresi bilyalı değirmenlerde 5-10 dakika iken, dik değirmenlerde bu süre 1 dakika kadardır. Sektördeki değirmenlerin %80'i hala bilyalı değirmenler olup farin öğütme amaçlı kullanılan değirmenlerde dik değirmen kullanımını çoğunluktadır.

3.1.4 Pişirme

Öğütülen malzeme, döner fırınlarda pişirilir ve çimentonun yarı mamulu yani "klinker" üretilmiş olur. Pişirmek üzere fırına verilmeden önce ön ısıtıcı siklonlara gönderilir. Burada, mal ile ters yönde olan gaz ile karşılaşan farin, gazın ısısını alarak sıcaklığı artar. Baca Gazı fanlarının fırından çekmiş olduğu sıcak gaz ile farin, siklonlarda sıcak gazla ısıtılarak, fırında pişmeye hazır hale getirilmiş olur. Yeterince ısıtıldıktan sonra fırına gönderilir. Bir çimento üretimindeki fırın grubunun çalışma prensibi Şekil 3.5'de verilmiştir.

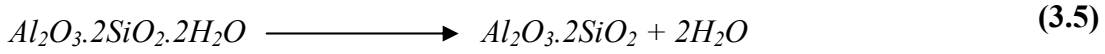


Şekil 3.5 : Bir çimento fabrikası fırın grubu çalışma prensibi.

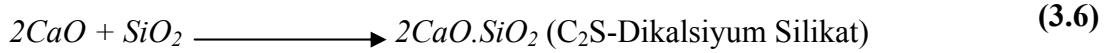
Siklonlara 60 °C de giren farın, birinci siklonda 300 °C, ikinci siklonda :500 °C, üçüncü siklonda :700 °C, dördüncü, siklonda :800 °C, fırın girişinde, 1100 °C civarına ulaşır. Fırında ise 1450 °C de pişirilir.

Isıtılan malzemede bazı kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bunlar;

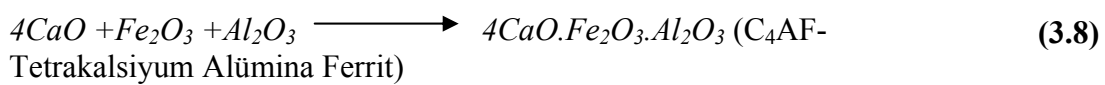
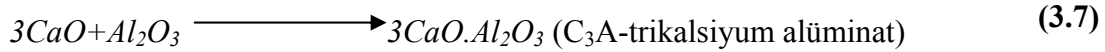
900 °C’de,



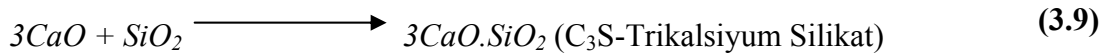
900 – 1200 °C’de,



1200 – 1300 °C’de,



1300 – 1450 °C’de,



Oluşan bu reaksiyonlara göre, fırın çıkışında oluşan yarı mamul klinkerin ana bileşenleri,

TrikalsiyumSilikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
DikalsiyumSilikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
TrikalsiyumAlumirat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
TetrakalsiyumAluminaferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Trikalsiyum Silikat, üretilen çimentonun dayanımı üzerinde en önemli etkisi olan fazdır. Normal olarak fırına beslenen farinde potansiyel C_3S oranı %52 ila %62 arasındadır. Ancak, farindeki potansiyel C_3S oranı % 65'in üzerinde ise, bu karışımın pişmesi çok zor olacak ve aynı zamanda bu farin ile anzast oluşumu da güçleşecektir (tuğlayı korumak için tuğla üzerinin makul bir kalınlıkta anzast ile kaplı olması istenir). C_3S , klinkerin en önemli yapıtaşdır. Kristal yapısındaki özellik nedeniyle, çimentonun erken dayanım kazanmasını sağlar. C_3S 'in artmasıyla ögünürlük kolaylaşır.

Dikalsiyum silikat oranı yaklaşık % 20 civarındadır. Hidratasyon ısı ve ilk dayanımı düşük bir mineraldir. C_2S , çimentonun geç dayanım kazanmasında etkilidir. Klinkerdeki mevcut C_3S ve C_2S fazları klinker fırında yaklaşık 1450 °C'de pişirildiğinde oluşmaktadır. Sinter bölgesindeki sıcaklık bazı sebeplerden dolayı değişebilir, bu da C_3S ve C_2S miktarlarının değişmesine neden olur. Çünkü C_3S oluşabilmesi için gerekli sıcaklık C_2S oluşumu için gerekli sıcaklıktan daha yüksektir. Yani daha düşük sıcaklıktaki pişirme daha yüksek C_2S ve daha düşük C_3S oluşumuna sebep olacaktır.

Trikalsiyum Aluminat, hidratasyon hızı en yüksek olan klinker mineralidir. İlk dayanımlar üzerine etkisi olumludur. Yapılan harcın kalıplanabilme, şekil verilebilme kısaca çalışılabilir olması (plastisite) üzerinde etkilidir. C_3A oranı arttıkça çimentoda plastisite de artmaktadır. Klinkerde C_3A miktarı % 6 – 10 arasında değişir. Bunun yanında, yüksek oranda C_3A içeren çimento ile yapılan betonun toprak veya su içerisindeki sülfata karşı dayanımı zayıftır.

TetrakalsiyumAluminaferrit çimentonun rengini etkileyen fazdır. Dayanım üzerine olumlu etkisi yoktur. Klinkerde %10 – 13 oranında bulunur. Bunu aşan durumlarda dayanım azalır.

Farin içeriğindeki kirecin % 100'ü serbest olmasına rağmen, pişme prosesi esnasında kirecin büyük bir bölümü diğer oksitlerle birleşerek yukarda bahsedilen dört tür mineral fazları oluşturur. Birleşmeyen yaklaşık % 0,5 ile % 1 arasındaki miktar ise serbest kireç olarak adlandırılır. Yani serbest kireç, silikat, alumina ve demir ile birleşmeyen CaO'dur. Buna kısaca serbest kireç denilir. Serbest kireç oranı arttıkça dayanım düşüklüğü görülür. Bu amaçla serbest kireç yüzdesinin maksimum %2 olması gerekmektedir.

Başarılı bir döner fırın operasyonu için ilk şart uygun ısı kaynağı kullanarak fırın çalışma sıcaklığını gerekli seviyeye getirmek ve fırın sisteminde meydana gelen ısı kayıplarını en aza indirerek o seviyede muhafaza etmektir. Gerekli ısı, yakıt içerisindeki Karbon (C), Hidrojen (H₂) ve Kükürtün (S) hava içerisindeki oksijen ile kimyasal reaksiyona girerek yanmanın meydana gelmesi sonucunda elde edilir. Yanmanın elde edilebilmesi için aşağıdaki şartların yerine getirilmesi gerekmektedir.

- Yeterli O₂ (Oksijen) bulunması,
- Yakıt – O₂ karışımını tutuşturacak yeterli sıcaklığın mevcut olması,
- Yanmanın fırın içerisinde tamamlanması için yeterli zamanın mevcut olması gerekmektedir.

Yanma tamamlandığında Karbondioksit (CO₂), Su Buharı (H₂O) ve Kükürt Dioksit (SO₂) meydana gelir.

Yetersiz hava yüzünden tam yanma gerçekleştirilemediği takdirde 1 kg karbonun yakılması sonucunda yaklaşık 2400 kcal ısı elde edilir. Tam yanma sağlanması halinde 1 kg karbonun yakılması ile 8100 kcal ısı elde edilebilecektir. Burada ortaya çıkan 5700 kcal'lik fark, yanmanın tam olarak gerçekleştirilebilmesinin, enerji verimliliği açısından önemini açıkça göstermektedir. O halde, tam yanmanın gerçekleştirilebilmesi için yeterli oksijenin temin edilmesi gerekmektedir. Gereğinden fazla oksijen de aynı zamanda gereksiz havanın ısıtılması sonucunu doğuracağından, optimum bir oksijen değerini yakalamak gerekmektedir. Bu değer, yanma sonundaki gaz içinde yaklaşık olarak bulunan %2 oksijen seviyesidir. Bu değerden fazla sapma, verimsiz yanmanın göstergesidir.

3.1.5 Klinker öğütme

Öğütme, çimento endüstrisinin en fazla enerji tüketen birimdir. Fırından alınan yarı mamül olan klinker, içine yaklaşık %3-5 oranında alçı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve belirli oranlarda da puzzolanik madde (tras, ponza, curuf, kalker, gibi) katılarak beraberce öğütüldüğünde çimento elde edilir. Çimento öğütmede kullanılan değirmenler yine hammaddede olduğu gibi iki türdür. Bunlar yine bilyalı ve valsli değirmenlerdir.

Çimento öğütmede kullanılan bilyalı değirmenler, hammadde öğütme değirmenlerinden farklıdır. Hammadde değirmenlerinde öğütmede tek kamara kullanılırken çimento öğütürken iki kamara kullanılır. İki kamaralı değirmenlerde birinci kamara yeterli incelikte mal öğütmek, ikinci kamarada nihai öğütme işi için kullanılmaktadır. İlk kamaradaki bölme plakası malzemenin kamara içinde kalış zamanı ve ikinci kamaraya geçen tanelerin büyüklüğünü kontrol etmeye yarar. Değirmenden çıkan mal seperatöre verilir, ince taneler siloya kalın taneler ise yeniden öğütülüp inceltmek üzere değirmene geri döner.

Çimento öğütmede kullanılan valsli değirmenler ise hammaddede olduğu prensiple çalışırlar.

Çimento Öğütme sırasında değirmenlerde, mal besleme, incelik, sıcaklık ve hava akışı gibi kontroller yapılır.

Çalışılan çimento cinsine göre klinker, alçı ve katkı beslemesi yapılır. Alçı çimentonun priz (donma) süresinin ayarlanması için kullanılır. Verilmesi gereken miktardan az veya çok verilmesi priz süresinin uzaması veya kısalmasına neden olur. Ayrıca değirmen çıkışı çimento sıcaklığının yüksek olması (135°C üzeri) alçının dehidratasyona uğramasına yani bozulmasına neden olur bu durumda priz süresini dolayısıyla çimento kalitesini etkiler. Çimento çıkış sıcaklığı $80 - 120^\circ\text{C}$ arasında tutulur.

3.1.5.1 Çimento katkı maddeleri

Çimento katkı maddeleri, alçıtaşı, mermer, tras ve granüle yüksek fırın curufudur. Alçıtaşı, buharlaştırıcı şartların sürdüğü sıg su ortamlarında oluşan tuzlardır. Genel formülü $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dur. Çimento imalinde donmayı düzenlemek için kullanılır. Bünyesinde su bulunmayan (yarım mol su ihtiva eden) türüne anhidrit denir.

Mermer, kalker (kireçtaşı) olarak teşekkül etmiş taşların uzun jeolojik süreç içinde büyük basınç ve sıcaklık altında kristalli hale dönmesi sonucu oluşur. Beyaz çimentoda katkı maddesi olarak kullanılır. Genel formülü Kireçtaşı ile aynıdır: (CaCO₃).

Tras, katkılı çimento üretilmesinde kullanılan bir tüf cinsidir. Volkanik faaliyetlerde püsküren tozların (küllerin) birikiminden meydana gelen hazır pişmiş malzeme olduğundan klinkere doğrudan katılır. Sulu ortamda kireçle karıştırılınca büyük bir hidrolik (bağlayıcı) özellik gösterir.

Granüle yüksek fırın curufu, demir cevheri yüksek fırında eritilip arıtılırken elde edilen uygun bileşimdeki erimiş curufun hızla soğutulması ile elde edilir. Granüle yüksek fırın curufu, uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellik gösteren, kütlece en az 2/3 oranında camsı curuf ihtiva eden bir hidrolik maddedir. Granüle yüksek fırın curufu kütlece en az 2/3'ü, CaO, MgO ve SiO₂ toplamından ibaret olmalıdır. Geri kalan kısmı az miktarda diğer bileşiklerle birlikte Al₂O₃ ihtiva etmeli, (CaO+MgO)/SiO₂ oranı kütlece 1.0'i geçmemelidir.

3.1.6 Paketleme ve sevkiyat

Üretilen çimento, kendi stok silosuna gönderilir. Çimentonun depo silolarına taşınması için gerek havalı gerekse mekanik taşıyıcı sistemler kullanılabilir. Farklı çimentolar silolarda farklı şekillerde depolanır. Çimentonun depolanması için farklı silo çeşitleri gereklidir. Bu konuda insanlardan kaynaklanabilecek hataları sıfıra indirmek için gerekli elektronik donanım ve sinyal sistemi olmasında çimento üreticisi açısından fayda vardır.

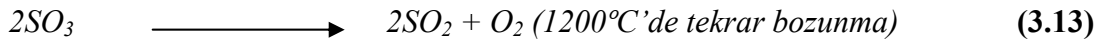
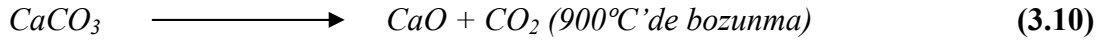
Çimento satışı ve sevkiyatı 50 kg lık torbalarda, 1500 kg'lık big bag diye bilinen çuvallarda ve dökme olarak üç türlü yapılır.

3.2 Çimento Üretiminde Oluşan Emisyonlar ve Kontrol Teknikleri

Çimento üretimi sırasında en önemli çevresel sorun atmosfere verilen kirletici gaz emisyonlarıdır. Yüksek miktarlarda oluşan emisyonların başında azot oksitler (NO_x), ve toz gelir. Tesiste oluşan atık su genelde yüzeyden akıtma ve soğutma suyu ile sınırlı olduğundan çimento üretiminde su kirliliği önemli bir etkiye sahip değildir. Ancak; yakıtların depolandığı açık alanlarda ve atıkların yüklenip boşaltılması sırasında

meydana gelen atık su, toprak ve yeraltı suyu kirlenmesi açısından potansiyel bir kirlenici kaynağı olabilmektedir.

Çimento üretimi sırasında, kullanılan kireçtaşının (CaCO_3) 900°C 'de bozunması ve yakıtın yanması ile yanma ürünleri oluşur;



SO_2 proses esnasında hammaddedeki CaO ve CaCO_3 ile reaksiyona girerek mamulün bünyesinde bağlanır;



Bu reaksiyonun verimliliği %100'e yakındır. Dolayısı ile çimento fabrikalarından çevreye yayılan SO_2 emisyonu ilgili yönetmeliklerce verilen sınır değerler aşılmaz. Bu durum özellikle çimento üretiminde yüksek kükürt ve kül muhtevalı kömürlerin kullanımına olanak verir. İzlenmesi gereken diğer emisyonlar karbonmonoksit (CO), Toplam Organik Karbon (TOC) Ve Uçucu Organik Bileşikler (VOC), Poliklorlu dibenzo-para-dioksinler (PCDD), poliklorludibenzofuranlar (PCDF), Hidroklorik Asit (HCl), Hisroflorik Asit (HF) ve ağır metallerdir (Cembureau, 1999).

- Azot Oksitler (NO_x),
- Karbonmonoksit (CO),
- Kükürt Oksitler (SO_x)
- Toz,
- Toplam Organik Karbon (TOC) ve Uçucu organik Bileşikler (VOC),
- PCDD 'ler ve PCDF 'ler,
- Ağır Metaller,
- HF ,
- HCl .

Çimento üretiminde kontrol teknikleri, klinkerleştirme sürecinin optimizasyonu ısı tüketimini azaltmak, klinkerin kalitesini iyileştirmek ve ekipmanların ömrünü arttırmak amacıyla yapılır. NO_x , SO_2 ve toz gibi emisyonların azaltılması ise bu optimizasyonun ikinci derecedeki etkileridir. Süreç parametrelerinin, tasarım değerlerine yakın, sabit ve istikrarlı işletimi fırın emisyonları için de faydalı olmaktadır. Optimizasyon hammaddenin homojenizasyonu, düzgün kömür dozajı ve klinker soğutmanın iyileştirilmesi gibi önlemleri de kapsamaktadır. İyi bir huni, taşıyıcı konveyör ve gravimetrik katı yakıt besleme sistemi gibi tasarımlarla katı yakıt besleme oranının sabit kalmasını sağlamak önemlidir.

NO_x emisyonu, alev ve pişirme sıcaklıkları düşürülerek ve yakıt tüketimi azaltılarak azaltılabilmektedir. NO_x kontrolü için oksijen miktarının yani hava fazlalığının kontrol edilmesi önemlidir. Genelde çimento fırınının arka çıkışındaki oksijen miktarı yani fazla hava ne kadar düşükse, NO_x o kadar düşük olur. Ancak daha düşük oksijen düzeylerinde CO ve SO_2 artışı söz konusu olduğu için bunun dengelenmesi gerekir.

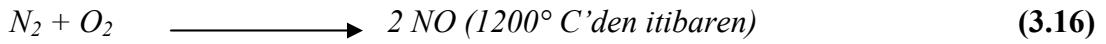
SO_2 emisyonu, düşük alev ve pişirme sıcaklıkları, fırının sabit/istikrarlı çalışması, fırın içindeki okside edici ortam nedeniyle SO_2 'in serbest hale geçmesinin azalmasıyla kendini gösterir. Fırın optimizasyonunun SO_2 emisyonlarına etkisi uzun yaş ve kuru fırınlarda önemli ölçüdedir ve %50'ye varan oranlarda SO_2 düşüşleri görülmüştür. Fırın optimizasyonu tüm fırınlarda uygulanabilir ve fırın dozaj sistemleri, homojenizasyon siloları, ön karışım/harmanlama yatakları/tabakaları ve daha yeni klinker soğutucularının kurulmasına kadar uzanan bir çok unsuru kapsayabilmektedir.

3.2.1 Azot oksit emisyonları

Çimento fabrikalarından kaynaklanan azot oksitler (NO_x), hava kirliliği bakımından büyük önem taşırlar. NO, renksiz, toksik, NO_2 ise kırmızı kahverengi, toksik bir gazdır. Çimento fırınları çıkış gazlarında en fazla bulunan gaz, azot oksitleridir. NO_x üretiminin iki ana kaynağı vardır:

- Isıl NO_x : Yanma havasındaki azotun oksijenle reaksiyona geçmesi sonucu oluşur,
- Yakıt NO_x : Kimyasal olarak yakıtta bulunan azotun havadaki oksijenle reaksiyona geçmesi sonucu oluşur.

Isıl NO_x 1200°C'nin üzerinde yanma havasında azot ile oksijen moleküllerinin reaksiyona geçmesi sonucu oluşur. Isıl NO_x fırının pişirme bölgesinde ortaya çıkar. Pişirme bölgesinde oluşan ısıl NO_x miktarı gerek pişirme bölgesi sıcaklığı gerekse oksijen muhtevasına bağlıdır. Isıl NO_x için reaksiyon oranı artan sıcaklıkla artış gösterir. Bu nedenle daha sıcak pişirme bölgesine ihtiyaç duyan pişirilmesi zor olan karışımları işleyen fırınlar, daha kolay pişirilen karışımları işleyen fırınlardan daha fazla NO_x üretmeye meyilli olur. Reaksiyona girme oranı, artan oksijen içeriğiyle birlikte de artar. Yakıtta bulunan NO_x ise yakıtta bulunan azotun yanmasıyla oluşur. Yakıttaki azot oksijenle reaksiyona geçer. Bu reaksiyonlar geri dönüşümlü reaksiyonlar olup, denge konsantrasyonları sıcaklık ve kimyasal kompozisyona bağlıdır.



Yüksek sıcaklıklarda, azot gazıyla oksijen reaksiyona girerek NO oluşur, NO havanın oksijeniyle yükseltgenerek NO₂ haline dönüşür. Ancak NO₂ yüksek sıcaklıklarda dayanıklı değildir ve hemen parçalanarak oksijen ve NO gazına indirgenir. Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen NO gazı kapalı sistemde yavaş yavaş soğutulursa, bir dengeye göre parçalanır, azot ve oksijen gazları meydana gelir. Eğer ani olarak soğutulursa, sabitleşir ve %2-3 kadarı NO₂ haline dönüşür.

Hava/yakıt oranının iyi ayarlanması NO_x'lerin oluşumunu azaltır. Ancak buradaki hava atmosferdeki gibi %21 oksijen ihtiva eden hava değil, inert bir gazla (baca gazıyla) seyreltilmiş ve içinde oksijen yüzdesi düşürülmüş bir havadır. Böyle bir hava normal hava içine %15-20 oranında baca gazı enjekte edilerek elde edilir. Yakıcı karışım içindeki oksijen yüzdesi düşürülür. Böyle bir gaz, yakıtla karıştırılıp yakıldığı zaman ortamın sıcaklığı yükselmez ve dolayısıyla CO meydana gelmez. Onun yerine CO₂ meydana gelir ve yanma tam olur. Yanma tam olduğu için ortamda oksijen kalmaz, bunun sonucunda da NO ve NO₂ oluşmaz. Sıcaklıkların ve oksijen içeriğinin yanında NO_x oluşumu, alevin biçimine ve sıcaklığına, yanma odasının boyutlarına, yakıtın azot içeriğine, neme, brülör tasarımına ve yanma süresine de bağlıdır (Cembureau, 1999).

3.2.1.1 Azot oksit emisyonları kontrol teknikleri

Çimento fabrikalarında alınan süreç kontrol önlemleri, iyileştirilmiş ateşleme tekniği, ve en uygun yakıt seçimi gibi genel birincil optimizasyon önlemleri ile NO_x emisyonunda azaltma kaydedilmiştir. Çizelge 3.1’de çimento üretimi sırasında oluşan NO_x emisyonlarını düşürücü etkilere sahip teknikler verilmiştir (IPPC, 2001, Kuleli, 2010)

Çizelge 3.1 : NO_x emisyonunu azaltma teknikleri.

Teknik	Fırın Sisteminde Uygulanabilirliği	Azaltma Etkinliği
Alev Soğutma	Tüm	% 0 – 50
Düşük Nox Brülörü	Tüm	% 0 – 30
Aşamalı Yanma	Ön Kireçleme Ön Isıtma	% 10 – 50
Fırın Ortasından Ateşleme	Uzun	% 20 – 40
Mineralleştirilmiş Klinker	Hepsi	% 10 – 15
SNCR (Selective Non Catalitic Reaction)	Kalsinatör	% 10 – 85

Alev soğutma

Yakıtta veya doğrudan aleve su eklenmesi sıcaklığı düşürür ve hidroksil radikallerinin konsantrasyonunu artırır. Bu durum pişirme bölgesinde NO_x redüksiyonuna olumlu etki edebilir; redüksiyonun etkinliği %0-50 olarak ölçülmüştür. Fırının toplam CO₂ emisyonu ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olan, %0.1-1.5 civarında ilave CO₂ emisyon oranlarına yol açan suyu buharlaştırmak için ek ısı gerekmektedir. Ancak su püskürtme fırının çalışmasında sorunlarına yol açabilmektedir (IPPC, 2001).

Düşük NO_x brülörü kullanmak

Düşük NO_x brülörleri tasarım detaylarında farklılık göstermektedir, ancak temel olarak eşmerkezli tüplerden fırının içine yakıt ve hava püskürtülmektedir. Primer hava oranı stokiometrik yanma için gerekli olan havanın %6-10’u kadardır. Bu brülör tasarımının amacı özellikle yakıttaki uçucu bileşikleri oksijensiz bir

atmosferde erken ateşlemek ve NO_x oluşumunu azaltmaktır. Başarılı bir şekilde kurulduğunda %30'a varan NO_x emisyonlarında azalma elde edilebilir. Düşük NO_x brülörleri gerek ana fırında gerekse ön kireçleme ocağında ve tüm döner fırınlara uygulanabilir ve ölçülen emisyon düzeyleri 600-1000 mg/Nm³'dür (IPPC, 2001).

Aşamalı yanma

Bu teknik özel tasarlanmış ön kireçleme ocaklarında ve birkaç yanma aşaması olan çimento fırınlarında uygulanır. Birinci yanma aşaması; döner fırında, klinker pişirme süreci için optimum koşullar altında meydana gelir. İkinci yanma aşaması; sinterleme bölgesinde, üretilen azot oksitlerin bir kısmının çözülmesine yol açan redüksiyon atmosferinin oluşmasını sağlayan, fırın ağzında bulunan ikinci bir brülörde meydana gelir. Bu bölgedeki yüksek sıcaklık NO_x'i azot gazına dönüştürmek için çok uygundur. Aşamalı ateşleme teknolojisi genelde sadece ön kireçleme ocağı olan fırınlarda kullanılabilir. Ön kireçleme ocağı olmayan siklonlu ön ısıtma sistemlerinde önemli ölçüde tesis değişikliklerine ihtiyaç vardır. Bazı iyi optimize edilmiş tesisler çok aşamalı yanma ile NO_x'i 500 mg/Nm³'ün altında izleyebilmişlerdir. Farklı aşamalı yanma sistemlerine sahip tesislerde yapılan ölçümler sonucunda %50'ye varan oranlarda azalış gösteren NO_x emisyonları elde edilmiştir. Ancak bir yandan NO_x emisyonlarını düşürürken diğer taraftan CO emisyonlarının artışına, dolayısıyla aradaki dengenin iyi sağlanmasına dikkat edilmelidir (IPPC, 2001).

Fırın ortasından ateşleme

Uzun yaş ve kuru fırınlarda fırın ortasından yığın halindeki yakıt ile ateşleme yapılması sonucu oluşan redüksiyon bölgesi, NO_x emisyonlarını %20-40 arası azaltabilmektedir. Uzun fırınların çıkısına yakın bölgelerde genelde 900-1000°C sıcaklık aralığına erişebilmek için atık yakıtların kullanımında bazı tesislerde fırın ortasından ateşleme sistemleri kurulmuştur (IPPC, 2001).

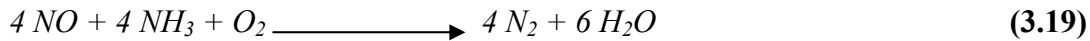
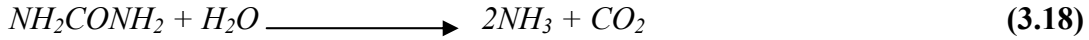
Mineralize klinker kullanımı

Mineralleştiricilerin hammaddeye eklenmesi klinker kalitesini ayarlamak ve sinterleme bölgesinin sıcaklığını azaltmak için kullanılan bir teknolojidir. Böylece pişirme sıcaklığı düşürülerek NO_x oluşumu önlenmiş olur. NO_x oluşumunda %10 – 15 arasında bir azalma olabilmektedir. Kalsiyum florür bir mineralleştirici örneğidir, ancak aşırı oranlarda eklenmesi HF salınımlarını arttırabilmektedir (IPPC, 2001).

SNCR (Selective Non Catalitic Reaction) teknolojisi

SNCR teknolojisi, NH₂-X (amonyak, üre) bileşiklerinin döner fırın gazları içerisine 800°C – 1150°C aralıklarında enjeksiyonu ile NO ve NO₂ bileşiklerini serbest N₂ (Azot Gazı) bileşiğine dönüştürmek için kullanılır. Formülasyon aşağıda verilmiştir.

