

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIKSU ARITMA ÇAMURLARININ ÇİMENTO FABRİKALARINDA EK YAKIT
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

AYNUR KEMİRTLEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ARSLAN SARAL**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIKSU ARITMA ÇAMURLARININ ÇİMENTO FABRİKALARINDA EK YAKIT
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Aynur KEMİRTLEK tarafından hazırlanan tez çalışması 13.02.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Arslan SARAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Arslan SARAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kadir ALP
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, TÜBİTAK Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı (TEYDEB)'nın 3090727 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında değerli fikir ve tecrübeleri ile beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Arslan SARAL'a,

Eğitime verdikleri destekten dolayı İSTAÇ A.Ş. Genel Müdürü Sayın Osman AKGÜL'e,

Eğitim süresince desteklerini esirgemeyen, çalışmaların yönlendirilmesinde önemli katkıları olan Teknik Genel Müd. Yrd. Sayın Dr.Şenol YILDIZ'a,

Deneysel çalışmaların yürütülmesinde katkılarını esirgemeyen Sayın Hasan SARI, Sayın Alpaslan KİRİŞ'e, deneylere değerli fikirleri ile katkıda bulunan Sayın Cengiz BASKE ve İSTAÇ Çevre Laboratuvarı çalışanlarına,

Deneysel çalışmalarının diğer ayağında yer alan TÜBİTAK-MAM Malzeme Enstitüsü çalışanları Sayın Dr. Musfafa Kara ve ekibine,

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen mesai arkadaşlarıma,

Çalışma süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme,

Teşekkürü bir borç bilirim.

Şubat, 2013

Aynur KEMİRTLEK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	17
1.3 Hipotez	18
BÖLÜM 2	
PROJENİN ARKA PLANI	20
2.1 Aritma Çamuru.....	20
2.1.1 Atıksu Aritma Tesislerinden Kaynaklanan Aritma Çamurları	20
2.1.2 Aritma Çamur Yönetimi.....	28
2.1.2.1 Atıksu Aritma Çamurunun Kurutulması	31
2.1.2.1.1 Kurutma Yöntemleri.....	32
2.1.2.2 Atıksu Aritma Çamurlarının Yakılması.....	36
2.1.2.2.1 Ayrı Yakma Sistemleri	40
2.1.2.2.2 Birlikte Yakma Sistemleri	41
2.2 Yasal Mevzuat	45
2.2.1 Avrupa Birliği Yasal Mevzuatı	46

2.2.2	EPA Mevzuatı	47
2.2.3	Atıklar ve Arıtma Çamurları ile İlgili Yönetmelikler ve Tebliğler	47
2.2.4	Yakma ile İlgili Yönetmelikler	51
2.3	Sektörel Ve/Veya Bölgesel Politikalar Ve Programlar	59
2.3.1	Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması-Marmara Havzası	59
2.3.2	Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımları Planlaması için Teknik Yardım (EHCIP) Projesi, Arıtma Çamurunun Tarımda Kullanılması Halinde Çevrenin ve Özellikle Toprağın Korunmasına İlişkin Konsey Direktifi'ne Özgü Yatırım Planı (ENVEST, 2005)	61
2.3.3	ÇŞB Atıksu Arıtımı Eylem Planı (2008-2012)	62
2.3.4	Marmara Çevre Master Planı ve Yatırım Stratejisi Nihai Raporu (MEMPIS Projesi, 2007)	62
BÖLÜM 3		
ÇİMENTO ÜRETİM TEKNOLOJİSİ		64
3.1	Çimento Üretimi	64
3.1.1	Çimento Üretiminde Uygulanan Prosesler Ve Teknikler	68
3.1.1.1	Hammaddeler ve Hammaddelerin Kazanılması.....	73
3.1.1.2	Yakıtlar-Depolama ve Hazırlama	77
3.1.1.3	Havaya Yapılan Emisyonlar	78
3.1.1.4	Klinker İçinde Yer Alan Mineral Fazlar	82
3.1.1.5	Portland Çimentosu	85
3.1.1.6	Çimentoda Kimyasal Bileşimin Önemi	89
3.1.1.7	Çimentoda Mineralojik Bileşimin Önemi	94
3.1.1.8	Çimentoda Boyut Dağılımının Önemi	96
3.1.1.9	Döner Fırın ve Döner Fırın Kimyası	96
3.1.2	Çimento Üretiminde Atık Kullanımı	100
3.1.2.1	Genel Hususlar	100
3.1.2.2	Atık Yakıtların Türleri ve Kalorifik Değerleri	104
3.1.2.2.1	Katı Atık Yakıtlar	106
3.1.2.2.2	Sıvı Atık Yakıtlar	107
3.1.2.3	Atık Kalite Gereksinimleri Ve Girdi Kontrolü.....	107
3.1.2.3.1	Atıkların metal konsantrasyonları.....	110
3.1.3	Atık Kullanımı Kalite Standartları	111
3.2	Türkiye'de Atıkların Çimento Üretiminde Kullanımı	117
BÖLÜM 4		
PİLOT ÖLÇEKLİ ÇALIŞMA		122
4.1	Projede Deneylerde Kullanılan Girdileri Hakkında Genel Bilgiler	122
4.1.1	Likit Petrol Gazı	122
4.1.2	Atık Çamur.....	125
4.1.3	Farin.....	128

4.1.4	Pilot Ölçekli Döner Fırın.....	129
4.2	Deneyisel Çalışmalar	134
4.2.1	Klinker Analizi	135
4.2.2	Çimento Analizi	138
4.2.3	Ağır Metal Analizi	144
4.2.4	Emisyon Ölçümü.....	146
BÖLÜM 5		
	ENDÜSTRİYEL ÖLÇEKLİ ÇALIŞMA.....	164
5.1	Projede Deneylerde Kullanılan Girdileri Hakkında Genel Bilgiler	164
5.1.1	Yakıt.....	164
5.1.2	Atık Çamur.....	165
5.1.3	Farin.....	167
5.1.4	Endüstriyel Ölçekli Döner Fırın.....	168
5.2	Deneyisel Çalışmalar	170
5.2.1	Klinker Analizi	171
5.2.2	Çimento Analizi	176
5.2.3	Emisyon Ölçümü.....	178
5.3	Sonuç ve Değerlendirme.....	180
BÖLÜM 6		
	FİZİBİLİTE	182
6.1	Atık Sektörü.....	182
6.1.1	Düzenli Depolama Yöntemi İle Bertaraf.....	182
6.1.2	Ek Yakıt Olarak Bertaraf	187
6.2	Çimento Sektörü Açısından.....	189
6.2.1	Yakıt (Enerji) Tasarrufu.....	190
6.2.2	Emisyon Azaltımı	194
BÖLÜM 7		
	SONUÇ VE ÖNERİLER	197
	KAYNAKLAR.....	204
	ÖZGEÇMİŞ.....	209

SİMGE LİSTESİ

Ag	Gümüş
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
As	Arsenik
Ba	Baryum
BTEX	Etil benzen ve ksilen
C ₃ A	Trikalsiyum alüminat (Celit)
C ₄ AF	Tetra kalsiyum alüminoferrit (Ferrit)
C ₂ S	Dikalsiyum silikat (Belit)
C ₃ S	Trikalsiyum silikat (Alit)
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CaSO ₄	Kalsiyum sülfat
CaO	Kalsiyum oksit
Cd	Kadmiyum
Cl	Klorür
Cu	Bakır
Cr	Krom
Co	Kobalt
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
ÇOK	Çözünmüş organik karbon
F	Flor
Fe ₂ O ₃	Demir oksit
HCl	Hidrojen klorür
HF	Hidrojen florür
Hg	Civa
HVFO	Yüksek viskoziteli fuel oil
K ₂ O	Potasyum oksit
LOI	Kızdırma kaybı
mg/kg	Konsantrasyon
mg/Nm ³	Konsantrasyon
MgO	Magnezyum oksit
ng/Nm ³	Konsantrasyon
NH ₃	Amonyak
Nm ³	Normal kübik metre (101,3 kPa, 273 K)

Mn	Mangan
MnO	Mangan (II) oksit
Mn ₂ O ₃	Mangan (III) oksit
Mo	Molibden
N	Azot
Ni	Nikel
NO _x	Azot oksitler
PAH	Poliaromatik hidrokarbonlar
Pb	Kurşun
Sb	Antimon
SO ₃	Kükürt trioksit
P ₂ O ₅	Difosfor pentaoksit
PCDD	Poliklorlu dibenzo-p-dioksinler
PCDF	Dibenzofuranlar
ppm	(Parts per million) milyonda bir birim
SiO ₂	Silisyum oksit
Se	Selenyum
Sn	Kalay
SO ₂	Kükürt dioksit
SO ₃	Kükürt trioksit
T	Ton (metrik)
TiO ₂	Titanyum oksit
Tl	Talyum
TOK	Toplam organik karbon
V	Vanadyum
VOC	Uçucu organik bileşikler
Zn	Çinko
ZrO ₂	Zirkonyum oksit

KISALTMA LİSTESİ

ADDY	Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
ATY	Atıktan Türetilmiş Yakıt
AYİY	Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik
AYGEİY	Atık Yönetiminin Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik
ÇŞB	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
EHCIP	Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımları Planlaması için Teknik Yardım Projesi
EKAÇTKDY	Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik
ENVEST	Arıtma Çamurunun Tarımda Kullanılması Halinde Çevrenin ve Özellikle Toprağın Korunmasına İlişkin Konsey Direktifi'ne Özgü Yatırım Planı
EPA	Amerikan Çevre Koruma Ajansı
ETKHKKY	Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
EURITS	Avrupa Özel Atıkları Yakma ve Bertaraf Birliği (the European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste)
İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
ÇŞB	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
KM	Katı Madde
SKHKKY	Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
MEMPIS	Marmara Çevre Master Planı ve Yatırım Stratejisi Nihai Raporu
MBR	Membran Biyoreaktör
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Atıksu arıtma tesisi sayısı	21
Şekil 2.2 Bölgelerde oluşan arıtma çamuru miktarı (ton/gün kuru madde)	22
Şekil 2.3 Türkiye’de oluşan toplam çamur miktarı (ton/gün kuru madde).....	22
Şekil 2.4 Arıtma çamurlara uygulanan ısı işlemler	39
Şekil 2.5 Yakmanın avantajları.....	44
Şekil 2.6 Yakmanın dezavantajları	44
Şekil 2.7 Yakmanın çevresel etkileri	45
Şekil 3.1 1950 ila 2006 yılları arasında AB-27’de ve dünyada çimento üretimi	65
Şekil 3.2 Çimento üretim prosesine genel bakış [CEMBUREAU, 2006].....	72
Şekil 3.3 Sıcaklığa bağlı olarak fırın içinde oluşan minerolojik reaksiyonlar	83
Şekil 3.4 Çimento fırını içinde gaz ve malzemenin sıcaklık davranışı	99
Şekil 3.5 Ayrı hatlı/aşağı çekişli kalsinatör örneği [64]	103
Şekil 3.6 Kalsinatöre atık besleme noktaları örneği [64].....	103
Şekil 3.7 Türkiye’deki çimento fabrikaları (TÇMB)	117
Şekil 4.1 Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan pilot ölçekli çimento döner fırını	130
Şekil 4.2 Pilot döner fırının ön ısıtma rejimi	134
Şekil 4.3 Deneysel çalışmalarda kullanılan pilot döner fırındaki termocouple’lerin konumları	134
Şekil 4.4 Pilot döner fırında üretilen klinkerlerin görüntüsü.....	136
Şekil 4.5. Siklon ünitesi	147
Şekil 4.6 Dioksin ve furan örnekleme hattı	150
Şekil 4.7 Ağır metal örnekleme hattı.....	152
Şekil 4.8 PAH örnekleme hattı.....	157
Şekil 4.9 Örnekleme sistemi	158
Şekil 4.10 Örnekleme için kullanılan cihaz şeması	162
Şekil 5.1 Endüstriyel ölçekli döner fırın üretim prosesi.....	170
Şekil 5.2 Endüstriyel döner fırında üretilen klinkerlerin görüntüsü	172
Şekil 5.3 % 6 Ataköy klinkerinin XRD paterni	174
Şekil 5.4 % 4 Ataköy klinkerinin XRD paterni	175
Şekil 5.5 % 10 Paşaköy klinkerinin XRD paterni	175
Şekil 6.1 1994-2011 yılları arası düzenli depolanan atık miktarı.....	183

Şekil 6.2	1994-2011 yılları arası bertaraf edilen toplam atık miktarı	183
Şekil 6.3	Sızıntı suyu arıtma tesisi.....	185
Şekil 6.4	Depo gazından enerji üretim tesisi	186
Şekil 6.5	Kömürcüoda düzenli depolama sahasına dökülen arıtma çamurları	186
Şekil 6.6	Ataköy ileri biyolojik arıtma tesisi genel görünüş.....	188
Şekil 6.7	Ataköy ileri biyolojik arıtma tesisi çamur arıtma prosesi şeması	188
Şekil 6.8	Çimento fabrikaları ve atık temin eden tesisler.....	191
Şekil 6.9	Ülkelere göre çimento üretimi CO ₂ emisyon miktarı.....	195

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	Sektörlere göre nem, organik madde, karbonat içeriği dağılımı 11
Çizelge 1.2	Aritma çamurlarını oluşturan major oksitler 11
Çizelge 1.3	Aritma çamurlarını oluşturan iz elementler 12
Çizelge 1.4	Portland çimento üretiminde kullanılan klinker ve enci tesislerinde oluşan çamur kül içeriği..... 17
Çizelge 2.1	İSKİ atıksu arıtma tesisleri ve çamur miktarları(2010) 24
Çizelge 2.2	İSKİ köylerdeki atıksu arıtma tesisleri ve çamur miktarları(2010) 26
Çizelge 2.3	İstanbul'da planlanan/inşası süren biyolojik atıksu tesisleri ve oluşacak çamur miktarları 28
Çizelge 2.4	Çamur yönetimi..... 31
Çizelge 2.5	Atık çamur tiplerinin tipik ısı değeri 38
Çizelge 2.6	Çamur külünün bileşimi 40
Çizelge 2.7	Toplam emisyon limit değerleri 56
Çizelge 2.8	SO ₂ ve TOK için toplam emisyon limit değerleri 56
Çizelge 2.9	Yakma tesisleri baca gazlarındaki emisyon sınır değerleri..... 57
Çizelge 2.10	Çimento fırını atık gazındaki NO ₂ emisyonu..... 59
Çizelge 3.1	2006 yılında coğrafi bölgelere göre dünya çimento üretimi [46] 65
Çizelge 3.2	İç piyasada oluşması tahmin edilen çimento tüketimi..... 66
Çizelge 3.3	AB-27'de çimento sanayiinde üretilen ısının yüzdesi olarak ifade edilen yakıt tüketimi [46, 47] 67
Çizelge 3.4	Çimento klinkeri üretimi için gerekli hammaddelerin ve çimento farininin kimyasal analizi [50,51,52,53] 75
Çizelge 3.5	Hammaddeler ve farinin içinde bulunan metaller [50]..... 76
Çizelge 3.6	Avrupa çimento fırınlarındaki emisyon aralıkları verileri..... 80
Çizelge 3.7	Klinker mineral fazları 82
Çizelge 3.8	Portland çimentosu ana bileşenleri 86
Çizelge 3.9	Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve yaklaşık miktarları 87
Çizelge 3.10	Çimento ana bileşenlerinin hidrasyon özellikleri 88
Çizelge 3.11	Döner fırında sıcaklığa bağlı değişen reaksiyonlar 98
Çizelge 3.12	Klinker oluşumunda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar 99
Çizelge 3.13	2003 ve 2004 yıllarında AB-27'de çimento fırınlarında yakıt olarak kullanılan değişik atık türleri 105

Çizelge 3.14	Katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için kalite standartları [80]	112
Çizelge 3.15	İsveç'teki çimento tesislerinde kullanılan yakıtlar için şartname [70]..	113
Çizelge 3.16	Endüstriyel atık ve solventler için kabul değerleri	114
Çizelge 3.17	Çimento fırınlarında atığın birlikte yakılması için kriterler [71].....	115
Çizelge 3.18	Katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için (ATY) sınıflandırma sistemi (CEN/TS15359:2006:E)	115
Çizelge 3.19	Avusturya, İsviçre ve Almanya'da ek yakıt sınır değerleri [74, 47]	116
Çizelge 3.20	Türk çimento tesislerinin coğrafi bölgelere dağılımı	119
Çizelge 3.21	Türk çimento sanayiinde kurulu kapasiteler ve kapasite kullanım oranları	119
Çizelge 3.22	Avrupa çimento sanayinde kullanılan yakıt miktarları (2007)	121
Çizelge 4.1	Deneylerde kullanılan LPG Propan gazının ISO 7941'e göre Kompozisyonu	122
Çizelge 4.2	Deneylerde kullanılan LPG'nin özellikleri	123
Çizelge 4.3	Deneysel çalışmada kullanılan LPG propan'nin özellikleri	124
Çizelge 4.4	Deneysel çalışmalarda kullanılan analiz metotları	125
Çizelge 4.5	Tuzla ve Paşaköy atık çamurunun fiziksel özellikleri	126
Çizelge 4.6	Tuzla atık çamuru ve paşaköy atık çamurunun ağır metal analizleri	127
Çizelge 4.7	Tuzla ve Paşaköy Atık Çamurunun Kimyasal Analizleri (550°C, külde) .	127
Çizelge 4.8	Pilot döner fırında kullanılan farinin kimyasal analizi ve modüller	128
Çizelge 4.9	Farin ağır metal analizi	129
Çizelge 4.10	Döner fırında kullanılan refrakterin kimyasal özellikleri	131
Çizelge 4.11	Döner fırında kullanılan refrakterin fiziksel özellikleri	132
Çizelge 4.12	Pilot döner fırında deney için kullanılan parametreler	133
Çizelge 4.13	Pilot döner fırında üretilen klinkerin kimyasal analiz özet sonuçları	137
Çizelge 4.14	Pilot döner fırında üretilen klinkerin ana bileşenlerinin özet sonuçları	138
Çizelge 4.15	Pilot döner fırında üretilen çimentonun kimyasal analiz özet sonuçları	138
Çizelge 4.16	Pilot döner fırında üretilen çimentonun ana bileşenlerinin özet sonuçları	139
Çizelge 4.17	Pilot döner fırında üretilen çimentonun fiziksel ve mekanik analizi	140
Çizelge 4.18	Üretilen klinkerden elde edilen çimentonun kimyasal analizlerinin kıyaslanması	141
Çizelge 4.19	Ağır metal karşılaştırma çizelgesi	145
Çizelge 4.20	Pilot ölçekli döner fırın baca gazı analiz sonuçları	147
Çizelge 5.1	Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan yakıtın özellikleri	165
Çizelge 5.2	Ataköy ve paşaköy atık çamurunun fiziksel özellikleri	166
Çizelge 5.3	Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan çamurun özellikleri	166
Çizelge 5.4	Ataköy atık çamuru ve paşaköy atık çamurunun ağır metal analizleri .	167
Çizelge 5.5	Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan farinin kimyasal analizi ve modüller	168
Çizelge 5.6	Endüstriyel ölçekli döner fırının özellikleri	169
Çizelge 5.7	Endüstriyel ölçekli döner fırında üretilen klinkerin kimyasal analiz özet sonuçları	173
Çizelge 5.8	Endüstriyel ölçekli döner fırında üretilen klinkerin ana bileşenleri	174

Çizelge 5.9	Endüstriyel ölçekli döner fırında üretilen klinkerin klinkerinin minerolojik analizi.....	174
Çizelge 5.10	Çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri açısından sınır değerleri [TS EN 197-1/Mart 2002].....	176
Çizelge 5.11	Endüstriyel ölçekli döner fırınında üretilen klinkerden elde edilen çimentonun fiziksel ve mekanik analizi	177
Çizelge 5.12	Endüstriyel ölçekli döner fırınında üretilen klinkerden elde edilen çimentonun kimyasal özellikleri	177
Çizelge 5.13	Ağır metal karşılaştırma çizelgesi	178
Çizelge 5.14	Endüstriyel ölçekli baca gazı analiz sonuçları.....	179
Çizelge 6.1	Ek yakıt ortalama kalorifik değer.....	192

ATIKSU ARITMA ÇAMURLARININ ÇİMENTO FABRİKALARINDA EK YAKIT OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Aynur KEMİRTLEK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Arslan SARAL

Tez kapsamında atıksu arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanımı araştırılmıştır.

Arıtma çamurlarının ek yakıt olarak kullanımının araştırılması kapsamında İSKİ atıksu arıtma çamurlarının 5 aylık çamur karakterizasyonu incelenmiş ve pilot ölçekli ve endüstriyel ölçekli deneme çalışmaları yapılmıştır.

Pilot ölçekli deneme çalışmalarında öncelikle % 100 LPG kullanılarak klinker üretilmiştir, daha sonra ise % 5, % 10 oranlarında Tuzla Çamuru ve % 10, % 20 oranlarında Paşaköy Çamuru ek yakıt olarak beslenmiştir. Endüstriyel ölçekli çalışmalarda % 6 , % 4 Ataköy Çamuru ve % 10 Paşaköy Çamuru ek yakıt olarak beslenmiştir.

Her iki çalışmada da deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddelerin (farin, arıtma çamuru, vb.) fiziksel ve ağır metal analizleri yapılmış, üretilen klinkerin ve çimentonun kimyasal, fiziksel, mineralojik analizi ve dayanım testleri yapılmış ve baca gazı analiz çalışmaları yürütülmüştür. Üretilen klinker ve çimentonun kalite sınır değerleri içinde olduğu tespit edilmiştir. Endüstriyel ölçekli tesiste yapılan ölçüm sonucunda Toz, TOC, HCl, HF, SO₂, NO₂ ve ağır metal ve dioksin furan emisyonları SKHKKY’de verilen sınır değerlerin altında olduğu ve TOC emisyonları hariç diğer emisyonların AYİY’te verilen sınır değerlerin altında olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda arıtma çamurlarının çimento üretim tesisinde klinker üretimi esnasında ek yakıt olarak kullanılabileceği açıkça görülmektedir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, hem klinkerin kalitesini bozmayan hem de emisyon değerleri açısından belirlenmiş limitler dahilinde çamurun çimento üretiminde ek yakıt halinde kullanma oranı % 10 olarak belirlenmiştir.

Çimento sektöründe çok çeşitli türdeki farklı atıklar yakıt olarak kullanılmaktadır. Atıkların ek yakıt olarak kullanılması ise konvansiyonel yakıt tasarrufu, CO₂ azaltımı sağlanmakta beraber atıkların düzenli depolanmasındaki su, hava ve toprağa verilen kirlenici emisyonları azaltılmaktadır. Bununla beraber atık maddelerin kullanımı düşünülmenden önce, atık maddelerin uygun bir biçimde seçilmesi, atık maddelerin kapsamlı analiz prosedürü ve ön arıtımı gibi farklı temel ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır. Değerlendirmeler ve kararlar; klinker üretim süreci ve proses koşullarına, hammadde ve yakıt bileşimlerine, besleme noktalarına, kullanılan baca gazı arıtım tekniğine, karşılaşılan atık yönetimi sorunlarına ve mevcut yönetmeliklerinin gereksinimlerine dayandırılmalıdır. Yakıt küllerinin tümüyle klinkerin içinde tutulması nedeniyle, klinkerin kalite standartlarını korumak için kalite standartları tanımlanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: arıtma çamuru, ek yakıt, emisyon, çimento, klinker, CO₂ azaltımı

**A STUDY ON THE USABILITY OF THE TREATMENT SLUDGE OF WASTE
WATER AS ADDITIONAL FUEL IN CEMENT FACTORIES**

Aynur KEMİRTLEK

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Arslan SARAL

It is studied whether the treatment sludge of waste water is used as an additional fuel in the cement factories or not in the scope of the thesis.

In the scope of the study on the usability of the treatment sludge as the additional fuel, the sludge characterization of the treatment sludge of ISKI waste waters for 5 months was evaluated and trial works were done as for pilot scale and industrial scale.

In the trial works with pilot scale, firstly clinker was produced by using 100% LPG; then the Tuzla sludge was fed in 5% and 10% ratios and the Paşaköy sludge in 10% and 20% ratios. In the industrial scale studies, 6%, 4% of Ataköy sludge and 10% of Paşaköy sludge was fed as the additional fuel.

In both studies, the physical and heavy metal analysis of the raw materials (raw meal, treatment sludge, etc.) used in the trial studies were made, the chemical, physical, mineralogical analysis and resistivity tests of the clinkers and cements produced were made and the chimney gas analysis studies were conducted. It was determined that the clinker and cement produced are in the quality limit values. It was determined that the dust, TOC, HCl, HF, SO₂, and heavy metal and dioxin furan emissions are below the limit values given in SKHKKY and the other emissions except TOC emissions are below

the limit values given in AYİY as a result of the measurements made in the facility with industrial scale.

It is clearly seen that the treatment sludge may be used as the additional fuel during clinker production in cement production facilities as a result of the studied made. It was determined that the ratio of the sludge to be used as the additional fuel in the cement production is 10% within the limits determined for both not harming the clinker quality and according to the emission values as a result of the experimental studies made.

Various wastes of a very diverse kind are used as fuel in cement industry. By using the wastes as additional fuel, conventional fuel savings and CO₂ decreases are obtained as well as the pollutant emissions given to water, air and earth during regular storage of the wastes are decreased. Nevertheless the basic principles should be considered such as selecting the waste materials in a suitable way, comprehensive analysis procedures and preliminary treatment of the waste materials before considering the waste material usage. The evaluations and decisions should be based on the clinker production process and process conditions, raw material and fuel compositions, feeding points, the technique used for refining the chimney gases, the waste management problems faced and the requirements in the existing regulations. Because the fuel cinders are completely kept in the clinker, the quality standards should be defined for maintaining the quality standards of the clinker.

Key words: Treatment sludge, additional fuel, emission, cement, clinker, CO₂ decrease

1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda literatürde arıtma çamurlarının farklı yöntemlerle değerlendirilmesi konusunda çok çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır. Literatürde katı atık azaltma ve geri dönüşüm çalışmalarına dair yapılan bazı çalışmalardan örnekler aşağıda özet olarak verilmiştir.

Türkiye’de arıtma çamuru geri kazanımı konusundaki işleyişin değerlendirildiği bir çalışmada, Türkiye genelinde oluşan arıtma çamurlarının, kaynakları ve özellikleri hakkında kesin sayısal veriler verilemese de hızla artan bir potansiyel bulunduğu konusuna değinilmiştir. Türkiye topraklarındaki organik madde eksikliği nedeni ile atık çamurların ya doğrudan ya da kompostlaştırma ile dolaylı olarak tarım ve orman arazilerinde kullanılabileceği ancak içinde tehlikeli ve zehirli madde içermemesi için ağır metal içeriğinin, zararlı organik madde bileşiğinin ve patojen organizma durumunun izin verilen sınır değerlerde olması gerekmektedir. Çamurlar tarımda ancak yılın belirli aylarında uygulandığından atıksu arıtma tesislerinde sürekli oluşan arıtma çamurlarının belirli süre için depolanması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (3–5 ay). Gerekli depolama kriterleri sağlanamazsa yakılarak bertarafı söz konusu olabilir fakat bu durumda da yakma sonucu oluşacak emisyonların zararsız hale getirilmesi maliyeti oldukça yüksektir. Arıtma çamurlarının depolanması için homojenleştirme, kurutma, karıştırma ve kompostlaştırma gibi yoğun ön işlemlerin yapılması gerekmektedir. Arıtma

çamurlarının depolanmasında da ana hedef uzun vadede çamurun çevreye olabilecek olumsuz etkilerini kontrol altına almaktır [1].

Ülkemizde arıtma çamurlarının yönetimine ilişkin konuyu bir bütün olarak ele alan bir yönetmelik bulunmaması büyük bir eksiklik olarak uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Mevcut yönetmeliklerde, hem kentsel hem de evsel atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan arıtma çamurlarında yapılan analizlere ait sonuçlar, bu çamurlarının çoğunun özellikle çözünmüş organik karbon ve/veya ağır metal parametreleri bakımından “tehlikeli atık sınıfında” nitelendirildiğini göstermektedir. Bu nedenle de yerel yönetimlerin çoğu bu çamurların katı atık depolama sahalarında depolanmasında ve tarımsal amaçlı kullanım alternatiflerinin değerlendirilmesinde önemli sorunlar yaşamaktadır. Bu sorun aynı zamanda pek çok endüstriyel tesiste oluşan arıtma çamurlarının yönetimi için de söz konusudur. Avrupa Birliği ülkelerinde uygulamada olan “Atık Çerçeve (Framework Directive on Waste- 75/442/EEC)” ve “Katı Atık Depolama (Landfill Directive -1999/31/EC)” yönetmelikleri uyarınca da katı atık depolama sahasına gönderilen atıkların organik madde içeriklerinin önemli oranda azaltılması gereği de gündemdedir. AB Atık Çerçeve Direktifi ile uyumlu olacak şekilde çevresel açıdan sürdürülebilir bir çamur yönetimi eylem planına ihtiyaç duyulmaktadır. Öncelikle ülkemizdeki tehlikeli atık sınıfında yer alan arıtma çamurlarına yönelik miktar ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kapsamlı bir envanterin oluşturulması gerekmektedir. Bu envanterle birlikte bölgesel koşullar da dikkate alınarak, her bölge için bu atıkların yönetim planlarının hazırlanarak uygulamaya konması ve bölge bazında en uygun bertaraf alternatiflerinin belirlenmesi gereklidir.

AB atık hiyerarşisinde esas alındığı üzere ilk aşamada atıksu arıtımı sırasında mümkün olan en iyi teknolojilerin kullanımı benimsenerek az çamur oluşumuna yönelik önlemlerin alınması ve oluşan çamur miktarlarının azaltılması esas olmalıdır. Oluşan arıtma çamurlarına uygulanan arıtım proseslerinde yararlı kullanım alternatiflerinin benimsenmesi, arıtım sonrası çamurun kalitesine bağlı olarak kırıç topraklarda uygulanabilirliğinin irdelenmesi, kompostlaştırılması, eğer yönetmelik değerleriyle uyumlu ise tarımsal amaçlı kullanılması, mevcut risk değerlendirmelerinin de göz

önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunun dışında atıktan enerji eldesine yönelik olarak yakma, ek yakıt olarak kullanımına ilave olarak gazifikasyon ve piroliz gibi valorizasyon prosesleriyle bu çamurlardan enerji eldesi öncelikli konular olarak ele alınmalıdır. Atığın depolama yoluyla bertaraf edilmesi son seçenek olarak değerlendirilmeli ve bunda da düzenli depolamaya gidecek çamur miktarlarının azaltılması hedeflenmelidir [2].

Atık su arıtma çamurunun son bertarafı için değişik üye ülkelerin uyguladıkları (uygulayacakları) metotlar ve yaklaşımlarla ilgili bilgiler halen kesinlik kazanmış değildir. Bazı Avrupa ülkelerinde atık çamurlarının bertarafındaki ana uygulama yöntemi bunların düzenli depolama sahalarında gömülmeleridir. % 50–75 arasındaki uygulama bu yöndedir. Geri kalan (% 25 ile 35 arası) miktarlar zirai tarım bölgelerinde toprak iyileştiricisi / gübre amaçlı kullanılmakta veya diğer geri dönüşüm sistemleri içinde (örneğin, parklar, saha ıslah işlemleri ve peyzaj gibi amaçlarla) değerlendirilmektedir [3].

İstanbul kenti için İ. Öztürk ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada İstanbul il sınırları dahilindeki kentsel katı atıklara yönelik AB Çevre Mevzuatı ile uyumlu Katı Atık Yönetimi Stratejik Planı'nda esas alınan farklı metotlar irdelenmiştir. Buna göre, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin 1992'de hazırlamış olduğu Katı Atık Yönetimi Projesi Fizibilite Raporu'nda, düzenli katı atık depo sahaları için günlük örtü toprağı ihtiyacının Avrupa yakası için 600 ton/gün, Asya yakası için ise 400 ton/gün olacağı belirtilmektedir. İstanbul'da yapımı süren atıksu arıtma tesislerinden çıkacak çamurun diğer bir bertaraf alternatifi kompostlaştırma işlemi olup, alternatifler içinde maliyeti bakımından en uygun çözümdür. Kompostlaştırılmış çamur, düzenli depolama alanlarında günlük örtü toprağı olarak kullanılabileceğı gibi, dağıtımı ve pazarlaması yapılarak, zirai alanlarda toprak şartlandırıcısı olarak da kullanılabilir. Bu durumda kuru atık çamur içindeki ağır metal içeriğinin, Katı Atık Kontrolü Yönetmeliğı'nde öngörülen değerleri aşmamasına dikkat edilmelidir. Arıtma tesislerinden çıkacak olan çamurların yakılması alternatifi, yakma esnasında oluşan emisyonların standartlara uygun olarak havaya verilmesi için büyük oranlarda ilave masraflar gerektirmesi ve sistemin

işletilmesindeki zorluklar sebebiyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde ilk planda tercih edilmemektedir. Ancak AB direktiflerinde biyolojik olarak parçalanabilen atıkların düzenli depolama alanlarında bertarafına getirilen kısıtlar, çamurların yakılmasını gerektirebilir. Arıtma amurları her geçen yıl gelişen endüstri ve artan nüfusa bağlı olarak katlanarak artmaktadır. İstanbul’un nüfus ve alan büyüklüğünden dolayı katı atık sorunları da ciddi boyutlara ulaşmış olduğundan dolayı alternatif geri dönüşüm yöntemleri üzerinde çalışılması gerekmektedir [4].

Arıtma tesislerinin bir yan ürünü olan arıtma amurlarının miktarının gittikçe artması kaçınılmazdır. Çamurların nihai bertarafı için yaygın olarak kullanılan düzenli depolama, yakma ve kompostlaştırma alternatiflerine arıtma çamurlarındaki patojen mikroorganizmalar, ağır metaller ve diğer toksik maddeler nedeniyle temkinli yaklaşılmaktadır. Mekanik yöntemlerle susuzlaştırma çamurunun (amur kekinin) kurutulduktan sonra yakıt olarak kullanılması da bir seçenektir. 4000–4500 kcal/kg kalori değerine sahip kekin bu ısıl değeri, düşük kalori değerine sahip kömüre yakındır. Çamurların termal işlemlerden geçirilerek değerlendirmesine ilişkin sınırlı da olsa pilot ve tam ölçekli uygulamalar süregelmektedir. Kl de talaş, fırın atıkları ve bazı katı atıklar da olduğu gibi yapı malzemesi ve bazı endüstriyel kullanımlar için uygunluk göstermektedir. Başta Japonya, Singapur, Almanya ve İngiltere olmak üzere bazı sanayileşmiş ülkelerde evsel arıtma amurlarının veya çamur küllerinin kille karıştırılarak inşat malzemesi üretilmesi çalışmaları süregelmektedir. Çamurun tuğla ya da kiremit üretimi için katkı malzemesi olarak kullanması sayesinde ayrıca çamur içerisindeki ağır metallerin tutulması, patojenlerin yok edilmesi ve organiklerin tam oksitlenmesi sağlanmaktadır [5].

Çamurların hammadde olarak değerlendirilmesinde, yapı malzemesi, imento hammaddesi ve adsorbent olarak kullanımı ön plana çıkmaktadır. Arıtma çamurlarına herhangi bir kimyasal stabilizasyon işlemi uygulanmaksızın yapı ya da kaplama malzemesi olarak kullanımı, oluşacak emisyonlar nedeniyle kısıtlanmakta bu tür kullanımlar için çamurların kimyasal veya termal işlemlerden geçirilmesi ön koşul olarak getirilmektedir. Çimento sanayinde ise döner fırınlarda ek yakıt olarak enerji

sağlayan çamur, yanması sonucu oluşan kül ile klinker için katkı olmakta ve portland çimentosu üretiminde kullanım alanı bulmaktadır [6].

S. Gören'in yapmış olduğu çalışmada, Japonya'nın başkenti Tokyo'da, Tokyo belediyesi tarafından uygulanan katı atık yönetiminden bazı kesitlere yer verilmiştir. Dünyanın en fazla nüfus yoğunluğuna sahip olmasından dolayı, atık problemini en ciddi şekilde yaşayan ülke olan Japonya'da ciddi önlemler alınmaya çalışılmaktadır. Katı atıkların bertaraf edildiği düzenli depolama sahalarının varlığı çok hayattır. Yenilerinin kurulması için şartlar mümkün olmadığından mevcut deponun kullanım süresinin arttırılması için çalışılmıştır. Fakat yaşanan gelişmeler sonucunda belirlenen yeni katı atık politikası gereği mevcut deponun uzun süreli kullanımı yerine katı atıkların azaltılması ve geri dönüşüme kazandırılması konusuna ağırlık verilmiştir. Japonya'da kanalizasyon şebekelerinden toplanan kirli su, arıtmaya gönderilmeden önce ön arıtmaya tabi tutulur, buralarda tortu ve birikintiler sebebi ile çamur oluşmaktadır. Kanalizasyon çamuru, suyun özellikleri, suya karışan madde oranları gibi etkenler göz önünde bulundurularak, oluşacak çamur miktarı hesap edilebilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda 2002 yılından 2016 yılına kadar oluşacak miktar 32.270.000 ton olarak belirlenmiştir. Ancak miktar azaltma ve geri dönüşüm uygulamaları ile düzenli depolama sahasına gidecek olan miktar, 2.950.000 ton (2.400.000 m³) olacaktır. Miktar azaltma ve geri dönüşüm yöntemi olarak tüm tortu ve çamurun yakma tesisine gönderilmesine ilişkin sistemler kurulmaktadır. Yakma tesisinde oluşacak külün geri kullanımı maksadıyla yüksek basınçla elde edilen blok ve çok ince granül haline getirilerek çimento katkı maddesi olarak kullanılması konusunda Japonya'da çalışmalar yapılmaktadır [7].

Prof. Dr. Z. Avaz yapmış olduğu çalışmada, atıksuların biyolojik arıtımı sonucu ortaya çıkan arıtma çamurlarının çevreye zarar vermeden ekonomik ve ekolojik biçimde giderilmesi ve değerlendirilmesi için uygulanan metotlara değinmiştir. Bu metotlar;

1. Açık alanda değerlendirme
2. Kurutulmuş çamur değerlendirilmesi (örneğin çimentoda ek yakıt olarak)
3. Çamurdan biyogaz eldesi

4. Gazlaştırma

5. Alternatif metotlar

olarak özetlenebilir. Atıksu arıtma çamurunun çimento üretiminde değerlendirilmesi için çeşitli gerekçeler sıralanmıştır. Özellikle çimento sanayinde kullanılması ile enerji tasarrufu sağlanacak ve enerji yoğun olan bu sanayi için maliyetleri oldukça düşürecektir. Çimentonun hammadde karışımı olan Ca, Si, Al, ve Fe oksitleri genellikle ikincil yakıtların da ana bileşenleridir. Yanma prosesi çok yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli olarak yürür. Bu da organik bileşenlerin dönüşümü için iyi bir ortam sağlar. Atıkların yanması sonucu oluşan küller çimento içinde kaldığı için bu proseste katı atık oluşmaz. Emisyon miktarını belirleyen faktörler atık gaz çıkışı sıcaklığı ve filtrede toplanan toz miktarıdır [8].

A. Murray'ın yapmış olduğu çalışmada kanalizasyon çamurunun çimento üretiminde kullanılması böylece meydana gelecek muhtemel ekonomik ve çevresel yararlarını incelemiştir. Kanalizasyon çamuru depolama sahalarında bertaraf edilerek, kompost şeklinde zirai amaçlı tarım alanlarında kullanılarak veya çeşitli yapı malzemelerinin (çimento, tuğla, hafif agrega) üretiminde kullanılarak değerlendirilmektedir. Bu atık çamurun çimento sanayinde sağladığı yararlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Düşük maliyet
- Enerji tasarrufu
- Çevre zararlarının en aza indirilmesi
- Emisyon değerlerinin düşmesi
- Doğal hayata ve küresel ekonomiye olumlu katkılar sağlaması

Çin'de Sichuan şehrinin Chengdu arıtma tesislerinde yapılan araştırma sonucu incelendiğinde günde 426.000 m³ atıksudan 45 ton kuru ağırlıkta çamur elde edildiği görülmüştür. Buradan yola çıkarak kanalizasyon çamurunun çimentoda kullanılması konusunda analitik bir yaklaşımla yıllık çevresel ve ekonomik maliyetler incelenmiştir.

Bunun sonucunda, çevresel ve ekonomik gelirleri etkileyen faktörler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Atık çamurun alt ısı değeri
- Kuru madde oranı
- Nakliyat
- Isı uygulayarak kurutma işlemi için yakıt kaynağı (kömür ya da doğal gaz)

Çalışmanın sonucunda, çimento fabrikalarının kanalizasyon çamurundan çevresel ve ekonomik faydalar sağlayabileceği belirtilmiştir. Fakat çevresel sürekliliğin iyileştirilmesi için proje dahilinde stratejik planlamaların yapılması gerektiği ve çevre iyileştirme projelerinin ekonomik olarak uygulanabilir olması için teşvik ve finansal mekanizmalara ihtiyaç olduğu ifade edilmektedir [9].

Ching-Ho Chen tarafından yapılan çalışmada, kanalizasyon çamuru külünün çimento esaslı hafif yapı malzemesi üretiminde kullanımı ve sinterleme davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Atık çamur külü, tuğla, kiremit, hafif agrega ve çimento katkısı olarak eskiden beri kullanılmaktadır. Çimento esaslı malzemelerin yüksek sıcaklık hassasiyeti ve atık çamur külünün puzolanik özelliğinden dolayı bu malzemenin katkı olarak kullanılmasıyla hassasiyetin giderilebileceği görülmüştür. Bu çalışmada da sıcaklığın makro/mikro özellikleri ve böylece külün yüksek sıcaklıkta davranışını incelemek için çimento esaslı kül katkılı hafif malzemeler çalışılmıştır. Farklı çimento/kül oranlarındaki karışıma değişik sıcaklıklarda sinterleme yapılarak ürün özellikleri ve sinterleme etkisi çeşitli analizlerle test edilmiştir. Elde edilen verilere göre en iyi sinterleme sıcaklığı ve çimento/kül oranı belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonuçlar 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda atık çamurdan elde edilen hafif yapı malzemesinin mikroyapısı ve mühendislik özelliklerinde susuzlaştırma ve hidrate olmuş dekompozisyon etkisi ortaya çıkarmaktadır. Buna karşın 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleme etkisi belirgin şekilde görülmekte olup daha yüksek sıcaklıklarda atık çamur külünün daha fazla kullanılması ile daha az kırık oluşumu olmuştur. Ayrıca 1093°C'de 4 saat boyunca

sinterlenen malzemenin basma dayanımı % 44 oranında iyileştirilmiş olup por hacmi ortalama olarak % 30 miktarda azalmıştır [10].

P. Garcés ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, çeşitli ticari çimentolar ile arıtma çamuru külünün uyumluluğu araştırılmıştır. Çimentonun bir kısmı yerine farklı oranlarda arıtma çamuru külünün kullanılmasının, harç davranışı, fiziksel özellikleri ve çalışılabilirliği üzerine etkisi incelenmiştir. Arıtma çamuru külünün, ortalama puzolanik bir etki göstermesinin yanı sıra basınç dayanımını arttırıcı etkisi bulunmuştur. Bu kül içinde bulunan sülfatın da çimento ile etkileşmediği, harcın çekme özelliklerinden tespit edilmiştir. Betonda çimentonun kısmi yer değişimi sayesinde çeşitli atıkların geri dönüşümüne imkan tanınması, karbondioksit emisyonunun azaltılması ve nihai ürünün çeşitli fiziksel özelliklerini iyileştirmesi sağlanmaktadır [11].

E.U. Çokgör ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, ülkemizde evsel ve endüstriyel nitelikli atıksuları arıtmakta olan aktif çamur tesislerinden kaynaklanan stabilize olmamış atık çamurlar, Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği Ek 11A'ya göre, özellikle toplam organik karbon (TOK) ve çözünmüş organik karbon (ÇOK) parametreleri açısından "Tehlikeli Atık" kategorisine girdiği ve uzaklaştırılmaları hem sorunlu hem de pahalı olduğu belirtilmektedir. Evsel ve endüstriyel arıtma tesislerinden çıkan fazla çamurların atık çamur keki şeklinde nihai bertarafa verilmeden önce arıtılması gerekmektedir. Arıtma tesislerinin tasarımı esnasında çamur sorunu önceden dikkate alınıp en uygun bertaraf metodu seçilmelidir. Yapılan çalışmalar sonucunda hem aerobik hem de anaerobik stabilizasyonun atık çamurların zararlı atık sınıfından çıkarılması için gerekli olan organik madde giderimini sağlamadığı görülmüştür. Tarımın ülkemiz ekonomisi için önemi göz önüne alındığında atık çamurların öncelikle kompost uygulamaları, ardından dolgu toprağı ve toprak iyileştirici olarak kullanımı düşünülebilir. Ancak özellikle kompost uygulamalarında atık çamurların içinde bulunabilecek çeşitli kimyasal maddelerin (ilaç, kişisel kullanım ürünleri, endokrin sistemini etkileyebilecek maddeler vs.) etkin kontrolü sağlanmalıdır. Bunun yanında, İstanbul'da bulunan evsel atıksu arıtma tesislerinden özellikle büyük ölçekli olanlarda

endüstriyel atıksuların da yüksek oranda katkısının bulunduğu ve bu yüzden atık çamur bertarafı için yakma ve piroliz alternatiflerinin de değerlendirilmesi önerilebilir [12].

Atıksu arıtma tesislerinde filtre keki olarak elde edilen çamur, kaçınılmaz bir yan üründür. Kentleşme arttıkça çamurun bertarafı da gittikçe büyüyen bir problem haline gelmiştir. Bu atığın yeniden değerlendirilmesi amacı ile İ.B. Çelik ve M. Öner'in yapmış olduğu çalışmada, filtre kekinin çimentoya doğrudan ve dolaylı olarak katılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın literatür kısmında, dünyada atıksuyun işlenmesi ve filtre keki atığının değerlendirilmesinde özellikle Japonya ve Singapur başı çektiği belirtilmektedir. Singapur gibi küçük bir ada ülkesinde 6 adet, sadece Tokyo'da ise 15 adet atıksu işleme tesisi bulunmaktadır. Elde edilen filtre keki miktarı ve yakma oranı olarak, yılda 4.560.000 ton kuru madde filtre keki ve % 55'lik yakma oranı ile Japonya önde gelmektedir. Japonya'da 62.000 ton filtre keki külü ve 28.000 ton endüstriyel atık kullanılarak yılda 110.000 ton çimento üretecek bir tesisin de Taiheiyo Cement ve Mitsui&Co kuruluşlarının ortaklıklarıyla 2001 yılında üretime başladığı bilinmektedir.

Filtre kekinin (FK) ve yakma sonucu oluşan filtre keki külünün (FKK) farklı kullanım şekilleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunlar; filtre keki külü için betonda, tuğla yapımında, cüruf eldesi, hafif agrega malzemesi ve bağlayıcı olarak kullanımdır. FKK betonda çimento yerine kısmi olarak kullanılmakta olup katılan FKK oranı arttıkça priz süresi uzamakta fakat belirtilen standartların dışına çıkmamaktadır. 28. gün basınç dayanımlarına bakıldığında %10'luk bir FKK katılımı, FKK katılmamış örneğin dayanımı ile aynı sonuçları vermektedir. FKK kullanarak yüksek basınç altında FKK preslenerek ve uygun sıcaklık olarak belirlenen 1020-1080⁰C'de yakılarak tuğla üretimi yapılabilmekte olup normal tuğla dayanım değerlerine eşdeğer tuğlalar üretilmektedir. Ayrıca 1050-1100⁰C'de yakma sonucunda veya kille karıştırıp yakma şeklinde agrega üretilmektedir. Filtre keki ise; kompost olarak ve kurutulduktan sonraki kullanım yakıt olarak kullanımı olanağı vardır. Yakıt olarak filtre kekinin kullanımında ana prensip FK'nin içindeki yanabilirlerden yararlanarak enerjinin kullanılmasıdır. Örneğin, 4000-4500 kcal/kg'lık bir kalorifik değere sahip olan kuru kek hemen hemen düşük kalorifik değerli bir kömürle aynıdır, bu nedenle yakıt olarak kullanılabilir [13].

J. Werther ile T. Ogada'nın yapmış oldukları çalışmanın literatür kısmında atık çamurun yakılması ile klinkerin kalitesinin kötüleşmeyeceği belirtilmiştir. Emisyon açısından asılı kalan ince kireçtaşı parçacıkları çamur yakmadan kaynaklanan asidik gaz kirliliklerini ortadan kaldırdığı, çamurdaki ağır metallerin ise elektrofiltreler sayesinde tutulduğu belirtilmiştir. Buna karşın çamurda % 0,2-0,5 dolaylarından fazla klor olması durumunda siklon ön ısıtıcısında tıkanmalar meydana gelmesi olasıdır [14].

J. Werther, D. Fytli ve ALF-CEMID şirketinin yapmış oldukları çalışmaların literatür kısımlarında, pratik olarak atık çamur besleme oranı çimento fabrikasındaki klinker üretim kapasitesinin maksimum oranı % 5'inden fazla olması gerektiği ifade edilmiştir. Bu nedenle 2000 ton/gün'lük çimento fırınında maksimum olarak 100 ton/gün kuru çamur kullanılabileceği belirlenmiştir [14,15,16].

A.Murray'nin yapmış olduğu çalışmada atık çamurun çimento üretiminde kullanımı yeni bir trend olup, % 2'den daha az miktarda ek yakıt olarak kullanılmakta olduğu belirtilmiştir. Ayrıca gelecek yıllarda atıksu işleme tesislerinin yaygınlaşacağından ötürü bu miktar artacağı belirtilmiştir [17].

A. Erdinçler'in yapmış olduğu çalışmada Türkiye'de 2009 yılında 16.548 ton endüstriyel arıtma çamuru 27.207 ton evsel arıtma çamuru olmak üzere toplam 43.755 ton arıtma çamuru çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanıldığı ifade edilmiştir [18].

A.Zabaniotou ve C. Theofilou'nun yaptığı çalışmada petrokok ile atık çamur karıştırılarak yakıt olarak kullanılmıştır. Karışımın 1400°C'de yakılması sonucunda insan sağlığı için zararlı dioksin salınımının olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca ağır metal konsantrasyonu açısından gaz miktarı sadece % 16 seviyesinde müsaade edilirken; dioksin/furan miktarı açısından sadece % 6 seviyesinde müsaade edilmektedir. Bir fırında % 7,5 oranında yaş çamur kullanıldığında, normalde 6.3 t/saat kuru petrokok (% 1 nemli) tüketilirken 8.0 €/saat kazanç sağlanmıştır. Bu metot ile Atina'daki en büyük bölge olan Psitalia'daki çamur problemi çözülmüş olur [19].

Salim Öncel ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada gıda, kaplama ve kimya olmak üzere 3 değişik endüstriden alınan çamurların fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu yapılmış ve çeşitli şartlandırma yöntemleriyle tekrar kullanılabilirliği üzerine bazı

araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çamurların kaynakları aşağıda özetlenmiştir. Çizelge 1.1’de çamur numunelerinin organik madde içeriğı, izelge 1.2’de arıtma çamurlarını oluşturan majör oksitler ve her 3 sektöre ait arıtma çamuru örneklerinde iz element analiz sonuçları ise izelge 1.3’de verilmiştir.

Sektör A: Biyolojik arıtma yapan organik içeriğı yüksek atıksulara sahip büyük bir gıda firması (yoğunlaştırma tankı ıkışı)

Sektör B: n kimyasal ve biyolojik arıtma yapan inorganik ve organik içeriğı sahip kimya firması (filtre pres sonrası)

Sektör C: Kimyasal arıtma yapan inorganik ve organik nitelikli atıksularını arıtan metal kaplama endüstrisi (yoğunlaştırma tankı çıkışı)

Çizelge 1.1 Sektörlere göre nem, organik madde, karbonat içeriğı dağılımı

SEKTÖR	NEM İÇERİĞİ, %	ORGANİK MADDE İÇERİĞİ, %
SEKTÖR A (YOĞUNLAŐTIRMA TANKI ÇIKIŞI)	47,84	19
SEKTÖR B (FİLTRE PRES SONRASI)	19,87	68
SEKTÖR C (YOĞUNLAŐTIRMA TANKI ÇIKIŞI)	44,45	51

Çizelge 1.2 Arıtma çamurlarını oluşturan major oksitler

MAJOR OKSİTLER(%)	SEKTÖR A	SEKTÖR B	SEKTÖR C
Al ₂ O ₃	5,200	1,428	0,813
Bi ₂ O ₃	-	0,020	0,010
CaO	55,659	56,969	37,696
Cl	3,129	0,807	0,349
Fe ₂ O ₃	18,639	17,173	17,916
K ₂ O	0,448	0,085	0,142

Çizelge 1.2 Arıtma çamurlarını oluşturan major oksitler (devamı)

MAJOR OKSİTLER(%)	SEKTÖR A	SEKTÖR B	SEKTÖR C
MgO	2,844	3,798	1,519
MnO ₂	0,129	0,190	0,141
Na ₂ O	0,140	0,490	2,648
P ₂ O ₅	1,996	3,758	28,845
SiO ₂	7,711	2,381	3,414
SO ₃	1,706	11,202	0,314
SrO	0,022	0,038	0,014
TiO ₂	0,207	0,089	0,025
V ₂ O ₅	0,069	0,029	-
ZrO ₂	0,016	0,016	0,016

Çizelge 1.3 Arıtma çamurlarını oluşturan iz elementler

ELEMENTLER (MG/KG)	SEKTÖR A	SEKTÖR B	SEKTÖR C
BAKIR (Cu)	20,101	5,765	1,239
NİKEL (Ni)	140,97	276,73	229,49
KROM (Cr)	6,062	370,5	7,151
ÇİNKO (Zn)	152,56	769,86	403,23
ARSENİK (As)	3,463	2,189	3,868
ANTİMON (Sb)	0,293	0,877	0,249
CİVA (Hg)	3,608	0,473	0,513
GÜMÜŞ (Ag)	6,711	9,653	6,007
KURŞUN (Pb)	38,869	38,025	78,294
KADMİYUM (Cd)	0,418	1,512	1,057
KALAY (Sn)	25,537	339,3	70,0
MOLİBDEN (Mo)	9,842	14,583	12,448
SELENYUM (Se)	0,946	5,651	0,856
BARYUM (Ba)	66,573	83,157	74,66

Çizelge 1.3'den de görüleceği gibi, ön kimyasal ve biyolojik arıtma yapan inorganik ve organik içeriğe sahip kimya firmasına (Sektör B) ait arıtma çamuru örneğinde genel anlamda tüm iz elementler diğer sektörlere nazaran daha yüksek konsantrasyonlar göstermekle birlikte, özellikle Ni, Cr, Sn, kısmen Mo ve Ba değerleri bariz seviyelere ulaşabilmektedir. Arıtma çamurunun bertarafı ve yeniden kullanımı konusunda dikkatli bir şekilde göz önünde bulundurulmalıdır. Sektör C ye ait örnekteki kısmen yüksek Ni, Zn, Pb konsantrasyonları, metal kaplama yapan tesisteki ürün girdisiyle alakalıdır. Sektör A'ya ait iz element konsantrasyonlarındaki anomaliler kimyasal katkı malzemeleri ile ilgili olduğu sonucunu akla getirmektedir.

Bu çalışmada fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu yapılan 3 farklı sektöre ait arıtma çamuru örneğinin, Sektör A: biyolojik arıtma yapan organik içeriği yüksek atıksulara sahip büyük bir gıda firması arıtma çamurunun uygun kimyasal bileşimi nedeniyle park ve bahçe düzenlenmesinde, Sektör B: ön kimyasal ve biyolojik arıtma yapan inorganik ve organik içeriğe sahip kimya firması arıtma çamurlarının uygun organik madde içeriği yüksek kalorifik nedeniyle yakarak enerji üretimde kullanılabileceği, Sektör C: kimyasal arıtma yapan inorganik ve organik nitelikli atıksularını arıtan metal kaplama endüstrisi arıtma çamurlarının yüksek fosfat içeriği nedeniyle özellikle fosfatlı toprakları seven tarım ürünlerinin üretildiği bölgelerde gübre katkısı olabileceği öncelikli olarak akla gelmektedir. Söz konusu bu üç tesiste halen arıtma çamurlarını yüksek maliyetlerle yakma tesisine vererek bertaraf etme şeklini uygulamaktadır.

Sonuç olarak, her yıl milyon tonlar seviyesinde ortaya çıkan arıtma çamurları yüksek maliyetlerle inşa edilen düzenli deponi alanlarına gömülerek bu tesislerin daha çabuk dolmasına, faydalı ömürlerinin kışalmasına, yine yakma tesislerinde yakılarak büyük bir ekonomik kayba sebep olunmaktadır. Yapılması gereken en önemli hareket her ne sektörden kaynaklarsa kaynaklansın arıtma çamurlarının fiziksel ve kimyasal karakterizasyonlarının yapılıp, uygun yeniden kullanım, geri kazanım olanakları konusunda ciddi araştırmalarda bulunulmasıdır [20].

P. Stasta ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada kuru çamurun ek yakıt olarak kullanılabileceği veya hammaddenin bir kısmının yerini (1 ton kuru çamur

hammadenin 1/3'ü kadarı) alabileceği belirtilmiştir. Aynı çalışmada kükürt, klor, alkali gibi kirlilikler ve ağır metaller klinkerin kalitesini etkilediği ve maksimum atık çamur besleme oranı çimento tesisinin klinker üretim kapasitesinin % 5'ini aşmaması gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca çimento üretiminde kullanılan hammaddeler ve çamur içindeki ağır metal içerikleri hakkında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Çamurdaki civa ve kadmium içeriği hem hammaddeye hem de çimento fırınındaki yakıta göre daha yüksektir.
- Nikel, krom ve arsenik içeriği benzer olup; ağır metal dengesine etki etmez.
- Çamur içindeki çinko, bakır ve kurşun içeriği daha yüksek olup; bu metaller klinker ile iyi şekilde bağlanmıştır [21].

Ö. Çelik ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada katkılı çimento üretiminde yeni endüstriyel atıkların değerlendirilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada silis dumanı ve Ovacık altın madeni tesisinden alınan atık çamur kullanılmıştır. Ovacık altın madeninde ölçülen ve gösterilen kategorilerdeki cevher rezervi yaklaşık 2.4 milyon ton ve 10 g altın/ton 'dur. Tesiste, kayaç öğütüldükten sonra sulu hale getirilmekte, içindeki altın ayrıldıktan sonra çıkan atık çamur havuzlarda toplandıktan sonra tesis dışına verilmektedir Atık çamur ve silis dumanının SEM görüntüleri ve tane boyu dağılımları çalışmada sunulmuştur. Kullanılan atık çamur PÇ 42.5 klinkerine % 5, 15 ve 25 oranlarında; silis dumanı ise % 15, 25 ve 35 oranlarında katılmıştır. Ayrıca silis dumanı ve atık çamur değişik oranlarda harmanlanarak PÇ 42.5 klinkerine katılmıştır. Üretilen çimento harçlarının 2, 7, 28 ve 56. günlerdeki basınç dayanımları ölçülmüştür ve PÇ 42.5 çimento harçlarının ölçülen basınç dayanım değerleri ile kıyaslanmıştır. Bütün bu sonuçlar göz önüne alındığında kullanılan atık çamur, portland çimentosunda katkı malzemesi olarak kullanılabilir bir davranış gösterdiği belirlenmiştir [22].

Kamil Varınca ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada akümülatör fabrikası endüstriyel atıksu çamurunun değişik oranlarda PÇ 32,5'luk portland çimentosu ile karıştırılıp zararsız hale getirilmesinde en uygun atık oranının bulunması amaçlanmıştır. Atık içermeyen kontrol numunesine karşılık % 1,7 , % 3,3 , % 5 , % 10 , % 25 , % 50 ve %

75'lik atık oranına sahip karışımlar ile çalışılmıştır. En uygun oranın tespitinde; katı blokların depolanması halinde en çok maruz kalacakları kuvvet olan basınç altında dayanaklıklarının ölçüldüğü mukavemet deneylerinin, ayrıca aşınma, ısınma-soğuma, donma ve yağmur gibi doğal şartlar altında katı bloğun aşınarak yer altı suyuna sızma ve suda çözünme ihtimalinin varlığından dolayı sızma deneylerinin yapılması gereklidir. Bu amaçla yapılan Mukavemet deneyleri TS EN 12390-1 “Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini” standardına göre, sızma deneyleri ise USEPA Method 1311 ‘Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)’ deneyine göre yapılmıştır. Sonuçta % 10-25 atık oranlarının hem mukavemet hem de sızma özellikleri yönünden bu atık için uygun katılaştırma oranları olduğu bulunmuştur. Bu çalışma ile akümülatör imalat fabrikası endüstriyel atıksu arıtma tesisi arıtma çamurlarının çimento ile katılaştırılmasının uygun bir bertaraf metodu olacağı, böylelikle atığın çevreye uyumlu bir şekilde bertarafı ile ekonomik bir kazanç elde edilmiş olacağı belirtilmiştir [23].

O. Aydınç’ın atık çamur yakma ile ilgili olarak yapmış olduğu sunumdan alınan bilgilere göre; Nuh Çimento fabrikasında atık çamur yakılmakta olup; atık çamur granül malzeme depolandığı silodan silobus tipi kapalı ve tüm yangın önlemleri alınmış kamyon ile besleme silosuna taşınarak ürün besleme silosuna pnömatik olarak basılmaktadır. Besleme silosundan alternatif yakıt brülörleri ile fırına pnömatik olarak beslenir ve yakılarak enerji elde edilmektedir. Yaklaşık olarak kullanılan granül malzeme ile kullanıldığı anda üretim hattından %3 ana yakıt indirgemesine gidilmektedir. Böylece birincil yakıt kullanımı ile atmosfere verilecek olan emisyonlar engellenmektedir. Kullanılan kuru çamurun ısı değeri kadar ana yakıttan azaltmaya gidilmektedir ve kaynak kullanımından azaltıma gidilmiş olmaktadır. Ayrıca alternatif yakıt kullanılarak CO₂ emisyonlarda da azaltıma gidilmiş ve hava kalitesi açısından faydalı bir gelişim gerçekleştirilmiştir. Atık çamurun en önemli özelliği metan gazı çıkışın bol olduğu depolama yerine metan gazı çıkışının olmadığı ve hacimce en uygun duruma getirilen kurutma işlemine tabi tutulması sonrasında da alternatif yakıt olarak kullanılmasıdır. Birinci yıkayıcıdan çıkan amonyak içerikli sıvı atık fırınlarda 900 derecelik bölgeye püskürtme sistemiyle beslenerek emisyon değerlerinde NO_x

indirgemesi amaçlı kullanılır. Tesisin kurulmamış olması durumunda, arıtma çamurları depolama alanlarına giderek metan gazı çıkışına sebep olacaktır. Kurutulan çamurların depolama alanına gitmesi durumunda çıkan metan gazının değeri; 30.000 ton CO₂ olacaktır. Üretim hattının soğutma bacasından sıcak gaz kullanılarak ısı enerjisi elde edilmektedir. Baca gazı kullanımı yerine en az sera gazı salınımı veren doğal gaz kullanılarak enerji elde edilseydi bu değer 10.000 ton CO₂ olacaktır. Tesisin çıkış ürünü granül kuru çamur olup; bu kurutulmuş çamur alternatif yakıt olarak kullanılarak ana fosil yakıttan azaltıma gidilmektedir. Kuru çamur kullanılmadan sadece fosil yakıt kullanılması durumunda ortaya çıkacak olan ekstra sera gazı miktarı; 30.000 ton CO₂ dur. Çamur kurutma kapasitesi 75.000 ton / yıl olması durumunda çıkan toplam CO₂ 70.000 ton / yıl olacak olup kurutulan çamurun % 93 ü oranında sera gazı emisyonu azaltımı sağlanmaktadır [24].

