



**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Öner Yusuf TORAMAN

119 800

**ATIKSU ARITMA ÇAMURUNU DEĞERLENDİRME
İMKANLARININ ARAŞTIRILMASI**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2002

119800

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIKSU ARITMA ÇAMURUNU
DEĞERLENDİRME İMKANLARININ
ARASTIRILMASI

Öner Yusuf TORAMAN
DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 19.09.2021 tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/ Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

İmza 
Doç.Dr.Oktay BAYAT
DANIŞMAN

İmza 
Prof. Dr. Mesut ANIL
ÜYE

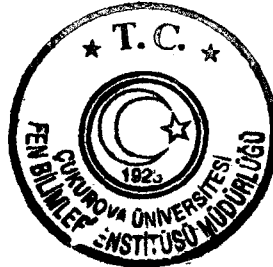
İmza 
Prof.Dr.Aysel ATIMTAY
ÜYE

İmza 
Prof. Dr. Beşir ŞAHİN
ÜYE

İmza 
Yrd. Doç. Dr. Belgin BAYAT
ÜYE

Bu tez Enstitümüz Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No: 668



İmza 
Prof. Dr.Fikri AKDENİZ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Araştırma Fonu Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: FBE 97D-91

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı. 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
ÖZ	VI
ABSTRASCT	VII
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	IX
ÇİZELGELER DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIV
RESİMLER DİZİNİ	XVII
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	1
1.2. Tanım	2
1.3. Arıtma Çamurunun Sınıflandırılması	3
1.4. Arıtma Çamurunun Yapısı	5
1.5. Arıtma Çamurunun Genel Özellikleri	7
1.5.1. Fiziksel Özellikler	7
1.5.1.1. Özgül Ağırlığı	7
1.5.1.2. Katı Madde İçeriği	7
1.5.1.3. Tane İrilik Dağılımı	8
1.5.2. Kimyasal Özellikler	8
1.5.2.1. Isıl Değeri	9
1.5.2.2. Gübre Değeri	11
1.5.2.3. Besin Değeri	11
1.5.3. Biyolojik Özellikler	11
1.6. Çamur Arıtımı	12
1.6.1. Çamur Stabilizasyonu	15
1.6.2. Çamur Susuzlaştırma	15
1.6.2.1. Susuzlaştırma Yöntemleri	18
i) Kurutma (Kum) Yatakları	18
ii) Vakum Filtrasyonu	20

iii) Basınçlı Filtrasyon	21
a) Pres Filtre	21
b) Bant (Belt) Pres	21
iv) Santrifüjleme (Santrifüj Dekantör)	22
1.7. Arıtma Çamurunun Bertarafı	24
1.7.1. Düzenli Depolama	24
1.7.2. Toprak Islahı (Zirai Üretimde Kullanım)	25
1.7.3. Kurutma ve Peletleme (Gübre Üretimi)	28
1.7.4. Termik İşlemler	30
1.8. Bertaraf İçin Karar Prosesi	32
1.9. Kurutma ve Yakma	34
1.9.1. Kurutma	34
1.9.1.1. Nem İçeriği ve Yaş Yakmaya Olan Etkisi	34
1.9.1.2. Çamur Yakma Prosesine Etkisi	37
1.9.2. Yakma	38
1.9.2.1 Çamurun Yanma Mekanizması	40
1.9.2.2. Yakma Süreci	40
1.9.2.3. Materyal Dengesi	41
1.9.3. Döner Fırın	41
1.9.4. Akışkan Yataklı Fırın (AYF)	42
1.9.4.1. Dolaşımli Akışkan Yatak (DAY) Fırınlr	49
1) DAY'ta Yakma Olayı	50
1.9.4.2. Akışkan Yatakta Kül Yapısı	52
1.9.4.3. AYF Boyutlandırma	53
1.9.5. Çok Gözlü Fırın (ÇGF)	54
1.10. Diğer Termik İşlemler	57
1.10.1. Islak (Yaş) Hava Oksidasyonu	57
1.10.2. Piroliz	57
1.11. Birlikte Yakma (co-combustion)	58
1.11.1. Termik Santrallerde Yakma	59
1.11.1.1. Pulverize Sistem	59

1.11.1.2. Akışkan Yataklı Sistem	61
1.11.2. Evsel Katı Atıklarla (MSW) Birlikte Yakma	62
1.11.3. Diğer Proseslerde Yakma	65
1.11.3.1. Çimento Fabrikalarında	65
1.11.3.2. Tuğla Üretiminde	67
1.12. Kurutma ve Yakma Tesisinin Temel Bileşenleri	67
1.13. Isı Dengesi	68
1.14. Çamurun Kendine Özgü Özellikleri	71
1.15. Kirlenici Emisyonlar, Kontrolü ve Arıtımı	72
1.15.1. Kül ve Ağır Metaller	73
1.15.2. Diğer (NO _x , N ₂ O, SO ₂ , HCl ve HF) Emisyonlar	75
1.15.2.1. AYW'da Tek Başına Yakmada	75
1) Ön-Kurutma Çamurunda	75
2) Yaş Çamurda	76
1.15.2.2. Kömürle Birlikte Yakmada	77
1) Pulverize Sistemde	77
2) AY'lı Sistemde	78
1.15.3. Civa	79
1.15.4. Dioksin ve Furanlar	79
1.16. Kirlenici Emisyonlar İçin Yasal Düzenlemeler	81
1.17. Büyük Ölçekli AYW Çamur Yakma Uygulamaları	82
1.18. Dünyadaki Arıtma Tesisleri ve Çamur Uygulamaları	88
1.18.1. Bazı Atıksu Arıtma Tesisleri	88
1.18.2. Arıtma Çamuru Uygulamaları	89
1.19. Ülkemizdeki Arıtma Tesisleri ve Çamur Uygulamaları	92
1.19.1. Bazı Evsel Atıksu Arıtma Tesisleri	92
1.19.2. Bazı Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisleri	96
1.19.3. Arıtma Çamuru Uygulamaları	99
1.19.4. Organize Sanayi Bölgelerinde Durum	101
1.20. Çamurla İlgili Ülkemizdeki Yasal Mevzuat	103

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	107
3. MATERYAL VE METOD	113
3.1. Materyal	113
3.2. Metod	114
3.2.1. Deneysel Çalışmalar	115
3.2.1.1. Yakma Deney Düzenegi	116
3.2.1.2. Ölçme ve Veri Değerlendirme Sistemleri	120
3.2.1.3. Deney Şartları	122
3.2.2. Numune Analiz Metodları	123
3.2.2.1. Atık Kabul Analizi	123
3.2.2.2. Kaba ve Elementer Analiz	123
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	125
4.1. Analiz Sonuçları	125
4.1.1. Depolama Atık Kabul Analizi	125
4.1.2. Kaba (Proksimat) Analiz	126
4.1.3. Elementer Analiz	126
4.1.4. Boyut Dağılım Analizi	127
4.1.5. Yatak Malzemesinin Özellikleri	128
4.1.6. Çamurun Ağır Metal Analizi	129
4.2. Dolaşım Akışkan Yatak Deneyleri	130
4.2.1. Yatak Boyunca Sıcaklık Dağılımları	130
4.2.2. Kül Miktarları	132
4.2.3. Yataktaki Boşluk Dağılımları	134
4.3. Arıtma Çamuru ve Kömürün Birlikte Yakılması	132
4.3.1. Yakma Şartları ve Yanma Verimleri	134
4.3.2. Baca Gazı Emisyonları (CO , C_mH_n , NO_x , SO_2)	138
4.4. Arıtma Çamuru ve Biomas (Pirina) Atığın Birlikte Yakılması	140
4.4.1. Yakma Şartları ve Yanma Verimleri	140
4.4.2. Baca Gazı Emisyonları (CO , C_mH_n , NO_x , SO_2)	144
4.5. Arıtma Çamuru/Kömür ve Biomasın Birlikte Yakılması	146
4.5.1. Baca Gazı Emisyonları (CO , C_mH_n , NO_x , SO_2)	146

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	148
KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŞ	164
EKLER	165
EK-1 : Mobil Emisyon Test Laboratuvarı (METL)	165
EK-2 : HESAPLAMALAR	171



ÖZ

DOKTORA TEZİ

ATIKSU ARITMA ÇAMURUNU DEĞERLENDİRME İMKANLARININ ARAŞTIRILMASI

Öner Yusuf TORAMAN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Doç. Dr. Oktay BAYAT
Yıl : 2002, Sayfa : 172
Jüri : Doç. Dr. Oktay BAYAT
Prof. Dr. Mesut ANIL
Prof. Dr. Aysel ATIMTAY
Prof. Dr. Beşir ŞAHİN
Yrd. Doç. Dr. Belgin BAYAT

Bu çalışmada, atıksu arıtma çamurunun karakteristik özellikleri belirlenerek 125 mm iç çap ve 1.8 m yüksekliğe sahip laboratuvar ölçekli Dolaşım Akışkan Yatak (DAY) bir fırında; arıtma çamuru+kömür, arıtma çamuru+biomas ve arıtma çamuru+kömür+biomas karışımları şeklinde ayrı ayrı yakılmıştır. Deneysel çalışmalarda değişik arıtma çamuru/kömür/biomas oranları (% 0-20 çamur, %80-100 kömür ve %80-100 biomas) denenmiştir. Akışkan yatak malzemesi olarak silis kumu ve kül karışımı kullanılmıştır. Yatak boyunca oluşan basınç dağılımları (mbar), yatak sıcaklıkları (°C) ve baca gazındaki O₂, SO₂, CO₂, CO, NO_x ve C_mH_n konsantrasyonları on-line olarak ölçülmüştür. Ayrıca yanma verimi (%) ve termik kapasite (kW) değerleri belirlenerek; yatak sıcaklığı (°C), yakıt besleme oranı (kg/s), terminal hız (m/sn) gibi işletme parametreleri için optimal çalışma koşulları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arıtma Çamuru, Biomas, Kömür, Yakma, Dolaşım Akışkan Yatak

ABSTRACT

PhD THESIS

THE UTILISATION OF WASTE WATER TREATMENT SLUDGE

Oner Yusuf TORAMAN

CUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
MINING ENGINEERING DEPARTMENT

Supervisor : Assoc. Prof. Oktay BAYAT
Year : 2002, Pages : 172
Jury : Assoc. Prof. Oktay BAYAT
Prof. Mesut ANIL
Prof. Aysel ATIMTAY
Prof. Beşir ŞAHİN
Asst. Prof. Belgin BAYAT

In this study, a Circulating Fluidized Bed (CFB) of 125 mm in diameter and 1.8 m height was used to find out the combustion characteristics of waste water sludge. Sludge cake+lignite coal, sludge cake+biomass and sludge cake+biomass+lignite coal mixtures were burned separately. Various sludge cake/biomass/coal rations are tried. Silica sand and ash were used as bed materials. On-line concentrations of O₂, SO₂, CO₂, CO and NO_x were measured in the flue gas as well as temperature (°C) and pressure distributions (mbar) along the bed. Combustion efficiency and thermal capacity of sewage sludge/coal/biomass mixtures were calculated and the optimum conditions for operating parameters (bed temperature (°C), fuel feed rate (kg/h), terminal velocity (m/s)) were determined.

Key Words: Sewage Sludge, Biomass, Coal, Combustion, Circulating Fluidized Bed

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma 1996-2002 yılları arasında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doç. Dr. Oktay BAYAT yönetiminde DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Önemli ve güncel bir konuda çalışmaya yönlendiren, çalışmaların her aşamasında yapıcı eleştirileri ve önerileri ile büyük katkıları gördüğüm Sayın Hocam Doç. Dr. Oktay BAYAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca;

Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Hocam Prof. Dr. Mesut ANIL'a, deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen ve bu konudaki deneyimlerinden yararlandığım Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Dr. Hüseyin TOPAL'a teşekkür ederim.

Özellikle çalışmalarımın yoğunlaştığı dönemlerde her türlü sabır ve desteğini gördüğüm tüm Aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

SİMGELER VE KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
AÇ	Arıtma Çamuru
AKM	Askıda Katı Madde
AY, AYF	Akışkan Yatak (Fırın)
BÇM	Bursa Çevre Merkezi
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
C_mH_n	Hidrokarbonlar
CO, CO ₂	Karbon Monoksit, Karbon Dioksit
ÇGF	Çok Gözlü Yakma Fırını
DAY, DAYF	Dolaşımli Akışkan Yatak (Fırın)
DİE	Devlet İstatistik Enstitüsü
d_p	Ortalama Tane İriliği, (mm)
ΔP	Basınç Farkı (mbar)
EEC	Avrupa Konseyi
EPA	Amerikan Çevre Ajansı
ESP	Elektrostatik Toz tutucu
FGD	Baca Gazı Kükürt Arıtma (Desülfürizasyon)
GEÇER	Gazi Üniversitesi Enerji ve Çevre Araştırma Merkezi
G_s	Katı Kütle Akısı
HCl, HF	Hidroklorik Asit, Hidroflorik Asit
HHV	Üst Isıl Değer (kcal/kg)
IHO	Islak Hava Oksidasyonu
KAKY	Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
KAY	Kabarcıklı Akışkan Yatak
K_{co}	Baca Gazında Toplam Karbon Monoksit Eksik Yanma Kaybı (%)
K_{CmHn}	Baca Gazında Toplam Hidrokarbon Eksik Yanma Kaybı (%)
K_c	Külde Karbon Eksik Yanma Kaybı (%)
KK, KM, k.m.	Kuru (Katı) Madde İçeriği (%)
KOI	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
λ	Fazla Hava Oranı (%)

LHV	Alt Isıl Değer (kcal/kg)
METL	Mobil Emisyon Test Laboratuvarı
MSW	Evsel Katı Atık
M_y	Yakıt Besleme Oranı (kg/s)
η_{CE}	Yanma (Isıl) Verimi (%)
NKD, NID	Net Kalorifik (Isıl) Değer
NO_x	Azot Oksitler
OFS	Çamurdan Yağ/Yakıt Üretimi
OM	Organik Madde İçeriği (%)
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
PCDD/PCDF	Dioksin-Furan
PTE	Potansiyel Toksik Element
Q_k	Isıl Kapasite (kW)
SK	Sabit Karbon (%)
SKKY	Su Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
SO_2	Kükürt Dioksit
TAKY	Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
TKKY	Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
T_{ort}	Ortalama Yatak Sıcaklığı (°C)
THC	Toplam Hidrokarbon
TOC	Toplam Organik Karbon
TK	Tunçbilek Kömürü
TS	Türk Standardı
U_f	Akışkan(laşma) Hızı, (m/sn)
UM, UK	Uçucu Katı Madde İçeriği (%)
UNIDO	Birleşmiş Milletler Sanayi Kalkınma Örgütü
V_g	Yanma Sonucu Oluşan Baca Gazı Miktarı , (Nm ³ /kg)
V_o	Akışkan Hızı (m/sn)
VOC	Uçucu Organik Karbon
wf	Susuz
waf	Susuz ve Külsüz