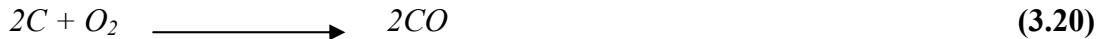
Üre (NH₂CONH₂) amonyaktan (NH₃) daha kolay elde edilebilir ve daha az tehlikeli olduğu için reaksiyon başlangıcında tercih sebebidir. Proseste de NH₃ gibi davranır:



3.2.2 Karbonmonoksit emisyonları

CO emisyonu, hammadde içindeki organik madde içeriği ile fırındaki yakıtın oksijen eksikliğinden dolayı tam yanamamasından meydana gelir. Hammadde içeriğine bağlı olarak kg klinker başına 1.5 ila 6 g arasında organik karbon doğal hammadde ile birlikte fırın sürecine girer. Kaynağı farklı olan farinin kullanıldığı denemelerde, %3 oksijen varlığında hammadde içindeki organik bileşiklerin %85-95'inin CO₂'e dönüştüğünü göstermiştir ancak aynı zamanda bunların %5-15'i CO'ye dönüşmüştür. Uçucu organik karbon bileşiklerinin (VOC) salınımı da bu koşullar altında % 1'in çok altında bulunmuştur.

Hammaddeden ve yakıttan gelen karbon, ortamdaki oksijenle reaksiyona girer:



CO oluşum reaksiyon hızı CO₂ oluşum reaksiyon hızından 10 kat daha büyüktür. Bu nedenle yanmada önce CO, onun yanmasıyla CO₂ meydana gelir. Buna göre ortamda ikinci reaksiyon için gerekli O₂ bulunmazsa, yanma tam olmaz ve CO emisyonu artar. Ayrıca fırın ünitesinde tam yanma olabilmesi için gerekli oksijen olduğu halde, sıcaklığın yüksek olması nedeniyle birinci reaksiyon gerçekleşir, oksijen fazlası ise yaramaz. Hatta ortamda bulunan CO₂ bile yaklaşık 1750°C gibi yüksek sıcaklıklarda, CO ve O₂'ye parçalanmaktadır (Cembureau, 1999).

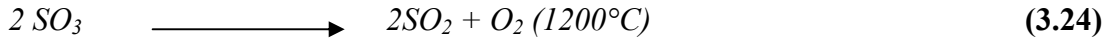
3.2.3 Kükürt oksit emisyonları

Çimento üretimi sırasında oluşan kükürt oksit (SO₂) emisyonları, hammaddenin ve kullanılan yakıtın kükürt içeriğine bağlı olmakla beraber az veya sıfır uçucu sülfür

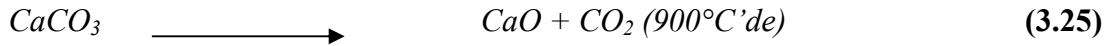
içeriğinde olan hammaddeleri işleyen fırınların SO₂ emisyonları ile ilgili pek sorunu yoktur. Emisyon azaltımı yapılmadan da bazı fırınlardan oluşan SO₂ emisyon konsantrasyonları 10 mg/m³'den düşüktür. Hammadde ve yakıtın bünyesindeki kükürt ortamdaki oksijenle reaksiyona girer ve SO₂ ile SO₃ meydana gelir.



Bu reaksiyonlardan SO₂ oluşumu hızlı gerçekleşirken, SO₃ oluşum hızı çok yavaştır. Bundan dolayı kükürt oksitlerin arasında SO₃ payı yaklaşık %1-2 kadardır ve yüksek sıcaklıklarda SO₂ haline dönüşür.



Hammaddedeki CaCO₃ yüksek sıcaklıkta;



Reaksiyonlarını vermekte ve sonuçta katı halde olan CaSO₄ meydana gelmektedir. Organik sülfür veya pirit (FeS) içeren hammaddeler kullanıldığında SO₂ emisyonları yüksek olabilir. Düşük oranda SO₃ üretilmesine ve redüksiyon koşulları altında H₂S'in de belirebilmesine rağmen serbest kalan ana sülfür bileşiği %99 oranında SO₂'dir. Sülfid ve organik bileşikli sülfür olarak ortaya çıkan hammaddenin içindeki sülfür, buharlaşır ve % 30'u veya daha fazlası ön ısıtma sürecinin ilk aşamasında salınabilir. Buradan çıkan gazlar doğrudan atmosfere veya hammadde değirmeni çalışır vaziyetteyse değirmene geri beslenir. Hammadde değirmeninde SO₂'in %20-70'i ince öğütülmüş hammaddeler tarafından tutulur. Buradan da anlaşılacağı gibi hammadde değirmeninin SO₂ emisyonunu düşürücü özelliği vardır.

Ön ısıtma fırınlarına beslenen yakıttaki kükürt de, sinterleme bölgesi, kireçleme bölgesi ve ön ısıtıcının alkali ortamından dolayı SO₂ emisyonlarına yol açmayacaktır. Bu kükürt klinker içerisinde tutulur. Oksijen fazlalığı (%1-3 arası O₂ fırında yeterli çimento ürün kalitesi temini için bırakılır) salınan her sülfid bileşiğini SO₂'ye oksitler. Kükürtün çoğu klinkerde sülfat olarak kalmaktadır (Cembureau, 1999).

3.2.3.1 Kükürt oksit emisyonları kontrol teknikleri

SO₂ kontrolünde ilk adım, düzgün fırın işletimi için, optimum oksijen konsantrasyonun sağlanması, hammadde ve yakıt seçimi gibi birincil süreç optimizasyon önlemleridir. Uzun fırınların oksijen içeriğini arttırmak SO₂ düzeyini azaltır ancak NO_x düzeyini artırır. Fırın intikal çıkışındaki oksijen içeriği ayarlanarak NO_x/SO₂/CO denge optimizasyonu ile baca gazı emisyonları korunabilir. Bu önlemlerin yeterli olmaması durumunda fırın çıkışında ek önlemler alınabilmektedir. Çizelge 3.2'de çimento imalatından kaynaklanan SO₂ emisyonları üzerinde azaltıcı etkisi olan tekniklerin bir özeti verilmiştir.

Çizelge 3.2 : SO₂ emisyonlarını azaltıcı teknikler.

Teknik	Fırın Sisteminde Uygulanabilirliği	Azaltma Etkinliği
Abzorban Eki	Tüm	% 60 - 80
Kuru Yıkayıcılar	Kuru	% 90'a kadar
Islak Yıkayıcılar	Tüm	> % 90
Aktif Karbon	Kuru	% 95'e kadar

Absorban eki

Söndürülmüş kireç (Ca(OH)₂), sönmemiş kireç (CaO) veya yüksek CaO içerikli aktive uçucu kül gibi absorbanların, fırının çıkış gazına eklenmesi SO₂'in bir kısmını absorblayabilmektedir. Bu absorbanların püskürtülmesi hem kuru hem de yaş süreçlere uygulanabilmektedir. Yapılan çalışmalarda ön ısıtmalı fırın sistemlerinde, söndürülmüş kireci doğrudan çıkış gazına püskürtmenin, söndürülmüş kirecin fırın beslemesine eklenmesinden daha az etkili olduğu görülmüştür. SO₂ kireçle CaSO₃ ve CaSO₄'a dönüşecek şekilde reaksiyona girer, bunun üzerine ham malzemelerle birlikte fırına girer ve klinkerin yapıtaşını oluşturur. Bu teknik orta düzeyde SO₂ konsantrasyonu olan gaz akımlarını temizlemek için uygun olup, 400°C'nin üstünde bir sıcaklıkta uygulanabilmektedir. Yüksek yüzeyel alanı ve gözenekliliği olan Ca(OH)₂ bazlı bir absorbanın kullanılması ayrıca tavsiye edilmektedir. Ön ısıtmalı fırın sistemlerinde Ca(OH)₂ absorban püskürtmesi ile SO₂ emisyonunda %60-80'lik bir azalma sağlanır.

Kuru yıkayıcılar

1500 mg/Nm³'ün üzerinde SO₂ emisyonlarını azaltmak için ayrı bir yıkayıcının olması gerekir. Bir kuru yıkayıcıda söndürülmüş kireç ve ham malzeme karışımından oluşan akışkan bir yatak oluşturmak için venturi reaktör kolonu kullanır. İlk SO₂ konsantrasyonu 3000 mg/m³ olduğunda 300 mg/m³ SO₂ emisyonuna karşılık gelen %90'lık bir azalma elde edilebilir. Bununla birlikte kuru yıkayıcı HCl ve HF emisyonlarını da düşürür. Kuru yıkayıcılar tüm kuru fırın türlerine uygulanabilmektedir.

Islak yıkayıcılar

Islak yıkayıcılar, kömürün kullanılan çimento fabrikalarında baca gazı desülfürizasyonunda en yaygın olarak kullanılan tekniktir. SO_x püskürtme kulesinden püskürtülen bir sıvı çimento harcı tarafından emilir veya sıvı, çimento harcı içerisine hava kabarcıkları oluşturarak alınır. Absorban kalsiyum karbonat, hidroksit veya oksit olabilir. Çimento harcı, çıkış gazına doğru karşı akımdan püskürtülür ve oluşan sülfidin hava ile oksitlenerek sülfata dönüştüğü ve kalsiyum sülfat dihidrat yıkayıcının alt bölümünde bulunan bir geri dönüştürme tankında toplanır. Dihidrat ayrılır, çimento öğütülmesinde alçı olarak kullanılır, su ise yıkayıcıya geri gönderilir. SO₂ emisyonundaki azalma %90'dan daha fazla olabilir.

Aktif karbon kullanımı

SO₂, organik bileşikler, ağır metaller, NH₃, NH₄ bileşikleri, HCl, HF ve toz gibi kirleticiler (elektrik çöktürücüden veya bez filtresinden sonra) aktif karbon üzerine emme ile baca gazından temizlenebilir. İsviçre'de ön ısıtmalı, dört aşamalı siklonlu fırın ve 2000 ton/gün klinker kapasiteli bir çimento tesisinde kurulan aktif karbon filtresi sonrasında ölçümler SO₂, ağır metal ve PCDD/F'lerle ilgili olarak yüksek arıtma etkinliği olduğunu göstermiştir. 100 günlük bir denemede filtre girişindeki SO₂ konsantrasyonları 50-600 mg/m³ arasında değişirken, çıkış konsantrasyonları her zaman 50mg/m³'ün önemli ölçüde altında kalmıştır. Toz konsantrasyonları da 30 mg/m³'ten 10 mg/m³'ün önemli ölçüde altına düşmüştür (IPPC, 2001).

3.2.4 Toz emisyonları

Döner fırın bacalarından çıkan toz emisyonu, çimento üretiminde çevreye yayılan önemli bir emisyon kaynağıdır. Önemli toz kaynakları fırınlar, hammadde

değirmenleri, klinker soğutucuları ve çimento değirmenleridir. Tüm bu süreçlerde hammaddenin kendisinden ve kömür kullanımından kaynaklanan toz partikülleri oluşur. Kömürden kaynaklanan toz emisyonu içinde hem organik, hem de inorganik maddeler bulunur. Kömürdeki inorganik maddelerin çok büyük bir kısmı cüruf yani alüminyum silikat halindedir.

Kaçak toz emisyonları malzemelerin transferleri sırasında, yükleme, boşaltma ve depolanma sırasında oluşabilir. Klinker veya çimentonun ambalajlanması ve sevkiyatı sırasında da partiküller salınabilir. Kaçak emisyonların etkisi çevredeki toz seviyesinin artması şeklinde olurken, sürecin devamında baca gazlarından salınan tozlar çok daha geniş bir alanın hava kalitesi üzerinde etkili yaratabilmektedir (Cembureau, 1999).

3.2.4.1 Toz emisyonları kontrol teknikleri

Çimento fabrikalarından kaynaklanan toz emisyonlarının üç ana nokta kaynağı vardır. Bunlar fırın sistemleri, klinker soğutucuları ve çimento değirmenleridir. Bu üç kaynak için bugün elektrostatik çöktürücüler ve torbalı filtreler kullanılmaktadır. Maddelerin yüklenip boşlatılması ve depolanması, hammadde ve yakıtların kırılması ve öğütülmesi sırasında oluşan kaçak toz salınımı da önemlidir. Çizelge 3.3’de toz emisyonu kontrol teknikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Toz emisyonu kontrol teknikleri.

Teknik	Fırın Sisteminde Uygulanabilirliği	Toz Emisyonu mg/m ³
	Tüm fırın sistemleri	5-50
Elektrostatik Çöktürücüler	Klinker Soğutucuları	5-50
	Çimento Değirmenleri	5-50
	Tüm fırın sistemleri	5-50
Torbalı Filtreler	Klinker Soğutucuları	5-50
	Çimento Değirmenleri	5-50

Günlük ortalamalar, normal şartlarda, yani, kuru gaz, 273 K, 101.3 kPa ve %10 O₂ referansı ile alınmıştır. Elektrostatik çöktürücü ve torbalı filtrelerin hem avantajı hem dezavantajı vardır. Her iki türün tozu temizleme etkililiği fırın normal çalışırken çok yüksektir. Yüksek CO konsantrasyonu, fırın çalıştırma, fırın kapatma veya

hammadde değirmeni çalışır veya çalışmaz durumdayken ki gibi özel koşullarda elektrostatik ktrclerin etkinliği önemli ölçüde azalabilirken torbalı filtreler etkililiklerini korur. Bu nedenle torbalı filtrelere iyi bakım yapılırsa ve filtre torbaları periyodik olarak değiştirilirse daha üstün bir etkinliğe sahip olabilirler. Torbalı filtrelerin dezavantajı kullanılmış filtre torbalarının, atık kabul edildiği için ulusal düzenlemelere göre bertaraf edilmeleri gerektiğidir (IPPC, 2001).

Elektrostatik ktrcler

Elektrostatik ktrcler, hava akımındaki partikül maddelerinin hareket ettiği yol üzerinde elektrostatik bir alan oluşturur. Partiküller negatif yükle dolar ve pozitif yüklü toplama plakalarına doğru göç ederler. Toplama plakaları periyodik olarak sallanır veya titreşir ve maddeleri yerinden oynatıp alttaki toplama hunilerine düşmesini sağlar. Elektrostatik ktrclerin yüksek sıcaklık koşullarında yani 400°C'ye kadar ve nemli ortamda çalışabilme özellikleri vardır. Verimliliği etkileyen faktörler baca gazının hızı, elektrik alanının kuvveti, partiküllerin yük oranı, SO₂ konsantrasyonu, nem içeriği ve elektrotların biçimi ve bulunduğu yerdir. Çöktürücü performansı özellikle toplama plakaları üzerinde biriken malzeme sonucu bozulabilir. Bu durumun sebebi alkali metal klorürleri ve sülfatları oluşturan yüksek klor ve sülfür içerikli maddelerin fırın sürecine girmesidir. Alkali metal klorürleri çok ince bir toz oluşturur (0.1-1 m) ve yüksek özgül toz dirençliliğe sahiptir, elektrotlar üzerinde yalıtım tabakaları oluşturur ve tozun temizlenmesinde sorunlara yol açarlar.

Elektrostatik filtreler, iyi bir havalandırma ve elektrostatik çöktürücü temizleme sistemi ile birlikte emisyon düzeylerini ortalama ayda (kuru gaz, 273°K, %10 O₂) 5-15 mg/m³'e düşürebilirler (IPPC, 2001).

Torbalı filtreler

Torbalı filtrelerin temel prensibi gazı geçiren, ancak tozu tutan bir kumaş zarının kullanılmasıdır. Toz öncelikle hem yüzey dokularına hem kumaşın derinliklerine ker, ancak yüzey tabakası biriktiğinde tozun kendisi filtre görevini görür. Süreçte kullanılacak olan gaz, torbanın içinden dışına doğru veya dışından içine doğru akabilir. Toz tabakası kalınlařtıķça gaz akısına karsı direnç de artar. Filtre ortamını periyodik olarak temizlemek filtre çapındaki basınç düşüşünü kontrol etmek bakımından gereklidir. En yaygın temizleme yöntemleri ters hava akımı, mekanik

sallama, titreşim ve basınçlı hava darbesidir. Torbanın işlevini yitirmesi durumunda, filtresinde bireysel olarak izole edilebilen birkaç tane bölme olmalıdır; bir bölme devre dışı kaldığında geriye kalan bölmeler mevcut performansı korumalıdır. Her bölmede ilgili bölmenin bakım gereksinimi olup olmadığını saptamak üzere “torba patlama detektörleri”nin bulunması gerekmektedir.

Torbalı filtre kullanımı toz emisyonlarını 5 mg/m^3 'ün altına düşürebilmektedir (kuru gazı, 273 K, % 10 O₂) (IPPC, 2001).

3.2.4.2 Kaçak tozun azaltılması

Kaçak toz, hammadde, yakıt ve klinkerin yüklenmesi, boşaltılması ve depolanması sırasında veya üretim tesisindeki araç trafiğinden kaynaklanabilmektedir. Olası kaçak toz kaynaklarını minimize etmek için basit ve doğrusal bir tesis sahası yapısı gerekir. Tesislerin düzgün ve eksiksiz bakımı sonucu hava sızıntı ve toz dökülme noktaları azaltılarak kaçak toz dolaylı olarak azaltılabilmektedir. Otomatik cihazların ve kontrol sistemlerinin kullanılması kaçak tozun azaltılmasını sağlayabilmektedir.

- Tozlu malzemelerin açık havada yığın halinde depolanması yerine uygun tasarımı rüzgar bariyerleri kullanarak kaçak tozu azaltmak mümkündür.
- Toz kaynağı tespit edildiğinde su püskürtme sistemi uygulanabilir. Toz partiküllerini nemlendirerek tozların çökmesi sağlanabilmektedir.
- Taşıyıcı kamyonların geçtiği alanlar mümkünse beton yüzey ile kaplanmalı ve yüzeyleri mümkün olduğunca temiz ve nemli tutulmalıdır. Yolların ıslatılarak özellikle kuru havada toz emisyonları azaltılabilmektedir.
- Meydana gelen herhangi bir durumda, döküntüyü temizlerken kaçak toz oluşumunu engellemek için otomatik süpürme sistemleri kullanılabilir.
- Tüm malzemeler negatif basınçlı kapalı sistemlerde yüklenip boşaltılmalı ve mümkünse bu sistemlerde taşınmalıdır.

Klinker siloları ve kapalı tam otomatik hammadde depoları, hammadde ve klinker stok sahalarında oluşan toz sorununa en etkili çözümdür. Bu depolarda, yükleme ve boşaltma sırasında kaçak toz oluşumunu engellemek için ayrıca bez filtreler de kullanılabilir.

3.2.5 Toplam organik karbon ve uçucu organik bileşik emisyonları

Çimento hammaddelerinden, yakıtlardan ve kullanılan alternatif yakıtlardan kaynaklanan organik maddeler de fabrika döner fırın bacalarından salınabilmesi muhtemel Toplam Organik Karbon (TOC) ve içeriğindeki Uçucu Organik Bileşikler (VOC) olarak görülmektedir. Yanma sürecinde uçucu organik bileşiklerin (VOC) oluşumu genellikle ortamdaki oksijen konsantrasyonuyla ilgilidir. Çimento fırınlarında normal sabit durum koşulları altında gazların fırında uzun süre kalmasından, yüksek sıcaklıktan ve oksijen fazlalığından dolayı TOC ve VOC emisyonları düşük olacaktır. Konsantrasyonlar fırını çalıştırma veya döngünün bozulması esnasında artabilmektedir.

Uçucu organik bileşik emisyonları, hammaddenin kademeli olarak giriş yapması sırasında, sürecin ilk adımlarında yani ön ısıtma ve ön kireçlemede hammadde ısındıkça oluşabilmektedir. Organik maddeler 400 ila 600°C arasında değişen sıcaklıklarda salınabilmektedir. Çimento fırınlarından çıkan çıkış gazının uçucu organik bileşik içeriği tipik olarak 10 ila 100 mg/Nm³ arasındadır (Cembureau, 1999, Kuleli, 2010). Ancak organik maddelerin bozunması için gerekli 1200°C yüksek sıcaklıktaki proses koşulları ve döner fırın içerisindeki uzun bekleme süresi organik maddelerin tamamen parçalanmasını sağlamaktadır.

3.2.6 Poliklorlu Dibenzo Dioksin ve Dibenzo Furan Emisyonları

Yanma sürecinde organik maddelere eklenen klorun Poliklorlu Dibenzo Dioksinlerin (PCDD) ve Poliklorlu Dibenzo Furanların (PCDF) oluşmasına sebep olabildiği bilinmektedir. PCDD'ler ve PCDF'ler hammaddede yeterli miktarda klor ve hidrokarbon bulunması durumunda ön ısıtma sırasında ve sonrasında baca gazı soğutma kulelerinde oluşabilir. PCDD'ler ve PCDF'lerin gazın 450°C 'den 200°C'ye soğutulması esnasında yeniden oluşması söz konusudur. Bu nedenle gazların fırın sisteminden çıkarken söz konusu aralık boyunca hızlıca soğutulması bu hususta çok önemlidir (IPPC, 2001). Ayrıca 1200°C'deki yüksek sıcaklık ve döner fırın içerisindeki uzun bekleme süresi, alternatif yakıtın içeriğindeki PCDD ve PCDF'leri tamamen parçalayacaktır.

3.2.7 Ağır metaller ve bileşikleri

Doğadan aldığımız hammaddede ve kullandığımız yakıtlarda metaller bulunmaktadır. Metal bileşikleri metalin uçuculuğuna ve tuzlarına bağlı olarak üç sınıfa ayrılabilir:

- 1) Ateşe dayanıklı veya uçucu olmayan bileşikler olan veya içeren metaller: Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu ve Ag,
- 2) Yarı uçucu bileşikler olan veya içeren metaller: Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K ve Na,
- 3) Uçucu bileşikler olan veya içeren metaller: Hg ve Tl.

Bu metallerin fırınlama ve pişirme sürecindeki davranışı uçuculuğuna bağlıdır. Uçucu olmayan metal bileşikleri, süreç içinde kalır ve çimento klinker yapısının bir parçası olarak fırından çıkar. Yarı uçucu metal bileşikleri fırın sisteminin daha soğuk bölgelerinde hammaddeler üstüne yoğunlaşmak üzere sinterleme sıcaklıklarında kısmen gaz halini alırlar. Bu durum çimento klinkeri vasıtasıyla girdi ve çıktı arasında dengenin kurulduğu ve korunduğu noktaya kadar devam eden fırın içi bir döngü etkisine neden olur.

Uçucu metal bileşikleri daha düşük sıcaklıklarda hammadde partikülleri üzerine yoğunlaşır ve fırının baca gazı ile birlikte dışarıya çıkmadıkları zaman iç veya dış döngüler sonucu dışarıya ulaşabilirler. Talyum, Cıva ve bileşikleri, Kadmiyum, Kursun, Selenyum ve bileşiklerinden çok daha uçucudur. Bu bileşikler kireçlenen besleme maddesi ile reaksiyona geçtiğinde veya kireçleme odasında, ön ısıtıcıda veya daha sonra kurutma tesisinde soğuk bölgelerde besleme maddesinin üzerine yoğunlaştığında kolay uçan metal bileşiklerinden oluşan bir iç döngü oluşur. Toz, yoğunlaşmış uçucu bileşiklerle birlikte toz separatörlerinde ayrıldığında ve farine geri verildiğinde metaller bir dış döngü oluşturur.

Çimento üretiminden çıkan tozlar düşük miktarda Arsenik (As), Kadmiyum (Cd), Cıva (Hg), Kursun (Pb) ve Talyum (Tl) gibi ağır metal bileşikleri içerebilir. Ağır metalle yüklü tozların en önemli kaynağı ön ısıtma, ön kireçleme, döner fırınlar ve klinker soğutucuları dahil fırın sistemidir. Ağır metal konsantrasyonları beslenen maddeye ve fırın sistemi içindeki yeniden sirkülasyona bağlıdır. Özellikle kömür ve atık yakıtların kullanılması süreç içindeki ağır metal girdisini arttırabilir. Fırın sistemine giren ağır metallerin uçuculuğunun değişiklik göstermesinden ve yüksek sıcaklıktan dolayı çimento fırın sistemindeki sıcak gazlar gaz halinde ağır metal

bileşikleri de içerir. Denge ile ilgili araştırmalar yüksek uçuculuk özelliğine sahip maddelerin klinker içinde fazla tutulamadığı için fırın sisteminde biriktiğini göstermiştir (IPPC, 2001).

3.3 Türkiye’de Çimento Sektörü

3.3.1 Türkiye’deki genel durum

Türkiye ekonomisinde 2004 yılında yaşanan istikrar ve büyüme, çimento sektörünün canlanmasındaki en önemli etkenlerden biridir. Ekonomik büyüme, inşaat sektöründe özel sektör ve konut yatırımları sayesinde yaşanan canlanma ve Irak pazarında çimento sektörü açısından yaşanan olumlu gelişmelerin sektördeki üreticilerin karlılıklarına da olumlu yansımaları olmuştur. İnşaat sektörünün 2004 yılında gösterdiği performans, Türk çimento sektörünün iç ve dış piyasalara yapılan satışlarını arttırmıştır.

2004 yılında, Türk çimento sektörü toplam üretim bakımından Avrupa’da 2., dünyada ise 7. sırada yer alırken, Türkiye, çimento ihracatı yapan ülkeler arasında 1. sıraya yerleşmiştir (İTO, 2005).

Dünyada önemli bir yere sahip olan Türk çimento sektörü 2010 yılında kapasite arttırılarak 105 milyon tona ulaşmış, üretim ise 63 milyon tonu bulmuştur. Dünyada önemli bir yere sahip olan Türkiye Çimento Sektörü üretimde Çin, Amerika ve Hindistan’dan sonra 4. sırada, Avrupa’da ise üretimde lider ülke konumunda bulunmaktadır (TÇMB, 2011).

Sektör, AB normlarına uygun olarak üretim yapmaktadır. Türk çimento sektöründe sınav maliyet açısından en önemli sorun, girdi maliyetlerindeki sürekli artış olup, enerji konusunda dünya çimento sektörlerine kıyasla maliyet dezavantajı yaşamaktadır. Maliyet düşürücü modernizasyon yatırımları ile Avrupa’nın en büyük üreticisi konumuna gelen sektör, yurt içi tüketim itibarıyla, 4. duruma gerilemiş, ihracatta yaşanan artış ile Avrupa’nın en büyük ihracatçısı konumuna gelmiştir. Türk Çimento sektörü 2010 yılı sonu itibarıyla 48 adet entegre tesis, 17 adet öğütme ve paketleme tesisi olmak üzere toplam 65 çimento fabrikasıyla 10.000 kişiye istihdam sağlamaktadır. Üretimin büyük kısmı 6 firma tarafından gerçekleştirilmektedir.

Yıllar itibarı ile üretim ve tüketim rakamları Çizelge 3.4'de verilmiş olup bu rakamlar incelendiğinde, üretilen çimentonun iç talebin çok üzerinde olduğu görülmektedir (TÇMB, 2011).

Çizelge 3.4 : Türk çimento sektörü üretim ve tüketim miktarları.