Hollanda'nın Limburg eyaletinde kanalizasyon idaresi 'Zuiveringschap Limburg' ile ENCI Cement Industry işbirliğinde mekanik olarak kurutulan 35.000 ton evsel arıtma çamurunun kalorifik değeri 2390 – 3580 kcal/kg bulunmuş ve çimento endüstrisi için uygun bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Çamur % 92.7 kuru toz, % 37 kül % 52 uçucu kısım, % 7.3 nem, 700 ppm klor ve % 0.75 sülfür içermektedir. Klinker fırınlarında kullanılabilmesi için boyutları % 15 – 25 oranında 90 µm'ye indirilmiştir. Tesiste yakıt olarak kullanılan çamurun yanma sonucu oluşan külü çimento katkı maddesi olarak kullanılmış ve sonuçlar portland çimento klinkerleri ile karşılaştırılmalı olarak Çizelge 1.4'de verilmiştir [25].

Çizelge 1.4 Portland çimento üretiminde kullanılan klinker ve ençı tesislerinde oluşan çamur kül içeriği

BİLEŞİK	I-42.5*	I-42.5/MR-SR*	IIB-42.5*	II-F/32.5 AL*	ENCI, %
CaO	64.59	62.88	67.59	65.60	8.2
SiO ₂	20.90	19.65	21.91	20.80	41
Al ₂ O ₃	4.90	4.01	5.36	4.60	14
Fe ₂ O ₃	3.99	6.83	0.29	4.80	9.5
K ₂ O	0.94	-	0.09	1.0	2.65
MgO	1.22	3.39	0.88	1.20	2
TiO ₂	-	-	-	-	0.7
Mn ₂ O ₃	-	-	-	-	0.15
SO ₃	3.27	2.26	3.04	1.70	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	13

*(II-F/32.5AL) Ticari markalı İspanyol orta kalite portland çimento, (IIB-42.5) Beyaz portland çimento, (I-42.5) ASTM tip portland çimento, (I-42.5/MR-SR) Sülfat dayanıklı portland çimento, C₃A içermeyen.

1.2 Tezin Amacı

Teknolojik gelişmeler ve sanayileşme ile paralel olarak yaşanan hızlı kentleşme ve nüfus artışı, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de insan faaliyetlerinin çevre üzerindeki baskısını hızla arttırmaktadır. Gelişen çevre bilinciyle, çevrenin korunması bütün dünyada ülkelerin temel politika öncelikleri arasında giderek ön sıralara yerleşmekte ve atık yönetimi de çevre koruma politikaları arasında ağırlıklı bir yer tutmaktadır. Doğal kaynakların hızla tüketilmesinin önüne geçilmesi ve üretilen atıkların çevre ve insan sağlığı için bir tehdit olmaktan çıkarılarak ekonomi için bir girdiye dönüştürülmesini amaçlayan atık yönetim stratejileri, tüm dünyada giderek öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenen “sürdürülebilir kalkınma” yaklaşımının temelini oluşturmaktadır.

Avrupa Birliği’ne uyum açısından ülkemizin en sorunlu alanlarının başında çevre gelmektedir. AB müktesebatının en kapsamlı alanlarından birisini oluşturan çevre, üyelik sürecinde Türkiye’yi en çok zorlayacak alanlardan biridir. Üyelik sürecinde yasal zorunlulukların ortaya çıkmasıyla birlikte atıksu arıtımında yaşanacak gelişmeler, arıtma çamuru miktarını önemli ölçüde artıracaktır. Atıksu arıtma teknolojilerinin seçiminde

çamur bertarafı önemli bir alt başlık oluşturmaktadır. Arıtmada oluşan ve uzaklaştırılması gereken çamurların; ham atıksu içerisindeki organik maddelerden farklı bir yapıda, bozunma ve kokuşma eğiliminde olması, çamurun sadece küçük bir kısmının katı madde, büyük bir kısmının ise sudan oluşması, bu yüzden büyük hacimler işgal etmesi ve patojen mikroorganizma içermesinden dolayı mutlaka bertaraf edilmeleri gerekmektedir. Ülkemizde tercih edilen en yaygın nihai bertaraf şekli düzenli depolamadır. Ancak getirilen yasal sınırlamalar ve alan yetersizliğinden dolayı önemli bir ısı kaynağı olan arıtma çamurları özel dizayn edilmiş tesislerde enerji üretimi amacıyla ve çimento fırınlarında ek yakıt olarak kullanılabilir.

Arıtma çamurlarının miktarları artmaya devam etmekle beraber, bu çamurların yönetimi de gün geçtikçe zorlaşmaktadır. Getirilen yasal sınırlamalar ve alan yetersizliğinden dolayı arıtma çamurlarının bertarafında yeni yöntem ve teknolojilerin uygulanması zorunlu hale gelmiştir. Arıtma tesislerinin artmasıyla birlikte yakın bir gelecekte oluşan çamur miktarının çok yüksek seviyelere ulaşacağı tahmin edilmektedir. Önemli miktardaki bu atıkların uzaklaştırılması ve bertarafı ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurlarının bertarafında, arazide zirai maksatlı kullanma, çöp sahalarına gömme, yakma ya da kompostlaştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tezin amacı İstanbul genelindeki arıtma tesislerinden oluşan atıksu arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

1.3 Hipotez

Çimento fabrikalarında atıkların yakıt amaçlı kullanımı hem atık üreticisi hem de çimento üreticisi için avantajdır. Her iki taraf için de avantaj olduğuna göre, çimento fabrikalarında atık yakılması için atık akışının iyi şekilde sağlanması gerekmektedir [69].

Avrupa çimento endüstrisinde önemli miktarda atıktan türetilen yakıtın geri kazanımı sağlanmaktadır ve bazı fabrikalarda %80'i aşan bir oranda fosil yakıt ikamesi yapılmaktadır. Bu durum, çimento endüstrisinin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve daha az doğal kaynak kullanılmasına katkı sağlamaktadır.

Türkiye çimento sektöründe ikincil yakıtların kullanımı henüz deneme sürecindedir ve kullanım miktarı dikkate alınacak seviyeye ulaşmamıştır. Avrupa Çimento Sektörünün alternatif yakıt kullanım oranı %20 civarındadır. Bu rakam ülkemizde % 1 den küçüktür.

Çimento fabrikalarında çok çeşitli türdeki farklı atıklar hammadde ve/veya yakıt olarak kullanabilmektedirler. Atık maddelerin kullanımı düşünülmeden önce, atık maddelerin uygun bir biçimde seçilmesi, atık maddelerin kapsamlı analiz prosedürü ve ön arıtımı gibi farklı temel ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır. Yakıt küllerinin tümüyle klinkerin içinde tutulması nedeniyle, klinkerin kalite standartlarını korumak için bu atıklar işlenmesi gereklidir. Bu sebeple belirli bir fabrikada hangi tür atığın kullanılabileceğine ilişkin karar için tek bir yanıt verilemez.

Ayrıca, yeterli miktarda atık yakıt mevcut olmalıdır. Değerlendirmeler ve kararlar; klinker üretim süreci ve proses koşullarına, hammadde ve yakıt bileşimlerine, besleme noktalarına, kullanılan baca gazı arıtım tekniğine, karşılaşılan atık yönetimi sorunlarına ve mevcut yönetmeliklerin gereksinimlerine dayandırılmalıdır [26].

Ülkemizde arıtma çamurlarının miktarları artmaya devam etmekle beraber, bu çamurların yönetimi de gün geçtikçe zorlaşmaktadır. 2008 yılına ait sanayilerden ve belediyelerden alınan verilere istinaden yapılan çalışmalar sonucunda; evsel/kentsel atıksu arıtma tesislerinden 500.000 ton/yıl arıtma çamuru, sanayi tesislerinden ise 575.000 ton/yıl olmak üzere toplam 1.075.000 ton/yıl (kuru katı madde) arıtma çamurunun oluştuğu değerlendirilmektedir.

Çimento fırınında ek yakıt olarak kullanılan atık türleri, tekstil, plastik, odun, kağıt-karton, işlenmiş fraksiyonlar (ATY), lastik, yağlar ve atık yağlar, katı atıklar (emprenye edilmiş talaş), solvent ve endüstriyel ve kentsel arıtma çamurlarıdır.

Bu tezde atıksu arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında klinker ve çimento standartlarını koruyarak %5 ila %10 oranlarında ek yakıt olarak kullanılabileceği ve ek yakıt kullanımı ile hem atık sektörü açısından hemde çimento sektörü açısından çevresel etkilere olumlu katkı sağlaması, emisyon azaltımına sebep olması, maddi kazanç sağlaması gibi faydalarının olacağı hipotez olarak sunulmaktadır.

BÖLÜM 2

PROJENİN ARKA PLANI

2.1 Arıtma Çamuru

2.1.1 Atıksu Arıtma Tesislerinden Kaynaklanan Arıtma Çamurları

Tüm belediyelere uygulanan 2008 yılı Belediye Atıksu İstatistikleri Anketi sonuçlarına göre, Türkiye'deki 3225 belediyeden 2421'ine kanalizasyon şebekesi ile hizmet verildiği tespit edilmiştir.

2008 yılında kanalizasyon şebekeleri ile toplanan 3,26 milyar m³ atıksuyun %44,7'si denize, %43,1'i akarsuya, %3,5'i baraja, %2,1'i göle-gölete %1,5'i araziye ve %5,1'i diğer alıcı ortamlara deşarj edilmiştir.

Kanalizasyon şebekesinden deşarj edilen 3,26 milyar m³ atıksuyun 2,25 milyar m³'ü atıksu arıtma tesislerinde arıtılmıştır. Arıtılan atıksuyun % 38,3'üne biyolojik, %32,7'sine fiziksel, %28,8'ine gelişmiş ve %0,3'üne doğal arıtma uygulanmıştır. Deşarj edilen atıksuların %69'u arıtılmaktadır. 2008 yılında kanalizasyon şebekesi ile hizmet verilen belediye nüfusunun Türkiye nüfusu içindeki payı %73, toplam belediye nüfusu içindeki payı ise %88 olarak tespit edilmiştir.

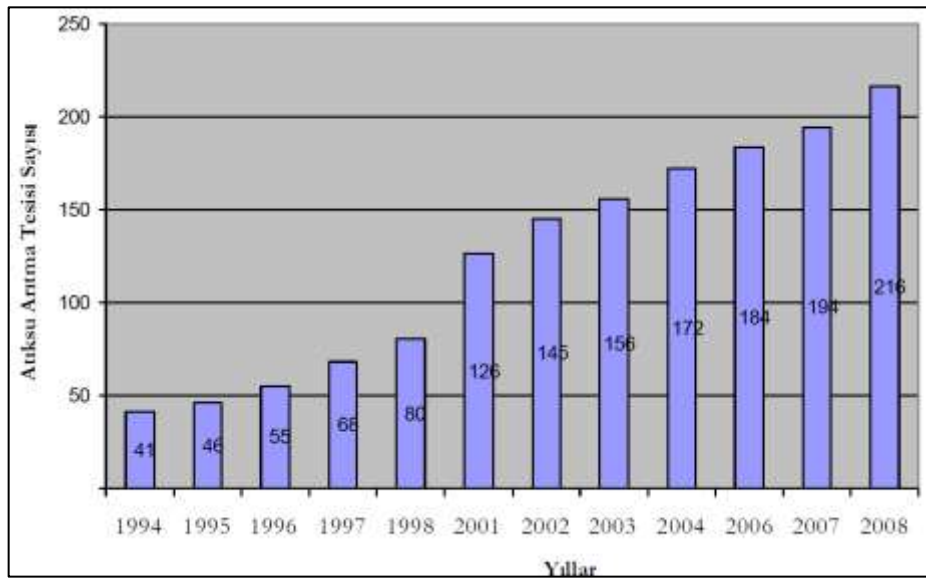
2008 yılı verilerine göre atıksu arıtma tesisleri ile hizmet verilen belediye nüfusunun oranı ise Türkiye nüfusu içinde % 46, toplam belediye nüfusu içinde % 61 olarak hesaplanmıştır. 2009 yılında bu oran yaklaşık % 65, 2010 yılı ilk yarısında ise %67'dir.

2008 yılı verilerine göre belediyelerden kanalizasyon şebekesi ile alıcı ortamlara deşarj edilen kişi başı günlük atıksu miktarının 173 litre olduğu tespit edilmiştir[27].

Atıksuyun arıtımında fiziksel arıtma yöntemi uygulama alanı bulmuş olmasına rağmen, atıksuyun büyük bir bölümü biyolojik arıtma yöntemi ile arıtılmıştır. Diğer taraftan; 2001 yılında, atıksulara fiziksel ve biyolojik olarak arıtma yöntemi uygulayan atıksu arıtma tesisi sayısı toplam 123 olarak belirlenmiş olup, bu değ er 2004 yılında, 172'ye, 2006 yılında 184'e ulaşmıştır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verilerine göre 2007 yılı sonu itibariyle toplam atıksu arıtma tesisi sayısı 194'e ulaşmıştır.

Ayrıca, 2006 yılı verilerine göre; atıksu arıtma tesislerinin 26'sı fiziksel, 135'i biyolojik, 23'ü ileri arıtım yöntemleri ile arıtım yapmaktadır [28].

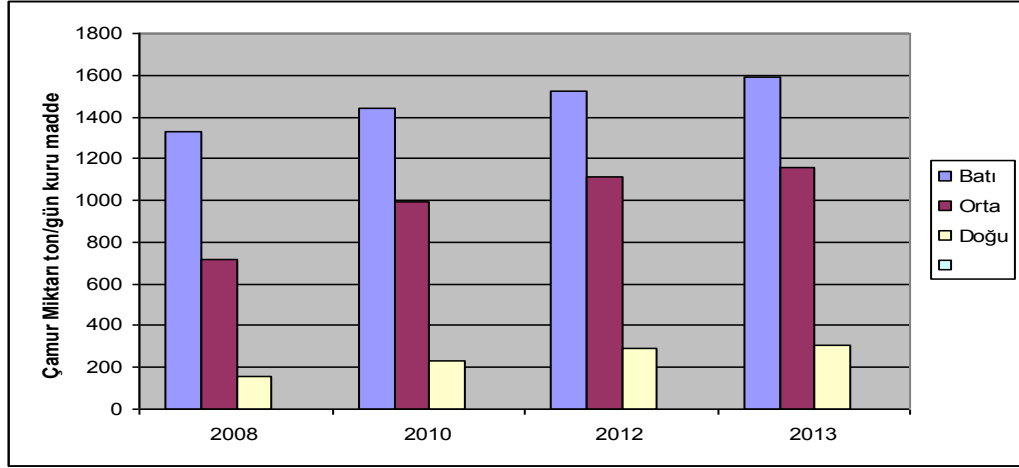
2008 yılına ait sanayilerden ve belediyelerden alınan verilere istinaden yapılan çalışmalar sonucunda; evsel/kentsel atıksu arıtma tesislerinden 500.000 ton/yıl arıtma çamuru, sanayi tesislerinden ise 575.000 ton/yıl olmak üzere toplam 1.075.000 ton/yıl (kuru katı madde) arıtma çamurunun oluştuğu değerlendirilmektedir.



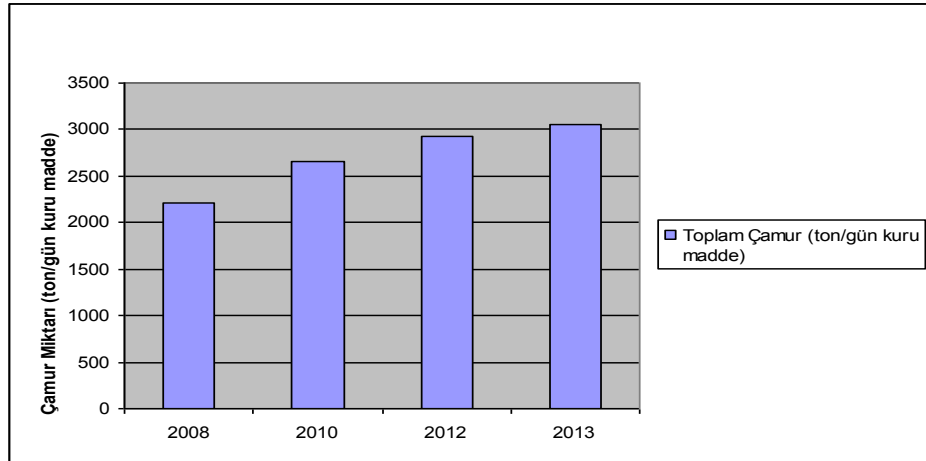
Şekil 2.1 Atıksu arıtma tesisi sayısı

Mevcut ve gelecekte oluşması muhtemel arıtma çamuru miktarı hakkında kesin veri olmamakla birlikte Atıksu Arıtımı Eylem Planı'nda (2008–2012) verilen havza bilgileri

esas alınarak hesaplamalar mevcuttur. Havzalar doğu, batı ve orta olarak üç bölgeye ayrılmıştır. Batı bölgesinde oluşan çamur miktarı hesaplanırken kişi başı oluşacak çamur miktarı 90 gr/kişi.gün, orta bölgede 80 gr/kişi.gün, doğu bölgesinde ise 60 gr/kişi.gün ortalama % 25 kuru madde içeriği kabulüne göre mevcut ve geleceğe dönük arıtma çamuru miktarları hesaplanmıştır [27].



Şekil 2.2 Bölgelerde oluşan arıtma çamuru miktarı (ton/gün kuru madde)



Şekil 2.3 Türkiye’de oluşan toplam çamur miktarı (ton/gün kuru madde)

Günlük su tüketiminin 2,5 milyon m³’ü geçen İstanbul’da, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) sorumluluğunda 10’u ön arıtma, 4’ü ileri biyolojik olan mevcut 33 adet atıksu arıtma tesisi bulunmaktadır. 1990’lı yılların başında sadece 2 adet atıksu arıtma

tesisi ile İstanbul'un %10'nun atıksuları arıtılırken 2008 yılında Tuzla ve Paşaköy Atıksu Arıtma Tesislerinin kapasite artışı ve Ataköy Atıksu Arıtma Tesisinin hizmete alınması ile bu oran 2010 yılında % 75'lerden % 90'lara çıkmıştır. Planlanan ve inşaatı süren tesislerin bitmesiyle gelecekte bu sayı daha da artacaktır [29].

Arıtılan atıksuyun % 60'nı ön arıtmadan, % 39'u ileri biyolojik arıtmadan ve % 1'ise biyolojik arıtmadan geçmektedir. Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2 İstanbul'da mevcut biyolojik atıksu arıtma kapasiteleri ve oluşan kuru çamur miktarları, Çizelge 2.3 İstanbul'da planlanan/inşaatı süren biyolojik atıksu tesisleri ve oluşacak çamur miktarları verilmiştir [30].

NO	ARITMA TESİSLERİ	FAAL. YILI	TESİSİN KAPASİTESİ M ³ /GÜN	ARITILAN ATIKSU (M ³ /GÜN)	ARITMA SİSTEMİ	ÇAMUR ÜRETİMİ TON/GÜN	ÇAMUR İŞLEME TÜRÜ	%KM
1	ATAKÖY İLERİ BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2010	390.000	315.000	İleri biyolojik arıtma (Azot ve Fosfor)	90-120	Kurutma	98
2	TUZLA ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	1998	150.000	317.464	I.Klasik Aktif Çamur(C)., II. kademe de C,N,P giderimi var	60-80	Santrifüj, Kurutma	90-98
		2009	100.000					
3	PAŞAKÖY ATIKSU İLERİ BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2000	100.000	113.689	Klasik Aktif Çamur(C,N,P)	35-50	Santrifüj, Kurutma	90-98
		2009	100.000					
4	BAHÇEŞEHİR ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2004	7.400	6.863	Klasik Aktif Çamur(C)	21	Belt pres + santrifuj	20
5	ÇANTA ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2006	1.600	3.567	Sürekli, Biyolojik arıtma	18	Belt Press	18
6	GÜMÜŞYAKA ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2007	1.700	2.107	Kesikli, Biyolojik Arıtma	2,6	Filtre pres	22
7	TERKOS ATIKSU İLERİ BİYOLOJİK ARITMA TES.	2000	1.730	1.582	Kesikli Biyolojik Arıtma	1,6	Dekantör	20
8	ÖMERLİ ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2008	500	447	Biyolojik arıtma	-	Fazla Aktif Çamurun P. Köye nakli	1-1,5
9	AĞVA (ŞİLE) ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2010	1.600	1.117	Biyolojik arıtma	-	Fazla Aktif Çamurun P. Köye nakli	1-1,5

Çizelge 2.1 İSKİ atıksu arıtma tesisleri ve çamur miktarları(2010)

NO	ARITMA TESİSLERİ	FAAL. YILI	TESİSİN KAPASİTESİ M ³ /GÜN	ARITILAN ATIKSU (M ³ /GÜN)	ARITMA SİSTEMİ	ÇAMUR ÜRETİMİ TON/GÜN	ÇAMUR İŞLEME TÜRÜ	%KM
10	YENİKAPI ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ	1988	864.000	750.185	Ön Arıtma	-	-	-
11	KADIKÖY ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ	2003	833.000	556.782	Ön Arıtma	-	-	-
12	KÜÇÜKSU ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ	2004	640.000	31.990	Ön Arıtma	-	-	-
13	BALTALİMANI ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ	1997	625.000	315.940	Ön Arıtma	-	-	-
14	PAŞABAHÇE ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ	2009	575.000	24.147	Ön Arıtma	-	-	-
15	KÜÇÜKÇEKMECE ATIKSU ARITMA TESİSİ	2003	354.000	153.821	Ön Arıtma	-	-	-
16	BÜYÜKÇEKMECE ATIKSU ARITMA TESİSİ	1998	155.120	80.117	Ön Arıtma	-	-	-
17	ÜSKÜDAR ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ	1992	77.760	32.546	Ön Arıtma	-	-	-
18	KUMBABA (ŞİLE) ATIKSU ÖN ARITMA TESİSİ	2008	46.000	14.680	Ön Arıtma	-	-	-
19	İZZETTİNKÖY BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	500	1.077	Ön Arıtma	-	-	-

Çizelge 2.1 İSKİ atıksu arıtma tesisleri ve çamur miktarları(2010)

NO	KÖYLERDEKİ ARITMA TESİSLERİ	FAAL. YILI	TESİSİN KAPASİTESİ M ³ /GÜN	ARITILAN ATIKSU (M ³ /GÜN)	ARITMA SİSTEMİ	ÇAMUR ÜRETİMİ TON/GÜN	ÇAMUR İŞLEME TÜRÜ	%KM
1	ÇATALCA KESTANELİK KÖYÜ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	500	474	Biyolojik arıtma	-	-	-
2	ÇATALCA ÇANAKÇA KÖYÜ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	500	281	Biyolojik arıtma	-	-	-
3	OKLALI KÖYÜ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	500	-	Biyolojik arıtma	-	-	-
4	ÇATALCA ÖRENCİK KÖYÜ A.BİY.ART.TES.	2008	250	123	Biyolojik arıtma	Çamur işlenmiyor.	-	-
5	ÇATALCA ÖRCÜNLÜ KÖYÜ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	250	159	Biyolojik arıtma	-	-	-
6	YAZLIK KÖYÜ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	250	-	Biyolojik arıtma	-	-	-
7	BAŞAKKÖY BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	250	276	Biyolojik arıtma	-	-	-
8	ÇATALCA AKALAN KÖYÜ A.BİY.ART.TES.	2008	200	145	Biyolojik arıtma	Çamur işlenmiyor.	-	-
9	SAHİLKÖY (ŞİLE) ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2008	200	95	Biyolojik arıtma	-	-	1-1,5

Çizelge 2.2 İSKİ köylerdeki atıksu arıtma tesisleri ve çamur miktarları(2010)

NO	KÖYLERDEKİ ARITMA TESİSLERİ	FAAL. YILI	TESİSİN KAPASİTESİ M ³ /GÜN	ARITILAN ATIKSU (M ³ /GÜN)	ARITMA SİSTEMİ	ÇAMUR ÜRETİMİ TON/GÜN	ÇAMUR İŞLEME TÜRÜ	%KM
10	YENİKÖY (ŞİLE) ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2008	200	109	Biyolojik arıtma	-	Fazla Aktif Çamurun P. Köye nakli	1-1,5
11	ÖĞÜMCE (BEYKOZ) ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2010	200	52	Biyolojik arıtma	-	Fazla Aktif Çamurun P. Köye nakli	1-1,5
12	KÖMÜRLÜK (ŞİLE) ATIKSU BİYOLOJİK ARITMA TESİSİ	2008	125	134	Biyolojik arıtma	-	Fazla Aktif Çamurun P. Köye nakli	1-1,5
13	ORUÇOĞLU KÖYÜ BİTKİSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ	2010	125	41	Biyolojik arıtma	-	Fazla Aktif Çamurun P. Köye nakli	1-1,5
14	ÇATALCA BELGRAD KÖYÜ TES.	2008	50	32	Biyolojik arıtma	-	-	-

Çizelge 2.3 İstanbul’da planlanan/inşası süren biyolojik atıksu tesisleri ve oluşacak çamur miktarları

TESİS ADI	KAPASİTE (M ³ /GÜN)	OLUŞAN ÇAMUR MİKTARI (ORT.) (KG/GÜN)
AMBARLI İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ (İNŞA)	400.000	175.000
TUZLA İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	250.000	115.000
BÜYÜKÇEKMECE İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	390.000	160.000
KÜÇÜKÇEKMECE İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	400.000	170.000
KİLYOS İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	146.000	50.000
SİLİVRİ İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	60.000	20.000
SELİMPAŞA İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	400.000	170.000
ÇANTA İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	156.000	51.000
RİVA İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ	35.000	12.000
KÖY İLERİ BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSLERİ (173 ADET)		

2.1.2 Arıtma Çamur Yönetimi

Entegre Katı Atık Yönetimi (EKAY), belirli atık yönetim gaye ve hedeflerine ulaşmak için uygun teknik, teknoloji ve yönetim programlarının seçimi ve uygulanması olarak tarif edilmektedir. EKAY’nin öncelik sırası en genel haliyle, atık azaltma, geri dönüşüm, atık dönüştürme, düzenli depolama olarak verilebilir. Atık azaltmaya, genelde bütün atık yönetim sistemlerinde birinci öncelik verilmektedir. Gerçekte atık azaltma, atık yönetim sisteminin bir parçası olmaktan ziyade ön şartı konumundadır. Geri dönüşüm, entegre katı atık yönetim sisteminde ikinci öncelikli konudur. Geri dönüşüm başlıca, atık maddelerinin ayrılma ve toplanması, ayrılan maddelerin yeniden kullanım ve işlenmek üzere hazırlanması ile yeniden kullanım ve işleme faaliyetlerini kapsar. Geri dönüşüm, doğal hammadde kaynaklarına olan talebin ve düzenli depolamaya giden atık miktarının azaltılması bakımlarından büyük önem taşımaktadır. Atık dönüştürme, katı atık yönetim sisteminde üçüncü öncelikle yer alır. Bu kapsamda, atıklara fiziksel, kimyasal ve biyolojik dönüştürme prosesleri uygulanır. Böylece örneğin evsel katı

atıklar için, katı atık işleme tesislerinin verimlerinin yükseltilmesi, yeniden kullanılabilir maddelerin geri kazanılması ile kompost, biyogaz, yanma ürünü enerji ve ısı gibi dönüşüm ürünlerinin geri kazanılması sağlanabilir [31].

Aritma çamurları az miktarda katı madde ihtiva eden daha ziyade sıvı fazda maddedir. Atıksu arıtma tesislerinde susuzlaştırma işlemi ile konsantre hale getirilen katı maddelerin oluşturduğu çamura “arıtma çamurları” denmektedir. Arıtmanın tipine ve amacına göre arıtma çamurlarının özellikleri değişmektedir.

Önemli miktardaki bu atıkların uzaklaştırılması ve bertarafı ciddi bir sorun olmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinden açığa çıkan çamurlar, arazide zirai maksatlı kullanma, düzenli depolama, yakma ya da kompostlaştırma yöntemleri ile bertaraf edilebilir.

Avrupa Birliği ülkeleri genel olarak arıtma çamurlarını deponi (çöplük) sahalarına göndermektedirler. Ancak İsviçre gibi zengin ve toprak alanı bakımından küçük olan ülkeler yakma tesislerinde nihai bertarafını gerçekleştirmektedir. Ancak yakma prosesleri diğer nihai bertaraf yöntemleriyle kıyaslandığında hem kuruluş hem de işletme maliyetleri bakımından oldukça pahalı bir yöntemdir. Kompostlaştırma, bu atıklar için Entegre Katı Atık Yönetimi’nin bileşenlerinden birisi olan atık dönüştürmenin en önemli uygulamasıdır. Bu metot, düzenli depolamaya göre biraz daha pahalı, yakmadan ise çok ucuz bir uzaklaştırma yöntemidir. Kompostlaştırma prosesi, düzenli depolamaya gidecek katı atık miktarının azalmasını sağlaması bakımından da, bütün dünyada çevre dostu bir katı atık yönetim sistemi olarak kabul edilmektedir.

Aritma çamurlarının bertarafında ortaya çıkan yüksek ekonomik maliyetler, işletmecileri ve araştırmacıları son yıllarda arıtma tesislerinde oluşan çamurların geri kazanımı ile ilgili bazı çalışmalara yönlendirmiştir. Bu konuyla ilgili ilk örnekler, geçen yüzyılın ilk yarısında arıtma çamurlarının gübreye karıştırılarak değerlendirilmesi şeklindedir. Ancak konu ile ilgili ciddi çalışmalar son 20 yıl içerisinde yapılmıştır. Bunun yanı sıra yakıt, yapı ve yol kaplama malzemesi ve çimento sanayi için hammadde olarak kullanım çalışmaları yine son yılların güncel araştırma konularıdır. Ancak uygun uzaklaştırma yöntemlerinin kullanılmaması halinde, çevrede ikincil bir kirlenme oluşma

olasılığı artacaktır. Özellikle son uzaklaştırma için yaygın olarak kullanılan depolama veya yakma yöntemlerinin oluşturduğu ikincil problemlerin çözümü çok daha zor olmakta, örneğin depolamada oluşan sızıntı suları, yakmada ise, enerji maliyetleri, külün uzaklaştırılması ve gaz emisyonları gibi olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Arıtma çamurlarının % 25-35 oranındaki karbon içeriği ile yakıt olarak kullanıma uygun olmasına rağmen, nem ve kül oranları yakıt olarak kullanımını sınırlandırmakta ancak uygun kurutma yöntemleri ve/veya uygun bir yakıt ile birlikte yakıldığında optimum koşullar sağlanabilmekte, yine de külün uzaklaştırılması ve gaz emisyonları çözüm beklemektedir [20-25].

Arıtma çamurlarının bileşimi, yapısı devamlı olarak değişmekte ve hiçbir zaman süreklilik göstermemektedir. Çamurun nihai bertaraf yöntemleri için giderek ağırlaşan yasal şartlar ve sınırlamalar da göz önüne alınırsa bu konu ile ilgili çalışmaların artırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bunlara ilave olarak üretim ve arıtım maliyetlerine büyük bir yük getirdiği için bu çamurların geri kazanılması günümüzde daha büyük bir önem kazanmaktadır.

Ülkemizde arıtma çamurlarının fiziksel ve kimyasal karakterizasyonları tam ve hassas olarak yapılmadığı için işletmeler açısından her zaman bir problem olarak görülmektedir. Oysa fiziksel ve kimyasal özellikleri ayrıntılı olarak ortaya konmuş olduğunda, arıtma çamurlarının yeniden kullanımı, geri kazanımı konusunda ciddi bir ekonomik girdi olabileceği akla gelmektedir. Her yıl milyon tonlar seviyesinde ortaya çıkan arıtma çamurları yüksek maliyetlerle inşa edilen düzenli deponi alanlarına gömülerek, bu tesislerin daha çabuk dolmasına, faydalı ömürlerinin kılmasına, yine yakma tesislerinde yakılarak büyük bir ekonomik kayba sebep olmaktadır. Yapılması gereken en önemli hareket her ne sektörden kaynaklanırsa kaynaklansın, arıtma çamurlarının fiziksel ve kimyasal karakterizasyonlarının yapıp, uygun yeniden kullanım, geri kazanım olanakları konusunda ciddi araştırmalarda bulunulmasıdır.

Atıksulara fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma işlemleri uygulanması sonucunda ortaya çıkan konsantre halde organik ve inorganik kirleticiler içeren çamurlara arıtma

çamurları denir. Çamur yönetimi 1960'lı yıllarda başlamış olup gelişimi Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Çamur yönetimi

YIL	PROSES
1960	Anaerobik Çürütme-Susuzlaştırma
1970	Susuzlaştırma-Kompost
1980	Yakma
1990	Termal Arıtma (Solidifikasyon) (tuğla, vb.)
2000'ler	Susuzlaştırma-Yakma Termal Kurutma Teknolojileri (piroliz) Biyogaz üretimi
2010-	Biyogaz üretimi, Gazifikasyon, Ek yakıt olarak kullanım

İstanbul, Ankara, Mersin, Adana, Kayseri, Tokat, Eskişehir, Gaziantep ve Diyarbakır kentsel atıksu arıtma tesislerinde çamur çürütücü sistemi bulunmaktadır. Ayrıca İzmir'de kurulması için ihale süreci devam etmektedir[27].

2.1.2.1 Atıksu Arıtma Çamurunun Kurutulması

Kurutma, atıksu arıtma tesislerinden çıkan çamurun öncelikli olarak hacminin azaltılması maksadıyla kullanılan termal bir prosestir. Termal kurutmanın en önemli avantajları, düşük taşıma masrafları, patojenlerin azaltılması ve kurutulmuş çamurun daha iyi depolama ve pazarlama imkanları vermesidir. Termal olarak kurutulmuş çamur gübre ya da toprak iyileştiricisi olarak kolayca pazarlanabilmekte ve depolama ile yakmada kabul görmektedir.

Kurutma genellikle piroliz ve yakmadan önce ön işleme olarak hizmet verir. Bunun yanı sıra kurutulmuş ürün birlikte yakma tesislerinde ikincil yakıt olarak kullanılabilir. Kurutulmuş çamur aynı zamanda arazide kullanılabilir ya da depolanabilir. Kurutulmuş çamur genellikle 1-4 mm granül boyutuna, %5-10 nem muhtevasına ve %1

den daha fazla olmayan toza sahiptir. Susuzlaştırılmış çamur içerisindeki katı madde miktarı %18-35 mertebelerindedir.

Aritma çamurunun gübre ve/veya yakıt olarak kalitesi genelde aşağıdaki kriterlere göre değişiklik gösterir:

- 1) Organik katıların içeriği
 - 2) Bitkilerin kullanabileceği besin içeriği, genel olarak fosfor, potasyum ve azot
 - 3) Su emme ve tutma özelliği
 - 4) Ağır metal içeriği
 - 5) Patojenik bakteri ve fungal (mantar), virüs içeriği ve toksinler
 - 6) Patojenik mikro organizmaların tekrar oluşum süresi
- 2 ve 4 atık suyun içeriğine ve arıtma tekniğine bağlıken, 1 ve 3 organik madde sindirimi ile bağlantılıdır.

Arıtma çamuru içinde patojenlerin bulunma olasılığı önemli bir sorundur ve ciddiye alınmalıdır. Bu noktada patojenlerin bulunma olasılığını en aza indirmek için düzgün ve doğru kurutma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu işlemde tutma süresi/tutma süresi dağılımı ve sıcaklık, partikül boyutu ve ısı geçirgenliği en güvenilir metotlar olarak görülmektedir. Bazı kurutma işlemleri sırasında $N-NH_3$ 'ün bir kısım kaybedilebilir. Eğer bu durum önemli ve zarar verici ise, kayıp katkı maddelerinin eklenmesiyle giderilebilir.

Gerçek akış şekli, kurutucu çeşidi (direk/dolaylı) ve her ürünlerdeki kuru katı miktarına (ortalama: %70-90) gibi etkenlere bağlıdır. Kurutucular arasında farklılıklar vardır. Isı geri kazanımı dolaylı kurutucularla daha etkin olabilirken, direk kurutucular ayrı granülizasyon gerektirmeyebilir.

2.1.2.1.1 Kurutma Yöntemleri

Yaklaşık olarak 20 kurutma makinesi üreticisi vardır. Değişik kurutma metotları ve teknolojileri arasında en belirgin olanı direk (direct) ve dolaylı (indirect) metotlardır. Çamur kurutma direkt veya dolaylı yolla ısı transferi kullanılarak yapılmaktadır.

Dolaylı Kurutucular:

Dolaylı kurutucularda, kurutulacak maddeye, dolaylı olarak, bir ısı transfer yüzeyi aracılığı ile ısı iletilir. Bu sistemde ısı aracı (ör: buhar, termal yağ) arıtma çamuru ile direk temasta değildir. Oluşan su buharının taşınması için küçük bir hava akımı kullanılabilir. Fakat genel olarak dolaylı kurutucularda hiç hava kullanılmamaktadır, bu, koku giderme masrafını en aza indirirken ısı yalıtımını en üst seviyede tutmaktadır. Dolaylı kurutucular;

- Pedallı Kurutucular
- Çukur Kurutucular
- Disk Kurutucular
- Çok Rafli Kurutucular

Dolaylı kurutucular arasında sıkça kullanılan sistemlerden biri disk kurutucularıdır. Disk kurutucular yavaş, döner (rotating) ekipmanlardır. Bu ekipmanların yapısı basit ve işletilmeleri de kolaydır.

Ekipmanın hareketsiz kısmı (stator) kurutulacak maddeyi içine alan neredeyse silindirik, yatay bir davuldan (drum) oluşmaktadır. Davulun içinde, davula bağlı olan ve karıştırıcı görevini yapan sıyrıcı çubuklar mevcuttur. Hareketsiz kısmın (stator) üst tarafında, toz ayırıcı ve kaçak buhar toplayıcı bir açıklık bulunur. Kurutucu genel olarak düşük bir alçak basınç ile çalıştırılır.

Ekipmanın hareketli kısmı (rotor) paralel biçimde sıralanmış, yatay bir şafta kaynaklanmış içi boş disklerden oluşmaktadır. Buhar veya başka ısıtıcı maddeler bu içi boş disklerin içinde dolaşmaktadır. Bu disklerin üzerine karıştırıcılar (agitator) kaynaklanmıştır. Ekipmanın işletmesi açısından küçük bir hava akımının olması avantaj yaratsa da, kurutma işlemi tamamen havasız da rahatlıkla sürdürülebilir. Az havasız veya tamamen havasız işleme toz ayrıştırma ve koku azaltma maliyetlerini en aza indirmektedir.

Yüksek verimlilikte ısı transferini sürekli kılmak için ısı transfer yüzeyini (diskleri) sürekli temiz tutmak gerekmektedir. Arıtma çamurunun yapışkan özelliği disklerin temizliği için olumsuz bir faktördür.

Disk kurutucularının yapışkan özellikli maddeleri işleyebilmesi için genelde aşağıdaki özelliklere sahip olmaları gerekmektedir:

- Isı transfer yüzeyinin kendini temizleme özelliği: disklerin kurutulacak madde içerisinde hafif sürtünme ile dönmesi
- Aynı anda karıştırıcı ve sıyrıcıların faaliyetleri ve yüksek ısı transferi kurutucu içinden geçen maddenin yapışmadan ve tıkanıklık oluşturmadan geçmesini sağlamaktadır.

Direkt Kurutucular:

Direkt kurutucularda, kurutmak için kullanılan gazın ısısı, arıtma çamuruna direkt olarak (doğrudan) aktarılmaktadır. Bu işlem gaz ve arıtma çamuru maddesinin arasında yoğun bir temas olmasını gerektirmektedir. Direkt kurutucular ısı verme faktörüne göre değişik tipleri mevcuttur.

- Pinomatik Kurutucular
- Döner Davul Kurutucular
- Akışkan Yataklı Kurutucular

Direk kurutucular arasında en sık kullanılan ekipman döner davul kurutucuları ve akışkan yataklı kurutuculardır.

Döner davul kurutucularında arıtma çamuru davulun bir ucundan konulmaktadır. Dönme faaliyeti ve davulun iç yapısından dolayı arıtma çamuru davulun öbür ucuna ulaşmakta ve aynı anda sıcak gazlarla çok yoğun temasa geçmektedir. Son ürün % 90 kuru katı oranına sahip granül arıtma çamurudur. Davul içerisinde tıkanmayı engellemek için döner davul sistemine giren arıtma çamurunun kuru katı oranı % 65'ten fazla olmalıdır. Bu kıvama ulaşmak için yeni (ıslak) arıtma çamurunun daha önce kurutulmuş arıtma çamuruyla karıştırılması gerekmektedir.

Akışkan yataklı kurutucularda yoğun temas sıcak gazların yükselmesi ile sağlanmaktadır. Yükselen gazlar arıtma çamurunu kurutana kadar çalkalayarak taşır. Arıtma çamurunun türüne göre kurutulmuş arıtma çamuru % 90'dan fazla kuru katı oranına sahip, tozdan arınmış, granüller haline dönüşür. Emisyon gazı içerisinde bulunan toz gaz akımı içerisinde taşınır, siklonlarla ayrıştırıldıktan sonra kurutulmuş atık çamuru ile karıştırılarak tekrar kurutucuya verilir. Akışkan yatak sistemine ısı alışverişini sağlayan teçhizatın eklenmesi direkt ve dolaylı kurutma sistemlerinden oluşan bir karma kurutma ekipmanı yaratır.

Gaz ve arıtma çamuru arasında oluşan yoğun temas ve iyi ısı transferi sonucunda direkt kurutucuların spesifik performansları dolaylı kurutuculardan daha iyidir. Buna ek bir avantaj olarak direkt kurutucular mekanik tasarım olarak daha basittirler.

Öte yandan direkt kurutucuların aşağıdakiler gibi dezavantajları vardır:

- Kullanılan gazlar yüksek oranda kirletici (özellikle de koku yapan bileşenler) taşımaktadır. İşlemin bu sonucu önemli derecede gaz arıtımına neden olmaktadır.
- Bu tür kurutucular düşük ısılarda çalışmaya daha az uygundur. Bu durum özellikle döner davul kurutucusu için geçerlidir.
- Patlama riski vardır.

Gazların sisteme tekrar devir daim (sirküle) edilmesi mümkün olsa da bu çok daha karmaşık kurutma ekipman tasarımı gerektirmekte ve böylelikle direkt kurutucuların avantajlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Her iki sistem yaygın olarak kullanılsa da direkt ve dolaylı kurutma teknolojileri arasındaki seçim arıtma çamuru karakteristiklerine ve çeşitli yerel faktörlerle yakından ilişkilidir.

Kurutmanın Avantajları ve Dezavantajları:

Harcanan enerji açısından bakılırsa bir kütleden suyun, buharlaştırma/kurutma yöntemiyle çıkarılması başka mekanik metotlarla karşılaştırıldığında (sıkıştırma ve santrifüj) maliyeti genel olarak daha yüksektir. Bu nedenle kurutma öncesinde yeterli derecede mekanik olarak su çıkarma işlemi gerçekleştirilmelidir.

Granül üretme işlemini içeren kurutma tesisleri diğer metotların çoğuna göre daha fazla mali yatırım gerektirmekte olsa da, öte yandan kurutma, arıtma çamurunun hacminde büyük miktarlarda azalmaya neden olmakta ve depolanabilen ve hijyenik bir ürün üretmektedir. Hacimdeki büyük azalmadan dolayı kuru arıtma çamuru nakliye, işleme ve depolama maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır [25].

Öteki metotlarla karşılaştırıldığında arıtma çamurunun kuru halde olmasının en büyük avantajı ise son ürünü en uygun zamanda belli bazı alanlara pazarlayabilme olasılığıdır:

- Tarım ve ormancılıkta gübre olarak kullanılması.
- Çimento tesislerinde, enerji tesislerinde ve yakma tesislerinde enerji olarak kullanılması
- Üst toprak peyzajı, dolgu ve düzenli depolama için kullanılması.

Isı ile kurutulmuş arıtma çamurunun hijyenizasyon ve önemli ölçüde hacim azaltma işleminden geçirilmiş olması çoğu uygulama için büyük önem kazanmaktadır.

2.1.2.2 Atıksu Arıtma Çamurlarının Yakılması

Günümüzde, arıtma çamurlarının en son işleme (bertaraf) yöntemi olarak uygulanan yakma yöntemi Avrupa'da arıtma çamurlarının toplam kütlesinin yaklaşık % 15 kadarına uygulanmaktadır. Arıtma çamurları;

- Özel dizayn edilmiş tesislerde ayrı yakılarak
- Evsel nitelikli atıklarla birlikte yakılarak
- Enerji üretilen ve ya çimento fabrikaları gibi yüksek sıcaklıklara çalışan tesislerde ilave yakıt olarak yakılabilmektedir.

Arıtma çamurlarının doğrudan zirai amaçlı olarak kullanılması veya düzenli depolama sahalarına gönderilerek bertaraf edilmesi giderek artan yasal kontrollere tabi olmaktadır. Bu nedenle, yakma sistemlerindeki yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına, yakma kriterlerinin sıkılığına, emisyon gazlarının işlenmesi ile ilgili maliyetlerin artmasına ve uçucu küllerle yanma ürünü olarak ortaya çıkan küllerin bertarafı

işlemlerinin zorlaşmasına rağmen, arıtma çamurlarının yakılarak bertaraf yönteminin giderek daha fazla kullanılacağı beklenmektedir.

Ön kurutma işlemi yapıldıktan sonra, arıtma çamurları, yüksek kalorifik değere sahip oldukları için, çimento fırınları içinde de yakılabilir. Bu durumda çamur içindeki kirleticiler de klinker içinde stabilize edilmiş olur. Ekonomik açıdan durum değerlendirilmesi yapıldığında, bu uygulamaların zirai amaçlı olarak kullanılamayan veya diğer evsel atıklarla birlikte yakılamayan çamurlar için düşünülmesi gerektiği anlaşılr. Stabilizasyon için öngörülen metotlardan biri de "vitrikasyon"dur. Japonya bu konuda bazı tecrübelerle sahiptir. Ancak yöntem çok pahalıdır [3].

Yakma sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, aşağıda verilen kendine özgü birçok avantajları vardır [1].

- Yakma üniteleri çamur ağırlığını, hacmini ve zehirlilik özelliğini büyük ölçüde azaltması,
- Nihai bertaraf etme için çok az madde kalması,
- Atık küller yol kaplaması, çimento, tuğla, beton yapımında kullanılabilir. gibi alanlarda kullanılması,
- Diğer metotlarla karşılaştırıldığında çamur yakma ünitelerinin çok az alan kaplaması,
- Diğer metotlarla karşılaştırıldığında yakma prosesi kısa sürede gerçekleşmekte olup toplama ve toprağa karıştırma yöntemlerinde olduğu gibi aylar ve yıllara ihtiyaç olmaması,
- Çamur yakma ünitesi çamur kaynağının hemen yanına tesis edileceğinden taşıma sorunu olmaması,
- Isı geri kazanım potansiyeli mevcut olması,
- Çamur yakma ünitesinden çıkış tek noktadan olduğundan kolayca analiz edilip gerekli kontroller yapılabilmesi

Son zamanlarda çimento üretiminde geleneksel yakıt yerine alternatif yakıt kullanılmaktadır. Yanma sonucunda ise emisyon salınmaktadır. Çamurdan kaynaklanan ağır metal ayrışma sonrasında elektrofiltreler vasıtasıyla fırın içinde absorbe edilir. Buna karşın ön ısıtıcı siklonundaki tıkanıklıklardan dolayı klor içeriği % 0,2 - 0,5 dolaylarında olabilir. Çimento üretiminde yakıt olarak atık çamur kullanılmasından sonra kireç stabilizasyonu gerekebilir. [19]. Atık çamur bir çeşit biyokütle yakıt olup çeşitli kalorifik değerleri Çizelge 2.5’de verilmiştir [15].

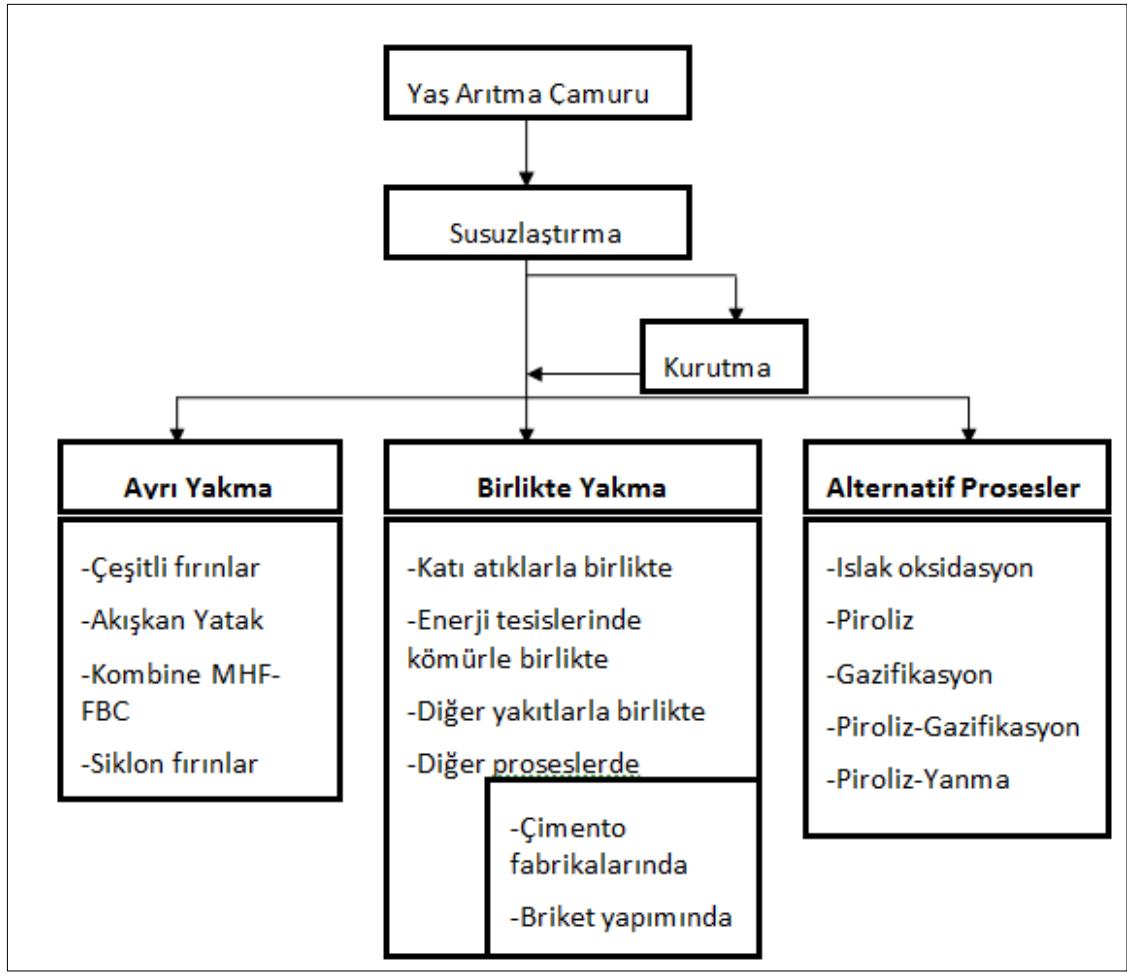
Çizelge 2.5 Atık çamur tiplerinin tipik ısı değeri

ÇAMUR TİPİ	ISIL DEĞER (KCAL/KG)	TİPİK (KCAL/KG)
HAM ÇAMUR	5494 – 6927	6091
AKTİF ÇAMUR	3822 - 5493	5016
ANAEROBİK OLARAK SİNDİRİLMİŞ BİRİNCİL ÇAMUR	2150 – 3105	2627
HAM KİMYASALLA HIZLANDIRILMIŞ BİRİNCİL ÇAMUR	3344 – 4299	3822
BİYOLOJİK FİLTRE ÇAMURU	3822 - 5494	4658

Susuzlaştırma işleminden sonra atık çamurun aşağıdaki fırınlarda yakılabilir:

- Çimento döner fırınları
- Akışkan yatak fırınları
- Çok tabanlı fırınlar

Yanma bir oksidasyon reaksiyonudur. Çamurlar için yanma, doğrudan veya dolaylı olarak yapılmaktadır. Doğrudan yakma da çamurlar çoğunlukla evsel atıklarla birlikte yakılırken, dolaylı yakmada ya enerji üretimi için bir yakıt olarak kullanılır ya da sanayide (çimento üretimi) bir başka yakıtla birlikte enerji ve hammadde girdisi olarak değerlendirilir. Şekil 2.4’de çamurlara uygulanan ısı işlemler gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Arıtma çamurlara uygulanan ısı işlemler

Laboratuvar ölçekli bir yakma tesisinde arıtma çamurlarının farklı yakıtlarla birlikte yakılması sonucu oluşan uçucu küllerin partikül boyutunun küçüldüğü, partikül içinde yanmamış karbonun olmadığı ve kömür ve diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında birlikte yakmada uçucu küllerin mineral içeriğinin azaldığı belirtilmektedir. Almanya, Hollanda ve Belçika’da kurulmuş enerji tesislerinde de çamurların yakılmasında oluşan gaz emisyonlarında ve külün ağır metal içeriğinde belirgin bir farklılığın olmadığı tespit edilmiştir. Çamur kül bileşimi Çizelge 2.6’da verilmiştir [25].

Çizelge 2.6 Çamur külünün bileşimi

BİLEŞİK	KURU AĞIRLIK DAĞILIMI (%)
SiO ₂	54.9
Al ₂ O ₃	18.4
P ₂ O ₅	6.9
Fe ₂ O ₃	5.8
CaO	5.4
K ₂ O	1.9
MgO	1.3
TiO ₂	1.1
DİĞER MİNERALLER	2.1
AĞIR METALLER	0.1
ORGANİK VE UÇUCU MADDE	1.9

2.1.2.2.1 Ayrı Yakma Sistemleri

Arıtma çamuru yakmak için kurulmuş özel yakma tesisleri uzun yıllardır işletilmektedir. Döner fırınlar ve klasik veya pirolitik tipli fırınlar günümüzde giderek yerlerinin akışkan yataklı sistemlere terk etmektedirler. Bunun nedeni akışkan yataklı sistemlerin işletilmelerinin daha kolay olmasıdır. Ayrıca bu sistemler;

- Bu prosesler düşük sıcaklıklarda dikey olarak tam yanmaya izin verilir,
- Akışkan yatak içinde bulunan inert malzemeler fırın içindeki ani sıcaklık değişimini önler,
- Kesikli çalıştırma olasılığı vardır,
- Bakım maliyetleri kısmen daha düşüktür.

Akışkan yataklı sistem, içi ısı tuğlası (refractory material) ile kaplanmış dikey bir yakma odasına sahiptir. Yatağın altında yüksek sıcaklığa getirilen bir kum tabakası vardır. Bu kum içinden yüksek sıcaklıkta hava geçirilerek akışkan halinde tutulur. Bertaraf edilecek arıtma çamurları bu kum yatağının ya içine ya da üzerine bırakılır.

Akışkan yatak içindeki gaz, oluşan yanma ürünlerinin tam olarak parçalanması için 850°C dereceye kadar ısıtılmalıdır. Mekanik olarak kurutulan arıtma çamurlarının yakma enerjisi verilmeden tam olarak yakılmaları mümkün değildir.

Yanma odasından çıkan sıcak gazlardan ısı enerjisini geri kazanan bir ısı geri kazanım ünitesi kullanılır. Bu ısıyı geri kazanmak ve yeniden kullanmak için şu üç teknik kullanılır: Birinci teknikte, yakma gazı duman (yanmış gazlar) / hava ısı değiştirgecinden geçirilerek ısıtılır. İkinci teknikte, geri kazanım kazanında oluşan buhar yardımı ile arıtma çamurunun kurutulması sağlanır. Üçüncü teknikte ise, fırının arkasında bulunan buhar kazanındaki ısı yardımı ile döner diskli bir kurutucuda arıtma çamurunun ön kurutma işlemi yapılır.

İkinci proses (teknik) ısıl yönden birincisine göre daha verimlidir, çünkü bu teknikte, ön kurutmadan önce % 20-25 kuru madde miktarı ve % 60-70 arasında uçucu madde /kuru madde oranına sahip arıtma çamurlarının otomatik (kendiliğinden) yanması temin edilebilmektedir. Kurutucudan çıkan su buharının geri kazanılması ve tekrar kazan tankına geri gönderilmesi de sonuçları (ısı kazanma verimliliğini) olumlu yönde etkilemektedir.

Bu tür ağır malzeme gereksinimi duyan ve yatırım maliyetleri gerektiren yatırımların büyük yatırımlar (kapasitelerinin saatte 2.5 ton suyu buharlaştırmaktan daha fazla) olmaları gerekmektedir. İkinci proses (teknik) Almanya, Hollanda ve İngiltere'de uygulanmaktadır. Bu proseste içinde yaklaşık % 23 kuru madde muhtevası olan arıtma çamurları kendiliğinden yakılabilmektedir.

2.1.2.2.2 Birlikte Yakma Sistemleri

Atık çamurlarının yakılması için evsel atık yakan yakma tesislerinin kullanılması oldukça çekici bir seçenektir. Bu durum yakma tesisinin arıtma çamurunun olduğu su arıtma tesisine yakın olması ve özellikle evsel atık yakan tesisin kapasitesi doyum noktasına ulaşmamış ise daha da ilginç bir alternatif oluşturmaktadır.

Birlikte yakmanın maliyeti ayrı yakmaya nazaran daha düşüktür. Bunun için yakma tesisinde çamur giriş sistemi gibi bazı noktaların modifiye edilmesi gerekebilir.

Evsel katı atıklarla arıtma çamurlarının karışımı karışımın enerji muhtevasının azalması nedeni ile dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Ayrıca ön-kurutmadan geçmiş veya hiç bir işleminden geçmemiş arıtma çamurlarının yakma tesislerine nasıl verilecekleri hususunda bir yöntemin geliştirilmesi de gerekmektedir.

Bu yöntemlerden biri arıtma çamurlarının kuru madde miktarını % 65 seviyesine çıkartacak şekilde kurutulmasıdır. Bu durumda arıtma çamurunun kalorifik değeri evsel atık kalorifik değerine yakın olur (2000 kcal/kg) ve bu çamur doğrudan fırına verilebilir. Fırına verilecek evsel katı atık madde miktarı verilen arıtma çamuru ağırlığı kadar azaltılmak zorundadır.

Arıtma çamurlarının yakılmasında kullanılan diğer bir uygulamada çimento ve benzeri tesislerde ilave yakıt olarak kullanılmasıdır. Çamurun bu fırınlarda kullanılmasıdaki temel sebep ise kalorifik değeridir.

Arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında yakılmasında dikkat edilecek hususlardan biride çamur besleme oranının, cüruf üretim miktarının %5 inden daha fazla olmamasıdır. Bu nedenle 2000 ton/ gün işleyen bir çimento fabrikasında maksimum 100 ton/gün kuru çamur yakılabilmektedir. Bazı kaynaklarda ise çamurun çimento fabrikalarında yakılmasında dikkat edilecek hususlardan biride çamurun çimento ürününün mekanik özelliklerini etkileyip etkilemediğinden emin olunması yönündedir.

Yakma Sisteminin Avantajlar ve Dezavantajları:

Avantajlar:

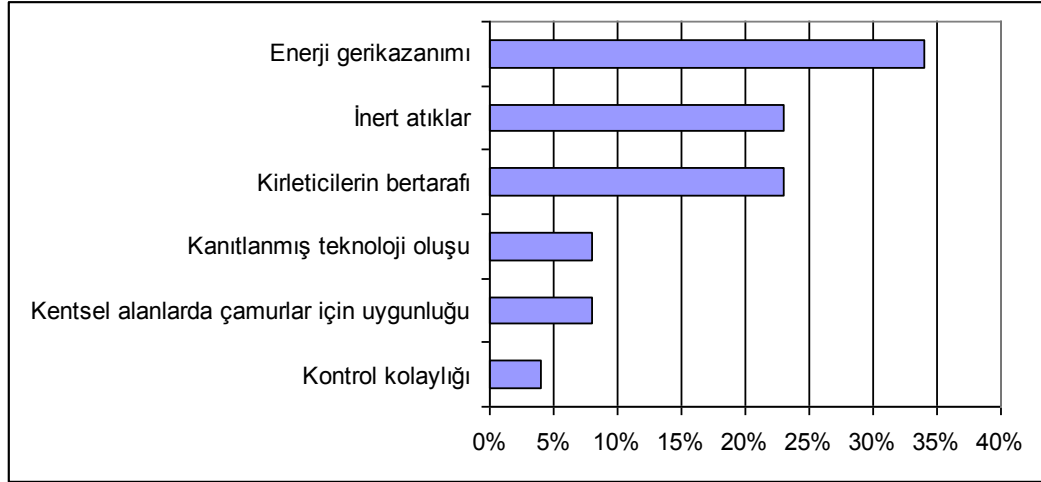
- Yanmadan sonra arıtma çamuru hacminde önemli azalma meydana gelir (yakmadan sonra elde edilen hacim azalması yakılan arıtma çamurunun organik madde içeriği ile bağlantılıdır. Yakma, arıtma çamurunun hacmini % 25-50 arasında azaltır.).
- Arıtma çamurlarından enerji olarak yararlanılmış olur
- Arıtma çamurunun yakılmasından sonra ortaya çıkan yan ürünlerin geri dönüşüm gayesi ile kullanılması mümkündür (asfalt yollarda dolgu maddesi, beton üretimi ve tuğla yapımı)

- Bu proses çamur kompozisyonuna fazla hassas değildir
- Güvenilir (bilinen / uygulanan) sistemlerdir
- Sitemin kapalı olması ve yüksek sıcaklıklar nedeni ile kokular minimize edilir.

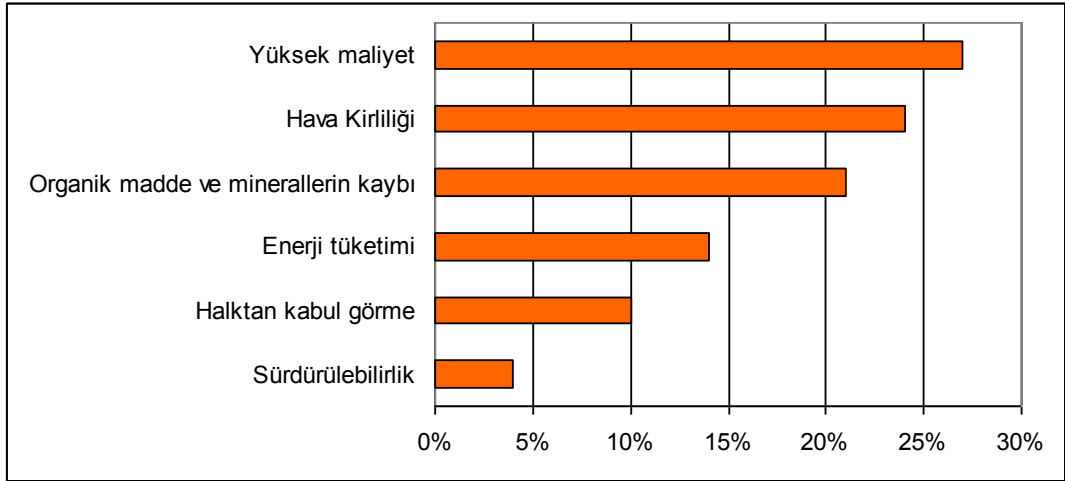
Dezavantajlar:

Yakma tesisleri yatırım maliyetleri yüksek işletmelerdir. Bunlar ancak büyük hacimlerin bertarafı için uygundur. Arıtma çamurlarının yakma tesislerinde bertarafına yönelik bir karar verilirken aşağıdaki maliyetler göz önüne alınmalıdır [3]:

- Gerekli depolama sisteminin maliyeti
- Fırın maliyeti
- Emisyon gazları ve yakma sonrası oluşan diğer atıkların (uçucu kül, klinker, yakmadan oluşan kül) işlenmesi ile ilgili maliyetler
- Diğer ek maliyetler- hem mevcut tesisler hem de yeni tesisler için geçerlidir
- Sabit ve oransal işletme giderleri: Personel, tüketilen maddeler (elektrik ve emisyon gazlarının temizlenmesinde kullanılan kimyasallar), bakım, vergiler, vb.
- Arıtma çamurunun işleme sahasına taşınmasının maliyeti
- Kalite kontrol ile ilgili giderler (ham arıtma çamuru ve yan ürünler)
- Geri dönüştürülecek bazı yan ürünlerin pazarlanması ile ilgili maliyetler.