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Atıksu Arıtma Çamurlarının Sınıflandırılması	4
Çizelge 1.2: Çeşitli Arıtma İşlemlerindeki Çamur Katı Madde Konsantrasyonları	7
Çizelge 1.3: Değişik Arıtma Çamurlarının Kimyasal Bileşimleri	8
Çizelge 1.4: Arıtma Çamurunun Tipik Isıl Değerleri	10
Çizelge 1.5: Gübre ve Arıtma Çamurunun Başlıca Nutrient İçeriği	11
Çizelge 1.6: Başlıca Çamur Arıtma Prosesleri	13
Çizelge 1.7: Susuzlaştırma İşlemi Sonucu Çamur Katı Konsantrasyon Değerleri	23
Çizelge 1.8: Arıtma Çamurun Agronomik Özellikleri (%k.m.)	26
Çizelge 1.9: Arıtma Çamuru ve Topraktaki Ağır Metal İçerikleri	26
Çizelge 1.10: Avrupa Birliği Tarım Direktifinde (86/278/EEC) Arıtma Çamuruna İzin Verilen Ağır Metal Sınır Değerleri	27
Çizelge 1.11: Çeşitli Ülkelere Ait Arıtma Çamuru Ağır Metal İçerikleri	28
Çizelge 1.12: 4500 t/yıl (k.m.) Kapasiteli Bir Çamur Yakma Tesisinin İçin Toplam Bertaraf Maliyetleri	33
Çizelge 1.13: Dolaşım Akışkan Yatağın (DAY), KAY ve Döner Fırınla Mukayesesi	48
Çizelge 1.14: Çamur Yakma Tesisinin Yatırım Maliyetinin Kısımları	54
Çizelge 1.15: Çeşitli Ülkelerdeki Yakılan Katı Atık Miktarları	63
Çizelge 1.16: Çimento ve Arıtma Çamuru Külünün Bileşimleri	66
Çizelge 1.17: Bazı Arıtma Çamurlarının Kömürle Kıyaslandığında Elementer Analizleri	71
Çizelge 1.18: Bazı Ülkelerdeki Atık Yakma İçin İzin Verilen Emisyon Limitleri	82
Çizelge 1.19: Japonya'daki Isı Kazanımlı ve Isı Kazanımsız bir AY Çamur Yakma Tesisinin İşletme Maliyetleri	83
Çizelge 1.20: Çeşitli Yakma Tesislerinde Elde Edilen CO, NO _x ve NO ₂ Emisyonları	87

Çizelge 1.21: Avrupa Birliğindeki Evsel Atıksu Arıtma Çamurunun Miktarı ve Bertaraf Oranları	90
Çizelge 1.22: OSB'lerdeki Arıtma Tesisleri ve Açığa Çıkan/Çıkacak Çamur Miktarları	102
Çizelge 1.23: Tarımda Kullanılacak Arıtma Çamuruna ait Ağır Metal Sınır Değerleri	104
Çizelge 1.24: Atıkların Düzenli Depolama Tesislerine Depolanabilme Kriterleri	106
Çizelge 3.1: DAYF Deneysel Çalışma Şartları	122
Çizelge 3.2: Arıtma Çamuru Atık Kabul Analizinde Kullanılan Cihaz ve Analiz Metodları	123
Çizelge 3.3: Arıtma Çamuru, Kömür ve Biomas Atığının Kaba ve Elementer Analizlerinde Kullanılan Cihaz ve Analiz Metodları	124
Çizelge 4.1: Atık Kabul Analiz Sonuçları ve TAKY Sınır Konsantrasyon Değerleri ile Mukayesesi	125
Çizelge 4.2: Arıtma Çamuru, Kömür ve Biomasın Kaba Analiz Sonuçları	126
Çizelge 4.3: Kullanılan Arıtma Çamuru, Kömür ve Biomasın Elementer Analizi ve Isıl Değerleri	127
Çizelge 4.4: Yatak Malzemesinin (Silis Kumu) Fizikokimyasal Özellikleri	129
Çizelge 4.5: Arıtma Çamurunun Ağır Metal Analizi	129
Çizelge 4.6: (Arıtma Çamuru+Kömür) Besleme Oranları, Kapasite ve Yanma Verimlerinin Karşılaştırılması	135
Çizelge 4.7: (Arıtma Çamuru+Kömür) Birlikte Yakma Deneylerindeki Akışkan Hızı ve Katı Kütle Akısı	135
Çizelge 4.8: (Arıtma Çamuru+Kömür) Besleme Durumundaki Yanma Kayıpları ve Yanma Verimleri	136
Çizelge 4.9: (Arıtma Çamuru+Kömür) Besleme Durumunda Baca Gazında Ölçülen Emisyon Değerleri	138
Çizelge 4.10: Baca Gazında %7 O ₂ ve %11 O ₂ 'ye Göre Gaz Emisyon Değerleri	138

Çizelge 4.11: (Aritma Çamuru+Biomas) Besleme Oranları, Kapasite ve Yanma Verimlerinin Karşılaştırılması	138
Çizelge 4.12: (Aritma Çamuru+Biomas) Birlikte Yakma Deneylerindeki Akışkan Hızı ve Katı Kütle Akısı	141
Çizelge 4.13: (Aritma Çamuru+Biomas) Besleme Durumundaki Yanma Kayıpları ve Yanma Verimleri	139
Çizelge 4.14: (Aritma Çamuru+Biomas) Besleme Durumunda Baca Gazında Ölçülen Emisyon Değerleri	138
Çizelge 4.15: Baca Gazında %7 O ₂ ve %11 O ₂ 'ye Göre Gaz Emisyon Değerleri	145
Çizelge 4.16: (Aritma Çamuru+Kömür/Biomas) Besleme Durumunda Baca Gazında Ölçülen Emisyon Değerleri	146
Çizelge 4.17: Baca Gazında %7 O ₂ ve %11 O ₂ 'ye Göre Gaz Emisyon Değerleri	147
Çizelge EK-1.1: METL'de Bulunan Bazı Ölçme Sistemleri ve Yardımcı Cihazlar	167
Çizelge EK-1.2: Baca Gazında Analizi Yapılan Gazlar ve Uygulama Analiz Yöntemleri	168
Çizelge EK-1.3: Gaz Ölçüm Analizörü, Kalibrasyon Gazı ve Konsantrasyonları	169

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1: Arıtma Sisteminde Çamur Çıkış Noktaları	3
Şekil 1.2: Arıtma Çamurundaki Suyun Dağılımı	6
Şekil 1.3: Arıtma Çamurunun Hacim ve Nem İçeriği Arasındaki İlişkisi	15
Şekil 1.4: Çamur Arıtımı İşlem ve Prosesleri	17
Şekil 1.5: Arıtma Çamurundaki Su-Katı Madde Dengesi	18
Şekil 1.6: Bir Kum Yatağının Genel Görünüşü ve Tipik Kesiti	20
Şekil 1.7: Kurutma ve Peletleme Prosesi Akım Şeması	29
Şekil 1.8: Termik Çamur İşleme Yöntemleri	33
Şekil 1.9: Arıtma Çamurunun Kuruma Eğrileri	34
Şekil 1.10: Kurutma Boyunca Çamurdaki Fiziksel Değişimler	35
Şekil 1.11: Arıtma Çamuru Kurutma Teknikleri	36
Şekil 1.12: Arıtma Çamuru Yakmada İlave Yakıt İhtiyacı	36
Şekil 1.13: Çok Gözlü Fırında Sıcaklık Profili	38
Şekil 1.14: Çamur Yakma İşleminin Genel Akım Şeması	39
Şekil 1.15: Akışkan Yataklı Fırında Arıtma Çamuru Yakma İçin Materyal Dengesi	41
Şekil 1.16: Döner Fırın	42
Şekil 1.17: Akışkan Yataklı Yakma Fırınına Ait Boyuna Kesit	43
Şekil 1.18: Akışkan Yataklı Fırına Yakıt İlavesi	46
Şekil 1.19: Akışkan Yataklı Yakma Fırını Proses Akım Şeması	47
Şekil 1.20: Kabarcıklı ve Dolaşımli Akışkan Yatağın Şematik Diyagramı	48
Şekil 1.21: Dolaşımli Akışkan Yatağın Şematik Gösterimi	51
Şekil 1.22: DAY'ta Gaz Temizleme Sistemi	52
Şekil 1.23: Çamurdaki Yakma Boyunca Oluşan Kül Yapısı	53
Şekil 1.24: Çok Gözlü Yakma Fırını	56
Şekil 1.25: Çok Gözlü Yakma Fırını Proses Akım Şeması	56
Şekil 1.26: Pulverize Kömürle Çalışan Termik Santralde Çamur Kurutma ve Birlikte Yakma Prosesi	60

Şekil 1.27: DAY'lı Termik Santralde Kömür ve Arıtma Çamurunun Birlikte Yakılması	62
Şekil 1.28: Arıtma Çamurunun Katı Atıklarla Birlikte Yakılması İçin Başlıca Alternatif Prosesler	64
Şekil 1.29: Almanya'da Akışkan Yataklı Bir Fırının Şematik Gösterimi	83
Şekil 1.30: Ön Kurutma Çamuru Yakma Tesisi Akış Diyagramı	85
Şekil 1.31: Avrupa Birliğinde 2005 Yılına Kadar Çamur Değerlendirmedeki Eğilim	91
Şekil 1.32: İzmit Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Akış Diyagramı	95
Şekil 1.33: Tuzla Çamur Yakma Tesisi Akış Diyagramı	97
Şekil 1.34: Kullanım/Bertaraf Yöntemlerine Göre Endüstriyel Atıksu Arıtma Çamuru Miktarı	100
Şekil 1.35: Sanayi Gruplarına Göre Endüstriyel Arıtma Çamuru Miktarı.....	101
Şekil 3.1: Arıtma Çamuru Temsili Örnek Hazırlama Akım Şeması	113
Şekil 3.2: DAY Yakma Sisteminin Boyutlandırılması	117
Şekil 4.1: Arıtma Çamuru/Kömür/Biomas ve Yatak Malzemesine Ait Tane Boyut Dağılımları	128
Şekil 4.2: Arıtma Çamuru+Kömür Yakma İşlemi Boyunca Ana Kolondaki Sıcaklık Değişimi	131
Şekil 4.3: Arıtma Çamuru+Biomas Yakma İşlemi Boyunca Ana Kolondaki Sıcaklık Değişimi	131
Şekil 4.4: Küldeki ve Yatak Malzemesindeki Yanabilir Kısımın Dağılımı: Kömürle Yakmada (a), Biomasla Yakmada (b)	133
Şekil 4.5: Akışkan Yatak İçerisindeki Boşluk (Bed Voidage) Dağılımı	134
Şekil 4.6: I. Seri Deneylere ait Yanma Kayıpları	137
Şekil 4.7: I. Seri Deneylere ait Yanma Verimlerinin Değişimi	137
Şekil 4.8: I. Seri Deneylerdeki Baca Gazı Emisyonlarının Değişimi	139
Şekil 4.9: II. Seri Deneylere ait Yanma Kayıpları	143
Şekil 4.10: II. Seri Deneylere ait Yanma Verimlerinin Değişimi	143
Şekil 4.11: II. Seri Deneylerdeki Baca Gazı Emisyonlarının Değişimi	145
Şekil 4.12: III. Seri Deneylere ait Yanma Kayıpları	147

Şekil EK-1.1: Baca Gazı Ölçme ve Veri Değerlendirme Sistemi	165
Şekil EK-1.2: Baca Gazı Ölçme ve Değerlendirme Sistemi Elemanları	
Akış Şeması	166



RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 1.1: Arıtma Çamurunun Susuzlaştırılmasında Kullanılan Bant (Belt) Pres	22
Resim 1.2: İzmit Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinden Genel Görünüm	94
Resim 3.1: Deneylerde Kullanılan Arıtma Çamuru Örneğinin Laboratuvara Getirilişi	114
Resim 3.2: DAY Yakma Deney Düzeneklerinin Genel Görünüşü	116
Resim 3.3: Kül Alma Mekanizması	118
Resim 3.4: Arıtma Çamuru (+Kömür/Biomas) Besleme Sistemi	119
Resim EK-1.1: Mobil Emisyon Test Laboratuvarı (METL)	166

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun çeşitli faaliyetleri sonucu oluşan evsel ve endüstriyel atık suyun fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemlerle arıtılması sonucu kullanılan prosese ve işletme şartlarına bağlı olarak ağırlıkça yaklaşık %0.25-12 katı madde (k.m.) içeren katı atık açığa çıkmakta ve arıtma çamuru olarak ifade edilmektedir (Orhon, 1997). Bu çamur içerdiği patojen ve toksik bileşenler yüzünden ciddi çevre problemlerine yol açmakta ayrıca önemli depolama ve uzaklaştırma problemleri oluşturmaktadır.

Arıtma tesislerinde toplam yatırım maliyetinin yaklaşık %50'sini açığa çıkan çamurun bertaraf edilmesi/uzaklaştırılması ile ilgili birimler oluşturmaktadır (Winkler, 1993). Günümüzde arıtma çamurunun çevreye zarar vermeden nihai bertarafı ve değerlendirilmesi konusunda özellikle A.B.D., İngiltere, Fransa, Almanya, Hollanda, Danimarka ve Japonya gibi ülkelerde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de gelişen sanayi ve artan nüfus yoğunluğundan dolayı konuyla ilgili çeşitli çalışmalar/araştırmalar özellikle son yıllarda büyük önem kazanmaya başlamıştır.

Atıksu arıtma tesislerinin ürettikleri çamurun kurulacak yeni arıtma tesislerinin de devreye girmesi ve hızla artan nüfus nedeniyle büyük miktarlara ulaşacağı, dolayısıyla arıtma çamuru sorununun önümüzdeki yıllarda daha da önemli boyutlara ulaşacağı açıktır. Örneğin; ülkemizde sadece endüstriyel atıksu arıtma tesislerinden yılda yaklaşık 3 milyon ton çamur açığa çıkmaktadır (DİE, 1994). Oysa bu atıkların uygun bir proses ile değerlendirilmesi ile mevcut problemler önemli bir oranda azalacak ve özellikle enerji üretiminde hammadde/yakıt olarak kullanılması ile hem çevre yönünden hemde ekonomik yönden faydalar sağlanacaktır.

1.1. Amaç

Endüstriyel prosesler ve belediyeye ait evsel atıksu arıtma tesislerinde her yıl çok büyük miktarlarda arıtma çamuru açığa çıkmaktadır. Bu çamurların çevreye zarar vermeden düzenli olarak uzaklaştırılması ve mümkün olduğu kadar da ekonomik yönden değerlendirilmesi gerekmektedir.

Atıksu arıtma çamurunun kompost yapımı, yapı malzemesi olarak çimento ve beton içinde katkı maddesi olarak kullanımı, tuğla üretimi, agrega üretimi gibi değişik uygulamalarda kullanılmasının yanısıra; özellikle içerdiği organik maddelerin tek başına veya diğer yakıtlarla birlikte yakılması (co-combustion/firing) suretiyle elde edilecek enerji üretimi de büyük önem kazanmaktadır.