Yıllar	Üretim (ton)	Tüketim (ton)
1950	517.000	796.000
1960	2.038.000	1.973.000
1970	6.374.000	6.070.000
1980	12.976.000	12.087.000
1990	24.416.000	22.647.000
2000	35.953.000	31.515.000
2001	29.959.000	25.082.000
2002	32.758.000	26.811.000
2003	35.095.000	28.106.000
2004	38.796.000	30.671.000
2005	42.787.000	35.083.000
2006	47.400.000	41.610.000
2007	49.256.000	42.456.000
2008	51.432.000	40.574.000
2009	54.200.000	39.960.000
2010	63.858.000	47.720.000

Ocak-Aralık 2010 dönemi itibarıyla yurt dışı satışların %50,1'lik oranla en fazla artış gösterdiği bölge Akdeniz Bölgesi olurken, yurt dışı satışların en fazla artış gösterdiği ikinci bölge %22 artışla Karadeniz Bölgesi olmuştur. Kıyı bölgelerde ihracatta yaşanan artış, bölgelerin kıyı kesimlerine yakınlığı sayesinde sağlanmıştır. Çizelge 3.5'de bölgelere göre tesis dağılımları verilmiştir (TÇMB, 2011).

Çizelge 3.5 : Bölgelere göre tesis dağılımları.

Bölgeler	Entegre Tesis
Marmara	10
Ege	4
Akdeniz	6
Karadeniz	7
İç Anadolu	10
Doğu Anadolu	5
Güney Doğu Anadolu	6
Toplam	48

Ocak-Aralık 2010 dönemi itibariyle toplam çimento satışlarının %24,8'i Marmara Bölgesinden karşılanırken, %20,8'i Akdeniz, %15,7'si İç Anadolu, %12,7'si Karadeniz, %11,1'i Güney Doğu Anadolu, %9,2'si Ege ve %5,7'si de Doğu Anadolu Bölgesinden karşılanmıştır (TÇMB, 2011)

3.3.2 Sektörün dış ticareti

Türk Çimento Sektörü 2008 yılındaki, yaklaşık 4 milyar dolar cirosu, 1 milyar dolar tutarındaki ihracatı ile, Türkiye Ekonomisi içinde önemli yere sahip olan bir sanayi dalıdır.

Artan kapasitenin piyasada yarattığı sıkıntı dış pazarla hafifletilmiştir. Son yıllarda Rusya ve Orta Doğu ülkeleri, Türkiye ihracatı açısından önemli bir pazar konumuna gelmiş ve bu talebin önümüzdeki yıllarda da devam etmesi beklenmektedir. 2008 yılında çimento ihracatının en fazla yapıldığı ülke olan Rusya'nın yerini, 2009 yılında Irak alırken, önümüzdeki dönemde Rusya'da ekonomik şartların iyileşmeye başlamasıyla, ülkenin sektör için yeniden gözde konuma gelmesi öngörülmektedir. Özellikle Rusya'nın Soçi kentinde 2014 yılında düzenlenecek kış olimpiyatları çerçevesinde yapacağı yatırımlar nedeniyle çimento sektörünün bu pazara yöneleceği beklenmektedir. Diğer taraftan, Mısır, Libya, Batı Afrika ihracatta önde gelen pazarlar konumuna gelmiştir (TÇMB, 2010).

3.3.3 Sektör maliyet kalemleri

Çimento üretiminde hammadde, yardımcı maddeler, enerji ve yakıt önemli maliyet bileşenleridir. Üretimden sonra ihracatta da önemli bir yere sahip olan diğer bir

maliyet kalemi ulaştırmadır. Özellikle enerji, yakıt ve ulaştırma maliyetleri sektörün pazardaki rekabetçiliğine zarar vermekte olup, sektör temsilcileri uluslararası rakiplerine göre maliyet dezavantajı yaşamaktadır. Çimento sektörü için maliyet kalem analizleri Çizelge 3.6'da verilmiştir (T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, 2010).

Çizelge 3.6 : Çimento sektörü maliyet kalemleri.

Türk Çimento Sektörü Sinaî Maliyet Kalemleri	Ortalama Maliyet %
Hammadde ve Yardımcı Maddeler	9,6
Elektrik	21,1
Yakıt	38,0
İşçilik	9,4
Amortisman	7,0
Diğer Sabit Giderler (Malzeme, vs.)	13,1
Diğer	1,8
Toplam	100

Sektörün önemli bir sorunu rakamlardan da anlaşıldığı üzere maliyetleridir. 2009 yılında petrol fiyatlarının düzelmesiyle bir miktar maliyetlerde iyileşme olsa da 2009'un son çeyreğinde petrol fiyatlarının yeniden yükselme trendine girmesi, sektörü endişelendirmiştir (T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, 2010).

4. ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATIK KULLANIMI

Bir çimento üreticisinin başlıca hedefi yüksek kaliteli çimento üretmek ve satmaktır. Bu hedefe yönelik olarak atık maddelerin yakıt olarak kullanımı çimento sektörüne bazı avantajlar sağlar. Atıkların yakıt olarak kullanımı sayesinde hem atıklar değerlendirilir hem de çevrenin korunmasına katkıda bulunulurken bir yandan rekabet gücü artırılıp bir yandan da toplumun bazı atık sorunlarına katkıda bulunulabilir.

Çimento sanayinin, çeşitli atıkları alternatif yakıt olarak kullanarak bir yandan fosil yakıtlardan tasarruf sağlarken bir yandan da atıkların değerlendirilmesi ve çevrenin korunması yoluyla toplumsal atık sorununa katkıda bulunabilme imkanı vardır.

Atıkların çimento fırınlarında alternatif yakıt olarak kullanılması, atıklardan azami seviyede enerji teminine imkan vermektedir. Malzeme enerjisinin tamamı fırında dolaysız olarak klinker üretimi için kullanılmaktadır. Bu teknik sayesinde, yakılan atıkların içindeki inorganik unsurlar gerekli ham maddelerin yerini alarak çimentonun bir parçası olma niteliğini kazandıkları için kullanılan atığın yanmayan kısımları da kazanılmakta ve cüruf ve küllerin ortadan kaldırılması zorunluluğu kalmamaktadır (Mokrzycki ve ark., 2003).

Türkiye’de Çimento üretiminde yakıt olarak ithal taş kömürü, petrol koku ve yerli kömür kullanılmakta, enerji maliyetleri toplam maliyetin %35–45’ini temsil etmekte ve bilinen en iyi teknolojiler ile yakıt giderleri en fazla %2 oranında düşürülebilmektedir.

Çimento sektöründe ikincil yakıt olarak kullanılmış lastik, atık yağlar, plastikler, kâğıt atıkları, solventler, kimyasallar, arıtma ve boya çamurları, ahşap parçaları, hayvan yemi ve kemik unu; kabuk, çekirdek, kompost, prina, şist yağı, odun talaşı ve tozu kullanılmaktadır.

Çimento sanayi çevre için zararlı atıkların yok edilmesinde önemli bir yardımcıdır. Kullanılan atıkların başlıcaları atık lastikler ve atık yağlardır. Çimento fırınlarındaki yanma olayının gerçekleştiği sinter bölgesinde 1450–1500°C olan sıcaklık, her türlü

tehlikeli atığın yok edilebileceği 1200°C alt sınır değerinin çok üzerindedir. Atık lastiklerle ilgili olarak, Avrupa’da, özellikle Almanya’da 25 yılı aşkın süredir atık lastikler çimento fırınlarında yakılmaktadır.

Lastik, boyutlarından dolayı yalnızca ön ısıtıcıdan beslenebilir. Kalorifik değeri yaklaşık 7900 kcal/kg dir. Kauçuk oranı yaklaşık %45, Zn oranı yaklaşık %2, kükürt oranı yaklaşık 1% dir. Dış ortamda yakmak zordur, kendi kendine yanmaz. AB’de 2006 yılından beri gömülerek bertaraf edilmesi yasaklanmıştır.

Atık lastikler homojendir, farklı lastik tiplerini yakmak mümkündür. Taşıma ve depolama için özel koşullar gerekmez. İşçi sağlığı-güvenliği için risk oluşturmaz. Enerji geri kazanımı ile birlikte hammadde kazanımı da mümkündür. Klinker kalitesine olumsuz etkisi olmamaktadır. Refrakter ömrüne olumsuz etkisi olmamaktadır. Anzast oluşumuna olumsuz etkisi olmamaktadır. Emisyonlar üzerinde negatif etkisi yoktur. NO_x emisyonları üzerinde azaltıcı etkisi vardır ve ekonomik bir yakıt olarak görülmektedir.

Atık yağlar, Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’nde “tehlikeli atık” olarak tanımlanmakta olup Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği ve Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’ne göre işlem görmektedir.

Yakıt karakteri taşıyan atıkların üreticileri, çimento sanayini bir atık bertaraf yolu olarak görmüştür. Ürettikleri atıkların çimento şirketleri tarafından kullanılmaması halinde, alternatif bertaraf yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Atıkların çimento fabrikalarına gönderilme maliyetinin diğer yöntemlerin kullanılmasından daha düşük olması halinde üreticiler, atıklarını alternatif yakıt olarak çimento fırınlarında kullanılmak üzere çimento fabrikalarına göndermeyi tercih etmektedir.

Çimento üretiminde katkı maddelerinin kullanımıyla, harcanan enerji ton klinker başına 900 kcal’den 750–720 kcal’e düşmektedir. Ancak, 27 çeşit katkılı çimento standardı bulunmasına rağmen, katkılı çimentolar Türkiye’de az üretilmektedir. (Güven, 2008). Katkılı çimento üretimi talep ile doğru orantılı olarak artabilecektir.

Çimento sektöründe 2008 ve 2009 yıllarında kullanılmış olan alternatif yakıtlar sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir (TÇMB, 2010). Yıllar arasındaki farka baktığımızda da Türkiye’deki çimento sektöründe alternatif yakıt kullanımındaki artışı görebiliriz.

Çizelge 4.1 : Türkiye’de çimento sektöründe 2008 yılında kullanılan atık miktarları.

Atık Cinsi (ton/yıl)	TÇMB
Lastikler	11.828
Kömür atıkları	3.156
Plastikler	6.314
Odun, kağıt, karton	419
Çamur	4.591
Boya Çamuru	239,9
Tank Dibi Çamuru	5.268
Atıksu Arıtma Tesisi Çamuru	25,0
Ambalaj Atıkları	480,48
Atık filtre torbaları	6,8
Tarımsal ve organik atıklar	225
Diğer Tehlikesiz Atıklar	2.498
Diğer Tehlikeli Atıklar	7.848
Yağ ve Yağlı atık	15.732
Diğer Tehlikeli Sıvı Yakıtlar	74,12
Solventler ve diğerleri	123,38
TOPLAM	58.828

Çizelge 4.2 : Türkiye’de çimento sektöründe 2009 yılında kullanılan atık miktarları.

Atık Cinsi (ton/yıl)	TÇMB	EİE*
Odun, kağıt, karton	1.309	1.569
Tekstil	473	1.141
Plastikler	13.113	12.237
Genel olarak ön işlemden geçen belediye atıkları	54	4.675
Lastikler	18.363	17.638
Endüstriyel Çamurlar	24.843	24.741
Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Çamurları	38.284	17.283
Hayvan Atıkları, Yağlar	119	119
Kömür/Karbon atıkları	2.892	44
Tarımsal Atıklar	535	3.408
Katı Atık Yakıtlar (emprenye talaş, v.b.)	10	10
Çözücüler ve ilgili atıklar	2.168	4.319
Yağ ve Yağlı atık	38.299	26.483
Diğerleri	14.754	25.408
TOPLAM	155.216	139.075

*EİE: Elektrik işleri etüd işleri idaresi.

Avrupa, Kanada, Japonya ve Amerika’daki birçok işletmede bütün veya parçalanmış lastikler çimento ocaklarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Çimento üretimi için 1450°C sıcaklık gereklidir. Aynı zamanda çimento ocakları coğrafik koşullarından dolayı da kullanım için uygundur. Çünkü hem ocaklar hem de lastik istifleri, merkezi yerleşimden uzaktır (Sugözü ve Mutlu, 2009).

Ayrıca, ülkemizde son yıllarda artan enerji ihtiyacı termik santrallerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu santrallerden açığa çıkan atıkların, özellikle de uçucu külün önemli çevre sorunları yarattığı bilinmektedir. Bu atığın inşaat sektöründe, özellikle beton ve çimento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır (Yigiter ve ark. 2004).

Atık otomobil lastiklerinin de çevreye verdikleri ciddi boyuttaki zararlardan dolayı yararlı şekilde kullanımları araştırılmaktadır. Bu amaçla, atık otomobil lastiklerinin beton teknolojisinde kullanımı araştırılmış, belirli oranlarda atık lastik katılan harç numuneleri hazırlanmış, normal harçlara kıyasla basınç, eğilme ve çekme dayanımları ile bu harçlar üzerindeki deniz suyu etkisi incelenmiştir (Topçu ve Demir 2004).

Atıkların çimento sanayinde alternatif yakıt olarak kullanılmaları teknik açıdan sağlıklı bir çözümdür, çünkü yanma sonucu atıkların organik kısımları imha olurken ağır metaller de dâhil olmak üzere inorganik kısımları ürünün bünyesine alınarak burada hapsolmektedir. Çimento fırınları alternatif yakıtların güvenli bir ortamda değerlendirilebileceği ve yakılabileceği ideal tesislerdir. Bu güvenli ortamın unsurları şunlardır:

- Yüksek ısı
- Uzun bekleme süresi
- Okside edici ortam
- Alkali ortam
- Klinkerin kül tutma özelliği
- Yakıtın kesintisiz beslenmesi
- Organik unsurlar
- Katı ya da sıvı hiçbir atık oluşmaması

Çimento fırınlarının normal işletme koşulları, imhası en zor organik maddeler için bile gerekenin ötesinde bir yanma ortamı sağlar. Bunun nedeni fırın gazlarının çok yüksek ısıda olmasıdır. Sıcaklık, döner fırın içerisinde 2000°C ve ön kalsinatörde 1100°C'dir. Gazların yüksek sıcaklık şartlarında kalış süreleri, döner fırınlarda aşağı yukarı 5-10 saniye, ön kalsinatörde ise 3 saniyenin üzerindedir.

Her çimento fırını kesintisiz olarak, yüksek ısı kapasitesi ile çalışan bir üretim ünitesine sahip olduğu için, fırın sıcaklığının kısa bir sürede büyük ölçüde değişimler göstermesi mümkün değildir. Çimento fırınları, gerekli olması halinde kolaylıkla tekrar konvansiyonel yakıtla döndürülebilir. Çimento fırınları bu nedenlerle alternatif yakıtların güvenli bir şekilde kullanılmasına uygun özel bir termal ortam sağlamaktadırlar.

Atık yanması sonucu oluşan küller de, klinker üretim sürecinde üretim fazlarının oluşumuna tıpkı kömür külünde olduğu gibi önemli elementler sağlarlar. Bunun nedeni atıkların içinde bulunan elementel yapıdaki bileşiklerdir.

Çimento fırınına hammaddeler veya atıkların kullanımıyla birlikte giren ağır metallerin, çimento fırınlarındaki reaksiyon biçimleri üzerinde yürütülmüş bulunan geniş araştırmalar sonucunda, büyük ölçüde klinkerin içinde kaldıkları ortaya koyulmuştur. Örneğin; arsenik, baryum, berilyum, krom, bakır, kurşun, nikel, selenyum, vanadyum üzerinde yapılan çalışmalar bu metallerin yaklaşık % 100'ünün katı maddelerle birlikte kaldıklarını saptamıştır. Ancak Cıva ve Talyum gibi metaller, klinkerle bu derecede birleşmedikleri için kullanılan atıklar bu ağır metaller bakımından kontrol altında tutulmalıdır. Bu çalışmalar, çimento fabrikalarında yapılan periyodik ölçümler sonucunda da kanıtlanmaktadır (Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 2006).

Alternatif yakıtların külleri, klinkerdeki sürecin fazlarının oluşumuna tıpkı kömür külünün yaptığı gibi önemli elementler sağlarlar. Örneğin hurda lastikler, enerjinin yanı sıra klinkerin önemli bir unsuru olan demiri sağlar. Eğer hurda lastikler olmasa bu demirin her halükarda başka bir malzeme şeklinde sürece ilave edilmesi gereklidir (Pekin, 2005).

Yalnızca karbon ve hidrojen den oluşan organik bir bileşik tam olarak yandığı zaman CO₂ ve su oluşur. Eğer organik bileşik, ayrıca klor veya kükürt de içeriyorsa bu durumda ortaya hidrojen klorür ve kükürt dioksit gibi asidik gazlar da çıkar. Ancak, bu gazlar fırında proses sırasında oluşmuş bulunan kireç ve diğer alkali maddeler tarafından emilerek nötralize edilirler.

2000 civarında çimento prosesinin incelendiği ve proses organik emisyonları üzerinde yürütülen bir dizi araştırma, dikkatlerin “dioksinler” olarak tanınan kimyasallar üzerinde toplanmasına neden olmuştur. Tehlikeli atıkların yakılarak

imha edilmelerini düzenleyen 94/67/EC sayılı AB yönetmeliği, dioksin emisyonunu, her metreküp gaz emisyonu için azami 0,1 nanogram olarak sınırlamış bulunmaktadır. Bu yönetmelik kapsamında dioksinler, “toksik eşdeğer” birimi ile ölçülmektedir. Gerek konvansiyonel fosil yakıtlar kullanan çimento fırınların, gerekse her tür alternatif yakıt kullanan çimento fırınları sözü edilen bu emisyon limitlerine uyumludur (Karstensen, 2007).

Bir çok ülkeyi temsil eden sekiz uluslar arası çimento şirketinin, yüksek miktarda alternatif yakıt kullanarak 300 milyon tonun üzerinde klinker üretimi sırasında 500’ü aşkın PCDD/PCDF örneklemeleri raporlanmıştır. Bu sonuçlara göre ölçümlerin (Çizelge 4.3) %98’inin toksik eşdeğerinin 0,1 ng/m³’ün altında olduğu görülmüştür (Karstensen, 2007).

Çizelge 4.3 : Çimento şirketleri PCDD/PCDF Ölçümleri ng I-TEQ/m³

Çimento Şirketi	N (Örnekleme Sayısı)	Konsantrasyon Aralığı (Ortalama)
Cemex (1999-2003)	16	0,00049-0,024
Heidelberg 2001-2004	> 170	0,0003-0,44 (0,020)
Holcim 2001	71	0,0001-0,2395 (0,041)
Holcim 2002	82	0,0001-0,292 (0,030)
Holcim 2003	91	0,0003-0,169 (0,025)
Lafarge 1996-2003	64	0,003-0,231 (0,0207)
RMC 2000-2004	13	0,0014-0,0688
Siam 2003	4	0,0006-0,022
Taiheiyo	67	0,011
Uniland	2	0,002-0,006

Türkiye’de çimento döner fırınlarından çıkan emisyonları sınırlandıran iki adet yönetmelik bulunmaktadır. 06.10.2010 tarihli 27721 sayılı resmi gazete yayımlanan Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik ve 03.07.2009 tarihli 27277 sayılı resmi gazete yayımlanan Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ile bacalardan çıkan emisyonlar sınırlandırılmıştır. Konsolide yönetmelikler tablosu Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Türkiye’de çimento sektörü için verilen emisyon limit değerleri.

Parametre	Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği	Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik
	Döner Fırın Ana ve Kömür Değirmeni Bacaları Emisyon Limitleri (mg/Nm ³)	
Mevcut Tesisler için Toplam Toz	120	30 ⁽²⁾⁽³⁾
Yeni Tesisler için Toplam Toz	50 ⁽¹⁾	30
HCl	-	10
HF	-	1
Mevcut Tesisler için NO _x	1300	800 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾
Yeni Tesisler için NO _x	800 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾
Cd+Tl	-	0,05
Hg	-	0,05
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn	-	0,5
Dioksinler ve Furanlar (PCDD ve PCDF)	-	0,1 ng/Nm ³
SO ₂	300	50 ⁽⁶⁾
TOK (Toplam Organik Karbon)	-	10 ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ : 10/02/1993 tarihinde imzalanmış Çimento Sanayi Çevre Deklarasyonu’ndan sonra kurulmuş ve kurulacak yeni tesisler ile mevcut tesislere yapılacak yeni üretim ünitesi ilaveleri için atık gazlardaki toz emisyon değeri 50mg/Nm³ ve NO_x değeri 800 mg/Nm³’ü aşmamalıdır.

⁽²⁾ : Saatte üç tondan fazla atık yakan çimento fırınlarına, 50 mg/Nm³ veya 120 mg/Nm³ olan toz limit değeri 1 Ocak 2013’den itibaren 30 mg/Nm³ olacaktır.

⁽³⁾ : Toplam toz emisyon limit değerinin 50 mg/Nm³’ten fazla olmayacağı belgelendiği takdirde, saatte üç tondan az atık yakan çimento fırınlarına, 50 mg/Nm³ olan Toz limit değeri 1 Ocak 2015 ‘den itibaren 30 mg/Nm³ olacaktır.

⁽⁴⁾ : Saatte üç tondan fazla atık yakan mevcut çimento fırınlarına, 1300 mg/Nm³ olan NO_x limit değeri 1 Ocak 2013 ‘den itibaren 800 mg/Nm³ olacaktır.

⁽⁵⁾ : NO_x için toplam emisyon limit değeri 1200 mg/Nm³’ten fazla olmadığı belgelendiği takdirde, saatte üç tondan az atık yakan mevcut çimento fırınlarına, 1300 mg/Nm³ olan NO_x limit değeri 1 Ocak 2015 ‘den itibaren 800 mg/Nm³ olacaktır.

⁽⁶⁾ : NO_x emisyon limit değerlerinin uygulanması için, faaliyette olan ve emisyon izni bulunan çimento fırınları, mevcut tesisler olarak kabul edilecektir.

⁽⁷⁾ : SO₂ ve TOK emisyon değerlerinin atıkların yakılmasından değil, kullanılan yakıttan kaynaklandığının ispat edilmesi durumunda sınır değer yakıt kullanımından kaynaklanan emisyon değeri olarak alınır.

Bacalarda sürekli ölçüm cihazları ile ölçülecek olan parametreler, toplam toz, CO, NO_x, O₂, Basınç, Sıcaklık, ve yanma odası sıcaklığıdır. Ağır Metaller yılda en az iki kez, dioksin ve furanlar yılda bir kez ölçülecektir. Dioksin ve furanların analizleri yurt içinde veya dışında lisanslandırılmış laboratuvarlarda yaptırılacaktır.

4.1 Çimento Sektöründe İklim Değişikliği

Küresel ısınmaya neden olan sera gazları dünyanın başlıca sorunlarından birisi haline gelmiştir. Kısaca “karbon gazı” olarak adlandırılan CO₂ (karbondioksit) salınımı başta Avrupa Birliği (AB) olmak üzere pek çok ülke tarafından vergilendirilerek üreticiler bir türlü cezalandırılmaktadır.

Çimento sanayi bu bağlamda en büyük karbon gazı salıcılarından olarak tartışmaların odak noktasındadır, bu nedenle de sanayi CO₂ salınımını azaltmak için çeşitli önlemler alınmaktadır:

- Özgül ısı tüketimini azaltmak olmak üzere enerji verimlerini arttırmak,
- Çimento bileşimine giren katkıların kullanım oranını arttırmak,
- Geleneksel fosil yakıtların yanında atıklardan üretilen ikincil yakıtların kullanılmasını arttırmak,

Başvurulan temel yöntemlerdir.

Çimento üretiminde CO₂ kaynaklarına baktığımızda 1 ton klinker üretimi için yaklaşık olarak 1 ton CO₂ salındığını görebiliriz. En yüksek miktar da hammaddenin dekarbonizasyonundan (kalsinasyonundan) sağlanmaktadır (Kuleli, 2010).

Bir ton klinker üretimi için yaklaşık 1,57 ton hammadde kullanılmaktadır (IPPC, 2001). Yaklaşık 0,5 ton CO₂ üreten kalsinasyon işlemini, fırın ve kurutucularda kullanılan yakıt içeriğindeki karbon ve üretimde kullanılan elektriğin termik santrallerde üretimi takip etmektedir. Çizelge 4.5’de klinker üretimi sırasında oluşabilecek yaklaşık karbondioksit miktarları verilmiştir (Kuleli, 2010).

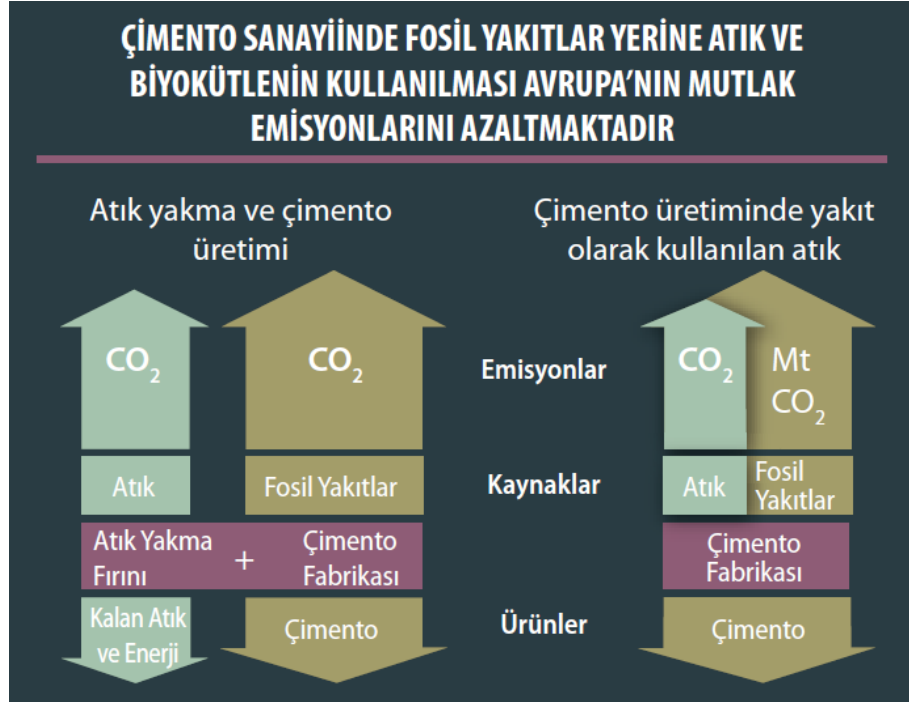
Çizelge 4.5 : Klinker üretiminde oluşabilecek yaklaşık karbondioksit miktarları.

		Kaynak	Toplam
0,5 ton CO ₂ /ton Klinker	Dekarbonizasyon	Doğrudan	
0,3-0,4 ton CO ₂ /ton Klinker	Yakıt	Doğrudan	~1 ton CO ₂ / ton Klinker
0,15 ton CO ₂ /ton Klinker	Elektrik	Dolaylı	

Bu değerlere çimento fabrikasında dolaşan araçlarla ürün sevkiyatında kullanılan araçlardan gelen yaklaşık 0,003 ton CO₂ / ton Klinker’de eklenebilmektedir.

21. Yüzyıl başlarında CO₂ salım düzeyini düşürmek için Kyoto Protokolünü onaylayan ülkelerdeki çimento sektörü önemli adımlar atmıştır. Yaklaşık 0,9 ton CO₂/ton çimento olan salım düzeyinin ikincil yakıtları kullanarak ve katkılı çimento kullanımını artırarak, 0,7 ton CO₂/ton’a düşürülmesi bir çok ülkede başarılmıştır (Kuleli, 2010).