Şekil 2.5 Yakmanın avantajları



Şekil 2.6 Yakmanın dezavantajları

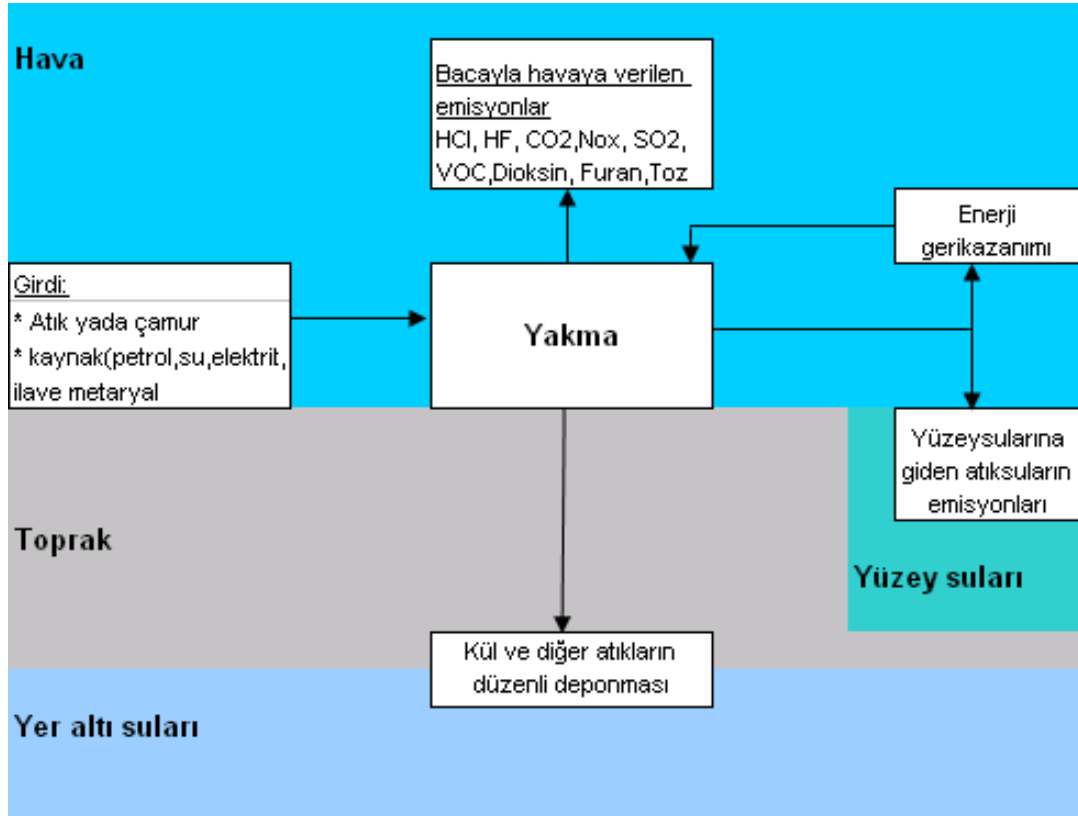
Arıtma çamurlarının yakılmasının avantaj ve dezavantajları aşağıdaki Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da sırasıyla verilmektedir.

Çevresel Etkiler:

Yakma tesislerinin genel olarak hava su ve toprağa etkisi olmakla beraber baca gazlarından çıkan emisyonlar hava kalitesini önemli derecede etkilemektedir. Arıtma çamurlarının yakılması sonucu çıkan emisyonlar prosese bağlı olmakla birlikte çamur tipine göre de değişim göstermektedir. Yakma tesislerinin çoğunda, üretilen enerji geri dönüştürülerek tesis içinde yeniden kullanılmaktadır. Özellikle arıtma çamurlarının

yakıldığı tesislerde enerji geri dönüştürülerek çamur içindeki su muhtevasının azaltılması maksadıyla kullanılır.

Yakma sonucu partiküller, uçucu küller, dioksin ve furanlar, gaz formunda ya da partiküllere bağlı olarak ağır metaller (özellikle Hg ve Cd), asit gazları (SO₂, HCl, HF), Nitrojen Oksitler, CO₂, uçucu organik bileşikler ve partiküllere bağlı organik bileşikler atmosfere verilmektedir. Baca gazlarının arıtılması atmosfere salıverilen bu gazların muhtevasını azaltmak maksadıyla yapılır.



Şekil 2.7 Yakmanın çevresel etkileri

2.2 Yasal Mevzuat

Bu bölümde, arıtma çamurların yönetimi ile ilgili olarak Ulusal mevzuat ve AB müktesebatı incelenmiştir.

2.2.1 Avrupa Birliği Yasal Mevzuatı

Çamur yönetimi, Avrupa Birliği çevre politikasında da en önemli ve problemli konulardan biri olarak kendini göstermektedir. 1973’de yayımlanan 1.Çevre Eylem Programı’ndan bu yana AB birbirini takip eden programlarda çevre korunmasına yönelik stratejileri belirlemiştir. 1992-2000 yılları arasındaki dönemi kapsayan 5. Programda ‘önleyici prensip’ olarak sürdürülebilir kalkınmayı esas almıştır. 6. Programda ise ‘atık’ öncelikli alanlardan biri olarak ilan edilmiş ve arıtma çamurlarına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. 91/271/EEC nolu Kentsel Atıksu Direktifinin yürürlüğe girmesiyle birlikte AB ülkelerindeki çamur üretim miktarları oldukça önemli oranlarda artış göstermiştir.

Atık yönetimi konusunda AB’nin öncelik verdiği stratejide; atık üretiminin kaynağında azaltılması ve zararlılığının önlenmesi, atığın yeniden değerlendirilmesi ve enerji eldesi ve en son aşamada bertaraf edilmesi şeklinde bir yaklaşım benimsenmiştir. Çamur yönetimi açısından, bu yaklaşımla tüm AB ülkelerinde en uygun teknolojiler kullanılarak mümkün olduğunca az çamur üretiminin sağlanacağı düşünülmektedir. Atığın yeniden kullanımı ve değerlendirilmesi ise ikinci adım olarak düşünülmektedir. 86/278/EEC nolu çamurun tarımsal amaçlı kullanımına yönelik direktifte çamurun toprakta kullanımı teşvik edilmekle birlikte insan, hayvan, bitki ve toprağa olabilecek zararların önlenmesi ana hedef olarak ortaya konmaktadır. Bu direktifte, tarımsal amaçlı kullanılması hedeflenen çamurların ancak arıtıldıktan sonra uygulanabileceğı; çamurun bilimsel tarım açısından çok önemli nitelikleri olduğu kaydedilmektedir. Direktif ayrıca, toprak ve çamur içerisindeki ağır metal konsantrasyonları ile toprağa yıllık olarak uygulanabilecek en yüksek ağır metal miktarlarına ilişkin kısıtlar getirmektedir. Araziye arıtma çamurunun uygulanması ile hayvan otlatma ve/veya hasat süreleri arasında geçen süre en az 3 hafta olmalıdır. Meyve ağaçları hariç olmak üzere, diğer meyve ve sebze ekinlerinin büyüme döneminde araziye uygulama yapılamaz. AB’nin 3. Taslak çalışma dokümanı da bu yönetmeliğe ilave olarak daha düşük ağır metal seviyelerine ve PCB, PAH, dioksin gibi organik kirleticilere ve patojen indirgenmesine değinmiştir. Atıktan enerji dönüşümü ve atıkların yakılması konusunda ise AB’de bir kaç yönetmelik

benimsenmesine karşın 00/76/EC nolu direktif hem kentsel hem de tehlikeli ve zararlı nitelikli atıkların yakılmasını düzenlemiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da –çamurun anaerobik çürüme prosesinden metan eldesi, çamurun yakılması, ek yakıt olarak değerlendirilmesi vb.- AB komisyonu çalışmalarında teşvik edilmektedir bu aynı zamanda AB’nin benimsediği Kyoto Protokolü ilkeleri açısından da önem taşımaktadır. AB’nin atık hiyerarşisinde en son seçenek olarak öngördüğü organik atıkların depolanması konusunda son yayımlanan Düzenli Depolama Direktifi (1999/31/EC Landfill Directive) depolama alanlarıyla ilgili olarak çok sınırlayıcı teknik ve işletme kriterleri ortaya koymaktadır [2].

2.2.2 EPA Mevzuatı

Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA), tehlikeli atıklara ilişkin atık yönetmeliklerini “Kaynak Koruma ve Geri Kazanımı Kanunu”nun altında düzenlemiştir (The Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). Bu kanunun 40 nolu başlığı altında federal yönetmelikleri de içine alan çevrenin korunmasına yönelik yönetmelikler yer almaktadır (40 CFR, Code of Federal Regulations, www.epa.gov, 19 Eylül 2008). Burada 239 ve 259 kodları arasında kalan yönetmelikler katı atıklar ile ilgili hususları, 260 ve 279 arasındaki yönetmelikler ise tehlikeli atıkların yönetimi ile ilgili hususları düzenlemektedir. Bu kısımlarda atık sınıflandırmaları, uygulanacak prosesler vb. gibi konular detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Bu yönetmeliklere ilave olarak, stabilize edilmiş arıtma çamurlarının toprakta kullanımına ilişkin esaslar, yine 40 nolu başlığın 268 nolu yönetmeliği olan Toprakta Bertaraf Etme Yönetmeliği kapsamında verilmektedir. Ağır metal konsantrasyonları ve uygulanan çamur stabilizasyonu prosesine bağlı olarak öngörülen patojen giderme seviyeleri için sınırlamalar bu yönetmelik ile esasa bağlanmıştır.

2.2.3 Atıklar ve Arıtma Çamurları ile İlgili Yönetmelikler ve Tebliğler

Arıtma çamurlarının yönetimi konusunda gerekli düzenlemeler AB ile uyum süreci kapsamında revize edilerek ilgili yönetmeliklerin içinde yer almaktadır. Bununla birlikte

arıtma çamurlarına yönelik esasların bir bütün olarak ele alındığı bir arıtma çamurları yönetmeliğinin Türk Çevre Mevzuatı'nda bulunmaması büyük bir eksiklik olarak görülmektedir. Arıtma çamurunun işlenmesi ve bertaraf edilmesine yönelik olarak hazırlanmış yönetmelikler aşağıda verilmiştir:

- Atık Yönetiminin Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik
- Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
- Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik
- Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği

a) Atık Yönetiminin Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (5 Temmuz 2010 Tarih ve 26927 No ile Resmi Gazete’de Yayımlanan (ÇŞB, 2008))

Bu yönetmeliğin amacı, atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetilmesine ilişkin genel esasların belirlenmesidir. Bu kapsamda, atık yönetiminin kontrollü bir şekilde yapılabilmesi için atık sınıflandırılması getirilmişti olup, atıkların tehlikelilik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 20 ana grup altında detaylı atık listesi ile bir sistematik oluşturulmuştur. Burada atıksu çamurları, Yönetmelik Ek IV’de verilen atık listesi içerisinde 19. madde olan, “Atık yönetim tesislerinden, tesis dışı atıksu arıtma tesislerinden ve insan tüketimi ve endüstriyel kullanım için su hazırlama tesislerinden kaynaklanan atıklar” bölümüne tekabül etmektedir (Madde 19.08). Bu bölüm su, atıksu ve atık yönetimi tesislerinden kaynaklanan tüm atıklara işaret etmektedir [32].

b) Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (14 Mart 1991 Tarih ve 20814 No ile Resmi Gazete’de Yayımlanan(ÇŞB,1991))

Yönetmeliğin amacı her türlü atık ve artığın çevreye zarar verecek şekilde, doğrudan veya dolaylı bir biçimde alıcı ortama verilmesi, depolanması, taşınması, uzaklaştırılması ve benzeri faaliyetlerin yasaklanması, çevreyi olumsuz yönde etkileyebilecek olan tüketim maddelerinin idaresini belli bir disiplin altına alarak, havada, suda ve toprakta

kalıcı etki gösteren kirleticilerin hayvan ve bitki nesillerini, doğal zenginlikleri ve ekolojik dengeyi bozmasının önlenmesi ile buna yönelik prensip, politika ve programların belirlenmesi, uygulanması ve geliştirilmesidir [33].

c) Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (26 Mart 2010 Tarih ve 27533 No ile Resmi Gazete’de Yayımlanan (ÇŞB, 2010))

Yönetmelik, atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertarafı sürecinde oluşabilecek sızıntı sularının ve depo gazlarının toprak, hava, yeraltı suları ve yüzeysel suların üzerindeki olumsuz etkilerinin asgari düzeye indirilerek çevre kirliliğinin önlenmesine, atıkların türüne göre uygun depo tabanı teknik tasarımlarının yapılması ve düzenli depolama tesislerinin inşa edilmesine, düzenli depolama tesislerine atık kabulü işlemlerine, düzenli depolama tesislerinin işletilmesi, kapatılması ile kapatma sonrası kontrol ve bakım süreçlerine, işletme, kapatma ve kapatma sonrası bakım süreçlerinde sera etkisi de dâhil olmak üzere çevre ve insan sağlığı açısından risk teşkil edebilecek olumsuzlukların önlenmesine, mevcut düzenli depolama tesislerinin ıslahı, kapatılması ve kapatma sonrası bakım süreçlerine ilişkin teknik ve idari hususlar ile uyulması gereken genel kuralları belirlemektir [34].

İlgili yönetmelikte atıkların düzenli depolanabilme kriterleri Ek-2’de verilmiştir. Arıtma çamurlarının düzenli depolama sahalarına kabulü “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” ve 05 Kasım 2010 tarihli “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğe İlişkin Genelge” ile düzenlenmiştir.

İlgili yönetmelik Geçici Maddeler 4 başlığı ve genelgenin 4. Maddesi ile Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliğin EK-IV’ünde tehlikesiz olarak sınıflandırılan arıtma çamurlarından, Yönetmelik Ek-2’de Çözünmüş Organik Karbon (ÇOK) sınır değerini sağlayamayanlar için;

- Yönetmelik Ek-2’de verilen diğer tüm parametreleri sağlaması (sınır değer artırımları için Bakanlıkça ayrıca izin verilebilir),
- Ağırılıkça en az %50 kuru madde ihtiva etmesi,

- Ön işleme tabi tutularak kötü kokunun giderilmesi,
- Atığın kararlı hale getirilmesi,

kaydıyla II. Sınıf düzenli depolama alanına kabulünde 1/1/2015 tarihine kadar Çözünmüş Organik Karbon (ÇOK) sınır değerine uygunluk aranmamaktadır.

Ancak mevcut susuzlaştırma teknolojileri ile söz konusu % 50'lik KM oranına ulaşılması, özellikle kentsel atıksu arıtma çamurları için, termal kurutma olmaksızın, pratik olarak mümkün değildir. Termal kurutma için de % 50'lik KM oranı çok düşük kalmaktadır. Bu sebeple minimum KM oranının % 30-35 düzeylerine çekilmesi uygun olacaktır. Zira depolanan kentsel katı atıkların özellikle yaz dönemindeki su muhtevası da % 65-70 düzeylerine ulaşabilmektedir.

d) Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (3 Ağustos 2010 Tarih ve 27661 No ile Resmi Gazete'de Yayımlanan (ÇŞB, 2010))

Bu yönetmeliğe göre, ham çamurun toprakta kullanılması yasaktır; stabilize arıtma çamurunun kullanılmasında ise bazı sınırlamalara uyulması gerekmektedir. Öncelikle stabilize çamurun, doğal orman alanları ile meyve ağaçları hariç olmak üzere toprakla temas eden ve çiğ yenen meyve ve sebze ürünlerinin yetiştirildiği topraklarda kullanımı yasaktır. Arıtma çamurunun toprakta kullanılması, tüm koruma alanları ile içme ve kullanma suyu temin edilen yüzeysel su ve yer altı suyu besleme havzalarında tamamen yasak olup, bu amaçlara hizmet etmeyen diğer yüzey sularını çevreleyen 300 m'lik alanın dışında uygulama yapılmasına izin verilmektedir. Hayvan otlatma veya hayvan yemlerinin hasadı yapılacak alanlarda ise, söz konusu faaliyetler ile arıtma çamurunun uygulanması arasında geçen süre en az 4 hafta olmalıdır. Bunlara ilaveten arıtma çamurlarının, pH değeri 6'dan küçük olan, organik madde içeriği %5'den fazla olan topraklarda ve taban suyu seviyesi 1 m'den sığ derinlikte olan veya eğimi %12'yi geçen alanlar ile kumlu tekstürlü topraklarda kullanımı yasaktır. Organik madde içeriği %40'dan daha az olan stabilize arıtma çamurlarının da toprağa uygulanması yasaktır. Kapasitesi 1.000.000 eşdeğer nüfusun üzerinde olan atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurların en az %90 kuru madde değerine kadar kurutulması esastır, ancak teknik ve

ekonomik acıdan uygunluğunun belgelenmesi durumunda %90 kuru madde şartı aranmaz [35].

e) Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (8 Ocak 2006 Tarih ve 26047 No ile Resmi Gazete’de Yayımlanan (ÇŞB, 2006))

Bu Yönetmeliğe göre, kentsel atıksu arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamuru uygun şartlarda yeniden kullanılabilir. Arıtma çamurlarının işlenmesi, geri kazanımı ve bertarafı ile ilgili olarak Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Madde 17’de belirtilen hususlar gözetilmelidir (20 Mart 2010 tarih ve 27527 no ile Resmi Gazetede yayımlanan). Arıtma çamurlarının toprakta kullanımı ve/veya bertarafının Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmeliği’nde belirlenen standartlara ve yöntemlere uygun olarak yapılması esastır [36].

f) Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (20 Mart 2010 Tarih ve 27517 No ile Resmi Gazete’de Yayımlanan (ÇŞB, 2010))

Yönetmeliğin amacı, yerleşim birimlerinden kaynaklanan atıksuların arıtılması ile ilgili atıksu arıtma tesislerinin teknoloji seçimi, tasarım kriterleri, arıtılmış atıksuların dezenfeksiyonu, yeniden kullanımı ve derin deniz deşarjı ile arıtma faaliyetleri esnasında ortaya çıkan çamurun bertarafı için kullanılacak temel teknik usul ve uygulamaları düzenlemek amacı ile hazırlanmıştır [37].

2.2.4 Yakma ile İlgili Yönetmelikler

Emisyon sınır değerlerini belirlemede kullanılan birçok yönetmelik vardır. Bunların içinden projenin konusunu ilgilendiren yönetmelikler aşağıda verilmiştir:

- Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği,
- Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği
- Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
- Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik
- Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği

Ayrıca Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nin üyesi olan çimento fabrikaları, 10 Şubat 1993 tarihinde Çimento Sanayi Çevre Deklarasyonu'nu imzalamışlardır. Çimento Sanayi Çevre Deklarasyonu sonrasında sağlanan olumlu gelişmeleri ve teknolojik değişiklikleri göz önüne alarak deklarasyonda yer alan hususlara uyulacağını deklare ederler [38].

a) Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (03 Temmuz 2009 tarih ve 27277 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan (ÇŞB, 2009)

Sanayi tesislerinden kaynaklanan hava kirliliğinin daha etkili yönetiminin sağlanabilmesi için Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY) 03.07.2009 tarih ve 27277 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girerek 22.07.2006 tarih ve 26236 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (ETKHKKY) yürürlükten kaldırılmıştır.

Bu Yönetmeliğin amacı, sanayi ve enerji üretim tesislerinin faaliyeti sonucu atmosfere yayılan is, duman, toz, gaz, buhar ve aerosol halindeki emisyonları kontrol altına almak; insanı ve çevresini hava alıcı ortamındaki kirlenmelerden doğacak tehlikelerden korumak; hava kirlenmeleri sebebiyle çevrede ortaya çıkan umuma ve komşuluk münasebetlerine önemli zararlar veren olumsuz etkileri gidermek ve bu etkilerin ortaya çıkmamasını sağlamaktır.

Yönetmelik işletmelerin kurulması ve işletilmesi için gerekli esasları, işletmeden çıkan hava emisyonları ve işletmenin etki alanı içerisinde hava kirliliğinin önlenmesinin tetkik ve tespiti ile, yakıtların, ham maddelerin ve ürünlerin üretilmesi, kullanılması, depolanması ve taşınmasına ilişkin usul ve esasları kapsamaktadır.

Çimento Fabrikaları ilgili yönetmelikte EK 5’te verilen “Kirlletici Vasfı Yüksek Tesisler İçin Özel Emisyon Sınırları” İkinci Grup Tesis Bölümünde Atık Geri Kazanım ve Nihai Bertaraf Tesisleri olarak tasniflenmiş (2.4.) ve atıkların yakılması ile ilgili Bakanlık tarafından yayımlanan mevzuata uyma koşulu getirilmiştir. Ayrıca ilgili mevzuatta bulunmayan esaslar bu Yönetmelikte belirtilen hüküm ve esaslara tabidir.

Atık gazlardaki toz emisyonları: 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 50 mg/Nm³ ü aşmamalıdır.

Kükürt Oranı: Baca gazındaki kükürt dioksit emisyonu 300 mg/Nm³ değerini aşmamalıdır.

Azotoksit (azotdioksit cinsinden) emisyonu: Mevcut tesislerde 1300 mg/Nm³

Yeni tesislerde 800 mg/Nm³ değerini aşmamalıdır.

Atıkların ek yakıt olarak kullanıldığı çimento fabrikalarında Bakanlığımız tarafından yayımlanan mevzuata uyulur. İlgili mevzuatta bulunmayan esaslar bu Yönetmelikte belirtilen hüküm ve esaslara tabidir. [39]

b) Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği (02 Ekim 1986 Tarih ve 19269 No İle Resmi Gazete'de Yayımlanan (ÇŞB, 1986))

Bu yönetmeliğin amacı, her türlü faaliyet sonucu atmosfere yayılan is, duman, toz, gaz, buhar ve aerosol halindeki emisyonları kontrol altına almak; insanı ve çevresini hava alıcı ortamındaki kirlenmelerden doğacak tehlikelerden korumak; hava kirlenmeleri sebebiyle çevrede ortaya çıkan umuma ve komşuluk münasebetlerine önemli zararlar veren olumsuz etkileri gidermek ve bu etkilerin ortaya çıkmamasını sağlamaktır.

Bu yönetmeliğe göre çimento üreten tesislerdeki atık gazlardaki toz emisyonları üretim metodu gereği elektrikli toz filtreleri ile donatılmamış olan tesisler: 75 mg/m³, üretim metodu gereği genelde elektrikli toz filtresi bulunan; çimento fırını, klinker soğutucu, kurutucu, öğüterek kurutan tesisler, nemli atık havalı, borulu öğütücülü tesislerden elektrikli toz filtresi uygulananlar: 120 mg/m³, yüksek toz elektrik direnci nedeni ile ilgili ayırımının oldukça zor olduğu ve elektrikli toz ayırıcıların uygulandığı tesisler: 150 mg/m³ sınır değerleri aşmamalıdır. Bu sınır değerler mevcut tesisler için % 100 artırılarak uygulanır.

Ayrıca klinker malzemesi kapalı hacimlerde depolanacaktır veya aynı etkiyi sağlayan tedbirlerle depolama ve yüklemede toz emisyonu önlenecaktır. Kış üretim dönemi

fazla ürünler açıkta depolanabilir. Çimento fırını, toz emisyon konsantrasyonunu sürekli ölçüp kaydeden bir ölçü cihazı ile donatılmalıdır [40].

c) Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (06 Ekim 2010 Tarih ve 27721 Sayılı Resmi Gazete ile Yayımlanan (ÇŞB, 2010))

Yönetmeliğin amacı, atıkların yakılmasının çevre üzerine olabilecek olumsuz etkilerini, özellikle hava, toprak, yüzey suları ve yeraltı sularında emisyonlar sonucu oluşan kirliliği ve insan sağlığı için ortaya çıkabilecek riskleri uygulanabilir yöntemlerle önlemek ve sınırlandırmaktır [41]. Atıkların beraber yakılması için hava emisyon limit değerlerinin saptanması için EK II kullanılır. Belirli bir toplam emisyon limiti 'C' belirlenmemişse, aşağıdaki formül uygulanacak olup atığın beraber yakılmasından doğan baca gazı emisyonundaki her ilgili kirletici madde ve karbon monoksitin limit değeri aşağıdaki gibi hesaplanacaktır:

$$\frac{V_{\text{atık}} \times C_{\text{atık}} + V_{\text{işlem}} \times C_{\text{işlem}}}{V_{\text{atık}} + V_{\text{işlem}}} = C \text{ mg/Nm}^3$$

$V_{\text{atık}}$: sadece izinde belirtilen en düşük kalorifik değere sahip atık kullanılarak saptanan ve bu yönetmelikte verilen koşullarda standart hale getirilen ve atığın yakılmasından kaynaklanan atıkgazın hacmi

Şayet tehlikeli atığın yakılması sonucunda yayılan ısı, tesiste yayılan toplam ısıнын %10'undan daha azına tekabül ediyor ise, $V_{\text{atık}}$, toplam yayılan ısı sabit kalmak kaydıyla, yakılacak olsa yayacağı ısı %10'a eşit olacak (teorik) bir miktar atıktan hesap edilmelidir.

$C_{\text{atık}}$: ilgili kirletici maddelere ve karbon monoksite ilişkin olarak Ek V'teki yakma tesisleri için belirlenen emisyon limit değerleri

$V_{\text{işlem}}$: Tesiste müsaade edilmiş ve normalde kullanılan yakıtların (atıklar hariç) yanmasından ve tesisin uyguladığı işlemde kaynaklanan ve EKHKKY de belirtilen şekilde emisyonu standart hale getirilmiş oksijen içeriğine dayanarak saptanan baca gazı hacmi.

Çişlem: Belirli endüstriyel sektörler için bu ekin Çizelgelerinde belirtildiği şekilde emisyon limit değerleri ve Çizelgede bu değerlerin mevcut olmaması halinde, normalde müsaade edilen yakıtları (atıklar hariç) yakarken EKHKKY ne uygunluk gösteren tesislerden çıkan baca gazındaki ilgili kirletici Maddelerin ve karbon monoksitin emisyon limit değerleri.

C: Belirli endüstriyel sektörler ve kirletici maddeler için bu ekin Çizelgelerinde belirtildiği şekilde toplam emisyon limit değerleri ve oksijen içeriği veya bu değerlerin mevcut olmaması halinde, işbu yönetmeliğin Eklerinde belirtilen emisyon limit değerlerinin yerine kullanılacak olan CO ve ilgili kirletici Maddeler için toplam emisyon limit değerleri. Oksijen içeriğinin yerine, standart hale getirmek amacıyla kullanılacak toplam oksijen içeriği, kısmi hacimleri de göz önünde tutarak yukarıdaki içeriğe dayanarak hesaplanır.

Atıkları beraber yakan çimento fabrikaları için özel hükümler kapsamında sürekli ölçüm cihazı ile belirlenen günlük ortalama değerlerin örnekleme süreleri ve diğer ölçüm şartları 7. Madde de belirtildiği gibidir. Dioksinler ve furanlar bütün değerleri ng/Nm³ olarak belirtilecek ve yarım saatlik ortalama değerler ise sadece günlük ortalama değerlerin hesaplanması için kullanılacaktır. Emisyon limit değerlerine uygunluk göstermesi gereken ölçüm sonuçları, sıcaklık 273 °K, basınç 101,3 kPa, %10 oksijen, kuru baz koşullarda standart hale getirilecek olup Çizelge 2.7’de Toplam Emisyon Limit Değerleri, Çizelge 2.8’de SO₂ ve TOK için toplam emisyon limit değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.7 Toplam emisyon limit değerleri

KİRLETİCİ MADDE	C MG/M ³
TOPLAM TOZ	30
HCl	10
HF	1
MEVCUT TESİSLER İÇİN NO _x	800
YENİ TESİSLER İÇİN NO _x	500 ⁽¹⁾
KİRLETİCİ MADDE	C MG/M ³
Cd + Tl	0,05
Hg	0,05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0,5
DİOKSİNLER VE FURANLAR(ng/m ³)	0,1
⁽¹⁾ NO _x emisyon limit değerlerinin uygulanması için, faaliyette olan ve emisyon izni bulunan çimento fırınları, yeni tesisler olarak kabul edilmeyecektir.	

Çizelge 2.8 SO₂ ve TOK için toplam emisyon limit değerleri

KİRLETİCİ MADDE	C MG/M ³
SO ₂	50
TOK	10

Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmeliğe göre hazırlanmış yakma tesisleri baca gazlarındaki emisyon değerleri Çizelge 2.9’da verilmiştir. Çizelgede verilen yakma tesisleri baca gazlarındaki emisyon sınır değerleri, deklarasyon, tebliğ ve yönetmeliklere göre karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.9 Yakma tesisleri baca gazlarındaki emisyon sınır değerleri

YAKMA TESİSLERİ BACA GAZLARI	
BİLEŞİĞİN ADI	ATIKLARIN YAKILMASINA İLİŞKİN YÖNETMELİK
1) GÜNLÜK ORTALAMA DEĞERLER	
TOPLAM TOZ	10 mg/Nm ³
TOPLAM ORGANİK KARBONLA İFADE EDİLEN GAZ VE BUHARLI ORGANİK MADDELER	10 mg/Nm ³
1) GÜNLÜK ORTALAMA DEĞERLER	
HİDROJEN Klorür (HCL)	10 mg/Nm ³
HİDROJEN Florür (HF)	1 mg/Nm ³
KÜKÜRT Dioksit (SO ₂)	50 mg/Nm ³
AZOT Monoksit ve Azot Dioksit (NO ₂) OLARAK	200 mg/Nm ³
2) YARIM SAATLİK ORTALAMA DEĞERLER	
TOPLAM TOZ	30 mg/Nm ³
TOPLAM ORGANİK KARBONLA İFADE EDİLEN GAZ VE BUHARLI ORGANİK MADDELER	20 mg/Nm ³
HİDROJEN Klorür (HCL)	60 mg/Nm ³
HİDROJEN Florür (HF)	4 mg/Nm ³
KÜKÜRT Dioksit (SO ₂)	200 mg/Nm ³
AZOT Monoksit ve Azot Dioksit (NO ₂) OLARAK	400 mg/Nm ³
3) MİNİMUM YARIM SAATLİK VE MAKSİMUM SEKİZ SAATLİK BİR ÖRNEKLEME SÜRECİNDE TÜM ORTALAMA DEĞERLER	
KADMIYUM VE BİLEŞİKLERİ (Cd OLARAK) TALYUM VE BİLEŞİKLERİ (Tl OLARAK)	toplam 0,05 mg/Nm ³
CIVA VE BİLEŞİKLERİ (Hg OLARAK)	toplam 0,05 mg/Nm ³
ANTİMON VE BİLEŞİKLERİ (Sb OLARAK) ARSENİK VE BİLEŞİKLERİ (As OLARAK) KURŞUN VE BİLEŞİKLERİ (Pb OLARAK) KROM VE BİLEŞİKLERİ (Cr OLARAK)	toplam 0,5 mg/Nm ³

Çizelge 2.9 Yakma tesisleri baca gazlarındaki emisyon sınır değerleri (devamı)

YAKMA TESİSLERİ BACA GAZLARI	
BİLEŞİĞİN ADI	ATIKLARIN YAKILMASINA İLİŞKİN YÖNETMELİK
KOBALT VE BİLEŞİKLERİ (Co OLARAK) BAKIR VE BİLEŞİKLERİ (Cu OLARAK) MANGAN VE BİLEŞİKLERİ (Mn OLARAK) NİKEL VE BİLEŞİKLERİ (Ni OLARAK) VANADYUM VE BİLEŞİKLERİ (V OLARAK) KALAY VE BİLEŞİKLERİ (Sn OLARAK)	
TOPLAM TOZ KARBON MONOKSİT (Co) HİDROJEN FLORÜR (HF) HİDROJEN KLORÜR (HCl) OKSİJEN, BASINÇ VE SICAKLIK	Emisyonların sürekli ölçümleri yapılacaktır
DİOKSİN VE FURAN EMİSYONLARI EN İLERİ TEKNİKLERLE AZALTILIR. MİNİMUM ALTI SAAT VE MAKSİMUM SEKİZ SAATLİK ÖRNEKLEME SÜRESİNDE ÖLÇÜLEN TÜM ORTALAMA DEĞERLERİ	0,1 ng/Nm ³ limit değerini aşmamalıdır

Baca gazındaki SO₂ emisyon sınır değerleri, II. Çimento Sanayii Çevre Deklarasyonu'nda 300 mg/Nm³, Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde 400 mg/Nm³ olarak verilmiştir.

II. Çimento Sanayii Çevre Deklarasyonu ve Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde belirtilen çimento fırını atık gazındaki NO₂ emisyon sınır değerleri Çizelge 2.10'da verilmiştir [38].

Çizelge 2.10 Çimento fırını atık gazındaki NO₂ emisyonu

ÇİMENTO FIRINI ATIK GAZINDAKİ NO ₂	
NO ₂ ÇIKIŞI	II. ÇİMENTO SANAYİİ ÇEVRE DEKLARASYONU
A) IZGARALI ÖN ISITICILI FIRINLARDA	1500 mg/Nm ³
B) SİKLON ÖN ISITICILI FIRINLARDA (BACA GAZI DEĞERLENDİRMELİ)	1300 mg/Nm ³
C)SİKLON ÖN ISITICILI FIRINLARDA (BACA GAZI DEĞERLENDİRMESİZ)	1800 mg/Nm ³

d) Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği (08 Haziran 2010 Tarihi ve 27605 Sayı ile Resmi Gazete’de yayınlanan (ÇŞB, 2010))

Yönetmeliğin amacı, enerji üretim tesislerinin faaliyeti sonucu atmosfere yayılan is, duman, toz, gaz, buhar ve aerosol halindeki emisyonları kontrol altına almak; insanı ve çevresini hava alıcı ortamındaki kirlenmelerden doğacak tehlikelerden korumak; hava kirlenmeleri sebebiyle çevrede ortaya çıkan umuma ve komşuluk münasebetlerine önemli zararlar veren olumsuz etkileri gidermek ve bu etkilerin ortaya çıkmamasını sağlamak için gerekli usul ve esasları belirlemektir [42].

2.3 Sektörel Ve/Veya Bölgesel Politikalar Ve Programlar

2.3.1 Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması-Marmara Havzası

Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması planında Marmara Havzasında, atıksuları arıtılan yaklaşık 14.000.000 kişiden yaklaşık 2.000.000 ton/yıl arıtma çamuru olduğu ileri atıksu arıtma tesislerinin yaygınlaşacağı yıllarda bu değer yaklaşık 500.000 ton/yıl olarak gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Çalışma doğrudan araziye uygulama metodunu önermiş, bunun yanında diğer metotlar için tavsiyelerde bulunmuştur. Bu proje kapsamında önerilen Çamur Yönetimi Yaklaşımı aşağıdaki gibi özetlenebilir [43].

Doğrudan Araziye Uygulama

Türkiye'nin coğrafi, iklimsel ve arazi kullanım durumu dikkate alınarak, özellikle <100.000 nüfuslu yerleşimlerin stabilize olmuş arıtma çamurlarının, ilgili mevzuata uygun olarak, doğrudan araziye uygulanması düşünülmelidir. Bu yolla bertaraf edilebilecek çamur miktarının toplam çamur üretiminin %30-40'ı düzeyine ulaşması beklenmektedir.

AB Düzenli Depolama Direktifi'nde (1999/31/EC) organik maddelerin düzenli depolanan atıklardan ayrılması zorunluluğu getirilmiştir. Bu sebeple arıtma çamurlarının depolanması haricinde de alternatif bertaraf metotları geliştirilmelidir. Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelikte de arıtma çamurlarının stabilize edildikten sonra belirli koşullar altında toprakta kullanımına izin verilmektedir. Bu şartlara göre Marmara Havzasında, arıtma çamurunun kaynaklandığı yerleşim yerlerindeki verimsiz arazilerde toprak şartlandırıcı olarak kullanılması değerlendirilebilir bir alternatiftir. Ancak, İstanbul ve Kocaeli gibi büyük şehirlerde uygun büyüklükte arazilerin bulunması zamanla zor olabileceğinden, büyük şehirlerden kaynaklanan arıtma çamurları için alternatif uygulamalar da geliştirilmelidir.

Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelikte endüstriyel çamurların da toprakta uygulamalarına kısmi izin verilmektedir. Ancak mevcut durumda Türkiye'de üretilen evsel ve kentsel atıksu çamurunun içeriği hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. ÇŞB Atıksu Arıtım Eylem Planı "Organize Sanayi Bölgesi Atık Temel Gösterge Sonuçları"na göre 2004 yılında, OSB'lerden çıkan arıtma çamurunun miktarının, % 56,14'ü düzenli depolanarak, % 28,75'i belediye katı atıklığında, % 14,72'si ise araziye atılarak, bertaraf edilmiştir. Bu konuda daha iyi değerlendirmeler yapılabilmesi için, Çevre ve Şehircilik Bakanlığının desteklediği, endüstrinin de katılım sağlayacağı ilave araştırmalar yapılmalıdır.

Diğer Yöntemlerle Bertaraf

Büyükşehirlerde ($N > 500.000$), doğrudan veya organik katı atıklarla birlikte anaerobik çürütme sonrası mekanik susuzlaştırma ve kurutma yoluyla hijyenizasyon sağlandıktan sonra, arıtma çamurları düzenli depolama alanlarında günlük örtü veya ilgili yönetmelikler çerçevesinde toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilir.

Stabilize olmamış kentsel AAT çamurları, mekanik susuzlaştırma sonrası atık yakma lisanslı çimento fabrikalarında yakılabilir, bölgesel atık yakma tesislerinde tek başına veya diğer atıklarla birlikte yakılıp enerji geri kazanılabilir. Yakma uygulanacaksa çamur stabilizasyonu yapılmaması esastır.

Stabilize olmamış arıtma çamuru keklerinin ($KM \geq \%35$) organik katı atıklarla birlikte veya ayrı olarak kompostlaştırılarak stabilize edildikten sonra toprak şartlandırıcısı ya da düzenli depolama alanlarında günlük örtü olarak kullanımı da diğer bir seçenektir.

Eşdeğer Nüfusu 100.000'den az olan AAT'ler için kurutma yatakları veya çamur lagünlerinde depolama sonrası araziye uygulama da duruma göre başvurulabilecek sürdürülebilir yönetim seçeneğidir.

Özellikle Büyükşehir'deki çamur yönetimi, BB Su Kanalizasyon İdareleri'nce hazırlatılacak Atıksu Yönetimi Master Planı'nın bir unsuru olarak yerel şartlar da dikkate alınarak bir Fizibilite çalışmasına dayalı biçimde planlanıp uygulanmalıdır [43].

2.3.2 Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımları Planlaması için Teknik Yardım (EHCI) Projesi, Arıtma Çamurunun Tarımda Kullanılması Halinde Çevrenin ve Özellikle Toprağın Korunmasına İlişkin Konsey Direktifi'ne Özgü Yatırım Planı (ENVEST, 2005)

Bugün Türkiye'de arıtma çamurlarının tarımda kullanım oranı yaklaşık %5-10 düzeyinde olup, bu şekilde bertaraf edilen çamur miktarı 50.000-100.000 ton/yıl civarındadır. AB Komisyonu'un Kentsel Atıksu arıtma Direktifi'nin uygulanmasına ilksin 1999 tarihli

raporunda yer alan verilere göre bu değer AB üyelerine kıyasla düşüktür. Rapora göre, 1998’de tarımda arıtma çamuru kullanım oranı %5 (Yunanistan) ile %65 (Fransa) arasında değişirken, AB ortalaması yaklaşık %50 mertebesinde kalmaktadır. Aynı raporda 2005 yılı için AB ortalamasının yaklaşık %55 mertebesine yükseleceği tahmin edilmektedir. Türkiye için ise Yatırım Planı’na göre, tarımda kullanılan arıtma çamuru miktarının bugünkü %5-10 seviyesinden gelecekte %30-40 seviyesine çıkacağı tahmin edilmektedir. Bu değer 2022’de yıllık yaklaşık 2 milyon ton çamura karşılık gelmektedir. Arıtma çamurunun tarımda kullanılmasının su şekilde gerçekleşmesi beklenmektedir:

- Stabilizasyon ve susuzlaştırma sonrası, stabilize edilmiş çamur, atıksu arıtma tesislerinde depolanacaktır. Depolama maliyetleri Kentsel Atıksu Arıtma Tesisleri Yönetmeliği uyarınca AAT’lerin kurulum ve işletme maliyetlerine dahildir.
- Çiftçiler ve diğer kullanıcılar, tarlalara yaymak üzere tesisten (çamur depolama) çamuru alacaklardır. Bu sebeple tesis sahiplerine çamur uzaklaştırma için yeni bir maliyet gelmemektedir [44,43].

2.3.3 ÇŞB Atıksu Arıtımı Eylem Planı (2008-2012)

Atıksu Arıtımı Eylem Planı’nda, arıtma çamurlarının yönetimine dair somut hedefler belirlenmemiştir (ÇŞB, 2008). Bu kapsamda geçmiş yıllara ait, Organize Sanayi Bölgeleri’nden (OSB) açığa çıkan arıtma çamuru miktarlarına yer verilmiş ve farklı yöntemlerle bertarafı (düzenli ve düzensiz depolama (~ %85), arazide bertaraf (~ %15)) değerlendirilmiştir [28,43].

2.3.4 Marmara Çevre Master Planı ve Yatırım Stratejisi Nihai Raporu (MEMPIS Projesi, 2007)

Arıtma çamurunun düzenli depolanması olasılığı, sadece kısa vadeli bir seçenek olarak düşünülmektedir. Bunun temel sebebi, AB düzenli Depolama Direktifi’nde belirtildiği üzere organik maddelerin düzenli depolanan atık içerisinde ayrılması konusundaki

ihtiyaç ve kısıtlardır. Bu seçeneğin uygulanabileceği süre içerisinde alternatif arıtma metotları geliştirilmelidir. Düzenli depolamaya alternatif teşkil edecek teknolojiler şunlardır:

- Çamurun arazi uygulamalarında kullanılması
- Arazi uygulamalarında veya kati atık formuna dönüştürmek üzere çamurun kurutulması
- Çamurun yakılması

Araziye uygulamada dikkate alınması gereken iki önemli parametre; patojen organizmalar ve ağır metallerin giderimi yönünden stabilize çamurun kalitesi ile çamurun gübre değeri ve toprak yapısını iyileştirmesi yönünden çiftçiler tarafından kabul görmesidir. Çamurun kurutulması veya yakılması uygulamalarında ise, atıksu çamurunun yüksek miktarlarda olduğu Büyükşehirlerde atıksu arıtımına dair Master Planlarda söz konusu stratejiler ortaya konmaktadır [45,43].

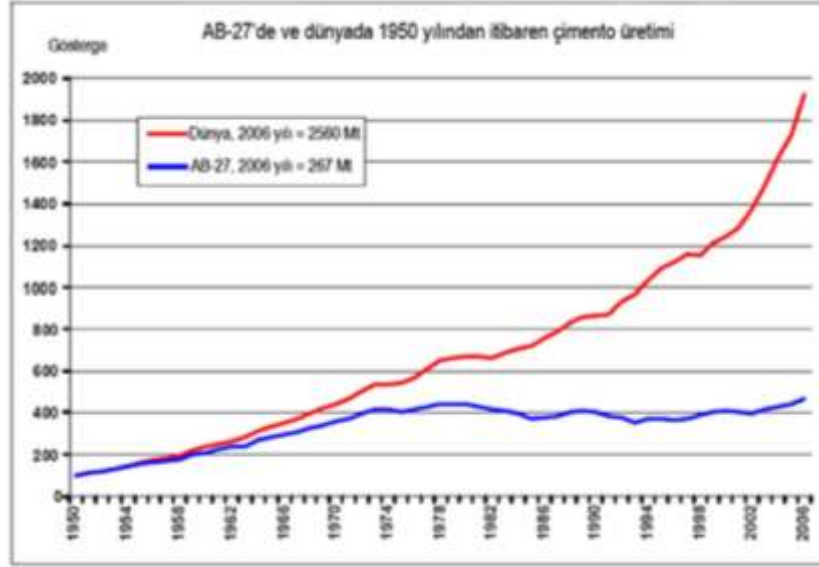
ÇİMENTO ÜRETİM TEKNOLOJİSİ

3.1 Çimento Üretimi

Çimento ince öğütülmüş, metalik olmayan, inorganik bir toz olup su ile karşılaştırıldığında donan ve sertleşen bir hamur oluşturur. Bu hidrolik sertleşmenin birincil nedeni, karışım suyu ile çimento bileşenleri arasında meydana gelen reaksiyon sonucu kalsiyum silikat hidratlarının oluşmasıdır.

Alüminli çimentoda ise hidrolik sertleşme kalsiyum aluminat hidratlarının oluşmasından kaynaklanır. Çimento bina ve inşaat mühendisliği yapıları için temel bir malzemedir. Avrupa’da büyük inşaat işlerinde çimento ve beton (çimento, agrega, kum ve suyun karışımı) kullanımı antik çağa kadar uzanır. Betonarme inşaatlarda en çok kullanılan çimento türü olan Portland çimentosunun patenti 1824 yılında alınmıştır. Çimento sanayinin çıktıları genel olarak inşaat işlerinin durumu ile doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle genel ekonomik durumu yakından izler.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, dünya çimento üretimi, gelişmekte olan ülkelerde ve özellikle 1990’lı yıllarda dünya çimento üretiminin aslan payını elinde tutan Asya’da 1950 yılından itibaren istikrarlı bir şekilde artmıştır [46-47].



Şekil 3.1 1950 ila 2006 yılları arasında AB-27’de ve dünyada çimento üretimi

2006 yılında dünya çimento üretimi 1420 Milyon ton olmuştur. Çizelge 3.1’de coğrafi bölgelere göre çimento üretiminin dağılımını göstermektedir.

Çizelge 3.1 2006 yılında coğrafi bölgelere göre dünya çimento üretimi [46]

BÖLGE	BİRİM	2006	BÖLGE	BİRİM	2006
ÇİN	%	47.4	ABD	%	3.9
HİNDİSTAN	%	6.2	DİĞER AMERİKA ÜLKELERİ	%	5.8
JAPONYA	%	2.7	AFRİKA	%	4.0
DİĞER ASYA ÜLKELERİ	%	13.2	BDT (CIS)	%	3.4
AB-27	%	10.5	OKYANUSYA	%	0.4
DİĞER AVRUPA ÜLKELERİ	%	2.5			

2006 yılında AB-25’te gerçekleşen toplam çimento üretimi 267.5 milyon ton, toplam çimento tüketimi ise 260.6 milyon ton olmuştur. 38 milyon ton çimento ithal edilip, 32 milyon ton ihraç edilmiştir.

Türkiye 2010 yılında çimento üretiminde Avrupa’nın en büyük, Dünyanın ise 5. Büyük çimento üreten ülkesi olmuştur[48]. Türk Çimento Sektörü, 2010 yılının ilk 9 ayında çimento üretiminde %9’luk büyümeye sağlamıştır. Bu dönemde üretilen çimentonun

yaklaşık %25'i ihracata gitmiştir. Yine bu dönemde iç satışlarda %14 büyüme yaşanırken ihracatta %2 oranında daralma yaşamıştır. Bölgesel olarak baktığımızda, üretimde sadece Güneydoğu Anadolu bölgesinde, ihracattaki azalış sebebiyle daralma yaşanmıştır. En fazla üretim artışı %20 ile Doğu Anadolu Bölgesinde yaşanmıştır. İç satışlarda ise Akdeniz bölgesi küçülürken, Doğu Anadolu bölgesinde %31 oranında büyüme sağlanmıştır. İhracatta da Akdeniz bölgesinde büyük artışlar gerçekleşirken, özellikle İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde %40'lara varan düşüşler yaşanmıştır.

2009 Yılı Türk Çimento Sektör Değerlendirmesi

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nce 2006-2013 yılları arasında iç piyasa çimento talebinde % 5'lik bir artış öngörülmektedir. Buna göre piyasada oluşacak talebin yıllara göre değişimi aşağıdaki Çizelge 3.2'de verilmiştir. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nin önümüzdeki 7 yıl içerisinde yıllık % 5'lik talep artışına ilişkin tahmini göz önüne alınırsa yatırımın hayata geçeceği 2011 yılında piyasada ilave bir kapasite ihtiyacı söz konusu olacaktır.

Çizelge 3.2 İç piyasada oluşması tahmin edilen çimento tüketimi

YILLAR	TÜKETİM (MİLYON TON/YIL)
2008	42,4
2009	44,7
2010	47
2011	49,4
2012	52
2013	54,3

Çimento sanayi enerji yoğun bir sanayi olup, enerji genelde, sermaye maliyetleri hariç ancak elektrik maliyetleri dahil olmak üzere üretim maliyetlerinin yaklaşık % 40'ını oluşturur. Geleneksel olarak kullanılan birincil fosil yakıt kömür olmuştur. Petrokok, linyit, doğal gaz ve fuel oil (ağır, orta ve hafif fuel oil) gibi çok çeşitli türde diğer katı, sıvı veya gaz halinde fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Bu geleneksel fosil yakıtlara ilaveten çimento sanayinde 15 yılı aşan bir süredir büyük miktarlarda atık yakıtlar veya

biyokütle yakıtlar kullanılmaktadır. Çizelge 3.3’de AB-27’de çimento sanayiinde üretilen ısının yüzdesi olarak ifade edilen yakıt tüketimi verilmiştir.

Çizelge 3.3 AB-27’de çimento sanayiinde üretilen ısının yüzdesi olarak ifade edilen yakıt tüketimi [46, 47]

YAKIT TÜRÜ	BİRİM	2006
PETROKOK (FOSİL)	%	38,6
KÖMÜR (FOSİL)	%	18,7
PETROKOK VE KÖMÜR (FOSİL) ¹⁾	%	15,9
HVFO ²⁾ DAHİL FUEL OİL	%	3,1
LİNYİT VE DİĞER KATI YAKITLAR (FOSİL)	%	4,8
DOĞAL GAZ (FOSİL)	%	1,0
ATIK YAKITLAR	%	17,9
Dahil edilmeyen: IE, CY, LT, SL Tahmin edilen: IT, PT, SE		
1) EU-23+ üyeleri tarafından bildirilmiştir		
2) HVFO = Yüksek viskoziteli fuel oil		

Çimento üretiminde emisyon önemli bir konudur. En büyük endişeye yol açan ve ilgilenilmesi gereken çimento fabrikası emisyonları azot oksitleri (NO_x), kükürt dioksit (SO₂) ve tozdur. Dikkate alınması gereken diğer emisyonlar uçucu organik bileşikler (VOC’lar), poliklorlu dibenzo-p-dioksinler (PCDD’ler) ve dibenzofuranlar (PCDF’ler) ile Hidrojen Klorür’dür (HCl). Ayrıca özel durumlarda karbon oksitleri (CO, CO₂), hidrojen florür (HF), amonyak (NH₃), benzen, tolüen, etil benzen ve ksilen (BTEX), poliaromatik hidrokarbonlar (PAH), metaller ve bileşenleri, gürültü ve koku emisyonları da gözönüne alınabilir.

Üretimde konvansiyonel hammaddeler ve yakıtların yerini çimento imalat prosesinde kullanılmakta olan uygun atık ve/veya biyokütleler almışlardır.

Çimento sanayi aynı zamanda sermaye-yoğun bir sanayidir. Yeni bir çimento fabrikasının maliyeti yaklaşık 3 yıllık ciroya eşittir ve bu durum çimento sanayinin sermaye-yoğunluğu en yüksek olan sanayiler arasında yer almasını sağlamıştır.

Çimento sanayinin karlılığı ciroya oranla % 10 civarındadır (faiz geri ödemesinden önce vergi öncesi kar bazında).

3.1.1 Çimento Üretiminde Uygulanan Prosesler Ve Teknikler

Çimento, esas olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile reaksiyonu sonucu sert bir kütle oluşturduktan sonra su içerisinde dağılmayan, sertliğini ve mukavemetini muhafaza eden veya artıran bağlayıcı maddelerdir.

Diğer bağlayıcı maddeler gibi çimentolar da, CaO, MgO gibi alkalın ögeler ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi hidrolik ögelerden oluşur. Alkalın ve hidrolik ögelerin oranları da bağlayıcı maddenin niteliğini belirler.

Kalker, kil ve marn hammadde olarak ocak bölgesinde taşıyıcı araçlara yüklenir. Ocaktan getirilen hammaddelerin boyutları tozsuzlaştırma ünitesi ile donatılmış bir çeneli kırıcıda, 25x25 milimetreye düşürülür. Kırılan hammaddeler çeşitlerine göre stoklanır. Tozlar transfer noktalarındaki torbalı filtrelerle geri kazanılır. Alınan hammaddeler değirmende öğütülerek farin haline getirilir. Çimento hammaddelerinin dikkatle orantılanmış bir karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silistir. Kireç daha ziyade kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girer. Silis için ise başlıca kaynak kildir. Bunları alümin ve demir oksit takip eder. Daha az miktarlarda magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddeler de bulunur.

Çimento üretim prosesinin temel kimyası kalsiyum karbonatın (CaCO₃) 900°C civarında ayrışması ile başlar ve kalsinasyon prosesi olarak bilinen bu işlem sırasında kalsiyum oksit (CaO, kireç) oluşur ve gaz halindeki karbondioksit (CO₂) açığa çıkar. Bunu izleyen klinkerleşme prosesi esnasında kalsiyum oksit yüksek sıcaklıkta (genelde 1400-1500°C) silis, alümin ve demir oksit ile reaksiyona girerek klinkeri meydana getiren silikatları, alüminatları ve kalsiyum ferritlerini meydana getirir. Son aşamada klinker çimentoyu oluşturmak üzere alçı taşı ve diğer katkı maddeleri ile birlikte öğütülür veya değirmenden geçirilir.

Farin; kalker, marn, demir cevherinin belirli oranlarda karıştırılıp öğütülmesinden elde edilen yarı mamul üründür. Farin silosunda tartılarak alınan farin, siklonlardan oluşan bir ön ısıtıcı kuleye beslenir. Farin 30°C'den 1000°C'ye kadar ısıtılarak % 90 oranında kalsine olur. Tamamen kapalı bir sistem olup çevreyi etkileyici hiç bir madde yaymaz.

Fırına beslenecek homojene edilmiş farinin belli bir kimyasal analiz değerini sağlaması istenir. Bu nedenle, hammadde karışım oranları belirlenirken, belli modül değerlerinin tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bu oranların önemi, sadece ulaşılacak komponentlerin kompozisyonları ile sınırlı kalmayıp; üretilecek çimentonun potansiyel olarak kalitesini de göstermektedir. Klinkerleşme ve klinkeri oluşturan fazların oranları (tri-kalsiyum silikat (C_3S), di-kalsiyum silikat (C_2S), tri-kalsiyum alüminat (C_3A), di-kalsiyum ferrit (C_2F), tetra-kalsiyum alumina ferrit (C_4AF)) yanında pişme indeksi, pişme faktörü, serbest kireç miktarı gibi diğer proses karakteristikleri ile de yakından ilişkilidir.

Farin, fırında pişerken hammadde içerisindeki oksitler önce serbest hale gelirler ve sonra sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluştururlar. Ön ısıtıcıdan gelen farin döner fırında 1500°C'de pişirilerek kalsine edilebilmesi için granüle hale getirilir ve bu işlem düşey değirmenlerde veya bilyalı değirmenlerde gerçekleştirilir. Çıkan ürüne ise klinker denir. 1300°C'de fırından çıkan klinker soğutularak sıcaklığı 100°C'ye düşürülür ve öğütme sırasında değirmen içine basınçlı su verilerek sıcaklığın artması önlenmiş olur. Daha sonra bu klinker, klinker stokholünde toplanır.

Soğutucudan çıkan klinker çimento üretiminde bir ara ürün sayılır ve çimento klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesi sonucu elde edilir. Klinker ve alçının öğütülmesinde daha çok bilyalı değirmenler kullanılır. Yaklaşık 3 m. çapındaki çelik silindir şeklindeki değirmenlerde hacimlerinin üçte birine kadar çelik silindir şeklindeki değirmenlerde hacimlerinin üçte birine kadar çelik ezici bilyalarla doldurulmuş bölmeler bulunur. Silindir dönerken bilyalar klinker tanelerine çarparak onları ufalarlar.

Son bölmede istenilen incelik elde edilmiş olur. Klinkere öğütme sırasında ağırlıkça % 3-5 arası kalsiyum sülfat katılır. Bu işlem çimentonun su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonların ve katılaşma sürecinin kontrolü bakımından zorunludur ve bu ürün silolara gönderilir.

Çimento üretiminin optimizasyonu için; hammadde üretiminden çimento öğütülmesine kadar bütün üretim aşamalarında, kimyasal kompozisyonun kontrol edilerek istenilen seviyede kalması sağlanmalıdır. Çimento üretiminde hammadde kompozisyonu ve homojenliği, üretim prosesinin ekonomisini ve çimentonun kullanım aşamasında kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, çimento hammaddelerinin istenilen kimyasal kompozisyonda ve homojen olarak üretilmesi ve bu durumun üretim aşamalarında da korunması sağlanmalıdır.

Çimento üretiminde kullanılan kuru, yarı-kuru, yarı-yaş ve yaş olmak üzere dört ana proses vardır:

- kuru proste, hammaddeler akıcı toz şeklindeki farini oluşturmak üzere öğütülür ve kurutulur. Kuru farin ön ısıtıcıya veya prekalsinasyon fırınına veya nadiren uzun kuru fırına beslenir.
- yarı-kuru proste farin su ile pelet haline getirilir ve fırından önce ızgaralı ön ısıtıcıya veya istavroz ile donatılmış uzun fırına beslenir.
- yarı-yaş proste ilk önce çimento harcı filtre preslerinde susuzlaştırılır. Filtre pastası pelet haline getirilerek farin üretimi için ızgaralı ön ısıtıcıya veya doğrudan filtre pastası kurutucusuna beslenir.
- yaş proste, hammaddeler (genellikle yüksek nem içerikli) pompalanabilir çimento harcı oluşturmak amacıyla suda öğütülür. Çimento harcı doğrudan fırına veya önce bir çimento harcı kurutucusuna beslenir.

Çimento üretim metot ve teknolojisinde en önemli farklılıklar fırın ünitelerinde kendini göstermektedir. Elektrik enerjisi tüketiminde yaş metodun 20 kws/ton çimento mertebelerinde bir avantaj göstermesine karşın, kuru metot ısı enerjisi tüketiminde yaş metodun 1.450-1.650 kcal/kg klinker tüketimine 700-900 kcal/kg klinker ısı enerjisi tüketimi ile üstünlük göstermektedir[49].

Dünya klinker üretiminin büyük bir bölümü halen yaş proseslere dayalıdır. Ancak, Avrupa’da üretimin % 90’dan fazlası kuru hammaddelerin mevcut olması nedeniyle kuru proseslere dayalıdır. Yaş prosesler daha fazla enerji tüketir ve bu nedenle daha

pahalıdır. Yarı-kuru proses kullanan fabrikalar genişleme veya büyük çapta bir yenileme gerektiğinde muhtemelen kuru tekniklere dönüşeceklerdir.

Yaş veya yarı-yaş proses kullanan fabrikalar Danimarka ve Belçika'da ve bir ölçüde İngiltere'de olduğu gibi sadece nemli hammaddelere erişebilmektedir.

Türkiye'de yaş fırınların çoğunluğu 1965-1973 yılları arasında üretim kapasitelerinin artırılması amacı ile 1974 yılından itibaren yakıt tasarrufu sağlamak amacı ile kuru sisteme çevrilmişlerdir. Halen ülkemizde yaş sistemde küçük kapasiteli 2 fırın faaliyetini sürdürmektedir [49].

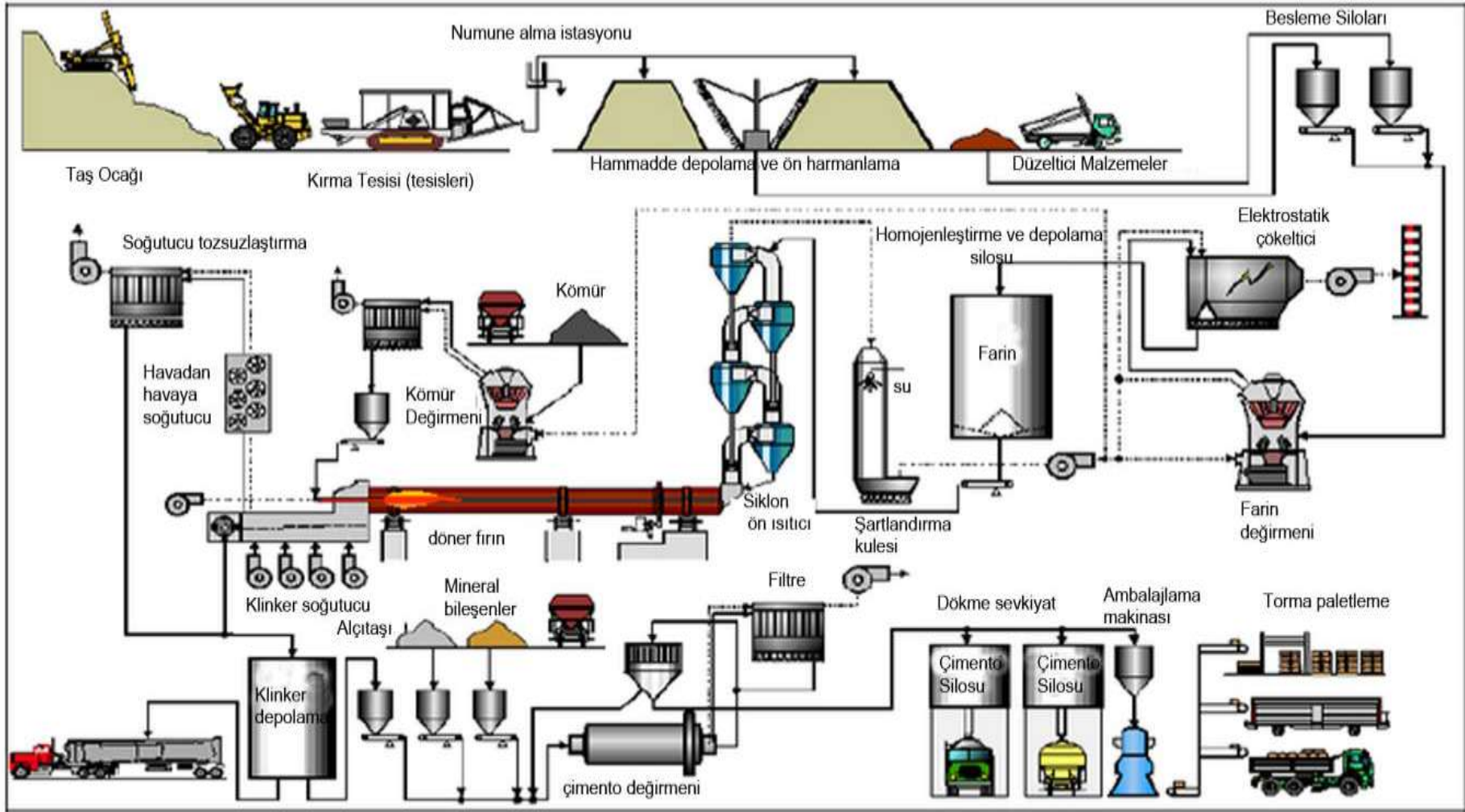
Ortaklaşa olarak tüm proseslerde aşağıda belirtilen alt-prosesler yer alır:

- hammaddeler – depolama ve hazırlama
- yakıtlar - depolama ve hazırlama
- atıkların hammadde ve/veya yakıt olarak kullanımı, kalite gereksinimleri, kontrol ve hazırlık
- fırın sistemleri, fırın yakma süreçleri ve emisyon azaltma teknikleri
- ürünler - depolama ve hazırlama
- paketleme ve sevkiyat.