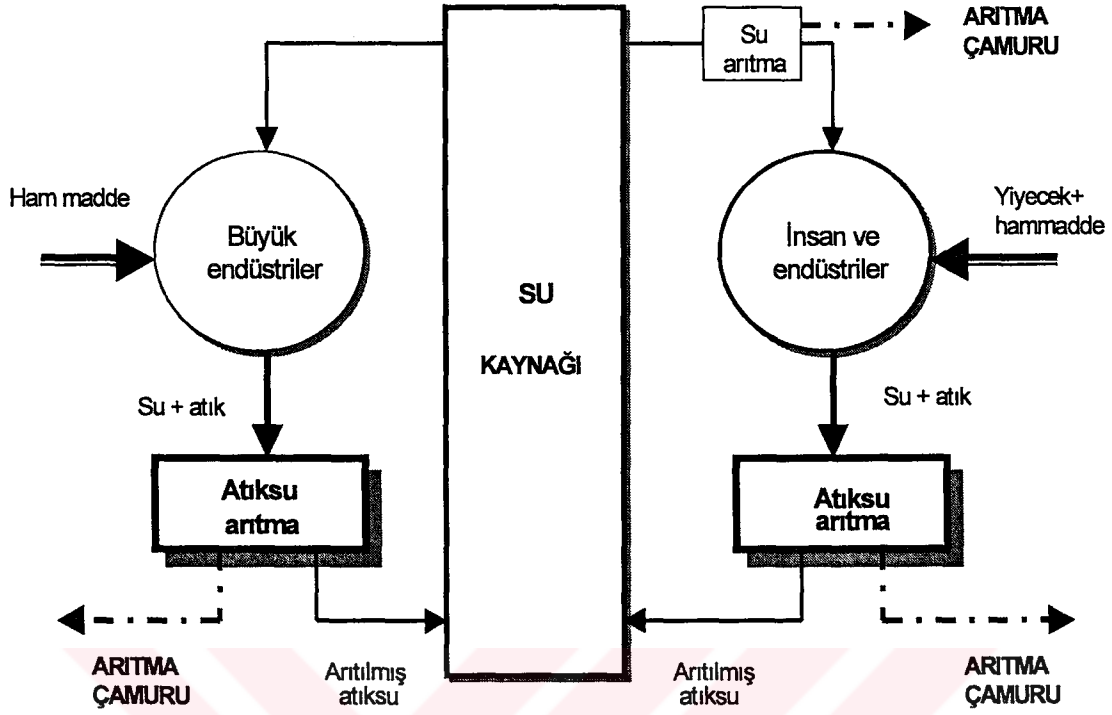
Doktora tezi olarak yapılan bu çalışmanın amacı; evsel-belediyeye ait-ve/veya endüstriyel atıksu arıtma tesislerinden açığa çıkan çamurun karakteristik özelliklerinin belirlenmesi, ikincil bir hammadde ve enerji kaynağı (yakıt) olarak kullanımının araştırılmasıdır.

1.2. Tanım

Atıksuların fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemlerle arıtılması sonucu sıvı veya yarı katı, kokulu ve uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak ağırlıkça %0.25-12 oranlarında katı madde içeren atık açığa çıkar ve bunlar atıksu arıtma çamuru olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle atıksuyun su akımı arıtmaya tabi tutulup sınır değerlerin altında kalacak şekilde temizlenirken başka bir kirletici akımın doğmasına yani atıksu çamuru probleminin oluşmasına neden olur. Ön arıtmada kullanılan basit çöktürme, kimyasal çöktürme ve biyolojik çöktürme birimleri ayrı ayrı özelliklerde ve kalitede çamur birikmektedir (Orhon, 1991). Bu çamurların katı madde (k.m.) içerikleri şu şekildedir:

Ön çöktürme çamuru	:	%3-5 k.m.
Kimyasal çamur	:	%2-4 k.m.
Biyolojik çamur	:	%1 k.m.

Biriken bu çamurun su arıtma akımından alınması ve genellikle teknik yöntemlerle zararsız hale getirilerek uzaklaştırılması zorunludur. Arıtma çamurunun insanoğlunun gerek evsel gerekse endüstriyel olmak üzere gerçekleştirdiği çeşitli faaliyetler sonucu ortaya çıkış noktaları Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Arıtma sisteminde çamur çıkış noktaları (Alfa Laval, 1997)

1.3. Arıtma Çamurunun Sınıflandırılması

Uygulanabilir arıtma yöntemini seçmek ve kullanılacak ekipmanın performansını tahmin etmek için çamuru sınıflandırmak büyük önem kazanmaktadır. Çizelge 1.1’de kaynağına ve özelliklerine göre çeşitli çamur türleri sınıflandırılmaktadır. Buna göre atıksu arıtma çamurlarını 6 ana grupta toplamak mümkündür (Degremont, 1991). Bunlar;

i-Hidrofilik organik çamur: En önemli sınıflardan birisini oluşturmaktadır. Bu çamurun susuzlandırılmasında karşılaşılan zorluklar büyük miktardaki hidrofilik kolloidlerin varlığından kaynaklanmaktadır. Atıksuyun biyolojik arıtılmasından açığa çıkan ve uçucu katı içeriği toplam kuru katı içeriğinin %90’ı kadar olabilen (örneğin gıda sanayi, organik kimya sanayi gibi) tüm arıtma çamuru türleri bu gruba girer.

Çizelge 1.1: Atıksu arıtma çamurlarının sınıflandırılması (Degremont, 1991)

ARITMA ÇAMURU TÜRÜ	ATIKSU KAYNAĞI	ARITMA YÖNTEMİ	BİLEŞENLER
Hidrofilik organik	1. Evsel	1. Tüm biyolojik veya fiziksel-kimyasal arıtmalar	OM/k.m.=%40-90 -protein maddeleri -sebze ve hayvan atıkları
	2. Gıda sanayi	2. Çökeltme ve/veya biyolojik safsızlaştırma	-hayvansal ve bazen mineral yağlar ve gres -fiziksel-kimyasal arıtmadaki hidrofilik hidroksitler (Al,Fe) -hidrokarbonlar (petrokimya sanayi)
	3. Tekstil sanayi, organik kimya sanayi	3. Fiziksel-kimyasal (flokülasyon-çöktürme) ve biyolojik	
	4. Biyolojik arıtma	4. Biyolojik	
Hidrofilik yağlı	1.Rafineri 2. Mühendislik faaliyeti (çözünür yağlar) 3.Soğuk haddehane	-Yağ ayırma -Flokülasyon-çökeltme-flotasyon -Biyolojik arıtma	-mineral yağlar ve gres -hidrokarbonlar -hidroksitler (Al,Fe) -biyolojik OM (muhtemel)
Hidrofobik yağlı	1.Çelik haddehane	-Çökeltme	-yoğun ve kolayca çökebilir k.m. -önemli miktarda mineral yağ ve gres
Hidrofilik inorganik	1.Nehirler ve kuyu suyu	1.Kısmen karbonat giderimi	1.CaCO ₃ (%50-55), Fe ve Al hidroksitler (%20-30), OM (%10-20)
	2.Yüzey işleme	2.Nötralizasyon+flokülasyon-çökeltme	
	3.Inorganik kimya sanayi	3.Klarifikasyon-nötralizasyon+biyolojik arıtma (muhtemel)	
	4.Boyahane 5.Tabakhane	"	4.Mineral+organik 5.Mineral+organik+hayvansal yağlar ve OM
Hidrofobik inorganik	1.Demir-çelik sanayi 2.Kömür yıkama	1.Çökeltme 2. "	2.düşük metal hidroksit içeriği
	3.Baca gazı arıtma	3.Nötralizasyon (kireç)	3.düşük OM içeriği
Fibroz	1.Kağıt fabrika	1.Flokülasyon a)Çökeltme (veya flotasyon) b)Biyolojik arıtma	1. a) %20-80 k.m.'li fiber+Al hidroksitler b)Fiziksel-kimyasal çamur/biyolojik çamur=%75-85/%25-15
	2. Kağıt hamur fabrika	2.a)Flokülasyon b)Biyolojik arıtma	2.a)Yüksek fiber içeriği (bazen kireç veya CaCO ₃), %4-6 k.m. b)Çamur konsantrasyonu %3-5, fiziksel-kimyasal/biyolojik =%50/%50

ii. Hidrofilik inorganik çamur: Bu çamur ham sudaki metal iyonların (Al, Fe, Zn, Cr) veya organik flokülanların (demir ve alüminyum tuzları) kullanımı sonucu fiziksel-kimyasal arıtma prosesleri sürecinde oluşan metal hidroksitler içerir.

iii. Yağlı çamur: Mineral veya hayvansal yağlardan oluşur. Bu yağlar ya emülsiyon halindedir yada hidrofilik veya hidrofobik çamur partiküllerinde adsorbe edilirler. Biyolojik çamurun bir kısmı nihai aktif çamur arıtımında (rafineri atıksularının arıtımında) da mevcut olabilir.

iv. Hidrofobik inorganik çamur: Bu çamur düşük miktarda bünye suyu içeren önemli miktarlarda partikül maddelerle (kum, silt, curuf, kristalize tuzlar, v.s.) karakterize edilir.

v. Hidrofilik-hidrofobik inorganik çamur: Bu çamur genelde hidrofobik maddelerden oluşur ancak çamur susuzlandırıldığında baskın bir şekilde negatif etki yaptığından önemli miktarlarda hidrofilik maddeler içerir. Bu hidrofilik maddeler çoğunlukla metalik hidroksitler (koagülanlar)'dır.

vi. Fibroz çamur: Bu çamurun susuzlandırılması; fiberleri yoğun olarak kazanırken, hidroksitler veya biyolojik çamurdan dolayı hidrofilik olması dışında susuzlandırılması genellikle kolaydır.

Bir arıtma çamurunun özelliği hem suyun kirliliğinin yapısına hemde suya uygulanan fiziksel-kimyasal veya biyolojik arıtma proseslerine bağlı olmaktadır.

1.4. Arıtma Çamurunun Yapısı

Arıtma çamurunun yapısını belirleyen faktörler şunlardır (Degremont, 1991):

(A) *Kuru Katı İçeriği (k.m.):* Litre başına gram veya ağırlıkça (%) miktarı olarak açıklanır ve 105 °C'de sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutularak tespit edilir.

(B) *Uçucu Katı İçeriği (UK):* Kuru katı içeriğinin ağırlıkça yüzdesi olarak açıklanır ve 550-600 °C'deki bir fırında gazlaştırma ile tespit edilir.

(C) *Element İçeriklerinin Ağırlığı (Özellikle organik çamur durumunda):*

- C ve H (çamurun net kalorifik değerini belirlemek için)
- N ve P (çamurun tarımsal değerini belirlemek için)

- Diğer bileşenler (ağır metaller). İnorganik çamur durumunda Fe, Mg, Al, Cr, kalsiyum tuzları (karbonatlar ve sülfatlar) ve silis içeriği çoğu kez faydalıdır.

(D) *Suyun Kompozisyonu:*

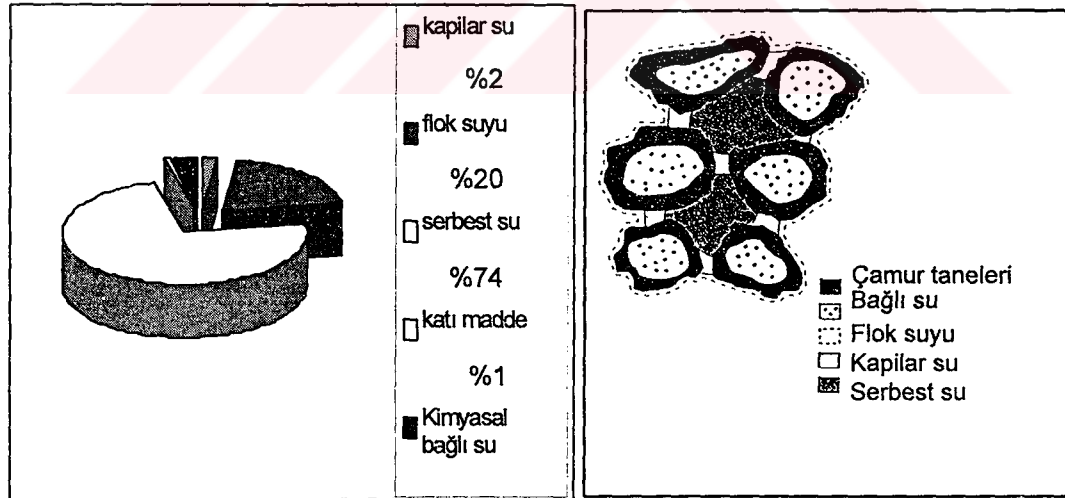
- çözülmüş maddeler; KOI, BOI₅, pH, v.s.

(E) *Suyun Yapısı:*

Aritma çamurundaki suyu dört grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

- *Serbest su:* Çamur partiküllerine bağlı olmayıp, graviteli çökelme ile kolayca ayrılır.
- *Flok (yumak) suyu:* Floklar içindeki hapsedilmiş su olup, yumakla birlikte hareket ederler. Mekanik su alma işlemleri ile giderilebilirler.
- *Kapilar su:* Partiküller üzerinde, bağlı (yapışık) halde bulunur ve bu partiküllerin sıkıştırılarak deformasyonları sonucu uzaklaştırılabilir.
- *Kimyasal bağlı su:* Partiküller içinde kimyasal olarak bağlanmış sudur.

Tipik bir arıtma çamurundaki suyun dağılımı Şekil 1.2'de verilmektedir.



Şekil 1.2: Arıtma çamurundaki suyun dağılımı (Filibeli, 1996; Gray, 1998)

1.5. Arıtma Çamurunun Genel Özellikleri

1.5.1. Fiziksel Özellikler

1.5.1.1. Özgül Ağırlığı

Birim hacimdeki çamur ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı şeklinde tanımlanan özgül ağırlık birçok çamur örneği için yaklaşık 1.0 g/cm^3 'tür. Bir başka ifadeyle çamurun özgül ağırlığı hemen hemen suyununkiye yakındır.

1.5.1.2. Katı Madde İçeriği

Çamurun katı ve sulu kısımları arasındaki ilişki katı madde konsantrasyonu olarak birim hacme düşen ağırlık olarak tanımlanır ve mg/L veya %k.m. (katı-kuru-madde) olarak belirtilir. Çamurdaki toplam katı maddeler, askıda ve çözünmüş katı maddelerin toplamına eşittir. Bu üç tür katı maddenin (toplam, askıda ve çözünmüş) her biri uçucu ve sabit kısımlara sahiptir. Çeşitli arıtma işlemlerindeki çamur k.m. konsantrasyonları Çizelge 1.2'de verilmektedir.

Çizelge 1.2: Çeşitli arıtma işlemlerindeki çamur katı madde konsantrasyonları (Filibeli, 1996)

UYGULANAN ARITMA İŞLEMİ	ÇAMUR KATI MADDE KONSANTRASYONU (%)
ÖN ÇÖKELTİM TANKI	0.5-16
SON ÇÖKELTİM TANKI	0.5-4
GRAVİTE YOĞUNLAŞTIRICI	2-10
FLOTASYON YOĞUNLAŞTIRICI	3-8
SANTRİFÜJ YOĞUNLAŞTIRICI	4-8
AEROBİK ÇÜRÜTÜCÜ	2.5-10
ANAEROBİK ÇÜRÜTÜCÜ	0.8-7

Arıtma çamurunu katı madde konsantrasyonuna göre üç grupta değerlendirmek mümkündür (Sanger ve ark, 2001). Bunlar:

- i- > %80 k.m. kuru çamur
- ii- %30-55 k.m. ön-kurutma çamuru
- iii- < %20-40 k.m. mekanik susuzlaştırılmış (yaş) çamur (keki)

1.5.1.3. Tane İrilik Dağılımı

Aritma çamuru içindeki taneler sadece boyut olarak değil aynı zamanda şekil ve yoğunluk olarak da değişkendir. Bu nedenle tane iriliği ile çamuru karakterize etmek zordur. Ancak özellikle susuzlandırma işlemlerinde tane boyut analizi yapılmalıdır.