Ayrıca çimento prosesindeki birlikte işleme, küresel CO₂ emisyonlarının azaltılması için çimento sanayine yüksek bir potansiyel sunmaktadır (Şekil 4.1). Birlikte işleme olmadığı durumda, bu malzemeleri oluşturan atıklar ve yan ürünlerin yakılması ya da düzenli depolanması zorunluluğu doğacak olup, eşdeğerleri oranında sera gazı emisyonları atmosfere salınacaktır. Düzenli depolamadan gelen emisyonlar, CO₂'den 21 kat daha fazla küresel ısınma potansiyele sahip bir gaz olan metanı %60 oranında içermektedirler (Cembreau, 2007).



Şekil 4.1 : Birlikte işlemenin CO₂ emisyonu azaltımına katkısı

1990 yılında yakıt olarak atıkların kullanılmasından elde edilen enerji yüzdesi %3'ken 2006'da, yaklaşık 5 milyon ton kadar kömür tasarrufu yapılmış ve CO₂ emisyonlarında 8 milyon ton bir azaltımla sonuçlanarak bu oran %18 civarına düşürülmüştür.

Biokütleden elde edilen CO₂ emisyonları iklim açısından nötr durumdadırlar. Avrupa çimento sanayinin kullandığı alternatif yakıtların %20'sinden fazlası, hayvan eti, kemik küspesi ve kanalizasyon çamuru gibi saf biokütleden oluşmaktadır. Biokütle erişilebilir olarak kalırsa bu oran daha da artırılabilir. Buna ek olarak çimento sanayinde kullanılan alternatif yakıtlar, içeriğinde odun ya da kağıt parçaları bulunmasından ötürü yüksek miktarda biokütle içermektedirler (Cembreau, 2007).

Üretilen çimentonun CO₂ emisyonlarının büyük bir bölümü, ara ürün olan klinkerin üretiminden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, çimentonun klinker içeriğinin azaltılmasıyla yani daha fazla katkı maddesi kullanılarak katkılı çimento kullanımını arttırdığımızda, üretilen çimentonun enerji ve karbon yoğunluğunun azalabileceği öngörülmektedir.

5. ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATY KULLANIMININ ETKİLERİ

İkincil ürünler herhangi bir endüstriyel prosesin bünyesinde var olan ve normal olarak kaçınılamayacak sonuçlardır. Bunun yanında, ürünlerin toplum tarafından kullanılması da geride birtakım atıkların oluşmasına yol açar. Birçok durumda, bu türden malzemeler (hem yan ürünler hem de atıklar) farklı bir biçimde yeniden kullanılamaz ve piyasada pazarlanamaz hale gelebilmektedirler. Bu malzemeler tipik olarak, daha farklı işlemlerden geçmek üzere üçüncü şahıslara verilmektedir.

Atığın işlenmesindeki amaç her zaman aynı olmayabilir ve atığın türüne ve bir sonraki biçimine bağlı olarak değişir. Bazı atık arıtma tesisleri çok amaçlı işletmelerdir. Bu dokümanda atığın işlenmesinin temel nedenleri şunlardır:

- Atığın zararlı olan niteliklerini en aza indirmek,
- Atığı, kısmen veya tamamen yeniden kullanılabilir veya daha ileri düzey işlenmesine izin verecek farklı bileşenlerine ayırmak,
- Nihai olarak bertaraf edilmeye gönderilmesi gereken atık miktarını azaltmak,
- Atığı, yararlı bir malzeme haline dönüştürmek.

Atık arıtma prosesleri, maddelerin bir ortamdan diğer bir ortama yer değiştirmesi veya aktarılmasını gerektiren işlemleri içerebilir. Örneğin, bazı atık arıtma proseslerinde şu sonuçları görebiliriz; sıvı atık madde, atık su kanalına, katı atık madde depolama alanına gönderilir, ve diğerleri temel olarak yakmadan kaynaklanan uçucu atıklar (yanma gazı ve parçacık) olarak havaya karışırlar. Farklı bir seçenek olarak, geri-kazanılmış akaryakıtın yakılmasında olduğu gibi, başka bir atık, arıtma hattına uygun hale getirilmek üzere değişikliğe uğrayabilir. İşletme içinde beklemede olsun veya işletme dışında halledilecek olsun atığın işlenmesi ile ilgili, çok sayıda önemli yardımcı faaliyetler bulunmaktadır; örneğin atığın kabul edilmesi ve depolanması gibi.

Atıklardan üretilen yakıtlar birçok ülkede on yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Bu yakıtlar çimento fabrikaları da dahil olmak üzere yüksek ısı işlemler gerçekleştirilen elektrik santralleri yanı sıra çeşitli endüstriyel tesisler tarafından da tercih

edilmektedir. Uygulamaya alınan yakıtlar kentsel atıklar, endüstriyel atıklar yada bunların karışımlarından oluşmakta olup katı yada sıvı halde bulunabilmektedir. Geleneksel türdeki yakıtlar yerine bu tür alternatif yakıtların tercih edilmesi beraberinde hem ekolojik hem de ekonomik faydalar getirmektedir. Özellikle bu türden yakıt uygulamalarına elverişli endüstrilerden birisi de teknolojik ve çevresel perspektiften bakıldığında, çimento endüstrisidir.

Türkiye'deki çimento üretimini gerçekleştirmek için çimento fabrikalarının yıllık kömür tüketimleri 6 milyon ton civarındadır. Yenilenemeyen bir fosil yakıt miktarı için bu rakam hayli yüksek olup çimento sanayi enerji kullanımı açısından daha verimli üretim yöntemlerinin yanı sıra kömüre alternatif olacak sürdürülebilir enerji kaynakları arayışına girmiş bulunmaktadırlar.

Atıkların alternatif yakıt olarak kullanılması kömür gibi yenilenmeyen fosil yakıtların tüketimlerinin yanı sıra kömür madenlerinden kaynaklanan çevresel etkilerin de azalmasını sağlar. Fosil yakıtlar, dünyamızdaki yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Bir ton klinker üretimi için yaklaşık olarak 800.000 - 900.000 kcal ısı enerjisine ihtiyaç vardır. Bu miktar da enerji yaklaşık 140 kg yüksek kalorili kömürden elde edilmektedir.

Türkiye'de yılda yaklaşık 60 milyon ton klinker üretilmektedir. Klinker üretiminde kullanılan yakıtın %10'u alternatif yakıtlarla ikame edildiği takdirde, çoğu ithal edilmekte olan 840.000 ton yüksek kalorili kömürden tasarruf edilmiş olacaktır.

Ayrıca, çimento için özgül enerji sarfiyatını yaklaşık 955 kcal/kg klinker kabul edersek, % 30-50 oranında bir yakıt ikame miktarı ve ATY'nin alt ısı değerinin yaklaşık 4500 kcal/kg olduğunu varsayarsak, buradan şu anlam çıkacaktır:

Yılda 6 – 11 milyon ton ATY'lik bir kullanım potansiyeli ile, çimento fırını için, yakıt ikame miktarı sabit kalmak üzere, yılda yaklaşık 1 – 2 milyon ton ATY mertebesinde bir potansiyel ile, yıllık 20 milyon tonluk bir klinker üretimi için kullanılabilir.

Hurda araç lastikleri, evsel ve endüstriyel atıklar, atık kağıtlar, atık yağlar, ahşap atıklar, kağıt proses çamuru, arıtma çamuru, plastikler, etkinliği kaybolmuş solventler, yağ ile kaplanmış üstü, bezler ve tank dip çamurları çimento sanayinin yakıt olarak kullanmakta olduğu başlıca atıklardır. Bu atıkların dışında günümüzde

bir de atıktan türetilmiş yakıtlar çimento sanayinde alternatif yakıt olarak kullanılmaktadırlar.

Günümüzde tehlikeli atıkların giderilmesi, birçok sanayi ve endüstri kuruluşu için çözülmesi zor problemlerden birini oluşturmaktadır. Sanayiciler, atıklarını çevrelerindeki depo alanlarında ya da yakma tesislerinde belirli bir bedel karşılığında giderebilmektedir. Buda ayrıca çimento sektörüne ek bir kazanç sağlamaktadır.

Atıkların yakıt olarak kullanılmaları sırasında atıkların organik kısımları tamamen imha olurken ağır metaller ve inorganik kısımları ürünün bünyesine alınarak burada bağlanmaktadır. Bu nedenle çimento prosesinde ATY'ler, güvenli bir şekilde bertaraf edilebileceği uygun ortama sahiptirler.

5.1 ATY Kabul Kriterleri

Atıktan türetilmiş yakıtların kullanılmasında çimento endüstrisinin geniş bir deneyimi vardır. Zararlı ve zararsız atıklar işlenerek, ikincil yakıt olarak kullanılırlar. Katı atıklardan geri kazanılmış atıklar dahil olmak üzere, atıktan türetilmiş yakıtların, kuru proseslerde kullanılması yaygınlaşmaktadır.

ATY içerisinde bulunan ve çimento prosesinde önemli bir parametre olan Klor, ısıtıcı birimini, yoğunlaşmış uçucu klorürlerle tıkararak kuru proseste azımsanmayacak sorunlara neden olabilir ve yine ATY ile birlikte prosese giren ağır metallere, Cıva (Hg) ve Talyum (Tl) gibi uçucu metaller, Kadmiyum (Cd) gibi yarı uçucu metaller ile birlikte kontrol altında tutulmalıdır. Ayrıca çimento prosesi için ATY'nin net kalorifik değeri (NCV) de tasarruf sağlanacak fosil yakıtlar açısından önemlidir.

Çizelge 5.1'de, çimento fırınlarındaki ATY ile ilgili talepleri yani atığın kabul kriterlerini göstermektedir. Rakamlar, örneğin Belçika, Almanya ve Fransa gibi ülkelerdeki son kullanıcılardan alınan verilere göre oluşturulmuştur.

Çizelge 5.1 : ATY için ülkelerdeki talep ortalamaları.

Birim	CK
NCV (Net Kalorifik Değer)	(kcal/kg) 1200/2350-2850/5250* (Ortalama Değerler)
Nem	(%) < 20
Kül	(%) < 15 – 20
Kükürt (S)	(%) < 2
Klor (Cl)*	(%) 0.5-1.0 (Ortalama) 1-3.0 (Maksimum)
Poli-Klorlu Bifenil (PCB)	(ppm) < 50 ppm
Cıva (Hg)	(ppm) < 10 ppm
Cd + Tl + Hg	(ppm) < 20 ppm
Sb + As + Pb +Cr +Co ++ Cu + Mn + Ni + V + Sn	(ppm) < 10.000 ppm

CK =çimento fırını veya klinker fırını

* NCV için herhangi bir maksimum değer bulunmamaktadır. Klinker fırınında malzeme ve enerjinin geri kazanılmasının bir arada olması, düşük kalori değerlerinin kullanılmasına imkan tanır, çünkü ATY'nin içindeki kül muhtevası, enerji girdisine herhangi bir katkıda bulunmaz.

** Cl verileri, girdinin bileşimine göre değişir. Yüksek ikame oranlarında, sınır değerler, by-pass'lı çimento fırını için % 3 ve bu sisteme sahip olmayan fırın için % 0.5-1 dir. Yaş prosesli çimento fırınlarında, klor için maksimum değer % 6 dır.

Çimento fırınlarında klor konsantrasyonlarındaki değişiklikler, ön ısıtıcı kulede tıkanmalar oluştururken, fırın içerisinde kemer oluşturup fırın kararlılığını bozarlar. Bu durumlarda ön ısıtıcı kulenin yanına klor by-pass sistemi yapılır. Klor konsantrasyonları fırın girişinde 250 g/ton klinkere ulaştığında sistemde by-pass ihtiyacı doğar. Bu hesaplamaların yapılması için de hammadde, yakıt ve atık içerisindeki klor miktarlarının klinker cinsinden hesaplanması gerekmektedir.

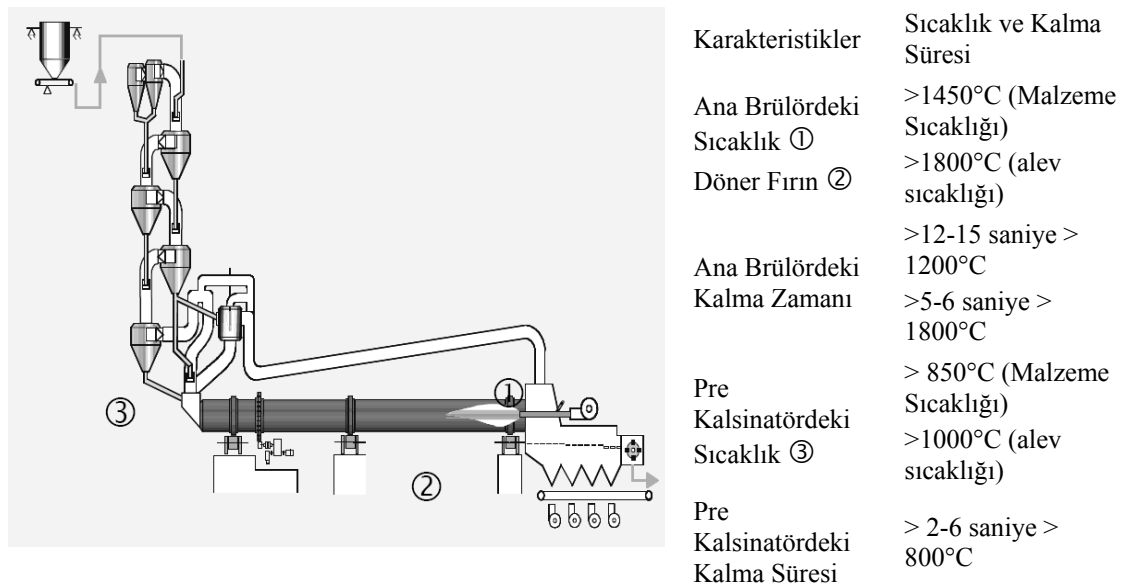
Bu sistemde, toz ayırıcı, gaz soğutucu ve torbalı filtre bulunur. Fırın içerisinden alınan sıcak gaz önce soğutulur, daha sonra filtreden geçirilir ve tutulan by-pass tozu çimento katkısı veya asfalt dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda, by-pass tozunun harcın 28 günlük dayanımlarında herhangi bir değişik gözlenmediği gibi yüksek fırın cürufu çimentosuna katkı olarak katıldığında dayanımın arttığı gözlenmiştir (Sutou ve arkadaşları, 1999).

Klorür by-pass sistemleri fırında kararlı operasyonu sağlarken, aynı zamanda düşük fiyatla yüksek klorürlü hammadde ve yakıtların kullanılmasını sağlayan, böylece çimento üretim maliyetlerini düşüren bir sistemdir. Ayrıca çimento içerisinde çok yüksek miktarlarda çok çeşitli atıkların kullanılmasına da yardımcı olmaktadır (Sutou ve arkadaşları, 1999).

5.2 ATY Besleme Noktaları

Birçok çimento fırını, çoğu durumda çimento klinkeri üretiminde bir yakıt ikamesi olarak kullanım için atıkları saha dışı üreticilerden kabul etmektedir. Genellikle ana brülöre sıvı atıklar enjekte edilmektedir. Bazı tesislerde katı atıkların kalsinasyon bölgesine sokulması mümkündür. Uzun fırınlar için bunun anlamı katı atığın orta bölgeden fırına verilmesi, ön ısıtıcı/pre-kalsinatörlü fırınlar için ise yüksek sıcaklık bölümündeki besleme noktasından atıkların beslenmesidir.

Tehlikeli atıkların durumunda, uygun sıcaklık ve alıkonma süresi aracılığıyla halojenli organik maddeler gibi yanıcı toksik bileşiklerin tamamen imhası sağlanmalıdır. Genel olarak ön ısıtıcı/pre-kalsinatörlü fırınlar için atığın ya ana brülörden ya da ikincil brülörden beslenmesi gerekmektedir. Ana brülördeki koşullar her zaman uygun olacaktır. İkincil brülör için yanma bölgesi sıcaklığının yeterli bir alıkonma süresi (iki saniye) boyunca 850°C 'nin üzerinde tutulması sağlanmalıdır. Çimento üretimi sırasında oluşan sıcaklık ve kalma süreleri Şekil 5.1'de verilmiştir (UNEP, 2010).



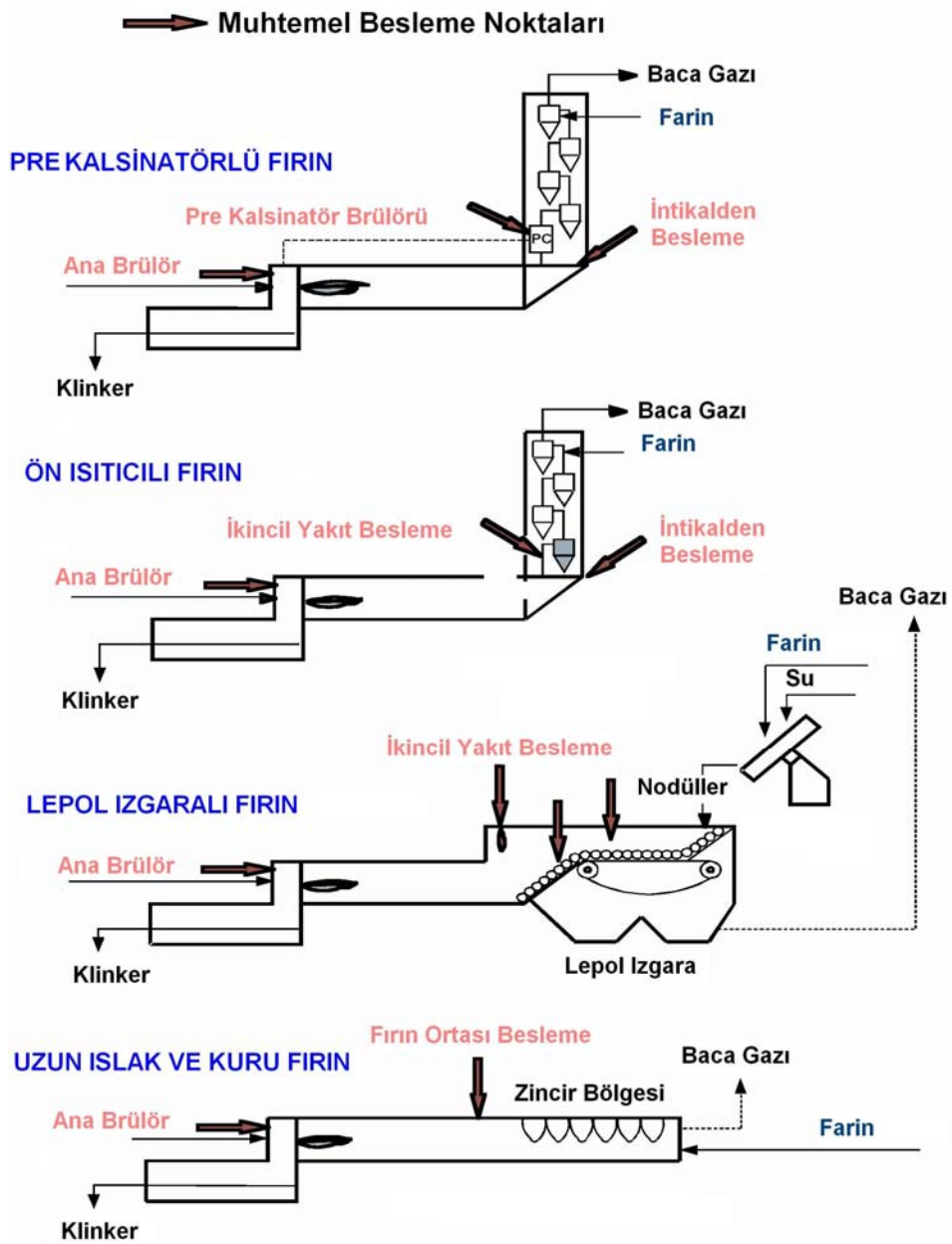
Şekil 5.1 : Çimento üretiminde sıcaklık ve kalma süreleri.

%1'den fazla halojenli organik madde (klorür olarak ifade edilir) içeriğine sahip tehlikeli bir atığın fırına beslenmesi durumunda, sıcaklığın en az iki saniye süreyle 1100°C 'de tutulması gerekmektedir.

Alternatif hammaddeler genellikle fırın sistemine geleneksel hammaddeler ile aynı şekilde (örneğin normal farin kaynağı aracılığıyla) beslenmektedir. Düşük

sıcaklıklarda uçucu hale getirilebilecek bileşenler içeren (örneğin çözücü gibi) alternatif hammaddeler, fırın sisteminin yüksek sıcaklık alanlarına beslenmelidir. Uçucu (organik ve inorganik) bileşenler içeren alternatif hammaddeler, fırının kontrollü test uygulamaları ya da yeterli laboratuvar testleriyle istenmeyen baca emisyonlarından kaçınılabileceği gösterilmediği müddetçe normal farin kaynağı aracılığıyla fırına beslenmemelidir.

Kullanılan atık malzemesinin fiziksel, kimyasal ve toksikolojik karakteristiklerine göre yeterli besleme noktaları seçilmelidir. Muhtemel atık besleme noktaları Şekil 5.2’de verilmiştir (UNEP, 2010).



Şekil 5.2 : Muhtemel atık besleme noktaları.

Atık maddeleri çimento üretim sürecine sokmak için farklı besleme noktaları kullanılabilir. En yaygın olanları şunlardır:

- Döner fırın çıkışı ucundaki ana brülör aracılığıyla;
- Döner fırın girişi ucundaki geçiş bölmesinde yer alan bir besleme oluğu aracılığıyla (parça yakıt için);
- Yükseltme borusuna ikincil yakıt besleme brülörleri aracılığıyla;
- Pre-kalsinatöre pre-kalsinatör brülörleri aracılığıyla;
- Pre-kalsinatöre bir besleme oluğu aracılığıyla (parça yakıt için);
- Uzun ıslak ve kuru fırınların durumunda bir orta fırın valfi aracılığıyla (parça yakıt için).

Atık maddelerin klorür, sülfür ve alkali gibi dolaşım halindeki uçucu elementlerin total giriş üzerindeki etkisi, kabul öncesinde çok dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir, zira bir fırında faaliyet sorunlarına neden olmaları mümkündür. Bu sebeple bu bileşenler için işlem türü ve spesifik fırın koşullarına göre her tesisin spesifik kabul kriterleri belirlemesi gerekmektedir.

Çizelge 5.2’de karışık evsel atıktan üretilmiş olan ATY’nin çimento fabrikalarında ana brülörden ve pre-kalsinatörden beslenmesi için verilmiş olan kalite parametreleri bulunmaktadır (Ibbetson&Wengenroth, 2007).

Çizelge 5.2 : Çimento fırınlarında kullanılacak ATY’nin besleme noktasına göre kalite parametreleri.

Kalite Parametreleri	Ana brülörden besleme	Pre-Kalsinatörden Besleme
Kalorifik değer (MJ/kg)	Min. 4750	Min. 3550
Tane boyutu (mm)	<20	<25
Kül (%)	düşük	Maks. 20%
Klorür (%)	Genellikle < 1%	Genellikle < 1%

Ana brülörden besleme için tane boyutunun daha düşük olması beklenir. Ayrıca atığın içindeki kül miktarı arttığında da kalorifik değer azalmaktadır. Buna ek olarak klorür içeriğinin de genelde düşük olması beklenmektedir.

Fırın sisteminin konvansiyonel yakıtlar ve hammaddelerin kullanılması ve fırın faaliyetlerinin kontrolüne dair genel prensipler uygulanmalıdır. Özellikle tüm ilgili işlem parametrelerinin sürekli olarak ölçülmesi, kaydedilmesi ve değerlendirilmesi

gerekmektedir. Fırın operatörleri de sağlık, güvenlik ve çevre emisyonu boyutları da dahil olmak üzere, atık maddelerin kullanımına ilişkin gerekliliklere özellikle odaklanılarak uygun şekilde eğitimden geçirilmelidir.

Atık, fosil yakıtı ile karşılaştırılabilir yanma karakteristiğine sahip alternatif yakıt olarak kullanılan ve tehlikeli olmayan atıklar haricinde, atıkların fırının çalıştırılması ve kapatılması sırasında beslenmemesi gerekmektedir. Fırının pişirme koşulları için minimum faaliyet stabilitesi koşullarını sağlayan atık beslemesinin bağlantısının kesilme stratejisini açıklayan yazılı iş talimatları mevcut olmalı ve fırın operatörleri tarafından bilinmelidir.

Atığın mineral içeriği, klinkerin karakteristiğini değiştirebilmektedir. Ham karışım bileşim, verilen kimyasal ayar noktalarına uyacak şekilde ayarlanmalıdır. Klorür, sülfür ve alkali için giriş sınırları tanımlanmalı ve faaliyete yönelik ayar noktaları kati şekilde gözetilmelidir. Alkali, sülfür ve klorür zenginleştirme döngülerinin önüne geçme amaçlı yan kurulumlar, sadece yan kurulum yönetimi için uygun çözümlerin belirlenmiş olması halinde düşünülmelidir (UNEP, 2010).

5.3 ATY Kullanımının Potansiyel Etkileri

Tüm dünyada çok sayıda çimento fabrikasında alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Bu fabrikalardan Lafarge Kuruluşuna ait Malogoszcz çimento fabrikasında, atıklardan üretilen, PASi ve PASr adında, iki tür yakıtın yakılma işlemleriyle ilgili testler gerçekleştirilmiştir.

Lafarge Cement Polska grubuna ait fabrikalarda alternatif yakıt kullanımı ile ilgili olarak aşağıdaki kriterlerin sağlanması gerekmektedir:

- Kalorifik Değer—14.0 MJ/kg ve üstünde (haftalık ortalama),
- Klor İçeriği—% 0,2 ve altında,
- Sülfür İçeriği—% 2,5 ve altında
- PCB İçeriği—50 ppm ve altında,
- Ağır Metal İçeriği—2500 ppm ve altında [bunlardan: Cıva (Hg)-10 ppm altında ve toplam Kadmiyum (Cd), Talyum (Tl) ve Cıva (Hg)—100 ppm altında] olmalıdır.

PASi ve PASr yakıtlarının içeriklerine baktığımızda,

PASr alternatif yakıtı, kağıt, karton, folyo, bez, kumaş, plastik kap, bant, kablo ve temizleyici madde gibi atık türlerinin 0→70mm yada 0→40 mm büyüklüğünde tanecikler halinde öğütülmesi yöntemiyle üretilmiştir. Atıklar içerisinde petrol yağı, yağ, yağlayıcı, boya vb. maddeler de bulunabilmektedir.

Yakıtın nitelik parametreleri aşağıdaki şekildedir:

- Ortalama ısı değeri—24,376 MJ/kg
- Ortalama nem içeriği—% 3,19
- Ortalama kül içeriği—% 7,98
- Ortalama klor içeriği—% 0,42
- Ortalama kükürt içeriği—% 0,23
- Yığımsal yoğunluk— 100-300 kg/m³.