Beyaz çimento üretim prosesi gri Portland çimentosu üretimine benzer. Proses aşamaları boyunca kirliliği ve üründe istenmeyen değişikliklerin meydana gelmesini önlemek için kesin kontrol altında tutulan koşullar uyarınca hammaddelerin seçimi, depolanması ve hazırlanması, yakıt depolama ve hazırlama, klinkerin bir fırın sisteminde pişirilmesi, beyazlatma/ soğutma ve öğütme proses kapsamında yer alır. Ancak ana teknolojik farklılık soğutma ve beyazlatmanın kombinasyonudur. Bu özel tür çimentonun beyazlığını arttırmak ve tekdüze bir renk sağlamak için bu aşamalar gereklidir ve kullanılmaktadır.

Bir çimento fabrikasının tipik proses akış şeması Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Şekil 3.2 Çimento üretim prosesine genel bakış [CEMBUREAU, 2006]



3.1.1.1 Hammaddeler ve Hammaddelerin Kazanılması

Kireçtaşı, marn veya tebeşir gibi doğal olarak oluşan kireçli tortular kalsiyum karbonatın kaynağını oluşturur. Silis, demir oksit ve alumina ise kum, şist, kil ve demir cevheri gibi çeşitli cevherlerde ve minerallerde bulunur.

Hemen hemen tüm doğal hammaddelerin kazanılması için madencilik ve taş ocakçılığı faaliyetleri gereklidir. Malzemeler çoğunlukla açık yeryüzü taş ocaklarından elde edilir. Gerekli faaliyetler kaya sondajı, patlatma, hafriyat, taşıma ve kırmaı kapsar.

Kireçtaşı, tebeşir, marn ve şist veya kil gibi ana hammaddeler ocaklardan çıkartılır. Çoğu zaman ocak fabrikaya yakın yerde bulunur. Hammaddeler ön kırma işleminden sonra depolanmak ve daha sonraki işlemler için hazırlanmak üzere çimento fabrikasına taşınır. Boksit, demir cevheri, yüksek fırın cürufu veya döküm kumu gibi diğer hammaddeler başka yerlerden temin edilir.

Ana Hammaddeler

a) Kireçtaşı

Kimyasal bileşiminde en az % 90 CaCO_3 (kalsiyum karbonat) bulunan kayalara kalker ya da kireçtaşı adı verilmektedir.

b) Kil

Kil mineralojik bileşiminde %90'a kadar kil mineralleri bulunan kayalardır. Kil minerallerinin temel özelliğı kimyasal bileşimlerinde alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunması ve sulu alüminyum silikatlardan meydana gelmiş olmasıdır. Demir, alkaliler ve alkali topraklarda değışik miktarlarda yer almaktadır.

c) Marn

Kalker ve kilin doğada, % 50-70 oranında kalker ve % 30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğundan ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha

yumuşak olması nedeniyle kolay öğütülebilmekte, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır.

Katkı Maddeleri

a) Puzolanik Maddeler

Kendi başlarına hidrolik bağlayıcı olmayan, ancak ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay maddelerdir. Çoğu puzolanik maddeler volkanik kökenli olup, en çok bilineni tüflerdir. Puzolanik maddelerin özelliği; yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içermeleridir. Bu nedenle Ca(OH)_2 ile tepkimeleri kolaydır ve bu özellikleri nedeniyle bağlayıcı özellik gösterirler. Çoğu doğal puzolanik maddeler volkanik kökenlidir.

b) Uçucu Küller

Uçucu küller ya da pülverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pülverize kömür ile işleyen fırınların toz tutma ünitelerinden sağlanan materyallerdir. Küresel biçimde olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içerirler. Puzolanik maddeler gibi Ca(OH)_2 ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar. Diğer taraftan yanmış karbon kalıntılarını da içermesi olasıdır.

c) Alçıtaşı (Jips)

Alçıtaşı, kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat olan bir mineraldir. Bileşiminde iki molekül kristalizasyon suyu bulunan türüne jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) denir. Susuz kalsiyum sülfat ise anhidrit (CaSO_4) olarak adlandırılır.

Çimento sanayi alanında genellikle jips kullanılmaktadır. Gerek jips gerekse anhidrit hiçbir zaman saf halde bulunmazlar. Bu iki mineralden her biri yarı dengeli olup biri diğerine dönüşebilmektedir. Ayrıca alçıtaşı yataklarına oluşum sırasında veya sonradan yabancı maddeler karışmış olabilir. Bunun sonucu olarak alçıtaşı ancak % 85-95 saflıkta bulunmaktadır. Çimento sanayinde genellikle maden ocağından çıktığı kalitesi ile hiçbir işleme tabi tutulmaksızın kullanılmaktadır. Jips ya da jips-anhidrit karışımını içeren hammaddeler son öğütme prosesinde % 3-5 oranında klinker ve/veya diğer katkı

maddeleriyle birlikte öğütülerek değişik tür çimentolar üretilmektedir. Alçıtaşı gibi sülfat içerikli maddelerin katılması çimentonun donma süresinin ayarlanmasında etkili rol oynamaktadır.

d) Demir Cevheri

Sanayinin en önemli hammaddelerinden birini oluşturan demir, saf halde gümüş parlaklığında olup kolayca oksitlendiğinden doğada serbest halde ender olarak bulunur. Demir cevherleri oksitler, sülfürler, sülfatlar ve karbonatlar olmak üzere dört grupta toplanırlar.

Hammaddeler üretim prosesini ve klinker kalitesini etkileyebilecekleri için klinker pişirme prosesi için gerekli olan özelliklere, kimyasal elementlere ve bileşimlere sahip olmalı ve bunları karşılamalıdır. Çimento klinkeri üretimi için gerekli hammaddelerin ve çimento farinlerinin kimyasal analizlerden elde edilen örnek aralıkları ve özellikleri Çizelge 3.4’de gösterilmiştir. Ana bileşenler dışında bu hammaddeler Çizelge 3.5’de listelenmiş olan metallerin bazılarını da içermektedir.

Çizelge 3.4 Çimento klinkeri üretimi için gerekli hammaddelerin ve çimento farininin kimyasal analizi [50,51,52,53]

BİLEŞENLER	KİREÇTAŞI, KİREÇ, MARN, TEBEŞİR	KİL	KUM	PFA ^{2'}	FE KAYNAĞI	FARİN
	(%KÜTLE)					
SiO ₂	0.5-50	33-78	80-99	40-60	0.5- 30	12-16
Al ₂ O ₃	0.1-20	7-30	0.5-7	20-30	0.2-4	2-5
Fe ₂ O ₃	0.2-5.9	4.0-15	0.0-4	5-15	50-93	1.5-2.5
Mn ₂ O ₃	0.02-0.15	0.090	0.051	0.127	0.1-4	0.0-0.5
Fe ₂ O ₃ ve Mn ₂ O ₃	0.1-10	2-15	0.5-2		19-95	≤2
CaO	20-55	0.2-25	0.1-3	2-10	0.1-34	40-45
MgO	0.2-6	0.3-5	0.3-0.5	1.0-3	0.5-7	0.3-5
K ₂ O	0-3.5	0.4-5	0.2-3	1-5	0.1-1	0.1-1.5
Na ₂ O	0.0-1.5	0.1-1.5	0.0-1	0.2-1.5	0.1-1	0.1-0.5

Çizelge 3.4 Çimento klinkeri üretimi için gerekli hammaddelerin ve çimento farininin kimyasal analizi [50,51,52,53] (devamı)

BİLEŞENLER	KİREÇTAŞI, KİREÇ, MARN, TEBEŞİR	KİL	KUM	PFA ^{2'}	FE KAYNAĞI	FARİN
	(%KÜTLE)					
SO ₃ ¹⁾	0.0-0.7	0.0-4	0.0-0.5	0.0-1	0-3	0-1.5
Cl	0.0-0.6	0.0-1	Eser Miktar		0.0-0.5	0.0-0.3
TiO ₂	0.0-0.7	0.2-1.8	0.0-0.5	0.5-1.5	0.0-3	0.0-0.5
P ₂ O ₅	0.0-0.8	0.0-1.0	0.0-0.1	0.5-0.1	0.0-1	0.0-0.8
ZrO ₂		0.02				
CaCO ₃	96					
KIZDIRMA KAYBI (CO ₂ + H ₂ O) LOI 950 ³⁾	2-44	1-20	≤5	6.74	0.1-30	32-36
1) SO ₂ olarak belirtilen toplam kükürt içeriği						
2) Pulverize edilmiş uçucu kül						
3) LOI 950 = Kızdırma kaybı						

Çizelge 3.5 Hammaddeler ve farinin içinde bulunan metaller [50]

ELEMENTLER		KİL VE KİLTAŞI	KİREÇTAŞI, MARN VE TEBEŞİR	FARİN
		MG/KG KURU MADDE		
ANTİMON	Sb	Veri yoktur	1-3	<3
ARSENİK	As	13-23	0.2-20	1-20
BERİLYUM	Be	2-4	0.05-2	0.1-2.5
KURŞUN	Pb	10-40	0.3-21	4-25
KADMİYUM	Cd	0.02-0.3	0.04-0.7	0.04-1
KROM	Cr	20-109	1.2-21	10-40
KOBALT	Co	20-10	0.5-5	3-10
BAKIR	Cu	Veri yoktur	3-12	6-60
MANGANEZ	Mn	Veri yoktur	<250	100-360
NİKEL	Ni	11-70	1.5-21	10-35

Çizelge 3.5 Hammaddeler ve farinin içinde bulunan metaller [50] (devamı)

ELEMENTLER		KİL VE KİLTAŞI	KİREÇTAŞI, MARN VE TEBEŞİR	FARİN
		MG/KG KURU MADDE		
CİVA	Hg	0.02-0.15	0.01-0.13	0.01-0.5
SELENYUM	Se	Veri yoktur	1-10	<10
TELLURYUM	Te	Veri yoktur	<4	<4
TALYUM	Tl	0.7-1.6	0.05-1.6	0.11-3
VANADYUM	V	98-170	4-80	20-102
KALAY	Sn	Veri yoktur	<1-5	<10
ÇİNKO	Zn	59-115	10-40	20-47

3.1.1.2 Yakıtlar-Depolama ve Hazırlama

Proses için gerekli olan ısıyı ve enerjiyi sağlamak için çeşitli yakıtlar (konvansiyonel ve atık) kullanılabilir. Çimento fırınına yakmak için değişik türde konvansiyonel yakıtlar kullanılır, bunlar;

- katı yakıtlar, örneğin; kömür, petrokok ve linyit ve bazı durumlarda bitümlü şist
- sıvı yakıtlar, örneğin; yüksek viskoziteli fuel oil (HVFO)
- gaz halinde yakıtlar, örneğin: doğal gaz

Bu yakıtların ana kül bileşenleri silis ve alümin bileşiklerdir. Ayrıca, küller eser miktarda metal de içerebilir. Bunlar hammaddelerle birleşmek suretiyle klinkerin bir parçası haline gelirler. Hammadde oranını hesaplarken bu durumun oluşacağı göz önüne alınmalı ve bu nedenle kül içeriği mutlaka düşük olmak yerine tutarlı olan yakıtın kullanılması tercih edilmelidir.

Ekonomik nedenlerden dolayı en çok kullanılan yakıt türü kömürdür. Gaz ve sıvı yakıtlar ise genellikle tutuşturma ve devreye alma amacıyla kullanılır. Kalorifer yakıtının verimli bir biçimde yakılabilmesi için buharla ön ısıtılarak uygun atomizasyon sıcaklığında yanma odasına püskürtülmesi gerekir. Kullanılacak sıvı yakıt tankları kapalı ve sızdırmazdır.

Antrasit, linyit, taşkömürü, asfaltit ve rafineri artığı olan petrokok çimento döner fırınlarında kullanılan başlıca katı yakıt türleridir. Bunların içerisinde en çok kullanılanlar ise taş kömürü ve linyitlerdir. İşletme ekonomisi ve ürün kalitesi yönünden uygun, çevresel etki ve temini yönünden sorunsuz yakıt sağlanması, başarılı bir çimento üretimi için en önemli faktördür.

Optimum yanma ve emisyon şartlarının sağlanabilmesi için, kullanılmadan önce kömürün uygun bir biçimde hazırlanması gerekir. Kömürün yanma ve emisyon davranışı; ısı değeri, nemi, külü, yanıcı uçucu oranı, kükürt ve azot içeriği, tane büyüklüğü, yakma sistemi (kömür brülörü) ve yanma odası (döner fırın) özellikleri vb. faktörler tarafından belirlenir. Fırına verilecek kömürün; özellikle nemi, tane büyüklüğü (inceliği) ve yanıcı uçucu madde oranı; alev biçimi ve yanma davranışı üzerinde etkili olmaktadır. Bunlardaki değişiklikler, alev biçiminde değişim ve dalgalanmalara neden olur. Kömür ne kadar ince öğütülürse, tutuşması daha kolay, yanma süresi ve alev boyu daha kısa ve alev sıcaklığı daha yüksek olur. İri taneler yanma tamamlanamadan fırın girişine doğru sürüklenebilir. Bu nedenle, gaz patlamalara neden vermeden kömürün sınırlı oksijen ortamında olabildiğince ince biçimde öğütülmesi gerekir. Yanıcı uçucu oranı yüksek kömürlerin öğütülmesinde kurutucu akışkan olarak döner fırının atık yanma gazları kullanılır.

3.1.1.3 Havaya Yapılan Emisyonlar

Çimento üretimi esnasında hava ve gürültü emisyonları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca atıkların kullanımı ile ilgili olarak örneğin atıkların depolanması ve taşınması nedeniyle kokular ortaya çıkabilir. Koku emisyonları iyi işletilen bir tesiste çok nadir olarak bir sorun oluşturur. Hammaddeler, ön ısıtıcıda ısıtıldığı zaman yanmayan ve sadece piroliz olan yanıcı bileşenler (kerogenler) içerdikleri takdirde hidrokarbon emisyonları oluşur. Bu hidrokarbon emisyonları bacanın üzerinde bir 'mavi pus' veya duman bulutu olarak görülebilir ve kötü hava şartlarında çimento tesisinin etrafında kokuya neden olabilirler.

Kükürt içeren yakıtların yanması ve/veya kükürt içeren hammaddelerin kullanılması koku emisyonlarına yol açabilir (özellikle şaft fırınlarında karşılaşılan bir sorundur). Ayrıca, hammadde veya yakıt olarak kullanılan atık malzemeler de özellikle hazırlama ve depolama gibi farklı proses aşamaları sırasında koku emisyonlarına yol açabilir. NOx azaltımı için amonyak kullanımı, uygun şekilde yapılmadığı takdirde bazı proses aşamalarında koku emisyonlarına yol açabilir.

IPPC Direktifi, emisyon sınır değerlerinin tespiti için uygun oldukları takdirde dikkate alınması gereken temel hava kirletici maddelerin genel bir belirleyici listesini içerir. Atık kullanımı dahil olmak üzere çimento üretimi ile ilgili olanlar aşağıda belirtilmiştir:

- azot oksitleri (NOx) ve diğer azot bileşikleri
- kükürt dioksit (SO₂) ve diğer kükürt bileşikleri
- toz
- toplam organik bileşikler (TOC) uçucu organik bileşikler (VOC) dahil
- poliklorlu dibenzo-p-dioksinler ve dibenzofuranlar (PCDD'ler ve PCDF'ler)
- metaller ve bileşikleri
- hidrojen florür (HF), hidrojen klorür (HCl)
- karbon monoksit (CO).

Listede adı geçmeyen karbon dioksit'in çimento üretimi ile ilgisi olduğu kabul edilmektedir. CO₂ emisyonları ve emisyon ticareti planı ile ilgili genel bilgi Topluluk içinde sera gazı emisyonu ticaretine izin veren bir plan oluşturan ve 96/61/EC sayılı Konsey Yönergesi'ni tadil eden Avrupa Parlamentosu ve Konsey'in 13 Ekim 2003 tarih ve 2003/87/EC sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifinde bulunabilir [Avrupa Birliği, 2003]. Ayrıca, özellikle NOx azaltımı için örneğin SNCR gibi ikincil önlemler/teknikler kullanıldığında NH₃ emisyonlarının da ilgili olduğu kabul edilebilir. Çimento üretimindeki en önemli emisyonlar fırın sisteminden havaya yapılan emisyonlardır. Bunlar hammaddeler ve yakıtların yanması ile ilgili fiziko-kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkar. Bir çimento fırınından çıkan gazlarının ana bileşenleri yanma havasından kaynaklanan azot, CaCO₃'ün kalsinasyonu ve yakıtın

yanmasından kaynaklanan CO₂, yanma prosesinden ve ham maddelerden kaynaklanan su buharı ile oksijen fazlasıdır.

Tüm fırın sistemlerinde katı maddeler sıcak yanma gazlarına doğru ters akıntı şeklinde hareket eder. Bu ters akıntı, bünye içinde sirküle eden bir akışkan gömme yatak görevi yaptığı için kirleticilerin emisyonlarını etkiler. Yakıtın yanması veya hammaddenin klinkere dönüştürülmesi sonucu oluşan birçok bileşen, ters akıntı şeklinde hareket eden hammadde tarafından absorbe veya üzerine yoğuşana kadar sadece gaz halinde kalır.

Malzemenin absorplama kapasitesi fiziko-kimyasal durumuna göre değişir. Bu durum malzemenin fırın sistemindeki konumuna bağlıdır. Örneğin, fırın prosesinin kalsinasyon aşamasından çıkan malzeme yüksek oranda kalsiyum oksit içerir ve bu nedenle HCl, HF ve SO₂ gibi asit türlerini absorp etme kapasitesi yüksektir. Faal olan fırınların emisyon verileri Çizelge 3.6’da verilmiştir. Fırınların içinde çalıştıkları emisyon aralıkları ağırlıklı olarak ham maddelerin özelliklerine, yakıtlara, tesisin yaşına, tasarımına ve ayrıca izin makamı tarafından belirlenen gereksinimlere bağlıdır. Örneğin, ateşleme/kalsinasyon sırasında yabancı maddelerin konsantrasyonu ve kireçtaşının davranışı emisyonları etkileyebilir, örneğin, hammaddenin içerdiği kükürt miktarındaki değişikliğin egzoz gazı kükürt emisyonları aralığı üzerinde önemli bir rolü ve etkisi vardır.

Çizelge 3.6 Avrupa çimento fırınlarındaki emisyon aralıkları verileri [54, 55, 56, 57, 58, 59, 47]

AVRUPA ÇİMENTO FIRINLARINDAN FIRINLARINDAN RAPOR EDİLEN EMİSYONLAR ¹⁾			
KİRLETİCİ	MG/NM ³	KG/TON KLİNKER	TON/YIL
NOX (NO ₂ ŞEKLİNDE)	145-2040	0.33-4.67	334-4670
SO ₂	4837’ye kadar ²⁾	11.12’ye kadar	11125’e kadar
TOZ	0.27-227 ³⁾	0.00062-0.5221	0.62-522
CO	200-4000 ⁴⁾	0.46-4.6	460-11500
CO ₂	-	yaklaşık 672 g/t _{çimento}	1.5456 milyon
TOC/VOC	1-60 ⁵⁾	0.0023-0.138	2.17-267
HF	0.009-1.0	0.021-2.3 g/t	0.21-23.0

Çizelge 3.6 Avrupa çimento fırınlarındaki emisyon aralıkları verileri [54, 55, 56, 57, 58, 59, 47] (devamı)

AVRUPA ÇİMENTO FIRINLARINDAN FIRINLARINDAN RAPOR EDİLEN EMİSYONLAR ¹⁾			
KİRLETİCİ	MG/NM ³	KG/TON KLİNKER	TON/YIL
HCl	0.02-20.0	0.046-46 g/t	0.046-46
PCDD/F	0.000012-0.27 ng 1- TEQ/Nm ³	0.0276- 627 ng/t	0.0000276-0.627 g/yıl
METALLER ⁷⁾			
Hg	0-0.03 ⁶⁾	0-69 mg/t	0-1311 kg/yıl
Σ(Cd, Pb)	0-0.68	0- 1564 mg/t	0-1564 kg/yıl
Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	0-4.0	0-9200 mg/t	0-9200 kg/yıl
¹⁾ Toplu rakamlarda 2300 m ³ /ton klinker ve yılda bir milyon ton klinker baz alınmıştır. Emisyon aralıkları yıllık ortalamalar ve çeşitli ölçüm tekniklerine dayalı temel gösterge niteliğindeki değerlerdir. Referans O ₂ içeriği normal olarak % 10'dur ²⁾ 253 adet döner fırının temiz gazında yapılan SO ₂ ölçüm değerleridir. 11 ölçüm ölçeğin üzerindedir. Bunlar içinden 7 adedinin ikame oranı '0', 3 adedinin '0 - 10' arası ve bir adedinin '40'ın üzerinde'dir. Hammaddeler uçucu kükürt bileşikler (örneğin, pirit) içerdikleri takdirde yüksek SO ₂ emisyonları beklenmelidir. Aslında bu oksitlenebilir bileşikler daha başlangıçta üst siklon kademelerinde SO ₂ 'ye dönüştürülebilir. Bu SO ₂ farin değirmeninde ince öğütülmüş hammadde tarafından yakalanabilir ³⁾ Rakamlar 253 döner fırının temiz gazında sürekli olarak yapılan toz ölçüm değerleridir. 8n ölçüm ölçeğin üzerindedir. Emisyon seviyeleri büyük ölçüde azaltma ekipmanlarının durumuna bağlıdır ⁴⁾ Bazı durumlarda, örneğin NOx azalması nedeniyle, CO emisyonları 2000 mg/Nm ³ 'ten fazla ve 5000 mg/Nm ³ 'e kadar (11,5 kg / ton klinker) olabilir ⁵⁾ 120 ölçümden elde edilen yıllık ortalama değerlerdir; çok az değer 60 mg/ Nm ³ 'ün üzerindedir. (122,6 mg/ Nm ³ veya 0,28 kg/ton klinker'e kadar) ⁶⁾ 306 spot ölçümden elde edilen 0.02 mg/ Nm ³ ortalama ve 0.57 mg/ Nm ³ (1311 mg/ton klinker) üst değerdir ⁷⁾ '0' = tespit seviyesi (LOD) anlamına gelir			

Her türlü fırın için m³/ton klinker şeklinde ifade edilen tipik fırın egzoz gazı hacimleri (kuru gaz, 101.3 kPa, 273 K, 1700 ila 2500 arasındadır [54]. Süspansiyonlu ön ısıtıcı ve ön kalsinatörlü fırın sistemlerinin egzoz gazı hacimleri normal olarak yaklaşık 2000 m³/ton klinker'dir (kuru gaz, 101.3 kPa, 273 K).

Ayrıca öğütme (değirmenden geçirme) ve taşıma operasyonları ile hammaddeler, katı yakıt ve ürün gibi diğer kaynaklardan oluşan yönlendirilmiş toz emisyonları vardır. Hammaddelerin ve katı yakıtların dışarıda depolanmasından ve çimento ürününün yüklenmesi de dahil olmak üzere herhangi bir malzeme nakil sisteminden kaynaklanan yayılmış toz emisyonları potansiyeli vardır. Bu yönler iyi tasarlanmadığı veya

korunmadığı takdirde emisyonların büyüklüğü önemli olabilir ve düşük seviyede salınımlar yerel seviyede rahatsız edici sorunlara yol açabilir.

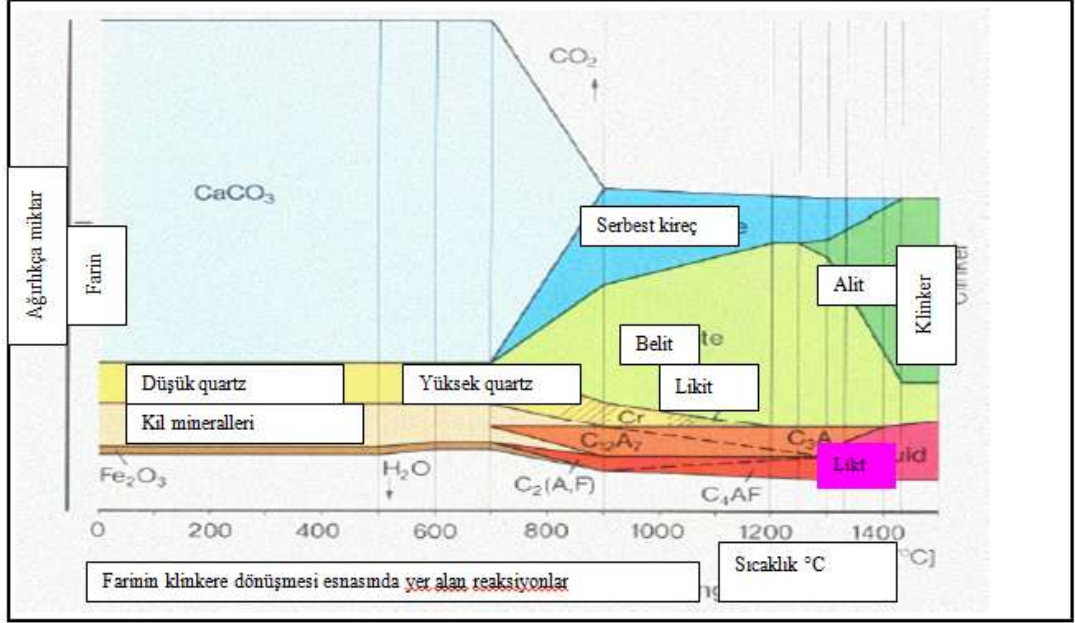
3.1.1.4 Klinker İçinde Yer Alan Mineral Fazlar

Klinker oluşumunda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan mineral fazları Çizelge 3.7’de görülmektedir. Şekil 3.3’de ise sıcaklığa bağlı olarak fırın içinde oluşan minerolojik reaksiyonlar verilmiştir. Çimento endüstrisinde kullanılan formüller aşağıdaki şekilde kısaltılmaktadır:

- Kireç ya da CaO “C” ile
- Silis ya da SiO_2 “S” ile
- Alümin ya da Al_2O_3 “A” ile
- Demir (3) oksit ya da Fe_2O_3 “F” ile gösterilmektedir.

Çizelge 3.7 Klinker mineral fazları

MİNERAL FAZLARI	KİMYASAL FORMÜLÜ	KULLANILAN SEMBOL
TRİKALSİYUM SİLİKAT (ALİT)	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
DİKALSİYUM SİLİKAT (BELİT)	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
TRİKALSİYUM ALÜMİNAT (CELİT)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
TETRAKALSİYUM ALÜMİNOFERRİT (FERRİT)	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
KALSİYUM ALÜMİNOFERRİT	$2\text{CaO}.(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_2 (\text{A}, \text{F})$
SERBEST KİREÇ	CaO	CaO
SERBEST MAGNEZYUM OKSİT	MgO	MgO
ALKALİ İÇERİKLİ ALÜMİNAT	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{O}.8\text{CaO}.3\text{Al}_2\text{O}_3$	$(\text{K}, \text{N})\text{C}_8\text{A}_3$
ALKALİ SÜLFAT	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{SO}_4$	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{SO}_4$
KALSİYUM SÜLFAT	CaSO_4	CaSO_4



Şekil 3.3 Sıcaklığa bağlı olarak fırın içinde oluşan minerolojik reaksiyonlar

Portland çimentosunun özellikleri bileşen kompozisyonu ile ilişkili olduğundan çimentonun oksit analizlerinden sonuç çıkarmak oldukça zordur. Genelde hesaplamalar Bogue denklemlerine göre gerçekleştirilir. ASTM C 150-92’de basit Bogue denklemleri şu şekilde verilmiştir:

- $A/F \geq 0.64$ ise;

$$C_3S = 4,071C - 7,600S - 6,718A - 1,430F - 2,852 SO_3$$

$$C_2S = 2,867S - 0,7544C_3S$$

$$C_3A = 2,650A - 1,692F$$

$$C_4AF = 3.043F$$

- $A/F < 0.64$ ise;

$$C_3S = 4,071C - 7,600S - 4,479A - 2,859F - 2,852 SO_3$$

$$C_2S = 2,867S - 0,7544C_3S$$

$$C_3A = 0$$

$$C_4AF = 2,100A + 1,702F$$

Klinkerde yer alan mineral fazlar aşağıda açıklanmıştır:

a)C₃S (Alit)

Klinkerin ana mineralidir. Mukavemet kalitesi açısından çok önemlidir. C₃S'in altı değişik şekli bilinir. Fakat bunlardan iki tanesi (yüksek sıcaklıkta oluşan) klinker bünyede bulunur. Karışım halindeki C₃S içinde % 1–1,5 arasında MgO ve de % 7'e kadar yükselebilen Al₂O₃ bulunabilir. Karışımı oluşturan maddeler alitin kristal yapısına etki etmeyip sadece yapı içerisinde bulunarak bazı yapı bozukluklarına yol açar. Alit renksiz olup özgül ağırlığı 3,25 gr/cm³ ağırlığındadır. Çimento kalitesi sadece alitin konsantrasyonuna değil alit kristalinin şekline de (kristal yapısına da) bağlıdır. Su ile reaksiyonu ve ortaya çıkan ısı orta değerdedir. Yüksek bağlayıcılık özelliği ilk yaşlardan itibaren etkilidir.

Mukavemet ve hidratasyon gibi temel özellikler alit kristalinin yapısı ile ilgilidir. Bu nedenle alit kristalinin büyüklüğünü ve şeklini iyi bilmek gerekir.

b)C₂S (Belit)

Yavaş ve kademeli olarak ekilir, katılaşır. Düşük hidratasyon ısısına sahiptir. Kirli sarımtırak renkli olan belit sinter bölgesinde (pişme bölgesinde) katı fazlar arasında oluşan reaksiyon sonucu meydana gelir. Bu faz zamanla çimentonun sertleşmesini arttırır. Silikatlar özellikle de belit yavaş kimyasal hidratasyon reaksiyonuna uğrayan bir fazdır. Bu nedenle son dayanım üzerine etkilidir. Su ile reaksiyonu yavaştır, az miktarda ısı açığa çıkarır. Yüksek olan bağlayıcılık özelliği kendini ileri yaşlarda gösterir.

c)C₃A (Celit)

Betonun ilk 24 saat içersinde katılaşmasını sağlayan siyahımsı camlaşmış partiküllerden oluşan fazdır. Hidratasyon ısısı en yüksek olan bileşendir. Bu nedenle su ile çok hızlı reaksiyona girer ve anında sertleşir.

d)C₄AF (Ferrit)

Bu fazın önemli derecede imento özelliklerine bir katkısı yoktur. Bu faz döner fırının n sinterleme bölgesinde sıvı reaksiyonlar arasında meydana gelir.

Siyah renkli kristallerden ibarettir. İyi pişmiş bir klinker renk olarak kurşuni renge çalan bir siyahlıktadır. Mat renkli bir klinker ise sinter bölgesinde tam olarak pişmemiştir. Bu nedenle bünyede serbest kireç gözlenir. Su ile reaksiyonu fazla olmayıp bağlayıcılık değeri azdır.

Kalker ve kil gibi hammaddeleri orantılayıp farini oluştururken bu dört ana bileşenin göreceli miktarlarını değiştirmek ve yeni bir hammadde veya katkı kullanmadan elde edilecek çimentoya bazı özellikler kazandırmak mümkün olmaktadır. Örneğin C_3S miktarını yükselterek erken dayanımı yüksek çimento, C_3A miktarını azaltarak sülfatlara dayanıklı çimento, C_2S miktarını arttırıp C_3S ve C_3A 'yı azaltarak düşük ısılı çimento üretmek mümkün olmaktadır.

e) $CaSO_4$ (Kalsiyum Sülfat)

Priz üzerinde etkili olup, priz süresini geciktirir. Kömür (yakıt) içerisinde bulunur. Alkalinin içine girerek miktarını fazlaymış gibi gösterir. Sülfat aşındırıcı etki yaparak betonu bozar. Klinker mineralleri saf bileşikler yani kristal fazlarıdır. Bu kristaller aynı zamanda klinkerin aynı fazları oluşturmeyen diğer kimyasalları da içerir. Bu nedenle saf bileşiklerle klinker minerallerini birbirinden ayırmak gerekir.

3.1.1.5 Portland Çimentosu

Hammadde karışımının hazırlanmasına ve klinkere eklenen katkı maddelerinin cinsine bağlı olarak farklı özelliklerde çimentolar üretilmektedir. Bunlardan bazıları Portland çimentosu, yüksek fırın cüruf çimentosu, sülfatlı cüruf çimentosu, uçucu kül çimentosu ve beyaz çimento olarak sıralanabilir.

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmesi ile ortaya çıkan ve “klinker” olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilen bir üründür.

Portland çimentosu klinkeri, kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikatlardan ($3CaO \cdot SiO_2$ ve $2CaO \cdot SiO_2$) ve geri kalanı alüminyum ve demir ihtiva eden klinker fazları ile diğer bileşiklerden oluşan hidrolik bir maddedir. Kütlece CaO/SiO_2 oranı 2,0'dan az

olmamalıdır. MgO muhtevası kütlece % 5'den fazla olmamalıdır. Fırında erişilen 1500°C civarındaki sıcaklık farin olarak adlandırılan hammadde karışımının sinterleşme ile ergime arasında bir hale gelmesine yol açmakta ve fırının çıkış ucuna doğru klinker denilen ortalama 1 cm çapında taneler oluşmaktadır. Klinkerin soğutulup az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi sonucu portland çimentosu elde edilmektedir.

Portland çimentosunun ana bileşenleri Çizelge 3.8'de, oksit ve miktarları ise Çizelge 3.9'da verilmiştir. Çizelge 3.9'da da görüldüğü gibi, en yüksek miktarlar sırasıyla kireç, silis, alümin ve demir oksite aittir. Özellikle kireç ve silisin payı yaklaşık olarak % 80 – 90 mertebesinde. Kireç, genellikle, kalkerli hammaddelerden, silis ve alümin ise killi hammaddelerden sağlanır. Demir oksit, killi veya kalkerli maddelerin yapısında bulunmaktadır. Çizelge 3.9'da gösterilen SO₃ miktarı aslında klinker öğütülürken eklenen alçıtaşından (CaSO₄.2H₂O) ortaya çıkmaktadır. Çok küçük miktarlarda yer alan magnezyum oksit ve alkalilerin çimentoya hiçbir yararı yoktur. Bu maddeler, çimento içersinde fazla miktarlarda yer aldıklarında çok zararlı olabilirler. Çimentoya faydalı olmadıkları halde Çizelge 3.9'da yer almalarının nedeni, hammaddelerin içerisindeki çok küçük yüzdelerde bulunan bu maddelerden ekonomik bir şekilde tamamen kurtulmanın mümkün olmayışdır.

Çizelge 3.8 Portland çimentosu ana bileşenleri

MİNERAL FAZLARI	KİMYASAL FORMÜLÜ	SEMBOLLERİ
TRİKALSİYUM SİLİKAT (ALİT)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
DİKALSİYUM SİLİKAT (BELİT)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
TRİKALSİYUM ALÜMİNAT (CELİT)	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A
TETRA KALSİYUM ALÜMİNOFERRİT (FERRİT)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Sıcaklığın etkisiyle hammadde karışımından açığa çıkan CaO, SiO₂,Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi oksitler, sıcaklık arttıkça (yaklaşık 1200°C) kendi aralarında kimyasal reaksiyona başlamaktadır. 1250–1300°C sıcaklıkta, hammadde karışımının % 20-30'u sıvılaşma göstermekte ve klinker denilen irili ufaklı katı tanecikler haline dönüşmektedir. Oksitlerin 1200–1450°C civarındaki kimyasal reaksiyonlardan sonra, çimentoyu

oluşturan ve birbirinden farklı özelliklere sahip dört ana bileşenin oluşumu tamamlanmış olur [60].

Çizelge 3.9 Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve yaklaşık miktarları

OKSİTLER	YAYGIN ADI	SEMBOLÜ	ORTALAMA MİKTARI (% AĞIRLIKÇA)*
CaO	Kireç	C	60-67
SiO ₂	Silis	S	17-25
Al ₂ O ₃	Alümina	A	3,0-8,0
Fe ₂ O ₃	Demir oksit	F	0,5-6,0
SO ₃	Kükürt trioksit	Ş (S)	1,0-3,0
MgO	Magnezyum oksit	M	0,1-4,0
Na ₂ O-K ₂ O	Alkaliler	N+K	0,2-1,3

(*) Tablodaki değerler, Prof. Dr. Turhan Y. Erdoğan, Betonun Oluşturan Malzemeler, Çimentolar, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÇMB adlı kitaptaki Portland Çimentosunu Oluşturan Oksit ve Miktarları tablosundan alınmıştır.

Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu, çimento standartlarında belirtilen deney yöntemlerinin kullanılmasıyla tayin edilmektedir. Çimento içerisindeki oksitlerin yüzdeleri ile bunlara ek olarak çimentodaki kızdırma kaybı, çözünmeyen kalıntı ve serbest kireç miktarları böyle bir analiz ile bulunabilmektedir. Çimentonun bileşenlerinin oranları deneysel olarak elde edebilmek amacıyla x-ışınları kırılma yöntemi ve optik veya elektron mikroskopla inceleme yöntemi gibi yöntemler kullanılabilmekte ise de bu yöntemlerin kullanımı hem basit değildir hem de deneyim gerektirmektedir. Bu sebeple, genel olarak Bogue tarafından verilen ve kolay olan hesap yöntemi kullanılmaktadır. Bogue yönteminde kimyasal analiz yoluyla bulunan oksit miktarlarını kullanmak suretiyle ana bileşenlerin yüzdelerini hesaplayabilmek mümkün olabilmektedir.

Çimentonun Hidratasyonu

Toz halindeki çimentonun hidratasyonu, su ile karıştırılması sonucu meydana gelen reaksiyonu kapsar. Hidratasyon sırasında önce plastik kıvamda çimento hamuru oluşur. Daha sonra bu hamur ‘priz başlangıcı’ ile plastikliğini kaybeder ve ‘priz sona ermesi’ ile de sertleşip dayanım kazanmaya başlar.

Çimentonun hemen tümünü oluşturan ana bileşenlerin su ile reaksiyonları ve hidratasyon ürünleri gerek kendi içyapıları gerekse ortamdaki diğer oksit ve bileşiklerle olan ilişkiler dolayısı ile çok karmaşıktır. Dört ana bileşenin her birisi hidratasyon sırasındaki 'reaksiyon hızı', açığa çıkan 'hidratasyon ısısı' ve meydana gelen jelin katılaştıktan sonraki 'bağlayıcılık değeri' yönlerinden farklı karakteristiğe sahiptir. Çizelge 3.10'da çimento ana bileşenlerinin hidratasyon özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.10 Çimento ana bileşenlerinin hidratasyon özellikleri

BİLEŞEN	HİDRATASYON ISISI	REAKSİYON	BAĞLAYICILIK DEĞERİ
C ₃ A	Çok yüksek	Hızlı	Az
C ₄ AF	Orta	Orta	Az
C ₂ S	Düşük	Yavaş	Başlangıçta az, sonraları fazla
C ₃ S	Orta	Orta hız	Fazla

C₃A ve C₃S çimentonun en reaktif ana bileşenlerdir. C₂S ise çok daha yavaş reaksiyona girer. C₃A'nın suyla reaksiyonu çok hızlı gerçekleşir. Ancak alçıtaşının varlığı C₃A'nın hızlı reaksiyona girmesini engeller. C₃S'in yüksek oranlarda bulunması çimentolarda erken dayanımın daha yüksek oluşmasına neden olur. C₂S'in erken dayanıma katkısı ise çok yüksek değildir, ancak son dayanıma katkısı yüksektir. C₃S ve C₂S'in Portland çimentosunda hidratasyonu sonucunda kalsiyum silikat hidratlar ile kalsiyum hidroksit oluşur. Her ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon esnasında açığa çıkardığı ısı ve oluşan ürünün dayanıma katkısı farklı olmaktadır.

Kalsiyum silikatlar (C₃S ve C₂S) hidrate olmuş çimento hamurunun dayanımından sorumlu en önemli bileşenlerdir. Dayanıma katkısının çok az olmasına karşın, çimentoda C₃A varlığı çimento hamuru sülfat atağına maruz kaldığında kalsiyum sülfoalüminat ve etrenjit oluşumuna neden olarak dayanıklılığı olumsuz etkilemesinden dolayı istenmeyen bir durumdur. Ancak, kireç ve silikanın kombinasyonunu sağladığından çimento üretiminde C₃A oldukça gereklidir. C₄AF çimentoda çok düşük miktarlarda yer alır. Diğer ana bileşenler ile kıyaslandığında çimento özelliklerini ciddi oranda etkilemez. Ancak, C₄AF alçıtaşı ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfoferrit oluşturur ve kalsiyum sülfoferrit varlığı silikatların hidratasyonunu hızlandırabilir. C₄AF-

alçıtaşı-su reaksiyonu C_3S reaksiyonundan daha yavaştır. C_4AF 'nin alçıtaşı olmadan hidratasyonu daha hızlıdır [60].

3.1.1.6 Çimentoda Kimyasal Bileşimin Önemi

Bilindiği gibi Portland çimentosunun kalitesi içerdiği bileşenlerin miktar ve oranına göre önemli ölçüde değişmektedir. Çimentonun dört ana bileşeni olan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 belirlenen bazı modüller aracılığı ile kontrol altında tutulmaktadır. Diğer ikincil önemdeki bileşenlerin karışıma etkileri ise analiz sonucundaki miktarları ile değerlendirilmektedir. Biricil bileşenle tanımlanan üç modülden ilk ikisi (CaO , SiO_2) karışımın kalitesinin saptanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hammaddelerin kimyasal bileşimleri Kireç Doygunluk Faktör" (LSF), Silis Modülü (SM) ve Alüminat Modülü (T.M) ile kontrol altında tutularak ayarlanmaktadır.

a) Silis Modülü

Sıvı fazın katı faza oranı olarak tanımlanmaktadır Bu oran 2.0 – 3.6 arasında olabilmektedir. Ancak genellikle, **2.3 – 2.7** arasında olması istenmektedir. Yanma prosesinin ekonomik sıcaklığı silis modülünün bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. Silis modülü artarsa yanma sıcaklığı artar, bu da daha az $3CaO.SiO_2$ ve daha fazla serbest CaO oluşmasına neden olmaktadır. Silis Modülü,

$$S.M = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$$

olarak tanımlanır.

Silis modülünün belirli sınır değerlerinden yüksek oluşu, pişme güçlüğüne, fazla yakıt kullanımına, sinterleşmenin güç olması nedeni ile daha yüksek ısılarda pişirme gereğine neden olmaktadır. Yüksek Silis Modülü değerleri aynı zamanda fırın astarlarının aşınarak zarar görmesine yol açtığı gibi donma başlangıcını geciktirerek, çimentonun dayanım kazanmasını da yavaşlatmaktadır.

Silis modülü düşük farinler ise kolay sinterleşmekte, daha kolay anzast oluşturmaktadır. Anzastın oluşması için fırın içindeki sıcaklığın yükselmesi ile sıvı faz miktarının artması ve bu artan sıvı fazın refrakter yüzeyine yapışması sonucu bir tabaka meydana

getirmesidir. Anzastın oluşması, erken dayanım veren ve çabuk sertleşen çimento üretimine sebep olmaktadır.

b) Alüminyum Modülü (Ton Modülü)

Akışkan kütle başlıca, C_3A ve ferritten, az miktarda da silis, magnezyumoksit, kireç, alkaliler, mangan vb, den oluşmaktadır. A / F oranı ne kadar yüksekse Fe_2O_3 ' e kıyasla Al_2O_3 ' ün oranı da o kadar büyük olmaktadır. Akışkanın viskozitesi, bileşimi ile yakından ilgilidir, bu oran ne kadar yüksekse belli bir viskoziteyi sağlamak için sıcaklığın o kadar yükseltilmesi gerekmektedir. Ayrıca ilk başta oluşan akışkan kütle miktarı A / F 'ye bağlı olup pişirme prosesinin ve sonuçta oluşan klinker kalitesinin üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır.

Alüminyum Modülü,

$$T.M = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

olarak formüle edilmiştir.

Alüminyum modülünün düşük olması klinkerleşme ısını düşürerek daha az yakıt kullanılmasını sağlamaktadır. Böyle çimentolarda C_3A düşüktür ve bunlar deniz sularına karşı dayanımı yüksek olan çimentoları oluşturur. Alüminyum Modülü değerinin yüksek olması durumunda; C_3A da artış, C_4AF de azalış, çabuk priz alma ve mukavemet kazanma gerçekleşir. Yüksek alüminyum-demir oranı, üretilen çimentonun yüksek erken dayanıma sahip olmasına rağmen, pişirme esnasında silikat ve kalsiyum oksit reaksiyonunu zorlaştıracı bir rol oynar. Bu ortalama modül değerlerinin belli bir istikrar içinde olması, fırın çalıştırma koşulları ve klinker kalitesi yönünden çok önemlidir. Bu nedenle farinin Alüminyum modülünün **1.3 – 1.6** arasında olması istenir.

c) Kireç Standardı (KS)

Karışımın kalitesinin saptanmasında kullanılan bir diğer modül ya da standart ise kireç standardıdır. Bu deyim C_3S miktarı için kullanılmaktadır. Çünkü bütün normal çimentolarda bir miktar serbest kireç bulunmaktadır, yani, hiçbir komponente bağlanmamış olan kirecin C_3S üretilmesine hiçbir katkısı yoktur. İşte bu nedenle kireç

standardı (K.S) diye bir faktör kullanılmaktadır. Bu faktör kireç doygunluk faktöründen sadece serbest kireci hesaba katması açısından ayrılmaktadır. K.S= 1 ise mümkün olabilen en çok miktardaki silis C₃S şeklinde bulunuyor demektir. Bütün bunlar silis, alüminyum, demir oksit ve kireç arasındaki kimyasal etkileşimin denge konumu araştırmaları ile ortaya konmuş bulunmaktadır.

Kireç standardı,

$$K.S = \frac{CaO}{2,8 * SiO_2 + 1,18 * Al_2O_3 + 0,65 * Fe_2O_3}$$

olarak formüle edilmiştir.

Bilindiği gibi farinde bulunan diğer bileşenlere göre CaO miktarının, çok dikkatli hesaplanması gerekmektedir. Fırına verilecek karışımda CaO miktarı yüksek ise farin güç pişmekte, üretilen çimento kalitesiz olmakta ve geç donmaktadır. Eğer CaO miktarı düşük ise alüminyum ve silisyumu yüksek, dayanımları düşük çimentolar elde edilmektedir. Genelde kireç standardının % 92 – 96 arası olması istenmektedir.

d) Hidrolik Modül

Hammadde karışımlarının kimyasal bileşenlerini belirleyen bir karakteristik orana hidrolik modül denir. Hidrolik modülün standart aralığı **1,7-2,2** arasındadır. En ideal hidrolik modül değeri ise 2'dir. Hidrolik modül değeri 1,7'nin altında olan çimentolar iyi kalitede olmayan çimento tanımlaması yapılabilir. Hidrolik modül değeri 2,2 değerini geçer hatta 2,4 değerinin üzerine çıkarsa bu tip çimentolarda genleşme problemleri ortaya çıkar.

Hidrolik Modül,

$$H.M = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

olarak formüle edilmiştir.

İkincil Bileşenler

a) Magnezyum Oksit (MgO)

Magnezyum oksit sinterleşme ısını düşürerek pişirmeyi kolaylaştıran bir bileşendir. MgO'yu yüksek olan farinler pişme bölgesinde topaklanarak fırının çalışmasını etkilediği gibi, karışımdaki birleşmemiş MgO, çimentonun hidratasyonu sonucunda periklas hale geçip hacim genişlemesine sebep olmakta, harç ve betonda çatlamlar görülmektedir. Bu nedenle MgO miktarının % 4'ü geçmemesi istenir.

b) Alkaliler (Na_2O ve K_2O)

Alkaliler hammadde ve pülverize kömür külünden ayrılarak, karışım sıcak bölgeye (800°C) geldiğinde buharlaşırlar. Sıcaklık 700°C 'ye düşünce ızgaralarda, siklonlarda tekrar kısmen kondense olurlar. Bu nedenle, arada bir baca gazları by-pass edilmektedir. Alkaliler genellikle K_2O ve sülfat şeklinde bulunurlar. Eğer yeterli sülfat bulunmazsa, MgO gibi CaO'ü bağlayıcı özellik göstererek K.S.'nin yükselmesine sebep olurlar. Ayrıca miktarları fazla ise, agregalarda bulunabilen çözülebilen silisle birleşerek alkali reaktivitesini oluşturabilir. Bu nedenle alkalilerin % 2,5'u geçmemesi istenir.

c) Kükürt Trioksit (SO_3)

Fırın ortamındaki kükürt, SO_3 şeklinde baca gazları ile tozlarla fırından uzaklaşır. Bazen de Fırın ortamında hammaddeler tarafından tutulur. Klinkerde tercihen sodyum, potasyum, sülfat, katı çözeltisi halindedir. Sülfatın az fazlası kemer oluşumuna neden olmakta, C_3A varlığı halinde ise C_3S 'in oluşumunu azaltmaktadır. CaSO_4 şeklinde olduğunda ise donmanın geciktirilmesi açısından oldukça pasiftirler.

d) Serbest Kireç (CaO)

Serbest kalsiyum oksit modern Portland çimentolarında nadiren ciddi miktarlarda bulunur. Hammaddenin yanlış oranlanması, yetersiz öğütme gibi etkenler klinkerdeki serbest kalsiyum oksit oluşumunun temel nedenleridir. Ayrıca pişirmenin tam olmayışından ve kristalleşme esnasında killi elemanlarla, iri kristalli kalkerin tam olarak reaksiyona girmesinden dolayı fazla miktarda serbest kireç oluşmaktadır. Bunlarla birlikte hammaddedeki CaO miktarının çok yüksek olduğu zamanlarda da serbest kireç ortaya çıkmaktadır. Serbest kirecin fazlası, betonda genişlemeye neden olduğundan % 2 dolayında olması istenmektedir.

e) Serbest Silis (SiO₂)

Farindeki serbest silis (kuvars) yüksek ise kırıcıdan başlayarak fırın sistemine kadar birçok sorunla karşılaşmaktadır. Serbest silisin yüksek olması halinde kırıcılar ve farin değirmeni çok aşınmakta, farinin ince öğütülmesi gerektiğinden değirmen sistemi buna uyacak şekilde dizayn edilmemiş ise enerji tüketimi çok yüksek olmalıdır. Bunlardan başka, yeterince ergimeyi sağlayacak madde (genellikle demir) kullanılmadığı takdirde, fırında anzast oluşmakta ve tuğlalar, serbest silisin aşındırıcı etkisi ile kısa zamanda dökülmektedir.

Fırın astarından radyasyonla ısı kaybı meydana gelmektedir. Ayrıca, serbest silisin yüksek olması ile yakıt tüketiminin artması gazların ısılarının yükselmesine neden olmaktadır. Kuşkusuz, bütün bu sayıların faktörler, üretim maliyetinin artmasını doğurmaktadır. Ancak, az miktarda Fe₂O₃ katılması ile yüksek silisli maddelerin daha çabuk ergimesi sağlanmakta yakıt tüketimi önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Fırına verilen karışımda ne oranda serbest silisin bulunması gerektiği konusunda kesin bir değer verilememektedir. Çünkü silikat ve alüminyum oranı, alkali ve MgO miktarı, kilin mineralojik yapısı gibi faktörler, serbest silisin olumsuz etkisini bir ölçüde gidermektedir. Bununla birlikte yatırım ve üretim maliyetlerini etkilememesi açısından genellikle fırına verilen karışımda serbest silisin % 3 den fazla olmaması tercih edilmektedir. Ancak bu yüzde miktarı da serbest silisin tane büyüklüğüne ve fırına verilen karışımın inceliğine göre değişebilmektedir.

Diğer Modüller

a) Prizlenme Modülü

Bir çimento klinkeri istenilen klinker minerallerini bünyesinde bulundurduğu sürece ve özellikle prizlenme açısından herhangi bir sorun yaşanmamaktadır. Prizlenme modülü olarak geliştirilen bir klinker çimentonun bu özelliğini ortaya koyar. Bu modül C₃S fazının C₂S fazına oranıdır ve genellikle 0,5'ten büyük olması istenir. Prizlenme modülü,

$$Me = \frac{C_3S}{C_2S} > 0,5$$

olarak formüle edilmiştir.

Prizlenme modülü arttıkça çimentonun başlangıç mukavemeti de artar. Bununla beraber hidrasyon ısısının düştüğü ancak kimyasal etkilere karşı direncin azaldığı anlamına gelir. Normal çimentolarda 0,5 değerinin üzerinde prizlenme modülü bulunur. Bununla birlikte ilk dayanımı yüksek çimentoların prizlenme modülü yaklaşık olarak 8'dir. Prizlenme modülü değeri 0,5'ten küçük olan çimentolar kof yapıdadır ve kendiliğinden parçalanma eğilimindedirler.

b) Pişirilebilirlik İndeksi

Bir klinker içerisinde bulunan oksitlerin miktarları, klinkerin en önemli indeksini oluşturur. Bu indeks döner fırın sistemi için en uygun klinkerleşme işlemini kontrol etmekle kalmayıp klinkerin öğütülebilirliğini ve ürünün fiziksel özelliğini de etkilemektedir. Kolay pişebilen karışımlar büyük klinker taneleri oluşturarak yakıt tasarrufu sağlar. Pişirilebilirlik indeksi,

$$BI = \frac{C_3S}{C_4AF + C_3A}$$

olarak tanımlanır.

Yapılan hesaplama sonucunda elde edilen BI değerlerine göre klinkerin pişme durumu aşağıda verilmiştir:

- BI = 5 (çok kolay pişer)
- BI = 4,2-4,7 (normal pişer)
- BI ≤ 3,8 (zor pişer)

3.1.1.7 Çimentoda Mineralojik Bileşimin Önemi

Bilindiği gibi pişirme işleminin amacı var olan minerallerin kristal yapılarını bozmak ve böylelikle onların okside bileşenlerine yeni ve ısısal stabilitesi olan değişik kristal yapılar kazandırmaktadır. Bu nedenle klinkerleşebilmede, hammaddenin içindeki minerallerin doğasının ve ısısal (termal) stabilitelerinin büyük önemi vardır. Ayrıca klinker mineraller için gerekli okside bileşenlerin uygun reaksiyon ısısında bulunmaları gereklidir. Başka

bir deyişle, hammadde içindeki mineraller en düşük ısıda dekompoze olmalı ve bunlar homojen bir şekilde dağılmalıdır.

Örneğin, klinkerleşebilme için önemli olan alümino ferrit eriyiği, gerekli alüminyum ve demir oksit bileşenlerinin her ikisinin de bir kil minerali içinde bulunduğu hallerde, kolaylıkla oluşur. Ancak bileşenlerin değişik ısılarda dekompoze olan farklı hammadde katkılarından gelmesi halinde alümina ferrit eriyiğın oluşması çok zorlaşır.

Klinkerleşebilmedeki farklılıklar özellikle silis, alüminyum ve demir oksit bileşenlerinin durumuna bağlıdır. Kalsiyum karbonat minerallerinin de klinkerleşebilme konusunda önemli etkisi var ise de genellikle kalsit halinde bulunmasından dolayı bu etki pek görülmez bununla birlikte yüksek yapısal bozuklukları olan kalsiti içeren maddelerin klinkerleşmesinin kolaylaştığı da bilinmektedir.

Kuvars, klinkerleşmeyi önemli şekilde etkiler bunun ise nedeni bir yandan yavaş reaksiyon veren bir bileşen olması diğeri yandan da öğütölmesinin zor olması dolayısı ile pişirmeyi zorlaştırmasıdır.

En önemli alüminyum bileşenleri, bileşimleri büyük ölçülerde değışen çeşitli kil mineralleridir. Oldukça saf kaolinitten montmorillonite ve yabancı oksitlerle iyice kirlenmiş illite kadar çok değışik içyapıda bulunabilirler. Bunun dışında kil minerallerinin kristal yapıları kalsite nazaran daha fazla düzensizlikler göstermektedir. Kristal yapı düzensizliğı arttıkça hammadde daha kolay klinkerleşmektedir. Montmorillonit ve illitin kristal yapılarında daha fazla düzensizlikler olduğı ve bunlar, düzenli bir kristal yapısı bulunan kaolinite oranla klinkerleşmeyi daha kolaylaştırmaktadır. Yapılan bir deneysel çalışmada kaolinit içeren ve beyaz çimento üretiminde kullanılan hammadde karışımının pişmesini 1500 – 1550°C civarında tamamlayabildiğı bildirilmiştir.

Alüminyum ve silis hammaddeye mika ve feldspat şeklinde de girebilirler. Bunlar yüksek alkali içermeleri nedeniyle likit faz formasyonunu destekler ve böylelikle klinkerleşmeyi kolaylaştırırılar. Ancak bunun bir yan etkisi anazıttı arttırmalarıdır.

3.1.1.8 Çimento Boyut Dağılımının Önemi

Çimento üretiminde klinkerleşebilmenin arttırılması için ince öğütme gerekmektedir. Bu sayede hammaddeyi meydana getiren mineraller daha büyük bir spesifik yüzeye sahip olduklarından kristal yapılarının bozunması ve klinker fazlarının oluşumu kolaylaşmaktadır.

Farini meydana getiren minerallerden klinker genellikle boyutça çok ince olduklarından kuvars ve kalsitin öğütülmesi klinker üretiminde büyük öneme sahiptir. Bununla beraber çok ince öğütmenin masraflı olduğu ve ayrıca teknik güçlükler de yarattığı için eldeki imkanlarla klinker üretiminde optimum bir öğütme boyutunun tespiti önem taşımaktadır. Ancak çok ince öğütme, klinker pişirme sıcaklığında ekonomik açıdan fayda sağlamasına karşılık bundan üretilcek klinkerde oluşacak boşluklar sebebiyle klinkerde öğünebilme zorlukları ortaya çıkacak ve bu da çimentonun kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir.

Klinkerleşmede amaç mümkün olduğu kadar tam reaksiyona varabilmektir. İri tanenin ince taneye nazaran daha büyük bir kütlesi vardır ve bir reaksiyonun tamamlılığı reaksiyona giren ve bu reaksiyon sonucu dönüşen kitle ile tanımlanır. Bunun için de reaksiyonun ne ölçüde tamamlandığı klinkerde yapılan serbest kalsiyum oksit ağırlık yüzdesinin tayini ile belirtilir. Bu nedenle klinker üretimine giren farinin belirli bir maksimum tane iriliğine sahip olması arzulanır. Genellikle bu boyut 100 mikron civarındadır.

Yapılan deneysel çalışmalar, farinde 90 mikronluk elek üzerinde kalan malzeme miktarı % 10 azaldığında, klinkerde serbest CaO miktarının sadece % 0,5 – 1 arasında azaldığını buna karşılık çimento mukavemetinde % 25'lere varan artışlar olduğunu göstermiştir.

3.1.1.9 Döner Fırın ve Döner Fırın Kimyası

Döner fırın, klinker üretimi için hammaddelerin pişirildiği, yatay olarak yerleştirilmiş içi boş bir silindirin şekline sahip, uzun bir fırındır. Çapı genellikle 2–6 m arasında değişen bu fırınlarda boy/çap oranı 15–30 civarındadır. Hammadde karışımının yaş sistemle beslendiği döner fırınlarda boy/çap oranı yaklaşık 30 civarındadır; hammadde

karışımının kuru sistemle hazırlanıp, önce ön ısıtıcılardan geçirildikten sonra beslendiği fırınlarda, boy/çap oranı yaklaşık 15'tir. Silindir şeklindeki fırın, bir ucu diğer ucundan birazcık daha yüksekte kalacak şekilde yerleştirilmektedir. Yaklaşık olarak % 3–4 eğime sahip olan çelik fırının iç yüzü ateş tuğlası ile kaplıdır. Kendi eksenini etrafında dakikada 1–2 devir yapan fırına bu nedenle 'döner fırın' denilmiştir.

Fırına girecek hammadde karışımı, fırının üst ucundan beslenmektedir. Fırındaki sıcaklık fırının alt ucundan püskürtülen yakıtla sağlanmaktadır. (Yakıt olarak fuel oil ve doğal gaz kullanılabilmeyle beraber son yıllarda ekonomik nedenlerle daha çok toz kömürden yararlanılmaktadır.) Fırının alt ucu en sıcak kısmı olup; yaklaşık 1500°C'dir. En soğuk kısmı en üst ucudur. Yaş sistemde kullanılan döner fırınlarda üst ucun sıcaklığı yaklaşık 100°C'dir. Kuru sistemde, hammaddelerin ön ısıtıcıdan geçerek girdiği döner fırınlarda, üst ucun sıcaklığı yaklaşık 800 – 900°C'dir. Üst uçtan beslenen hammadde karışımı, fırının dönme işlemi ve eğimi nedenleriyle aşağıya doğru yavaş yavaş hareket ederek gittikçe daha yüksek sıcaklıklarla karşılaşmaktadır. Sıcaklık etkisiyle hammaddede yer alan kimyasal olaylar sonucunda klinkerin bileşenleri oluşur. Pişen malzeme klinker olarak fırının alt ucundan alınır, soğutucuya dökülür. Soğutulan klinker bir kırıcıdan geçirilerek depolanır [60].

Döner fırında çimento hammaddeleri içindeki kireç, silis ve alümina sıcaklık arttıkça önce serbest hale gelirler, sonra da kendi aralarında birleşip yeni bileşikler meydana getirirler. Ön ısıtmada ve fırının en üst bölgesinde malzemedeki serbest ve kristal sular buharlaşır, kil ayrışır ve CO₂ kalkerden ayrılmaya başlar. Aşağıya doğru, daha sıcak bölgelerde kalsinasyon tamamlanır, serbest kalan CaO kilden ayrılan SiO₂ ve Al₂O₃ ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatları meydana getirir [61].

Çimento genel olarak kuru sistemde üretilmektedir. Kuru sistemde çalışan çimento fabrikalarında çimento üretiminde izlenen yol maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir:

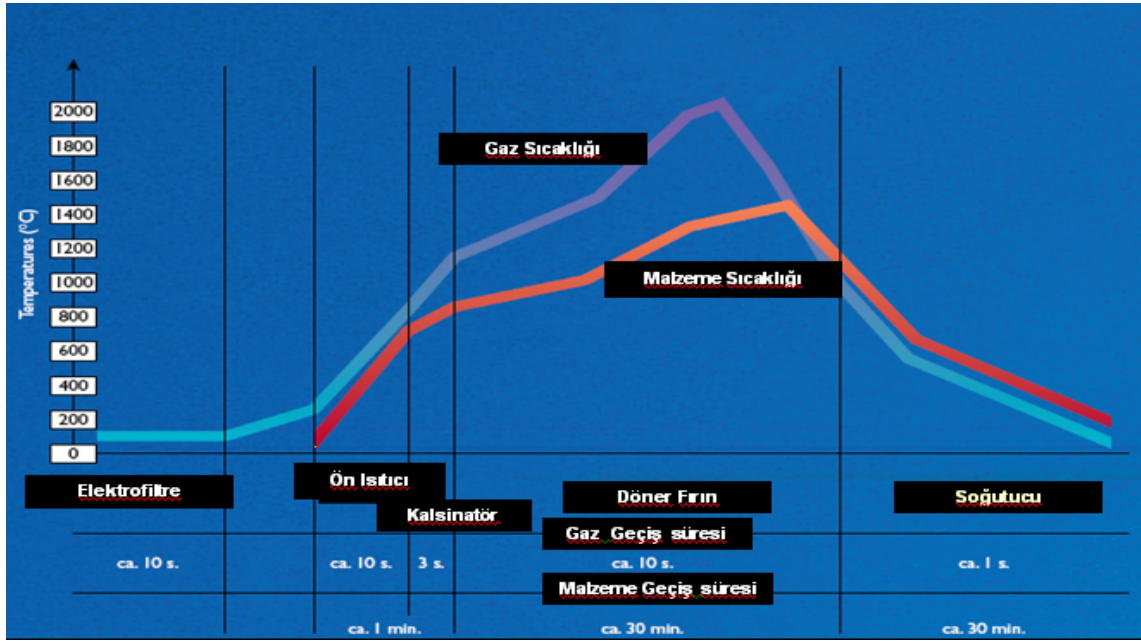
1. Belirli bir kimyasal bileşimi verecek şekilde kalker, kil ve demir cevherinin değişik oranlarda karıştırılması.
2. 1 cm altına boyut küçültme.