1.5.2. Kimyasal Özellikler

Evsel ve endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının özellikleri çıkış kaynaklarına bağlı bulunduğundan kimyasal bileşimleri konusunda bir genelleme yapmak zordur. Ancak, evsel arıtma çamurlarının özellikleri için temsili değerler Çizelge 1.3’de verilmektedir.

Çizelge 1.3: Değişik arıtma çamurlarının kimyasal bileşimleri (EPA, 1990))

* k.m.’nin %’si olarak

** Genellikle sanayiden gelen tehlikeli katyonlar

PARAMETRE	ARITMA ÇAMURU TÜRÜ		
	HAM ÖN ÇÖKELTİM ÇAMURU	ÇÜRÜTÜLMÜŞ ÖN ÇÖKELTİM ÇAMURU	AKTİF ÇAMUR
pH	5-6.5	6.5-7.5	6.5-7.5
Toplam kuru katı madde (k.m.), %	3-8	5-10	0.5-1
Toplam uçucu katı madde*	60-90	30-60	60-80
Yağ ve gres (çözünen) *	6-35	5-20	5-12
Protein*	20-30	15-20	32-41
Azot (N)*	1.5-4	1.6-6	2.4-7
Fosfor (P)*	0.8-2.8	1.4-4	2-7
Potasyum (K)*	0-1	0-3	0.2-0.5
Selüloz*	8-15	8-15	5-10
Demir (sülfid olmayan)	2-4	3-8	-
Silisyum (Si)*	15-20	10-20	-
Ağır Metaller (mg/kg)**			
Cd	16	76	-
Cr	110	160	-
Cu	200	340	-
Pb	500	-	-
Ni	46	63	-
Zn	620	930	-

Arıtma çamurunun kimyasal bileşiminin bilinmesi nihai bertaraf yönteminin seçilmesi ve çamurdan yararlanma imkanlarının (örneğin gübre olarak) değerlendirilmesi açısından önemlidir. Ayrıca yine yakma ve arazide bertaraf yöntemleri de düşünüldüğünde ağır metaller ve hidrokarbonların miktarının belirlenmesi önem kazanmaktadır.

1.5.2.1. Isıl Değeri

Arıtma çamurunun ısı değeri, kalorimetre testleri ile tanımlanır ve çamurun türüne, toplam organik karbon ve uçucu katı madde içeriğine bağlıdır. Buna göre;

- Arıtılmış ham ön çökeltim çamurunun ısı değeri, özellikle önemli miktarda yağ ve gres içeriyorsa, oldukça yüksektir.
- Mutfak öğütücülerinin kullanıldığı yerlerde çamurun uçucu madde içeriği ve dolayısıyla ısı değeri yüksek olacaktır.
- Anaerobik çürütülmüş çamur uçucu madde içeriği azaldığı ve yanmayan inert madde içeriğini arttırdığı için ham çamurdan daha düşük ısı değere sahiptir.

Fiziksel-kimyasal arıtma çamurları inert madde içeriğinden dolayı düşük ısı değere sahiptirler. Genellikle ham çamurun ısı değeri yaklaşık 4180 kcal/kg k.m. iken çürütülmüş çamurda bu değer 2500 kcal/kg k.m. olabilmektedir (Werther ve Ogada, 1999).

Çeşitli arıtma çamurlarına ait ısı değerler Çizelge 1.4'te özetlenmektedir. Çamurun tipik ısı değeri ise 5250-6450 kcal/kg k.m. arasındadır (Hudson, 1995). Çamurun ısı değeri bazı düşük kaliteli kömürlerin ısı değerine eşdeğerdir. Arıtma çamuru belli oranlarda su içerdiğinden ve katı maddelerin sadece bir kısmı yanıcı olduğundan yakıt değeri 550 kcal/kg çamur kadardır. Çamurdaki 0.5 kg suyu buharlaştırmak için ise yaklaşık 475-600 kcal ısı gerekmektedir. Arıtma çamurunu yakabilmek için genellikle fuel-oil gibi yardımcı yakıt gereklidir.

Çizelge 1.4: Arıtma çamurunun tipik ısı değerleri (Filibeli, 1996)

ÇAMUR TÜRÜ	ORTALAMA ISIL DEĞER kcal/kg k.m.
HAM ÖN ÇÖKELTİM ÇAMURU	6080
AKTİF ÇAMUR	4970
BİYOLOJİK FİLTRE ÇAMURU	4700
ÖN ÇÖKELTİM ÇAMURU (KİMYASAL MADDE İLAVELİ)	3880
ANAEROBİK ÇÜRÜTÜLMÜŞ ÇAMUR	3040

Filtrasyon öncesi ilave edilen koagülant miktarını hesaba katan ve vakum filtreden geçirilen farklı türdeki arıtma çamurlarının ısı değerlerinin elde edildiği ampirik bağıntı şu şekildedir (Metcalf ve Eddy, 1991):

$$Q = a \left[\frac{P_v (100) - b}{100 - P_c} \right] \frac{100 - P_c}{100} \quad (1)$$

Burada;

Q : Isıl değer, Btu/lb k.m.

a : Katsayı

Ön çökeltim çamuru için : 131

Arıtılmış veya çürütülmüş çamur için : 131

Ham aktif çamur için : 107

b : Katsayı

Ön çökeltim çamuru için : 10

Ham aktif çamur için : 5

P_v : Arıtma çamurundaki uçucu madde içeriği (%)

P_c : Arıtma çamuruna ilave edilen koagülant madde içeriği (%)

Arıtma çamurunun yakıt değeri daha çok çamurun türüne ve uçucu madde içeriğine bağlı olmaktadır.

1.5.2.2. Gübre Değeri

Evsel atıksu çamurunun gübre olarak değeri içerdiği nütrient (N, P ve K) miktarlarına bağlıdır. Bu maddelerin arıtma çamurundaki miktarı genellikle iyi bir kimyasal gübrede aranan değerlerden daha düşüktür (Çizelge 1.5).

Çizelge 1.5: Gübre ve arıtma çamurunun başlıca nütrient içeriği (Filibeli, 1996)

* Nütrient konsantrasyonları toprak ve ürün ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı olabilir

	NUTRIENT *, %		
	AZOT, N	FOSFAT, P	POTAS, K
TARIMSAL AMAÇLI GÜBRELER	5	10	10
STABİLİZE ARITMA ÇAMURU	3.3	2.3	0.3

1.5.2.3. Besin Değeri

Arıtma çamuru bazen besin kaynağı olarak da kullanılabilir. Kentsel-evsel- atıksu arıtma tesislerinden gelen çamurlar oldukça yüksek oranlarda protein içerirler. Örneğin aktif çamurun, protein miktarı %35 civarında olduğundan, hayvan yemi olarak kullanılması mümkündür (Velioğlu, 1980).

	<u>Ön çökeltim çamuru</u>	<u>Aktif çamur</u>	<u>Çürütülmüş çamur</u>
Protein %'si	20-30	30-40	15-20

1.5.3. Biyolojik Özellikler

Atıksu arıtımında meydana gelen çamurlarda iki önemli husus toxonomi (organizmaların sınıflandırılması) ve patojen (hastalık yapan) organizmaların varlığıdır. Bir çamur kütlelerinin pek çok farklı kaynağı olabileceğini ve her bir kaynaktan gelen besin ile değişik organizmaların bu küttelede yer alacağı düşünülürse, bu küttelede patojen organizmaların üremesi mümkündür. Bunların türünün ve miktarının tespiti zor olduğundan kimyasal özellik gibi biyolojik ve biyokimyasal özelliklerin çamur için bir genellemesini yapmak zordur.

Ham ön çökeltim çamuru çok sayıda ve farklı türde organizma içerir. Patojen organizmaların konsantrasyonu oldukça yüksektir. Aktif çamurda çok çeşitli organizmalar vardır ve hepsinin bilinmesi mümkün değildir. Çürütme işlemi ile patolojik mikro-organizmalar büyük oranda yok edilirler.

1.6. Çamur Arıtımı

Çamur arıtımının amacı, esasen, uzaklaştırılması gereken hacmi azaltmak ve çamurdaki kirleticileri nispeten atıl ve zararsız hale getirmektir. Çamur arıtma ve uzaklaştırma işlemleri, atıksu arıtma tesislerinin toplam maliyetinin büyük bir kısmını (%25-40) oluşturduğu düşünülecek olursa, bu tesislerin projelendirilmesinde ve ekonomik analizinde önemli bir rol oynadığı açıktır.

Çamur arıtımı ve uzaklaştırılması aşağıdaki sebeplerden dolayı zorunlu olmasının yanısıra oldukça da güçtür:

- Arıtılmamış atıksuyun estetik (gerek koku ve gerekse görünüm) açıdan en az rahatsız edici kesimini çamur oluşturur,
- İhtiva ettiği organik maddelerden dolayı çamurun biyolojik çözülmesi sözkonusudur ve
- Çamurdaki mevcut katı madde yüzdesi oldukça düşük olduğundan arıtılması ve/veya uzaklaştırılması gereken çamur hacmi oldukça yüksektir.

Çamura uygulanan başlıca arıtma prosesleri ve bu proseslerin avantaj ve dezavantajları ile elde edilen çamurun muhtemel kullanım alanları Çizelge 1.6'da belirtilmektedir.

Çizelge 1.6: Başlıca çamur arıtma prosesleri (Degremont, 1991)

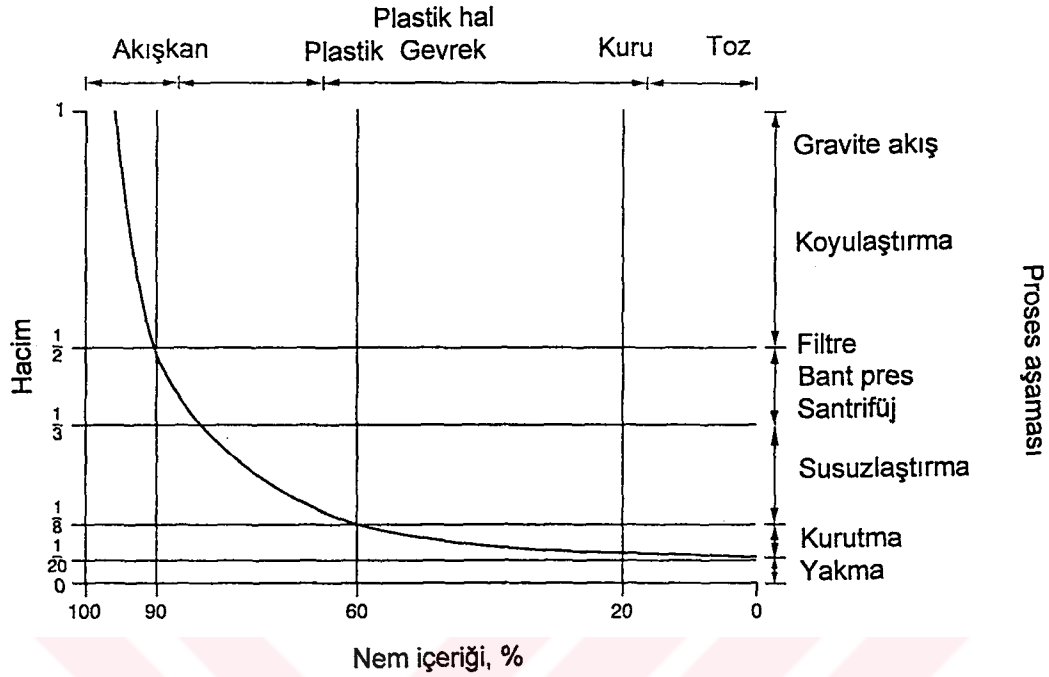
TK: Tarımda kullanım DD: Düzenli depolama Y: Yakma K: Kompost

ÇAMUR TÜRÜ, ARITMA PROSESİ ve k.m. İÇERİĞİ (%)	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI	MUHTEMEL KULLANIM
HAM ÇAMUR	Sınırlı yatırım maliyeti	Yüksek koku riski	
Belt filtre veya santrifüj, %20-25	Orta yatırım maliyeti	-Kireç ihtiyacı -Yüksek miktar çamur -Yüksek DD maliyeti	Kabul edilir kuruluktaysa DD
Belt filtre, %35-40	-Orta yatırım maliyeti -İyi kek kuruluğu	-Yüksek reaktif maliyet -Orta kurutma maliyeti	-DD -Kurutma sonrası Y
Belt filtre veya santrifüj+kompostlama, %30-40	Yeniden kullanım için uygun ürün	Yüksek yatırım maliyeti	-Ticari ölçekte K -TK -DD
Belt filtre veya santrifüj+kurutma veya yakma, %80-90	Çok kuru ürün ve kül	-Çok yüksek yatırım maliyeti -Yüksek enerji tüketimi	-TK -DD -Y
Termik şartlandırma+filtre pres+yakma (kül)	Minimum yakıt tüketimi	-Çok yüksek yatırım maliyeti -Yüksek koku riski	Y
AEROBİK DENGELENMİŞ ÇAMUR	Basit	-Çamur filtrasyonu zayıf -koku riski	
Kurutma yatağı, %30	-En düşük yatırım maliyeti -Kompleks değil	-Büyük yer ihtiyacı -Kurutulmuş yatağın yakılması için gerekli işçilik	-Sıvı veya katı formada TK -DD
Sıvı, %2-5	-Düşük yatırım maliyeti -Kompleks değil	-Büyük stok alanı ihtiyacı -Arazi boşaltma maliyeti	Sıvı olarak TK
Drenaj, %5-10	-Orta yatırım maliyeti -Basit -Orta stok alanı	Reaktif maliyeti	-TK -DD zor
Şartlandırma (inorganik) sonrası filtre pres, %30-35	Yüksek kek kuruluğu	-Yüksek reaktif maliyet -Yüksek yatırım maliyeti	-TK -DD
Belt filtre veya santrifüj+kompostlama, %30-40	Kompost üretimi	İki kez dengelenmiş ürün	-Ticari ölçekte K -TK -DD
ANAEROBİK ÇÜRÜTME ÇAMURU	-Çamur ağırlığında azalma -Emniyetli depolama	-Yüksek yatırım mal. -daha düşük enerji maliyeti	
Kurutma yatağı, %30	Orta sermaye ve işletme maliyeti	-İşçilik -Hava şartları	-TK -DD

Çizelge 1.6 (devamı)

Sıvı, %2-3	Orta sermaye ve işletme maliyeti	Büyük stoklama ihtiyacı -Yüksek arazi boşaltma maliyeti	Sıvı formda TK
Drenaj, %5-10	Orta sermaye maliyeti	Araziye boşaltma maliyeti	
Polimer şartlandırma+belt filtre veya santrifüj, %20-25	Orta sermaye maliyeti	Reaktif maliyeti	TK
Filtre pres ve inorganik şartlandırma, %35-40	-İyi kek kuruluğu -Az reaktif tüketimi	-Yüksek sermaye maliyeti -Reaktif maliyeti	-TK -DD
Termik şartlandırma, %50	Mükemmel kek kuruluğu	-Çok yüksek sermaye maliyeti -Koku riski -Termik likörlerin arıtımı	-TK -DD -Y
Filtre pres+kısmi kurutma ve karıştırma, %50-60		-Çok yüksek sermaye maliyeti -Yüksek reaktif maliyeti	-TK -Humus -DD -Y
Filtre pres+ kurutma, %80-90		-yüksek sermaye maliyeti -Reaktif maliyeti	-TK -Humus -DD -Y

Çamur işleme/arıtmanın çeşitli aşamalarında üretilen çamur hacmi ve nem içeriği arasındaki ilişki Şekil 1.3’de verilmektedir. Arıtma çamuru %90 nem oranında sıvı gibi davranırken, bu oran azaldıkça viskoz akıştan çok plastik bir davranış gösterir.