PASi alternatif yakıtı, yakıt talaş yada tütün tozu biçimindeki sorbentin (emici madde) boya, cila, ağır damıtma sonrası parçacıkları, petrol bazlı atıklar ile kirlenmiş diatom toprak gibi atıklar ile karıştırılması sonucu elde edilir. Yakıtın nitelik parametreleri aşağıdaki şekildedir:

- Ortalama ısı değeri—9,152 MJ/kg (yakıt bileşimine bağlıdır)
- Ortalama nem içeriği—%30,45
- Ortalama kül içeriği—%24,13
- Ortalama klor içeriği—%0,2424
- Ortalama sülfür içeriği—%0,28
- Yığımsal yoğunluk—350–450 kg/m³.

Yakıtların özelliklerine baktığımızda, kül içeriği düşük olan PASr yakıtının kalorifik değerinin yüksek olduğunu, Klor içeriklerine baktığımızda tesis atık kabul kriterlerini sağladığını ve %1'in altında olduğu görülebilmektedir.

PASi ve PASr adlı alternatif yakıtların kullanımı sırasında gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları Çizelge 5.3'de HCl emisyonları, Çizelge 5.4'de ağır metal emisyonları olarak verilmiştir (Mokrzycki ve ark., 2003).

Çizelge 5.3 : PASi yakıtı kullanıldığında oluşan HCl emisyonları.

Parametre	PASi Yakıtı Olmadan Ağır Metal Emisyon Ölçümü	PASi Yakıtı Uygulandığında Ağır Metal Ölçümü
Normal Şartlarda Kuru Gaz Debisi (tys.m ³ /sa)	237,299	205,890
Normal Şartlarda HCl Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	1,73	4,83
%10 Referans O ₂ ile Normal Şartlarda HCl Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	2,27	5,26
HCl Emisyonları (kg/h)	0,4109	0,9948

Çizelge 5.4 : PASi yakıtı kullanıldığında ağır metal emisyonları.

Parametre	PASi Yakıtı Olmadan Ağır Metal Emisyon Ölçümü		PASi Yakıtı Uygulandığında Ağır Metal Ölçümü	
	Ölçüm 1 (mg/kg)	Emisyon (kg/sa)	Ölçüm 1 (mg/kg)	Emisyon (kg/sa)
Toz	–	3,030	–	2,785
As	0,2	6,06E-07	0,2	5,57E-07
Cd	1,0	3,03E-06	1,0	2,79E-06
Cr	20,0	6,06E-05	25,0	6,96E-05
Pb	77,0	2,33E-04	92,0	2,56E-04
Zn	54,0	1,64E-04	39,0	1,09E-04
Cu	12,0	3,64E-05	14,0	3,90E-05

Çizelge 5.5’de PASi yakıt uygulamasına ait toz emisyonları; Çizelge 5.6’da PASr ve PASi yakıtlarının kullanımı sırasında klinkerlere ait ağır metal içeriği verilmiştir (Mokrzycki ve ark., 2003).

Çizelge 5.5 : PASi yakıt uygulandığında toz emisyonları.

Parametre	PASi Yakıtı Olmadan		PASi Yakıtı Uygulandığında	
	Sol Baca Ölçüm Ort.	Sağ Baca Ölçüm Ort.	Sol Baca Ölçüm Ort.	Sağ Baca Ölçüm Ort.
Hava basıncı (hPa)	990,00	990,00	989,00	1008,00
Göreceli basınç (hPa)	-10,95	-11,70	-13,80	-14,00
Sıcaklık (°C)	109,00	112,00	116,00	114,00
Gaz nemlenme derecesi (kg/kg)	0,04	0,04	0,08	0,08
Kuru gaz içerisinde CO ₂ payı (%)	14,00	16,10	16,60	18,30
Kuru gaz içerisinde O ₂ payı (%)	13,50	11,70	10,05	11,80
Normal Şartlarda Kuru Gaz Yoğunluğu (kg/m ³)	1,37	1,39	1,39	1,39
Normal Şartlarda Nemli Gaz Yoğunluğu (kg/m ³)	1,34	1,35	1,32	1,32
Ölçüm Koşullarından Gaz Yoğunluğu (kg/m ³)	0,93	0,92	0,89	0,92
Ortalama Gaz Hızı (m/s)	20,35	19,75	19,45	17,70
Ölçüm Koşullarında Gaz Debisi (tys, m ³ /sa)	186,45	180,95	178,20	162,17
Normal Şartlarda Nemli Gaz Debisi (tys, m ³ /sa)	128,80	124,01	120,44	112,29
Normal Şartlarda Kuru Gaz Debisi (tys, Nm ³ /sa)	121,34	115,96	106,68	99,20
Normal Şartlarda SO ₂ Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	128,17	240,89	307,59	167,27
%10 Referans O ₂ ile SO ₂ Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	167,84	315,45	298,36	182,17
SO ₂ Emisyonu (kg/h)	15,55	27,93	32,82	16,59
Normal Şartlarda NO _x Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	847,00	1045,90	1064,31	1148,20
%10 Referans O ₂ ile NO _x Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	1109,16	1369,64	1126,28	1250,52
NO _x Emisyonu (kg/h)	102,77	121,29	113,53	113,90
Normal Şartlarda CO Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	260,84	363,73	665,39	578,70
%10 Referans O ₂ ile CO Konsantrasyonu (mg/Nm ³)	341,57	476,31	679,59	630,27
CO Emisyonu (kg/h)	31,65	42,18	70,99	57,41
Normal Şartlarda Toz Konsantrasyonu (Kuru Gaz) (g/Nm ³)	0,01	0,01	0,01	0,01
%10 Referans O ₂ ile Normal Şartlarda Toz Konsantrasyonu (kuru gaz) (g/Nm ³)	0,02	0,02	0,02	0,02
Toz Emisyonu (kg/h)	1,52	1,51	1,34	1,45

Çizelge 5.6 : PASi ve PASr kullanımını sırasında klinkere ait ağır metal içeriği.

Element (ppm)	Alternatif yakıt olmadığına alınan nihai örnek	Alternatif yakıt PASr uygulandığında nihai örnek	Alternatif yakıt PASi uygulandığında nihai örnek
As	73	81	77
Cr	42	43	44
Zn	57	187	62
Cd	3	4	3
Pb	<10	<10	<10
Co	8	8	5
Ni	20	20	19
V	40	36	32
Cu	11	21	55
Be	0,5	0,5	0,5
Mo	<3	<3	5
Tl	<30	<30	<30
Hg	3	2	2
Mn	131	153	137

PASr yakıtı yakıtı intikalden ve ana brülörden verilerek sistem beslenmiş olup aşağıdaki sonuçlar kaydedilmiştir:

- Yakıt beslemesi intikalden yapıldığında CO içeriğinde artış gözlemlenmiştir, bu nedenle yakıt fırın ana yakma biriminden verilmelidir.
- Havaya karışan emisyonlar sınır değerlerin altındadır.

PASi alternatif yakıt beslemesi intikalden gerçekleştirilmiştir. PASr yakıt türünde olduğu gibi testler olumlu sonuçlar vermiştir. PASr yakıt türünde belirtildiği gibi ana oksit elemanlarına ait içerik ile üretilen klinker faz bileşimi yakıt eklenmeden gerçekleştirilen klinker üretimindeki ile benzerlik göstermektedir (Mokrzycki ve ark., 2003).

5.3.1 ATY kullanımı sırasında ağır metaller salımları

Ağır metallere her birinin tek başına kirletici-salım davranışını belirleyen faktörler, proses giriş nitelikleri, toz toplama sisteminin toplama verimliliğinin yanında, fırın sistemi içindeki davranışlarıdır.

Klinker fırınlama koşulları altında çalışan kuru proses uygulamasında, As, Cr,Cu, Ni, Zn, Be ve V gibi hammaddeler ve yakıtlarla birlikte prosese yüklenen elementlerin, hemen hemen tamamı, fırın sisteminden dışarı klinkerle birleşik vaziyette çıkmaktadır. Aynı şekilde Pb ve Cd'nin bir kısmı da klinker içine hapsolmuş durumdadır. Siklon ön-ısıtıcı fırın sisteminde klinkerle birlikte çıkan Pb ve Cd, aşağı yukarı fırınla ön-ısıtıcı arasındaki belirgin Pb ve Cd döngüsü ile denge halindedir.

Tl (Talyum) ve Hg (Cıva) ise klinker dokusunun içinde hapsolmuş durumda olmazlar. Tl bileşikleri döner fırın içinde ve siklon ön-ısıtıcı fırınların içinde buharlaşır, 450 ile 550 °C sıcaklık aralığında ön-ısıtıcı üst kısımlarında yoğunlaşır. Prosesin doğasından gelen dahili döngü sonucunda oluşan yanmamış gaz tozları aracılığıyla harici Tl döngüsü meydana gelir. Tl salımlarının seviyesi, harici döngünün konsantrasyon seviyesi ve toz toplayıcı ekipmanın toplama verimliliği tarafından belirlenir. Hg, toz toplayıcı bölgesinde ham malzeme parçacıkları üzerinde yoğunlaşan gaz halinde bileşenler meydana getirir. Yoğuşma ve dolayısıyla Hg'nin ortamdaki uzaklaştırılması, azalan egzoz sıcaklıklarıyla ters orantılı olarak artacaktır. Siklon ön-ısıtıcı fırın sistemlerinden alınan ölçümlerin gösterdiğine göre; 130 °C altındaki egzoz gaz sıcaklıklarında, Hg nin % 90'ı parçacıkların üzerinde yoğunlaşmış biçimde bulunur. Bu şu anlama gelir: Hg bileşiklerinin hemen hemen tamamı, fırın sistemindeki elektrostatik çöktürücü tarafından uzaklaştırılır.

Flanders'da, ilgili zararsız atıkların ortaklaşa-yakılması konusundaki birtakım senaryolar için Hg salımları hesaplanmıştır. Model teşkil edecek hesaplamalar için Walloon çimento fırınlarının Flanders'da kurulduğu varsayılmıştır. Elde edilen bilgiler şunu göstermiştir: Çimento fırınlarında katı atıklardan geri kazanılmış atık kullanılmasının, Flanders'daki ağır metal salımları üzerinde herhangi bir önemli etkisi bulunmamaktadır (ERFO, 2005).

Ayrıca çimento fırınlarında kullanılan fosil yakıtların çoğunun içinde bağlı halde bulunan ağır metaller, yanma esnasında açığa çıkıp ve parçacıklar üzerinde veya

buhar olarak atmosfere salınırlar. Metallerin açığa çıkması birkaç şekilde olur, fakat çoğunluğunu, proses akış yönü sonrasındaki kirlilik kontrol cihazlarına giren baca gazları da dahil olmak üzere, uçucu küller gibi yanma artıkları oluşturur.

Metal elementlerin çoğu parçacıklarla birleşmiş halde bulunur. Uçucu elementler, daha büyük yüzey alanı olması dolayısıyla, baca gazı akışı içindeki parçacıkların yüzeylerinde yoğuşmayı tercih ederler. Uçucu metal elementlerin, yanma haznesinden, bacaya akış yönünde sürüklenen ince taneli parçacıklar üzerinde birikmesi dolayısıyla, bu elementlerle ilgili kirletici salımları, yakıtın dönüştürülme yönteminden ziyade gazı temizleyen ekipmanın verimliliğine bağlıdır. Katı veya sıvı yakıt tüketen termik tesislerde oluşan baca gazlarından parçacık malzemeleri ayırmak için yaygın olarak elektrostatik çökelticiler ve torbalı filtreler kullanılır. Bu sistemler, % 99,9'dan fazla bir toplam verimlilikte çalışırlar. Bununla beraber, daha küçük tane dağılım boyutuna sahip (yani, üstünde metal elementlerin biriktiği parçacıkların da bulunduğu tane dağılımı) malzemelerde filtreleme verimliliği genelde düşüktür.

İnce tanecikli malzemeleri kontrol etmede torbalı filtreler daha iyidir ve parçacıkların yüklenmesi ve uçucu kül niteliklerine karşı daha az hassastırlar. Filtrelerin giriş kısmından önce baca gazlarını şartlandırmak üzere küçük miktarlarda katkılar ilave ederek toz toplamının verimliliği daha da artırılabilir.

Islak yöntemli FGD (Baca Gazı Desülfürizasyonu) temizlik sistemleri, bazı metal salınımlarını azaltmak hususunda etkin bir yöntemdir. Bunun başlıca sebebi: baca gazları sistemin kir emici kısmını geçerken sıcaklıkları yaklaşık 50 – 60 °C ye kadar düşer, bu durum, buhar fazında olan uçucu elementlerden birçoğunun yoğuşmasına ve tutulmasına yolaçar.

Evsel arıtma çamuru ve diğer bazı katı geri kazanılmış yakıtlar gibi ikincil yakıtlar, geleneksel yakıtlara kıyasla daha yüksek ağır metal konsantrasyonlarına sahip olabilirler; buhar fazında veya çok aşırı ince duman halinde kalabilirler. İkincil yakıtlar değerlendirilirken, Hg konsantrasyonu, uçuculuğu göz önüne alındığında, tüm elementlerinkine nazaran en kritik olanlardan birisidir.

IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change)'nin referans dökümanında, yanma proseslerinde ikincil yakıt kullanan bazı tesisler hakkında bilgiler bulunmaktadır. Örneklerden bir tanesi, ikincil yakıt olarak kurutulmuş evsel arıtma

çamuru kullanan, taş kömürü tozuyla çalışan DBB tesisine aittir (girdi olarak ağırlıkça % 2.2 – 4,7 kurutulmuş çamur verilmiştir). Evsel arıtma çamurunun taş kömürü ile birlikte yakılmasından dolayı (ortaklaşa yakma), As ve özellikle Hg gibi uçucu ağır metallerin atmosfere salınan miktarları teorik olarak artabilmektedir. Bazı uygulama bilgileri Çizelge 5.7’de gösterilmiştir (ERFO, 2005).

Çizelge 5.7 : Evsel arıtma çamurları ile kömürün birlikte yakılması durumunda kirletici-salın değerleri.

	Kömür yakma (mg/Nm ³)	Ortaklaşa Yakma (mg/Nm ³)
Toplam Cd, Tl	<0.005	<0.005
Hg	0.003-0.0012	0.0001-0.0013
Toplam Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	<0.075	<0.075

Evsel arıtma çamurunun içindeki Hg konsantrasyonu 0.4 – 1.6 mg/kg d arasındadır, yakma sonucunda yan ürünlerin herhangi birinde, (kül, alçı, atıksu) dioksin/furan konsantrasyonlarıyla ilgili herhangi bir bulguya rastlanmamış, yan ürünlerin ağır metal konsantrasyonlarında önemli bir artış gözlenmemiştir. Yan ürünlerin kalitesi hemen hemen hiç değişmemiş, ve sonuç olarak kazan külü ve alçı normalden farklı birşey yapılmaksızın aynı şekilde standart işlemlere tabi tutulmaktadır (ERFO, 2005).

ATY, Çimento sektöründe alternatif yakıt olarak büyük bir önem taşımaktadır. Avrupa Birliği’ndeki stratejiye göre, ATY gibi alternatif yakıt kullanımının Portland Çimentosu maliyetleri üzerinde %30-40 azaltımı sağlamasının sürdürülebilir gelişim için hedeflendiği belirtilmektedir. Avrupa’da 1995’de çimento sektöründe ikincil yakıt ikamesi %10 mertebelerinde iken petrokok %39, kömür %40 ve fuel oil ve gaz yakıtlar ise %9 oranında tüketilmekte idi. Hollanda’da ısıl ikame %72 iken Almanya’da %30, İtalya’da %5 ve İspanya’da %2 oranlarında idi.

Çimento sektöründe ATY kullanımının, teknolojik üretim sistemi ve klinker kalitesi üzerinde, lokal hava kalitesi üzerinde, sera gazı azaltımı üzerinde ve katı yakıt ikamesi olarak kullanımının maliyetler üzerinde olmak üzere çeşitli yönlerden ele alınmaktadır. Genon ve Brizio’ya göre Avrupa genelinde ve İtalya özelinde kok ve kömür yerine ATY kullanımı dolayısı ile çimento sektöründe konvansiyonel kirletici gazlar bakımından herhangi bir değişiklik söz konusu değildir. NO_x emisyonları bakımından, düşük alev sıcaklığı ve düşük hava fazlası dolayısı ile, azaltıcı

etkisinden de bahsedilebilir. Klorlu mikro kirleticiler açısından da fosil yakıtlı durumla fark bulunmamaktadır. Ancak ikame yakıt olarak ATY kullanımının en önemli etkisi ağır metaller bakımından ortaya çıkmaktadır.

Çimento fırınlarında yakılan ATY içindeki kirleticilerin bölge hava kalitesi üzerindeki etkisi gaz fazına ya da klinker bünyesine aktarma oranlarına bağlı olarak olacaktır. ATY'nin dorudan yakılması söz konusu olduğunda kirleticilerin ya atık gaz akımına ya da arıtma atıkları içine aktarılacağı bilinmektedir.

Avrupa Komisyonu (2003) raporuna göre çimento fırınlarında 1 ton ATY yakılması halinde kömür kullanımına göre civa emisyonunda 421 mg, kurşun emisyonlarında 4,1 mg ve kadmiyum emisyonlarında 1,1 mg artışa neden olduğu bilinmektedir.

ATY içindeki kirleticilerin farklı yakma sistemlerinde gaz fazına geçişleri ile ilgili aktarım faktörleri (AF) Çizelge 5.8'de verilmiştir (Genon ve Brizio, 2008).

Çizelge 5.8 : ATY'nin çimento fırınlarında birlikte yakılması durumunda ATY içindeki kirleticilerin atık gaz akımına aktarılma faktörleri.

	ATY için Aktarım faktörleri (AF)		Atık solventler için AF
	Çöp fırınları için atık gaz AF	Çimento fırınları için atık gaz AF	Çimento fırınları için atık gaz AF (%)
Klor	0.08	3.4	-
Sülfür	0.1	3.1	-
Kadmiyum	0.5	1.873	4.32
Talyum	0.065	0.875	2.81
Cıva	5	49	24.96
Antimoni	0.004	0.042	-
Arsenik	0.001	0.020	0.01
Kurşun	0.005	1.015	0.21
Krom	0.005	0.018	0.01
Kobalt	0.005	0.014	-
Bakır	0.005	0.040	0.01
Manganez	0.005	0.010	-
Nikel	0.005	0.019	0.001
Vanadyum	0.005	0.050	-
Kalay	0.005	0.043	-
Çinko	Veri yok	0.437	0.18

Çizelge 5.9'da verilenlerden ATY'nin doğrudan yakma yerine çimento fırınlarında birlikte yakılması durumunda atmosfere verilme oranları bakımından AF'nin klor ve sülfür bakımından oldukça yüksek gerçekleştiğini göstermektedir. Ağır metallerin arıtma sistemleri içinde tutulma oranlarının da çimento üretimine göre daha yüksek olmaktadır. Birlikte yakılma durumunda ağır metallerin büyük bir kısmı klinker içinde tutulmaktadır. Atık solventlerin çimento fırınında birlikte yakılması durumunda kirleticilerin atık gaz akımına aktarma oranı ATY'ye göre çok daha yüksek gerçekleşmektedir.

Bir çimento fabrikasında ATY'nin birlikte yakılması durumunda genellikle petrol koku yada kömür kullanımı ile ilişkili olan seviyelerle karşılaştırıldığında emisyon değerleri ve üretilen klinkerdeki olası değişimleri anlamak son derece önemlidir. ATY ya da geleneksel yakıtlar içerisindeki ağır metal konsantrasyonları oldukça değişken yapıdadır.

Çizelge 5.9'da ATY'nin kirlenme durumuna dair çok geniş bir veritabanı özeti sunulmaktadır. Veriler Avrupa Komisyonuna ait nihai rapor (2003), European Recovered Fuel Organisation'ın çalışması ve İtalya'da yüksek kaliteli ATY üretimi hakkında özel bir analizden alınmıştır (Genon ve Brizio, 2008).

Çizelge 5.9 : ATY ve çimento üretiminde kullanılan yakıtların bileşenleri.

Parametreler	ATY Bileşimi		İtalyan Yasal Limitleri		Kömür		Petrol koku	
	Min.	Mak.	ATY	Yüksek kaliteli ATY	Mak	Min	Mak	Min
N (%)	0.52	0.52			1.3	1.3	2	2
S(%)	0.1	0.2	0.6	0.3			5	5
Cl (%)	0.28	0.7	0.9	0.7			0.01	0.01
KD(kJ/kg)	13,000	22,000 15,000 20,000			23,220	33,040	33,863	33,863
Nem (%)	2.9	34	25	18				
Sb (ppm kuru)	9	14.7			1	1	0.2	0.2
As (ppm kuru)	0.9	8.8	9	5	0.5	10	0.46	0.46
Cd (ppm kuru)	0.18	2.6	<7	3	0.05	10	0.1	0.3
Cr (ppm kuru)	11.3	140	100	70	0.5	60	2	104
CrVI (ppm kuru)								
Co (ppm kuru)	0.6	4			0.5	20		
Mn (ppm kuru)	28	210	400	200	5	300		
Hg (ppm kuru)	0.1	0.4	<7	1	0.02	4.4	0.02	0.1
Ni (ppm kuru)	0.85	21	40	30	0.5	100	200	300
Pb (ppm kuru)	25	157	200	100	1	300	2.4	100
Cu (ppm kuru)	45	266	300	50	5	60		
Sn (ppm kuru)	4	500			10	10		
Tl (ppm kuru)	0.02	0.5			1	1	0.04	3
V (ppm kuru)	0.3	7			1	100	400	2342
Zn (ppm kuru)	225	340			1	1000	6.8	6.8

Rapor edilen veriler malzemelerin kalorifik değeri ile bir çimento fırınındaki olası ısı ikamesine dayalı olarak Çizelge 5.10'da gösterildiği şekilde bir karşılaştırma yaratmak için kullanılmıştır. Son iki sütun VDZ tarafından yayınlanan bir çalışmadan türetilmiştir (Genon ve Brizio, 2008).

Çizelge 5.10 : Geleneksel ve alternatif yakıtlar arasında ağır metal konsantrasyonlarının karşılaştırılması.

	ATY aralığı		Kömür aralığı		Petrol Koku aralığı		VDZ (maksimum değerler)	
	Min. (mg/MJ)	Maks. (mg/MJ)	Min. (mg/MJ)	Maks. (mg/MJ)	Min. (mg/MJ)	Maks. (mg/MJ)	Yakıtlar (mg/MJ)	Alternatif yakıtlar (mg/MJ)
Sb	0.419	0.685	0.036	0.036	0.006	0.006	0.07	0.05
As	0.042	0.410	0.018	0.355	0.014	0.014	1.9	1
Cd	0.008	0.121	0.002	0.355	0.003	0.009	0.3	0.7
Cr	0.527	6.524	0.018	2.133	0.059	3.071	3.7	21
CrVI	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	0.028	0.186	0.018	0.711	-	-	1.2	8
Mn	1.305	9.786	0.178	10.665	-	-	-	-
Hg	0.005	0.019	0.001	0.156	0.001	0.003	0.06	0.1
Ni	0.040	0.979	0.018	3.555	5.906	8.859	3.5	25
Pb	1.165	7.316	0.036	10.665	0.071	2.953	10	25
Cu	2.097	12.396	0.178	2.133	-	-	3.7	67
Sn	0.186	1.282	0.355	0.355	-	-	0.4	0.7
Tl	0.001	0.023	0.036	0.036	0.001	0.089	0.15	0.1
V	0.014	0.326	0.326	3.555	11.812	69.161	6.7	16
Zn	10.485	15.844	0.036	35.549	0.201	0.201	8	625

Açıkça görüldüğü gibi ATY içerisinde petrol kokuna oranla genelde daha yüksek Sb, Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr ve Zn içeriği bulunmaktadır. Ancak kömür de bazı durumlarda yüksek oranda Hg, Co, Cd ve Tl içerebilmektedir.

Bu veriler ile Çizelge 5.9'da verilen aktarım faktörlerine dayanarak (çimento fırınlarında atık gaza AF) kömür ve petrol koku yerinde ATY kullanımının çimento fırınına ait emisyonlar üzerindeki etkisini görmek üzere bir simülasyon gerçekleştirilmiştir (%50 seviyesinde ısı ikamesi farz edilmiştir). Çizelge 5.10 sonuçları göstermekte olup petrol koku yerine ATY kullanıldığında ağır metal emisyonu üzerinde, özellikle cıva açısından, negatif bir etki gözlenirken kömür yerine ATY kullanıldığında genelde pozitif bir etki beklenmektedir. Yine bu simülasyon için tüm tahmin edilen değerler mevcut emisyon sınırları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Aynı simülasyon geleneksel ve alternatif yakıtların bileşimi kullanılarak gerçekleştirilmiş, VDZ tarafından sunulmuş ve sonuçlar Çizelge 5.11'de özetlenmiştir. Bu durumda, alternatif yakıt kullanımının ağır metal emisyonunu ciddi biçimde kötüleştirdiği ve tehlike yaratacak biçimde sınır seviyesine ittiği açıkça görülmektedir (Genon ve Brizio, 2008).

Çizelge 5.11 : Çimento fırınına farklı yakıtların beslenmesine bağlı olarak değişen ağır metal emisyonları.

	100% petrol koku	50% petrol koku 50% ATY	100% kömür	50% kömür 50% ATY	Atık yakma (mg/Nm ³) sınır direktifi
Cd + Tl min (mg/Nm ³)	0,00006	0,00011	0,00034	0,00025	0,05
Cd + Tl mak (mg/Nm ³)	0,00093	0,00169	0,001690	0,00467	
Hg min (mg/Nm ³)	0,00029	0,00127	0,00034	0,000340	0,05
Hg mak (mg/Nm ³)	0,00143	0,00524	0,07588	0,04246	
Sum HM min (mg/Nm ³)	0,00769	0,00984	0,00049	0,00673	0,5
Sum HM mak (mg/Nm ³)	0,06613	0,07076	0,11206	0,09668	

Ancak Zevenhoven and Kilpinen tarafından rapor edilen verilerden de gözlenebileceği gibi ATY bileşimi oldukça değişken yapıda seyredebilmektedir. Hg konsantrasyonları farzedilen 0.1-04 ppm aralığı yerine 1 ila 10 ppm arasında ve Cd konsantrasyonları 0.16-2.6 ppm yerine 1 ila 10 ppm aralığındadır. Bu konsantrasyonların sonuçları değiştirebileceği ve farklı çıkarımlar yapmaya yol açabileceği açıktır. Bu durum özellikle sınırı aşan cıva açısından geçerlidir.

Her durumda geleneksel yakıtlar yerine ATY kullanımının çimento fırınlarında atık gaz içerisinde yüksek miktarda ağır metal oluşması açısından tehlikeli olduğu görüldüğünden yakılacak olan ATY nitelik ve niceliği derinlemesine analiz edilmelidir.

The European Recovered Fuels Organisation çimento fırınında kuru işleme ait emisyon sınırlarına uyum sağlamak için katı yakıtlarda (SRF) maksimum seviyede ağır metal konsantrasyonu tavsiye etmektedir (Çizelge 5.12).