3. 100°C sıcaklıkta değirmen-havalı klasifikatör (sınıflandırıcı) kapalı devre sisteminde karışımın 90 mikron altına öğütülmesi
4. Ön ısıtıcı sistemi içinde (100 – 900°C sıcaklık aralığında)
 - +500°C 'de killerin kristal suyunun uzaklaştırılması.
 - +805°C' de kalkerin parçalanarak CO₂'nin uzaklaştırılması
 - 800 – 900 ° C arasında dikalsiyum silikat oluşumu.
5. Döner fırın sistemi içinde (900 – 1450°C sıcaklık aralığında)
 - 1095 – 1205°C sıcaklık aralığında trikalsiyum alüminat (C₃A) ve tetrakalsiyum alümina ferrit (C₄AF) oluşumu
 - 1260 – 1455°C sıcaklık aralığında trikalsiyum silikat oluşumu (C₃S)

Farinden klinkere geçişte çimento hammaddelerinde mineral faz değişimleri meydana gelmekte olup, sıcaklığa bağlı olarak gelişen başlıca reaksiyonlar Çizelge 3.11'da özetlenmiştir. Şekil 3.4'deki [60] diyagramda ise; fırın içindeki gaz ve malzemenin sıcaklık dağılımı verilmiştir. Sıcaklığın etkisiyle meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ise Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.11 Döner fırında sıcaklığa bağlı değişen reaksiyonlar

650–1050 °C			
I	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 5\text{CaCO}_3$	→	$\text{C}_3\text{A} + 2 \text{C}_2\text{S} + 2 \text{H}_2\text{O} + 5 \text{CO}_2$
II	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{CaCO}_3$	→	$\text{C}_2\text{F} + 2 \text{CO}_2$
III	$\text{C} + \text{O}_2$	→	CO_2
IV	$\text{SiO}_2 + 2 \text{CaCO}_3$	→	$\text{C}_2\text{S} + 2 \text{CO}_2$
V	CaCO_3	→	$\text{C} + \text{CO}_2$
1250–1450 °C			
VI	$\text{C}_2\text{F} + \text{Ca} + \text{C}$	→	C_4AF
VII	$\text{C}_3\text{A} + 2\text{C}$	→	C_3S
VIII	$\text{C}_2\text{F} + \text{Ca} + \text{C}$	→	C_4AF
IX	$\text{C}_2\text{S} + \text{C}$	→	C_3S



Şekil 3.4 Çimento fırını içinde gaz ve malzemenin sıcaklık davranışı

Çizelge 3.12 Klinker oluşumunda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar

SICAKLIK	PROSES	TERMAL DEĞİŞİM
100 °C	Hammaddelerin serbest suyunun buharlaşması	Endotermik
500 °C VE ÜZERİ	Kil minerallerinin dehidratasyonu	Endotermik
800-900 °C	Kalsinasyon başlar (CaCO_3 'ün bozunması)	Endotermik
900 °C VE ÜZERİ	Kil mineral ürünlerinin rekristalizasyonu $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ve monokalsiyum silikat oluşması ve dikalsiyum şekline dönüşmesi	Ekzotermik
900-1200 °C	CaO ve alüminasilikatlar arasında reaksiyon	Ekzotermik
1185-1285 °C	$(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ ve $(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$ ve $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ oluşması	Endotermik
1250-1280 °C	Sıvı fazın başlaması	Endotermik
1280 °C VE ÜZERİ	Ergimenin devam etmesi ve çimento bileşiklerinin oluşması ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)	Muhtemelen Endotermik

3.1.2 Çimento Üretiminde Atık Kullanımı

Avrupa çimento endüstrisinde önemli miktarda atıktan türetilen yakıtın geri kazanımı sağlanmaktadır ve bazı fabrikalarda %80'i aşan bir oranda fosil yakıt ikamesi yapılmaktadır. Bu durum, çimento endüstrisinin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve daha az doğal kaynak kullanılmasına katkı sağlamaktadır.

Bazı AB Üyesi Ülkelerdeki işlenmemiş atıkları toprağa gömülmesine ilişkin yasa, gittikçe artan sayıda mekanik ve mekanik-biyolojik atık arıtma tesisinin devreye girmesine neden olmuştur. Bunun sonucunda, ön arıtması yapılmış olan atık fraksiyonlarının kullanımı konusuna olan ilgi artmıştır.

Uygun bir şekilde yapılacak arıtmadan sonra, münferit atık fraksiyonları, çimento fabrikalarında çevreye uyumlu olarak yeniden kullanım gereksinimlerini sağlayabilmektedir. AB-27 çimento sanayi, çimento fabrikalarında seçilmiş atık kollarının yeniden kazanılması konusunda uzun yıllardır faaliyet göstermektedir. Geleneksel olarak; yenilenemeyen doğal kaynakları, mineralleri ve fosil yakıtları kullanan bu sanayi, kendisini bu kaynakların korunması için atık kullanmaya ve aynı zamanda nihai atık yaratmamaya adanmıştır [62, 47].

3.1.2.1 Genel Hususlar

Çimento üretiminde birincil hammaddelerin ve/veya fosil yakıtların yerine değişik türde atık maddeler kullanılabilir ve bu durum doğal kaynakların tasarrufuna katkıda bulunur. Temelde, klinker pişirme prosesinin özellikleri, çevreye yararlı olan atıktan enerji eldesi ve malzemeye geri kazanımı uygulamalarını mümkün kılar. Atık kullanımı için gerekli olan proses özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- döner fırınlarda yaklaşık 2000 °C azami sıcaklık (ana pişirme sistemi, alev sıcaklığı)
- döner fırınlarda 1200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yaklaşık 8 saniye gaz bekleme süresi
- döner fırının sinterleme bölgesinde yaklaşık 1450 °C malzeme sıcaklığı
- döner fırında oksitleyici gaz atmosferi

- ikincil yakma sisteminde 850 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yaklaşık 2 saniyeden fazla gaz bekleme süresi; ön kalsinatörde bekleme süreleri daha uzundur ve sıcaklıklar daha yüksektir.
- ikincil yakma sisteminde ve/veya kalsinatörde 850 °C katı madde sıcaklığı
- yeteri derecede uzun bekleme sürelerinde yüksek ısı nedeniyle oluşan yük dalgalarında stabil yanma koşulları
- yeteri derecede uzun bekleme sürelerinde yüksek ısı nedeniyle organik kirleticilerin parçalanması
- HF, HCl, SO₂ gibi gaz bileşiklerin alkali reaktantlara tutunması
- partikül bağlı ağır metaller için yüksek bekleme kapasitesi
- PCDD/F'nin "de-novo sentezi"ne yol açtığı bilinen ısı aralığında atık gazların kısa bekleme süreleri
- yakıt küllerinin tümüyle klinker bileşenleri içinde tutulması ve dolayısıyla eşzamanlı malzeme (örneğin aynı zamanda bir hammadde bileşeni olarak) ve enerji geri kazanımı
- klinker matrisi içindeki tüm malzemelerin kullanılması nedeniyle ürüne özgü atıklar oluşmaz, ancak Avrupa'da bulunan bazı çimento fabrikaları baypas tozunu bertaraf etmektedirler
- uçucu olmayan ağır metallerin klinker matrisi içinde kimyasal-mineralojik olarak tutulması [50, 63, 47].

Araştırmalar, döner fırınlarda tehlikeli maddelerin malzeme ve klinker tarafından, örneğin şaft fırınlar gibi, diğer tür fırınlarda olduğundan daha iyi absorbe edildiklerini göstermektedir [63, 64].

Çok çeşitli türdeki farklı atıklar hammadde ve/veya yakıt olarak kullanılır. Atık maddelerin kullanımı düşünülmenden önce, atık maddelerin uygun bir biçimde seçilmesi, atık maddelerin kapsamlı analiz prosedürü ve ön arıtımı gibi farklı temel ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır. Yakıt küllerinin tümüyle klinkerin içinde tutulması nedeniyle, klinkerin kalite standartlarını korumak için bu atıklar işlenmesi

gereklidir. Belirli bir fabrikada hangi tür atığın kullanılabileceğine ilişkin karar için tek bir yanıt verilemez.

Değerlendirmeler ve kararlar; klinker üretim süreci ve proses koşullarına, hammadde ve yakıt bileşimlerine, besleme noktalarına, kullanılan baca gazı arıtım tekniğine, karşılaşılan atık yönetimi sorunlarına ve örneğin, Atık Yakma Direktifi (WID) gibi mevcut Avrupa yönetmeliklerinin ve ulusal yönetmeliklerin gereksinimlerine dayandırılmalıdır [26].

Temel bir kural olarak, yakıt ve/veya hammadde olarak kabul edilen atıklar döner fırına aşağıda belirtilen katma değeri sağlamalıdır:

- atık maddeden elde edilen kalorifik değer
- atık maddeden elde edilen maddi değer

Ayrıca atıkların fiziksel ve kimyasal bileşimleri, özellikleri ve kirleticilerinin yanı sıra hacim ve kategorileri, de göz önünde bulundurulmalıdır. Çimento sanayi tarafından kullanılan atıktan türetilen yakıtlar, genelde bir ön arıtmadan geçen (örneğin ufalama, karıştırma, öğütme ve homojenizasyon) ve uygun kalite güvencesi gerektiren seçilmiş atık kollarından elde edilir. Atık maddelerin hazırlanması genellikle atık arıtma tesislerinde gerçekleştirilir.

Fırına atık besleme noktaları

Hammadde olarak kullanılan atıklar genelde fırına konvansiyonel hammaddeler gibi, diğer bir deyişle normal olarak, farinin sağlandığı yoldan beslenirler. Yakıtların çimento fırınına beslenmesi için farklı besleme noktaları kullanılabilir.

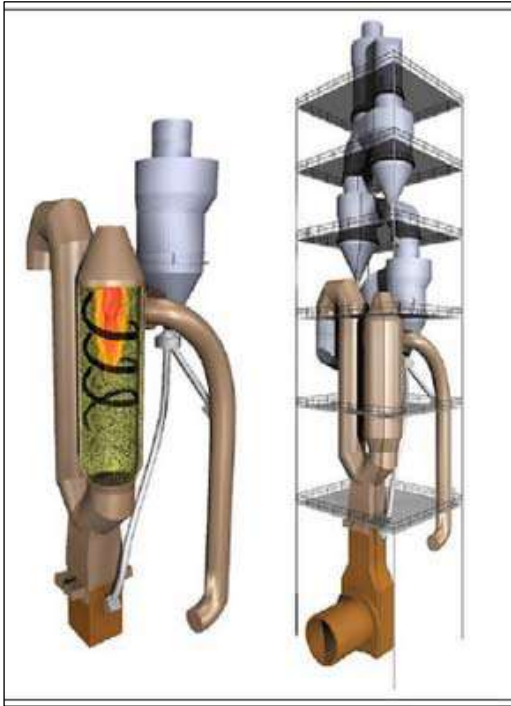
Fırın sistemine yakıt ikmali yapılabilecek olası besleme noktaları aşağıda belirtilmiştir:

- döner fırın çıkışındaki ana brülör vasıtasıyla
- döner fırın giriş ucundaki geçiş odasında bulunan besleme oluğu vasıtasıyla (dökme yakıt için)
- ikincil brülörler vasıtasıyla besleme kanalına
- ön kalsinatör brülörleri vasıtasıyla ön kalsinatöre
- besleme oluğu vasıtasıyla ön kalsinatöre (dökme yakıt için)

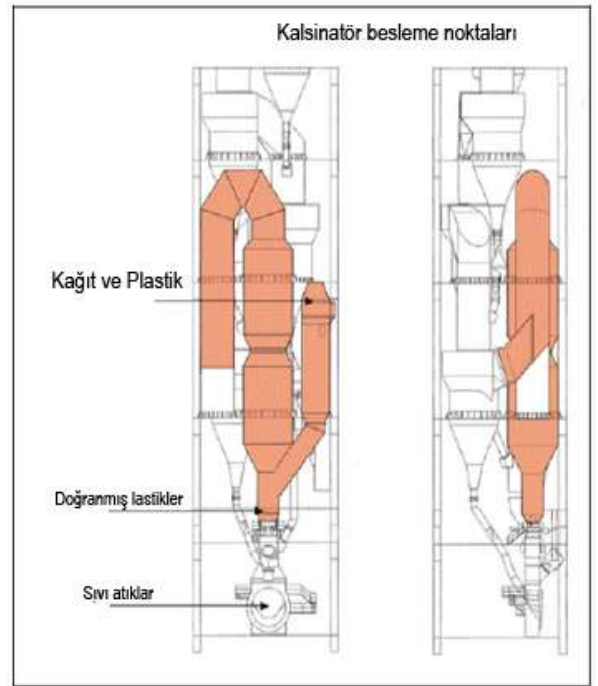
- Uzun yaş ve kuru fırınlarda orta fırın vanası vasıtasıyla (dökme yakıt için)
- Lepol ızgaranın sonu yoluyla.

Bu noktalar aynı zamanda atıkların çimento üretim sürecine yakıt ve/veya hammadde olarak beslenmesi için de kullanılabilir. Emisyonlar üzerinde etkisi olabileceği için, yakıtların fırına beslenme şeklinin çok önemli olduğuna dikkat edilmelidir. Genelde, bu besleme noktaları arasında, yakıtlardan kaynaklanan baca gazlarının fırının en yüksek sıcaklık bölgesine geçişi için bunların ana brülör yoluyla beslenmesi şeklinde tek bir yol vardır. Yukarıda açıklandığı gibi diğer besleme noktaları ile ilgili olarak sıcaklık ve kalma süresi fırının tasarımına ve işleyişine bağlıdır.

Beş siklona kadar ön ısıtıcı kademeleri ve bir ön kalsinatörü bulunan fırın sistemleri yeni kuru proses tesisleri için standart teknik olarak kabul edilmektedir. Bunun bir örneği Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Atıkların yakıt olarak kullanılması ile ilgili kalsinatör tekniği Şekil 3.6’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Ayrı hatlı/aşağı çekişli kalsinatör örneği [64]



Şekil 3.6 Kalsinatöre atık besleme noktaları örneği [64]

Ana brülör yolu ile beslenen atıklar, birincil yanma bölgesinde 2000°C'ye varan yüksek sıcaklıklarda, ayrışır. Atık yakıtlar da dahil olmak üzere farklı türdeki yakıtların kullanımı için çok kanallı brülörler tasarlanmıştır. İkincil bir brülöre, ön ısıtıcıya veya ön kalsinatöre beslenen atıklar halojenli organik maddelerin ayrıştırılması için her zaman yeterli olmayan düşük sıcaklıklarda yakılacaktır. Fırının üst ucundan veya parça yakıt olarak beslenen maddelerin içindeki uçucu bileşenler buharlaşabilir. Bu bileşenler birincil yanma bölgesine geçmezler ve bu nedenle ayrışmazlar veya klinker içinde bağlı kalmazlar. Bu nedenle, uygun olmayan bir şekilde kullanıldığı takdirde, uçucu metalleri (cıva, kadmiyum, talyum) veya uçucu organik bileşikler içeren atıkların kullanımı, cıva, kadmiyum, talyum emisyonlarında veya organik emisyonlarda (örneğin VOC'lar) artışa yol açabilir.

Kalsinasyon bölgesinden önce düşük sıcaklıklarda uçucu hale gelebilen bileşenleri (örneğin hidrokarbonlar, solventler, atık yağlar) içeren atık maddeler dikkate alınmalıdır. Bunlar, fırın sisteminin yeterince yüksek ısıya sahip bölgelerine beslenmelidir.

Atık kullanımının sağladığı enerji verimliliği

Çimento sanayi, çimento üretim süreçlerinde kullanılan yakıtlar ile ilgili enerji verimliliğinde ilerleme sağlamış olup, iyileştirmeler için alternatif yollar geliştirmeye devam edecektir. Ancak, proseste kullanılan atık yakıtların kalorifik değerleri, enerji verimliliğinde iyileştirme sağlamak için çok önemli bir kalite gereksinimi olup, kalsinasyonu destekleyen termal proses için de olumlu bir girdidir [63, 65, 62].

3.1.2.2 Atık Yakıtların Türleri ve Kalorifik Değerleri

Klinker pişirme süreci konvansiyonel yakıtların bazı bölümlerinin yerini alan değişik türdeki atık malzemelerin kullanımı için uygun koşullar sunmaktadır. Çizelge 3.13'de listelenmiş olan ve tehlikeli ve tehlikesiz atıklar olarak sınıflandırılan çeşitli türdeki atıklar Avrupa çimento fırınlarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu kalorifik atık maddelerin çimento fırınlarında birincil yakıtların yerine kullanılabilmesi nedeniyle tutarlı bir atık kalitesinin olması esastır (örneğin: yeterli kalorifik değer, metal, halojen

(örneğin: klor) ve kül içeriği, atığın brülörler için uygun olması). Klinker üretimi sırasında atık yakıtların kullanımında sürekli bir artış söz konusudur, ancak tehlikeli olmayan atıkların kullanımındaki artış, tehlikeli atıkların kullanımındaki artıştan daha önemlidir [66, 64, 63, 67].

Çizelge 3.13’de atık yakıtların kullanım listesi ve çeşitli türdeki atıkların kalorifik değer örnekleri yer almaktadır [66, 68, 62, 47, 64].

Çizelge 3.13 2003 ve 2004 yıllarında AB-27’de çimento fırınlarında yakıt olarak kullanılan değişik atık türleri [66, 47, 64]

GRUP	ATIK YAKITLARIN TÜRLERİ (TEHLİKELİ VE TEHLİKESİZ)	KALORİFİK DEĞER ÖRNEKLERİ (MJ/KG)
1	ODUN	Yaklaşık 16
2	KAĞIT KARTON	3-16
3	TEKSTİL	40’a kadar
4	PLASTİK	17-40
5	İŞLENMİŞ FRAKSİYONLAR (ÖRNEĞİN ATY)	14-25
6	KAUÇUK/LASTİKLER	Yaklaşık 26
7	ENDÜSTRİYEL ÇAMUR	8-14
8	KENTSEL ARITMA ÇAMUR	12-16
9	HAYVAN ATIKLARI, KATI YAĞLAR	14-18, 27-32
10	KÖMÜR/KARBON ATIĞI	14-21,5
11	ZİRAİ ATIKLAR	20-30
12	KATI ATIKLAR (EMPRENYE EDİLMİŞ TALAŞ)	14-28
13	SOLVENTLER VE İLGİLİ ATIKLAR	20-36
14	YAĞLAR VE YAĞLI ATIKLAR	25-36
15	BİTÜMLÜ ŞİST BAZLI YAKIT KARIŞIMLARI (% 85-90 BİTÜMLÜ ŞİST)	9.5
16	KANALİZASYON ÇAMURU (NEM İÇERİĞİ > % 10)	3-8
17	KANALİZASYON ÇAMURU (NEM İÇERİĞİ < % 10 İLA 0)	8-13

3.1.2.2.1 Katı Atık Yakıtlar

Yanıcı katı atıkların tümü klinker pişirme sürecinde yakıt olarak kullanıma uygun değildir. Katı atıklar çok farklı kökenleri ve bileşenleri olan ve aşağıda örnekleri verilen homojen veya homojen olmayan karışımlardan oluşabilir:

- yanıcı fraksiyonlar, örneğin kağıt, karton, plastik, kauçuk ve odun artıkları
- organik fraksiyonlar içeren değişik miktarlardaki inert maddeler, örneğin; kum, taş, seramik, demirli/demir-dışı metaller ve organik ıslak malzemeler
- tehlikeli fraksiyonlar, örneğin; katran, reçineler, emprenye edilmiş talaş veya tehlikeli olmayan malzemeler.

Karışık kentsel atık, karışık ticari atık veya karışık inşaat, yıkım atıkları ve bazı tehlikeli katı atıkların yakıt olarak kullanılmadan önce atık yönetimi tesislerinde ön işleme tabi tutulmaları gereklidir. Ayırma, kırma ve peletleme gibi atık arıtma işlemlerinin kapsamı atık yakıt uygulamasına bağlıdır.

Katı yakıt hazırlama teknikleri, atıkların kaynakları ve türleri ile çimento sanayinin gereksinimlerine bağlı olarak büyük değişiklikler gösterir. Önemli gereksinimlerden birinin kaynağı, atık yakıtı fırına aktarmak için kullanılan aktarma ve ateşleme sistemidir:

- ana ateşleme sistemi (fırın girişinde/çıkışında, atık yakıtların borular vasıtasıyla enjeksiyonu): kurutulmuş çamur gibi yüksek ölçüde aşındırıcı atıklar ve alışılmadık partikül şekilleri ve boyutları operasyonel sorunlara neden olabilir. Katı atık yakıtların fırına taşınması için pnömatik transfer sistemleri kullanıldığı takdirde tıkanmalar ve döner parçaların hasar görmesi önlenabilir (sistem tümüyle hareketli parçalar olmaksızın çalışır). Yakıtle birlikte fırına enjekte edilen taşıma havası miktarı, fırın yanma stokiyometrisi açısından ihmal edilebilir düzeydedir. Partikül boyutlarının daha büyük olması, büyük pnömatik konveyör hatlarını ve üfleyicileri gerektirir. Bu nedenle, atık yakıtın boyutunun küçültülmesi ile yumuşak peletlenmesi önemli olan işlem adımlarıdır. (Genel olarak, partikül boyutu 25 mm'den daha büyük olmamalıdır). Yumuşak

peletleme yoluyla sıkıştırmanın avantajı, yakıtın akış ve dozaj özelliklerinin iyileşmesidir.

- ikincil yakma sistemi (yakıt fırın girişi, döner fırın girişi ve en alt siklon aşaması veya kalsinatör arasındaki yükseltici vasıtasıyla beslenir): katı atık yakıtlar için boyut sınırlaması ikincil yakma sistemi için önemli değildir. Fırın girişi veya fırın ortası teknolojisi vasıtasıyla bütün halindeki lastikler bile beslenebilir. Ayrıca, yüksek kül içeriği olan atıklar da kullanılabilir.

3.1.2.2 Sıvı Atık Yakıtlar

Sıvı atık yakıtlar, kullanılmış solventler, boya artıkları veya uygun kalorifik değerleri olan atık yağlar gibi değişik atıkların özel atık yönetimi tesislerinde karıştırılması veya ön işleme tabi tutulması suretiyle hazırlanabilir.

Sıvı atık yakıtların elleçlenmesi, örneğin depolanması ve beslenmesi sırasında organik bileşiklerin emisyonlarını önlemek için bazı tehlikeli sıvı atıklara (örneğin solventler) dikkat edilmelidir. Gerekli yerlerde kullanılmak üzere örneğin buhar geri kazanımı gibi çeşitli teknikler vardır. Buhar geri kazanım sistemleri, organik maddelerin akışına sadece buhar geri kazanım sistemi bağlantısı yapıldığında izin verilmesini ve buhar geri kazanım sistemi ile buna bağlı tesisattan normal çalışma esnasında, güvenlik nedeniyle gerekli olan salımlar dışında, gaz salınmamasını sağlayacak şekilde çalıştırılır [63, 51, 47].

3.1.2.3 Atık Kalite Gereksinimleri Ve Girdi Kontrolü

Çimento fırınlarında hammadde ve/veya yakıt olarak kullanılan atık malzemeler, tümüyle klinkerin içinde bağlı kalmaları nedeniyle ve hava emisyonları üzerinde olumsuz etkileri en aza indirmek için farklı kalite standartlarına ulaşmak zorundadırlar. Atıkların sabit bir kaliteye sahip olmaları esastır. Atık yakıt özelliklerini garanti altına almak için, bir kalite güvence sisteminin olması gereklidir. Bu gibi bir güvence sistemi özellikle, örnekleme, numune hazırlama, analiz ve dış izleme ile ilgili hükümleri içerir. Daha yararlı bilgiler CEN/TC 343 'Geri Kazanılan Katı Yakıtlar' gibi Avrupa

Standardizasyon Komitesi teknik şartnamelerinde bulunabilir. Ayrıca, mevcut Avrupa yönetmeliklerinin ve ulusal yönetmeliklerin gereksinimleri göz önünde bulundurulmalıdır. Atıkların beraber yakılması sırasında Atık Yakma Direktifi (WID) gereksinimleri, örneğin tehlikeli atık kullanımı sırasında operatör tarafından yerine getirilen kabul prosedürleri ile ilgili gereksinimler, karşılanmalıdır [Avrupa Birliği, 2000]. Kalite gereksinimleri ile ilgili temel bir kural olarak, yakıt ve/veya hammadde olarak kabul edilen atıklar çimento fırınına aşağıda belirtilen katma değerleri sağlamalıdır:

- Atık malzemeden elde edilen kalorifik değer
- Atık malzemeden elde edilen malzeme değeri

Yeterli kalorifik değere sahip olan atıklar çimento fırınlarında birincil yakıtların yerini alabilir. Bu atıkların kalorifik değerlerinin çok değişken olduğu dikkate alınmalıdır.

Yanıcı atıkların veya ayrılabilir kalorifik fraksiyonlara sahip atıkların yakıt olarak kullanılmak üzere hazırlanması işlemi, genellikle çimento fabrikası dışında yapılır. Bu yakıtlar genellikle tedarikçi veya fabrikasında hiçbir ilave işleme tabi tutulmaksızın doğrudan çimento fırınlarında kullanılabilecek şekilde hazırlanır. Ayrıca, teslim edilen atık malzemeler çimento fırınında kullanılmadan önce çimento fabrikası personeli tarafından da düzenli olarak kontrol ve analiz edilir. Değişik kalite özelliklerini kontrol etmek amacıyla özel laboratuvar teçhizatı kullanılır.

Belirli niteliklere sahip atık yakıtları hazırlamak ve harmanlamak için kullanılan teknikler, malzeme girdilerinin özelliklerine ve kullanıcıların gereksinimlerine bağlıdır. Üretime özgü atıklar gibi atık malzemeler bile termal özellikler ve kimyasal bileşim gibi sabite yakın niteliklere sahip olan homojen bir karışım sağlamak üzere kullanılmadan önce atık tesislerinde arıtılır ve harmanlanır. Ancak bazı durumlarda, örneğin kullanılmış lastikler veya kullanılmış yağlar gibi atıklar başka bir işleme tabi tutulmaksızın teslim edildikleri şekliyle kullanılabilir. Farklı kaynaklardan gelen karışık katı atıklar veya karışık kentsel atıklardan ayrılmış olan fraksiyonlar gibi homojen olmayan atıklar, sabit bir düşük kirletici girdisine sahip olan güvenilir bir kaliteyi elde etmek için daha fazla izleme çabası harcanmasını gerektirir.

Atık yakıtlar için önemli olan özellikler ve parametreler, kalorifik değer ile birlikte içerdikleri su, kül, kükürt, klor ve ağır metallerdir (özellikle cıva, kadmiyum ve talyum). Ayrıca, brülörler için uygun olmaları da önemlidir. Klor, üretim süreci üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, kabul edilebilir klor konsantrasyonu fabrikadaki özel duruma bağlıdır, ancak bu konsantrasyon, fırın sisteminde operasyonel sorunlara örneğin ön ısıtıcıda tıkanmaya yol açmamak için mümkün olduğunca düşük tutulur. Yüksek hacimli klor girişinin olduğu durumlarda, korozyonu, tıkanmayı, kapanmayı vb. önlemek için genellikle bir klor baypası yapmak gerekebilir.

Klor, kükürt ve alkali içeren hammaddeler ile yakıtlar (atıklar dahil) fırına beslendiğinde, fırın ile ön ısıtıcı arasındaki dahili sirkülasyon bir zenginleştirme döngüsü görevini yapar. Yüksek konsantrasyonlarda, böyle bir döngü fırın giriş alanında, kalsinatörde ve iki alt kademede tortu oluşmasına neden olur. Aksamaların minimize edildiği düzenli bir fırın operasyonu enerji tasarruflu klinker üretiminin esasını teşkil ettiğinden, kaplama oluşumunun neden olduğu faaliyet durdurmalarından kaçınılmalıdır. Bu nedenle, alkalilerin, klorun ve daha az oranda kükürtün yüksek sirkülasyonu fırının girişinde gaz baypası yapılmasını zorunlu kılar. Proses gazının bir miktarını gidermek suretiyle klor, kükürt ve alkalilerin yanı sıra diğer maddeler de dışarı atılır. Sıcak hammaddenin ve sıcak gazın giderilmesi sonuçta giderilen fırın giriş gazı yüzdesi bazında yaklaşık 6 - 12 MJ/ton klinker daha fazla özgül enerji tüketimine yol açar. Tipik baypas oranları klor baypası için %15'e kadar ve kükürt baypası için % 70'e kadardır. Baypas gazı ile birlikte çıkartılan SOx'in doğal olarak yıkanması aşağıda belirtilenlere bağlıdır:

- reaktif kireç miktarı
- >300 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda alıkoyma süresi
- su (buhar) varlığında <200 °C'den daha düşük sıcaklıklarda alıkoyma süresi.

Konfigürasyonuna ve kullanılabilecek ilave termal enerjiye bağlı olarak baypas yapılması ilave emisyonların oluşmasına neden olabilir [63, 69, 65, 62].

Tipik klor konsantrasyonları <0.5 - % 2 arasında değişir. Atık yakıtların uygunluğunun değerlendirilmesi ve kontrolü için AB-27 içinde özel sistemler ve şartnameler geliştirilmiştir, örneğin klinker pişirme işlemi için kullanılmak üzere seçilen atıklar için izin verilen maksimum kirleticin değerler ile ilgili listeler geliştirilmiştir. Fabrikaya özgü özellik ve izin gereksinimlerine bağlı olan şartnameler için fabrikaya özgü durum dikkate alınmıştır. Ayrıca, sıvı atık yakıtların teslimine ilişkin teknik normlar şartnamelerde belirlenmiştir.

Kullanılan diğer sistemler, çoğunlukla metal içeriğine odaklanmıştır. Bu şartların tümünü karşılamayan diğer malzemelerin de kullanılabileceği dikkate alınmalıdır. Arıtma çamuru veya tahta atıklar kullanıldığı takdirde, muhtemel cıva emisyonları nedeniyle cıva girdisi düzenli olarak izlenmelidir.

Ayrıca, yeterli miktarda atık yakıt mevcut olmalıdır. Kaynak seçimi, çimento sürecinde operasyon veya kalite sorunlarına yol açabilecek malzemeleri azaltmak amacıyla tekli akışlarda dikkate alınacak ilk husustur.

Yakıtların (konvansiyonel veya atık) seçiminde, ürünlerin kalite gereksinimleri göz önüne alınmalıdır. Sonuç olarak çimentonun üretiminde kullanılmaya uygun atık yakıtların türleri ve miktarları konusunda büyük ölçüde fabrikaya özgü durumlara bağlı olan sınırlamalar vardır [64, 64, 65, 62, 47].

3.1.2.3.1 Atıkların metal konsantrasyonları

Metallerin konsantrasyonları atıkların kaynağına göre değişir. Birçok Avrupa ülkesinde düzenleyici kurumlar ve/veya sanayi tarafından yakıt ve/veya hammadde olarak kullanılabilecek değişik atıklar için izin verilen maksimum madde değerlerine ilişkin listeler düzenlenmiştir. Ayrıca özel atıkları kapsayan diğer izin verilmiş çevresel performanslarda, değişik değerlere rastlanabilir. Ancak, yerel duruma bağlı olarak farklı kriterler uygulandığı için mutabık kalınmış bir eşik sınır değeri yoktur. Uygulanan kriterler aşağıda belirtilenleri içerebilir:

- ulusal çevre politikaları ve mevzuat
- çimento sanayinin etkisinin bölgesel endüstriyel gelişme bağlamında önemi

- bölgesel çevre yasa ve standartlarını uyumlaştırma çabaları
- geleneksel hammadde ve atıklardaki maddelerin düzeyleri
- fabrika koşulları ve emisyonları
- mevcut atıklar için arıtma alternatifleri
- gerekli olan asgari kalorifik değerler
- çimento kalitesi gereksinimleri.

3.1.3 Atık Kullanımı Kalite Standartları

Atık yakıtların minimum kalite koşullarını belirleyerek, endüstriyel proseslerde kullanılan ikincil yakıtların kullanılmasını teşvik edecek ve böylece çevresel kirlenmenin yükünü azaltacak ulusal girişimler mevcuttur. Almanya'da sertifika etiketi tanıtılmış ve uygulamaya alınmıştır. Örneğin İsveç ve Birleşik Krallık'ta uygulamaya konulan, fakat 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. Finlandiya ve İtalya'daki ATY ile ilgili kalite standartları Çizelge 3.14'de verilmiştir.

Çizelge 3.14 Katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için kalite standartları [80]

KARAKTERİSTİK	BİRİM	İTALYA	FİNLANDİYA ¹⁾			
			DL	KALİTE SINIFI		
				I	II	III
SU MİKTARI	%	<25				
ISIL DEĞERİ	KJ/kg	15,000				
KÜL MİKTARI	%	20				
KLOR MİKTARI	% (m/m) ²⁾	0.9	0.01	<0.15	<0.50	<1.50
KÜKÜRT MİKTARI	% (m/m) ²⁾	0.6	0.01	<0.20	<0.30	<0.50
AZOT MİKTARI	% (m/m) ²⁾	-	0.01	<1.00	<1.50	<2.50
POTASYUM VE SODYUM MİKTARI ³⁾	% (m/m) ²⁾	-	0.01	<0.20	<0.40	<0.50
ALUMİNYUM MİKTARI	% (m/m) ²⁾	-	0.01	⁴⁾	⁵⁾	⁶⁾
CİVA MİKTARI	mg kg ⁻¹	-	0.1	<0.1	<0.2	<0.5
KADMIYUM MİKTARI	mg kg ⁻¹	-	0.1	<1.0	<4.0	<5.0
KURŞUN	mg kg ⁻¹	200				
BAKIR	mg kg ⁻¹	300				
MANGANEZ	mg kg ⁻¹	400				
KROM	mg kg ⁻¹	100				
ÇİNKO	mg kg ⁻¹	500				
NİKEL	mg kg ⁻¹	40				
ARSENİK	mg kg ⁻¹	9				
KADMIYUM+CİVA	mg kg ⁻¹	7				

Notlar:

1) Sınır değer, miktarı ≤ 1000 m³ olan yakıtı veya bir aylık süre içinde üretilen ve teslimatı yapılan yakıt miktarına aittir, ve an 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) miktarı.

4) Metalik alüminyum 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.

DL algılama sınırı

İsveç'teki çimento tesislerinde kullanılan yakıtlar için kriterler Çizelge 3.15'de verilmiştir.

Çizelge 3.15 İsveç'teki çimento tesislerinde kullanılan yakıtlar için şartname [70]

PARAMETRE	KRİTERLER	
	"SPECIALBRÄNSLE A"	"LATTBRÄNSLE"
KALORİ (ISIL) DEĞERİ	23.9 - 31.4 MJ/kg	25.1 - 31.4 MJ/kg
PARLAMA NOKTASI	< 21°C	< 21°C
ÖZGÜL YOĞUNLUK, 15°C	0.9 - 1.1 kg/dm ³	0.80 - 0.95 kg/dm ³
VİSKOZİTE	Pompalanabilir	1 - 5 cst, 50°C sıcaklıkta
KÜL MİKTARI	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

2006 yılında Almanya'da ek yakıt kullanım oranı % 80'lerin üzerine çıkmıştır. Almanya'da çimento fabrikalarında başlıca atık yağlar, lastikler, odun, işlenmiş fraksiyonlar (ATY) ve solventler ek yakıt olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.16'de çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılan endüstriyel atık ve solventlerin kabul kriterleri verilmektedir [63].

Çizelge 3.16 Endüstriyel atık ve solventler için kabul değerleri

PARAMETRE	BİRİM	ENDÜSTRİYEL ATIK	SOLVENT
S	%	2	3 ¹⁾
Cl	%	1	1
Cd	mg/kg	10	10 ²⁾
Tl	mg/kg	1	0,5
Hg	mg/kg	0,5	1
Sb	mg/kg	75	5
As	mg/kg	10	20
Pb	mg/kg	100	700 ³⁾
Cr	mg/kg	100	100
Co	mg/kg	20	300
Cu	mg/kg	300	5
Mn	mg/kg	100	1000
Ni	mg/kg	100	10
V	mg/kg	25	0,5
Sn	mg/kg	75	1
1)Yıllık ortalama 1 mg/kg 2) Yıllık ortalama 5 mg/kg 3) Yıllık ortalama 300 mg/kg			

EURITS'in çimento işletmelerinde ikame yakıt olarak birlikte yakılacak atıklarla ilgili ölçütleri, Çizelge 3.17'de verilmiştir. Çimento endüstrisi bu ölçütlerin ve özellikle minimum ısı değeri konusundaki ölçütün çok katı (zorlayıcı) olduğunu resmen ilan etmiştir.

Çizelge 3.17 Çimento fırınlarında atığın birlikte yakılması için kriterler [71]

PARAMETRE	BİRİM	DEĞER
ISIL DEĞER	MJ/kg	15
Cl	%	0.5
S	%	0.4
Br/l	%	0.01
N	%	0.7
F	%	0.1
Be	mg/kg	1
Hg/Ti	mg/kg	2
As, Se (Te), Cd, Sb	mg/kg	10
Mo	mg/kg	20
V, Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Mn, Sn	mg/kg	200
Zn	mg/kg	500
KÜL MİKTARI (excl Ca, Al, Fe, Si)	%	5

CEN çalışma grubu 118, "Katı Atıklardan Türetilmiş Yakıtlar" ile ilgilenmek üzere Nisan 2000 tarihinde oluşturulmuştur. Bu görev gücünün hedefi, katı atıklardan türetilmiş yakıtları ve kullanımlarını tanımlayacak bir CEN raporunu hazırlama çalışmalarına başlamak ve ilgili standartların oluşturulması için bir iş programı planlamaktır. CEN çalışma grubu tarafından oluşturulmuş katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için sınıflandırma sistemi Çizelge 3.18'da verilmiştir [72,73].

Çizelge 3.18 Katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için (ATY) sınıflandırma sistemi (CEN/TS15359:2006:E)

SINIFLANDIRILAN ÖZELLİK	İSTATİSTİKSEL ÖLÇÜ	BİRİM	SINIFLAR				
			1	2	3	4	5
NET KALORİFİK DEĞER (NCV)	Ortalama değer	MJ/kg (ar)	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
KLOR, Cl	Ortalama değer	% (d)	≤0.2	≤0.6	≤1.0	≤1.5	≤3
CİVA, Hg	Medyan Yüzde (80nci dereceden)	mg/MJ(ar) mg/MJ(ar)	≤0.02 ≤0.04	≤0.03 ≤0.06	≤0.08 ≤0.16	≤0.15 ≤0.30	≤0.50 ≤1.00

Farklı ülkelerdeki ek yakıt kullanılan çimento fabrikalarının farklı atıklar için tipik metal konsantrasyon aralıkları Çizelge 3.19’de verilmiştir.

Çizelge 3.19 Avusturya, İsviçre ve Almanya’da ek yakıt sınır değerleri [74, 47]

PARAMETRE	AVUSTURYA			İSVİÇRE		ALMANYA	
	GENEL OLARAK YAKILABİLİR ¹⁾ ATIK	KALORİFİK DEĞERİ YÜKSEK ATIKLAR (PLASTİK, KAĞIT, TEKSTİL, ATIK AĞAÇ VB.)	SOLVENT, ATIK YAĞ	GENEL OLARAK YAKILABİLİR ²⁾ ATIK	DİĞER ATIKLAR	KALORİFİK DEĞERİ YÜKSEK ATIKLAR ³⁾ (PLASTİK, KAĞIT, TEKSTİL, ATIK AĞAÇ VB.)	SOLVENT, KULLANILMIŞ YAĞ
	SINIR DEĞER (MG/KG)						
As	15	15	20	15		13	15
Sb	5	20 (200) ⁴⁾	100	5	800 ¹⁾	120	20
Be	5	-	-	5		2	2
Pb	200	500	800	200	500	400	150
Cd	2	27	20	2	5 ⁵⁾	9	4
Cr	100	300	300	100	500	250	50
Cu	100	500	500	100	600	700	180
Co	20	100	25	20	60	12	25
Ni	100	200	-	100	80	160	30
Hg	0,5	2	2	0,5	5	1,2	1
Tl	3	10	5	3	-	2	2
V	100	-	-	100	-	25	10
Zn	400	-	-	400	-	-	-
Sn	10	70	100	10	-	70	30
Cl (toplam)	1%	2%	-	-	-	1.75%	-
PCBs	50	-	100	-	-		-
1) Net kalorifik değer 25 MJ/kg 2) Net kalorifik değer 18 MJ/kg 3) PET 4) PET, polyester 5) Spesifik durum, Hg için arıtım sistemi							

3.2 Türkiye’de Atıkların Çimento Üretiminde Kullanımı

Atıkların geri dönüşümü ve geri kazanımı temel esas olmakla birlikte çimento sanayinde zararlı veya zararsız atıklar işlenerek, ek yakıt olarak veya ham yakıt ile karıştırılarak kullanılmaktadır.

Çimento fabrikalarında atıkların yakıt amaçlı kullanımı hem atık üreticisi hem de çimento üreticisi için avantajdır. Her iki taraf için de avantaj olduğuna göre, çimento fabrikalarında atık yakılması için atık akışının iyi şekilde sağlanması gerekmektedir [75].

Türkiye çimento sektöründe ikincil yakıtların kullanımı henüz deneme sürecindedir ve kullanım miktarı dikkate alınacak seviyeye ulaşmamıştır. Avrupa Çimento Sektörünün alternatif yakıt kullanım oranı %20 civarındadır. Bu rakam ülkemizde % 1 den küçüktür. (TÇMB) Birincil yakıtların kullanımını petrokok % 37’lik oranla birinci sıradadır. Petrokoku % 23 linyit, % 17 ithal kömür takip etmektedir [76]. Ülkemizdeki çimento fabrikalarının bulunduğu yerler Şekil 3.7’te verilmiştir.



Şekil 3.7 Türkiye’deki çimento fabrikaları (TÇMB)

Türk çimento sanayiinin temelleri Kocaeli Darıca’daki 20.000 ton/yıl kapasiteli Aslan A.Ş. ve Kocaeli Eskişehir’deki yine 20.000 ton/yıl kapasiteli Eskişehir Portland Çimentosu ve Su Kireci A.Ş. fabrikalarının 1912 yılında faaliyete geçmesiyle atılmıştır

[77]. Cumhuriyetle birlikte Türkiye'deki çimento fabrikalarının sayısı artmaya başlamışsa da, üretim miktarları uzun yıllar boyunca iç talebi karşılamaktan uzak kalmış, ihtiyacın bir kısmı ithalatla karşılanmak zorunda kalınmıştır.

1950'den sonra çimento sanayiine özel sektörün daha yoğun bir biçimde girmesiyle birlikte üretim miktarları hızla artmış, 1978-1983 yılları arasında inşaat sektöründeki durgunluğa bağlı olarak Türkiye'de büyük ölçüde atıl kapasite oluşmuştur. Bu yıllardan itibaren oluşan üretim fazlasının ihracata yönlendirilmesi ile birlikte, Türkiye bu alanda ihracatçı bir ülke konumuna gelmiştir. 1989 yılından itibaren başlatılan özelleştirme çalışmaları sonucu bir kamu kuruluşu olan ÇİTOSAN'a ait 21 fabrikanın özelleştirilmesi tamamlanmış, böylece devlet çimento sektöründen tamamen çekilmiştir.

Türk çimento sanayiinin uzun dönemler boyunca genellikle büyüme eğiliminde olmasına karşın, 1994, 1999 ve 2001 yıllarında ülkemizde yaşanan ekonomik krizler nedeniyle, üretim miktarlarında büyük düşüşler gözlenmiştir. Bu yıllarda özellikle deniz kıyısında kurulmuş olan ve ihracat yapabilme olanağı olan fabrikalar üretimlerini ihracata yönelterek krizin etkilerinden kısmen korunma imkanı bulabilirlerken, bu imkana sahip olmayan iç kesimlerdeki fabrikalarda kapasite kullanım oranlarında büyük düşüşler görülmüştür. Türkiye'de en son yaşanan Şubat 2001 ekonomik krizinden sektörün gördüğü zarar özellikle fazla olmuş, sektörün toparlanarak eski üretim seviyelerine ulaşması birkaç yılı bulmuştur. Ancak, son yıllarda makroekonomik istikrarın sağlanması ve inşaat sektörünün hızla büyümesi nedeniyle çimento üretim ve talebinde yüksek oranda artışlar meydana gelmiştir.

2004 yılına gelindiğinde yaklaşık 11 milyon tonluk ihracatıyla dünya birinciliğine yükselmiş durumda olan Türk çimento sanayii, 2005 yılında sağladığı 9 bin kişinin üzerinde doğrudan istihdam seviyesinin yanı sıra, aynı yılın sonu itibarıyla yaklaşık 3,3 milyar TL ciroya ulaşmış, imalat sanayii üretimi içindeki payı yaklaşık yüzde 5,7, GSMH içindeki payı ise yaklaşık yüzde 1,43 olmuştur. 600 milyon TL civarında vergi ödeyen sektör, yaklaşık 480 milyon \$ ihracat geliri sağlamıştır [78].

Çizelge 3.20 Türk çimento tesislerinin coğrafi bölgelere dağılımı

BÖLGE	ENTEGRE TESİS	ÖĞÜTME TESİSİ
MARMARA	17	3
EGE	5	2
AKDENİZ	7	3
KARADENİZ	9	4
İÇ ANADOLU	14	4
D. ANADOLU	7	2
G.D. ANADOLU	7	1
TOPLAM	66	19

Optimum büyüklüğe yakın fabrikalar genellikle Akdeniz, Ege ve Marmara Bölgelerindeki deniz kıyısında kurulmuş olan fabrikalardan oluşmaktadır.

Çizelge 3.21 Türk çimento sanayiinde kurulu kapasiteler ve kapasite kullanım oranları

YILLAR	ÇİMENTO KAPASİTESİ		KLİNKER KAPASİTESİ	
	KAPASİTE (BİN TON)	KKO (%)	KAPASİTE (BİN TON)	KKO (%)
1999	63.218	55,07	33.197	84,24
2000	64.098	56,09	35.096	82,49
2001	64.987	46,10	35.117	81,86
2002	64.815	50,54	36.210	81,46
2003	66.363	52,88	36.408	83,55
2004	65.915	58,80	39.028	83,96
2005	67.846	63,06	40.313	90,25
2006	70.653	67,09	42.558	89,75
2007	81.470	64,14	44.618	93,20
2008	94.306	61,36	56.782	87,15
2009	103.534	58,64	62.523	84,82
2010	105.450	59,54	63.858	82,73

Çizelge 3.21'den görüleceği üzere, Türk çimento sanayiinde 2010 yılı itibariyle toplam çimento kapasitesi 105 milyon ton, toplam klinker üretim kapasitesi ise 64 milyon

tondur. Mevcut fabrikalarda yapılacak modernizasyon ve kapasite artırımı yatırımlarının yanı sıra, komple yeni yatırımların da devreye girmesi ile çimento sanayiinde kurulu kapasitenin daha da artması beklenmektedir (TÇMB). Kapasite kullanım oranları ise aynı yılda çimento üretiminde % 60, klinker üretiminde ise %83 olarak gerçekleşmiştir.

Üretim Maliyetleri

Çimento sanayi, yüksek enerji ihtiyacı olan sektörler arasında yer almakta olup bir ton çimento üretilmesi için ortalama 4,4 milyon Btu/ton enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Kömür, doğal gaz, yağ ve petrokok gibi enerji kaynakları, çimento fabrikalarında klinker üretimi esnasında kullanılan başlıca konvansiyonel yakıtlar arasında yer almakta ve bu yakıtlar için ayrılan bütçe işletme masraflarının % 30 - 40'lık kısmına karşılık gelmektedir. Gerek yenilenemez enerji kaynaklarının korunması gerekse yakıt maliyetlerinin düşürülmesi için çimento üretiminde kullanılabilecek alternatif yakıtların değerlendirilmesi günümüzde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Çimento fırınlarındaki yüksek sıcaklık değerleri, uzun işlem süresi ve oksitleyici ortam sayesinde, atıkların organik içeriklerinin tamamıyla bozunması sağlanabilmektedir. Atık içerisinde bulunabilecek ağır metaller ve diğer inorganik bileşikler ise çimento yapısındaki silikatlarla birleşmekte veya klinker içerisinde tutularak çevreye taşınımları engellenebilmektedir.

Çimento fırınlarında alternatif yakıtların kullanılması, Avrupa ve Amerika'da son derece yaygın bir yöntemdir. Bu yönetime, nispeten daha az olsa da dünyanın başka yerlerinde de rastlanmaktadır. Avrupa'da, en az 15 ülkedeki en az 85 fabrikada düzenli olarak lastik, plastik, kağıt, atık kaynaklı yakıtlar, kurutulmuş kanalizasyon çamuru, hayvansal atıklar ve çok çeşitli atık kaynaklı yakıtlardan faydalanılmaktadır. ABD'de atık türlerinin çeşitliliği daha az olmakla birlikte, katı atıklardan elde edilen yakıtların kullanımı oldukça yaygındır. 33 kadar fabrikada lastik, çok azında da diğer katı atıklardan elde edilen yakıtlar kullanılmaktadır. 2007 CEMBERUA verilerine göre Avrupa çimento sanayinde kullanılan yakıt miktarları Çizelge 3.22'de verilmiş olup alternatif yakıt kullanımı % 16,4 seviyesindedir.

Çizelge 3.22 Avrupa çimento sanayinde kullanılan yakıt miktarları (2007)

YAKIT TÜRÜ	KULLANIM YÜZDESİ
PETROKOK	45,8
KÖMÜR	30,3
FUEL OİL	2,9
LİNYİT	3,8
DOĞAL GAZ	0,8
ALTERNATİF YAKIT (ATIKLAR)	16,4
MALİYET KALEMLERİ	ORTALAMA MALİYET (%)
HAMMADDE VE YARDIMCI MADDELER	9,5
ELEKTRİK	23,5
YAKIT	20
AMBALAJ VE AMBALAJ İŞÇİLİĞİ	7,5
MALZEME	6,5
İŞÇİLİK	14
DIŞARIDAN ALINAN HİZMETLER (*)	10
AMORTİSMAN	7
DİĞER	2

(*) Temizlik, yemekhane, dahili nakliye vb.

Not: 1 ton çimento elde etmek için gerekli elektrik enerjisi 110 kwh olarak kabul edilmiştir (TÇMB)

Elektrik ve yakıt giderleri birlikte değerlendirildiğinde, yüzde 43,5 oranla en büyük üretim maliyet kaleminin enerji giderleri olduğu görülmektedir.

Çimento fabrikalarında atıkların ek yakıt olarak kullanılması için yapılan ilave yatırımların sanayici açısından avantajlı duruma geçebilmesi için düzenli ve istenilen kalitede atık akışı sağlanmalıdır. Her atık türünün özelliğine ve kullanım oranına göre ürün üzerindeki davranışları incelenmelidir. Bu konuda yapılacak bilimsel çalışmalar, atık yakıtların çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılmasının toplumda yaratacağı psikolojik etkinin olumlu yönde gelişmesini sağlayacaktır.

Ne kadar çok çalışma yapılır ve olumlu sonuç elde edilirse ileride yaşanabilecek atık yakılmasına karşı tepkilerin önüne geçilebilmesi o oranda başarılı olacaktır [75].

PİLOT ÖLÇEKLİ ÇALIŞMA**4.1 Projede Deneylerde Kullanılan Girdileri Hakkında Genel Bilgiler****4.1.1 Likit Petrol Gazı**

Deneyssel çalışmada klinker üretimi için birincil yakıt olarak MİLANGAZ firmasından temin edilen LPG-propan gazı kullanılmıştır.

LPG, ham petrolün rafinelerde arıtılması ile veya doğalgazdan olmak üzere iki ana kaynaktan elde edilmektedir. Ham petrolün damıtılması ile elde edilen LPG, sudan arıtılır ve içerdiği kükürt miktarı standartlara uygun bir sınıra indirilir. Aslında kokusuz olan LPG, olası bir tehlikeyi önlemek amacıyla etil merkaptan ile kokulandırıldıktan sonra kullanıma sunulur. Ülkemizde kullanıma sunulan miks LPG, %70 bütan - %30 propan'dan oluşur. Kullanılan LPG'nin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1, genel özellikleri ise Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Deneylerde kullanılan LPG Propan gazının ISO 7941'e göre Kompozisyonu

KOMPOZİSYON	ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	KÜTLE %	HACİM %
METHANE	± 0,04	0,01	0,00
ETHANE	± 0,4	0,26	0,37
PROPANE	± 0,33	96,54	96,81
PROPYLENE	± 0,04	0,00	0,00
İ-BUTANE	± 0,15	1,32	1,20
N-BUTANE	± 0,32	1,87	1,63

Çizelge 4.1 Deneylerde kullanılan LPG Propan gazının ISO 7941'e göre Kompozisyonu (devamı)

KOMPOZİSYON	ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	KÜTLE %	HACİM %
1-BUTENE	± 0,01	0,00	0,00
İ-BUTENE	± 0,01	0,00	0,00
CİS-2-BUTENE	± 0,02	0,10	0,09
TRANS-2-BUTENE	± 0,01	0,00	0,00
1,3-BUTADİENE	± 0,01	0,00	0,00
İ-PENTANE	± 0,05	0,00	0,00
N-PENTANE	± 0,16	0,00	0,00

Çizelge 4.2 Deneylerde kullanılan LPG'nin özellikleri

TANIMI	DEĞERİ	BİRİMİ
FİZİKSEL HALİ	Gaz	
RENGİ	Renksiz	
KOKU	LPG'nin kendisi kokusuzdur. Güvenlik amacıyla nahoş koku veren kimyasallarla (merkaptan) kokulandırılmıştır.	
KAYNAMA NOKTASI, ATMOSFER BASINCINDA (PROPAN)	-42	°C
BUHAR BASINCI, 20°C SICAKLIKTA (KARIŞIM)	2,5 - 3	Bar
PARLAMA NOKTASI	-104	°C
ALEV ALMA SICAKLIĞI	420	°C
PATLAYICILIK ÖZELLİKLERİ	1,8 – 9,5	Havayla %
NİSPİ YOĞUNLUK, SIVI HALDE, SUYA GÖRE	0,560	15°C'de
NİSPİ YOĞUNLUK, GAZ HALDE, HAVAYA GÖRE	2,28	15°C ve 1,103 bar'da
AKIŞKANLIK (VİZKOZİTE)	Çok düşük	

Çizelge 4.3 Deneyisel çalışmada kullanılan LPG propan'ın özellikleri

TEST	BİRİM	METOT	TS 2178 ISO 9162	ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ	SONUÇ
YOĞUNLUK @ 15°C	kg/lt	ISO 8973			0,5088
GÖSTERGE BUHAR BASINCI @ 40°C	kPa	ISO 8973	en çok 1550		1246
GÖSTERGE BUHAR BASINCI @ -5°C	kPa	ISO 8973			304
H ₂ S KURŞUN ASETAT METODU		EN ISO 8819	geçer		Geçer
BAKIR ŞERİT KOROZYONU		EN ISO 6251	derece 1		1a
BUHARLAŞMA KALINTISI	mg/kg	EN ISO 13757		± 1,6	
KALINTI 100 ML BUHARLAŞMA	ml	ASTM D 2158			Yok
UÇUCULUK	°C	ASTM D 1837			-38,8
SERBEST SU MUHTEVASI			yok		Yok
TOPLAM MERKAPTAN	ppm	ASTM D 5504			1,97
TOPLAM KÜKÜRT	ppm	ASTM D 5504	en çok 100		2,39
MOTOR OKTAN SAYISI (MOS)		TS EN 589			95,33
TOPLAM DİEN MUHTEVASI	mol %	ISO 7941	en çok 0,5		0
C2 HİDROKARBONLARI	mol %	ISO 7941			0,38
C4 HİDROKARBONLARI	mol %	ISO 7941	en çok 7,5		2,44
C5 HİDROKARBONLARI	mol %	ISO 7941	en çok 0,2		0
KÜTLECE SAFLIK ORANI	kütle %	ISO 7941	en az 95		99,74
DOYMAMIŞ HİDROKARBONLAR	kütle %	ISO 7941			0
KOKU (ALT ALEVLENME SINIRIN % 20'SİNDE)		TS EN 589	farklı ve hoş olmayan		hoş olmayan

4.1.2 Atık Çamur

Deneysel çalışmalarda evsel nitelikte Tuzla Atıksu Arıtma Tesisi ve Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisi atık çamuru kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan analiz metotları Çizelge 4.4’da verilmiştir. İSKİ’den kuru olarak (KM~10-2) temin edilen atık çamurların fiziksel özellikleri ile ağır metal analizler sonuçları Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilmiştir. Çamur numunesinden bir miktar alınarak 550°C’de kül tayini yapılmış ve elde edilen külün kimyasal analizi belirlenmiştir. Her iki çamura ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Deneysel çalışmalarda kullanılan analiz metotları

PARAMETRE	STANDART ADI	ANALİZ YÖNTEMİ
YOĞUNLUK	DIN 11540	Hacim ölçme esasına
NEM	İŞLETME İÇİ METOD	Etüvde kurutma 103 C
PH	SM 4500-H ⁺ pH Value TS 12071/ Eylül 1996	Çözünmüş Numunede Elektrom. Metod
KÜL (550 °C) (%)	TSEN 12879/ Mart 2003	Kül fırınında yakma
KIZDIRMA KAYBI, LOI (1000°C) (%)	İŞLETME İÇİ METOD	Kül fırının da yakma
PARLAMA NOKTASI (°C)	İŞLETME İÇİ METOD	Parlama Noktası cihazı ile
TOPLAM ORGANİK KARBON, TOK (%)	TS 12089 EN 13137	TOC cihazı ile yakma
ÇÖZÜNÜŞ ORGANİK KARBON, ÇOK (MG/L)	TS 8195 EN 1484/2000	TOC cihazı ile yakma
TOPLAM KÜKÜRT (%)	İŞLETME İÇİ METOD	Kükürt tayin cihazı ile yakma
TOPLAM KARBON, C (%)	TS ISO 10694 /Aralık 1995	Karbon azot cihazı ile yakma
TOPLAM AZOT, N (%)	TS ISO 13878 /Mart 2001	Karbon azot cihazı ile yakma
TOPLAM HALOJENLER, TX (% CL-)	İŞLETME İÇİ METOD	Halojen ölçüm cihazı ile
CD,CR,CU,,Nİ,PB,ZN,CO	TS EN 11885 Ocak 2010	ICP Optik Emisyon Spektrofotometrik M.
MN,TL	TS EN 11885 Ocak 2010	ICP Optik Emisyon Spektrofotometrik M.

Çizelge 4.4 Deneysel çalışmalarda kullanılan analiz metotları (devamı)

PARAMETRE	STANDART ADI	ANALİZ YÖNTEMİ
SB,AS,SE	SM 3113 B / 2005	Atomik Absorbsiyon Spektrofotometrik Electrothermal Metod
SÜLFAT	TS ISO 9280/1998 TS 10304-/04/1997 SM 4500-SO4 E/2005	Baryum Klorür ile Gravimetrik Metod İyon Kromatografi Metodu Türbidimetrik Metod
ASİTTE ÇÖZÜNÜRLEŞTİRME	TS EN ISO 15587-1/04.04	Kral Suyunda Özütleme- Mikrodalga Fırın

Çizelge 4.5 Tuzla ve Paşaköy atık çamurunun fiziksel özellikleri

PARAMETRE	TUZLA ATIK ÇAMURU	PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU
YOĞUNLUK (G/ML)	1,1	0,9
NEM 75 °C (%)	0,2	0
pH	7,0	7,7
KÜL (550 °C) (%)	67,5	60,7
KIZDIRMA KAYBI, LOI (1000°C) (%)	38,1	45,5
PARLAMA NOKTASI (°C)	163	165,0
TOPLAM ORGANİK KARBON, TOK (%)	17,5	20
ÇÖZÜNÜMÜŞ ORGANİK KARBON, ÇOK (MG/L)	1613	794,5
TOPLAM KÜKÜRT (%)	1,08	1,1
TOPLAM KARBON, C (%)	18,6	23,2
TOPLAM AZOT, N (%)	2,40	3,40
TOPLAM HALOJENLER, TX (% CL-)	0,173	0,2
SÜLFAT (MG/L)	122,4	15,9

Çizelge 4.6 Tuzla atık çamuru ve paşaköy atık çamurunun ağır metal analizleri

PARAMETRE (MG/KG)	TUZLA ATIK ÇAMURU	PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU
ANTİMON, SB	0,21	2,34
ARSENİK, AS	1,95	1,09
BAKIR, CU	724	878,9
CİVA, HG	0,80	2,0
ÇİNKO, ZN	2843	3427
KADMIYUM, CD	3,49	6,0
KOBALT, CO	6,7	8,72
KROM, CR	2192	2563
KURŞUN, PB	89,8	378,88
MANGANEZ, MN	338	351
NİKEL, Nİ	136	143,7
SELENYUM, SE	1,08	1,0
TALYUM, TL	1,20	3,593
VANADYUM, V	38	116,69

Çizelge 4.7 Tuzla ve Paşaköy Atık Çamurunun Kimyasal Analizleri (550°C, külde)

BİLEŞENLER	TUZLA ATIK ÇAMURU MİKTAR (%)	PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU MİKTAR (%)
SiO ₂	37,45	46,05
Al ₂ O ₃	10,56	14,25
Fe ₂ O ₃	5,74	6,14
CaO	34,4	12,28
MgO	3,39	2,63
K ₂ O	3,0	3,28
Na ₂ O	1,3	1,09
Cl	0,19	0,12
TiO ₂	0,63	1,87
SO ₃	1,67	1,97

Çizelge 4.7 Tuzla ve Paşaköy Atık Çamurunun Kimyasal Analizleri (550°C, külde) (devamı)

BİLEŞENLER	TUZLA ATIK ÇAMURU MİKTAR (%)	PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU MİKTAR (%)
P ₂ O ₅	0,81	9,21
MnO	0,10	0,11
Cr ₂ O ₃	0,19	0,29
TOPLAM	99,43	99,29

4.1.3 Farin

Pilot döner fırında kullanılacak olan farin çimento fabrikasından temin edilmiştir. Farinin kimyasal analizi Çizelge 4.8’de, ağır metal analizi Çizelge 4.9’de verilmiştir. Farinin % 0,5’i 200 µm’un üzerinde, % 13,5’u ise 90 µm’un üzerindedir. Bir başka deyişle farinin % 86,5’u 90 µm’un altındadır.