Şekil 1.3: Arıtma çamurunun hacim ve nem içeriği arasındaki ilişkisi (Gray, 1998)

Çamur arıtımında çamur stabilizasyonu ve katı madde içeriğinin artırılması amacıyla çeşitli yöntemler uygulanır. Aşağıda bunlardan bahsedilmektedir.

1.6.1. Çamur Stabilizasyonu

Arıtma tesislerinde katı maddelerin çöktürülmesi sonucunda oluşan çamurların katı madde içerikleri düşük olduğundan, bu oranı artırmak amacıyla çamur yoğunlaştırma işlemi uygulanır. Yoğunlaştırılan çamurun stabilizasyonu şu şekilde gerçekleştirilir:

Kimyasal stabilizasyon: kimyasal madde ilavesi ile,

Biyolojik stabilizasyon: aerobik (oksijenli), anaerobik (oksijensiz) çamur stabilizasyonu veya kompostlaştırma işlemi ile yapılır.

1.6.2. Çamur Susuzlaştırma

Susuzlaştırma, arıtma çamurlarının arıtımındaki en önemli adımlardan birisidir. Stabilize edilmiş çamurun nem içeriğinin azalması amacıyla uygulanır.

Yoğunlaştırılmış çamurun doğrudan araziye uygulanabildiği ve doğrudan yakıldığı istisnai durumlar dışında, susuzlaştırma, her çamur arıtma prosesinin vazgeçilmez bir parçasıdır.

Susuzlaştırma ile iki temel fayda elde edilir:

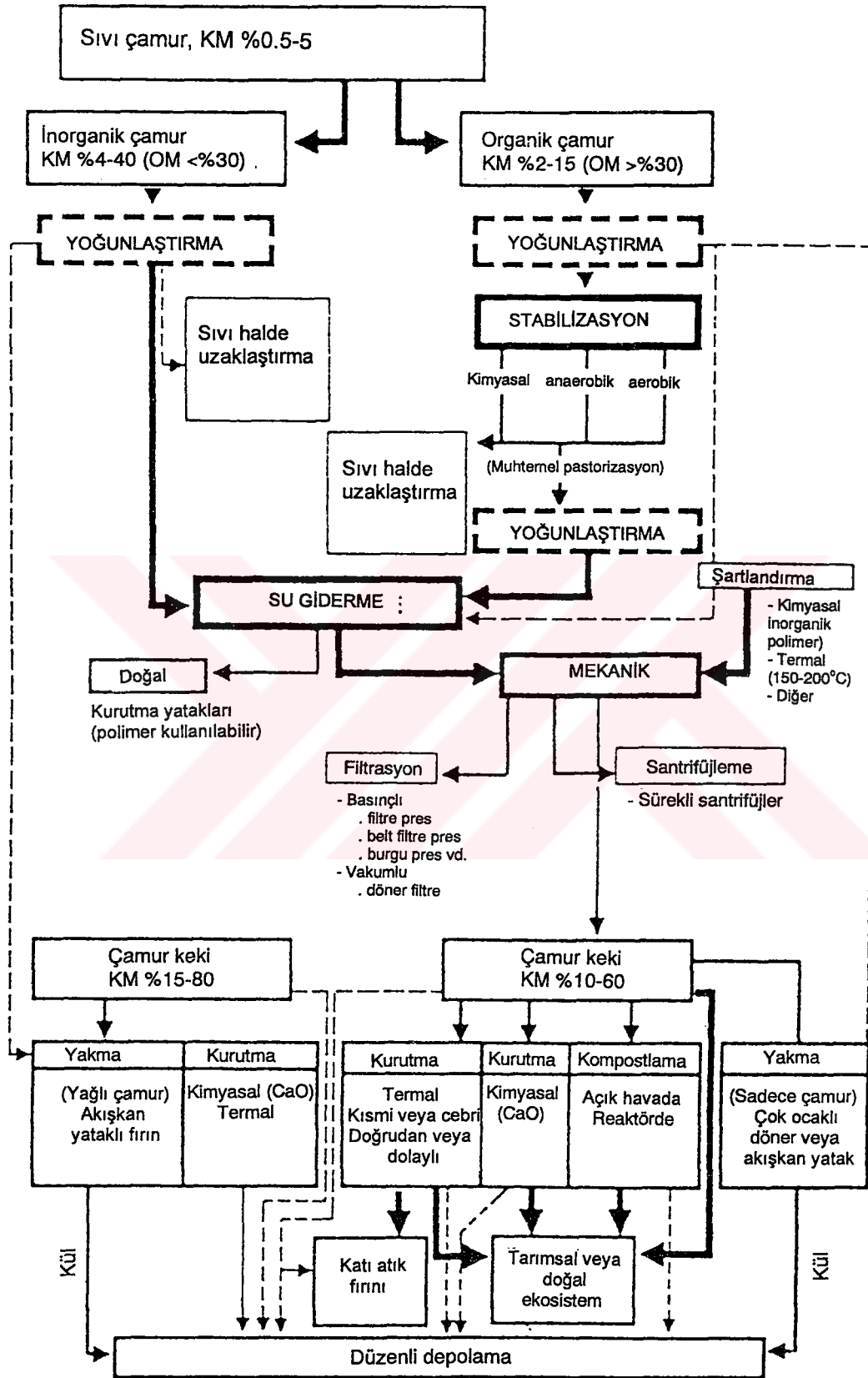
- i- Sulu çamurun suyunun büyük kısmının giderilmesiyle çamur hacminde büyük bir azalma meydana gelir.
- ii- Akıcı haldeki sulu çamur, katı olarak taşınabilir bir çamur kekine dönüşür.

Arıtma çamurları genellikle yoğunlaştırma sonrasında susuzlaştırmaya tabi tutulur. Aerobik biyolojik arıtma çamurları, yoğunlaştırma öncesi veya sonrasında ayrıca stabilizasyon ve pastörizasyona da tabi tutulabilirler. Kolay süzülebilen bazı inorganik çamurlar dışında bütün arıtma çamurlarının süzülebilirliklerini arttırmak üzere şartlandırılmaları, susuzlaştırmanın çok önemli ve ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilir.

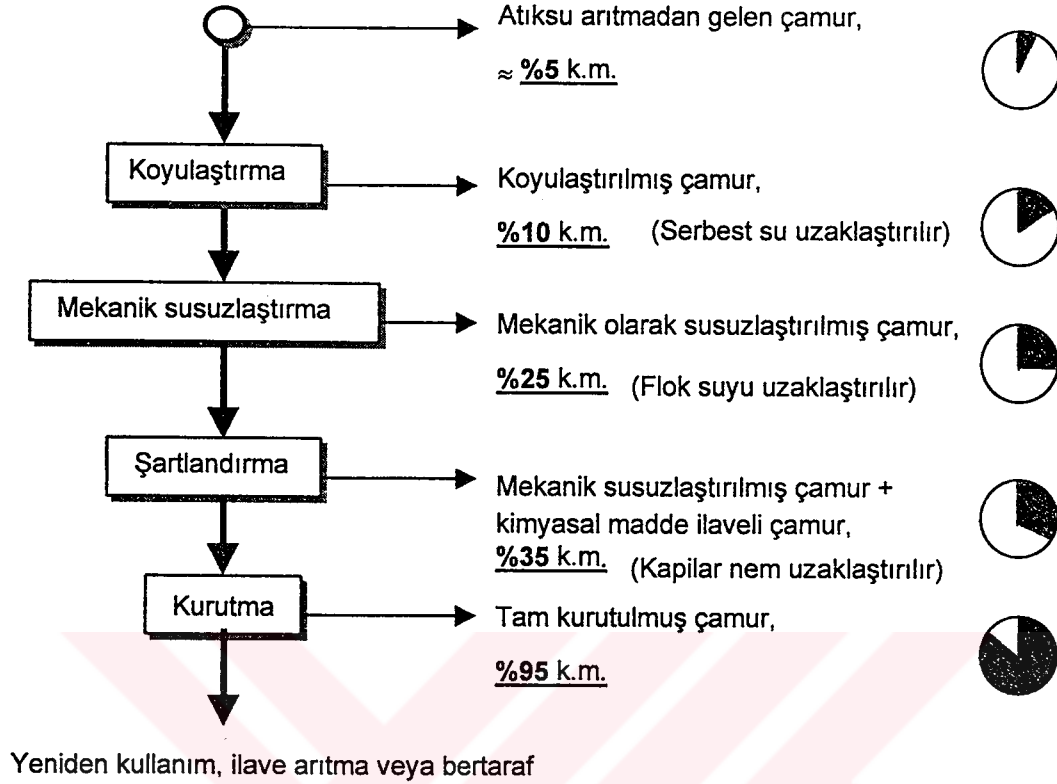
Şartlandırma en yaygın haliyle metal tuzları ve/veya kireç ilavesi yada organik polimerler ilavesi ile kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilir. Seyrek olarak çamurun yüksek sıcaklıklara ısıtılması suretiyle termal olarak da uygulanmaktadır.

Susuzlaştırmanın genel olarak çamur arıtımı işlem ve prosesleri içindeki yeri Şekil 1.4’de verilen diyagramda şematik olarak gösterilmektedir.

Koyulaştırma, mekanik susuzlaştırma, şartlandırma ve kurutma sonrası arıtma çamurundaki su-katı madde dengesi Şekil 1.5’de verilmiştir. Örneğin çamurun %3’ ten %6 katı oranına koyulaştırılması ile çamur hacminde %50 azalma olacaktır (Mc Ghee, 1991). Koyulaştırma sonrası ilave su uzaklaştırma için mekanik susuzlaştırma gerekecektir. Susuzlaştırma özelliklerini arttırmak için kimyasal madde kullanılarak veya termal işlemler uygulanarak şartlandırılabilir. Kimyasal şartlandırma katıların yumaklaşması ve suyun ayrılmasıyla sonuçlanır. Gerekli kimyasal madde ihtiyacı azdır (8-10 mg/kg k.m.) ve bu yüzden üretilen çamurun miktarını etkilemez. Çamur yakma ürünü kül, ince çamur taneleri veya kömür, şartlandırmada katkı maddesi olarakta kullanılabilir.



Şekil 1.4: Çamur arıtımı işlem ve prosesleri (Degremont, 1991)



Şekil 1.5: Arıtma çamurundaki su-katı madde dengesi (Manzel, 1989)

1.6.2.1. Susuzlaştırma Yöntemleri

Çamur susuzlaştırma yöntemlerini iki grupta toplamak mümkündür:

- doğal susuzlaştırma (kurutma yatakları),
- mekanik susuzlaştırma (vakum filtre, santrifüjler, pres filtre, bant (belt) pres).

i) Kurutma (Kum) Yatakları

Günümüzde kullanılan susuzlaştırma işlemlerinden birisi kurutma/kum yataklarıdır. Özellikle küçük arıtma tesisleri için oldukça caziptir. Genellikle arazinin bol ve ucuz olduğu yörelerde ve nüfusu 100 000 kişiden fazla olan arıtma tesislerinde kullanılmaktadır. İşletmelerinin basit oluşu ve deneyimli personel gerektirmemeleri avantajdır. Ham çamur koku ve sinek sorunu yarattığından ve ayrıca suyunun alınması daha zor olduğundan dolayı, kurutma yatakları, iyi bir

şekilde çürütülmüş –aerobik, anaerobik veya kimyasal olarak stabilize edilmiş- çamurlara doğrudan uygulanabilir. Ayrıca ham çamurda bol miktarda bulunan yağ ve gres yatakların gözeneklerini kolayca tıkayabilmektedir.

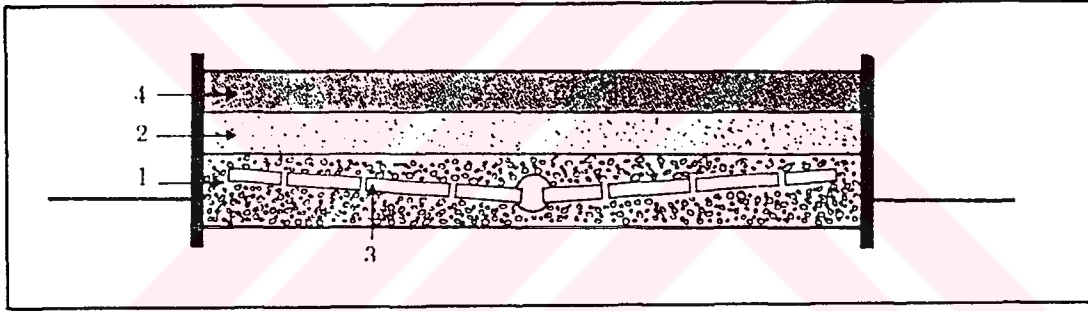
Çamur kurutma yatakları genellikle altına drenaj borularının yerleştirildiği 20-40 cm'lik bir çakıl (15-30 mm ortalama çap) tabakası ve onun üzerine serilmiş 10-35 cm kalınlığında bir kum (0.5-2 mm efektif çap) tabakasından meydana gelir. Sulu çamur yatağın üzerine 30-40 cm'lik bir kalınlıkta yayılır ve önce drenaj sonra da atmosferik kurutma ile susuzlandırma gerçekleşir. Çamur keki kum yüzeyinin üzerinden elle –kürek-veya mekanik olarak sıyrılıp uzaklaştırılır. Aynı alan yeniden kullanılır. Bu arada kaybedilen kumu telafi etmek için zaman zaman yatak yüzeyine ilave kum serpilir (Degremont, 1991).

Hava şartlarına bağlı olarak, 30-40 cm'lik bir sulu çamur kalınlığı ile kurutma 3-6 hafta sürebilir. Elde edilen kuru madde oranı genellikle %15-25 arasındadır. Çok güneşli havalarda bu oran %40 hatta %60'a kadar da yükselebilmektedir.

Kurutma yataklarının verimini etkileyen parametreler şu şekildedir:

- İklim (yağış şiddeti ve miktarı, hava sıcaklığı, nispi nem, rüzgar hızı)
- Çamurun özellikleri
- Kullanılmayan arazi durumu ve arazi maliyeti
- Yerleşim bölgelerine yakınlığı
- Çamur şartlandırıcıların kullanılma durumu

Çamur kurutma yataklarının genel görünüşü ve tipik kesiti Şekil 1.6'da sunulmaktadır. Kurutma yatakları, yüksek işçilik giderleri, geniş arazi kullanımı ve performansın hava şartlarına bağlı olması nedeniyle günümüzde pek fazla kullanılmamaktadır (BÇM, 2000).