Aktarım faktörlerinin yakıtın bileşimi (örneğin, cıvanın hangi moleküller etrafında yapılandığı) halojenlerin varlığı (örneğin, Pb, Ag, Ni klorid olarak çok daha uçucudur) ve indirgeyici yada okside edici bir atmosferin ortaya çıkışına göre değişebildiğinin altını çizmek gerekir.

Aktarım faktörlerini etkileyebilen bir diğer faktör de genellikle elektrostatik bir çökeltici (ESP) şeklinde olan ve çıkış gazı sıcaklığında partikül formunda var olan metalleri bertaraf edebilen, toz giderme sistemidir. Ayrılan tozlar genellikle farin içerisine geri dönüştürülerek ağır metallerden oluşan bir dahili döngü yaratılır. Eğer ESP yerine daha etkin ayırma özelliği olan torbalı filtre kullanılır ise sisteme geri döndürülen ağır metal konsantrasyonu büyüdüğünden aktarma faktörleri de değişebilir. Sonuç olarak atık gaz içerisindeki buhar basınçları da aynı şekilde artabilir. Bu durum farklı kaynama noktaları olan farklı bir katı/gaz dengesine ve klinker yada emisyonlara doğru farklı ağır metal aktarımlarına yol açabilmektedir (Genon ve Brizio, 2008).

5.3.2 Çimento prosesinde ATY kullanımı sonucunda klorun ısıl davranışı

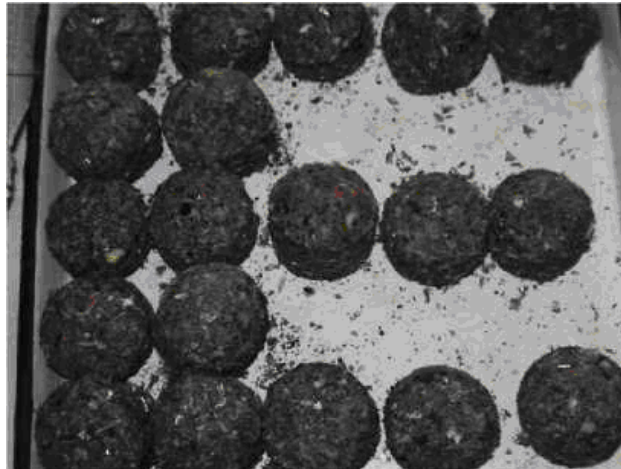
Yakma sırasında ATY içeriğindeki HCl biçiminde var olan klor bileşiminin açığa çıkabilmesinden dolayı ve bu bileşimin duman içerisinde bulunan aromatik hidrokarbon ile tepkimeye girerek son derece zehirli olan dioksinlerin oluşumuna yol açabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple CRDF'in (Kompozit Atıktan Türetilmiş

Yakıt) çimento fırınlarında kullanılması ile ortaya çıkan klorun davranışlarını incelemek üzere Çin’de bir çalışma yapılmıştır (Song ve arkadaşları, 2009).

RDF (ATY)'ye oranla CRDF'nin kolay üretim ve saklama koşulları gibi yakıtsal açıdan bazı avantajları bulunmaktadır. CRDF yakma prosedüründe, HCl ve dioksin gibi ikincil gazların emisyonu belirgin seviyede azaltılabilmektedir. Bu açıdan CRDF kullanımı kentsel atıkların zararsız biçimde işlenmesi açısından etkili bir yaklaşım haline gelmektedir.

Bir sıcaklık işlevi olarak CRDF'ye ait klor salınım performansını değerlendirmek üzere yanma ve piroliz (ısıl bozunma) sırasındaki klor emisyon davranışı incelenmiştir.

CRDF soğuk kompres ile kalıplama yöntemi kullanılarak kentsel atığın toz kömür ile birleştirilmesi şeklinde hazırlanmıştır. Öncelikle, Harbin şehrinde bulunan altı atık sahasından elde edilen şehirsal atıklar sınıflandırılmış, kurutulmuş ve öğütülmüş ve bunlar içerisinde yanıcı bileşenler seçilmiştir. Daha sonra yanıcı madde kütleli olarak sekize iki oranında toz kömür ile birleştirilmiştir. Bu karışıma az miktarda bağlayıcı katkı maddesi eklenmiş ve soğuk kompres kalıplama uygulanmıştır. Son olarak 25MPa basınç altında belirli bir süre sıkıştırılma sonucu nihai CRDF ürünü elde edilmiştir. Elde edilen CRDF küre benzeri bir yapıda olup yaklaşık 20 g ağırlığındadır. Sıradan ATY ile karşılaştırıldığında CRDF daha yüksek (22.75 x 103kJ/kg) bir kalorifik değere sahiptir. CRDF ürününün görünümü Şekil 5.3'de gösterilmiştir. CRDF genel formülü $C_xH_yO_zS_iN_jCl_k$ şeklinde ifade edilmiş olup CRDF'in bileşim analizleri de Çizelge 5.12'de verilmiştir.

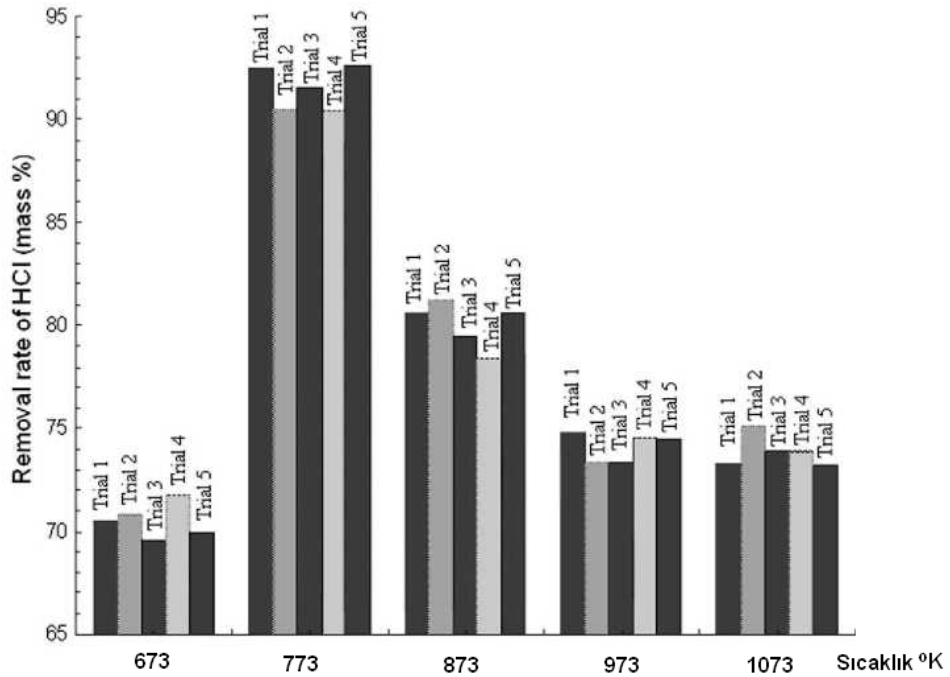


Şekil 5.3 : CRDF ürünü görünümü.

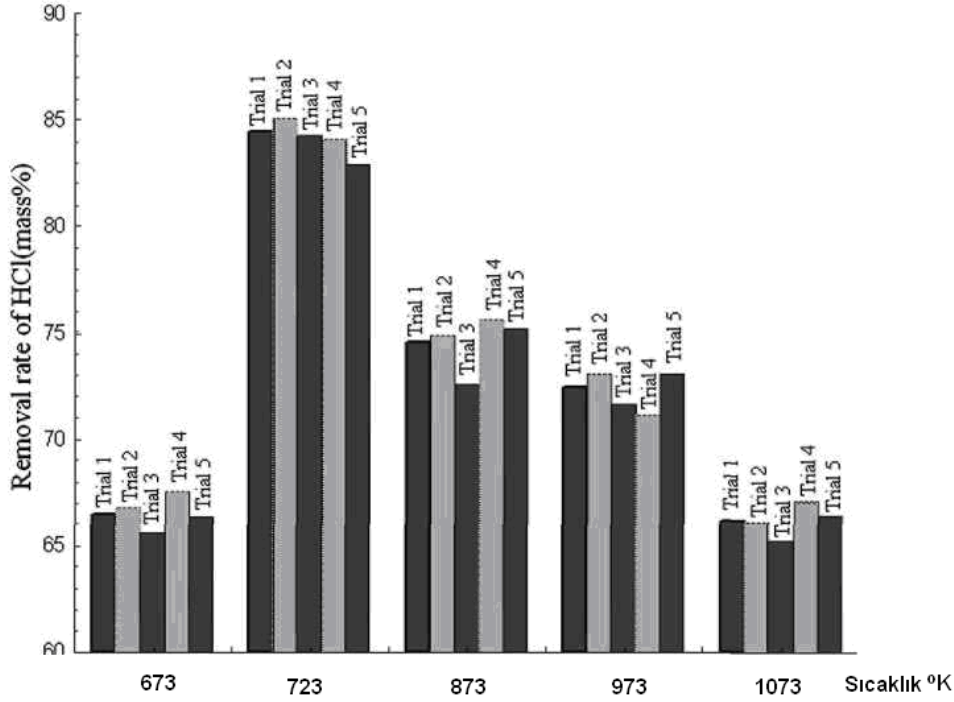
Çizelge 5.12 : CRDF'in elementel bileşim analizi.

Elementler	C	H	O	N	S	Cl
İçerik (Kütlece %)	39,60	3,71	26,90	0,79	0,24	1,39

Yapılan çalışmalar sonucunda, CRDF içeriğindeki klorun yanma ya da piroliz sürecinde HCl şeklinde açığa çıktığı görülebilmektedir. Yanma sırasında, sıcaklık artışı sonucunda CRDF'den açığa çıkan klorun davranışları gözlemlenmiştir. Klor salınım hızlarının 673.15-1073.15°K sıcaklık aralığında belirgin miktarda artış gösterdiği fark edilmiştir. Bu açıdan, beş farklı sıcaklık seçilmiş (673.15, 773.15, 873.15, 973.15, ve 1073.15°K) ve her bir sıcaklıkta beş deney gerçekleştirilmiştir. Beş çalışmaya ait ortalama klor salınım hızı yanma sıcaklığının bir işlevi olarak Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Maksimum klor salınım hızları 773.15°K seviyesinde görülürken sıcaklığın artmasıyla kademeli olarak düşüş gözlenmiştir. Piroliz işlemi sırasında da yanma süreci ile aynı eğilimler elde edilmiş olup Şekil 5.5'de gösterilmiştir (Song ve arkadaşları, 2009).



Şekil 5.4 : CRDF'in yanması işlemine ait klor salınım oranı.



Şekil 5.5 : CRDF’in piroliz işlemine ait klor salınım oranı.

Yanma sırasında en yüksek seviyede inorganik klor salınım oranı 773.15°K seviyesinde kütsel olarak %92 biçiminde gözlemlenmiş olup piroliz esnasındaki salınım hızına ait tepe noktası değeri ise %84 ile 723.15°K seviyesinde görülmüştür. Bu veriler CRDF kaynaklı inorganik klorun 723.15 ve 773.15°K sıcaklık aralığında etkili biçimde açığa çıkabildiğini göstermektedir. Böylece, yüksek sıcaklıkta HCl ile aromatik hidrokarbon arasındaki reaksiyon önlenmiş olur ve böylece dioxin emisyonları oluşumunun azalmasını sağlar.

Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi verilerine dayalı olarak, hem yanma hem de piroliz sürecinde 973.15 ve 1073.15°K yüksek sıcaklık seviyelerinde organik klor salınımı gözlenmiştir. Piroliz sırasında atık gaz içeriğinde, otuz üç farklı organik klor tespit edilirken yanma sürecinde on üç farklı organik klor tespit edilmiştir. Piroliz sürecinde zararlı ve toksik bileşen konsantrasyonlarında artış gözlenmiştir. Oksijen konsantrasyonundaki artış ile de, CRDF’nin yanma işlemleri kolaylaşmıştır.

CRDF’ye ait termal süreç içerisinde üç ana faz olduğu görülmektedir: İlk kütle kaybı (%38.5) 473 ile 573°K sıcaklık aralığında meydana gelirken, ikinci kütle kaybı (%20.35) 673 ile 773°K arasında, %22.25’lik en son kütle kaybı ise 873 ile 1073°K sıcaklık aralığında meydana gelmiştir.

Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaya dayalı olarak piroliz sürecinde üretilen gazdan meydana gelen otuz üç çeşit farklı organik bileşen varken yanma sürecinde on üç farklı gaz üretilmiştir.

Piroliz sürecinde toksik bileşenlerin belirgin biçimde artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Piroliz sürecinde oluşan benzen ve metil-benzen içeriğinin yanma sürecinde üretilenlerden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Piroliz sürecinde üretilenlerle karşılaştırıldığında yanma sürecinde tespit edilen en önemli toksik maddeler 3-trikloropropilen ve 5-klorometil klorokaprilat içeriğinden oluşmaktadır.

Çizelge 5.13, 673.15-1073.15°K sıcaklık aralığında tanımlanan organik klor türlerini özetlemektedir (Song ve arkadaşları, 2009).

Çizelge 5.13 : CRDF’in yanması ve pirolizi sonucunda oluşan organik klor türleri

Bileşim	1073,15 K		973,15 K		873,15 K		773,15 K		673,15 K	
	Piroliz	Yanma	Piroliz	Yanma	Piroliz	Yanma	Piroliz	Yanma	Piroliz	Yanma
3,3-Dimethyl pentan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Benzen	+0,472	0,354	+0,425	0,323	+0,496	+0,386	+0,397	+0,351	+0,440	+0,407
2,3-Dimethyl pentan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3-Methyl heksan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tirbutil fosfin	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1,3-Dikloropropan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3-Kloropropen	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Metilbenzen	+0,719	+0,300	+0,521	+0,348	+0,479	+0,264	+0,396	+0,306	+	+
Etilbenzen	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Feniletilen	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kloro-ester	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Undekan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2-İndolon	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dibutil fitalat	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dihidrik fenol	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Benzil kloroformat	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Naftalin	+1,56	+	+1,13	+	+0,95	+0,518	+1,68	+0,348	+0,83	+0,792
Cycloolefine	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5-Klorometil klorokaprilat	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
10-Metil-1-oktadesen	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1-Metilnaftalin	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tridesil epoksietan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3-Niril-4-metiltiyoprimidin	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Fenatren	+0,076	+	+0,127	+	+0,081	+0,0285	+0,049	+0,054	+0,088	+0,058
2-Undeklenik asit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1,13-Diolefin-3-,14 keton	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Nonadekan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Laran	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2-Lauroleic	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5-Klorometil-klorodekanoat	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
n-Heneikosan	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3-Tetradesan-1-ol-asetat	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Antrasen	+0,082	+	+0,018	+	+	+0,061	+0,032	+	+0,069	+

Not: (+, tespit edildi; değer, tespit edilen yoğunluk).

Yanma sürecinde daha düşük sıcaklık aralığında (773.15-873.15 K) klorun büyük kısmının inorganik madde formunda olduğu hipotezine varılabilir. PCDD ve PCDF oluşum koşulları bozulmuş ve bu durum daha yüksek sıcaklık aralığında organik klor oluşumunun azalmasına yol açmıştır. Bunun özellikle dioksin oluşumunun önlenmesi biçiminde ikincil kirliliğin ortadan kaldırılmasına katkıda bulunduğu söylenebilir.

Her ne kadar CRDF düşük sıcaklıkta yanma ve piroliz süreçlerinde benzer termal davranışlar göstermiş olsa da yanma sürecindeki kinetik özellikleri yüksek sıcaklıktaki piroliz sırasındaki bozunum hızından çok daha hızlıdır. Bu olgu tepkimeye ait etkili çarpışma kesrini artıran ve yanma sürecinde kinetik oksidasyon tepkimesini iyileştiren oksijen konsantrasyonu ile açıklanabilir (Song ve arkadaşları, 2009).

5.4 ATY Kullanımının Çimento ve Beton Üzerine Etkileri

Çimento fabrikalarında, alternatif yakıtların yakılmasından sonra ortaya çıkan kül, yarı mamul olan klinker bünyesine katılmakta; ve bu durumun katkının son ürün olan çimento üzerinde herhangi bir negatif etkisi bulunmamaktadır. Yani arazide depolanması gerekecek herhangi bir kül/cüruf atığı oluşmamaktadır.

Çimento üretim prosesi gereğince atıklarda mevcut olabilecek inorganik bileşikler ve ağır metaller, ya silikatlar ile kombine olacaklar ya da klinkerleşme sırasında toksik bileşiklerini zararsız bileşiklere dönüştüreceklerdir.

Kısmen yakıtın yerine geçen farklı seviyelerdeki atıkların eklenmesiyle laboratuvar koşulları altında farklı klinkerleri konu alan çalışmalar Arjantin'de yapılan bir çalışmada derlenmiştir. Atık kullanma yüzdeleri, endüstriyel tesisler için kabul edilen sınırlar dahilinde tutulmuştur.

Bu çalışmada; yakıt olarak kullanılan yüksek kalorifik değere sahip petrolden ve çimento endüstrisinde kullanılan ticari markalı bir yakıt karışımının kullanım sistemleri araştırılmıştır. Farklı oranlardaki atığın eklenmesi sonrasında elde edilen klinkerlerin fizikokimyasal özelliklerini değerlendirmektedir.

Bu çalışmada, Blaine özgül yüzey alanı, pirometrik koni eşdeğeri (PCE) sıcaklığı, x ışını kırınımı (XRD), diferansiyel termal analiz, simültane termogravimetrik analiz ve sıkıştırılmaya karşı mekanik dayanım teknikleri kullanılmıştır.

Kullanılanılmış olan hammadde, yerli bir çimento şirketi tarafından sağlanan endüstriyel bir karışımdır.

Bu çalışmada, kullanılan yakıt farklılıklarının çimentonun basınç dayanımını önemli ölçüde değiştirmedeği sonucuna varılabilmektedir. Genel olarak, bu testin yüzdeleriyle ve koşulları uyarınca bu atıkların eklenmesi, klinker özelliklerini önemli ölçüde değiştirmemektedir (Trezza ve Scian, 2005).

5.4.1 Çimento ve beton içeriğindeki ağır metallerin araştırılması

2003 yılında Karlsruhe’de yapılan bir araştırma için Antimon, Arsenik, Kurşun, Kadmiyum, Kobalt, Bakır, Manganez, Nikel, Talyum, Kalay, Vanadyum ve Çinko 13 eser element olarak seçilmiştir. Cıva ise, yeterli örnek adedi olmasına rağmen uçuculuğundan dolayı çimento ve klinkerdeki miktarının tespitinin zor olması nedeniyle araştırma dışında bırakılmıştır.

2000’li yıllarda Alman Çimento Tesisleri Birliği, çimentonun kalite kontrolü sırasında 400 örnek ile yapmış oldukları çalışma sonucunda eser element konsantrasyonlarını yayınlamışlardır.

Bu verilerden yola çıkarak Farin, klinker ve çeşitli çimento tipleri ve teorik olarak karıştırılmış bir karışık çimento içerisinde bulunan eser elementler hesaplanmış ve literatürle karşılaştırılması verilmiştir.

Farin, Klinker ve çeşitli çimento tiplerinin eser element konsantrasyonlarının (ppm cinsinden) literatür verileri ile karşılaştırılması Çizelge 5.14’de verilmiş olup literatürdeki minimum, maksimum, ortalama değerler ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çizelge 5.14 : Hesaplanan eser elementlerin literatür ile karşılaştırılması.

		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Tl	V	Zn
Farin	AV	5	0,3	5	25	21	480	22	20	2	4,3	0,4	32	53
	Min.	2	0,03	3	23	5	50	12	1,7	0,1	2	0,1	6	10
Farin	Max.	28	1,1	14	59	19	500	38	98	2	10	12	120	108
(Literatür)	AV*	9	0,3	7	30	14	236	20	14	1	3	0,5	37	34
Klinker	AV	9	0,8	11	48	40	864	44	41	5	8,5	0,9	68	159
	Min.	2	0,01	6	10	5	218	10	1	0,1	1	0,01	10	29
Klinker	Max.	87	4	48	422	136	526	397	105	17	36	10	136	600
(Literatür)	AV	9	1	13	66	38	400	38	24	5	1,3	0,5	57	113
Portland	AV	9	0,8	10	46	39	816	42	40	5	8	0,9	66	153
Çimentosu	Min.	2	0,03	3	25	14	107	14	5	0,5	1	0,02	15	21
Portland	Max.	117	6	21	712	98	3901	97	254	18	14	4,1	144	679
Çimentosu	AV	8	0,6	11	68	38	606	45	27	5	3	0,6	74	164
(Literatür)	AV	3	0,7	5	28	12	2707	13	13	2	5,3	0,7	36	59
Yüksek Fırın	Min.	0,8	0,1	0,2	19	5	n.a.**	4	1	n.a.	n.a.	n.a.	62	5
Çimentosu	Max.	15	1	18	246	160	n.a.	53	136	n.a.	n.a.	n.a.	444	245
(Literatür)	AV	6	0,5	6	50	13	n.a.	17	13	5	n.a.	0,5	113	122
Cürüflü	AV	7	0,7	8	39	29	1561	31	30	4	6,9	0,8	55	115
Çimento	AV	7	0,7	7	46	28	545	31	43	3	5,4	0,9	47	144
Puzolanik	AV	9	1	7	50	46	540	28	39	3	5,3	1,2	43	163
Çimento	AV	8	0,6	8	36	32	706	36	34	4	6,7	0,7	55	115
Şistli	AV	8	0,7	9	42	34	1164	36	35	4	7,4	0,8	59	133
Çimento	AV	1,6	0,1	4	23	9	255	13	10	1	n.a.	n.a.	30	48
Kalkerli	10%	13,6	0,8	17	59	43	1268	39	48	15	n.a.	n.a.	93	291
Çimento	90%	6,8	0,4	10	40	25	680	24	27	6	4,6	n.a.	56	140
Karışık	AV													
Çimento***														
Normal														
Çimento														
VDZ****														
[VDZ,														
2000]														

* Ortalama Değerler.

** Mevcut değil.

*** Karışık Çimento: %66 Portland Çimentosu, %14 Yüksek Fırın Çimentosu, %13 Cürüflü Çimento, %6 Kalkerli Çimento, %1 Şistli Çimento, < %1 Puzolanik Çimento'dan oluşmaktadır.

**** Alman Çimento Tesisleri Birliği.

Hesaplanan değerlerin literatür değerleri aralığında olduğunu görebiliriz. Farin söz konusu olduğunda, Arsenik, Manganez, Antimon ve Çinko'nun literatür değerlerine baktığımızda büyük sapmalar verdiğini söyleyebiliriz. Ancak hesaplanan konsantrasyon değerlerinin de bu aralıklarda çıktığını söylemek mümkündür. Portland çimentosu için de bu elementler üzerinden bakıldığında yine aralıklar dahilinde olduğu söylenebilir.

Klinker içeriğinde bulunan Kadmiyum, Antimon ve Çinko elementleri miktarlarının ise farin içeriğinde bulunan miktarlardan çok daha yüksek seviyede bulunduğu açıkça görülebilmektedir. Bu artışın çoğunlukla yakıtlardan kaynaklandığı söylenebilir. Çalışmada girdileri incelediğimizde ise Antimon ve Çinko'nun artışının ikincil yakıt kullanımından olduğunu söylemek mümkündür.

Yüksek Fırın Çimentosu değerlerine baktığımızda da Portland Çimentosu değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir (FZKA, 2003).

Alman Çimento Tesisleri Birliği (VDZ) tarafından, betonun geri dönüştürülmesi sırasındaki davranışları dahil klinkerin ağır metal içeriği ile ilgili yoğun biçimde araştırma yapılmıştır. Almanya'da ikincil yakıtların kullanılmasının hemen hemen iki katına çıkmasına rağmen (1994 yılında % 10'dan, 1998 yılında % 19'a), ağır metallerle ilgili konsantrasyon değer aralıkları hala aynı durumdadır. Çimento esaslı ürünler için çevreyle ilgili kriterlerin incelenmesi sonucunda varılan hükümler aşağıda verilmiştir:

Değişik eser miktardaki elementlerin tipik sızma (leaching) niteliklerinde büyük farklılıklar bulunmaktadır.

Daha önceki incelemelerin sonuçlarının da teyid ettiği gibi, genel sızma davranışları bakımından, elementlerin üç farklı kategoriye ayrıldıkları söylenebilir:

- Pb, Cu, Cd, Ni, ve Zn gibi "düzenli" metaller; pH 8 -11 aralığında minimum sızma (leachability) gösterirler.
- Cr, Mo, As, Sb, ve V (yani, kromat CrO_4 , arsenat AsO_4) gibi "oksi-anyonlar" olarak görülen elementler; pH'ın nötr ve hafif bazik olduğu ortamlarda maksimum sızma sergilerler.
- Çözünür tuzlar; pH ile herhangi bir bağıntı göstermezler. Çimento esaslı sistemlerde sadece birkaç bileşen buna benzer davranış gösterir.

Çimento harcındaki toplam eser element muhtevaları ile harçtan süzülen elementler arasında zor koşullar altında bile herhangi bir sistematik bağıntı bulunmamaktadır.

Çizelge 5.15, mevcut maksimum eser element konsantrasyonları (öğütülmüş harca uygulanan "Mevcudiyet Testi"nden alınan) ile "toplam" eser element konsantrasyonları arasındaki oranları yüzde olarak göstermektedir. Sızma testinde tanka sızan miktar ile toplam miktar arasında önemli bir fark görülmemiştir. Tabloda da görüldüğü üzere; araştırılan eser elementlerin konsantrasyonlarında sistematik bir artış, eğim veya bağıntı bulunmamaktadır (ERFO, 2005).

Çizelge 5.15 : ‘Toplam’ ve ‘Mevcut’ eser element konsantrasyonları bağıntısı.

Element	Mevcudiyet Testi Çimento Ortalama (%)	Harç Karışım (nötr pH) Ortalama (%)	Tank Sızma testi (100y) Ortalama (%)
As	12	0,5	0,001
Ba	64	11	0,02
Cd	54	1,8	0,004
Co	93	4,4	0,002
Cr	53	9,9	0,002
Cu	72	0,3	0,002
Mn	79	3,5	0,0000
Mo	34	8,8	0,003
Pb	30	0,8	0,0003
Sb	16	3,0	0,0008
Sn	3	0,3	0,003
Sr	99	22	-
V	11	0,9	0,003
Zn	74	0,9	0,5

"Toplam" ve "mevcut" eser element konsantrasyonları arasındaki bağıntı, harç karışım testindeki (L/S=10, pH 8 kontrol) ve ticari ve özellikli çimentoların tank sızma testindeki sızan miktarlar ("mevcudiyet", NEN 7341'e göre, pH=4, tanecik boyutu < 125 µm koşullarında süzülen miktar demektir). Eser element konsantrasyonlarının tümü toplam miktarın yüzdesi olarak verilmiştir.