Çizelge 4.8 Pilot döner fırında kullanılan farinin kimyasal analizi ve modüller

BİLEŞENLER VE MODÜLLER	MİKTAR (%)
CaO	43,50
SiO ₂	13,87
Al ₂ O ₃	2,59
Fe ₂ O ₃	2,17
MgO	0,93
K ₂ O	0,53
Cl	0,02
Na ₂ O	0,15
TiO ₂	0,31
SO ₃	0,10
MnO	0,10
KIZDIRMA KAYBI	35,20
TOPLAM	99,47

Çizelge 4.8 Pilot döner fırında kullanılan farinin kimyasal analizi ve modüller (devamı)

BİLEŞENLER VE MODÜLLER	MİKTAR (%)
KİREÇ STANDARDI (K.S.T)	100,45
SİLİS MODÜLÜ (S.M)	2,91
HİDROLİK MODÜL (H.M.)	2,33
SİLİS MODÜLÜ (S.M.)	2,91
ALÜMİNA MODÜLÜ (T.M.)	1,20

Çizelge 4.9 Farin ağır metal analizi

BİLEŞENLER	MİKTAR (MG/KG)
ARSENİK	5,5
KADMIYUM	0,8
KROM	126,1
BAKIR	38,6
KOBALT	3,2
CİVA	0,1
MANGANEZ	309,2
NİKEL	26,2
KURŞUN	5,9
ANTİMON	0,3
SELENYUM	3,1
ÇİNKO	37,5
VANADYUM	17,1
TALYUM	25,3

4.1.4 Pilot Ölçekli Döner Fırın

Deneyisel çalışmalarda TÜBİTAK 1007 projesi kapsamında imal edilen ve teknik özellikleri aşağıda verilmiş olan pilot ölçekli çimento döner fırını kullanılmıştır. Pilot

ölçekli fırın, beslenen farinin kalsinasyonu amacıyla ön ısıtma fırını ve klinker üretimde kullanılan pişirim fırını olmak üzere iki döner fırından meydana gelmektedir. Brülör sistemi hem LPG hem de atık çamur besleme ünitesinden oluşmakta olup, en ufak bir aksaklık durumunda sistem kendi kendini durdurmaktadır. İSTAÇ. A.Ş.'nin Kemerburgaz tesislerinde bulunan döner fırına ait değişik görüntüler Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan pilot ölçekli çimento döner fırını

Ön Isıtma Fırının Teknik Özellikleri

- Ön ısıtma fırının boyu: 4000 mm (titreşimli besleyiciden başlayan mesafe)
- Ön ısıtma fırının dış çapı: 325 mm
- Ön ısıtma fırının iç çapı: 275 mm
- Ön ısıtma fırının çıkış ucundaki sıcaklığı yaklaşık 850°C dir.
- Ön ısıtma fırının dönüş hızı 0,4 - 4 d/d arasında ayarlanabilir
- Ön ısıtma fırınının eğimi 0-5° arasında ayarlanabilir.
- Helezonik titreşimli besleyici hacmi: 250 lt

- Ön ısıtma fırınının dış kısmı çalışmaya uygun olan kazan saçıdır. Bunun ön kısmı 25 mm kalınlığında 1250°C'ye dayanıklı 128 kg/m³ yoğunluğunda seramik elyaf ile kaplanmıştır. Fırının iç kısmı ise AISI 309 paslanmaz çelikten imal edilmiştir.

Çimento Döner Fırının Teknik Özellikleri

- Çimento döner fırının boyu: 6000 mm (LPG ve RDF besleme yapılan ünitelerden itibaren mesafe)
- Çimento döner fırının dış çapı: 700 mm
- Çimento döner fırının iç çapı: 380 mm
- Çimento döner fırının dönüş hızı 0,4 - 4 d/d arasında ayarlanabilir.
- Çimento döner fırının eğimi 0-5° arasında ayarlanabilir.
- Çimento döner çıkış ucundaki sıcaklık yaklaşık 1450°C dir.
- Çimento döner giriş ucundaki sıcaklık yaklaşık 850°C dir.
- Çimento döner fırınının çelik konstrüksiyonu çalışmaya uygun olan kazan saçıdan imal edilmiştir. İç kısımda kullanılacak olan refrakter 2 katmandan oluşmuştur; ön katmanda 1500°C'ye dayanıklı castable refrakter, ikinci katmanda ise izolasyon özelliği olan castable refrakter kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılacak olan döner fırında kullanılan refrakterin özellikleri Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'de verilmiştir. Refrakterin özellikleri, döner fırının tavlama rejiminin belirlenmesi açısından özellikle önem arz etmektedir.

Çizelge 4.10 Döner fırında kullanılan refrakterin kimyasal özellikleri

BİLEŞENLER	MİKTAR (%)
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	58-87
Fe ₂ O ₃	1,5-2,0
CaO	3,4

Çizelge 4.11 Döner fırında kullanılan refrakterin fiziksel özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİK	DEĞER
HACİM AĞIRLIĞI (110°C)	2,4-2,5 gr/cm ³
SOĞUKTA BASMA DAYANIMI (110°C)	min. 450 kg/cm ²
SOĞUKTA BASMA DAYANIMI (1000°C)	min. 300 kg/cm ²
REFRAKTERLİK	36 SK
TANE BOYUTU	0-5 mm
ÇALIŞMA SICAKLIĞI	1750 °C
TERMAL İLETKENLİK (1000°C)	1,7 – 1,8 kcal/mh °C
TERMAL LİNEER GENLEŞME (1000°C)	% 0,9-1,0
KARIŞIM SUYU	% 7-9

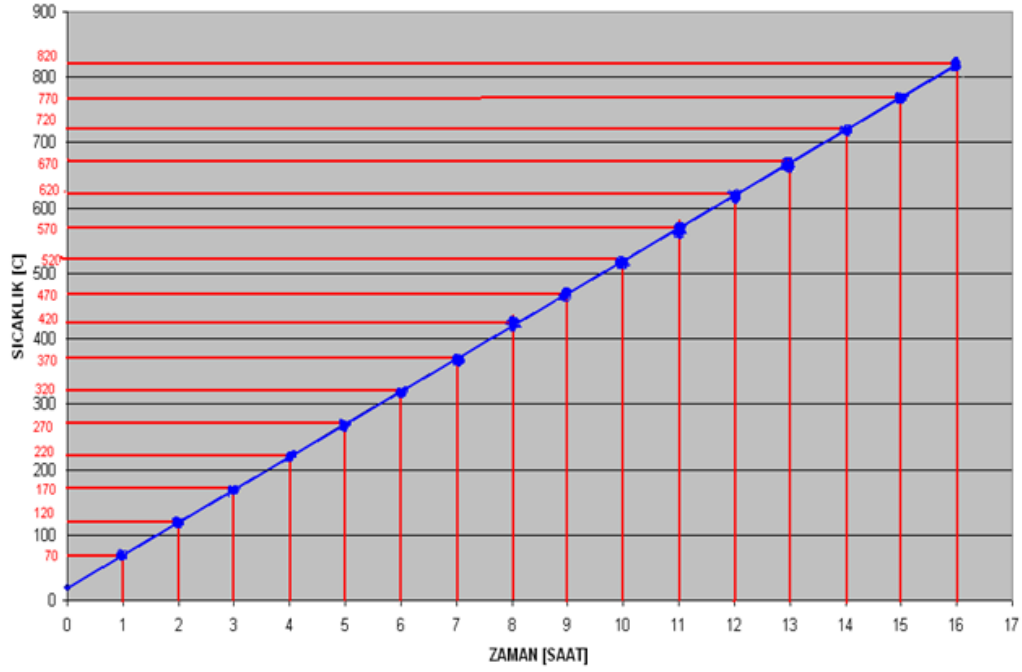
Pilot döner fırın ön ısıtma rejimi:

Pilot döner fırına farin beslemeden önce istenilen sıcaklığa gelmesi için belirli bir rejimde ön ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Ön ısıtma işlemi Şekil 4.2’de verildiği gibi yapılmakta ve farin besleme sıcaklığına (yaklaşık 820°C) ulaşana kadar devam etmektedir. Bu süre yaklaşık 16 saat sürmektedir.

Ön ısıtma işlemi tamamlandıktan sonra farin bunkerinden titreşimli besleyici vasıtasıyla belirlenen miktarda farin beslenerek klinker üretim çalışmasına başlanmıştır. Klinkerin oluşup oluşmadığını anlayabilmek için spot olarak dansite deneyi yapılmış ve oluşan klinkerin kalitesi ve dansite değerine bakılarak en uygun klinkeri üretebilecek şekilde ön ısıtma ve pişirim fırınların çeşitli parametreleri sabitlenmiştir. Deneylerde kullanılan döner fırın parametreleri Çizelge 4.12’de verilmiştir. Ayrıca deneysel çalışma esnasında sistemde bulunan dört noktada termocouple vasıtasıyla sıcaklık değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Pilot tesiste bulunan termocouple’ların konumları Şekil 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 Pilot döner fırında deney için kullanılan parametreler

NUMUNE SİLOSU HACMİ	250 litre
FARİN BESLEME MİKTARI	145 kg/h
KLİNKER ÜRETİMİ	90 kg/h
MALZEMENİN FIRINDA KALIŞ SÜRESİ	Yaklaşık 60 dakika
ÖN ISITMA FIRININ EĞİMİ	3,4°
PİŞİRİM FIRININ EĞİMİ	3,4°
ÖN ISITMA FIRININ SICAKLIK DAĞILIMI	1 ve 2 numaralı termocouple ile ölçülen sıcaklık değerleri olup, aşağıda ilgili başlıklarda verilmiştir.
PİŞİRİM FIRININ SICAKLIK DAĞILIMI	3 ve 4 numaralı termocouple ile ölçülen sıcaklık değerleri olup, aşağıda ilgili başlıklarda verilmiştir.
ÖN ISITMA FIRININ DÖNÜŞ HIZI	4 d/d
PİŞİRİM FIRININ DÖNÜŞ HIZI	3,2 d/d
ÖN ISITMA FIRININ ÖLÇÜLERİ	Boy: 4000 mm
	İç çap: 275 mm
	Dış çap: 325 mm
PİŞİRİM ISITMA FIRININ ÖLÇÜLERİ	Boy: 6000 mm
	İç çap: 380 mm
	Dış çap: 700 mm



Şekil 4.2 Pilot döner fırının ön ısıtma rejimi



Şekil 4.3 Deneysel çalışmalarda kullanılan pilot döner fırındaki termocouple'lerin konumları

4.2 Deneysel Çalışmalar

İSTAÇ. A.Ş. Kemberburgaz tesislerinde bulunan pilot döner fırında değişik atık çamur oranları kullanılarak klinker üretim çalışması yapılmıştır. Bu deneyde amaç, atık

çamurun ek yakıt olarak kullanılması, oluşan klinkerin karakterizasyonunu tayin ederek atık çamurun performansının belirlenmesidir.

4.2.1 Klinker Analizi

Pilot ölçekli deneme çalışmalarında verilerin kıyaslanabilir olması amacı öncelikle % 100 LPG kullanılarak klinker üretilmiştir. Daha sonra ise % 5, % 10 oranlarında Tuzla Atık Çamuru ve % 10, % 20 oranlarında Paşaköy Atık Çamuru beslenmiş ve her bir deney sonucunda klinker üretilerek klinkerin kimyasal ve mineralojik analizleri yapılmış, oluşan klinkerin performansı gözlenmiştir. Ayrıca deneysel çalışma esnasında emisyon ölçümü yapılmıştır.

Deney sonucunda üretilmiş olan klinkerin kimyasal analizi ve mineralojik analiz TÜBİTAK MAM tarafından yapılmıştır. Üretilmiş olan klinkerin görüntüsü Şekil 4.4’de verilmiştir. Pilot döner fırında üretilen klinkerin kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’de verilmiştir. Çizelge 4.13’de görüldüğü gibi, klinker üretimi esnasında yapılan dansite sonucuna göre tam olarak klinker üretilmiş olduğu anlaşılmaktadır. Daha sonra yapılan kimyasal analiz ile bulunan değerlerin sınır değerler içinde olduğu görülmüş ve yapılan deneysel çalışma sonrasında Portland çimentosu klinkerinin üretildiği belirlenmiştir. Üretilen klinkerde yapılan mineralojik analiz sonucuna göre dört ana bileşen değerlerinin de Portland çimentosundaki belirtilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür (Çizelge 4.14). Ana bileşenlerin hesaplanmasında Bogue eşitlikleri kullanılmıştır. Bu denklemlerin kullanabilmesi için $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$ olması gerekmektedir. Bu şart yerine geldiği için ana bileşenler aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\% C_3S = 4.07 (\%CaO) - 7.60 (\%SiO_2) - 6.72 (\%Al_2O_3) - 1.43 (\%Fe_2O_3) - 2.85 (\%SO_3)$$

$$\% C_2S = 2.87 (\%SiO_2) - 0.754 (\%3CaO.SiO_2)$$

$$\% C_3A = 2.65 (\%Al_2O_3) - 1.69 (\%Fe_2O_3)$$

$$\% C_4AF = 3.04 (\%Fe_2O_3)$$



Klinker Üretimi



% 0 Atık Çamur + % 100 LPG kullanılarak üretilen klinker numunesi



% 5 Tuzla Atık Çamur + % 95 LPG kullanılarak üretilen klinker numunesi



% 10 Tuzla Atık Çamur + % 90 LPG kullanılarak üretilen klinker numunesi



% 10 Paşaköy Atık Çamur + % 90 LPG kullanılarak üretilen klinker numunesi



% 20 Paşaköy Atık Çamur + % 80 LPG kullanılarak üretilen klinker numunesi

Şekil 4.4 Pilot döner fırında üretilen klinkerlerin görüntüsü

Çizelge 4.13 Pilot döner fırında üretilen klinkerin kimyasal analiz özet sonuçları

BİLEŞENLER VE MODÜLLER	% 0 ATIK ÇAMUR + % 100 LPG	% 5 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 95 LPG	% 10 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 90 LPG	% 10 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 90 LPG	% 20 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 80 LPG	SINIR DEĞERLER (*)
CaO	66,90	66,41	65,93	66,05	65,26	60 – 67
SiO ₂	21,45	21,69	21,93	21,83	22,19	17 – 25
Al ₂ O ₃	4,20	4,30	4,39	4,36	4,50	3 – 8
Fe ₂ O ₃	3,35	3,38	3,42	3,39	3,43	0,5 – 6
MgO	1,44	1,47	1,50	1,46	1,47	0,1 – 4
K ₂ O	0,85	0,88	0,91	0,89	0,92	0,2 – 1,3
Cl	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	Maks. 0,1
Na ₂ O	0,22	0,24	0,25	0,23	0,25	0,2 – 1,3
TiO ₂	0,47	0,46	0,46	0,48	0,48	
SO ₃	0,16	0,16	0,15	0,19	0,21	1–3
TAYİN EDİLEMEYEN	0,92	0,97	1,02	1,25	1,25	
TOPLAM	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
KİREÇ STANDARDI (K.S.T.)	99,56	97,66	95,81	96,47	93,67	% 92–96
SİLİS MODÜLÜ (S.M)	2,84	2,82	2,81	2,82	2,80	% 2,3–2,7
ALÜMİNYUM MODÜLÜ(T.M)	1,25	1,27	1,28	1,28	1,31	% 1,3–1,6
HİDROLİK MODÜL (H.M.)	2,33	2,26	2,22	2,23	2,17	% 1,7-2,2
SERBEST KİREÇ	1,5	1,4	1,4	1,1	1	Maks. 2
DANSİTE (G/L)	1280	1269	1240	1248	1271	1200-1300

(*) Çizelgedeki değerler, Prof. Dr. Turhan Y. Erdoğan, Betonlu Oluşturan Malzemeler, Çimentolar, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÇMB adlı kitaptaki Portland Çimentosunu Oluşturan Oksit ve Miktarları Çizelgesundan alınmıştır.

Çizelge 4.14 Pilot döner fırında üretilen klinkerin ana bileşenlerinin özet sonuçları

	MİKTAR (%)					
MODÜLLER	% 0 ATIK ÇAMUR + % 100 LPG	% 5 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 95 LPG	% 10 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 90 LPG	% 10 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 90 LPG	% 20 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 80 LPG	ÇİMENTO FABRİKASI* ORTALAMA DEĞERLERİ (%)
C₃S	75,9	71,38	66,88	68,34	61,29	55-65
C₂S	4,26	8,34	12,42	11,03	17,37	11-20
C₃A	5,5	5,66	5,85	5,80	6,12	5-9
C₄AF	10,2	10,30	10,41	10,32	10,45	10-15

(*)özel bir çimento fabrikası

4.2.2 Çimento Analizi

Pilot ölçekli döner fırında üretilen klinkerin alçı taşı ile karıştırılarak elde edilen çimentonun kimyasal analiz özet sonuçları (Çizelge 4.15) ile çimentonun ana bileşenlerinin sonuçları (Çizelge 4.16) incelendiğinde, atık çamurun çimento üzerinde herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığı görülmüştür. Çizelge 4.17’de verilen çimentonun fiziksel ve mekanik analiz sonuçları ile Çizelge 4.18’de verilen çimentonun kimyasal analiz sonuçları standart değerlerle karşılaştırıldığı zaman herhangi bir olumsuz durum gözlenmemektedir.

Çizelge 4.15 Pilot döner fırında üretilen çimentonun kimyasal analiz özet sonuçları

BİLEŞENLER VE MODÜLLER	% 0 ATIK ÇAMUR + % 100 LPG	% 5 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 95 LPG	% 10 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 90 LPG	% 10 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 90 LPG	% 20 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 80 LPG	SINIR DEĞERLER %(*)
CaO	65,24	64,78	64,31	64,43	63,68	60 – 67
SiO ₂	20,43	20,65	20,88	20,79	21,13	17 – 25
Al ₂ O ₃	4,02	4,11	4,20	4,17	4,30	3 – 8
Fe ₂ O ₃	3,19	3,23	3,26	3,24	3,27	0,5 – 6
MgO	1,38	1,41	1,43	1,40	1,41	0,1 – 4
K ₂ O	0,81	0,84	0,87	0,84	0,88	0,2 – 1,3

Çizelge 4.15 Pilot döner fırında üretilen çimentonun kimyasal analiz özet sonuçları (devamı)

BİLEŞENLER VE MODÜLLER	% 0 ATIK ÇAMUR + % 100 LPG	% 5 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 95 LPG	% 10 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 90 LPG	% 10 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 90 LPG	% 20 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 80 LPG	SINIR DEĞERLER % (*)
Cl	0,04	0,04	0,02	0,01	0,02	Maks. 0,1
Na ₂ O	0,21	0,22	0,24	0,22	0,23	0,2 – 1,3
TiO ₂	0,45	0,44	0,43	0,45	0,46	
SO ₃	2,27	2,26	2,26	2,29	2,32	1–3
KIZDIRMA KAYBI	1,50	1,52	1,53	1,55	1,57	Maks. 5
TAYİN EDİLEMEYEN	0,46	0,50	0,57	0,61	0,73	
TOPLAM	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
KİREÇ STANDARDI	99,4	97,6	95,7	96,3	93,5	% 92–96
SİLİS MODÜLÜ	2,83	2,82	2,80	2,81	2,79	% 2,3–2,7
ALÜMİNYUM MODÜLÜ	1,26	1,27	1,29	1,29	1,31	% 1,3–1,6
HİDROLİK MODÜL	2,36	2,31	2,27	2,29	2,22	% 1,7–2,2
SERBEST KİREÇ	1,2	1,4	1,4	1,0	1,0	Maks. 2

(*) Çizelgedeki değerler, Prof. Dr. Turhan Y. Erdoğan, Betonu Oluşturan Malzemeler, Çimentolar, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÇMB adlı kitaptaki Portland Çimentosunu Oluşturan Oksit ve Miktarları Çizelgesundan alınmıştır.

Çizelge 4.16 Pilot döner fırında üretilen çimentonun ana bileşenlerinin özet sonuçları

	MİKTAR (%)					
MODÜLLER	% 0 ATIK ÇAMUR + % 100 LPG	% 5 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 95 LPG	% 10 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 90 LPG	% 10 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 90 LPG	% 20 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 80 LPG	ÇİMENTO FABRİKASI ORTALAMA DEĞERLER (%)
C₃S	72,3	68,1	63,8	65,2	58,5	55-65
C₂S	4,0	7,9	11,7	10,4	16,5	11-20
C₃A	5,2	5,4	5,6	5,6	5,9	5-9
C₄AF	9,7	9,8	9,9	9,8	10,0	10-15

Çizelge 4.17 Pilot döner fırında üretilen çimentonun fiziksel ve mekanik analizi

NUMUNE ADI	İNCELİK			PRİZ SÜRESİ (DAKİKA)		SU İÇERİ Ğİ (%)	ÖZGÜL AĞIRLIK (G/CM ³)	LE CHATELIER (GENLEŞME) (MM)	BASINÇ DAYANIMI (MPA)		
	45 µM	90 µM	BLAİN E	PRİZ BAŞLANG ICI	PRİZ SON U				2 GÜN	7 GÜN	28 GÜN
SINIR DEGERLER (TS EN 197- 1) 42,5 R				≥60	-			≤10	≥20	-	≥42,5 - ≤ 62,5
% 0 ATIK ÇAMUR + % 100 LPG	19, 1	2,7	3150	126	187	24,0	3,16	3	22,1	35,2	44,7
% 5 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 95 LPG	19, 2	2,3	3000	125	187	24,2	3,16	2	23,3	36,1	45,2
% 10 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 90 LPG	18, 6	2,4	3210	127	188	24,0	3,16	2	21,8	35,2	45,4
% 10 PAŞAKÖY ATIK ÇAMUR + % 90 LPG	18, 9	2,4	3110	123	184	24,0	3,16	2	21,2	36,4	46,9
% 20 PAŞAKÖY ATIK ÇAMUR + % 80 LPG	20, 7	3,1	3130	119	184	24,8	3,16	3	21,5	37,2	45,9

Çizelge 4.18 Üretilen klinkerden elde edilen çimentonun kimyasal analizlerinin kıyaslanması

BİLEŞENLER	% 0 ATIK ÇAMUR + % 100 LPG	% 5 TUZLA ATIK ÇAMUR + % 95 LPG	% 10 TUZLA ATIK ÇAMUR +% 90 LPG	% 10 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 90 LPG	% 20 PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU + % 80 LPG	SINIR DEĞERLER (TS EN 196-2)
KIZDIRMA KAYBI	1,50	1,52	1,53	1,55	1,57	≤ % 5,0
ÇÖZÜNMEYEN KALINTI	0,22	0,10	0,18	0,15	0,17	≤ % 5,0
KLORÜR (CL ⁻)	0,04	0,04	0,02	0,01	0,015	≤ % 0,10
SÜLFAT MİKTARI (SO ₃ OLARAK)	CEM I 32,5 N 32,5 R 42,5 N	-	-	-	-	≤ % 3,5
	CEM I 42,5 R 52,5 N 52,5 R	2,27	2,26	2,26	2,29	2,38
						≤ % 4,0

Çimentoya uygulanan fiziksel mekanik testlerin yapılış şekli aşağıda verilmiştir.

a) Standard dayanım

Çimentonun standart dayanımı EN 196-1'e göre tayin edilen 28 günlük basınç dayanımıdır. Üç standart dayanım sınıfı belirlenmiştir: Bunlar 32,5 sınıfı, 42,5 sınıfı ve 52,5 sınıfıdır.

b) Erken dayanım

Çimentonun erken dayanımı EN 196-1'e göre tayin edilen 2 veya 7 günlük basınç dayanımıdır. N ile belirtilen normal erken dayanım sınıfı ve R ile belirtilen yüksek erken dayanım sınıfı olmak üzere her bir standart dayanım sınıfı için iki erken dayanım sınıfı tanımlanır.

c) Priz Başlama Süresi

EN 196-3'e göre tayin edilen priz başlama süresidir. EN 196-3'e göre priz başlama süresi deney için Vicat cihazına takılmış olan iğne taban plâkasının üzerine indirilir ve

iğneli Vicat cihazı taksimatlı gösterge üzerinde sıfıra ayarlanır. Sonra iğne yukarı kaldırılarak duruş pozisyonuna alınır. Vicat kalıbı, standart kıvamdaki çimento pastası ile doldurulur ve düzlenir. Doldurulmuş Vicat kalıbı taban plâkası ile birlikte (uygun boyutlu ve $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 'da tutulan ve bağıl nemi % 90'dan az olmayan bir oda veya bir rutubet dolabı) belirtilen odaya veya rutubet dolabına yerleştirilir, uygun bir süre sonra Vicat cihazına ve iğnenin altına yerleştirilir. İğne, pasta ile temas edinceye kadar yavaşça indirilir. Hareket eden parçaların hızla inmesini önlemek için iğne bu durumda (1-2) saniye tutulur. Sonra hareket eden parçalar birden bırakılır ve iğnenin düşey olarak pastanın içine girmesi sağlanır. İğnenin pastaya batması tamamlandıktan sonra veya iğnenin serbest bırakılmasından 30 saniye sonra (hangisi daha önce olmuşsa) taksimatlı göstergede okuma yapılır. İğnenin ucu ile taban plâkası arasındaki mesafeyi veren bu değer, sıfır anından itibaren geçen süre ile birlikte kaydedilir. İğnenin aynı numuneye batırılma işlemi, iğnenin pastaya batırıldığı noktalar arasındaki veya kalıp kenarından en az 10 mm mesafe olacak şekilde ve 10 dakikalık uygun zaman aralıkları ile tekrarlanır. Numune, iğnenin batırılma zamanları arasında rutubet odasında veya rutubet dolabında tutulmalıdır. Her batırma işleminden sonra Vicat iğnesi hemen temizlenmelidir. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğne ile taban plâkası arasındaki mesafe (4 ± 1) mm oluncaya kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilir. Gereken doğruluk batma deneylerindeki zaman aralıklarının prizin başlamasına yakın azaltılması ile sağlanabilir ve başarılı deney sonuçlarında aşırı farklılık gözlenmez.

d) Priz sonu süresinin tayini

EN 196-3'e göre tayin edilen priz sonu süresi, taban plâkasının üzerinde bulunan kullanılmış olan dolu kalıp, priz sonu süresi tayini için ters çevrilir. Böylece priz sonu süresinin tayini, pastanın başlangıçta taban plâkası ile temas eden yüzeyi üzerinde yapılır. İğne, küçük batmaların doğru şekilde gözlenebilmesini kolaylaştırmak için iğne bağlantı halkası ile cihaza tutturulur. Pastaya batırma işlemleri arasındaki zaman aralıkları, meselâ 30 dakikaya kadar arttırılabilir. Numune, batırma işlemleri arasında rutubet odasında veya dolabında tutulmalıdır. Her batırma işleminden sonra Vicat

iğnesi hemen temizlenmelidir. İğnenin ilk 0,05 mm kadar battığı an ile sıfır olarak kabul edilen zaman, en yakın 15 dakikaya yuvarlatılarak priz sonu süresi olarak kaydedilir. Gereken doğruluk bağlantı halkasının pasta üzerinde ilk işaret bıraktığı andan itibaren priz sonu yaklaştıkça zaman aralıklarının azaltılması ile sağlanabilir ve başarılı deney sonuçlarında aşırı farklılık gözlenmez.

e) Genleşme

EN 196-3'e göre tayin edilen hacim genleşmesidir. Kalıp, çubuk şeklinde gösterge uçları bulunan pirinçten yapılmış olmalıdır. Kalıbın esnemesi, 300 g'lık bir ağırlık uygulandığında, çubuk şeklindeki göstergelerin uçları arasındaki mesafe, kalıcı deformasyon oluşturmaksızın ($17,5 \pm 2,5$) mm olmalıdır. Her kalıp için alt ve üst plâka olmak üzere bir çift cam plâka bulunmalıdır. Plâkalar kalıptan daha geniş olmalıdır. Kalıbın üzerini örtecek plâka en az 75 g olmalıdır, bu gereği karşılamak için ince bir plâka üzerine ilâve küçük kütleler koyulabilir.

Deney aynı çimento pasta karışımından aynı anda iki numune üzerinde yapılır. Standard kıvamda bir çimento pastası hazırlanır. Hafif yağlanmış Le Chatelier kalıbı yine hafif yağlanmış olan plâkanın üzerine konur ve sıkıştırmaksızın veya vibrasyon yapmaksızın hemen pasta ile doldurulur, tercihe göre sadece elle veya düz kenarlı bir spatül kullanarak, üst yüzeyin seviyesi ayarlanır. Doldurma sırasında kalıbın yarık kısmının açılmaması için parmaklarla hafif sıkılır veya uçlar bağlanır veya uygun bir lastik bantla tutturulur. Kalıbın üstü hafif yağlanmış plâka ile örtülür, gerekirse ilâve kütle eklenir ve bütün cihaz hemen rutubet dolabına konur. Burada ($24 \pm 0,5$) saat (20 ± 1)°C'da ve % 98'den az olmayan bağıl nemde muhafaza edilir. Cam plâkaların arasına yerleştirilmiş kalıbın üzerini örten plâkanın üzerine istenirse ilâve kütle konmak suretiyle hepsi birlikte su banyosuna konulabilir ve burada ($24 \pm 0,5$) saat (20 ± 1)°C'da muhafaza edilir. Ancak bu işlemin referans metoda göre doğrulanmış olması gerekir. ($24 \pm 0,5$) saatlik süre sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe (A) en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak ölçülür. Sonra kalıp (30 ± 5) dakika içinde kaynama sıcaklığına kadar ısıtılır ve su banyosu kaynama sıcaklığında (3 saat $\pm$ 5 dakika) bekletilir. 3 saat sonra meydana gelen genleşme ile aynı değer görülebildiği takdirde, kaynama süresi

daha kısa olabilir. Kaynama süresi sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe (B), en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak ölçülebilir. Kalıbın $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 'a kadar soğuması beklenir. Gösterge uçları arasındaki mesafe (C), en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak ölçülür. Her numune için (A) ve (C) ölçümleri kaydedilir ve (C-A) farkı hesaplanır. (C-A)'nın iki değerinin ortalaması en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak hesaplanır.

f) İncelik

Çimento inceliği başlıca iki değişik şekilde ifade edilmektedir. Birinci yöntemde özgül yüzey cm^2/g olarak Blaine aleti kullanılarak ve hava geçirgenliği prensibine uyarak 1 g çimento numunesindeki tanelerin toplam yüzeyi cm^2 cinsinden belirlenir. Blaine aleti ile özgül yüzey tayini diğer yöntemlere göre daha güvenilir sonuçlar verdiği için incelik tayininde en çok kullanılan yöntem olmaktadır. İkinci yöntemde ise, çimento standartlarında belirtilen büyüklükte göz açıklıklı eleklerden elendikten sonra elek üzerinde kalan miktar % ağırlık olarak bulunur.

g) Özgül ağırlık

Özgül ağırlık değeri, çimentonun bazı dolgu maddeleri ile karıştırılıp karıştırılmadığını ve kuru bir yerde muhafaza edilmediği zaman yer alabilecek hidratasyonun başlayıp başlamadığı hakkında fikir verebilmektedir. Çimentonun özgül ağırlığı çimento kalitesini doğrudan göstermemekle birlikte beton karışımında malzeme oranlarının hesaplanmasında kullanılması yönünden oldukça önemlidir. Portland çimentolarının özgül ağırlığı genellikle $3,10\text{-}3,16 \text{ g/cm}^3$ arasındadır.

4.2.3 Ağır Metal Analizi

Deneysel çalışmada kullanılan farin ve atık çamurlar ile elde edilen klinkerlerdeki ağır metal değerleri toplu halde Çizelge 4.19'da verilmiştir. Ayrıca bu çizelgede örnek teşkil etmesi açısından yayınlanmış olan bir makalenin sonuçları verilmiştir. Makale sonuçları ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen ağır metal analiz değerleri uyumlu olup herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Ağır metallerin sınır değerleri konusunda herhangi bir standart bulunmayıp sadece kromun sınır değeri üzerinde durulmaktadır. Avrupa mevzuatına göre (Chromate Directive 2003/53/EC) çimentoda Cr^{+6} miktarı 2

ppm'den fazla olmalıdır. Klinkerde bulunan ağır metallerin uçucu olmayanları ana minerallerin bileşiğine minör faz olarak girmekte ve kaliteyi minör fazda etkilemektedir.

Ağır metallerin fırın sistemi içerisindeki davranışlarına göre 3 sınıfa ayrılabilir:

- Uçucu olmayan veya çok az uçucu ağır metaller (As, Be, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, P, Sb, Sn, Se, Ni Te, Zn, V, Pb)
- Yarı uçucu ağır metaller (Tl, Cd)
- Uçucu ağır metaller (Hg)

Uçucu olmayan ağır metallerin tamamı klinkere karışır. Hg, Tl, Cd elementleri düşük sıcaklıklarda buharlaşıp baca gazı emisyonuna karıştığı için bu elementlerin konsantrasyonları baca gazı emisyonu ile ölçülüp sınır değerlerle kıyaslanır. Baca gazında Tl + Cd toplamının sınır değeri Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği'ne göre maksimum 0.05 mg/Nm³, Hg'nin maksimum sınır değeri 0.05 mg/Nm³'dür.

Çizelge 4.19 Ağır metal karşılaştırma çizelgesi

AĞIR METALLER (MİKTAR-MG/KG)	FARİ N	TUZLA AÇ	PAŞAKÖ Y AÇ	% 0 AÇ + % 100 LPG	% 5 TUZLA AÇ + % 95 LPG	% 10 TUZLA A AÇ + % 90 LPG	% 10 PAŞAK ÖY AÇ + % 90 LPG	% 20 PAŞAK ÖY AÇ + % 80 LPG	ÖRNEK BİR KLİNKER (MG/KG)*
ANTİMON	0,3	0,21	2,34	0,6	0,3	0,3	0,5	0,5	6,8
ARSENİK	5,5	1,95	1,09	9,3	7,1	8,4	10,2	7,9	83,9
BAKIR	38,6	724	878,9	58,7	55,8	61,9	75,8	75,0	261,4
CİVA	0,108	0,80	2,0	0,052	0,009	0,117	0,052	0,026	0,008
ÇİNKO	37,5	2843	3427	55,7	30,3	57,9	104,3	102,0	
KADMIYUM,	0,8	3,49	6,0	0,6	0,6	0,7	0,6	0,8	1,7
KOBALT	3,2	6,7	8,72	4,2	4,7	4,9	4,7	6,2	6,5
KROM	126,1	2192	2563	544,7	520,4	565,6	515,2	538,7	48,2
KURŞUN	5,9	89,8	378,88	0,6	0,6	1,8	1,2	2,8	57,1
MANGANEZ	309,2	338	351	462,0	437,4	545,7	581,4	461,9	656,1

Çizelge 4.19 Ağır metal karşılaştırma çizelgesi (devamı)

AĞIR METALLER (MİKTAR-MG/KG)	FARİN	TUZLA AÇ	PAŞAKÖY AÇ	% 0 AÇ + % 100 LPG	% 5 TUZLA AÇ + % 95 LPG	% 10 TUZLA AÇ + % 90 LPG	% 10 PAŞAK ÖY AÇ + % 90 LPG	% 20 PAŞAK ÖY AÇ + % 80 LPG	ÖRNEK BİR KLİNKER (MG/KG) *
NİKEL	26,2	136	143,7	45,4	41,0	48,5	48,7	44,8	38,7
SELENYUM	3,1	1,08	1,0	2,8	2,6	2,6	2,1	2,3	5,8
TALYUM	25,3	1,20	3,593	0,3	0,6	-	0,2	0,3	0,3
VANADYUM	17,1	38	116,69	42,5	41,5	44,5	43,2	42,5	87,8

* Gabriella Niculae, Investigations on heavy metals during waste co-incineration, CARPATCEMENT Holding, Bucharest, Romania, ZKG International, No. 11-2008 (Volume 61)

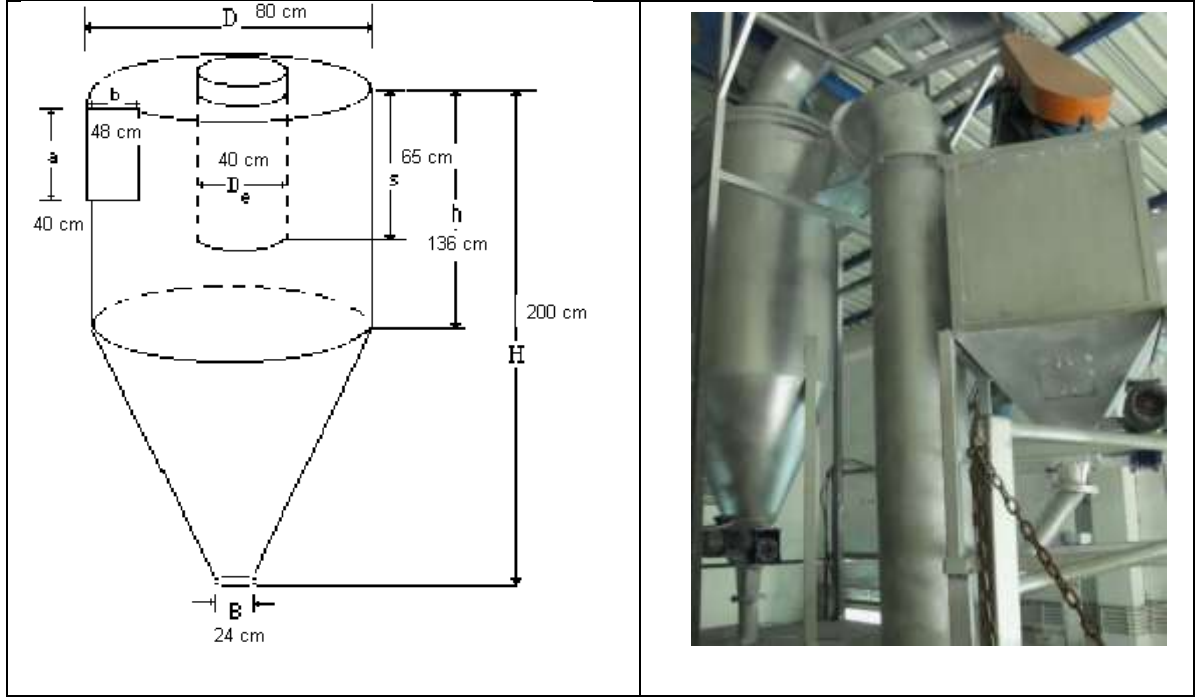
4.2.4 Emisyon Ölçümü

Deneysel çalışma esnasında baca gazında emisyon ölçümü yapılmış ve sonuçlar “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmelik” (SKHKKY) ve “Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik’te (AYİY) atıkları beraber yakan çimento fabrikaları için belirlenen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Her iki yönetmelikle karşılaştırılması sebebi AYİY Geçici Madde 1 “*Bu Yönetmeliğin yayımı tarihinde işletilmekte olan mevcut yakma ve beraber yakma tesisleri, geçerli olan mevcut lisans şartlarına göre faaliyetlerini sürdürürler. Ancak; söz konusu tesisler bu Yönetmeliğin eklerinde parametre bazlı verilen muafiyetler hariç olmak üzere en geç 31/12/2012 tarihine kadar Yönetmelikte belirtilen diğer şartları sağlayacak şekilde gerekli tedbirleri alır.*” ibaresinin yer almasıdır. Ek yakıt kullanma lisanslı almış çimento fabrikaları 31 Aralık 2012 tarihine kadar SKHKKY’te verilen sınır değerleri sağlamak ve geçiş aşamasında AYİY’te verilen sınır değerlere ulaşmak için gerekli yatırımları yapmakla yükümlüdürler.

Pilot döner fırında toz tutma ünitesinin (siklon) bulunmaması sebebi ile döner fırında modifikasyon yapılmış ve Şekil 4.5’de ölçüleri ve şekli verilen bir adet siklon ilave edilmiştir. Pilot ölçekli döner fırında siklon hem ön ısıtıcı hem de toz tutma ünitesi görevi göstermektedir. Endüstriyel boyutlu çimento tesislerinde ön ısıtıcı ve toz tutma

ünitesi görevi gösteren seri bağlı siklonlar (en az 5 adet) bulunmakta ve sistemde ayrıca toz tutma ünitesi olarak %99 verimle çalışan elektrostatik filtre ya da torbalı filtre bulunmaktadır. Pilot ölçekli deneme çalışmalarında emisyon ölçümünün yapılması konusunda ENOFİS'ten hizmet alımı yapılmıştır.

Pilot döner fırında yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.20'de verilmektedir. Tüm sonuçlar kuru gaz, % 10 Oksijen, 1013 mbar, 273°K baz alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Siklon ünitesi

Çizelge 4.20 Pilot ölçekli döner fırın baca gazı analiz sonuçları

PARAMETRE	C (MG/NM ³) %10 O ₂					
	SKHKKY	AYİY	% 0 ATIK ÇAMUR	% 10 TUZLA	% 10 PAŞAKÖY	% 20 PAŞAKÖY
TOZ	50	50*	6329	6730	4046	2975
TOC	-	10	0,94	4,84	5,58	7,2
HCl	10	10	< 0,47	0,47	0,51	0,52
HF	1	1	< 0,47	0,48	0,52	0,54
SO ₂	-	50	t.e.	t.e.	t.e.	t.e.

Çizelge 4.20 Pilot ölçekli döner fırın baca gazı analiz sonuçları (devamı)

PARAMETRE	C (MG/NM ³) %10 O ₂					
	SKHKKY	AYİY	% 0 ATIK ÇAMUR	% 10 TUZLA	% 10 PAŞAKÖY	% 20 PAŞAKÖY
NO ₂	1200	1200*	312	350	276	387
CD + TL	0,05	0,05	0,90	2,49	1,17	0,45
HG	0,05	0,05	0,0008	< 0,0005	< 0,0043	< 0,0005
SB + AS + PB + CR + CO + CU + MN + NI + V + SN	0,5	0,5	4,8	10,56	3,86	1,58
DİOKSİN FURAN (NG/NM3)	0,1	0,1	t.e.	0,0145	0,0049	0,0061

*Deneme yakmasında, NO_x için toplam emisyon limit değeri 1200 mg/m³'ten fazla olmadığı belgelendiği takdirde, 31 Aralık 2014 tarihine kadar, mevcut ıslak işlemlili çimento fırınlarına veya saatte üç tondan az atık yakan çimento fırınlarına, NO_x için muafiyet tanınır. Deneme yakmasında toplam toz emisyon limit değerinin 50 mg/m³'ten fazla olmayacağı belgelendiği takdirde, saatte üç tondan az atık yakan çimento fırınlarına, toz için 31 Aralık 2014 tarihine kadar muafiyet tanınır. Aksi durumda sınır değerler toz için 30 mg/m³, NO_x için 800 mg/m³ olarak 01/01/2013 tarihinden itibaren geçerli olacaktır.

Pilot ölçekli döner fırında yapılan ölçüm sonuçlarında TOC, HCl, HF, SO₂, NO₂, Hg ve Dioksin Furan emisyon değerleri gerek SKHKKY gerekse AYİY de verilen sınır değerlerin altında olduğundan yönetmelikte verilen şartları sağlamaktadır. Toz emisyon değeri ve Hg hariç diğer ağır metaller yönetmelikte verilen sınır değerlerin üstündedir. Bunun sebebi olarak pilot ölçekli tesiste baca gazı arıtım ünitesi bulunmaması ve çalışmalar sırasında tesiste meydana gelen tıkanmalar ve aksaklıklar gösterilebilir. Endüstriyel ölçekli tesislerde ise baca gazı arıtım üniteleri %99,99 verimle çalışmakta olup değerler sınır değerlerin altına düşmektedir. Ayrıca Çizelge de görüldüğü üzere ek yakıt miktarı arttıkça toz ve ağır metal parametrelerinde azalma meydana gelmiştir. Bu sonuç istatistiksel açıdan anlamlı olmamakla beraber daha önce TÜBİTAK 1007 programı kapsamında kurumumuz tarafından yürütülen "105G108 nolu Geri Dönüşümlü Plastik Atıkların Granül Ürüne Dönüştürülmesi ve Geri Dönüştürülemeyen Diğer Atıkların Çimento Fabrikalarında Ek Yakıt Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması" adlı projede de çimento fabrikasına yapılan endüstriyel ölçekli çalışmalarda ek yakıt olarak ATY (Atıktan Türetilmiş Yakıt) kullanılmış ve ATY oranında artışa paralel olarak ağır metal emisyon değerlerinde azalma görülmüştür. Bunun sebebi, ATY nin petrokoka oranla daha düşük kalorifik değere ve daha yüksek nem muhtevasına sahip olması, döner fırın

içerisinde daha düşük alev sıcaklığı ve daha yüksek nemli ortam oluşturmaları ile döner fırının içerişi de, prosesin doğası gereği alkali bir ortam olması sebebiyle ağır metallerin metal hidroksitleri şeklinde bağlanıp gaz fazından ayrılması için daha uygun şartların oluşması olarak açıklanmıştır.

Gerek literatür taraması sonuçları gerekse pilot ölçekli deneysel çalışmalar sonucunda evsel nitelikli atık çamurların çimento sanayinde klinker üretiminde ek yakıt olarak rahatlıkla kullanılabileceği görülmüştür. Bu proje kapsamında sadece iki adet evsel nitelikli atık çamur (Tuzla ve Paşaköy) denenmiş ve yukarıda da anlatıldığı gibi gerek klinkerin kalitesi gerekse bu klinkerden üretilen çimentonun kalitesi açısından standart değerlere göre herhangi bir olumsuz sonuçla karşılaşılmaamıştır. Bu sonuçlardan hareket ederek Tuzla atık çamurunu % 10, Paşaköy atık çamurunu ise % 20 oranında ek yakıt olarak kullanılabileceği görülmüştür. Bu bilgilerden hareket ederek başka bir tesisin de evsel nitelikli atık çamurunun ek yakıt olarak kullanılabileceği görüşüne varılmıştır. Ancak atık çamur sirkülasyonunun fazla olmaması ve klinker üretimi açısından sıkıntı oluşturmaması için atık çamurun yüksek kalorifik değere ve düşük nem oranına sahip olması gerekmektedir. Bir diğer önemli konu ise sadece atık çamuru değil bunun yanında diğer atıkları da aynı anda ek yakıt olarak kullanılması, hem atık çamurda bulunan ağır metallerin hem de baca gazı emisyon değerlerinin dengelenmesi açısından faydalı olacaktır.

Emisyon ölçümünün yapılış şekli aşağıda verilmiştir.

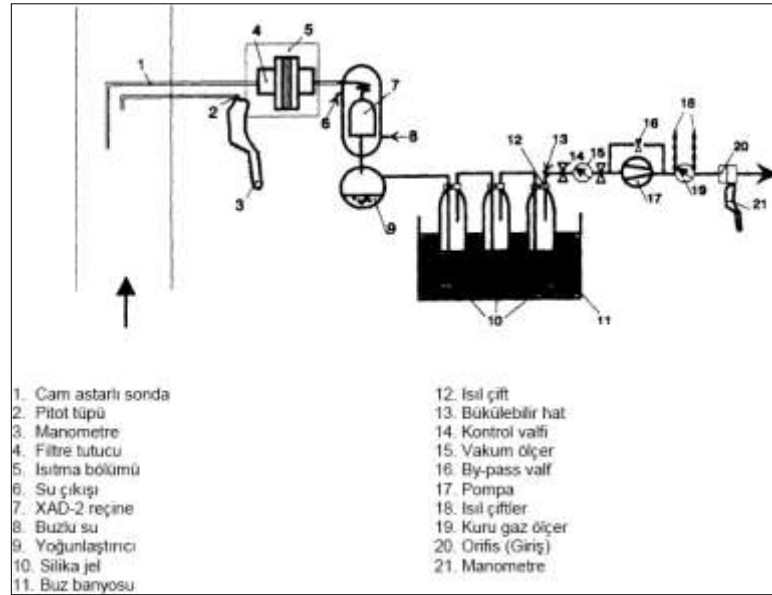
a) PCDD/PCDF Örnekleme ve Analizi

PCDD/PCDF (Poliklorlu dibenzodiyoksin/ Poliklorlu dibenzofuran) numune alma ve ekstraksiyon işlemleri TS EN 1948-1 ve TS EN 1948-2 metotlarına uygun olarak yapılmaktadır. Gaz numunesi, bacadan izokinetik olarak alınır. Parçacıklarda ve gaz fazında adsorblanan PCDD/PCDF'ler numune alma hattında toplanır. Toplama kısmı filtre, destilat balonu ve katı adsorbenttir.

Ana toplama parçalarına, numune alma işleminden önce numunenin türevlerinin geri kazanma hızının tayini için, $^{13}\text{C}_{12}$ etiketli PCDD/PCDF ilave edilir. Numune gaz, numune alma sistemine özgü sıcaklığa getirilir ve gaz veya parçacıklar halindeki PCDD/PCDF'ler tutulur. İzokinetik numune alma, TS ISO 9096'ya göre bacada temsili numune alma pozisyonlarında yapılır.

Numune alma hattı, daha ziyade 0,3 μm çapında tanecikleri olan aerosolden bu tanecikleri % 99,5 etkinlikle tutabilecek bir filtre bulundurur. Sızıntı kontrolünü de ihtiva eden tanık numune, her bir numune alma serisinden önce alınır.

Numune alma hattının kısımları, yeniden kullanılmadan önce temizlenir ve numune ile temas edebilecek, kullanılacak yüzeyler çalkalanır, çalkalama çözeltisi, muhafaza edilir. Numune almada en uzun süre 8 saattir. Numune alma hattının şekli Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 Dioksin ve furan örnekleme hattı

Numune alma standart çözeltisi, koruyucu olarak % 4 tetradekan ihtiva eder. Sızıntı kontrolü, numune alma işleminden önce ve sonra yapılır. Numune alma hattında başlık tıkalı iken, numune alma esnasında en az basıncı belirlemek gerekir ve hacim hızı,

normal akış hızının % 5'inden daha az olacak şekilde ayarlanır. Numune alma akış hızı, metodun geçerli olduğu aralıkta olacak (5 L/dak – 25 L/dak) ve her bir numune alma standardının geri kazanma oranı, ilgili ekstraksiyon standardının % 50'sinden büyük olacak şekilde ayarlanır.

Filtre sıcaklığı, bacanın içinde veya dışında 125 °C'nin altında olmalıdır. Numune gazın sıcaklığı, filtre tutucusunda çığ noktasının üzerinde olmalıdır. Numune gaz sıcaklığı yoğunlaştırıcının alt kısımlarında, en fazla 20 °C'da tutulur.

Sızdırmazlık Kontrolü: Numune alma hattı sonda başlığının tıkanması ve sızıntılar, numune alma hattına atmosfer basıncının altında 50 kPa'ya kadar basınç uygulanarak kontrol edilir.

Numune Gaz Akış Kontrolü: Numune gaz akış oranı elle ayarlanır. Baca gazı verileri, gazölçer giriş ve çıkış sıcaklıkları, gazölçer ve atmosfer basıncı, baca gazı hızı ve numune gaz akış oranları her 10 dakika için kaydedilir. Bunlar, izokinetik koşullarda numune gaz akış oranı sağlamak için gerekli hesaplamalarda kullanılır. Ayrıca bacada nem ve oksijen ölçümleri de yapılarak kayıt altına alınır.

Numune Alma Hattından Numune Geri Kazanımı: Numune alma hattı borudan uzaklaştırılır ve numune alma giriş duvarlarından herhangi bir bulaşmanın olmamasına dikkat edilir. Gerekirse soğutulur ve sızıntılar kontrol edilir. Son sızıntı hızı kaydedilir. Cihaz laboratuvar işlemine göre davranılarak sökülür. Soğuk sonda metodunda, sonda sistemin dışında iken özel dikkat gerekir. Numunenin her bir kısmı iyice kapatılır, temiz numune kalıplarına yerleştirilir ve uygun şekilde etiketlenir.

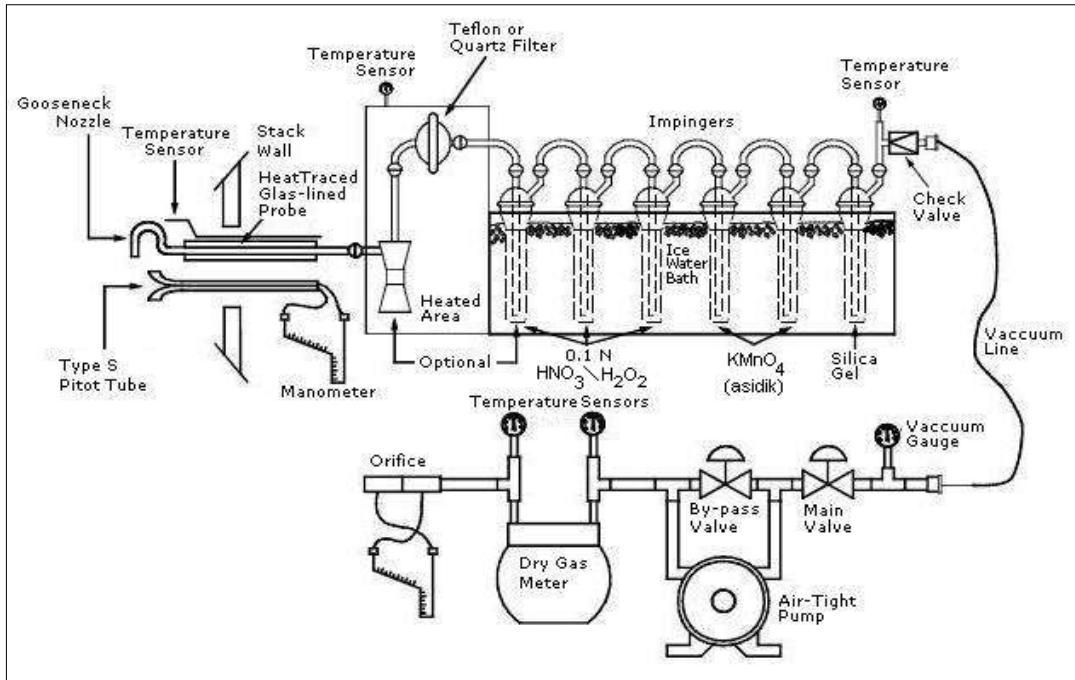
Ekstraksiyon ve Temizleme İşlemi: ¹³C₁₂ etiketli 2,3,7,8-klor sübstitüye PCDD/PCDF üyeleri metodun farklı aşamalarında eklenir. Ekstraksiyon ve temizleme işlemlerinde kayıplar belirlenebilir ve GC/MS analizinden hemen önce eklenmiş enjeksiyon standartları ile birlikte kantitatif tayini için iç standartlar olarak eklenen bu üyeler kullanılarak telafi edilir. İşlenmemiş numune ekstraktının, temizleme işleminin ana

amacı numune matris bileşenlerini uzaklaştırmaktır. Ayrıca son numune ekstraktında analitin zenginleştirilmesi sağlanmış olur. Ekstraksiyon işlemleri, normal olarak filtrelerin ve adsorbanların, sokselet cihazında ekstraksiyonu ve damıtma ürününün sıvı ekstraksiyonuna dayanır. Numunenin temizlenme işlemi, farklı adsorban kullanan çok kolonlu sıvı kromatografi teknikleri ile gerçekleştirilir. Prensip olarak analitleri yeterli miktarda geri kazanabilen herhangi bir temizleme metodu kullanılabilir.

Tesisten alınan numuneler, analiz amacı ile taşıyon olarak kullanılan ALS Group, Çek Cumhuriyeti Prag Laboratuvarlarına analiz için gönderilmiştir. Analiz sonuçlarını gösterir belgeler ve firmanın akreditasyon belgesi ekte verilmiştir.

b)Ağır Metal Örneklemesi ve Analizi

Bacadan numune alma işlemi için genel olarak EPA Metot 29'da verilen işlemlere göre yapılır. Sadece partikül madde emisyonları tayin edilmeyecek ise filtrenin kurutma, tartım gibi ön işlemlerden geçirilmesine gerek yoktur. Numune alma hattının şekli Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 Ağır metal örnekleme hattı

İlk olarak filtre ekipmanını sıcak musluk suyu ile yıkanır, daha sonra ise sıcak sabunlu su ile yıkanır. Daha sonra cam malzemeleri 3 kez musluk suyu ile yıkayın ayrıca üç kez de çalkalayın. Daha sonra hacimsel olarak % 10'luk bir nitrik asit çözeltisinde en az 4 saat boyunca suda tutulur, üç kez çalkalanır ve son olarak da aseton ile yıkanır ve ortam havasında kurumaya bırakılır. Tüm malzemeler kuruma sırasında kirlenme olmaması için üzerleri kaplanırlar.

Örnekleme hattı hazırlanırken tüm bağlantılar olası bir kirlenmeye karşı kapalı tutulur. Nem bu sistemden ayrı olarak tayin edilir. Bu nedenle birinci ve ikinci gaz yıkama şişelerine 100 ml $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ çözeltisinden eklenilir. Üçüncü gaz yıkama şişesi boş bırakılır. Daha sonra dördüncü ve beşinci gaz yıkama şişelerine asidik KMnO_4 (% 4 KMnO_4 / %10 H_2SO_4) eklenir. Son gaz yıkama şişesinde ya da kendi kutusunda pompayı nemden korumak için silika jel bulundurulur.

Örnekleme öncesi sistemde kaçak olmaması için gerekli önlemler alınır ve kaçak testleri yapılır. Ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla bir toz örnekleme benzer şekilde hava çekişi yapılarak selüloz ester membran filtreden geçirilir. Bu şekilde baca gazında bulunan ağır metaller filtre üzerinde toplanır. Numune alımında kullanılan filtreler numune saklama kapları ile laboratuvara ulaştırılır. İzokinetik örnekleme noktalarından numune alma işlemi sırasında elde edilen verilen daha sonra hesaplamalarda kullanılmak üzere kaydedilir. Örnekleme işlemi tamamlandıktan sonra örneğin geri kazanılması işlemleri gerçekleştirilir.

Laboratuvara gelen filtreler mikrodalgada önişleme tabi tutularak tamamen berrak bir sıvı haline getirilir, numune bu şekilde Atomik Absorpsiyon Spektrometre ile analiz için hazır hale gelir. Aynı işlemlerden geçirilerek şahit numune de hazırlanır, tesisten alınan numune ve şahit numune Atomik Absorpsiyon Spektrometre cihazında analiz edilir ve ağır metal tayini yapılır.

Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi, gaz halindeki ve temel enerji düzeyinde bulunan atomların, UV ve görünür bölgedeki ışığı absorblaması ilkesine dayanır. Işıma şiddetindeki azalma ortamda absorbsiyon yapan elementin derişimi ile doğru orantılıdır. Hangi metalin analizi yapılacak ise cihaza o metalin oyuk katot lambası

kullanılır. Analizi yapılacak metale has standartlar hazırlanarak metalin absorbands yaptığı dalgaboyunda okuma yapılır.

Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresinin bileşenleri, analiz edilecek elementin absorplayacağı ışığı yayan ışık kaynağı, örnek çözeltisinin atomik buhar haline getirildiği atomlaştırıcı, çalışılan dalgaboyunu diğer dalgaboylarından ayırıştırılmasına yarayan monokromatör ve ışık şiddetinin ölçüldüğü dedektördür.

c) Bacada Toz Örneklemesi ve Analizi

EPA Metot 5 ile baca gazında toz ölçümü yapılır. İzokinetik örneklemeye metoduna uygun toz örneklemeye cihazı ile numuneler aşağıda sıralanan parçalar kullanılarak izokinetik olarak örneklenir ve gravimetrik olarak tartımla toz konsantrasyonu bulunur.

Cihaz ve Malzemeler:

Toz ölçümleri izokinetik örneklemeye metodu ile çalışan cihazla yapılmıştır.

- Partiküller Madde Ölçüm Cihazı
- Nem tutucu (Desikatör)
- Nem tutucu (Silika Jel)
- Bağlantı Hortumları
- Ölçüm Probu (Isıtmalı)
- Ölçüm koşullarına göre seçilen ve ölçümde kullanılan başlıklar ve diğer aparatlar
- Etüv
- Hassas Terazı
- Filtre Kağıdı: 82,6 mm çaplı fiberglas filtre kağıdı
- Filtre tutucu (Isıtmalı)
- Pens
- Saklama Kabı: Şeffaf 90 x 15 mm boyutlarında filtre saklama kabı

Örneklemeye İşlemi:

Örnekleme yapılacak noktanın izokinetik şartlara uygun olması gerekmektedir. Bunun için gaz hattı üzerinde bulunan dirsek, fan, klape gibi gaz akımını bozucu etkiler dikkate alınarak, baca tabii çekişli ise en az 2 (iki) baca çapı (eşdeğer çap), baca cebri çekişli ise gazın geliş istikametine doğru tercihen 8 (sekiz) baca çapı (eşdeğer çap) uzaklıkta seçilmelidir.

Örneklemede kullanılacak olan filtre kağıdı bacada beklenen toz miktarına göre tercih edilir. Çok tozlu olan proses bacalarında (çimento fabrikaları, kireç ocakları v.b.) parmak filtreler kullanılır. Tercih edilen filtre, tutucuya sabitlenmeden önce gün ışığına tutulmak suretiyle, üzerinde iğne deliği benzeri büyüklükte sızdırma yapabilecek delik olup olmadığı gözle kontrol edilir. Uygun olmayan bir sonuçla karşılaşırsa başka bir filtre kağıdı aynı testten geçirilmek suretiyle kullanılır.

Numune alma noktası ve sonda deliği tespit edildikten sonra toz cihazının, kullanma talimatında belirtildiği gibi aparatları ile birlikte bağlantıları yapılır ve kaçak testine tabi tutulur, herhangi bir hata ile karşılaşılmadığı takdirde cihaz kullanıma hazır hale getirilir.

Isıtmalı Prob örnekleme noktasına bağlanarak ısıtmalı prob ve filtre tutucunun 120 °C'ye ısınması beklenir ve baca içerisinde tespit edilen her nokta için numune alma işlemi gerçekleştirilir. Aynı esnada bacadaki nem miktarı ve basınç ölçülerek kayıt altına alınır. Ölçüm sonrasında hesaplama için kullanılacak olan değerler cihazdan okunarak Toz Emisyonu Numune Alma Formu'na kaydedilir. Filtre tutucudan çıkarılan filtre kağıdı, sonuçların makullüğü açısından gözle kontrol edilir. Filtre kağıdı tartılmak üzere ilgili taşıma kabına konur ve saklanır.

Örnek Analizi:

Uygun saklama kapları ile laboratuvara getirilen filtreler 2 saat süreyle 105 °C'de etüvde kurutulur ve nem ve tozdan etkilenmeyecek kapta (desikatör) yaklaşık 2 saat bekletilir. Nem ve sıcaklık kontrolü olan bir ortamda, sertifikalı ağırlık malzemeleriyle

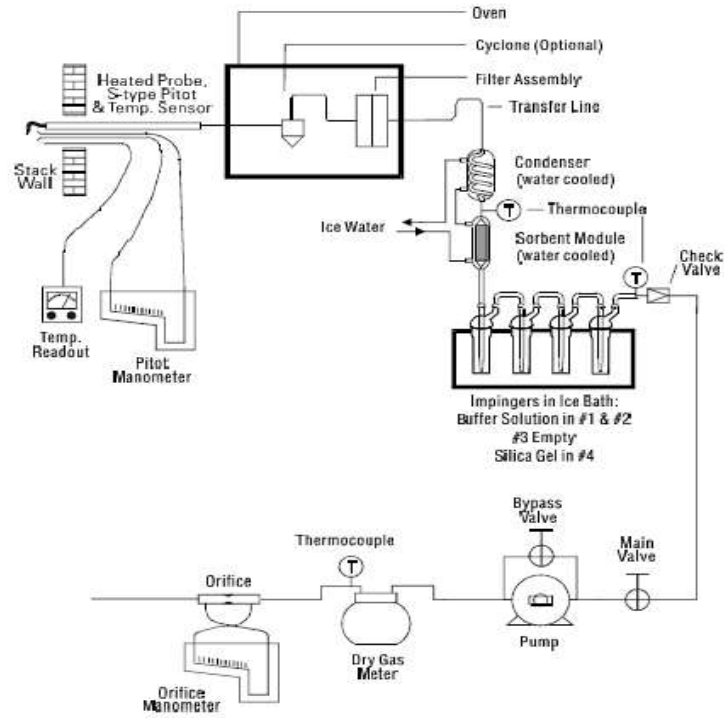
doğrulaması yapılan hassas terazide tartılıp sonuçları Hassas Terazi Kayıt Çizelgesi'ne kaydedilir. Hesaplama işlemi tartım sonuçları kullanılarak, gazın içerdiği toz miktarı formül kullanılarak mg/m^3 cinsinden hesaplanır.

d) PAH Örnekleme ve Analizi

Sabit kaynaklardan PAH örnekleme ISO 11338-1, numune hazırlanması, ekstraksiyonu ve analizi ISO 11338-2 metotlarına göre gerçekleştirilir.