1. Çakıl (15-30 mm)

2. Kum (0.5-2 mm)

3. Drenaj kanalı

4. Arıtma çamuru

Şekil 1.6: Bir kum yatağının genel görünüşü ve tipik kesiti (Degremont, 1991)

ii) Vakum Fitrasyonu

Dönen bir tamburun iç kısmına vakum uygulanarak gerçekleştirilir. Tambur çevresi filtre bezi ile kaplıdır ve tambur suyu alınacak çamurun bulunduğu hazneye kısmen batmış olarak döner. Dönme esnasında çamurun katı kısmı filtre bezi üzerinde kek oluşturur ve bu kek, tambur tekrar hazneye dalıncaya kadar koruyarak hazneye dolmadan önce sıyrıcı bıçaklar vasıtasıyla filtre bezinden sıyrılır. Vakum filtresi ile %20-30 katı madde içeriği elde edilir. Mekanik susuzlaştırma tekniklerinin en eskisi olan bu yöntem yüksek enerji ve kimyasal kullanımı ve bakım zorlukları nedeniyle günümüzde çok sınırlı bir uygulamaya sahiptir (Artan, 1993).

iii) Basınçlı Filtrasyon

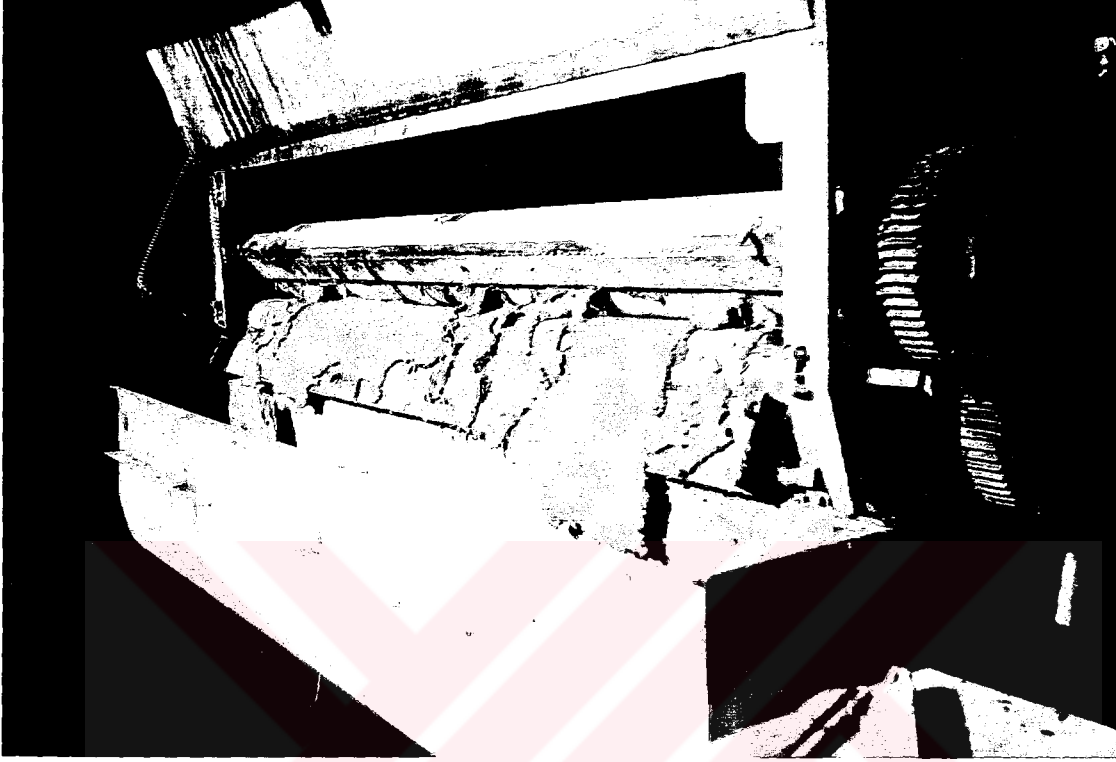
a) Pres Filtre

Yüksek basınç altında çamur suyunun alınmasını sağlayan mekanik ekipmandır. Kesikli çalışma söz konusudur. Pres filtre çıkışında katı madde içeriği yüksek (%30-45) çamur keki elde edilir. Aks üzerinde dikey olarak yerleştirilen filtre preslerde plakalar filtre bezi ile kaplanır. Merkezden plakalara beslenen çamur, plakalara basınç uygulayarak sıkıştırılır ve su filtre bezinden süzülerek alınır. Çamur miktarının fazla olmadığı veya yüksek kuru madde içeren kek elde edilmesinin zorunlu olduğu durumlarda tercih edilir (Gray, 1998).

b) Bant (Belt) Pres

Proses sırasında yüksek miktarda çamur üreten tesislerde sürekli çalışan belt pres kullanılır (Resim 1.1). Çamurun belt pres öncesi kimyasal olarak şartlandırılması gerekir. Genellikle organik polielektrolitlerle (1.3-1.7 kg/t k.m.) muamele edilerek yüksek verimli bir flokülasyon elde edilir. Flokülasyona tabi tutulmuş çamur ön susuzlaştırma işlemi ile suyunun bir kısmını kaybeder ve hacmi başlangıç hacminin 1/3 ile 1/5'i oranında azalır. Çamur sıkıştırma kademesinde artan bir basınçla, 4 çift silindir arasında etkili bir ön sıkıştırmaya maruz bırakılarak, başlangıç miktarının %20-50'si kadar su kaybeder. Çamur son olarak ilk ikisi elek tambur gibi çalışan, 6 adet silindirden geçirilerek parçalanır ve artan bir yüksek basınçla sıkıştırılır. Çamur tipine göre %20-35 katı madde içeriği elde edilir.

<u>Arıtma çamuru türü</u>	<u>Katı Madde,%</u>	
	<u>Giriş</u>	<u>Kek</u>
Çürütülmüş çamur	2-3	20-35
Primer çamur	4-6	20-30
Kağıt çamuru	2-6	25-35



Resim 1.1: Arıtma çamurunun susuzlaştırılmasında kullanılan bant (belt) pres

Kullanım kolaylığı ve filtrasyonun gözle takibi imkanı, yatırım giderlerinin filtre preslerden düşük olması, prosesin ve filtre kayışlarının yıkamasının sürekli oluşu ve mekanik tasarımının basitliği avantajlarından bazılarıdır (BÇM, 2000).

iv) Santrifüjleme (santrifüj dekantör)

Belt presler gibi sürekli çalışırlar. Yüksek devirde dönen bir tambur içine aktarılan ve polielektrolit kullanılarak şartlandırılmış olan çamur merkezkaç kuvvetinin etkisi ile suyundan ayrılır. Kimyasal madde sarfiyatı ve enerji tüketimi belt prese göre fazla olup, işletilmeleri ve bakımları kolaydır. Çamur türüne bağlı olarak %10-40 katı madde içeriği elde edilir. Kokuyu minimize edecek şekilde kapalı çalışması ve çamurun homojen olması şartıyla işletme işgücü ihtiyacı azlığı yöntemin

avantajlarıdır. Ancak enerji sarfıyatı, gürültü, personel ihtiyacı ve hızlı aşınma gibi dezavantajları vardır (Artan, 1993).

Susuzlaştırma yöntemi seçiminde çamur özellikleri, cinsi, ulaşılmak istenen katı madde konsantrasyonu, tesis kapasitesi ve kullanılan şartlandırma maddelerinin cinsi ve miktarı etkili olmaktadır.

Mekanik susuzlandırma ünitelerinin kapasitelerinin belirlenmesinde gerekli değerler, pilot tesisler ve laboratuvar denemeleri yardımı ile bulunur. Bu amaçla, çeşitli uygulama sonuçlarından elde edilmiş olan ve Çizelge 1.7’de verilen alt-üst sınır ve ortalama değerler de kullanılabilir.

Çizelge 1.7: Susuzlaştırma işlemi sonucu çamur katı konsantrasyon değerleri (Metcalf ve Eddy, 1991)

UYGULANAN SUSUZLAŞTIRMA İŞLEMİ	KATI KONSANTRASYONU, %	
	ALT-ÜST SINIR	ORTALAMA
Gravite Yoğunlaştırıcılar	4-10	6
Flotasyon Yoğunlaştırıcılar	3-6	4
Vakum Filtrasyon	15-30	20
Bant (Belt) Pres	15-30	22
Pres Filtre	20-50	36
Santrifüjler	10-35	22

Susuzlaştırma işlemlerinden geçen çamurlarda katı madde konsantrasyonlarının yüksek değerlere sahip olmadığı düşünülebilir. Oysa, görünüm itibarıyla %15’lik bir katı madde konsantrasyonuna sahip çamur oldukça koyu bir macunu andırır; %25’lik bir konsantrasyon değerinde ise çamur, çamur niteliğini kaybedecek kadar katılaşmıştır. Aslında bu durum hiçte şaşırtıcı değildir zira çamurdaki katı madde konsantrasyonunu %5’den %20’ye yükseltmek sözkonusu çamurdaki su içeriğinin yaklaşık %80 oranında azaltılması ile mümkündür. Örneğin 5 g katı madde 95 g su ihtiva eden bir çamurun (%5), 5 g katı madde ve 20 g su ihtiva eden bir çamura dönüşmesi için (%20) başlangıçta mevcut olan 95 g suyun 75 gramını dışarı atmak gerekir ki, su içeriğinin %80 oranında azalması demektir (Velioglu, 1980).

Arıtma çamurunu su içeriğine göre şu şekilde sınıflandırmak mümkündür:

- i- %90'dan fazla su ihtiva eden çamur (sıvı)
- ii- %50-90 arası su ihtiva eden çamur (slurry-kek)
- iii- %50'den daha az su içeren çamur (katı)

Su içeriğine göre çamuru pompayla, konveyörle veya burgu ile taşımak mümkündür.

1.7. Arıtma Çamurunun Bertarafı

Atıksuların arıtılmasında zor ve pahalı işlemlerden birisi, oluşan çamurlara uygulanan işlemler ve bertaraf yöntemleridir. Günümüzde çok farklı çamur bertaraf /uzaklaştırma işlemleri mevcuttur.

Bunlar;

- ☐ Düzenli depolama (tek başına veya evsel katı atıklarla birlikte depolama)
- ☐ Araziye gömme
- ☐ Araziye boşaltma
- ☐ Okyanusa boşaltma
- ☐ Anaerobik parçalama (çürütme): daha stabil madde elde etmek için çamurdaki organik veya uçucu maddelerin biyolojik oksidasyonu.
- ☐ Termal işlemler (yakma)
- ☐ Toprak ıslahı (zirai üretimde kullanım)
- Fidanlıklarda, orman alanlarında, rekreasyon alanlarda (parklar, golf sahaları vb), peyzaj düzenlemede ve ev bahçelerinde
- ☐ Diğer
- Bozulmuş alanlarda (maden alanları, inşaat sahaları vb), otoyollarda, havaalanı pistlerinde

1.7.1. Düzenli Depolama

Serbest su içermeyen stabilize edilmiş çamur ya tek başına yada evsel (kentsel) katı atıklarla birlikte karıştırılarak depolanabilir. Arıtma çamurlarının

düzenli depolama alanlarında bertarafı için, *Katı Atıklar Yönetmeliği*'ne göre %35 k.m. konsantrasyonuna kadar suyunun alınması gerekmektedir. Özel durumlarda bu oran %25'ler seviyesine inebilmektedir. Bu katı oranına ulaşmak için ilave edilen katkı maddeleri, bertaraf edilecek çamurun toplam miktarında önemli bir artışa neden olmaktadır. Diğer bir problem ise deponi alanlarının mevcut kapasitelerinin azalması ve yeni dolgular için inşa edilebilecek alanların sınırlı olması şeklinde belirtilebilir. Bunun yanısıra yönetmelikte belirtilmemiş olmasına rağmen arıtma çamurlarının ihtiva ettiği ağır metaller, tuzlar, toksik maddeler gibi yeraltı suyunun kirlenmesine neden olabilecek veya koku problemi yaratacak maddelerin belirlenmesi düzenli depolama uygulamalarında gözönünde bulundurulması gereken hususlardır. Genel olarak tehlikeli ve zararlı atıklar sınıfında değerlendirilebilecek endüstriyel arıtma çamurlarının “monodeponilerde” bertarafı düşünülmelidir (Şengül ve Filibeli, 1992).

Düzenli depolama işleminde; - sistematik serme, - sıkıştırma, - üzerini örtme yöntemi uygulanmalıdır. Bu uygulama düzenli depolamayı ‘kontrolsüz atma’ dan ayırır.

Düzenli depolamanın uygulanmasını sınırlandıran etkenler ise şunlardır:

- Biyogaz sızıntısı (organik maddenin ayrışımı sonucunda oluşan biogaz uygun bir şekilde toplanarak işleme tabi tutulur),
- Yağmur suyu ile yıkama,
- Kullanılabilir arazinin varlığı (Toprak,1996).

Düzenli depolama diğer uzaklaştırma yöntemlerine göre daha ucuzdur. Ancak arazi maliyeti ve susuzlaştırma işlemi önemli rol oynamaktadır.

Günümüzde, çoğu ülkede, yeni bir dolgu alanı yapımı için izin alınması prosedürü uzun ve zahmetli olmaktadır. Bu ve benzeri problemler, yakmadan daha ucuz bertaraf yöntemi olarak uygulanan saha dolgunun avantajını hızla ortadan kaldırmaktadır (Kassner, 1992).

1.7.2. Toprak Islahı (Zirai Üretimde Kullanım)

Evsel atıksuların arıtılmasından ve belli başlı endüstriyel akıntılardan açığa çıkan çamur tarım arazilerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir. Evsel atıksuyun

biyolojik arıtımından açığa çıkan çamurun başlıca agronomik (fenni ziraat) özellikleri Çizelge 1.8’de verilmektedir.

Çamurun değeri içerisindeki hümik maddelerin besleyici içeriği kadar özümleme için derinlik, yüksek geçirimsizlik kapasitesi, iyi drene edilebilme ve havalandırma yeteneği, nötr veya alkali pH gibi gerekli toprak özelliklerine de bağlıdır.

Çizelge 1.8: Arıtma çamurun agronomik özellikleri (%k.m.) (Degremont, 1991)

	ÖN ÇÖKELTME		ÖN ÇÖKELTME + BİYOLOJİK ARITMA		UZUN HAVALANDIRMA
	ham	çürütülmüş	ham	çürütülmüş	
Organik madde	55-65	40-55	60-80	40-65	55-70
N	2.5-3	2-2.5	3.5-4.5	2-2.5	4-5
P	1-1.5	0.5-1	2-2.5	1-1.5	2-2.5
K	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3
Ca	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15

Tarımda kullanılan çamurlardaki başlıca potansiyel risk içerdikleri ağır metaller Zn, Cd, Cu, Ni, Cr ve Hg’dir. Bu da genellikle metal işleme gibi endüstrilerden kaynaklanmaktadır. Ancak bünyesinde endüstriyel atıksu bulundurmeyen evsel nitelikte atıksularda da yüksek konsantrasyonlarında ağır metal bulunabilmektedir. Çamurun araziye uygulaması (yayılması) işlemi yapılacaksa atıksu arıtma tesisi girişinde bu ağır metallerin analizi yapılmalıdır. Yüksek değerlerde bunların arıtılmaları gerekmektedir. Yapılan araştırmalar atık çamurdaki ağır metallerin ortalama içeriğinin çoğu tarım topraklarındakinden daha yüksek olduğunu göstermektedir (Çizelge 1.9).

Çizelge 1.9: Arıtma çamuru ve topraktaki ağır metal içerikleri (Poletschny, 1988)

AĞIR METAL	ÇAMURDAKİ ORTALAMA DEĞERLER (mg/kg k.m.)	TARIM TOPRAĞINDAKİ ORTALAMA DEĞERLER (mg/kg k.m.)
Cd	3.8	0.44
Cu	330	15
Ni	39	15
Pb	159	36
Zn	1318	67
Hg	2.7	0.12
Cr	91	25

Aritma çamurunun tarım alanlarına kontrolsüz bir şekilde verilmesi, tarımsal arazilerdeki ağır metal konsantrasyonlarını arttırmaktadır. Bu da tarım ürünlerini doğrudan etkilemekte, aynı zamanda bitki ve hayvanlar vasıtasıyla da insanlar üzerine geçmesine sebep olmaktadır.