Büyüklik dizilişi olarak sızma testinde ve kayda değer katsayılar olarak "Mevcudiyet" testinde gözlemlendiği gibi, çimentodaki eser elementlerin toplam konsantrasyonu, açığa çıkan eser elementlerin konsantrasyonundan fazladır. Çimentoda, eser element içerikleri için toplam konsantrasyonların temel bir kuralmış gibi kullanılmasının arkasında hiç bir bilimsel dayanak yoktur (ERFO, 2005).

Çimento bazlı inşaat malzemelerinin (beton, harç) normal hizmet süresi, geri dönüşüm ve elden çıkarma sırasında su ile yaptığı temas, eser elementlerin dışarı sızmasıyla sonuçlanabilir. Beton yapılardan çevreye bırakılan tehlikeli maddelerin miktarı çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörler, beton tipi (monolitik, zemin) ve temas yüzeyi ile ilişkili olan çevresel faktörlerdir (yer, su, atık, kimyasal çevre faktörleri). Ağır metalleri bağlama sürecindeki büyük rol C-S-H aşaması ve kalsiyum aluminat ve sulfo aluminat hidratlar ile ilgilidir.

Krol, 2008, Portland Çimento (CEM I 32,5R) ve Portland Uçucu Kül Çimentosu CEM II/B-V 32,5R-HSR) bazlı betonlardan ağır metallerin sızma seviyesi ile ilgili

yürüttüğü bir çalışmada çeşitli çevresel faktörlerin ağır metallerin sızması üzerindeki etkisini ele almıştır. Betonlar deniz suyu etkisine maruz bırakılmış ve ağır metallerin sızabilirlik seviyelerine bakılmıştır. Çizelge 5.17’de bu çimento tiplerinin ağır metal içeriğini göstermektedir (Krol, 2008).

Çizelge 5.16 : Çimentoların ağır metallerin içerikleri.

Ağır metaller	İçerik (mg/kg)	
	CEM I 32,5R	CEM II/B-V 32,5R-HSR
Zn	316	262
Cr	54	52
Ni	18	26
Pb	24	31
Cu	60	54

Bu çimento tiplerinden 10x10x10 cm boyutunda küpler oluşturulmuştur ve bu küpler 4 litre damıtılmış su içeren bir kaba konmuştur. Testin toplam süresi 64 gündür ve 8 araştırma dönemine bölünmüştür. Her bir araştırma döneminin ardından, bir sulu özüt kaptan alınmıştır ve sıvı değiştirilmiştir. Bir dönemde sızan sıvı HNO₃ ile pH = 4 elde edilene kadar asitlendirilirken, bir metot da deniz suyu kullanılmıştır. Bir dönemde partikül parça ebadına indirgenmiş beton örnekleri kullanılmış olup diğer bir dönemde ise asitlendirilmiş sıvı ile testler gerçekleştirilmiştir.

Metot I ile gerçekleşen 64 günün ardından su sızmasındaki ağır metallerin toplam konsantrasyonu Çizelge 5.17’de özetlenmiştir. Çizelge 5.18’de ise pH=4 olan sıvı ortamındaki ağır metallerin sızma testi sonuçları verilmiştir (Krol, 2008).

Çizelge 5.17 : Betonlardan sızma testi ağır metal konsantrasyonu (64 gün).

Ağır metaller	Ağır metal konsantrasyonu (mg/kg)		İzin Verilen Değer*	İzin Verilen Değer**
	CEM I 32,5R	CEM II/B-V 32,5R-HSR		
Zn	0,01169	0,01558	-	3,0
Cr	0,0155	0,01235	0,05	0,05
Ni	0,00333	0,00136	0,02	0,05
Pb	0,00181	0,00145	0,025	0,05
Cu	0,00781	0,00992	2,0	0,05

* Konsey Direktifine (98/83/EC) göre- insan tüketimi amacı taşıyan suyun kalitesi

** Konsey Direktifine (75/440/EEC) göre- A 1 kategorisindeki sularda bulunan ağır metal konsantrasyonu (temel düzeyde fiziksel arıtma, özellikle de filtreleme ve dezenfektasyon gerektiren yüzey suları)

Çizelge 5.18 : Betonlardan sızma testi ağır metal konsantrasyonu (64 gün / pH=4'lü sıvı ortamı)

Ağır metaller	Ağır metal konsantrasyonu (mg/kg)		İzin Verilen Değer*	İzin Verilen Değer**
	CEM I 32,5R	CEM II/B-V 32,5R-HSR		
Zn	0,01173	0,01913	-	3,0
Cr	0,0158	0,01283	0,05	0,05
Ni	0,00156	0,00138	0,02	0,05
Pb	0,00198	0,00164	0,025	0,05
Cu	0,00827	0,01197	2,0	0,05

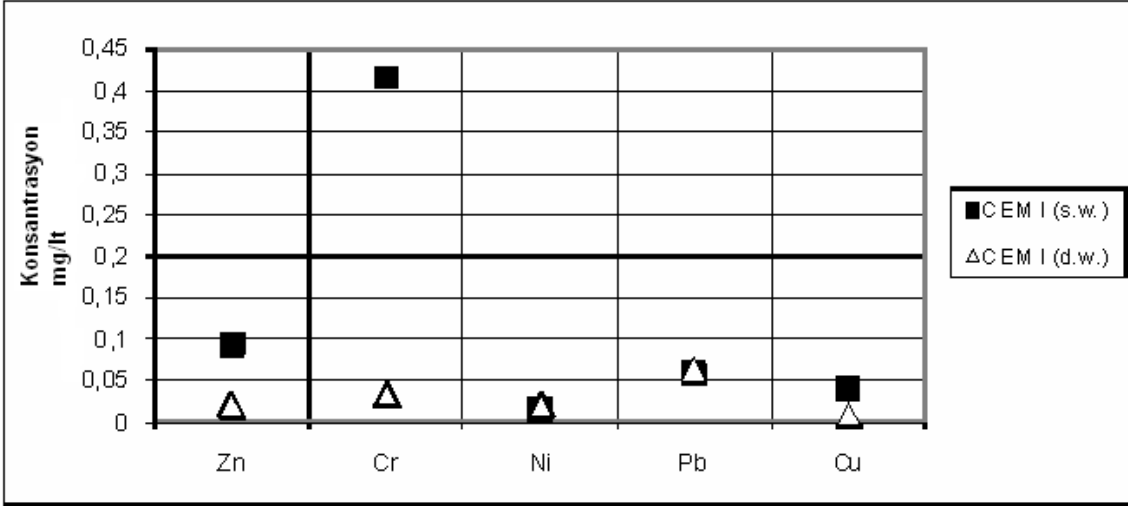
* Konsey Direktifine (98/83/EC) göre- insan tüketimi amacı taşıyan suyun kalitesi

** Konsey Direktifine (75/440/EEC) göre- A 1 kategorisindeki sularda bulunan ağır metal konsantrasyonu (temel düzeyde fiziksel arıtma, özellikle de filtreleme ve dezenfektasyon gerektiren yüzey suları)

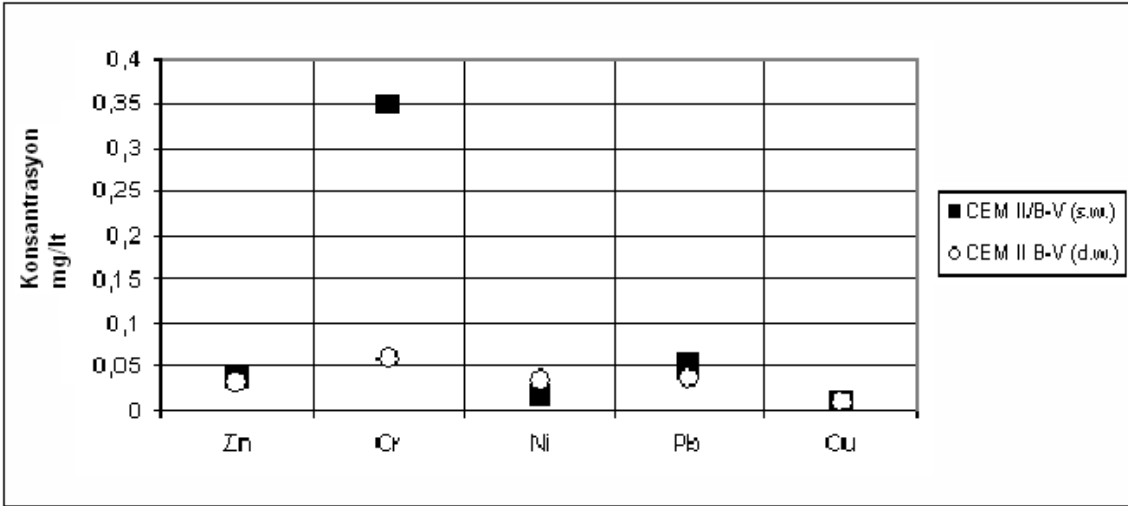
Elde edilen sonuçların analizleri betonlardan serbest bırakılan ağır metallerin miktarlarının düşük düzeyde olduğunu göstermektedir.

Düşük pH içeren sıvı incelendiğinde, CEM I betondaki sızma, artan düzeyde çinko oluşmasına yol açmaktadır; ancak, krom, nikel ve kurşun sızması daha düşük düzeydedir. CEM II betondaki gibi pH=4 ortamında nikel ve kurşun düzeyleri daha düşüktür. Kullanılan çimento tipi ve ortamın pH'sine bakılmaksızın, tüm betonlar için bakır sızması 360 günlük test süresinin ardından sabit kalmaktadır.

Uygulanan deneylerde CEM I ve CEM II çimentoya dayalı betonlar deniz suyu ortamına maruz bırakılmıştır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de ise deniz suyu ortamındaki ağır metallerin sızma testi sonuçları verilmiştir (Krol, 2008).



Şekil 5.6 : CEM I (damıtılmış su (d.w.) ve deniz suyu (s.w.)) ağır metal konsantrasyonları.



Şekil 5.7 : CEM II (damıtılmış su (d.w.) ve deniz suyu (s.w.)) ağır metal konsantrasyonları.

CEM I Çimento örneğinin içerisindeki Krom Metalinin, deniz suyu etkisinde, damıtılmış su etkisindeki konsantrasyondan daha yüksek miktarlarda sızma gösterdiği görülmektedir. Benzer sonuçlar CEM II Çimento için de kaydedilmiştir. Ayrıca, araştırmalara göre CEM I bazlı çimentolar, deniz suyu etkisi altında daha yüksek çinko sızması göstermektedirler. Deniz suyu nedeni ile klorürlerin etkisi altında olan betonlar ile kalsiyum hidroksit arasında tepkime meydana gelir.

Araştırma ayrıca, betonun 10 mm altındaki parçalara ayrılmasında CEM I ve CEM II bazlı betonlarda ağır metallerin nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Kırılan betonların sızabilirlik testi damıtılmış su ve pH = 4 sıvısı ortamında

gerçekleştirilmiştir. Sızma sıvısının azaltılan pH'ı çimento tipine bakılmaksızın ağır metallerin konsantrasyonunun artmasına yol açmıştır. Çizelge 5.19'da kırılmış betonlardan alınan örnekler verilmiştir (Krol, 2008).

Çizelge 5.19 : Kırılmış betonlardaki ağır metal konsantrasyonları.

Ağır metaller	Ağır metal konsantrasyonu (mg/kg)		İzin Verilen Değer*
	CEM I 32,5R	CEM II/B-V 32,5R-HSR	
Zn	0,0057	0,0063	-
Cr	0,028	0,005	0,05
Ni	0,0012	0,0005	0,02
Pb	0,00043	0,00047	0,025
Cu	0,0011	0,0019	2,0

* Konsey Direktifine (98/83/EC) göre- insan tüketimi amacı taşıyan suyun kalitesi

Tüm analiz edilen ağır metallerdeki iyon düzeylerinin, Portland Uçucu Kül Çimentosu bazlı betondan alınan sızma sonuçlarının, CEM I Portland Çimentosu bazlı betondan alınan sızma sonuçlardan daha düşük olduğu bulunmuştur.

CEM II/B-V bazlı betonlardan alınan nikel ve kurşun sızma sonuçları içme suyu ile ilgili standarda uygun değildir. Ancak, atmosferik koşullara maruz bırakılan ağır metallerin daha yüksek ölçüde sızması, ağır metal yüklerini taşıyan yağmur ve karla ilişkili çevre kirliliğine dayalı olabileceğini göstermektedir. Bir başka neden de CEM II/B-V bazlı betonun aşamalı şekilde karbonizasyonu olabilmektedir.

Ağır metallerin sızmasını belirleyen faktör betonun olgunlaşmaya bırakılma süresidir ve bu nedenle de araştırma dâhilinde dikkate alınmıştır. Ek olarak, 360 gün boyunca doğal çevreye maruz bırakılan betonların ağır metal iyonlarının testini içermiştir. Monolitik beton formlarından alınan su özütlerinin değerlendirilmesi çok düşük ağır metal düzeyi göstermektedir. Sızma 64 günlük test süresi boyunca yapılmıştır ve ağır metallerin düzeyi içme suyu çıkarılmasında kullanılan su ile aynı kalitededir. Bunun anlamı, Portland çimentolar ve önemli bileşenleri olan çimentolarda kullanılan betonlar doğrudan su ile temas halinde olan inşaatlarda kullanılabilir olmasıdır.

Azaltılan pH ortamına yerleştirilen beton konusunda ağır metal sızma seviyesinin yürürlükteki standartta verilen aralıklarda olduğu görülmüştür. Ek olarak, kırılan beton şekillerinin, malzeme ile temas halinde kalan suyun kalitesini olumsuz şekilde etkilemeyen, küçük miktarlardaki ağır metalleri serbest bıraktığı görülmüştür.

Sızma sıvısının azaltılan pH'ı CEM I ve CEM II bazlı betonda çinkonun ve kromunun artmasına yol açtığı görülmektedir.

Atmosferik faktörlere maruz bırakılan betonların örnekleri, laboratuarda bırakılan örneklerle kıyasla, ağır metallerin artan sızmasını ortaya koyabilir. İki analiz edilen beton arasında yapılan kıyaslama da, su sızmasındaki daha yüksek ağır metal konsantrasyonunun Portland Uçucu Kül Çimentosunda, 360 günlük doğal ortama maruz kalmanın ardından gözlemlendiği sonucunu ortaya koymaktadır (Krol, 2008).

5.4.1.1. Ağır metallerin çimento içerisine giriş yolları

Çimento ve klinker içeriğindeki eser element miktarları prosese girdi maddeleri üzerinden hesaplanmıştır. Bu değerler literatür değerleri ve VDZ tarafından ölçülen değerler ile iyi bir uyum göstermiştir. Böylece, çimento içeriğine bakıldığında, ikincil yakıtlar, ikincil hammaddeler, ve katkıları gibi değişik tipte girdilerin konsantrasyonları hakkında da güvenilir bilgi sağladığı kabul edilebilir. Çalışmalar Portland çimentosu üzerinde yapılmış olup, nedeni en çok kullanılan çimento olmasıdır. Bu çalışma sırasında Çizelge 5.20'deki sınıf ve girdi malzemeleri kullanılmıştır (FZKA, 2003).

Çizelge 5.20 : Çalışmada kullanılan sınıflar ve malzemeler.

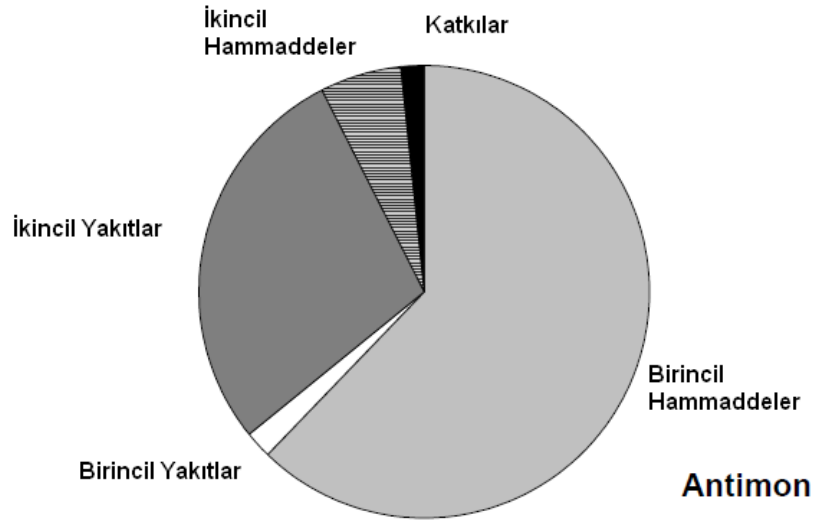
Sınıf	Girdi Malzemeleri
Birincil Hammaddeler	Kalker, marl, kil, kum, tras
Düzenli Yakıtlar	Taş kömürü, linyit, petrokok, bitümlü şist
İkincil Yakıtlar	Kullanılmış lastikler, atık yağ, hurda ahşap, ticari, evsel ve endüstriyel atıklar
İkincil Hammaddeler	Demir cevheri, demir ve çelik endüstrisi çıktıları, döküm kumu, yanma sonucu oluşan küller, kömür külü
Katkılar	Alçı, anhidrit, tras, bitümlü şist, FGD Alçı

Yapılan çalışmalarda, beklendiği üzere birincil hammaddeler, eser elementlerin giriş yolları olarak en önemli katkıları sağlamakla beraber ikincil giriş maddeleri de bu duruma önemli katkı sağlamaktadırlar. Bu büyük oranda payları, elementten elemente farklılık göstermeleridir. Bu dağılıma göre, Portland çimentosu içerisindeki eser elementlerin dört kategorisi ve kategori tanımlamaları Çizelge 5.21'de verilmiştir (FZKA, 2003).

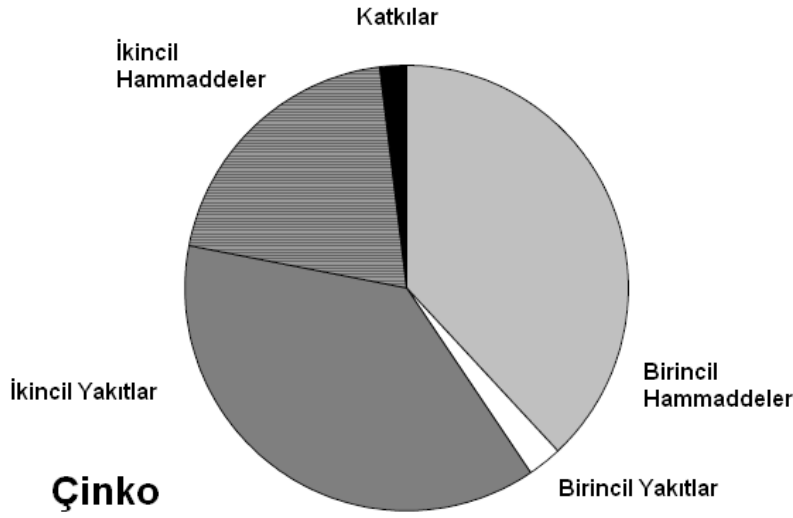
Çizelge 5.21 : Eser elementlerin kategorileri ve tanımlamaları.

Kategori	Tanımlama	Eser Elementler
Kategori I	Birincil hammaddeler tarafından oluşan eser elementler < 55%	Cd Cu Zn
Kategori IIa	Birincil hammaddeler tarafından oluşan eser elementler 60-80% aralığında; ikincil hammaddelere kıyasla, yakıtlarla giriş hakimdir.	Ni V
Kategori IIb	Birincil hammaddeler tarafından oluşan eser elementler yaklaşık 70%; yakıtlara kıyasla, ikincil hammaddelerle giriş hakimdir.	Sb Tl Co
Kategori III	Birincil hammaddeler tarafından oluşan eser elementler yaklaşık 75%; yakıtlar ve ikincil hammaddelerle giriş eşit dağılmıştır.	Cr
Kategori IV		As Pb Sn

Her kategoriden iki temsilci alınarak hazırlanan grafiklerden antimon ve çinko için Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir (FZKA, 2003).



Şekil 5.8 : Kategori II; Portland Çimentosu içeriğindeki antimonun bireysel giriş yolları için göreceli payları.



Şekil 5.9 : Kategori I; Portland Çimentosu içeriğindeki çinko bireysel giriş yolları için göreceli payları.

Çalışma sonuçları Çizelge 5.22’de verilmiştir (FZKA, 2003).

Çizelge 5.22 : Portland Çimentosu içeriğinde bulunan eser elementler ve çimentoya giriş şekilleri.

Eser Elementler	Düzenli Yakıtlar	İkincil Yakıtlar	İkincil Hammaddeler
As	-	-	kömür külü; demir ve çelik endüstrisi
Cd	-	kullanılmış lastikler, ticari, evsel ve endüstriyel atıklar	demir ve çelik endüstrisi
Co	-	kullanılmış lastikler	demir ve çelik endüstrisi; demir cevheri; kömür külü; döküm kumu
Cr	-	kullanılmış lastikler	demir ve çelik endüstrisi; demir cevheri; yanma sonucu oluşan küller
Cu	-	ticari, evsel ve endüstriyel atıklar	demir ve çelik endüstrisi; demir cevheri; kömür külü
Ni	Petrokok	-	demir ve çelik endüstrisi; kömür külü; demir cevheri
Pb	-	kullanılmış lastikler, atık yağ	demir ve çelik endüstrisi; kömür külü; demir cevheri
Sb	-	kullanılmış lastikler, ticari, evsel ve endüstriyel atıklar	-
Sn	-	-	demir ve çelik endüstrisi
Tl	-	kullanılmış lastikler	kömür külü
V	Petrokok	-	kömür külü
Zn	-	kullanılmış lastikler, atık yağ	demir ve çelik endüstrisi; demir cevheri

Çinko ve kadmiyumun, (Kategori I) çimento içerisinde bulunmasına birincil hammaddelerin katkısı toplam eser element konsantrasyonlarının %50'sinden azdır. Buna ek olarak ikincil yakıtlardan kullanılmış lastikler, atık yağ ve ticari, evsel ve endüstriyel atıklar da, demir ve çelik endüstrisi kaynaklı hammaddeler gibi önemli girdilerdir.

Antimon ve Vanadyum, (Kategori II) çimento içerisinde bulunmasına birincil hammaddelerin katkısı toplam eser element konsantrasyonlarının sırasıyla %62 ve %74'üdür. Hammaddeler dışında yakıtlar da önemlidir. Antimon için, ikincil yakıtlardan kullanılmış lastikler, atık yağ ve ticari, evsel ve endüstriyel atıklar da belirleyicidir. Vanadyum için petrokok da önemli bir girdi sayılabilmektedir.

Kobalt ve Krom, (Kategori III) birincil hammaddeler dışında ikincil hammaddeler de önemli sayılabilir. Çimento içerisindeki toplam kobalt konsantrasyonlarına bakıldığında esas ikameler demir ve çelik endüstrisi ve kömür külüdür. Krom için ise demir ve çelik endüstrisi kadar yanma sonucunda oluşan küllerin de önemli olduğunu belirtebiliriz.

Kurşun ve Kalay, (Kategori IV) yakıtlar ve ikincil hammaddelerden neredeyse eşit olarak oluşmaktadır. İkisi arasında da demir ve çelik endüstrisi önemli rol oynarken, kurşun için kömür külü önemli sıradadır. Tabloda gösterilmeyen Manganez'in % 94'ü birincil hammaddelerden oluşmaktadır (FZKA, 2003).

5.5 Risk Değerlendirme

Birleşik Krallık (BK)'ta yapılan bir çalışmada MSW'den elde edilmiş enerji yoğunluklu SRF için risk değerlendirme çalışmaları yapılmıştır. Var sayımlarla verilen aralıklar için kömür yakıtlı güç santrallerindeki SRF'nin birlikte yanmasından önce çimento fırınlarında kömür ile SRF'nin birlikte yanması en uygun senaryo olarak düşünülmüştür (Garg ve arkadaşları, 2009).

SRF'nin biokütle içeriği (yaklaşık %70) önemli ölçüde sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Genel itibarıyla çimento fırınları düşük teknolojik riskler, çevresel emisyonlar ve yakıt masrafı açısından en iyi seçenek olarak görülmektedir. Ek olarak, çimento fırın operatörlerinin atıktan elde edilen yakıtları işleme konusunda iyi deneyimleri bulunmaktadır.

Yapılan risk değerlendirme çalışmasında, SRF'nin birlikte yakılmasının değerlendirileceği dört potansiyel senaryo belirlenmiştir:

- **Senaryo 1:** Birleşik Krallık'ta 2GW'lık elektrik üretmek için kullanılan kömür yakıtlı bir santralin ısı girişinin %10'u SRF'den sağlanmıştır.
- **Senaryo 2:** Isı ve elektrik üretiminde kullanılan 200 kt/y kapasiteli bir MSW insineratörüne kütleli bazda %10'luk SRF sağlanmıştır.
- **Senaryo 3:** Isı ve elektrik üretiminde kullanılan 200 kt/y kapasiteli odun yongaları kullanılan bir yakma sistemine kütleli bazda %20'lik SRF sağlanmıştır.
- **Senaryo 4:** Isı üretimine imkan sağlayan 300 kt/y kapasiteli kömür kullanan bir çimento fırınına, kütleli bazda %20'lik SRF sağlanmıştır.

Her bir senaryo ile ilgili genel risklerin belirlenmesi için teknolojik, çevresel, planlama, mevzuatsal, kamusal, finansal, politik ve SRF talebi gibi farklı kategorilere bakılmıştır.

Bir Likert ölçeği (1-5) benimsenmiş ve veriler, çeşitli risklerin gerçekleşebilecek muhtemel sonuçları ile bağdaştırılmıştır. Belirli bir durumdan oluşabilecek risk aşağıdaki ifade kullanılarak değerlendirilmiştir:

$$Risk (Ri) = Sonuç (Ci) \times Olasılık (Pi) = Risk Durumu \quad (5.1)$$

Risk karakterizasyonu değerlendirmesi, düşük (*) 1-8; orta (**) 9-15; yüksek (***) 16-18; çok yüksek (****) 19-21; şiddetli (*****) 22-25 olarak verilmiştir.

Yürütülen analizler ve tüm riskler birlikte gruplandığında Senaryo 2 ve 3'te, SRF'nin birlikte kullanılması tercih edilen bir seçenek olarak görülmemektedir. Çizelge 5.23'de farklı senaryolara ait risk karakterizasyonları verilmiştir (Garg ve arkadaşları, 2009).

Çizelge 5.23 : Değişik senaryolar için risk karakterizasyonu.

Senaryo Numarası/Senaryo Açıklaması	1	2	3	4
Kategori	Kömür santralinde kömür ile SRF'nin birlikte yakılması	İnsineratörde MSW ile SRF'nin birlikte yakılması	Biyokütle firmında odun yongaları ile SRF'nin birlikte yakılması	Çimento firmında kömür ile SRF'nin birlikte yakılması
Teknolojik	Son kullanıcılar riski			
Çevresel	Artan aksaklık ile ispatlanmamış teknoloji kullanımı	**	****	*
Planlama	SRF tedarikinde düşük güvenlik	*	*	*
Mevzuat	Kontrolsüz salımlar	*	****	*
Kamu	İzin alma zorlukları	**	****	**
Finansal	Belirsiz izin ortamı	***	****	*
Finansal	Yerel Muhalefet	**	****	*
Finansal	Proje finansmanı	***	****	*
Finansal	sağlama zorluğu	*	*	*
Finansal	Sermaye yatırımına başarısız geri dönüş	**	****	**
Finansal	Muhalefet	**	****	**
Finansal	kampanyaları	*	****	*
Finansal	Yerel politik müdahaleler	****	****	*
Finansal	Yetersiz Pazar	**	****	*
Finansal	SRF kalitesi	2	3	1
Genel Puanlama	2	3	4	1

Risk Kategorizasyonu:

* Düşük: 1-8

** Orta: 9-15

*** Yüksek: 16-18

**** Çok yüksek: 19-21

Çimento fırınlarındaki birlikte yanma, tüm seçenekler üzerinde en az risk olarak raporlanmaktadır. Atık yakma fırınlarındaki birlikte yanma konusunda bulunan temel riskler (Senaryo 2) ispatlanmamış teknoloji, yerel muhalefet ve yetersiz pazarı içermektedir.