Genel Hazırlıklar: Örnekleme işlemi için izokinetik şartlarda temsil edici noktalar belirlenir ve TS ISO 9096 metodundaki gibi, izokinetik örnekleme yapılır. Her bir örnekleme işlemi öncesinde sızıntı (kaçak) testi gerçekleştirilir. Örnekleme işleminin başlamasından önce baca gazının yoğunluğu, basıncı, sıcaklığı ve eğer mümkün ise gaz kompozisyonu tayin edilir. Ayrıca izokinetik şartlar için baca kesitindeki hız ve sıcaklık profili de ortaya çıkarılır. Örnekleme yapabilmek için bacanın hızına ve sıcaklığına uygun olarak nozullar seçilir ve örnekleme yapılır. Laboratuvarda temizlenmiş ve örneklemede kullanılacak olan malzemeler temiz bir kutu içinde ve dikkatlice taşınır. Ölçüm sırasında örnekleme hacmi (standart şartlar), örnek sıcaklığı (gazometreden geçen), ortalama gaz hızı, baca boyutları, baca gazının nem miktarı, örnekleme süresi boyunca baca gazının ortalama oksijen miktarı, bacadaki statik basınç ve sıcaklık, örnekleme akışı kaydedilir.

Örnekleme İşlemi: Bacadan izokinetik olarak çekilen baca gazı nozuldan, ısıtılmış probdan ve ısıtılmış kısımda bulunan filtre tutucudan geçirilir. Filtre sıcaklığı çığırma sıcaklığının üzerinde tutulur fakat baca sıcaklığının üzerinde tutulmaz. Eğer bacada çok yoğun bir toz miktarı varsa, bu durumda siklon filtre fazla birikmeyi önlemek amacı ile kullanılır. Tüm sistemden geçirilen baca gazı sıcaklığı yeterli soğukluğa ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına) indirilir ve PAH örnekleme yapılan katı adsorberda (XAD-2) tutulur. Örnekleme hattının tasarımına bağlı olarak geçirilen numune debisi $1\text{ m}^3/\text{saatten}$ $6\text{ m}^3/\text{saate}$ kadar değişkenlik gösterir.



Şekil 4.8 PAH örnekleme hattı

Numunenin Analizi: PAH'ların analizleri için kullanılan metot ISO 11338-2'dir. Bu metod ile PAH'ların ppb seviyesinde analizleri gaz kromatograf ile yapılır. Alınmış olan numuneler 1 hafta içerisinde, tercihen ise 24 saat içerisinde ekstrakte edilir. Numuneler koyu bir ortamda ve uygun sıcaklıkta bekletilirler. Ekstraksiyon öncesinde, numuneye PAH bileşenlerinin geri kazanım tayini için, $^{13}\text{C}_{12}$ etiketli PAH standart çözeltisi ilave edilir. Ekstraksiyon işlemi numune hazırlama işlemi gibi 20 saat süren bir işlemdir. Numuneler ekstrakte edildikten sonra, clean-up (temizleme) işleminden geçirilirler. Bu işlemin bitmesinin ardından da gaz kromatografiye hazır hale getirilirler. Analize hazırlanan maddelerin 2-5 μl aralığında enjeksiyonu ile Kütle Spektrometresi (MS) ile tayin işlemi yapılır. Analizler GC-MS'in iyon seçimli görüntüleme modunda (SIM) gerçekleştirilir.

Kalibrasyon Standartları: Kabul edilebilir bir analitik kesinlik için bilinen konsantrasyonda sertifikalı malzemeler analiz edilir. PAH analizleri için kullanılacak olan

kalibrasyon standartları ticari olarak satın alınmış ve buradan seyreltme yolu ile kullanılmaktadır.

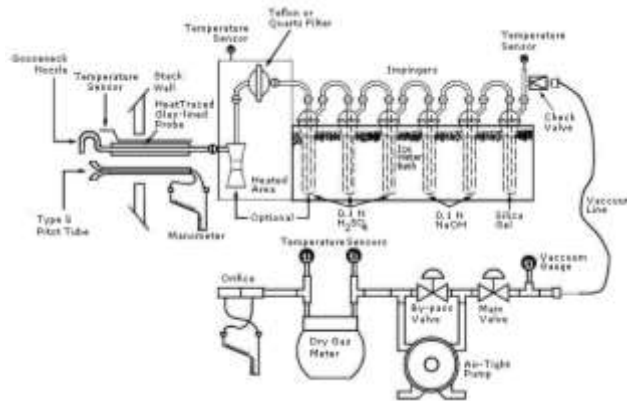
Gaz Kromatografi: Numune GC-MS (Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi) cihazına enjekte edilir, uygun fırın programı ile analiz gerçekleştirilir. Cihaz ile daha önceden yapılmış kalibrasyon verilerine dayanarak PAH bileşenlerinin kütesel konsantrasyonları (ng/m^3) hesaplanır ve raporlanır.

e) Halojen Tayini

EPA Metot 26 A ile Baca Gazından Hidrojen Halide ve Halojenlerin İzokinetik olarak Örneklenmesi ve Tayini yapılır. Hidrojen bileşiklerinin ve halojenlerden Hidrojen Klorür (HCl), Hidrojen Bromür (HBr), Hidrojen Florür (HF), Klor (Cl_2) ve Brom (Br_2)ların örneklenmesi gaz yıkama şişeleriyle sıvı absorbanlara izokinetik olarak yapılır. Örneklemesi yapılan halojenlerin analizi iyon kromatograf cihazı ile yapılır. Bu metotta Hidrojen Klorür için analitik tespit edilebilir limit $0.2 \mu\text{g}/\text{mL}$ 'dir. Diğer bileşikler için bu limit daha düşüktür.

Cihaz ve Malzemeler:

Örneklemeye için bir örneklemeye probu, ısıtmalı olabilecek bir filtre işlemi, içinde sülfürik asit ve sodyum hidroksit bulunan gaz yıkama şişeleri, kontrol vanası, pompa, gaz sayacı, akış ölçüm sistemi olan bir sistem gereklidir. Ayrıca çekilen havada sıcaklık ve basınç ölçümü yapabilmelidir. Ölçümün normalleştirilmesi için de bir ortam basınç ölçerine ihtiyaç vardır.



Şekil 4.9 Örneklemeye sistemi

Baca gazı analiz cihazı ölçüm yapılan kaynakta

Ölçüm Aralığı: 0,1 – 200 mg/m³

Minimum Tayin Sınırı: 0,1 mg/m³ (0,1 m³ hava için)

200 mg/m³'ten yüksek konsantrasyonlar için, sonuçlar geçerli kılınmadan önce absorpsiyon verimliliğinin kontrol edilmesi şartı ile kullanılabilir.

Harici Kalibrasyon: Pompanın çekişinin kalibrasyonu, akış hızı ölçerin kalibrasyonu, sıcaklık ayarlarının kalibrasyonu yapılamalıdır.

Dahili Kalibrasyon: Pompanın çekişinin doğrulaması, ısıtılmış hat için sıcaklıkların doğrulaması yapılmalıdır.

Örnekleme İşlemi:

İzokinetik olarak örnekleme yapılır ve tamamlanır. Her bir örneklemeden önce ölçüm öncesi ve ölçüm sonrası kaçak testi yapılması gereklidir. Kaçak testi sonucu çekilen baca gazı debisinin %2'sini aşmayacak şekilde olmalıdır.

Ölçüm Sonrası Kaçak Testi: Her bir örnekleme işlemi sonucunda kaçak testi yapılması zorunludur. Kaçak testi işlemi başlangıçtaki gibi yapılır, tek farklılık, çekilen vakuma eşdeğer ya da en büyük vakuma eşdeğer şekilde yapılması gerekmektedir. Eğer elde edilen değer ortalama çekiş debisinin %2'sinden daha düşük ise sonuçlar kabul edilebilirdir ancak değil ise örnek hükümsüzdür.

2 ve 3. gaz yıkama şişesinde sülfürik asit çözeltileri plastik kaba koyulmak suretiyle stoklanır, ayrıca bağlantı ekipmanları da saf su ile yıkanarak aynı kaba alınır. Toplam miktar hacimce ± 1 mL hassasiyetli mezürle ölçülerek işaretlenir ve kaydedilir.

4 ve 5. gaz yıkama şişesindeki sodyum hidroksit çözeltileri plastik kaba koyulmak suretiyle stoklanır, ayrıca bağlantı ekipmanları da saf su ile yıkanarak aynı kaba alınır.

Bacada beklenen her 1 ppm'lik derişimler için 25 mg'lık sodium thiosulfate kaba eklenir ve çalkalanarak karıştırılması sağlanır. Bu madde koruyucu madde olarak kullanılır ve çıkan seviye işaretlenir.

Saha Şahitleri: Örnek geri kazanımında izlenen adımlar aynı şekilde izlenerek kullanılan miktardaki reaktifler saha şahidi olarak ayrı kaplara alınır ve işaretlenir.

f) Yanma Gazı Ölçümleri

Firmamız laboratuvarında kullanılan baca gazı analiz cihazı, portatif bir cihaz olup Testo firmasının 350 M/XL modelidir. Baca gazı analiz cihazı CO, SO₂, NO, NO₂ NO_x (NO + NO₂ toplamı cinsinden) konsantrasyonlarını ppm ve oksijen düzeltmeli mg/Nm³ türünden, O₂ % (yüzde) türünden ve sıcaklık °C olarak ölçebilmektedir. Ayrıca Testo 350 M/XL cihazı CO₂, yanma verimi, fazla hava katsayısı ve kayıpları hesaplayabilmektedir.

Baca gazı analiz cihazı el kontrol ünitesi, cihaz üzerine yerleştirilerek veya data kablosu vasıtasıyla cihazdan ayrı olarak kullanılabilen ve ölçüm sonuçlarını ekranda gösteren Testo 454 marka el kontrol ünitesidir. Ayrıca el kontrol ünitesi vasıtasıyla basınç farkı ve hız ölçümü yapılmaktadır.

Testo marka ısılık pompası ile Bacharach Skalasına göre ısılık ölçümleri yapılmakta olup 1.63 litre gazın ayrı bir pompa ile yardımı ile otomatik bir şekilde filtre kâğıdından geçirilerek filtre kâğıdında toplanan ısı miktarı Bacharach Skalası ile karşılaştırılmaktadır.

Cihaza ait ölçüm problemleri; 700 mm uzunluğunda 1000 °C sıcaklığa dayanıklı ve 350 mm uzunluğunda 500 °C sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelik malzemelerdir.

g) Bacada Toplam Organik Karbon Tayini

Baca gazlarında düşük derişimlerde bulunan gaz halindeki toplam organik karbonun kütle derişiminin, alev iyonlaştırma detektörü (FID) kullanan cihaz ile tayini TS EN 12619 Metodu gereğince yapılmaktadır.

Cihaz ve Malzemeler:

Alev İyonlaştırma Detektörü (FID): Ölçme prensibi, hidrojen alevinde organik bileşiklerin yanması sonucu ortaya çıkan iyonlaşma akımının tayinine dayanır. Bu akım, yakıt gazı alevinde yanan organik bileşiklerin bağ oluşturan (düz zincir veya dallı zincirli) ve bağ eşlerinin karbon atomlarının sayısına bağlıdır. Tepki faktörü, detektörün özel tasarımının ve ayarlanan çalışma koşullarının bir fonksiyonudur. FID'nin en önemli faydası, organik karbon içeren bileşiklere kuvvetli bir şekilde ve inorganik yakıt gazı bileşiklerine (CO, CO₂, NO, H₂O gibi) ise daha zayıf tepki vermesidir. FID'nin çalışması için bir yakıt gazına ve yanma havasına ihtiyaç vardır.

Yanma Havası: Yanma havasının TOC derişimi 0,2 mg/m³'ü aşmamalıdır.

Yakıt Gazları: Yakıt gazı, donanımın üreticisinin ayrıntılı tanımlamalarına göre temin edilmeli ve kullanılmalıdır. Bu gazlar; hidrojen, hidrojen/helyum karışımı, hidrojen/azot karışımı olabilir. TOC derişimi, 0,2 mg/m³'ü aşmamalıdır. % 99,999 (hacimce yüzde) saflığa sahip gazlar genelde bu şartı karşılar. Yakıt gazı borusu, paslanmaz çelikten veya bakırdan yapılmış olmalıdır.

Sıfır Ayar Gazı Ve Seyreltme Gazı: Sıfır ayarı ve seyreltme gazı olarak azot (0,2 mg/m³'den daha az TOC içeren) kullanılır. 0,2 mg/m³'ü aşmamak şartıyla hava da kullanılabilir.

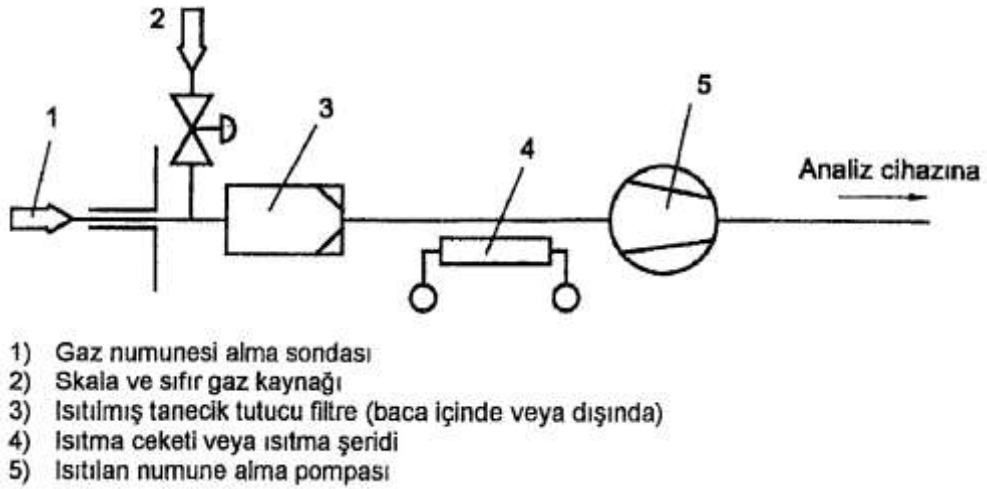
Ayar Gazı: Ayar gazı bileşeni propan olmalıdır. Bu gaz, 0,2 mg/m³'ten daha az TOC içeren bir tamamlayıcı gaz içinde hazırlanmalıdır. Bu gaz bilinen bir derişime ve gazın analizi en çok % 2 belirsizliğe sahip olmalıdır. Ayar gazı yaklaşık 16 mg/m³ TOC derişimine sahip olmalıdır.

Kontrol Gaz Karışımı: Kontrol gaz karışımı metan ($\approx 2,0$ mg/m³), etan ($\approx 1,5$ mg/m³), toluen ($\approx 0,5$ mg/m³), oksijen (≈ 11 %), karbondioksit (≈ 10 %), karbonmonoksit (≈ 50 %)

mg/m³) ve tamamlayıcı gaz olarak azottan oluşur ve analiz maksimum %6'lık belirsizliğe sahip olmalıdır.

Örnekleme İşlemi:

Toplam Organik Karbon örnekleme işlemi Sigma Mini FID cihazı ile yapılmaktadır. Numune alma, büyük miktardaki baca gazından, ana gaz akışının bileşimini doğru olarak temsil edecek şekilde küçük bir kısmı çekme işlemidir. Numune alma ekipmanı için paslanmaz çelik politetrafloretillen ve polipropilenflorür uygun malzemelerdir. Numune alma cihazı yakıcıyı tıkayabilecek ince tanecikleri ayırmak için bir filtre tertibatı mutlaka olmalıdır. Filtreden sonra yoğunlaşmadan kaçınılmalıdır. Bu amaçla en soğuk noktanın sıcaklığı baca gazı sıcaklığının 20 °C üstünde olacak ve baca gazının sıcaklığını 200 °C'den fazla aşmayacak şekilde ısıtılmış bir hat mutlaka gereklidir. Ölçümlerde kullanılan örnekleme hattı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Örnekleme için kullanılan cihaz şeması

Sigma Mini FID cihazı açılmadan önce yakıt ve kalibrasyon tüplerinin bağlantı ekipmanları kontrol edilir. Bunlarda herhangi bir hasar söz konusu ise cihaz çalıştırılmaz. Isıtmalı hat cihaza bağlandıktan sonra hat üzerinde herhangi bir kıvrım olmaması gerekir. Hat üzerinde oluşacak herhangi bir kıvrım o bölgenin çok fazla

ısınmasına neden olacaktır. Cihaz açıldıktan sonra kesinlikle ısıtmalı hattın kurulu elektriksel bağlantısı kesilemez yada bağlantı kurulamaz.

Cihaz kalibrasyonu yapılarak kullanıma hazır hale getirilir.

Ölçüm işlemine başlanmadan önce proses koşulları göz önünde bulundurularak ısıtmalı hattın sıcaklığı kontrol edilir. Prob bacanın içine girilerek ölçüm işlemine başlanılır. Bacadaki gazın prob hattından geliş süresi, FID prosesi süresi ve proses koşulları göz önünde bulundurularak değerler takip edilir. En az 5 dakika sonra okunan değer FR.504.85. Sabit Kaynaklarda Toplam Organik Karbon (TOC) Tayin Formu'na kaydedilir.

Veri Toplama:

FID analizörü, ölçülen TOC derişim değerlerinin sürekli bir çıktısını sağlama özelliğine sahiptir. Cihaz, örnekleme işlemine başladıktan yaklaşık 10 – 15 dk sonra stabil hale gelir ve ekranından okunan değerler kayıt altına alınarak sonuçlar okunur.

ENDÜSTRİYEL ÖLÇEKLİ ÇALIŞMA

5.1 Projede Deneylerde Kullanılan Girdileri Hakkında Genel Bilgiler

5.1.1 Yakıt

Petrokok ham petrolün rafinerilerde işlenmesi sonucunda petrol içeriğindeki her türlü uçucu madde türleri ve yağların kazanılmasından sonra zorunlu olarak çıkan katı artık bir maddedir. Koyu gri veya siyah renklidir. Eritilemez fakat 1500°C üzeri sıcaklıklarda plastik faza geçer. Başlıca bileşeni karbondur, yapısında kükürt, oksijen ve azot ve hidrojen de bulundurur. Isıl değeri ortalama 7800 kcal/kg'dır. Standart bir petrokok kuru bazda, % 85,5 karbon, % 12,9 uçucu madde ve % 1,6 kül içerir. Kükürt yüzdesi ise ortalama % 4,5 olarak kabul edilir. Ülkemizde petrokokun ısınma amaçlı kullanımı yasaklanmıştır. Ancak çimento üretiminde linyitlerle % 30 -60 arasında karıştırılarak kullanılmaktadır.

Endüstriyel deneme çalışmaları özel bir çimento fabrikasında yürütülmüştür. Çimento fabrikası döner fırında ana yakıt olarak petrokok ve linyit kullanılmaktadır. Bunun yanında atık yağ, atık lastik ve atık plastik gibi malzemeler zaman zaman petrokoka ek yakıt olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmada klinker üretimi için birincil yakıt olarak linyit ve petrokok kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan yakıtların özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan yakıtın özellikleri

	LİNYİT			PETROKOK		
	% 6 ATAKÖY	% 4 ATAKÖY	% 10 PAŞAKÖY	% 6 ATAKÖY	% 4 ATAKÖY	% 10 PAŞAKÖY
BÜNYE RUTUBETİ (%)	2,01	2,12	2,12	0,46	0,38	0,81
HAVADA KURU KÖMÜRDE UÇUCU MADDE (%)	32,25	29,25	28,33	15,68	11,75	13,75
KURU KÖMÜRDE UÇUCU MADDE (%)	32,91	29,88	28,94	15,75	11,79	13,86
HAVADA KURU KÖMÜRDE KÜL (%)	22,34	20,78	23,12	5,72	3,52	8,95
KURU KÖMÜRDE KÜL (%)	22,80	21,23	23,62	5,75	3,53	9,02
HAVADA KURU KÖM.YANAN KÜKÜRT (%)	0,91	0,89	0,66	4,37	4,36	4,30
HAVADA KURU KÖM.YANMAYAN KÜKÜRT (%)	0,19	0,19	0,12	0,50	0,50	0,50
TOPLAM KÜKÜRT (%)	1,10	1,08	0,78	4,87	4,86	4,80
HAVADA K.KÖM.ÜST KAL. (KCAL/KG)	6.071	6.097	5.788	8.005	8.044	7.823
K.KÖM.ÜST KAL. (KCAL/KG)	6.196	6.229	5.913	8.042	8.075	7.887
K.KÖM.ALT KAL. (KCAL/KG)	5.978	6.023	5.718	7.844	7.892	7.696
OR.KÖM.ALT KAL. (KCAL/KG)	5.848	5.884	5.586	7.807	7.862	7.631

5.1.2 Atık Çamur

Endüstriyel ölçekli deneme çalışmalarda evsel nitelikte Ataköy Atıksu Arıtma Tesisi ve Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisi atık çamuru kullanılmıştır. İSKİ'den kuru olarak (KM~10-2) temin edilen atık çamurların fiziksel özellikleri ile ağır metal analizler sonuçları Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Ataköy ve paşaköy atık çamurunun fiziksel özellikleri

PARAMETRE	ATAKÖY ATIK ÇAMURU	PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU
YOĞUNLUK (G/ML)	1,0	0,9
NEM 75 °C (%)	3	4
ORJİNAL ÇAMUR ÜST KALORİ (KCAL/KG)	2.881	3.221
ORJİNAL ÇAMUR ALT KALORİ (KCAL/KG)	2.582	2.958
pH	7,1	6,5
KÜL (550 °C) (%)	43,2	41,5
KIZDIRMA KAYBI, LOI (550°C) (%)	56,8	58,5
PARLAMA NOKTASI (°C)	142	171
TOPLAM ORGANİK KARBON, TOK (%)	29	32,4
ÇÖZÜNÜMÜŞ ORGANİK KARBON, ÇOK (MG/L)	1715	7300
TOPLAM KÜKÜRT (%)	0,72	0,82
TOPLAM KARBON, C (%)	28	32,5
TOPLAM AZOT, N (%)	3,21	5
TOPLAM HALOJENLER, TX (% CL-)	0,03	0,07
SÜLFAT (MG/L)	29,2	194

Çizelge 5.3 Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan çamurun özellikleri

PARAMETRE	% 6 ATAKÖY	% 4 ATAKÖY	% 10 PAŞAKÖY
CI	0,0862	0,0783	0,0235
AC 350 KAL. BOMBA KALORİSİ	2833	2798	3225
BÜNYE RUTUBETİ (%)	3,12	3,08	1,28
HAVADA KURU ÇAMURDA UÇUCU MADDE (%)	50,24	49,68	55,61
KURU ÇAMURDA UÇUCU MADDE (%)	51,86	51,26	56,33
ORJİNAL ÇAMURDA UÇUCU MADDE (%)	50,24	49,68	55,61
HAVADA KURU ÇAMURDA KÜL (%)	41,89	41,76	37,28
KURU ÇAMURDA KÜL (%)	43,24	43,09	37,76
ORJİNAL ÇAMURDA KÜL (%)	41,89	41,76	37,28
KURU ÇAMURDA TOPLAM KÜKÜRT (%)	0,66	0,66	0,74
HAVADA KURU ÇAMUR ÜST KALORİ (KCAL/KG)	2.791	2.756	3.180

Çizelge 5.3 Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan çamurun özellikleri (devamı)

PARAMETRE	% 6 ATAÖY	% 4 ATAÖY	% 10 PAŞAÖY
HAVADA KURU ÇAMUR ALT KALORİ (KCAL/KG)	2.653	2.620	3.026
KURU ÇAMUR ÜST KALORİ (KCAL/KG)	2.881	2.844	3.221
KURU ÇAMUR ALT KALORİ (KCAL/KG)	2.682	2.649	3.003
ORJİNAL ÇAMUR ÜST KALORİ (KCAL/KG)	2.791	2.756	3.180
ORJİNAL ÇAMUR ALT KALORİ (KCAL/KG)	2.582	2.551	2.958

Çizelge 5.4 Ataköy atık çamuru ve paşaköy atık çamurunun ağır metal analizleri

PARAMETRE (MG/KG)	ATAÖY ATIK ÇAMURU	PAŞAÖY ATIK ÇAMURU
ANTİMON, SB	1,7	2
ARSENİK, AS	3,3	4,6
BAKIR, CU	530	318
CİVA, HG	0,80	0,65
ÇİNKÖ, ZN	1107	1076
KADMİYUM, CD	5,3	1,37
KOBALT, CO	4,3	7
KROM, CR	320	617
KURŞUN, PB	41,7	36,6
MANGANEZ, MN	275	0,8
NİKEL, Nİ	145	252
SELENYUM, SE	1,8	2
TALYUM, TL	1,20	-
VANADYUM, V	32	27

5.1.3 Farin

Deneysel çalışma endüstriyel boyutta ve ticari çimento üreten fabrikada yapıldığı için, işletmenin uygulamış olduğu sisteme paralel olarak deneyin başlandığı saatten itibaren saat başı farin numunesi alınıp farinin özellikleri belirlenmektedir. Endüstriyel ölçekli

deneysel çalışmalarda kullanılan farinin kimyasal analizi ve modülleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5 Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan farinin kimyasal analizi ve modüller

BİLEŞENLER VE MODÜLLER	% 6 ATAÖY MİKTAR (%) 25.10.2011	% 4 ATAÖY MİKTAR (%) 26.10.2011	% 10 PAŞAKÖY MİKTAR (%) 02.11.2011
CAO	44,16	44,25	44,36
SiO ₂	12,35	12,30	12,30
Al ₂ O ₃	3,25	3,19	3,16
Fe ₂ O ₃	2,17	2,21	2,16
MGO	0,93	0,94	0,92
K ₂ O	0,67	0,64	0,63
CL	0,0232	0,0235	0,0241
NA ₂ O	0,14	0,14	0,14
TiO ₂	0,31	0,30	0,31
SO ₃	0,10	0,10	0,11
MNO	-	-	-
KIZDIRMA KAYBI	35,91	35,90	35,88
TOPLAM	100,01	99,99	99,99
KİREÇ STANDARDI (K.S.T)	110,91	111,60	112,07
SİLİS MODÜLÜ (S.M)	2,28	2,28	2,31
HİDROLİK MODÜL (H.M.)	2,49	2,50	2,52
ALÜMİNA MODÜLÜ (T.M.)	1,50	1,44	1,46

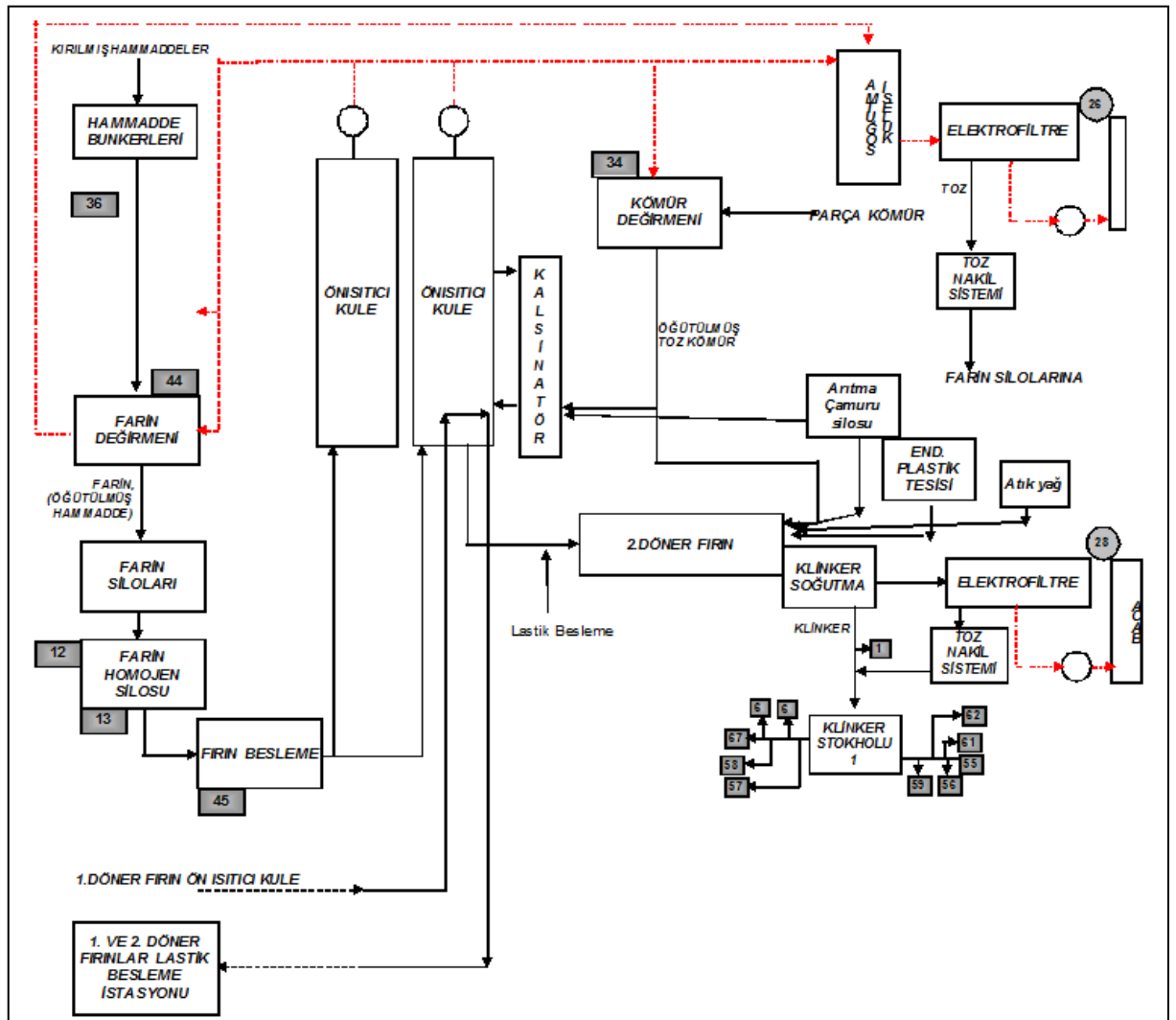
5.1.4 Endüstriyel Ölçekli Döner Fırın

Proje kapsamında endüstriyel ölçekli klinker özel bir çimento fabrikasında 2 numaralı çimento fırınında üretilmiştir. Fabrikanın üç adet üretim hattı bulunmaktadır. 1. üretim hattında 90 ton/saat, 2. üretim hattında 250 ton/saat, 3. üretim hattında 115 ton/saat kapasiteli farin değirmenlerinde hazırlanan hammadde; 1. üretim hattında 1345

ton/gün, 2. üretim hattında 2800 ton/gün, 3. üretim hattında 1600 ton/gün olmak üzere toplam 5450 ton/gün kapasiteli ön ısıtıcılı prekalsinatörlü kuru sistem döner fırınlarda 1450-1500°C'de pişirilerek klinker üretilmektedir. Üretim hatlarının yıllık kapasitesi 1. üretim hattı 425.000 ton/yıl, 2. üretim hattı 900.000 ton/yıl ve 3. üretim hattı 525.000 ton/yıl olmak üzere toplam 1.850.000 ton/yıl klinkerdir. Üç üretim hattında üretilen klinker, 2 adedi 90'ar ton/saat, 1 adedi 135 ton/saat ve bir adedi de 60 ton/saat olmak üzere toplam 375 ton/saat kapasiteli dört adet çimento değirmeninde katkı maddeleri ile birlikte öğütülerek üretilen bu çimento, toplam dokuz adet paketlenme makinesi ile beş adet dökme çimento tesisinden oluşan beş adet paketlenme ünitesinden, torba ve dökme çimento olarak piyasaya sürülmektedir. Proje kapsamında deneysel çalışmalar için kullanılan endüstriyel ölçekli döner fırının özellikleri Çizelge 5.6'da, üretim prosesi ise Şekil 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.6 Endüstriyel ölçekli döner fırının özellikleri

ÇAP	[m]	4,2
UZUNLUK	[m]	60,5
SİKLON KADEME SAYISI	[n]	4
KAPASİTE	[ton/gün]	2925
FIRIN DEVRİ	n/min	3,3
İNTİKAL MAL SICAKLIĞI	C	870
FIRIN ÇIKIŞ AĞZI MAL SIC.	C	~1000
SICAKLIK PROB YERLERİ		Soğutma, fırın kafası, sinter, intikal, siklon kademeleri,
ATIK BESLEME NOKTALARI		FIRIN KAFA: Kömür, Atık yağ, RDF, Doğal gaz, Arıtma Çamuru İNTİKAL: Lastik KALSİNATÖR: Kömür, Arıtma Çamuru
YAKIT DAĞILIMI, FIRIN/ÖN ISITMA	%Fırın vs % Ön Isıtma	45/55



Şekil 5.1 Endüstriyel ölçekli döner fırın üretim prosesi

5.2 Deneysel Çalışmalar

Ek yakıt deneme çalışmaları için Ataköy ve Paşaköy AAT'leri seçilmiştir. Ataköy ve Paşaköy AAT'lerinden alınan arıtma çamurları çimento tesisinin çamur silosuna beslenmiştir. Endüstriyel deneme çalışması için fırına çamur silosundan besleme yapılmıştır.

Çimento fabrikasının 2 numaralı döner fırında değişik atık çamur oranları kullanılarak klinker üretim çalışması yürütülmüştür. Çamur besleme oranı, pilot ölçekli deneme çalışması sonuçları, tesiste mevcut çamur besleme sisteminin kapasitesi, tedarik

edilebilecek çamur miktarı, çamurun kalorifik değeri, diğer ek yakıt kullanım oranları, çamur karakterizasyonu (kül, ağır metal vs) dikkate alınarak belirlenmiştir.

5.2.1 Klinker Analizi

Endüstriyel ölçekli % 6 Ataköy, % 4 Ataköy ve % 10 Paşaköy oranlarında atık çamur beslenmiş ve her bir deney sonucunda klinker üretilerek klinkerin kimyasal, fiziksel ve mineralojik analizleri yapılmış, oluşan klinkerin performansı gözlenmiştir.

Deney sonucunda üretilmiş olan klinkerin kimyasal analizi çimento fabrikası tarafından, mineralojik analiz ise TÜBİTAK MAM tarafından yapılmıştır. Üretilmiş olan klinkerin görüntüsü ise Şekil 5.2’de verilmiştir. Deneysel çalışma endüstriyel boyutta ve ticari çimento üreten fabrikada yapıldığı için, işletmenin uygulamış olduğu sisteme paralel olarak deneyin başlandığı saatten itibaren saat başı farin numunesi alınarak farinin özellikleri belirlenmiştir. Endüstriyel ölçekli deneysel çalışmalarda kullanılan farinin kimyasal analizi ve modülleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Klinkerin kimyasal analiz sonuçları ile modülleri Çizelge 5.7’de, ana bileşenler Çizelge 5.8’de, mineralojik yapısı Çizelge 5.9’da ve XRD paterni ise % 6 Ataköy Şekil 5.3’de, % 4 Ataköy Şekil 5.4’de ve % 10 Paşaköy Şekil 5.5’de verilmiştir.

Ana bileşenlerin hesaplanmasında Bogue eşitlikleri kullanılmıştır. Bu denklemlerin kullanabilmesi için $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$ olması gerekmektedir. Bu şart yerine geldiği için ana bileşenler aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\% C_3S = 4.07 (\%CaO) - 7.60 (\%SiO_2) - 6.72 (\%Al_2O_3) - 1.43 (\%Fe_2O_3) - 2.85 (\%SO_3)$$

$$\% C_2S = 2.87 (\%SiO_2) - 0.754 (\%3CaO.SiO_2)$$

$$\% C_3A = 2.65 (\%Al_2O_3) - 1.69 (\%Fe_2O_3)$$

$$\% C_4AF = 3.04 (\%Fe_2O_3)$$



% 0 Atık Çamur kullanılarak üretilen klinker numunesi



% 10 Paşaköy Atık Çamur kullanılarak üretilen klinker numunesi



% 6 Ataköy Atık Çamur kullanılarak üretilen klinker numunesi



% 4 Ataköy Atık Çamur kullanılarak üretilen klinker numunesi

Şekil 5.2 Endüstriyel döner fırında üretilen klinkerlerin görüntüsü

Çizelge 5.7 Endüstriyel ölçekli döner fırında üretilen klinkerin kimyasal analiz özet sonuçları

BİLEŞENLER VE MODÜLLER	% 6 ATAKÖY	% 4 ATAKÖY	% 10 PAŞAKÖY	SINIR DEĞERLER (*)
CaO	65,96	66,10	66,41	60 – 67
SiO ₂	21,57	21,24	21,59	17 – 25
Al ₂ O ₃	5,15	5,07	5,03	3 – 8
Fe ₂ O ₃	3,74	3,85	3,69	0,5 – 6
MgO	1,02	1,04	0,99	0,1 – 4
K ₂ O	0,79	0,79	0,72	0,2 – 1,3
Cl	0,04	0,05	0,04	Maks. 0,1
Na ₂ O	0,24	0,24	0,24	0,2 – 1,3
TiO ₂	0,38	0,36	0,39	
SO ₃	0,56	0,58	0,53	1–3
MnO	0,05	0,05	0,05	
TAYİN EDİLEMEYEN	0,50	0,63	0,33	
TOPLAM	100	100	100	
KİREÇ STANDARDI (K.S.T.)	95,73	97,27	96,55	% 92–96
SİLİS MODÜLÜ (S.M)	2,43	2,38	2,48	% 2,3–2,7
ALÜMİNYUM MODÜLÜ(T.M)	1,38	1,32	1,36	% 1,3–1,6
HİDROLİK MODÜL (H.M.)	2,17	2,19	2,19	
SERBEST KİREÇ	1,81	2,33	1,37	Maks. 2
DANSİTE (G/L)	1305	1318	1378	1200-1300

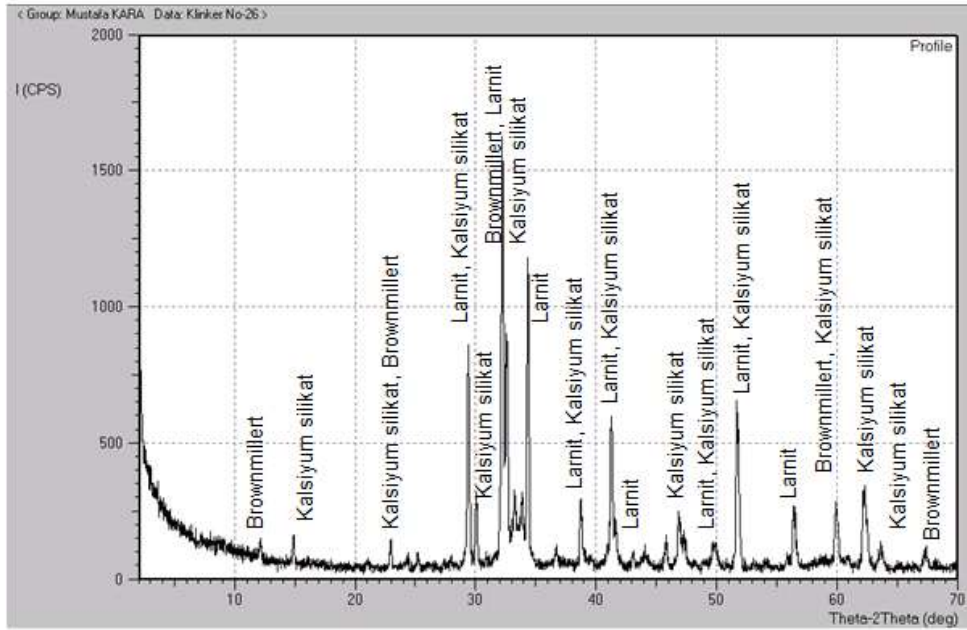
(*) Çizelgedeki değerler, Prof. Dr. Turhan Y. Erdoğan, Betonun Oluşturan Malzemeler, Çimentolar, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÇMB adlı kitaptaki Portland Çimentosunu Oluşturan Oksit ve Miktarları Çizelgesundan alınmıştır.

Çizelge 5.8 Endüstriyel ölçekli döner fırında üretilen klinkerin ana bileşenleri

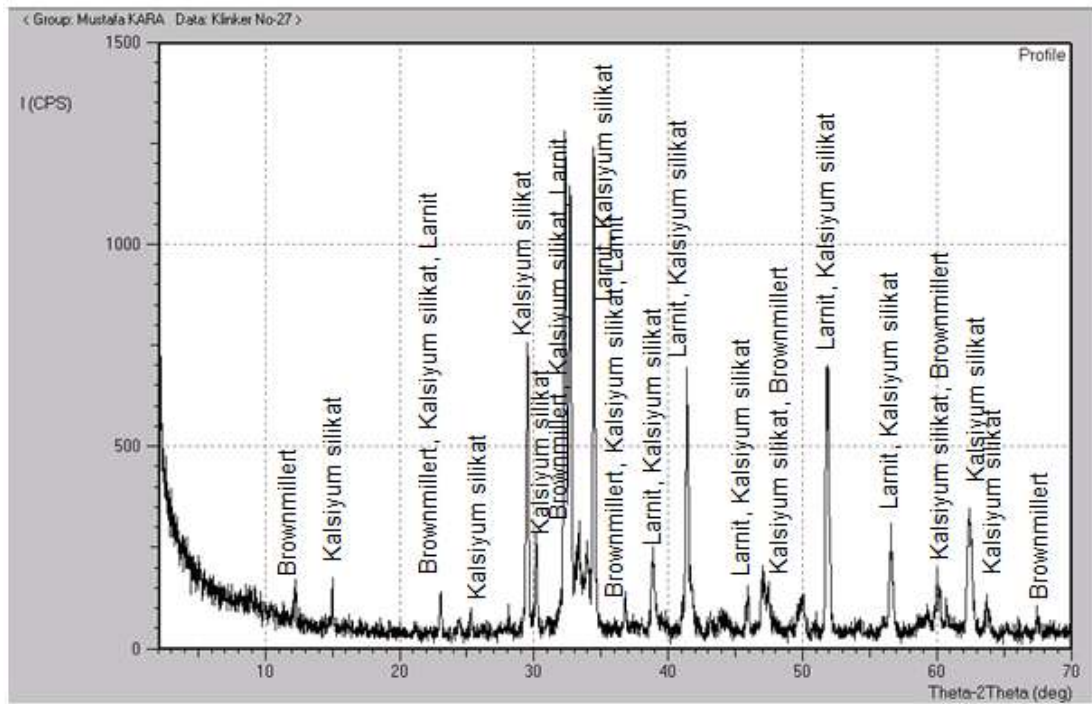
	MİKTAR (%)			
MODÜLLER	% 6 ATAÖY MİKTAR (%)	% 4 ATAÖY MİKTAR (%)	% 10 PAŞAKÖY MİKTAR (%)	ÇİMENTO FABRİKASI ORTALAMA DEĞERLER (%)
C₃S	55,71	56,96	60,15	55-65
C₂S	19,82	17,92	16,52	11-20
C₃A	7,31	6,93	7,07	5-9
C₄AF	11,39	11,71	11,24	10-15

Çizelge 5.9 Endüstriyel ölçekli döner fırında üretilen klinkerin klinkerinin minerolojik analizi

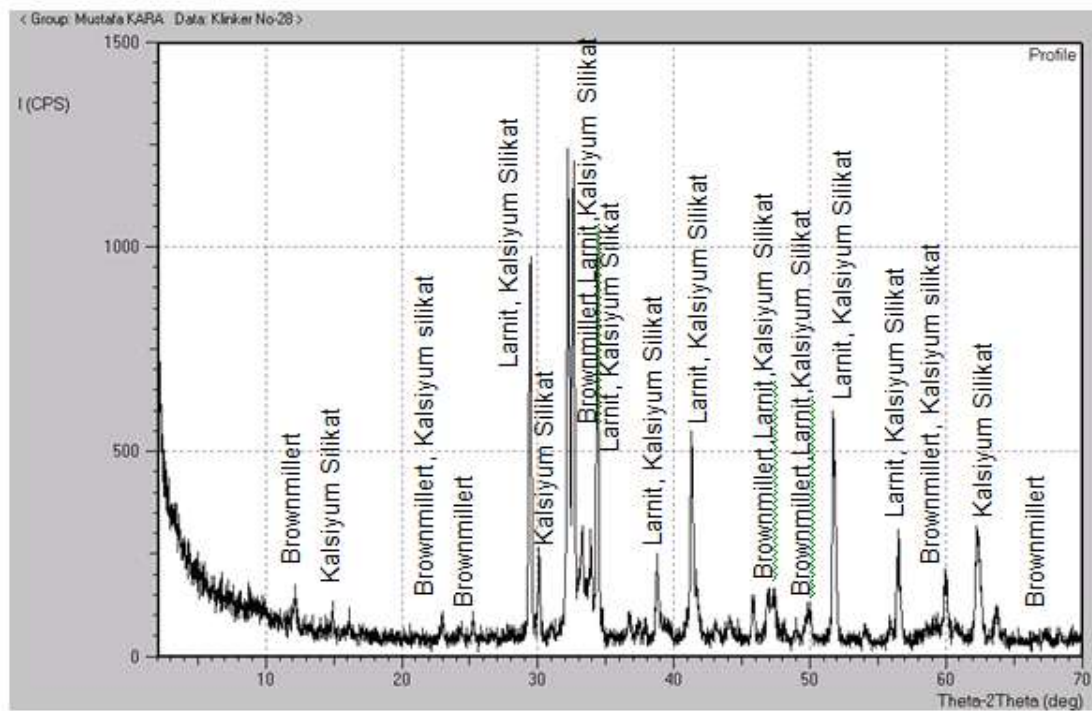
	% 6 ATAÖY MİKTAR (%)		% 4 ATAÖY MİKTAR (%)		% 10 PAŞAKÖY MİKTAR (%)	
BİLEŞİK ADI	FORMÜLÜ	PDF NO	FORMÜLÜ	PDF NO	FORMÜLÜ	PDF NO
LARNİTE	Ca ₂ SiO ₄	33-302	Ca ₂ SiO ₄	33-302	Ca ₂ SiO ₄	33-302
KALSIYUM SİLİKAT	Ca ₃ SiO ₅	42-551	Ca ₃ SiO ₅	42-551	Ca ₃ SiO ₅	42-551
BROWNMİLLERT	Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅	30-226	Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅	30-226	Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅	30-226



Şekil 5.3 % 6 Ataköy klinkerinin XRD paterni



Şekil 5.4 % 4 Ataköy klinkerinin XRD paterni



Şekil 5.5 % 10 Paşaköy klinkerinin XRD paterni

5.2.2 Çimento Analizi

Deney sonucunda üretilen klinkerden % 95 ve % 5 alçıtaşı (jips- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) karıştırılarak CEM I 42,5 R tipi çimento elde edilmiş ve TS 197/1'e göre mekanik ve fiziksel testleri yapılmıştır. TSE EN 197-1 Standardına göre çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri açısından sınır değerler Çizelge 5.10'da verilmiştir. Elde edilen çimentonun fiziksel ve mekanik test sonuçları Çizelge 5.11'de, kimyasal özellikler ise Çizelge 5.12'de verilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda bulunan değerler Çizelge 5.10'de verilen standart değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan farin ve atık çamurlar ile elde edilen klinkerlerdeki ağır metal değerleri toplu halde Çizelge 5.13'de verilmiştir. Ayrıca bu çizelgede örnek teşkil etmesi açısından yayınlanmış olan bir makalenin sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.10 Çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri açısından sınır değerleri [TS EN 197-1/Mart 2002]

DAYANIM SINIFI	BASINÇ DAYANIMI (MPA)				PRİZ BAŞLAMA SÜRESİ (DAKİKA)	GENLEŞME (MM)
	ERKEN DAYANIM		STANDART DAYANIM			
	2 GÜNLÜK	7 GÜNLÜK	28 GÜNLÜK			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 N	≥ 20,0	-	≥52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	-				

Çizelge 5.11 Endüstriyel ölçekli döner fırınında üretilen klinkerden elde edilen çimentonun fiziksel ve mekanik analizi

DENEY ADI	İNCELİK			PRİZ SÜRESİ (DAKİKA)		SU İÇERİ Ğİ (%)	ÖZGÜL AĞIRLI K (G/CM ³)	LE CHATELIER (GENLEŞME) (MM)	BASINÇ DAYANIMI (MPA)		
	45 µM	90 µM	BLAİN E	PRİZ BAŞLANG ICI	PRİZ SON U				2 GÜ N	7 GÜ N	28 GÜ N
% 6 ATAÖY	19,7	3,1	3120	129	196	24,6	3,16	2	27, 0	43,0	54,0
% 4 ATAÖY	19,9	3,2	3170	131	198	24,4	3,16	1	26, 1	41,6	52,6
% 10 PAŞAKÖY	18,6	2,7	3220	130	186	24,6	3,16	2	25, 4	42,5	51,8

Çizelge 5.12 Endüstriyel ölçekli döner fırınında üretilen klinkerden elde edilen çimentonun kimyasal özellikleri

BİLEŞENLER		% 6 ATAÖY (25.10.2011)	% 4 ATAÖY (26.10.2011)	% 10 PAŞAKÖY (02.11.2011)	SINIR DEĞERLER (TS EN 197-1)
ÇÖZÜNMEYEN KALINTI		0,10	0,11	0,09	≤ % 5,0
KLORÜR MUHTEVASI (CL ⁻)		0,048	0,0416	0,027	≤ % 0,10
SÜLFAT MİKTARI (SO ₃ OLARAK)	CEM I				
	32,5 N				
	32,5 R	-	-	-	≤ % 3,5
	42,5 N				
SÜLFAT MİKTARI (SO ₃ OLARAK)	CEM I				
	42,5 R				
	52,5 N	0,76	0,55	0,46	≤ % 4,0
	52,5 R				

Çizelge 5.13 Ağır metal karşılaştırma çizelgesi

AĞIR METALLER (MİKTAR-MG/KG)	FARİN	ATAKÖY ATIK ÇAMURU	PAŞAKÖY ATIK ÇAMURU	% 6 ATAKÖY	% 4 ATAKÖY	% 10 PAŞAKÖY	ÖRNEK BİR KLİNKER (MG/KG)*
ANTİMON, SB	0,3	1,7	2	1,6	1,3	1	6,8
ARSENİK, AS	5,5	3,3	4,6	13,8	12	11	83,9
BAKIR, CU	38,6	530	318	102,5	84	77	261,4
CİVA, HG	0,108	0,80	0,65	0,18	0,2	0,2	0,008
ÇİNKO, ZN	37,5	1107	1076	279	83	147	-
KADMIYUM, CD	0,8	5,3	1,37	0,75	0,97	0,7	1,7
KOBALT, CO	3,2	4,3	7	7,3	6,8	7,3	6,5
KROM, CR	126,1	320	617	353	483	466	48,2
KURŞUN, PB	5,9	41,7	36,6	13	14	2	57,1
MANGANEZ, MN	309,2	275	0,8	0,6	0,56	0,5	656,1
NIKEL, Nİ	26,2	145	252	68,5	54,5	55	38,7
SELENYUM, SE	3,1	1,8	2				5,8
TALYUM, TL	25,3	1,20	-	0,2	0	0	0,3
VANADYUM, V	17,1	32	27	104	97	105	87,8

* Gabriella Niculae, Investigations on heavy metals during waste co-incineration, CARPATCEMENT Holding, Bucharest, Romania, ZKG International, No. 11-2008 (Volume 61)

5.2.3 Emisyon Ölçümü

Endüstriyel çalışma esnasında baca gazında emisyon ölçümü yapılmış ve sonuçlar “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmelik” (SKHKKY) ve “Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik’te (AYİY) atıkları beraber yakan çimento fabrikaları için belirlenen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Her iki yönetmelikle karşılaştırılması sebebi AYİY Geçici Madde 1 “Bu Yönetmeliğin yayımı tarihinde işletilmekte olan mevcut yakma ve beraber yakma tesisleri, geçerli olan mevcut lisans şartlarına göre faaliyetlerini sürdürürler. Ancak; söz konusu tesisler bu Yönetmeliğin eklerinde parametre bazlı

verilen muafiyetler hariç olmak üzere en geç 31/12/2012 tarihine kadar Yönetmelikte belirtilen diğer şartları sağlayacak şekilde gerekli tedbirleri alır.” ibaresinin yer almasıdır. Ek yakıt kullanma lisanslı almış çimento fabrikaları 31 Aralık 2012 tarihine kadar SKHKKY’te verilen sınır değerleri sağlamak ve geçiş aşamasında AYİY’te verilen sınır değerlere ulaşmak için gerekli yatırımları yapmakla yükümlüdürler.

Deneyisel çalışmada kullanılan çimento fabrikasının 2 numaralı döner fırın bacasına ait emisyon ölçüm sonuçları Çizelge 5.14’de verilmiştir. Tüm sonuçlar kuru gaz, % 10 Oksijen, 1013 mbar, 273°K baz alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.14 Endüstriyel ölçekli baca gazı analiz sonuçları

PARAMETRE	C (MG/NM ³)					
	SKHKKY	AYİY	% 0 ATIK ÇAMUR	% 6 ATAKÖY	% 4 ATAKÖY	% 10 PAŞAKÖY
TOZ	50	50*	8,5	24,3	32,48	45,05
TOC	-	10	15,96	13,02	12,58	16,53
HCl	10	10	< 0,20	< 0,15	< 0,12	0,83
HF	1	1	< 0,17	< 0,16	< 0,12	< 0,17
SO ₂	-	50	T.E.	T.E.	T.E.	T.E.
NO ₂	1200	1200*	764,13	767,96	642,24	731,86
CD + TL	0,05	0,05	<0,0088	0,0094	0,0195	0,0088
HG	0,05	0,05	0,00019	0,0013	0,0015	0,00055
SB + AS + PB + CR + CO + CU + MN + NI + V + SN	0,5	0,5	<0,0414	0,0377	0,0422	0,0478
DİOKSİN FURAN (NG/NM ³)	0,1	0,1	-	0,0859	0,0167	0,0319

Deneme yakmasında, NO_x için toplam emisyon limit değeri 1200 mg/m³’ten fazla olmadığı belgelendiği takdirde, 31 Aralık 2014 tarihine kadar, mevcut ıslak işlemlili çimento fırınlarına veya saatte üç tondan az atık yakan çimento fırınlarına, NO_x için muafiyet tanınır. Deneme yakmasında toplam toz emisyon limit değerinin 50 mg/m³’ten fazla olmayacağı belgelendiği takdirde, saatte üç tondan az atık yakan çimento fırınlarına, toz için 31 Aralık 2014 tarihine kadar muafiyet tanınır. Aksi durumda sınır değerler toz için 30 mg/m³, NO_x için 800 mg/m³ olarak 01/01/2013 tarihinden itibaren geçerli olacaktır.

Endüstriyel ölçekli tesiste yapılan ölçüm sonucunda Toz, TOC, HCl, HF, SO₂, NO₂ ve ağır metal ve dioksin furan emisyonları SKHKKY’de verilen sınır değerlerin altında olduğu ve

TOC emisyonları hariç diğer emisyonların AYİY’te verilen sınır değerlerin altında olduğu tespit edilmiştir.

5.3 Sonuç ve Değerlendirme

ÇİMENTO FABRİKASINDAN. Büyükçekmece tesislerinde bulunan 2 numaralı çimento döner fırınında değişik ek yakıt oranlarında çamur beslenerek klinker üretilmiş ve üretilen klinkerin kimyasal, fiziksel ve mineralojik analizi yapılmıştır ve sonuçlar Bölüm 5.2.1’de verilmiştir. Yapılan kimyasal analiz ile bulunan değerlerin Portland çimentosundaki sınır değerler içinde olduğu görülmüş ve yapılan deneysel çalışma sonrasında Portland çimentosu klinkerinin üretildiği anlaşılmıştır. Ayrıca mineralojik açıdan dört ana bileşen değerlerinin normal Portland çimentosundaki belirtilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Klinker belli oranda alçı taşı ile karıştırılarak çimento üretilmiş ve üretilen çimentonun fiziksel ve mekanik analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları Bölüm 5.2.2.’de verilmiştir. Çimentonun fiziksel ve mekanik analiz sonuçları TS 197/1 standartında belirtilen sınır değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılan farin ve atık çamurlar ile elde edilen klinkerlerdeki ağır metal analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Bölüm 5.2.2.’de verilmiştir. Farin, çamur ve klinkerin ağır metal analiz sonuçları örnek teşkil etmesi açısından yayınlanmış olan bir makalenin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Makale sonuçları ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen ağır metal analiz değerleri uyumlu olup herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Klinkerde bulunan ağır metallerin sınır değerleri konusunda herhangi bir standart bulunmamaktadır.

Endüstriyel ölçekli deneme yakması esnasında 2 numaralı döner fırın ana bacasında ek yakıt besleme esnasında emisyonu ölçümleri yapılmıştır. Endüstriyel ölçekli tesiste yapılan ölçüm sonucunda Toz, TOK, HCl, HF, SO₂, NO₂ ve ağır metal ve dioksin furan emisyonları SKHKKY’de verilen sınır değerlerin altında olduğu ve TOK emisyonları hariç diğer emisyonların AYİY’te verilen sınır değerlerin altında olduğu tespit edilmiştir.

Tüm bu bilgiler ışığında arıtma çamurlarının çimento üretim tesisinde klinker üretimi esnasında ek yakıt olarak kullanılabileceği açıkça görülmektedir. Yapılan deneysel

Çalışma sonucunda, hem klinkerin kalitesini bozmayan hem de emisyon değeri açısından belirlenmiş limitler dahilinde çamurun imento üretiminde ek yakıt halinde kullanma oranı % 10 olarak belirlenmiştir.

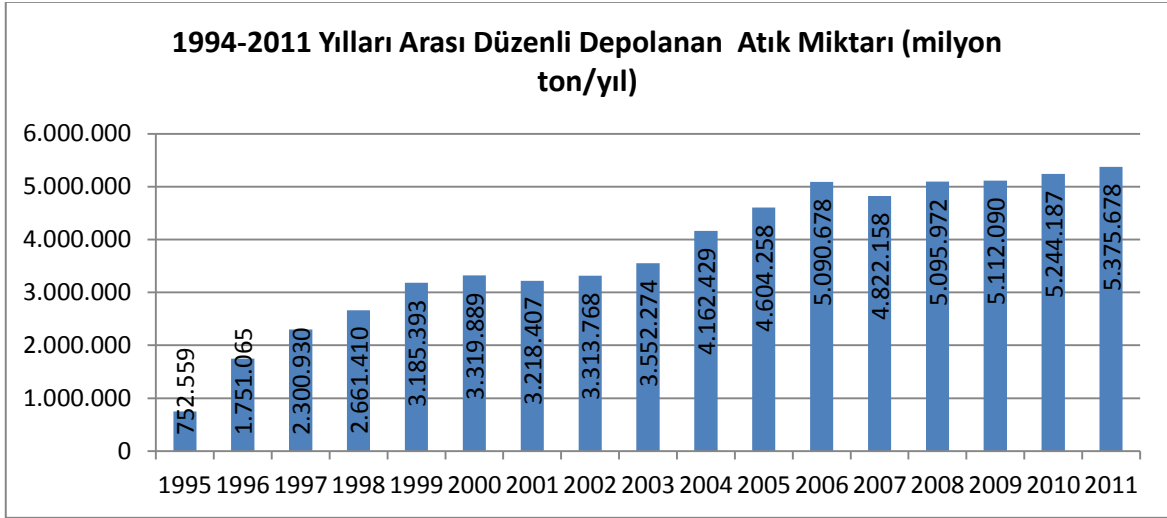
6.1 Atık Sektörü

6.1.1 Düzenli Depolama Yöntemi İle Bertaraf

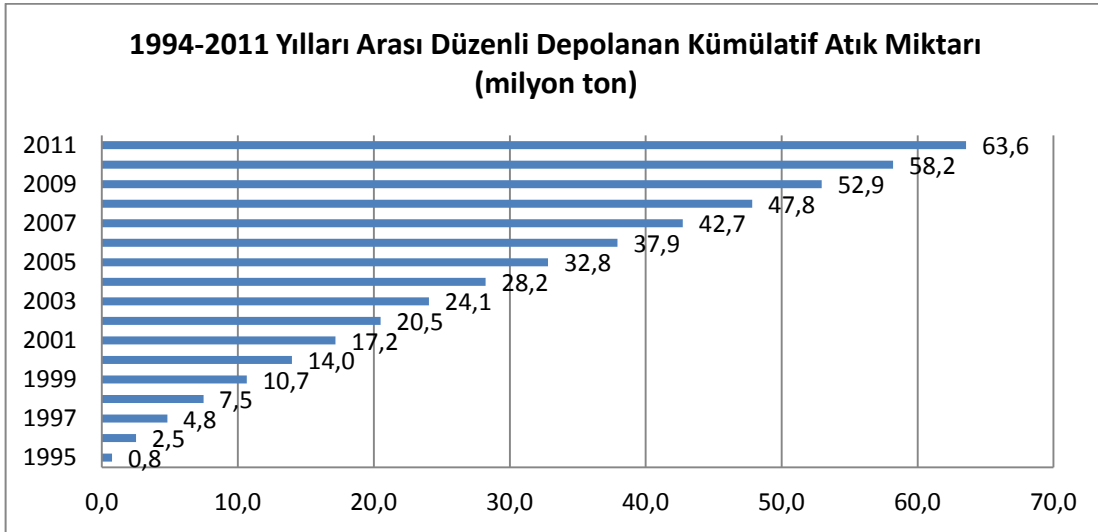
Günlük su tüketiminin 2,5 milyon m³'ü geçen İstanbul'da, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) sorumluluğunda 10'u ön arıtma, 4'ü ileri biyolojik olan mevcut 33 adet atıksu arıtma tesisi bulunmaktadır. İSKİ tarafından işletilmekte olan evsel atıksu arıtma tesislerinde 2010 yılında oluşan günlük kuru çamur miktarı 300 ton civarında olup, bu rakamın gelecekte 1.000 ton/güne ulaşacağı varsayılmaktadır. Oluşan çamurun büyük kısmı (>%95) Ataköy İleri Biyolojik Arıtma Tesisi, Tuzla Atıksu Biyolojik Arıtma Tesisi ve Paşaköy Atıksu İleri Biyolojik Arıtma Tesisi'nden oluşmaktadır.

Katı atık üretimi günde yaklaşık 15.000 ton olan İstanbul'da, İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 1995 yılında Avrupa yakasında 1 adet, Anadolu yakasında köyü mevkilerinde 1 adet katı atık düzenli depolama alanı açılmış ve katı atıklar düzenli depolanma yöntemi ile bertaraf edilmeye başlanmıştır. Avrupa yakasında Odayeri Düzenli Depolama Tesisi 266 ha büyüklüğünde olup günlük yaklaşık 9.700 ton katı atık kabul edilmekte, Asya yakasında Kömürcüoda Düzenli Depolama Tesisi ise toplam 233 ha büyüklüğünde olup günlük yaklaşık 5.200 ton atık kabul etmektedir. 1995 yılından günümüze kadar iki sahada toplam yaklaşık olarak 64 milyon ton katı atık depolanmıştır. Şekil 6.1'de 1994-2011 yılları arasında düzenli depolanın atık miktarı ve

Şekil 6.2’de 1994-2011 yılları arası düzenli depolama yöntemi ile bertaraf edilen toplam atık miktarı verilmektedir.



Şekil 6.1 1994-2011 yılları arası düzenli depolanan atık miktarı



Şekil 6.2 1994-2011 yılları arası bertaraf edilen toplam atık miktarı

Ataköy, Paşaköy ve Tuzla Atıksu Arıtma Tesisler’inde oluşan arıtma çamurları Kömürcüoda Düzenli Depolama Tesis’inde depolama yöntemi ile bertaraf edilmektedir. Kömürcüoda düzenli depolama sahasına arıtma tesislerinden kaynaklanan arıtma çamurlarının döküldüğü döküm sahası yaklaşık 10 ha büyüklüğündedir.