Çamurun kullanımını düzenlemek için pek çok ülke, ya toprakta ya da çamurdaki limit konsantrasyonları ve uygulama sıklığını belirlemektedir. Çizelge 1.10'da çamur için verilen ağır metal limitleri gösterilmektedir.

Çizelge 1.10: Avrupa Birliği Tarım Direktifinde (86/278/EEC) arıtma çamuruna izin verilen ağır metal sınır değerleri (Hall, 1994)

AĞIR METAL	ÇAMURDAKİ SINIR KONSANTRASYONLAR (mg/kg k.m.)	TARIM TOPRAĞINDAKİ SINIR KONSANTRASYONLAR (mg/kg k.m.)	TOPRAKTA İZİN VERİLEN YILLIK ORTALAMA SINIR (mg/kg k.m.)
Cd	20-40	1-3	0.15
Cu	1000-1750	50-140	12
Ni	300-400	30-75	3
Pb	750-1200	50-300	15
Zn	2500-4000	150-300	30
Hg	16-25	1-1.5	30

Direktif arıtma çamurunun tarımda kullanımı iki şekilde kontrol etmektedir:

1. Çamurun uygulanacağı toprağın *Potansiyel Toksik Element* (PTE) içeriğini göz önüne alarak. Eğer PTE'lerin herhangi birinin konsantrasyonu ulusal düzenlemelerdeki minimum sınır değerleri aşarsa, o zaman çamur uygulamasına izin verilmeyecektir.
2. Çamur ilavesinden sonra ağır metal birikiminin limitleri aşmamasını sağlamak için araziye çamur uygulamasını düzenleyerek.

Avrupa Komisyonu direktifi metal limitleri yaklaşımında esnektir ve bazıları daha sıkı olmak üzere, çoğu ülkeye kendi limitlerini ayarlama imkanı vermektedir (Çizelge 1.11).

Çizelge 1.11: Çeşitli ülkelere ait arıtma çamuru ağır metal içerikleri (Davis, 1996)

* Sınır değerler mg metal/ kg kuru çamur şeklindedir

AĞIR METAL*	AVRUPA BİRLİĞİ	İNGİLTERE	ALMANYA	DANİMARKA	GÜNEY AFRİKA
Cd	1-3	3	1.5	0.5	2
Cu	50-140	135	60	40	100
Ni	30-75	75	50	15	15
Pb	50-300	300	100	40	56
Zn	150-300	300	200	100	185
Hg	1-1.5	1	1	0.5	0.5

Arıtma çamuru, nadir elementlerin tümüyle çözünmesini sağlayan pH seviyesinde toprağa verilmemelidir. Araziye boşaltmadan sonra toprağın pH'sı 6'nın aşağısına düşmemelidir. İlave edilen çamur miktarının her yıl yerel agronomik testler tarafından belirlenmesi gerektiğinden 30 ton kuru çamur/ha.yıl dozajı makul bir değer olarak kabul edilebilir.

Çamur araziye şu şekillerde yayılabilir:

- Sıvı halde
- Hamur (tikotropik yapılı)
- Plastik katı halde

Çok kalın inorganik çamur için, %50 k.m. içeriği

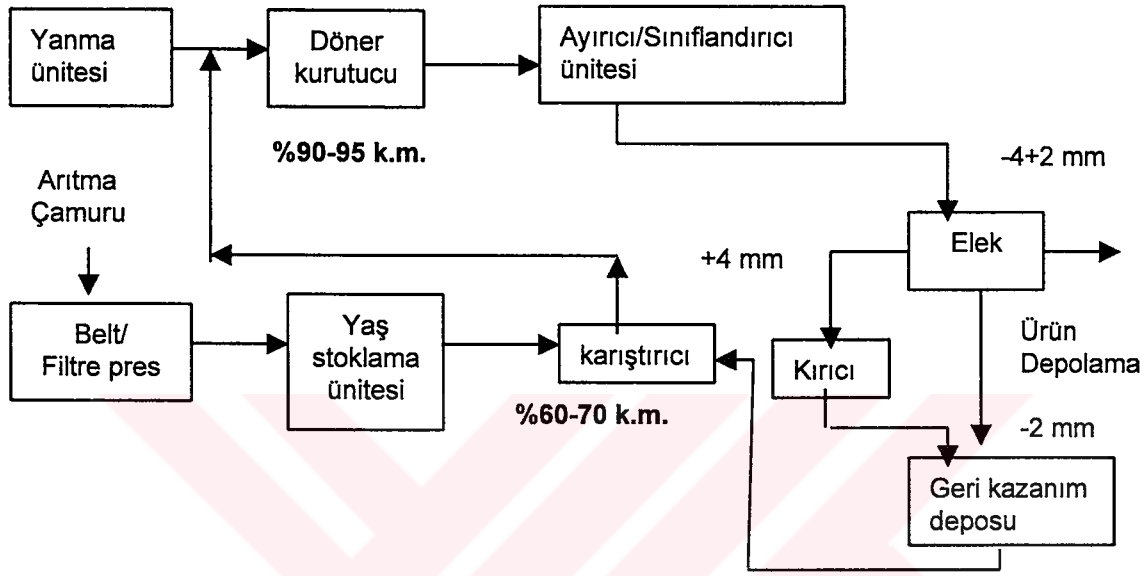
Biyolojik kolloidal çamur için, %15 k.m. içeriği

- Kolay ufalanır, gevrek yapıda (mekanik baskı ile)
- Granül veya toz şeklinde (mekanik susuzlaştırmaya ilave olarak termik kurutma ile)

1.7.3. Kurutma ve Peletleme (gübre üretimi)

Kurutma ve peletleme işlemi susuzlandırılmış bioatik (çamur)ları gübre olarak satılabilir bir ürüne dönüştürür. Proseste belt preste susuzlandırılmış çamurlar karıştırılır ve kurutulur. İnce malzemeler peletlenmiş ürün çekirdeği olarak tutulur.

Yaklaşık %60-70 katı içeren harmanlanmış malzeme daha sonra %90-95 arasında katı içeriğine kurutulduğu bir döner kurutucuya beslenir (Şekil 1.7).



Şekil 1.7: Kurutma ve peletleme prosesi akım şeması (Pincince, 1997)

Kurutulmuş malzeme bir seperatör (ayırma) ünitesine beslenir. Çamurlar malzemeyi iri ve ince olarak ikiye ayıran bir eleme ünitesine taşınır. İri partiküller daha ince boyuta indirilmek üzere kırıcıya gönderilir. -4+2 mm tane iriliğindeki peletlenmiş ürün konveyörle depolama silolarına taşınır.

Almanya'da geliştirilen Blue-Tec (1994) kurutma prosesi koku ve toz emisyonları oluşturmeyen kapalı devre çalışan modüler kurutuculardan oluşmakta, buharlaşma ünitesindeki peletlerin tutulma süresi bant konveyörün hızına ve istenen nihai kuru katı madde içeriğine (genellikle %70-95) bağlı olmaktadır. Yaş çamur 10-15 dakikada kurutulmakta, son derece iyi taşıma ve depolama özelliklerine sahip katı peletler haline dönüştürülmektedir.

Çamur kurutma tekniklerini ısı transferine göre 2 grupta değerlendirmek mümkündür:

- 1) Direkt kurutma: Çamur sıcak gazlarla (hava, baca gazları) doğrudan temas ederek ısıtılmaktadır. Nisbeten düşük bir yatırım maliyeti vardır. Hava taşıma ve kirlilik kontrol sistemleri gerekir.

ÖRNEK: Döner tambur, akışkan yatak ve flaş kurutucular.

- 2) İndirek kurutma: Isı taşıyıcı (buhar veya termal yakıt) ve çamur arasındaki fiziksel bir temas yoktur. Isı bir metal yüzeyden geçerek aktarılır. Kurutucuya çok sınırlı miktarda hava girdiğinden, hava havayı taşıma, temizleme ve koku kontrolü direkt kurutucudan daha azdır. Kurutucudaki oksijen (hava) seviyesi çok düşük olduğundan dolayı alev ve patlama riski azdır.

ÖRNEK: Disk, ince film ve çoklu tabla kurutucular.

Kullanımı yaygın olan VADEB* arıtma çamuru kurutma teknolojisine ait modeller ve ürün özellikleri ise şu şekildedir (Vadep, 1998):

Buharlaştırma kapasitesi (L/s)	Model	Yıl	Çamur girişi (kg/s)	Çamur çıkışı (kg/s)	Ürün özelliği
710	DX-120	1994	800 (%11 k.m.)	90 (%95 k.m.)	1-2 mm granül
3200	DX-400	1986	4000 (%18 k.m.)	800 (%95 k.m.)	2-3 mm granül
3800	DX-600	1999	5500 (%28 k.m.)	1700 (%90 k.m.)	3-4 mm granül

1.7.4. Termik İşlemler

Arıtma çamurunun termik yöntemlerle bertarafı için gerek piyasada gerekse geliştirme aşamasındaki bir çok teknoloji mevcuttur. Bu teknolojiler üç grupta sınıflandırılabilir (Ogada, 1995):

- Tek başına yakma (mono-incineration)
- Birlikte yakma (co-combustion/firing)
- Yeni ve alternatif termik işlemler

* Vandenbroek Int. Ltd. (Hollanda) tarafından Termal Kinetik Çamur Arıtma için kabul edilen ticari bir marka

Yakma işleminin çamur vb. atıklara uygulanması ile,

- Hacimce %90, ağırlıkça %75’lik bir azalma olur ve atık biyolojik olarak steril bir kül ürüne dönüşür,
- Küresel ısınmaya neden olan seragazi (metan) üretilmez,
- Elektrik üretimi için buhar üreterek, endüstriyel proseslerin ısınmasında, sıcak su temininde kullanım gibi düşük maliyetli bir enerji kaynağıdır,
- Dip külü inşaat sektöründe ikincil agrega olarak kullanılabilir,
- Uçucu, toksik ve enfeksiyon yapıcı atıklar için en uygulanabilir çevre seçeneğidir (Williams, 2000).

Ancak bu tür teknolojilerin uygulanmasında göz önünde bulundurulması gereken bazı faktörler ise şu şekilde sıralanabilir:

- i- Yakma sonrası çamur kuru kütlelerinin %50’ye kadar olan kısmı kül olarak kalır ve ayrıca çamurdaki bir çok toksik ağır metallerde külün uzaklaştırılmasını karmaşık hale getirir.
- ii- Kurutma boyunca, çamur serbestçe akamadığında %50-60 kuru madde civarında yapışkan faza geçer, bu çamur kurutma prosesini karışık hale getirir.
- iii- Azot, klor, sülfür, dioksin, furan gibi çamurdaki bileşikler yanma boyunca çeşitli yapılarda gazlı kirleticiler şeklinde serbest kalırlar. Bu atık yakmada normalden daha sıkı emisyon limitlerini karşılamaya zorlayan baca gazı arıtmayı gerektirir.
- iv- %70-80 nem içerikli mekanik olarak susuzlandırılmış çamurun net ısı değeri kendi kendine yanma için yeterli değildir ve ilave yakıt gerekir.

Alternatif yöntemler:

Tek başına yakmaya alternatif teknolojiler aramak için bazı nedenler de vardır. Bunlardan en önemlisi büyük oranlarda baca gazı ve çamur yakma boyunca oluşan kül ve ileri baca gazı arıtma zorunluluğudur. Baca gazı arıtma tesislerinin boyutunu ve baca gazı temizlemenin sermaye ve işletme maliyetini belirlediği için baca gazı hacmi önemli bir parametre olmaktadır. Oluşan büyük miktardaki külün bertarafı çamur uzaklaştırma maliyetini de artırmaktadır. Hem kül miktarını hemde

baca gazı hacmini azaltan alternatifler prosesler amaçlanmaktadır. Alternatif yöntemleri şu şekilde sıralamak mümkündür:

i) *gazlaştırma*: Elde edilen ürün sentetik gaz yakıt olmasının yanında kimya sanayi için de faydalı bir maddedir.

ii) *piroliz*: Organik maddelerin havasız ortamda termal bozunması işlemidir. Piroliz süresince çamurun organik kısmı faydalı yakıta (piroliz gazı) dönüşmekte ve düşük işletme sıcaklığı da SO_2 ve NO_x oluşumunu engellemektedir.

iii) *yaş oksidasyon*: Sulu ortamda organik maddelerin oksidasyonu işlemidir.

1.8. Bertaraf için Karar Prosesi

Yasal mevzuatların yanısıra arıtma çamurunun işlenmesine ilişkin kararda maliyet önemli bir kriterdir. Maliyetler yerel şartlara ve işletme tesisinin büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Arıtma çamurunun işlenmesi ve bertarafı ile ilgili değişik seçeneklerin doğru bir karşılaştırmasını yapabilmek için üç ana faktörden etkilenen yıllık maliyetleri ele almak önemlidir. Bunlar:

i) Yıllık yatırım maliyeti: Toplam yatırım miktarına, finansman metoduna, amortisman süresine ve borç alınan miktarın faiz oranlarına bağlıdır.

ii) İşletme maliyeti: Enerji, kimyasal madde, bakım, personel ücretleri, vergi ve sigortalardan oluşmaktadır.

iii) Diğer maliyetler: Bertarafa, kalıntı veya son ürünün tekrar kullanımına bağlı maliyetlerdir.

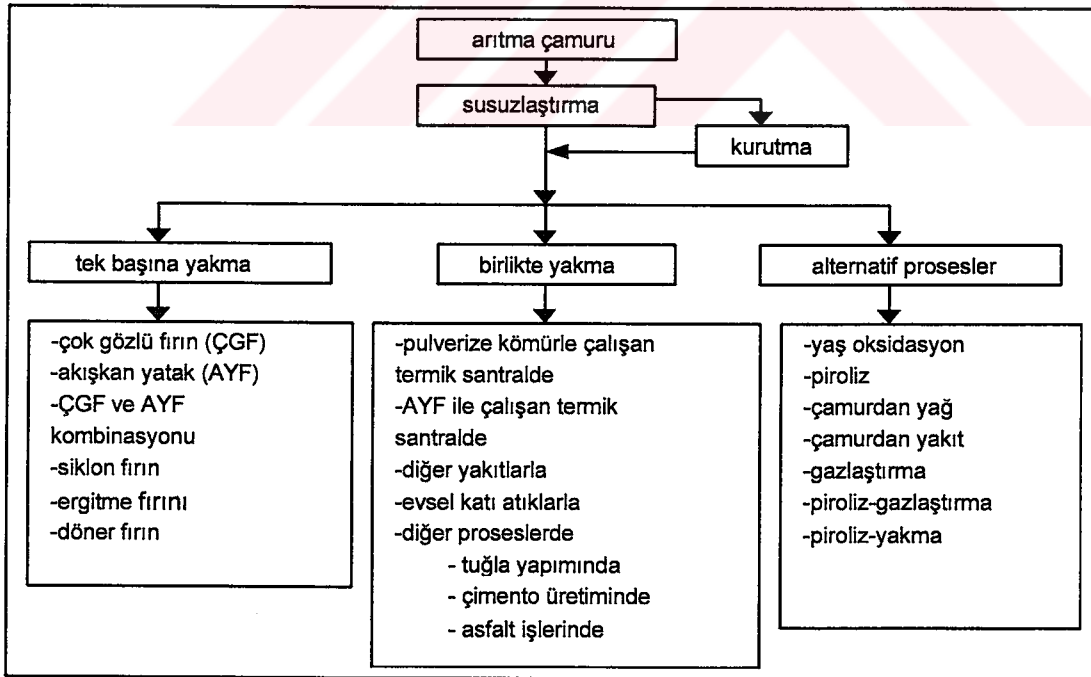
Maliyet karşılaştırmaları yapılırken girdi olarak kullanılan arıtma çamurundan beklenen kalitenin ve dolayısıyla ön işletme maliyetlerinin bir yöntemden diğerine değişebileceği dikkate alınmalıdır (BÇM, 2000). Çizelge 1.12’de bir yakma tesisi için bertaraf maliyetlerinin dağılımı verilmektedir.