Bir biyokütle yakma tesisinde yapılan birlikte yanma işleminde de (Senaryo 3) kanıtlanmamış teknoloji, çevreye kontrolsüz salımlar, kamu tepkisi ve muhalefet kampanyaları şeklinde son kullanıcılara çeşitli riskler sunduğu hükmüne varılmıştır. SRF'nin kalitesi de biyokütle yanma tesisi operatörleri için büyük bir kaygı olabilmektedir.

Atıktan elde edilen yakıtlar konusunda var olan kesinleşmemiş mevzuat durumu, finansal kaynak sağlama zorluğu ve pazar eksikliği, senaryo 1 için temel sorunları oluşturmaktadır.

SRF'nin yasal olarak bir yakıt mı yoksa atık mı olduğu henüz kararlaştırılmamıştır. Bu belirsizlik proje finansmanını sağlamada zorluklara sebep olabilecektir. Ancak SRF gelecekte bir yakıt olarak kabul görürse, o zaman SRF'nin biyokütle paydası kazanç getirecek ve zorluk olmadan bir birlikte yanma yakıtı olarak kullanılabilinecektir.

Başka bir göze çarpan kaygı da SRF'nin elektrik santrali kazanlarında bir birlikte yanma yakıtı olarak kullanılmasının gaz emisyonlarını arttırabileceği ve katı atıklar oluşturabileceğidir. Muhtemel bir kamu tepkisi de elektrik santrali operatörleri için başka bir kaygıyı oluşturmaktadır.

Risk analizi, SRF'nin çimento fırınlarında birlikte yanmasının (Senaryo 4) yakıt kullanıcılara en az riski sunduğunu göstermektedir. Temel riskler, izin almada zorluklar, muhalefet kampanyaları ve SRF kalitesini içermektedir. SRF'nin diğer atıktan elde edilen yakıtlara nazaran daha düşük bir yanma değeri vardır fakat SRF'deki biyojenik içerik onun çimento fırınlarında birlikte yanmasını kolaylaştırabilir.

Yukarıdaki risk analizleri temelinde ve her bir kategorinin eşit ağırlıkta olduğunun farz edilmesi ile dört senaryo da şu tercih sırasına göre düzenlenmiştir: Çimento fırınları > kömür santralleri > MSW kullanan insineratör >Biyokütle fırını (Garg ve arkadaşları, 2009).

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Artan nüfus ve tüketim sonucu, atık bertarafı ülkemiz ve özellikle İstanbul için büyük bir sorun haline gelmiştir. Avrupa Birliği ile çevresel uyumluluğu sağlamaya yönelik planlamalar Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından yürütülmektedir. Bu çalışmalarda atıkların depolamaya gönderilecek kısmının azaltılması üzerinde önemle durulmaktadır. Bu sebeple, atıkların bertaraf edilmesi için depolama haricinde yakma gibi yöntemler de gündeme gelmektedir. Bu yöntemlerin arasında geri dönüşüm, geri kullanım, organik madde azaltılması termal prosesler öne çıkmaktadır. Özellikle belirli atıklar için yakma tesisi görevini üstlenen çimento fabrikaları sayesinde, depolama tesislerine gidecek olan atığın miktarı azaltılmaktadır. Çimento tesisleri bu bakımdan bütün dünyada atık sektörü için önemli bir potansiyel kazanmaktadır.

Katı atık yakma tesislerinde CO₂ gazı ve ağır metal içeren küller ortaya çıkmakta ve genellikle enerji geri kazanımı yapılamamakta ya da sınırlı oranda yapılabilmektedir. Ancak çimento fabrikalarında, yanmadan sonra ortaya çıkan kül, yarı mamul olan klinker bünyesine katılmakta dolayısı ile atık problemi oluşturmamaktadır.

ATY kullanımı, ATY özelliklerine bağlıdır. ATY özellikleri ise ATY üretiminde kullanılacak atıkların özelliklerine ve ATY üretim prosesinin yapısına bağlıdır. ATY için bir standardizasyon ve buna bağlı bir sınıflandırma sistematığının oluşturulması gerekmektedir. Sınıflandırma sistematığı kalorifik değer, nem, klor, sülfür ve ağır metal içeriklerine göre yapılmaktadır. Dolayısı ile ATY kullanımını talep eden her sektör kendi proses özellikleri ve ürün standartlarını dikkate alarak hangi sınıftaki ATY'leri kullanabileceğine karar verebilir. Yasal bakımdan ATY kullanımına yönelik lisanslandırma da bu gibi özellikler dikkate alınarak esaslara bağlanmak durumundadır. O zaman ATY üreticileri, ATY ürünleri ve ATY kullanıcıları bir düzene kavuşmuş olacaktır. Çimento sektöründe ATY kullanımı da bu özellikler dikkate alınarak düzenlenmelidir.

Ülkemizde yıllık atık miktarı yaklaşık 28,7 milyon tondur. Katı Atık Ana Planı (KAAP) Projesi kapsamında 2006 yılında yapılan katı atık kompozisyon belirleme

çalışmasının sonucuna göre kentsel katı atıklardan günde yaklaşık 11.000 ton ATY elde edilebilir. Buda yılda 4 milyon ton ATY demektir. Özellikle çimento tesislerinin bulunduğu iller bakımından ATY üretim kapasitesi ise yılda 3 milyon ton olarak belirlenmiştir. ATY üretiminde endüstriyel ve tehlikeli atıkların kullanılması da bu potansiyeli artırıcı yönde etki etmektedir. 2010 yılı verilerine göre çimento sektöründe ATY ve benzeri yakıt ikame amaçlı kullanım toplam enerji ihtiyacının %3'üne denk gelmektedir. Bu miktarda, ATY'nin çimento sektöründe kullanılması, fosil yakıt ikamesi bakımından olduğu kadar, sera gazı emisyonları bakımından da önemli azalmaları önemli bir katkı yaratmaktadır.

Bu atıkların, çimento tesislerinde yakıt ikamesi olarak kullanılması çevresel açıdan da dikkatle ele alınarak incelenmelidir. İncelemelerin çimento prosesi, çimento kalitesi, çimentonun kullanımı ile oluşturulan malzemelerle temas halinde olan çevresel ortamlar, çimento prosesi atıkgazları, atıkgazların arıtılmasından kaynaklanan atıklar gibi geniş bir alanda sürdürülmesi ve sonuçlandırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY) olarak tanımlanan ve yakıt ikamesi olarak kullanılan bir atığın çimento tesislerinde kullanılmasının yukarıda belirtilen alanlardaki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çimento sektöründe ATY kullanımının etkilerinin ortaya konulabilmesi için ilk olarak ATY'nin çimento prosesine nereden giriş yapılabileceği hususu ele alınmıştır. Bu çerçevede ATY'nin ve bozunma ürünlerinin yeterli oksidasyonunun sağlanabileceği minimum sıcaklık değerleri ve reaksiyon süreleri kıstas olarak alınmıştır. Ana brülörden ve ikincil brülörlerden döner fırına girişlerin, atık gaz akımı kompozisyonu bakımından sorun oluşturmadığı görülmüştür. %1'den fazla halojenli organik madde (klorür olarak ifade edilir) içeriğine sahip tehlikeli bir atığın fırına beslenmesi durumunda, sıcaklığın en az iki saniye süreyle 1100°C'de tutulması gerekmektedir. Prekalsinatör ve ön ısıtma bölgeleri düşük sıcaklıklarda uçucu hale getirilebilecek bileşenler içeren (örneğin çözücü gibi) alternatif hammaddeler ve ATY'ler için uygun besleme noktaları değildir. Uçucu (organik ve inorganik) bileşenler içeren alternatif hammaddeler, fırının kontrollü test uygulamaları ya da yeterli laboratuvar testleriyle istenmeyen baca emisyonlarından kaçınılabileceği gösterilmediği müddetçe normal farin kaynağı aracılığıyla prekalsinatöre beslenmemelidir.

Çimento fırınlarında klor konsantrasyonlarındaki değişiklikler, ön ısıtıcı kulede tıkanmalar oluştururken, fırın içerisinde kemer oluşturup fırın kararlılığını bozmaktadır. Bu durumlarda ön ısıtıcı kulenin yanına klor by-pass sistemi yapılmalıdır. Klor konsantrasyonları fırın girişinde 250 g/ton klinkere ulaştığında sistemde by-pass ihtiyacı doğar. Bu tür sistemlere sahip olmayan çimento fırınları için ATY türü seçiminde klor içeriği %1'den düşük olan türler seçilmelidir.

ATY kullanımından kaynaklanan en önemli etkilerin başında ağır metaller gelmektedir. Ağır metallere her birinin tek başına kirletici-salın davranışını belirleyen faktörler, proses giriş kütle dengesi, toz toplama sisteminin herbir metal için toplama verimliliği ve fırın sistemi içindeki davranışlarıdır. Kuru proses uygulamasında, As, Cr,Cu, Ni, Zn, Be ve V gibi hammaddeler ve yakıtlarla birlikte prosese yüklenen elementlerin, hemen hemen tamamı, fırın sisteminden dışarı klinkerle birleşik vaziyette çıkmaktadır. Aynı şekilde Pb ve Cd'nin bir kısmı da klinker içine hapsolmuş durumdadır.

Tl (Talyum) ve Hg (Cıva) ise tam olarak klinkerde tutulamazlar ve Tl bileşikleri döner fırın içinde ve siklon ön-ısıtıcılı fırınların içinde buharlaşır, 450 ile 550 °C sıcaklık aralığında ön-ısıtıcının üst kısımlarında yoğunlaşır. Bir kısım Tl ise sistemde çıkan atıkgazlar içinde harici Tl döngüsü meydana gelir. Tl salımlarının seviyesi, harici döngünün konsantrasyon seviyesi ve toz toplayıcı ekipmanın toplama verimliliği tarafından belirlenir.

Hg, toz toplayıcı bölgesinde ham malzeme partikülleri üzerinde yoğunlaşan gaz halinde tutulur. Yoğuşma ve dolayısıyla Hg'nin ortamdaki uzaklaştırılması, azalan egzoz sıcaklıklarıyla ters orantılı olarak artacaktır. Siklon ön-ısıtıcılı fırın sistemlerinden alınan ölçümlerin gösterdiğine göre; 130 °C altındaki egzoz gaz sıcaklıklarında, Hg'nin % 90'ı partiküllerin üzerinde yoğunlaşmış biçimde bulunur. Hg bileşiklerinin hemen hemen tamamı, fırın sistemindeki elektrostatik çökeltici tarafından uzaklaştırılır.

Evsel arıtma çamuru ve diğer bazı katı geri kazanılmış yakıtlar gibi ikincil yakıtlar, geleneksel yakıtlara kıyasla daha yüksek ağır metal konsantrasyonlarına sahip olabilirler; buhar fazında veya çok ince partiküller halinde kalabilirler. İkincil yakıtlar değerlendirilirken, Hg konsantrasyonu, uçuculuğu göz önüne alındığında, tüm elementlerinkine nazaran en kritik olanlardan birisidir.

Yakma sırasında ATY içeriğindeki HCl biçiminde var olan klor bileşiminin açığa çıkabilmesinden dolayı ve bu bileşimin duman içerisinde bulunan aromatik hidrokarbon ile tepkimeye girerek son derece zehirli olan dioksinlerin oluşumuna yol açabileceği düşünülmektedir. Yanma sürecinde düşük sıcaklık aralığında (500-600°C) klorun büyük kısmının inorganik madde formunda olduğu hipotezine varılabilir. PCDD ve PCDF oluşum koşulları bozulmuş ve bu durum daha yüksek sıcaklık aralığında organik klor oluşumunun azalmasına yol açmıştır. Bunun özellikle dioksin oluşumunun önlenmesi biçiminde ikincil kirliliğin ortadan kaldırılmasına katkıda bulunduğu söylenebilir.

Çimento üretim prosesi gereğince atıklarda mevcut olabilecek inorganik bileşikler ve ağır metallere, ya silikatlar ile kombine olacaklar ya da klinkerleşme sırasında zararsız bileşiklere dönüştürüleceklerdir.

Ağır metallere ATY'nin çimento prosesinde kullanımı üzerinde diğer bütün kirleticilere göre daha büyük etkiye sahiptirler. Klinker içerisinde bulunan ağır metallere, farin, fosil yakıtlar, ATY ve diğer atıklardan oluşmaktadır. Klinker içeriğinde bulunan kadmiyum, antimon ve çinko elementleri miktarlarının ise farin içeriğinde bulunan miktarlardan çok daha yüksek seviyede bulunabilmektedir. Bu artışın çoğunlukla ATY dahil yakıtlardan (petrol koku, taş kömürü v.b) kaynaklandığı söylenebilir. Girdiler incelendiğinde antimon ve çinkonun artışının ikincil yakıt kullanımından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

ATY içerisinde petrol kokuna oranla genelde daha yüksek Sb, Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr ve Zn içeriği bulunmaktadır. Ancak kömür de bazı durumlarda yüksek oranda Hg, Co, Cd ve Tl içerebilmektedir. Petrol koku yerine ATY kullanıldığında ağır metal emisyonu üzerinde, özellikle cıva açısından, negatif bir etki gözlenirken kömür yerine ATY kullanıldığında genelde pozitif bir etki beklenmektedir.

Alman çimento derneği (VDZ) tarafından, ATY dahil alternatif yakıt kullanımının ağır metal emisyonunu ciddi biçimde kötüleştirdiği ve tehlike yaratacak biçimde sınır seviyesine ittiğine dair bulgular yayınlanmış olup ATY içindeki ağır metallere konsantrasyonları üzerinde dikkatle durulması gerekliliği vurgulanmaktadır.

Her durumda geleneksel yakıtlar yerine ATY kullanımının çimento fırınlarında atık gaz içerisinde yüksek miktarda ağır metal oluşması açısından tehlikeli olduğu

görüldüğünden yakılacak olan ATY nitelik ve niceliği derinlemesine analiz edilmelidir.

ATY kullanılarak üretilmiş çimentolardan yapılmış betonların atık olarak bertarafı söz konusu olduğunda ağır metallerin sızma potansiyelleri önem taşımaktadır. Genel sızma davranışları bakımından, elementlerin üç farklı kategoriye ayrıldıkları söylenebilir. Pb, Cu, Cd, Ni, ve Zn gibi "düzenli" metaller; pH 8 -11 aralığında minimum sızma (leachability) gösterirler. Cr, Mo, As, Sb, ve V (yani, kromat CrO₄, arsenat AsO₄) gibi "oksi-anyonlar" olarak görülen elementler; pH'ın nötr ve hafif bazik olduğu ortamlarda maksimum sızma sergilerler. Çözünür tuzlar; pH ile herhangi bir bağıntı göstermezler. Çimento esaslı sistemlerde sadece birkaç bileşen buna benzer davranış gösterir.

Sızma deneylerinde saf su yerine deniz suyu kullanıldığı zaman krom metalinin, daha yüksek miktarlarda sızma gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, deniz suyu etkisi altında daha yüksek çinko sızması göstermektedirler.

10 mm altına kırılan betonların sızabilirlik testi damıtılmış su ve pH = 4 sıvısı ortamında gerçekleştirildiğinde azaltılan pH'ın çimento tipine bakılmaksızın ağır metallerin konsantrasyonunun artmasına yol açmıştır.

Çinko ve kadmiyumun, Çimento karışımına girişinde birincil hammaddelerin katkısı toplam eser element konsantrasyonlarının %50'sinden azdır. Antimon ve Vanadyum için, birincil hammaddelerin katkısı toplam eser element konsantrasyonlarının sırasıyla %62 ve %74'üdür. Kobalt ve Krom, birincil hammaddeler yanında ikincil hammaddeler de önemli sayılabilir. Çimento içerisindeki toplam kobalt konsantrasyonlarına bakıldığında esas ikameler demir ve çelik endüstrisi ve kömür külüdür. Krom için ise demir ve çelik endüstrisi kadar yanma sonucunda oluşan küllerin de önemli olduğunu belirtilmektedir. Kurşun ve Kalay, yakıtlar ve ikincil hammaddelerden neredeyse eşit olarak oluşmaktadır.

Beton atıklarının çevresel ortamda maruz kalacakları sızma etkisi sonucu üretimlerinde kullanılan ATY ve benzeri atıklardan gelen ağır metaller önemli bir çevresel kirlenme oluşturmamaktadırlar.

ATY'nin değişik kullanıcılar tarafından kullanılmasının uygun bir risk değerlendirme sistematiği yardımıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tür değerlendirmelerde ATY'nin fosil yakıtlı yakma sistemlerinde, evsel atık yakma

sistemlerinde, ağaç atıklarının yakıldığı bir tesiste ve çimento fırınlarında yakılması alternatifleri oluşturacağı riskler bakımından incelendiğinde en düşük riskin çimento tesislerindeki kullanıma ait olduğu anlaşılmaktadır. Bu tür risk değerlendirmelerinde ATY'nin yakılması için teknolojinin uygun olup olmadığı, işletmeci tarafından tercih edilip edilmeyeceği, temininin kolay olup olmadığı, gerekli yasal izinlerin alınmasının zorluk veya kolaylıkları, finans teminindeki zorluklar, geri ödeme hızları, politik ve toplumsal davranışlar, çevresel kaliteyi etkileme potansiyeli, pazar bulma imkanları gibi kriterler dikkate alınmaktadır.

Sonuç olarak, ATY üretim ve çimento tesislerinde kullanımının farklı çevresel etkileri incelendiğinde en önemli etkisinin hava kirlenmesi alanında olabileceği ve bunun da özellikle petrokok yerine ATY kullanımı dolayısı ile başta civa olmak üzere, talyum, kadmiyum gibi ağır metallerin emisyonunda artışa neden olabileceği, bunda çimento üretim prosesindeki teknolojik alt yapının belirleyici olacağı anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Buldu, İ.**, 2006: Bağcılar Burhan (Tarsus-Mersin) Kireçtaşlarının Hammadde Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.
- Cembreau**, 1997: *Alternative Fuels In Cement Manufacture*, Technical and environmental review, D/1997/5457/April, Brussels.
- Cembreau**, 1999: *“Best Available Techniques” For The Cement Industry*, A contribution from the European Cement Industry to the exchange of information and preparation of the IPPC BAT Reference Document for the cement industry, Rue d’Arlon 55 - B-1040 Brussels.
- Cembreau**, 2007: *Sürdürülebilir Çimento Üretimi*, Avrupa Çimento Sanayinde Alternatif Yakıt Ve Hammaddelerin Birlikte İşlenmesi, Brüksel, Belçika.
- Çevre Kirliliğinin Entegre Bir Biçimde Önlenmesi ve Kontrolü (IPPC)**, 2001: Çimento ve Kireç İmalat Sanayiinde Mevcut En İyi Teknikler ile ilgili Referans Dokümanı.
- Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı**, 2006: Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007 – 2013), Taş ve Toprağa Dayalı Sanayiler Özel İhtisas Komisyonu, Çimento Sanayii Ön Raporu, Ocak, 2006.
- Environmental Protection Agency (EPA)**, U.S. Environmental Protection Agency, <www.epa.gov>.
- European Recovered Fuel Organisation (ERFO)**, 2005: Classification Of Solid Recovered Fuels, EIPPCB “Draft Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants”, Seville.
- European Commission, Directorate General Environment**, 2003: Refuse Derived Fuels, Current Practice And Perspectives. Final report.
- Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft Wissenschaftliche Berichte (FZKA)**, 2003 : Heavy Metals in cement and concrete resulting from the co-incineration of wastes in cement kilns with regard to the legitimacy of waste utilisation.
- Friends of the Earth**, 2008: Briefing Autoclaving, Mechanical and Biological Treatment (MBT).
- Garg, A., Smith, R., Hill, D., Longhurst, P.J., Pollard, S.J.T., Simms, N.J.**, 2009: An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from municipal solid waste, Science Direct, 2289–2297, UK.

- Genon, G. & Brizio, E.**, 2008: Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. Science Direct, 2375–2385, Italya.
- German Institute For Quality Assurance And Certification**, 2001: Solid Recovered Fuels, Quality Assurance RAL-GZ 724.
- Güven**, 2008: Katı Atıkların Çimento Firinlarında Bertaraf Edilmesi Ve/Veya Yakıt Olarak Kullanılması, Türkiye Kalkınma Bankası Yayını, Temmuz – Eylül 2008 Sayı: **49**, Sayfa: 29.
- Ibbetson, C. & Wengenroth, K.**, 2007: Optimisation of Fuels from MBT processes. In Proceedings of International Symposium of Mechanical Biological Treatment. (pp. 372-384). Germany: Wasteconsult International.
- Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)**, 2006: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.
- İSTAÇ Co.**, 2010: <<http://www.istac.com.tr>>
- İTO**, İstanbul Ticaret Odası, <<http://www.ito.org.tr/wps/portal>>
- Kara, M., Günay, E., Tabak, Y., Yıldız, Ş., Enç, V.**, 2008: The usage of refuse derived fuel from urban solid waste in cement industry as an alternative fuel. In: The 6th IASME/WSEAS International Conference on Innovation Heat Transfer, *Thermal Engineering and Environment* (HTE'08), 20–22 August 2008, Rhodes, Greece, pp. 172–177. ISBN: 978-960-6766-97-8.
- Kara, M., Günay, E., Tabak, Y., Yıldız, Ş.**, 2009: Perspectives for pilot scale study of RDF in Istanbul, Turkey, Science Direct, Waste Management **29** (2009) 2976–2982. www.elsevier.com/locate/wasman, İstanbul, Turkey.
- Karstensen, K. H.**, 2007: Formation, release and control of dioxins in cement kilns, The Foundation for Scientific and Industrial Research (SINTEF), P.O. Box 124, N-0314 Oslo, Norway.
- Krol, A.**, 2008: Effect of variable environmental conditions on heavy metals leaching from concretes, Faculty of Environmental Engineering, Opole University of Technology, Opole, Poland.
- Kuleli, Ö.**, 2010: *Çimento Mühendisliği El Kitabı*, TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- Küçükgül, E. Y.**, 2004: Tehlikeli Atıkların Yönetimi. Tehlikeli Atıkların Yönetimi Kursu – TMMOB ÇMO İzmir Subesi. İzmir
- Mokrzycki, E., Uliasz-Bochenczyk, A.**, 2003: Alternative Fuels for the Cement Industry, Science Direct, Vol: **74** (2003), Issue: 1 – 2, pp: 95 – 100, Poland.
- Mokrzycki, E., Uliasz-Bochenczyk, A., Sarna, M.**, 2003: Use of alternative fuels in the Polish cement industry, Science Direct, *Applied Energy* **74** (2003) 101–111, Malogoszcz, Poland.
- Mutz, S., Pretz, T.**, 2001: Aluminium Recovery From Composite Light Packaging Material in Germany, *Today And In The Future*, ICCE/8 Congress, Tenerife Island.

- Nithikul, J.**, 2007: Potential Of Refuse Derived Fuel Production From Bangkok Municipal Solid Waste, *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering in Environmental Engineering and Management*, Environmental Engineering Chulalongkorn University Bangkok, Thailand.
- Pekin, A.V.**, 2005: Çimento Sanayinde Alternatif Yakıt Kullanımı, Akçansa Çimento Sanayii ve Tic. A.Ş., Genel Müdür Yardımcısı.
- Pretz, T., Khoury, A., Uepping, R., Glorius, T. & Tubergen, J. Van.**, 2003: 'BREF ,Waste treatment - Solid recovered fuels''Editors: RWTH-Aachen I.A.R., European Recovered Fuel Organisation (ERFO).
- Sika, P.**, 2000: Energy from MSW, RDF Pelletization, A Pilot Indian Plant, Department of Science & Technology, Government of India.
- Song, Z., Vv, Y., Tong, L.**, 2009: Thermal-behavior study of chlorine released from composite refuse derived fuel, School of Resource and Environment Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, (2298–2305) China.
- Soylu, M.**, 2006: Çimento Üretiminde İstatistikler, Enerji Tüketimi, Sürdürülebilirlik, Hacettepe, Ankara.
- Sugözü, İ., Mutlu, İ.**, 2009: Atık Taşıtların Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri, Teknolojik Araştırmalar, *Taşıtların Teknolojileri Elektronik Dergisi* Cilt: 1, No: 1, 2009 (35-46).
- Sutou, K., Harada, H., Ueno, N.**, 1999: Concentration Is The Key, Taiheiyo Cement Corporation, *Cement Technology Conference*, International Cement Review, Virginia, US.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı**, 2009: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY) R.G. 27277, 3 Temmuz 2009.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı**, 2010: Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik R.G. 27721, 6 Ekim 2010.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı**, 2010: Türkiye'nin Ulusal İklim Değişikliği Eylem Planı'nın Geliştirilmesi Projesi Atık Sektörü Mevcut Durum Değerlendirmesi Taslak Raporu, Eylül, 2010.
- T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı**, 2010: Çimento Sektörü Raporu, Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi.
- TÇMB**, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, <<http://www.tcma.org.tr/>>.
- Topçu, İ. B., Demir, A.** 2004: Lastik Agregalı Harçlarda Deniz Suyu Etkisi. *Beton 2004 Kongresi Bildirileri*. 10-12 Haziran 2004, İstanbul, 312-320 s.
- Trezza, M.A., Scian, A.N.**, 2005: Waste fuels: their effect on Portland cement clinker, *Cement and Concrete Research* **35** (2005) 438–444, Gonnet, Argentina.
- TUİK**, Türkiye İstatistik Kurumu, <<http://www.tuik.gov.tr/Start.do>>.
- UK EA**, 2001: "Guidance for the recovery and disposal of hazardous and nonhazardous waste (other than by incineration and landfill)", UK Environmental Agency, SEPA, IPPC S5.06.

United Nations Environment Programme (UNEP), 2010: Draft technical guidelines on co-processing of hazardous waste in cement kilns, Scientific and technical matters: technical guidelines, Geneva, 10–14 May, 2010.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)
<<http://www.wbcd.org/>>.

Yiğiter, H., Aydın, S., Yazıcı, H., Baradan, B. 2004: C Tipi Uçucu Kül Katkılı Betonların Bazı Fiziksel, Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Beton 2004 Kongresi Bildirileri, 10-12 Haziran 2004, İstanbul, 58-66 s.

Zevenhoven, Kilpinen, 2001: Trace element, alkali metals.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ayça ÖZEL
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1985
Lisans Üniversitesi: Kocaeli Üniversitesi