Atıksu arıtma çamurlarının bertaraf maliyeti nakliye ve depolama maliyeti olarak düşünülebilir. Nakliye maliyeti arıtma tesisinin bertaraf tesisine uzaklığı ve nakliye

edilecek malzemeye karakterizasyonuna bağlı olarak artmaktadır. Nakliye firmaları ile yapılan görüşmeler sonucunda arıtma çamurlarının taşınmasının kilometre maliyeti yaklaşık 3-5 TL arasında tespit edilmiştir. Paşaköy, Ataköy ve Tuzla atıksu arıtma tesislerinin Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası'nın uzaklığı sırasıyla 26 km, 85 km, 58 km'dir.

Arıtma çamuru depolama maliyeti yatırım ve işletme maliyetinden oluşmaktadır. Yatırım maliyeti, saha düzenleme, depo tabanı teşkili, depo yüzeyi teşkili ve gerekli ekipman ve malzemelerden oluşmaktadır. İşleme maliyeti ise ham çamurun depolanmadan önce ön işlem için karıştırılacak malzemenin temini, ön işlem yapılması, sahaya serilmesi ve ekipmanların sabit ve işletme maliyetini kapsamaktadır. Türkiye koşulları dikkate alınarak belirlenen düzenli depolama maliyeti yaklaşık olarak 30-35 USD/ton'dur. Bu durumda İSKİ atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurların düzenli depolama yöntemi ile bertarafının yıllık maliyeti 27.044.144 TL olarak hesaplanmıştır.

Düzenli Depolamanın Çevresel Etkileri:

Bir düzenli depolama alanının başlıca girdileri evsel katı atık ve arıtma çamurunun yanı sıra işletme için gerekli, araç yakıtları, elektrik, sızıntı suyunun arıtılmasından oluşan çamur gibi ilave maddelerdir. Çıktıları ise sızıntı suyu, depo gazı ve depo gazının geri kazanılması durumunda enerji üretimidir. Depolama sahalarının su, hava ve toprağa kirletici emisyonları bulunmaktadır. Çevreye verilen emisyonlar hakkında, evsel katı atıklar için söylenebileceklerin dışında çamur için özel bir durum bulunmamaktadır.

Su ve toprağa verilen emisyonların miktarı iklim şartlarına ve depo alanının üst örtüsüne bağlı olarak değişir. Sızıntı suyu, birçok anyon ve katyonun yanı sıra, yüksek konsantrasyonda ayrışabilir organik madde, klorlu organikler, fenol, benzen, pestisit gibi organik bileşikler, amonyak, ağır metaller gibi kirleticileri de ihtiva eder. Sızıntı suyunun drenaj sistemiyle toplanıp arıtıldıktan sonra uygun şekilde uzaklaştırılması gerekir. Aksi takdirde bu kirleticiler toprağa sızarak kirletir, buradan yüzeysel ve yer altı suyuna ulaşarak kirlenmeye yol açar. Sızma hızı ve kirleticilerin konsantrasyonları, atığın fiziksel ve kimyasal yapısının yanı sıra toprak özellikleri ve çevresel faktörlere de bağlıdır.

Düzenli depolama sahasında oluşan sızıntı suyunun organik yükünün (KOİ: 20000 mg/lit, N: 3500 mg/lit) ve inert kimyasal oksijen ihtiyacının (500-1000 mg/lit) yüksek olması sebebi ile deşarj kritierlerinin sağlanması için biyolojik yöntemleri ile arıtım mümkün değildir. Bu sebeple düzenli depolama sahalarından oluşan sızıntı suyunun arıtımı için Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahasında biyolojik arıtmaya ilave olarak membran biyoreaktör (MBR) sistemi kurulmuştur (Şekil 6.3). Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahasında 1200 m³/gün sızıntı suyu oluşmakta ve oluşan sızıntı suyu dere deşarj kriterlerinde arıtım yapılmaktadır.



Şekil 6.3 Sızıntı suyu arıtma tesisi

Havaya verilen emisyonlar, geri kazanılmadığı takdirde depo gazı ve tozdur. Ayrıca taşıtların egzoz gazlarıyla kirleticiler verilir. Depo gazın ana bileşimi metan ve karbondioksit olmakla birlikte, %1 in altında kalan bir kısmı uçucu organik karbonlardan (VOC) meydana gelir. Depo gazında, konsantrasyonları 0,02 mg/m³ ile 600 mg/m³ arasında değişen 12 tür halojenli hidrokarbon ve 30 tür hidrokarbon bulunduğu tespit edilmiştir.

Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahasında 7 MW kurulu kapasiteli enerji üretim tesisi kurulmuş olup yıllara sari olarak 2030 yılına kadar 3.400 GWh elektrik üretilmesi planlanmaktadır. Ayrıca yıllık 1.000.000 ton eş-CO₂ emisyon azaltımı sağlanmaktadır.



Şekil 6.4 Depo gazından enerji üretim tesisi

Depo alanının işletilmesi sırasında hava, su ve toprağa verilen kirletici emisyonlara ilave olarak araçlardan kaynaklanan gürültü ve toz, koku, haşere, fare vb zararlıların üremesi, arazi kullanımı, bitki örtüsü ve peyzaj öğelerinin bozulması, kötü işletme durumlarında yangın, patlama, sızıntı suyunun kontrolsüz boşaltılması vb. etkilere de çıkarmaktadır.

Sahaya kabul edilen arıtma çamurlarının su ve organik madde muhtevalarının yüksek olması nedeniyle koku ve sinek gibi problemlere yol açmakta, akıcılığının yüksek olması sebebiyle sahada tutulamayıp diğer alanlara yayılmakta ve kuruması çok uzun süreler almaktadır. Bu durum, çamur depolamadan kaynaklanan çevresel etkilerin kabul edilebilir sınırları aşmasına ve depo alanının kısa sürede dolmasına yol açmaktadır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Kömürcüoda düzenli depolama sahasına dökülen arıtma çamurları

6.1.2 Ek Yakıt Olarak Bertaraf

Aritma tesislerinde oluşan çamurların çevreye zarar vermede ekonomik bir şekilde bertarafı önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Atıksu arıtma çamurları, arazide zirai maksatlı kullanma, düzenli depolama, yakma ya da kompostlaştırma yöntemleri ile bertaraf edilmektedir. Aritma çamurlarının bertarafında ülkemizde en çok tercih edilen yöntem düzenli depolamadır. Ancak son zamanlarda getirilen yasal düzenlemeler arıtma çamurlarının düzenli depolama yöntemi ile bertarafını zorlaştırmıştır (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (26.03.2010 ve 27533 R.G.)).

Aritma çamurlarının bertarafında ortaya çıkan yüksek ekonomik maliyetler, işletmecileri ve araştırmacıları son yıllarda arıtma tesislerinde oluşan çamurların geri kazanımı ile ilgili bazı çalışmalara yönlendirmiştir. Bu konuyla ilgili ilk örnekler, geçen yüzyılın ilk yarısında arıtma çamurlarının gübreye karıştırılarak değerlendirilmesi şeklindedir. Ancak konu ile ilgili ciddi çalışmalar son 20 yıl içerisinde yapılmıştır. Bunun yanı sıra yakıt, yapı ve yol kaplama malzemesi ve çimento sanayi için hammadde olarak kullanım çalışmaları yine son yılların güncel araştırma konularıdır.

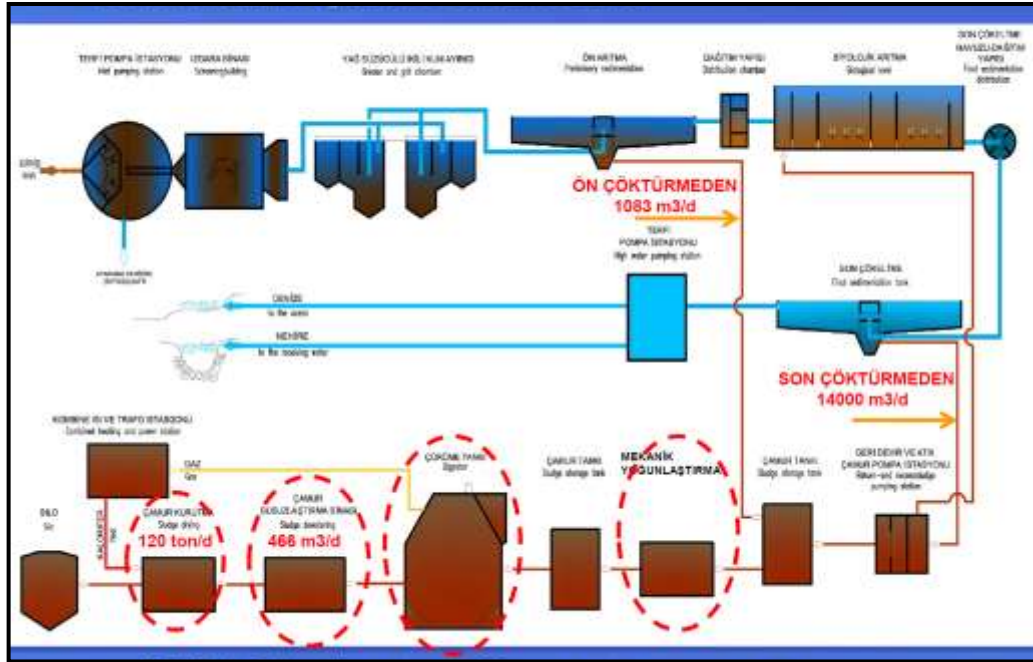
Türkiye’de de yapılan sektörel ve/veya bölgesel politika ve programlarda da arıtma çamurlarının araziye uygulanması, kurutulması ve yakılması ile ilgili alternatif teknolojiler önerilmiştir.

Ataköy, Paşaköy ve Tuzla Atıksu Arıtma Tesisleri’nde oluşan arıtma çamurları 2011 yılına kadar Kömürcüoda Düzenli Depolama Tesisi’nde depolama yöntemi ile bertaraf edilmekteyken yasal sınırlamalar nedeni ile 2011 yılı itibari ile Tuzla ve Ataköy Atıksu Arıtma Tesisi’ne çamur çürütücü ve kurutucu sistemi, Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisi’ne kurutucu sistemi inşa edilerek işletmeye alınmıştır.

Tuzla Atıksu Biyolojik Arıtma Tesisi’nde 300 ton/gün, Paşaköy Atıksu İleri Biyolojik Arıtma Tesisi’nde 200 ton/gün, Ataköy İleri Biyolojik Arıtma Tesisi’nde ise 600 ton/gün kapasiteli kurutma ünitesi bulunmaktadır. Kurutucularda %25 kuru maddeye sahip çamur %90 oranına kadar kurutulmaktadır. Kurutma tesisi bulunan Ataköy İleri Biyolojik Arıtma Tesisi’nin genel görünüşü Şekil 6.6’da ve proses şeması ise Şekil 6.7’de verilmektedir.



Şekil 6.6 Ataköy ileri biyolojik arıtma tesisi genel görünüş



Şekil 6.7 Ataköy ileri biyolojik arıtma tesisi çamur arıtma prosesi şeması

Ülkemizde 44 adet çimento fabrikası bulunmaktadır. Bu tesislerden 27 adedi ek yakıt ve alternatif hammadde olarak kullanma konusunda Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan (Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü) lisans almıştır. Lisans kapsamında arıtma çamuru olan çimento fabrikası sayısı ise 14'dür.

İSKİ atıksu arıtma tesislerinde kurutma ünitesinden çıkan % 90 kuru maddeye sahip arıtma çamurları çimento fabrikasına gönderilerek bertaraf edilmektedir. Ataköy Atıksu Arıtma Tesisinde oluşan arıtma çamuru AKÇANSA A.Ş'ye, Tuzla ve Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisinden oluşan arıtma çamuru ise Oyak Aslan Çimento'ya gönderilmektedir. Ataköy tesisinin AKÇANSA çimento fabrikasına uzaklığı 30 km, Tuzla ve Paşaköy tesislerinin Oyak Aslan Çimento fabrikasına uzaklığı sırasıyla 17 km ve 40 km civarındadır. Arıtma çamurlarının kurutulması ile nakliye edilen atık miktarı yaklaşık % 80 oranında azaltılmıştır. Bununla beraber kurutulmuş arıtma çamurlarının çimento tesisindeki çamur silosuna beslemek için silobas araçlarla taşınması zorunlu hale gelmiştir. Bu durum çamurun ton nakliye maliyetini arttırmıştır. Açık kamyonlarla taşımının kilometre maliyeti ortalama 4 TL iken silobasla taşımının maliyeti ortalama 7 TL'dir. Fakat atıksu arıtma tesislerinin çimento fabrikalarına yakın olması ve taşınan çamur miktarının az olması sebebi ile toplam nakliye maliyeti düzenli depolama ile bertaraf yönteminde hesaplanan nakliye maliyetinden oldukça düşük seviyelerdedir.

İSKİ atıksu yatırım ihale bedelleri, tesislerle yapılan görüşmeler ve şirketimiz tarafından yapılan çalışmalar neticesinde Tuzla ve Ataköy Atıksu Arıtma Tesisinin çamur kurutma tesisi kurulum ve işletme maliyeti yaklaşık 185 TL, Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisinde ise yaklaşık 160 TL civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Paşaköy atıksu Arıtma Tesisinde maliyetin düşük olması tesiste çürütücü sistemi olmamasından kaynaklanmaktadır.

Kurutulmuş arıtma çamurunun çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılmasında İSKİ ve çimento fabrikaları ile yapılan görüşmelerde tehlikesiz kurutulmuş arıtma çamurundan bertaraf ücreti alınmadığı tespit edilmiştir.

Arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılmasının arıtma tesisi yönetimi açısından maliyeti 67.124.846 TL olarak hesaplanmıştır.

6.2 Çimento Sektörü Açısından

Çimento fabrikalarında atıkların ek yakıt olarak kullanımı sırasında bazı başlıklar öne çıkmaktadır. Bunlara baktığımızda, elde edilen iki sonuç vardır. Birincisi konvansiyonel yakıt tasarrufu ikincisi CO₂ azaltımıdır.

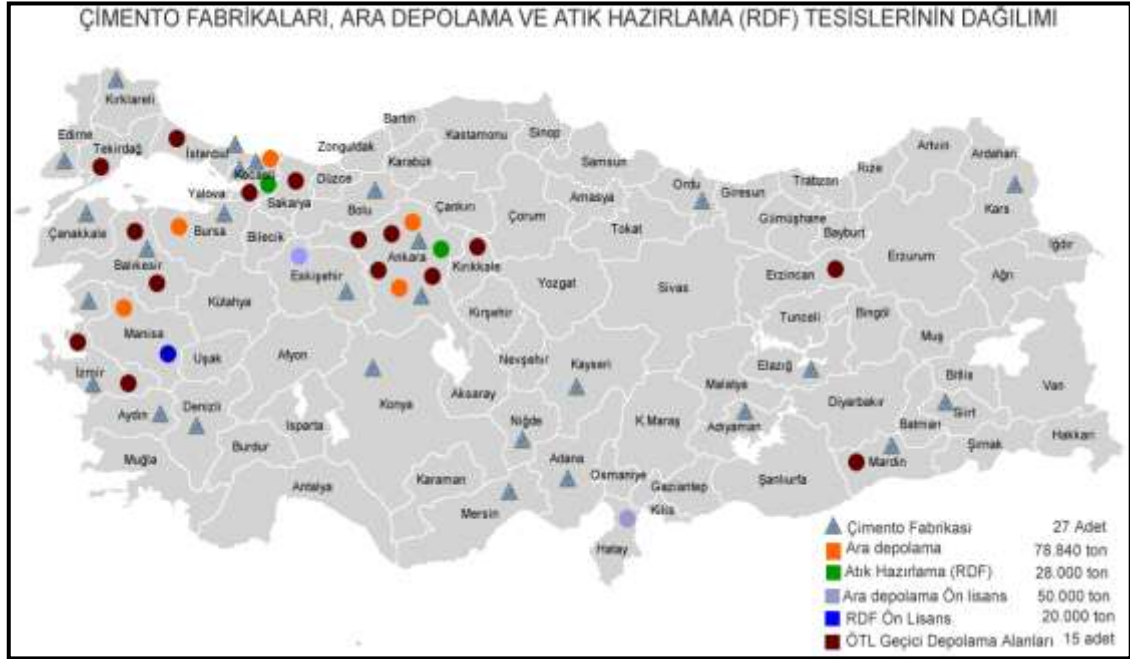
6.2.1 Yakıt (Enerji) Tasarrufu

Çimento fabrikalarında maliyetlerin yaklaşık %40'ı enerji tüketiminden kaynaklanmakta olup, bu enerji tüketiminde büyük bir kısmı ise döner fırının ısıl gücünde kullanılan yakıtlardan dolayıdır. Avrupa Birliğinde çimento üretimi 2006 yılında 267.5 milyon tona ulaşmıştır. Buda dünya üretim miktarının %10.5'ine karşı gelmektedir. Bu miktarda bir üretim için yaklaşık 25,6 milyon ton konvansiyonel yakıtı ihtiyaç duyulmuştur. Bu denli bir enerji ihtiyacı çimento sektörünü alternatif ve uygulanabilir yönere itmiştir. Bu durum alternatif yakıt kullanımını gündeme getirmektedir. Bu nedenle ek yakıt kullanımı alternatif enerji açısından çok önemli bir durum teşkil etmektedir.

Ülkemizde atıkların ek yakıt olarak kullanımına ilişkin uygulamalar ilk olarak 22.06.2005 tarih ve 25853 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Atıkların Ek Yakıt Olarak Kullanılmasında Uyulacak Genel Kurallar Hakkında Tebliğ doğrultusunda başlamıştır. Tebliğe göre ek yakıt olarak kullanılacak atıklar "kullanılmış lastikler, I ve II nci kategori atık yağlar, boya çamurları, atık solventler, plastik atıklar ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından uygun görülecek diğer atıklar" olarak belirtilmiştir. Ancak, tebliğin yayım tarihinden sonra yenilenen 30.07.2008 tarih ve 26952 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği gereğince sadece II. Kategori atık yağlar ile atık yağların geri kazanım işlemi sonucu ürün kalitesi tutturulamayan I. Kategori atık yağlar ek yakıt olarak kullanılması zorunluluğu getirilmiştir. İlgili tebliğ de bu doğrultuda revize edilmiştir. Tebliğ 2010 yılında Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik'in (AYİY) (06 Ekim 2010 Tarih ve 27721 Sayılı Resmi Gazete ile yayımlanması ile yürürlükten kalkmıştır. AYİY kapsamında ek yakıt kullanan çimento tesisleri "beraber yakma tesisi" olarak tanımlanmış ve bu tesislere özel hükümler getirilmiştir. Tebliğin yürürlükten kalkması ile beraber çimento fabrikaları için ek yakıt olarak kullanılacak atıkların türü yönetmelikte verilen özel şartlara uymak koşulu ile artmıştır.

Ülkemizde 44 adet çimento fabrikasından 27 adedi ek yakıt ve alternatif hammadde olarak kullanma konusunda Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan lisans almıştır. 27 adet çimento fabrikası "Atık Yönetiminin Genel Esaslarında İlişkin Yönetmelik'te (AYGEİY)" tanımlı 6'lı haneli 839 atık kodundan 438'inden lisans almıştır.

Ek yakıt kullanımı için lisans alan çimento fabrikaları ve bu çimento fabrikalarına atık temin eden ara depolama ve atık hazırlama tesislerinin dağılımı Şekil 6.8’de verilmektedir.



Şekil 6.8 Çimento fabrikaları ve atık temin eden tesisler

27 adet lisanslı çimento fabrikalarının toplam klinker üretim kapasitesi yılda 38.692.698 tondur. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) tarafından 2005-2007 yılları arasında atık türlerine göre alternatif yakıt kullanım miktarları sırasıyla 12.487 ton, 49.833 ton, 56.050 ton olarak bildirilmiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) ise 2008-2010 yılları arasında atık türlerine göre ek yakıt kullanım miktarlarını sırasıyla 77.099 ton, 133.877 ton ve 261.000 olarak bildirmiştir. 2010 yılında ek yakıt kullanım oranı 2005 yılına göre 20,90 kat artmıştır.

Çimento sanayinde geleneksel olarak kullanılan birincil fosil yakıt kömür olmuştur. Petrokok, linyit, doğal gaz ve fuel oil (ağır, orta ve hafif fuel oil) gibi çok çeşitli türde diğer katı, sıvı veya gaz halinde fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Bu geleneksel fosil yakıtlara ilaveten çimento sanayinde ülkemizde 7 yılı aşan bir süredir büyük miktarlarda atık yakıtlar veya biyokütle yakıtlar kullanılmaktadır. Ülkemizde genelde petrokok ve linyit kullanılmaktadır. Petrokok ve linyit'in kalorifik değeri sırasıyla

ortalama 7767 kcal/kg, 5773 kcal/kg'dır. Ek yakıtların ortalama kalorifik değerleri Çizelge 6.1'de verilmektedir(Çimento Fabrikaları, ÇŞB).

Çizelge 6.1 Ek yakıt ortalama kalorifik değer

EK YAKIT TÜRÜ	KALORİFİK DEĞER (KCAL/KG)
ATIK YAĞLAR	8.800-10.000
ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ LASTİKLER	5.500-6.000
ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT (ATY)	4.400
SOLVENTLER	7.500
PLASTİK ATIKLAR	4.500-5.000
BOYA ÇAMURLARI	3.500
PETROL TANK DİBİ ÇAMURU	10.000
ENDÜSTRİYEL ATIKSU ARITMA ÇAMURLARI	2.500-4.000
KONTAMİNE ATIKLAR (AMBALAJ VE GİYSİ ÜRÜNLERİ İÇİN)	3.000
YAĞLI KONTAMİNE ATIKLAR	3.500
PETROL VE TÜREVLERİ İLE KONTAMİNE ATIKLAR	4.000
DİĞER KALORİFİK DEĞERİ OLAN TEHLİKELİ ATIKLAR	2.000
KALORİFİK DEĞERİ OLAN TEHLİKESİZ ATIKLAR	1.500

Çimento sanayii verilerine göre 1 kg klinkerin pişirilmesi için ortalama 860 kcal enerjiye ihtiyaç vardır. Ek yakıt kullanım lisanslı olan 26 çimento fabrikasının toplam klinker üretim kapasitesi yılda 38.692.698 tondur. Ülkemizde çimento fabrikalarının ek yakıt kullanım oranı klinker üretim kapasitesi ve ek yakıt kullanım miktarı dikkate alınarak 2008 yılında % 1,1, 2009 yılında %1,86, 2010 yılında ise %3,59 olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda çimento fabrikalarının klinker üretiminde kapasite kullanımı % 100 olduğu varsayımından yola çıkılmıştır. Bilindiği üzere ülkemizde her çimento fabrikasının klinker üretimi kapasite oranı birbirinden farklıdır. Örneğin 2010 yılında klinker üretiminde kapasite kullanım oranı Nuh Çimento % 93,7, AKÇANSA Çimento % 100, ÇİMSA Çimento % 93,7, TÇMB verilerine göre ise çimento sanayinin geneli için %

82,73'tür [79, 80, 81]. Bu oranlar dikkate alındığında ek yakıt kullanım oranları 2008 yılı için %1,33, 2009 yılı için % 2,25, 2010 yılı için % 4,34 olarak hesaplanmıştır.

Ülkemizde çimento fabrikalarının ek yakıt kullanımı ile yaptığı petrokok yakıtı biriminden tasarrufu 2008 yılı için 47.207 ton, 2009 yılı için yaklaşık 80.000 ton, 2010 yılı için 154.000 tondur.

Çimento sanayinde ek yakıt kullanımının temel kurallarından biri atık maddeden elde edilen kalorifik değer, bir diğeri ise atık maddeden elde edilen maddi değerdir. Ek yakıtların kalorifik değeri yukarıda verilmiştir. Ülkemizde en çok tercih edilen fosil yakıt petrokok ve linyittir. TÜİK verilerine göre petrokokun fiyatı 204 TL/ton ve linyitin fiyatı 258 TL/ton'dur.

Çimento fırınlarında alternatif yakıtların kullanılması, Avrupa ve Amerika'da son derece yaygın bir yöntemdir. Avrupa Çimento Sektörünün alternatif yakıt kullanım oranı %20 civarındadır. Ülkemizde ek yakıt kullanım oranları yukarıda verildiği üzere oldukça düşük seviyelerdedir. Ülkemizde çimento fabrikalarının ek yakıt kullanım lisans oranları % 40 düzeyindedir. Bazı çimento fabrikalarında ek yakıt kullanım oranları % 10'lar düzeyine çıkmıştır. İleriki yıllarda ek yakıt kullanım oranının artması beklenmektedir. Ülkemizde çoğu ilde atıksu artıma tesisi bulunmaktadır.

Mevcut ve gelecekte oluşması muhtemel arıtma çamuru miktarı hakkında kesin veri olmamakla birlikte Atıksu Arıtımı Eylem Planı'nda (2008–2012) verilen havza bilgileri esas alınarak hesaplamalar mevcuttur. Havzalar doğu, batı ve orta olarak üç bölgeye ayrılmıştır. Batı bölgesinde oluşan çamur miktarı hesaplanırken kişi başı oluşacak çamur miktarı 90 gr/kişi.gün, orta bölgede 80 gr/kişi.gün, doğu bölgesinde ise 60 gr/kişi.gün ortalama % 25 kuru madde içeriği kabulüne göre mevcut ve geleceğe dönük arıtma çamuru miktarları hesaplanmıştır. Bu kabulden yola çıkarak çimento üretimi yapılan 42 ilde oluşan çamur miktarı 1.4 milyon ton/yıl (%25 KM) olarak hesaplanmıştır. Bu durumda sadece atıksu artıma çamurlarının ek yakıt olarak kullanılması durumunda ek yakıt kullanım oranı %4 ve elde edilebilecek yıllık kazanç ise yaklaşık 32 milyon TL olacaktır. Bu da ton başına yıllık ortalama 84 TL kazanç anlamına gelmektedir.

Yukarıda açıklandığı üzere ek yakıt kullanımından hem petrokok tasarrufu yapılmakta hem de ek yakıtın birim maliyeti petrokoktan düşük ve çoğu kez atık üreticileri tarafından atık bertaraf ücreti verildiği için maddi tasarrufta sağlanmaktadır. Bu miktar ek yakıt türü, ek yakıt kullanım oranı, fosil yakıt türü, fosil yakıt kullanım oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. 1 ton klinker üretimi için ek yakıt kullanım oranı % 10 iken saatlik kazanç 2-6 TL, % 20 iken 4-9 TL, % 30 iken 10-12 TL arası tasarruf yapılmaktadır. Hesaplamada yapılan kabuller;

- 1 ton klinker için 860 kcal enerji ihtiyacı
- Fosil enerji olarak sadece petrokok, linyit veya % 70 linyit+%30 petrokok kullanıldığı
- Ek yakıt olarak çamur, atık yağ, ATY, kontamine atık, atık lastik ve plastik kullanıldığı'dır

Ülkemizde ek yakıt kullanan çimento fabrikalarının yıllık petrokok üretiminin 38.692.698 ton olduğu kabul edilirse ek yakıt kullanımı % 10 iken 77-232 milyon TL, % 20 iken 155-348 milyon TL, % 30 iken 387-464 milyon TL kazanç elde edilebilmektedir.

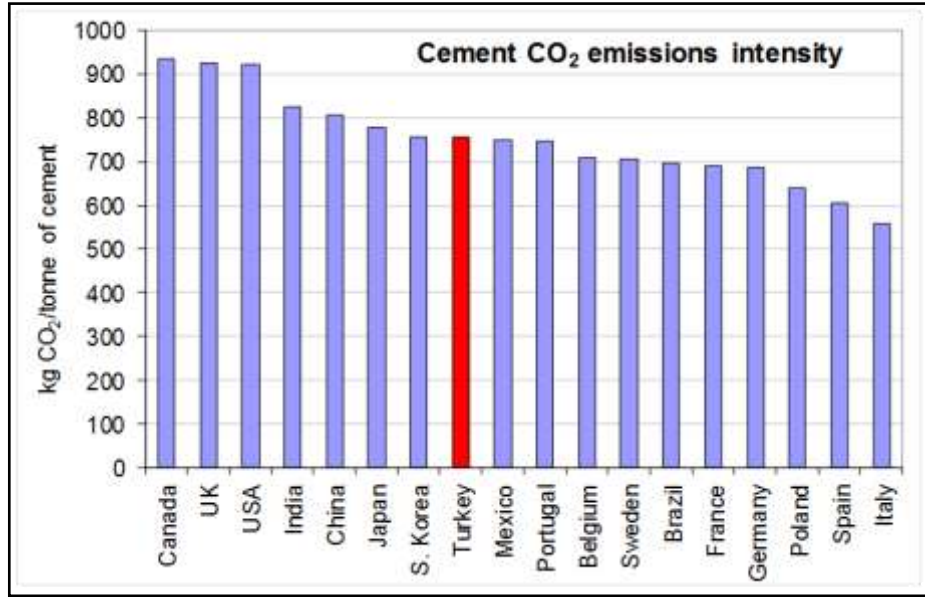
6.2.2 Emisyon Azaltımı

Çimento üretimi ile ilgili temel çevresel konulardan biri de havaya yapılan emisyonlardır. Çimento sektöründe atıksu deşarjı genellikle yüzey akıntısı ve soğutma suyu ile sınırlıdır ve su kirliliğine önemli bir katkıda bulunmaz. Yakıtların depolanması ve taşınması toprak ve yeraltı suları için potansiyel bir kirlilik kaynağıdır.

Bir kütle dengesinin amacı, kütlenin korunumu kanununu dikkate almak suretiyle sisteme giren ve çıkan kütle bileşenlerini değerlendirmektir. Tüm kütle dengesi öğelerinin değerlendirilebilmesi için hammadde ve yakıt bileşimleri, gaz akımları, atmosferik veriler ve benzeri proses verileri hakkında önceden bilgi sahibi olmak gereklidir. Bir farin değirmeni, ön ısıtıcı, fırın ve soğutucudan oluşan sisteme sahip bir çimento tesisinde aşağıda belirtilen girdi ve çıktı akışları önemlidir:

- girdi akışları:
 - ✓ hammaddeler (konvansiyonel ve/veya atık)
 - ✓ enerji (Yakıtlar (fosil ve/veya atık ve/veya biyokütle), elektrik enerjisi)
 - ✓ su (yakıt nemi, hammadde nemi, hava nemi ve farin değirmeninde su enjeksiyonu dahil)
 - ✓ hava (birincil hava, nakil havası, soğutma havası ve kaçak hava)
 - ✓ yardımcı maddeler (mineral katkıları, ambalaj malzemesi)
- çıktı akışları:
 - ✓ klinker
 - ✓ proses kayıpları/atığı (filtre tozları)
 - ✓ havaya yapılan emisyonlar (örneğin. toz, NO_x, SO_x)
 - ✓ suya yapılan emisyonlar (nadir durumlarda)

TÇMB verilerine göre ülkemiz için 1 ton çimento üretimi için 754 kg CO₂ emisyonu salınımı yapılmaktadır. Şekil 6.9'da ülkelerin 1 ton çimento üretimi için CO₂ emisyon miktarı verilmektedir.



Şekil 6.9 Ülkelere göre çimento üretimi CO₂ emisyon miktarı

2010 yılında 266.000 ton ek yakıt kullanımı ile 154.000 ton petrokok tasarrufu yapılmıştır. Atıkların 2010 yılında enerji amaçlı olarak kullanılması sayesinde yaklaşık

100.000 ton/yıl CO₂ azaltımı sağlanmıştır. Eğer lisanslandırılan atık miktarının tamamı imento fabrikalarında ek yakıt amaçlı olarak kullanılmış olsaydı 1.240.500 ton/yıl CO₂ azaltımı sağlanmış olacaktı. Bu rakam ise lkemizin CO₂ azaltım hedefinin %5'ine karşılık gelmektedir [82].

SONUÇ VE ÖNERİLER

Aritma çamurlarının miktarları artmaya devam etmekle beraber, bu çamurların yönetimi de gün geçtikçe zorlaşmaktadır. Getirilen yasal sınırlamalar ve alan yetersizliğinden dolayı arıtma çamurlarının bertarafında yeni yöntem ve teknolojilerin uygulanması zorunlu hale gelmiştir. Arıtma tesislerinin artmasıyla birlikte yakın bir gelecekte oluşan çamur miktarının çok yüksek seviyelere ulaşacağı tahmin edilmektedir. Önemli miktardaki bu atıkların uzaklaştırılması ve bertarafı ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurlarının bertarafında, arazide zirai maksatlı kullanma, çöp sahalarına gömme, yakma ya da kompostlaştırma yöntemleri kullanılmaktadır.

2008 yılı verilerine göre belediyelerden kanalizasyon şebekesi ile alıcı ortamlara deşarj edilen kişi başı günlük atıksu miktarının 173 litre olduğu tespit edilmiştir[1]. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verilerine göre atıksu arıtma tesisi sayısı 194'e ulaşmıştır. Atıksu arıtma tesislerinin 26'sı fiziksel, 135'i biyolojik, 23'ü ileri arıtım yöntemleri ile arıtım yapmaktadır [2].

2008 yılına ait sanayilerden ve belediyelerden alınan verilere istinaden yapılan çalışmalar sonucunda; evsel/kentsel atıksu arıtma tesislerinden 500.000 ton/yıl arıtma çamuru, sanayi tesislerinden ise 575.000 ton/yıl olmak üzere toplam 1.075.000 ton/yıl (kuru katı madde) arıtma çamurunun olduğu değerlendirilmektedir.

Mevcut ve gelecekte oluşması muhtemel arıtma çamuru miktarı hakkında kesin veri olmamakla birlikte Atıksu Arıtımı Eylem Planı'nda (2008–2012) verilen havza bilgileri

esas alınarak hesaplamalar mevcuttur. Havzalar doğu, batı ve orta olarak üç bölgeye ayrılmıştır. Batı bölgesinde oluşan çamur miktarı hesaplanırken kişi başı oluşacak çamur miktarı 90 gr/kişi.gün, orta bölgede 80 gr/kişi.gün, doğu bölgesinde ise 60 gr/kişi.gün ortalama % 25 kuru madde içeriği kabulüne göre mevcut ve geleceğe dönük arıtma çamuru miktarları hesaplanmıştır [1].

Günlük su tüketiminin 2,5 milyon m³'ü geçen İstanbul'da, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) sorumluluğunda 10'u ön arıtma, 4'ü ileri biyolojik olan mevcut 33 adet atıksu arıtma tesisi bulunmaktadır. Arıtılan atıksuyun % 60'nı ön arıtmadan, % 39'u ileri biyolojik arıtmadan ve % 1'ise biyolojik arıtmadan geçmektedir. Atıksu arıtma tesislerinden yaklaşık 1000 ton/gün (% 25 KM) arıtma çamuru oluşmaktadır. İstanbul'da planlanan/inşası süren biyolojik atıksu tesisleri ile oluşacak arıtma çamur miktarları 2000 ton/gün olacaktır.

Arıtma çamurlarının yönetimi konusunda gerekli düzenlemeler AB ile uyum süreci kapsamında revize edilerek ilgili yönetmeliklerin içinde yer almaktadır. Arıtma çamurunun işlenmesi ve bertaraf edilmesine yönelik olarak hazırlanmış yönetmelikler aşağıda verilmiştir:

- Atık Yönetiminin Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (AYGEİY)
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDY)
- Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (EKAÇTKDY)
- Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY)
- Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (AYİY)

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik'te atıkların düzenli depolanabilme kriterleri Ek-2'de verilmiştir. Arıtma çamurlarının düzenli depolama sahalarına kabulü "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" ve 05 Kasım 2010 tarihli "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğe İlişkin Genelge" ile düzenlenmiştir. İlgili yönetmelik Geçici Maddeler 4 başlığı ve genelgenin 4. Maddesi ile Atık Yönetimi Genel

Esaslarına ilişkin Yönetmeliğin EK-IV'ünde tehlikesiz olarak sınıflandırılan arıtma çamurlarından,

- Yönetmelik Ek-2'de verilen diğer tüm parametreleri sağlaması (sınır değer artırımları için Bakanlıkça ayrıca izin verilebilir),
- Ağırlıkça en az %50 kuru madde ihtiva etmesi,
- Ön işleme tabi tutularak kötü kokunun giderilmesi,
- Atığın kararlı hale getirilmesi,

kaydıyla II. Sınıf düzenli depolama alanına kabulünde 1/1/2015 tarihine kadar Çözünmüş Organik Karbon (ÇOK) sınır değerine uygunluk aranmamaktadır.

Ancak mevcut susuzlaştırma teknolojileri ile söz konusu % 50'lik KM oranına ulaşılması, özellikle kentsel atıksu arıtma çamurları için, termal kurutma olmaksızın, pratik olarak mümkün değildir.

Bu durum atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurlarının bertarafında, arazide zirai maksatlı kullanma, yakma ya da kompostlaştırma yöntemlerini gündeme gelmiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından arıtma çamurlarının yönetimi için Havza Koruma Eylem Planları, Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımları Planlaması için Teknik Yardım (EHCIPI) Projesi, Atıksu Arıtımı Eylem Planı, Marmara Çevre Master Planı ve Yatırım Stratejisi Nihai Raporu hazırlanmıştır. ÇŞB'nin ilgili politika ve programlarında da arıtma çamurlarının yönetiminde araziye uygulama, yakma ve kompostlaştırma metotları önerilmiştir.

Çimento sanayi, yüksek enerji ihtiyacı olan sektörler arasında yer almakta olup bir ton çimento üretilebilmesi için ortalama 4,4 milyon Btu/ton enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Kömür, doğal gaz, yağ ve petrokok gibi enerji kaynakları, çimento fabrikalarında klinker üretimi esnasında kullanılan başlıca konvansiyonel yakıtlar arasında yer almakta ve bu yakıtlar için ayrılan bütçe işletme masraflarının % 30 - 40'lık kısmına karşılık gelmektedir. Gerek yenilenemez enerji kaynaklarının korunması gerekse yakıt maliyetlerinin düşürülmesi için çimento üretiminde kullanılabilecek alternatif yakıtların değerlendirilmesi günümüzde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Avrupa çimento endüstrisinde önemli miktarda atıktan türetilen yakıtın geri kazanımı sağlanmaktadır ve bazı fabrikalarda %80'i aşan bir oranda fosil yakıt ikamesi yapılmaktadır. Bu durum, çimento endüstrisinin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve daha az doğal kaynak kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Temel bir kural olarak, yakıt ve/veya hammadde olarak kabul edilen atıklar döner fırına aşağıda belirtilen katma değeri sağlamalıdır:

- atık maddeden elde edilen kalorifik değer
- atık maddeden elde edilen maddi değer

Avrupa çimento endüstrisinde atık yakıtların minimum kalite koşullarını belirleyerek, endüstriyel proseslerde kullanılan ikincil yakıtların kullanılmasını teşvik edecek ve böylece çevresel kirlenmenin yükünü azaltacak ulusal girişimler mevcuttur. Almanya'da sertifika etiketi tanıtılmış ve uygulamaya alınmıştır. Örneğin İsveç ve Birleşik Krallık'ta uygulamaya konulan, fakat prosesle ilgili nedenler dolayısıyla çimento endüstrisi tarafından şart koşulmuş ikincil yakıtlara ait kalite standartları bulunmaktadır.

Türkiye 2010 yılında çimento üretiminde Avrupa'nın en büyük, Dünyanın ise 5. Büyük çimento üreten ülkesi olmuştur[48]. Türkiye çimento sektöründe ikincil yakıtların kullanımı henüz deneme sürecindedir ve kullanım miktarı dikkate alınacak seviyeye ulaşmamıştır. Avrupa Çimento Sektörünün alternatif yakıt kullanım oranı ortalama %20 civarındadır. Bu rakam ülkemizde % 1 den küçüktür.

Çimento fırınında ek yakıt olarak kullanılan atık türleri, tekstil, plastik, odun, kağıt-karton, işlenmiş fraksiyonlar (ATY), lastik, yağlar ve atık yağlar, katı atıklar (emprenye edilmiş talaş), solvent ve endüstriyel ve kentsel arıtma çamurlarıdır.

AB-27'de çimento fırınlarında yakıt olarak kullanılan arıtma çamurlarının ortalama kalorifik değeri ortalama 12-16 MJ/Kg, ülkemizde ise ortalama 10-15 MJ/kg arasındadır.

Proje kapsamında İSKİ tarafından işletilen ve arıtma çamur miktarı bakımından %90'ın üzerinde temsiliyete sahip Ataköy, Paşaköy ve Tuzla atıksu arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanımı araştırılmıştır.

Arıtma çamurlarının ek yakıt olarak kullanımının araştırılması kapsamında İSKİ atıksu arıtma çamurlarının 5 aylık çamur karakterizasyonu incelenmiş ve pilot ölçekli ve endüstriyel ölçekli deneme çalışmaları yapılmıştır. Pilot ölçekli çalışmada *“105G108 nolu Geri Dönüşümlü Plastik Atıkların Granül Ürüne Dönüştürülmesi ve Geri Dönüştürülemeyen Diğer Atıkların Çimento Fabrikalarında Ek Yakıt Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”* TÜBİTAK 1007 projesi kapsamında imal edilen ve Kemerburgaz Kompost ve Geri Kazanım Tesisi’nde bulunan pilot ölçekli çimento döner fırını kullanılmıştır. Endüstriyel ölçekli çalışma ise özel bir çimento fabrikasının 2 numaralı çimento fırınında yürütülmüştür.

Pilot ölçekli deneme çalışmalarında öncelikle % 100 LPG kullanılarak klinker üretilmiştir, daha sonra ise % 5, % 10 oranlarında Tuzla Çamuru ve % 10, % 20 oranlarında Paşaköy Çamuru ek yakıt olarak beslenmiştir. Endüstriyel ölçekli çalışmalarda % 6, % 4 Ataköy Çamuru ve % 10 Paşaköy Çamuru ek yakıt olarak beslenmiştir.

Her iki çalışmada da deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddelerin (farin, arıtma çamuru, vb.) fiziksel ve ağır metal analizleri yapılmış, üretilen klinkerin ve çimentonun kimyasal, fiziksel, mineralojik analizi ve dayanım testleri yapılmış ve baca gazı analiz çalışmaları yürütülmüştür. Üretilen klinker ve çimentonun kalite sınır değerleri içinde olduğu tespit edilmiştir. Endüstriyel ölçekli tesiste yapılan ölçüm sonucunda Toz, TOC, HCl, HF, SO₂, NO₂ ve ağır metal ve dioksin furan emisyonları SKHKY’de verilen sınır değerlerin altında olduğu ve TOC emisyonları hariç diğer emisyonların AYİY’te verilen sınır değerlerin altında olduğu tespit edilmiştir.

Arıtma çamurlarının düzenli depolama yöntemi ile bertarafında nakliye ve depolama maliyeti olarak üzere iki maliyet kalemi bulunmaktadır. Nakliye maliyeti arıtma tesisinin bertaraf tesisine uzaklığı ve nakliye edilecek malzemeye karakterizasyonuna bağlı olarak artmaktadır. Ülkemiz koşullarında arıtma çamurlarının nakliye maliyeti yaklaşık 3-5 TL/km, depolama maliyeti yaklaşık 30-35 USD/ton’dur. Atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurların atık yönetimi açısından düzenli depolama yöntemi ile bertarafının yıllık maliyeti yaklaşık 27 milyon TL’dir.

Depolama sahalarının su, hava ve toprağa kirletici emisyonları bulunmaktadır. Su ve toprağa verilen emisyonlar sızıntı suyudur. Emisyon miktarı iklim şartlarına ve depo alanının üst örtüsüne bağlı olarak değişir. Havaya verilen emisyonlar, geri kazanılmadığı takdirde depo gazı ve tozudur. Ayrıca taşıtların egzoz gazlarıyla kirleticiler verilir. Depo alanının işletilmesi sırasında hava, su ve toprağa verilen kirletici emisyonlara ilave olarak araçlardan kaynaklanan gürültü ve toz, koku, haşere, fare vb zararlıların üremesi, arazi kullanımı, bitki örtüsü ve peyzaj öğelerinin bozulması, kötü işletme durumlarında yangın, patlama, sızıntı suyunun kontrolsüz boşaltılması vb. etkilere de çıkarmaktadır.

Arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılmasının atık yönetimi açısından kurutma tesisi kurulum ve işletme maliyeti, nakliye maliyeti ve atık bertaraf maliyeti (yakma maliyeti) olmak üzere 3 ana maliyet kalemi bulunmaktadır. Ülkemiz koşullarında kurutma tesis kurulum ve işleme maliyeti yaklaşık 160 TL/ton, nakliye maliyeti 7 TL/km ve atık bertaraf maliyeti ise kentsel atıksu arıtma çamuru için ücretsizdir. Arıtma çamurlarının ek yakıt olarak kullanımının atık yönetimi açısından maliyeti yaklaşık 67 milyon TL'dir. Bu maliyet enerji geri kazanım ve emisyon azaltımından kaynaklanan girdi maliyetini kapsamamaktadır.

Çimento fabrikalarında atıkların ek yakıt olarak kullanımı sırasında bazı başlıklar öne çıkmaktadır. Bunlara baktığımızda, elde edilen iki sonuç vardır. Birincisi konvansiyonel yakıt tasarrufu ikincisi CO₂ azaltımıdır.

Çimento sektörü ek yakıt kullanımından hem petrokok tasarrufu yapılmakta hem de ek yakıtın birim maliyeti petrokoktan düşük ve çoğu kez atık üreticileri tarafından atık bertaraf ücreti verildiği için maddi tasarrufta sağlanmaktadır. Bu miktar ek yakıt türü, ek yakıt kullanım oranı, fosil yakıt türü, fosil yakıt kullanım oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. 1 ton klinker üretimi için ek yakıt kullanım oranı % 10 iken saatlik kazanç 2-6 TL, % 20 iken 4-9 TL, % 30 iken 10-12 TL arası tasarruf yapılmaktadır.

Ülkemiz genelinde çimento fabrikalarının yer aldığı 42 ildeki toplam oluşan çamur miktarı yılda yaklaşık 1,4 milyon tondur (%25 KM). Sadece atıksu artıma çamurlarının ek yakıt olarak kullanılması durumunda ek yakıt kullanım oranı %4 ve elde edilebilecek

yıllık kazanç ise yaklaşık 32 milyon TL olacaktır. Bu da ton başına yıllık ortalama 84 TL kazanç anlamına gelmektedir.

TÇMB verilerine göre ülkemiz için 1 ton çimento üretimi için 754 kg CO₂ emisyonu salınımı yapılmaktadır. 2010 yılında 266.000 ton ek yakıt kullanımı ile 154.000 ton petrokok tasarrufu yapılmıştır. Atıkların 2010 yılında enerji amaçlı olarak kullanılması sayesinde 100.000 ton/yıl CO₂ azaltımı sağlanmıştır.

Sonuç olarak çok çeşitli türdeki farklı atıklar yakıt olarak kullanılmaktadır. Atıkların ek yakıt olarak kullanılması ise konvansiyonel yakıt tasarrufu, CO₂ azaltımı sağlanmakta beraber atıkların düzenli depolanmasındaki su, hava ve toprağa verilen kirletici emisyonları azaltılmaktadır. Bununla beraber atık maddelerin kullanımı düşünülmeden önce, atık maddelerin uygun bir biçimde seçilmesi, atık maddelerin kapsamlı analiz prosedürü ve ön arıtımı gibi farklı temel ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır. Değerlendirmeler ve kararlar; klinker üretim süreci ve proses koşullarına, hammadde ve yakıt bileşimlerine, besleme noktalarına, kullanılan baca gazı arıtım tekniğine, karşılaşılan atık yönetimi sorunlarına ve mevcut yönetmeliklerinin gereksinimlerine dayandırılmalıdır. Yakıt küllerinin tümüyle klinkerin içinde tutulması nedeniyle, klinkerin kalite standartlarını korumak için kalite standartları tanımlanmalıdır.

KAYNAKLAR

-
- [1] DEÜ, Çamurlar, Arıtma Çamurları, Özellikleri, Geri Kazanılması ve Depolanması, <http://web.deu.edu.tr/erdin/pubs/doc81.htm>, 15.02.2011
- [2] Filibeli, A. ve Ayol, A., (2008). "Tehlikeli Atık Sınıfındaki Arıtma Çamurlarının Yönetimi", Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu'08, Bildiriler Kitabı, 02-06 Kasım 2008.
- [3] DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti., Evsel ve Evsel Nitelikli Atıksu Arıtma Çamurunun Arıtımı, [report-4d-turkish, www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/evsel/13.doc](http://www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/evsel/13.doc), 21.03.2011.
- [4] Öztürk, İ., Demir, İ., Akgül, H.O., Yıldız, Ş., Özabalı, A. ve Tezer, B.H., (2007). "İstanbul İçin AB İle Uyumlu Entegre Katı Atık Yönetimi Stratejik Planı", TÜRKAY 2007, AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, 2007.
- [5] Mazlum N., Mazlum S. ve Öztürk E., (2009). "Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesinde Yeni Gelişmeler", TÜRKAY 2009 Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, YTÜ, 15-17 Haziran 2009, İstanbul.
- [6] Aydın S., (2004). "Atıksu Arıtma Tesisi Çamurlarının Değişik Amaçlarla Kullanımının Araştırılması", İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ekim, 2004.
- [7] Gören, S., (2007). "Katı Atık Yönetiminde Japonya'dan Bir Örnek", TÜRKAY 2007, AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, 2007.
- [8] Ayvaz, Z., (2000). "Atıksu Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi", Ekoloji ve Çevre Dergisi, 9:35(2000), 3-12.
- [9] Murray, A., (2007). "End Use of Sewage Sludge in Cement Manufacturing, Potential Economic and Environmental Benefits, Energy and Resources Group", October 1, 2007.
- [10] Chen, C.H, Chiou, I.J. ve Wang, K.S., (2006). "Sintering Effect On Cement Bonded Sewage Sludge Ash", Cement & Concrete Composites, 28:26–32, 2006.

- [11] Garcés, P., Carrión, M.P., García-Alcocel, E., Payá, J., Monzó, J. ve Borrachero, M.V., (2008). "Mechanical and Physical Properties Of Cement Blended With Sewage Sludge Ash", Waste Management, 12:2495-2502, 2008.
- [12] Çokgör, E.U., Mantaş, E.P., İnel, G. ve Taş, D.O., (2008). "Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarının Biyolojik Stabilizasyonunun Değerlendirilmesi: İstanbul Örneği", Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu'08, Bildiriler Kitabı, 02-06 Kasım 2008.
- [13] Çelik, İ.B. ve Öner M., (2003). "Atıksu Arıtma Filtre Kekiin Çimentoda Kullanımı", Madencilik, 42:2, 11-18, Haziran 2003.
- [14] Werther J. ve Ogada T., (1999). "Sewage Sludge Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 25(1):55-116, 1999.
- [15] Fytli D. ve Zabaniotou A., (2008). "Utilization of Sewage Sludge in EU Application of Old And New Methods—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12", 116-140.
- [16] Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, 07-09 Haziran 2006, İstanbul, [http://www.alfcemind.com/cd/AF and ARM sewage sludge.htm](http://www.alfcemind.com/cd/AF_and_ARM_sewage_sludge.htm), 15.03.2011
- [17] Murray A. ve Price L., (2008). "Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-525E, June 2008.
- [18] Erdinçler A., Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarından Enerji Elde Edilmesi, <http://tekirdag.cevreorman.gov.tr/Tekirdag/Files/Egitimler/Calistay/Aysen%20Erdinçler%20%C3%87orlu%20Sunum%5B1%5D.pdf>, 04.06.2011
- [19] Zabaniotou A. ve Theofilou C., (2008). "Green Energy at Cement Kiln in Cyprus—Use of Sewage Sludge As a Conventional Fuel Substitute, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12", 531-541.
- [20] Öncel, S., Engin, G.Ö., Morgül, A. ve Ömürlü, N., (2007). "Arıtma Çamurlarının Karakterizasyonu ve Yeniden Kullanımı Üzerine Bir Çalışma, Ulusal Çevre Sempozyumu", 18-21 Nisan 2007, Mersin.
- [21] Stasta P., Boran J., Bebar L., Stehlik P. ve Oral J., (2006). "Thermal Processing of Sewage Sludge", Applied Thermal Engineering 26, 1420-1426.
- [22] Çelik Ö., Alp Y.Z., Damcı E., Elbeyli İ.Y. ve Pişkin S., (2004). "Atık Çamur ve Silis Dumanının Çimentoların Basınç Dayanımları Üzerine Etkileri", Beton 2004.
- [23] Varınca K., Avşar Y., Kurt O. ve Gönüllü M.T., (2006). "Kurşun İçerikli Akü Tesisi Arıtma Çamurlarının Çimento ile Katılaştırılmasının Araştırılması", 10.
- [24] Aydınç O., Nuh Çimento A.Ş., CDP 2. ÇALIŞTAYI – İSTANBUL – 28.04.2010 www.sabanciuniv.edu/.../CDP-2.Calistay.Sunum-NuhCimento-OguzAydinc.ppt, 05.05.2010.

- [25] Aydın S., (2004). "Atıksu Arıtma Tesisi Çamurlarının Değişik Amaçlarla Kullanımının Araştırılması, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü", Doktora Tezi, Ekim, 2004.
- [26] Avrupa Birliği (2000). "Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste", 2000/76/EC.
- [27] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye'nin Ulusal İklim Değişikliği Eylem Planı'nın Geliştirilmesi Projesi Atık Sektörü Mevcut Durum Değerlendirmesi Raporu, 2011.
- [28] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Atıksu Arıtımı Eylem Planı (2008-2012),2008.
- [29] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi, İSKİ 2010 Faaliyet Raporu, 2010.
- [30] http://www.iwes.com.tr/2010sunumlar/51_Ali_Inci.pdf,12.10.2010.
- [31] Arıkan, O.A. ve Öztürk, İ., (2005). "Arıtma Çamuru Kompostlaştırılmasında Organik Evsel Katı Atık İlavesinin Etkisi", İTÜ Dergisi, 4(1):15-24, Şubat 2005.
- [32] T.C. Resmi Gazete, Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik. (26927), 05.07.2008.
- [33] T.C. Resmi Gazete, Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği. (20814), 14.03.1991.
- [34] T.C. Resmi Gazete, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. (27533), 26.03.2010.
- [35] T.C. Resmi Gazete, Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik. (27661), 03.08.2010.
- [36] T.C. Resmi Gazete, Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği. (26047), 08.01.2006
- [37] T.C. Resmi Gazete, Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği. (27517), 20.03.2010.
- [38] Çimento Sanayi Çevre Deklarasyonu. 10 Şubat 1993.
- [39] T.C. Resmi Gazete, Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği. (27517), 20.03.2010.
- [40] T.C. Resmi Gazete, Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği. (19269), 02.10.1986. [34]T.C. Resmi Gazete, Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği. (25755), 14.03.2005.
- [41] T.C. Resmi Gazete, Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik. (27721), 06.10.2010.
- [42] T.C. Resmi Gazete, Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği. (27605), 08.06.2010.
- [43] ÇŞB, (2010). Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması-Marmara Havzası, Ankara.
- [44] ÇŞB, (2005). Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımları Planlaması için Teknik Yardım (EHCI) Projesi, Arıtma Çamurunun Tarımda Kullanılması Halinde Çevrenin ve

- Özellikle Toprağın Korunmasına İlişkin Konsey Direktifi'ne Özgü Yatırım Planı, ENVEST, Ankara.
- [45] ÇŞB, (2007). Marmara Çevre Master Planı ve Yatırım Stratejisi Nihai Raporu (MEMPIS Projesi), Ankara.
- [46] CEMBUREAU, (2006-2008,). "General information about cement industry, updates 2006, 2007 and 2008".
- [47] TWG CLM, (2007). "Merged and sorted comments master spread sheet on draft 1 and information".
- [48] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, <http://www.tcma.org.tr>, 01.05.5011.
- [49] DPT, (2000), Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu (Çimento ve Hazır Beton), Ankara.
- [50] VDI 2094 Almanya (2003). "Emissionsminderung Zementwerke/Emission control cement industry", VDI 2094.
- [51] Castle Cement İngiltere, (2006). "Presentations and contributions from British cement plants during site visits".
- [52] Macaristan (2006). "Hungarian cement industry".
- [53] Fransa/DFIU/IFARE Karlsruhe (2003). "EGTEI - Draft background document on cement sector", contribution for review.
- [54] CEMBUREAU, (2001). "Information for cement industry/Information for cement and lime BREF 2001".
- [55] CEMBUREAU, (1997 Kasım). "BAT for the cement industry, Kasım 1997 / Information for cement and lime BREF 2001".
- [56] Hollanda, (1997). "Dutch notes on BAT for the production of cement clinker/Information for cement and lime BREF 2001".
- [57] Haugh, (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- [58] Lohse, J., (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- [59] CEMBUREAU, (2007). "Behaviour of SO₂ in the clinker burning process".
- [60] Erdoğan T.Y., Betonlu oluşturan Malzemeler, Çimentolar, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÇMB.
- [61] Çimento, Yeni Bir Çağın Malzemesi, TÇMB, 2004.
- [62] CEMBUREAU, (2006). "Additional contributions, e.g. types of cement and composition, information on chromates, information on why the cement industry has started to use AFR, contributions to the pre-draft of the revised CL BREF, composition information for grey cement", contribution for BREF review.
- [63] Almanya, V. (2006). "Cement manufacturing industries, German contribution".

- [64] Estonya (2006). "Review to BREF for Kunda, cement manufacturing and annexes".
- [65] ERFO, T. ve Glorius, Scorigel, (2005). "Classification of solid recovered fuels".
- [66] CEMBUREAU (2006). "2004 and 2005 statistics on the use of alternative fuels and materials in the clinker production in the European cement industry".
- [67] Avusturya (2006). "Austrian cement industry", Contribution with Annexes 1,2 and 3.
- [68] Avrupa Komisyonu (2000). "Commission Decision 2000/532/EC of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste (notified under document number C(2000) 1147) (Text with EEA relevance)".
- [69] EURITS (2006). "Contribution: Template for the review of the cement and lime BREF".
- [70] Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspective by European Commission, 2003.
- [71] EURITS - Criteria for quality of waste for co-incineration in cement kilns (European Use for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste).
- [72] CEN to Mandate on Solid Waste Fuels (SRF) by European Commission, 2002.
- [73] CEN/TS 15359, Solid recovered fuels - Specifications and classes fuels, 2006.
- [74] HOLCIM/GTZ (2006). "Guidelines on Co-processing Waste Materials in Cement Production".
- [75] Mokrzycki E. ve Uliasz-Bochenczyk A., Alternative Fuels for the Cement Industry, Science Direct, 74, 1(2):95 – 100 (2003).
- [76] Pekin A. V., Çimento Sanayinde Alternatif Yakıt Kullanımı www.eie.gov.tr/turkce/en_tasarufu/en_tas_etkinlik/2005_bildiriler/oturum2/AhmetVpekin.doc, 03.02.2011.
- [77] Devlet Planlama Teşkilatı, 2006:9.
- [78] Devlet Planlama Teşkilatı, 2006:12.
- [79] Nuh Çimento Faaliyet Raporu, 2010.
- [80] Akçansa Faaliyet Raporu, 2010.
- [81] ÇİMSA Faaliyet Raporu, 2010.
- [82] Varır A., Atıkların Alternatif Yakıt Olarak Enerji Amaçlı Kullanımı, Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yöneyimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, 17 Haziran 2011, İstanbul, http://www.icci.com.tr/2011sunumlar/O40_Ahmet_Varir.pdf, 20.07.2011

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Aynur KEMİRTLEK
Doğum Tarihi ve Yeri :12.02.1979, Kayseri
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :aynur.kemirtlek@gmail.com, akemirtlek@istac.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Çevre Mühendisliği	Anadolu Üniversitesi	2000
Lise		Yeşilhisar Lisesi	1996

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	İSTAÇ A.Ş.	Proje Etüt ve Analiz Şefi
2006	İSTAÇ A.Ş.	Çevre Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Varınca, K. Lüy, E. ve **Kemirtlek, A.** “ Katı Atık Geri Kazanımı Çalışmaları, İstanbul Örneği” TÜRKAY 2007 AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, Mayıs 2007, İstanbul.
2. Yıldız, Ş., Saltabaş, F. ve **Kemirtlek, A.** “İstanbul İçin Tehlikeli Atık Envanteri ve Tehlikeli Atık Bertarafına Yönelik Çalışmalar” Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları’08 Sempozyumu, Kasım 2008, İstanbul.
3. Yıldız, Ş., Saltabaş, F., Enç, V., **Kemirtlek, A.**, Tezcan, E. ve Doğan, K.” Ambalaj Atıkları Yönetimi-İstanbul Örneği” Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları’08 Sempozyumu, Kasım 2008, İstanbul.
4. **Kemirtlek, A.**, Saltabaş, F., Yıldız, Ş. “ Tehlikeli Atık Yönetiminde İstanbul Örneği” TÜRKAY 2009 Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, 15-17 Haziran 2009.
5. Yıldız, Ş., Saltabaş, F., Yalçinkaya S., **Kemirtlek, A.** “ Katı Atık Taşıma ve Toplama Optimizasyonu Kağıthane Örneği” TÜRKAY 2009 Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, 15-17 Haziran 2009.
6. Yıldız, Ş., Lüy E., **Kemirtlek, A.** “ Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Kuş Kontrolü” TÜRKAY 2009 Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, 15-17 Haziran 2009.
7. Kara, M., Tabak, Y., Yildiz, S., Enc, V., **Kemirtlek A.**, “ The Usage of Sewage Sludge in Cement Kiln as Supplementary Fuel”, EurAsia Waste Management Symposium, 14-16 Kasım 2011.
8. Enc, V., **Kemirtlek A.**, M. Kara, Y. Tabak, “Ömerli İçme Suyu Arıtma Tesisi Çamurlarının Endüstriyel Ölçekte Tuğla Üretiminde Kullanılması”, İstanbul Uluslararası Katı Atık Su ve Atıksu Kongresi 2013 (Istanbul3Wcongress 2013), 22-24 Mayıs 2013

9. Kara, M., Tabak, Y., Yildiz, S., Enc, V., **Kemirtlek A.**, “Ömerli İçme Suyu Atık Çamuru Kullanarak Tuğla Üretim Denemeleri”, 4. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi (UKAY 2012), Antalya, 17-20 Ekim 2012
10. Kara, M., Tabak, Y., Yildiz, S., Enc, V., **Kemirtlek A.**, “Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisi Arıtma Çamurunun Çimento Üretiminde Ek Yakıt Olarak Kullanımı”, 4. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi (UKAY 2012), Antalya, 17-20 Ekim
11. Yildiz, S., Enc, V., **Kemirtlek A.**, Kara, M., Tabak, Y., “Ömerli İçme Suyu Arıtma Tesisi Çamurlarının Endüstriyel Ölçekte Tuğla Üretiminde Kullanılması" *Paper ID: 426* has been accepted for ORAL presentation at Istanbul International Solid Waste, Water and Wastewater Congress 2013 (Istanbul3Wcongress 2013).

Proje

1. Atıksu Arıtma Çamurlarının Çimento Fabrikalarında Ek Yakıt Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 3090727, TÜBİTAK TEYDEB-1501, 2009-2012
2. Arıtma Çamurlarının Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 3100164, TÜBİTAK TEYDEB-1501, 2010-2012
3. İSTAÇ Tıbbi Atık Yakma Tesisinde Dioksin/Furan Giderim Ünitesinin Adsorbant Doz Optimizasyonu, BAP, 2010-2012
4. Amonyacı Oksitleyen Arkelerin Atıksu Arıtımındaki Rolünün Moleküler Tekniklerle Belirlenmesi, 107T680, TÜBİTAK 1001, 2007-2010
5. G-07-BTC-136201- Technical Assistance For Management Of The Antakya Landfill Facility In Line With International Standards, BTC Bölgesel Kalkınma Hibe Fonu, 2007-2010