Çizelge 1.12: 45000 t/yıl (k.m.) kapasiteli bir çamur yakma tesisi için toplam bertaraf maliyetleri (Lurgi, 1999)

* Toplam bertaraf maliyeti : 25-28 Sterlin /t (çamur keki)
130-140 Sterlin/t (k.m.)

MALİYETLER	(%)
A- SABİT MALİYETLER	
Yatırım	55
Personel ve idari harcamalar	10
Bakım giderleri	10
Vergiler	4
Sigorta	1
TOPLAM (A)	80
B- DEĞİŞKEN MALİYETLER	
Enerji	6
Utility tüketimi	5
Artıkların bertarafı	9
TOPLAM (B)	20
TOPLAM (A)+(B)	100

Aritma çamuruna uygulanan ve/veya uygulanabilecek başlıca termik yöntemler Şekil 1.8’de gösterilmektedir.



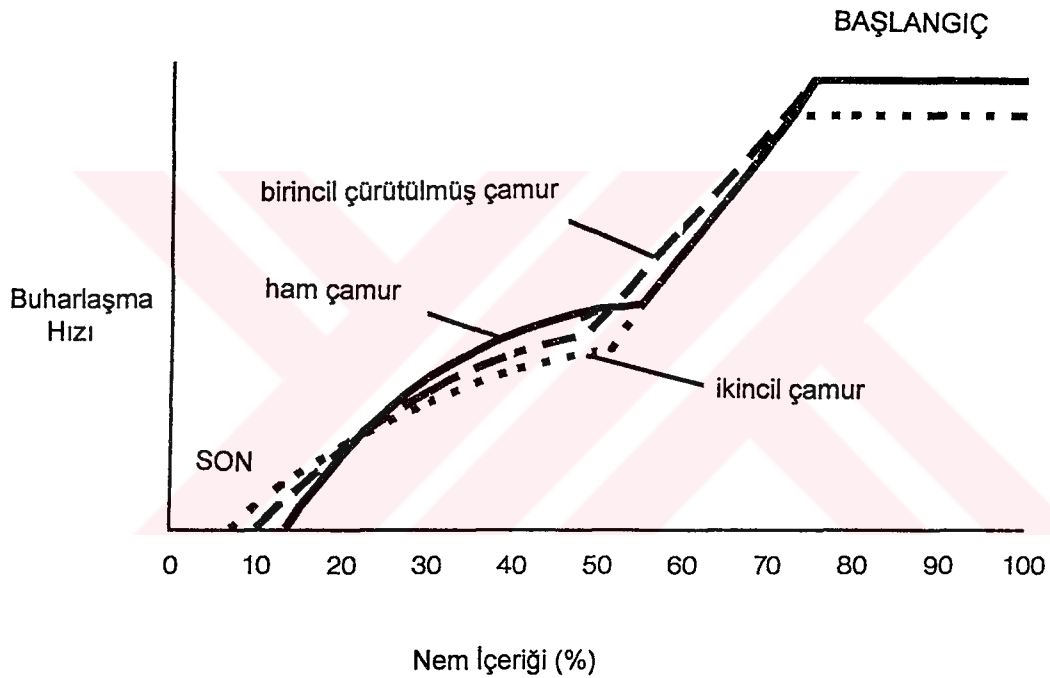
Şekil 1.8: Termik çamur işleme yöntemleri (Oğada, 1995)

1.9. Kurutma ve Yakma

1.9.1. Kurutma

1.9.1.1. Nem İçeriği ve Yaş Yakmaya Olan Etkisi

Arıtma çamuru yüksek su ihtiva eden (%70-75 serbest su, %20-25 flok suyu, %1 kapilar su ve %1 bağlı su) bir organik ve inorganik madde karışımıdır (Mc Ghee, 1991). Çeşitli nem yapıları farklı teknikler kullanılarak uzaklaştırılabilir. Çamur sadece bir düşüş hız peryoduna sahip klasik kuruma eğrisinden farklı olarak iki düşüş hız peryodundan oluşan farklı bir kuruma özelliği göstermektedir (Şekil 1.9).



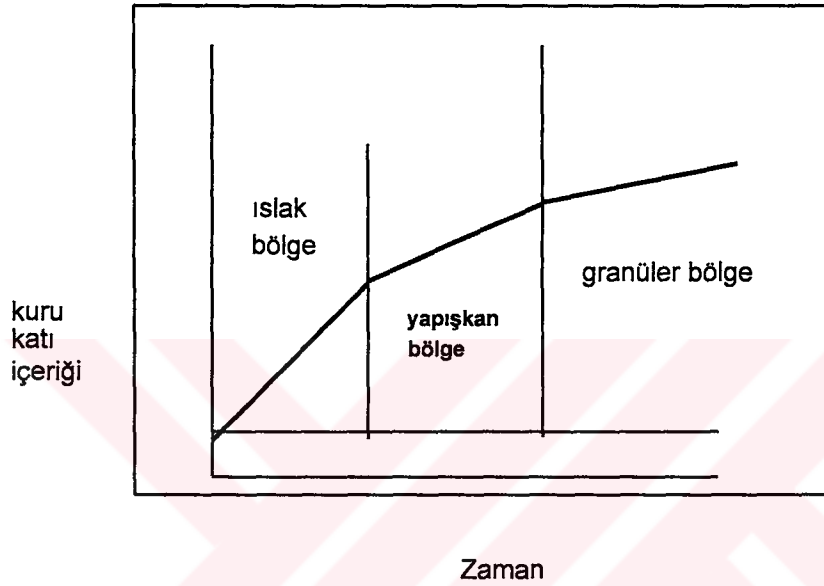
Şekil 1.9: Arıtma çamurunun kuruma eğrileri (Lowe, 1995)

Kurutma deneylerine göre, çamur nemi sabit bir kurutma hız peryodu boyunca uzaklaştırılan serbest nem, ilk düşüş hız peryodu boyunca uzaklaştırılan kılcal nem, kurutma eğrisinin 2. düşüş hız peryodunda uzaklaştırılan yüzey nemi ve kimyasal olarak bağlı ve uzaklaştırılamayan bağlı nem olarak karakterize edilmektedir (Lowe, 1995). Birinci kurutma eğrisi düşme hızından ikinciye geçiş noktaları farklı tip çamurlar için farklıdır. Bu geçiş noktalarındaki fiziksel değişimler çok önemli bir olgudur. Çamur üç ana bölgeden geçmektedir (Şekil 1.10). Bunlar;

i-ıslak bölge: çamur serbestçe hareket eder, ısıtılmış bir tüpün içine kolayca yayılabilir.

ii-yapışkan bölge: çamur macunsudur ve akmaz (%60-65 k.m.).

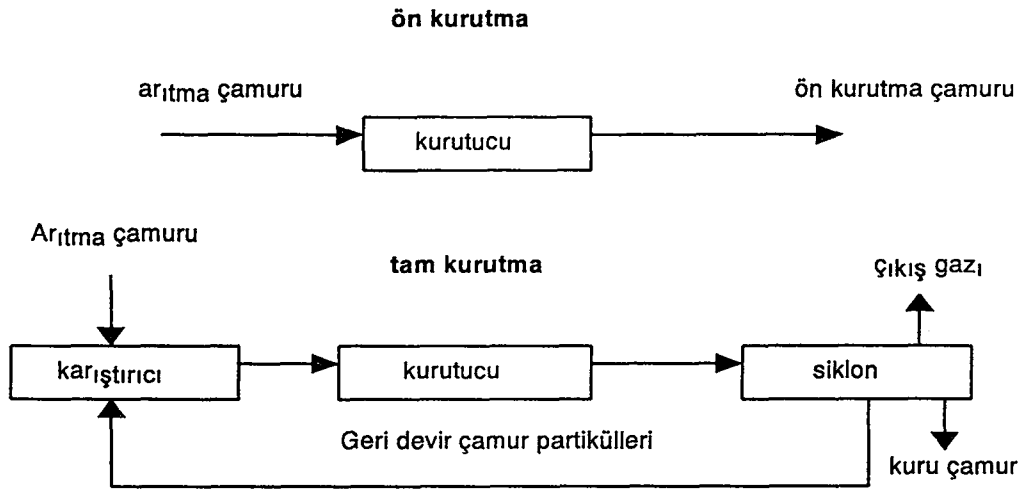
iii-granüler bölge: serbestçe karışır.



Şekil 1.10: Kurutma boyunca çamurdaki fiziksel değişimler (Gruter ve ark, 1990)

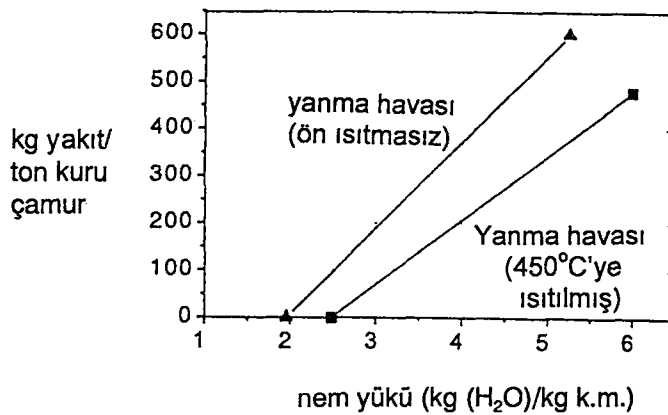
Bu fiziksel değişimlerin önemi, geliştirilen ve diğer materyallerle başarıyla uygulanan kurutma teknolojilerinin arıtma çamurunun kurutulmasına kolayca aktarılamayacağını göstermektedir. Böylece yapışkan zondan geçmek zorunda olduğu için bütünüyle tek bir kademede çamurun kurutulması mümkün değildir. Bunun sonucu olarak çamur kurutmada iki yol geliştirilmektedir (Şekil 1.11). Bunlar;

- i- ön kurutma (ıslak bölgenin sonuna kadar kurutma) ve
- ii- tam kurutmadır.



Şekil 1.11: Arıtma çamuru kurutma teknikleri (Werther ve Ogada, 1999)

Yapışkan bölgenin problemi ön kurutma gerektiren yanma sistemleri için çözülmesi gereken bir konudur. Ancak yaş çamur yakma boyunca yüksek nem içeriğiyle bağlantılı diğer faktörler gözönünde bulundurulmalıdır. İlk olarak çamurdaki nemin uzaklaştırılması için enerji gerektiğinden çamur yakma boyunca serbest kalan net enerji azalır. Eğer net enerji kendiliğinden yanmaya yetmiyorsa o zaman ilave yakıt verilmelidir. Gerekli ilave yakıt miktarı yanma havasının sıcaklığı kadar nem içeriğine ve çamur tipine de bağlıdır. Şekil 1.12' de 3580 kcal/kg ısı değere sahip bir ham çamur için baca gazındaki O_2 'nin %6 olduğu akışkan bir yatakta 850 °C'de gereken ilave yakıt ihtiyaçlarını göstermektedir.



Şekil 1.12: Arıtma çamuru yakmada ilave yakıt ihtiyacı (Anonymous, 1991)

Buna göre;

- i- Ağırlıkça %20-25 k.m. içeren (3-4 kg su/kg kuru çamur) yaş çamur eğer yanma havası 450 °C'ye ısıtılırsa, 1 ton kuru çamur başına 100-200 kg yakıt gerekir.
- ii- Buharlaşan vapour, baca gazı arıtımı ve toz tutma ekipmanlarının boyutlarını etkileyen baca gazının miktarını artırır.
- iii- AYF'da uçucuların kurutulması ve yatakta yanması dolayısıyla fribord sıcaklığından daha düşük bir akışkan yatak sıcaklığı elde edilir ki bu da kömür yakma için tipik olmayan ancak yaş çamur akışkan yataklı yakma sisteminin bir özelliğini göstermektedir (Mühlhaus, 1991).

Yaş çamurdaki yüksek nem içeriği bazı işletme problemlerine neden olabilmektedir. Çamurdaki su yatağa girerken buharlaşmakta ve bu da ilave ısı gerektirmektedir. Waters (1975), %80'e kadar inert (mineral madde+su) ve 1195 kcal/kg'a kadar düşük bir ısı değere sahip yakıtların AYF'da yakılabileceğini göstermiştir.

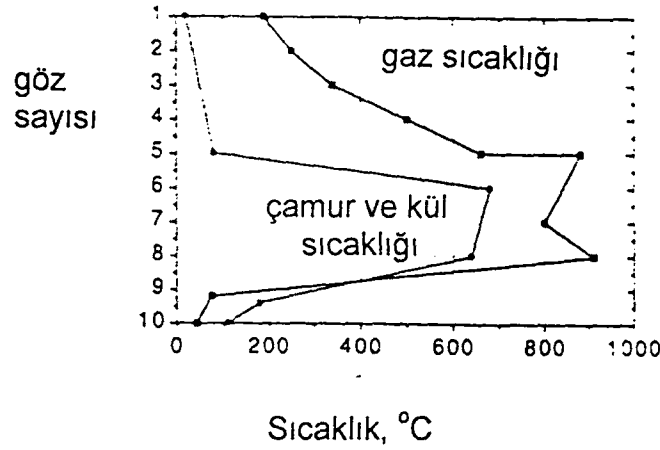
Sonuç olarak çamurun nem içeriği özellikle yanma ünitesinin boyutlandırılması için önemli bir tasarım parametresidir.

1.9.1.2. Çamur Yakma Prosesine Etkisi

Yaş arıtma çamurunun özel yanma karakteristiklerinden birisi yüksek nem içeriğidir. İlk yakma çalışmaları düşük nem içerikli kömürler üzerinde yoğunlaşmaktaydı ve kömür yakma modellerinin çoğusunda kurutma prosesi yok farzediliyordu. Ancak son yıllarda özellikle yaş linyitlerin yakılması boyunca kurutma prosesine önem verilmeye başlanmıştır.

Kurutma ve piroliz arasındaki etkileşimi anlayabilmek için, yüksek sıcaklıkta yaş çamur partiküllerinin davranışlarını takip etmek gerekir. Çamurun pirolizi kömürle kıyaslandığında çok düşük partikül sıcaklıklarında başlar. ÇGF'nın farklı bölümlerinden ölçülen gaz, kül, çamur sıcaklığı çamurun 100 °C partikül sıcaklığına

ulaştığında 5. göze kadar bir gözden diğerine geçerken yavaşça ısındığını göstermektedir (Şekil 1.13).



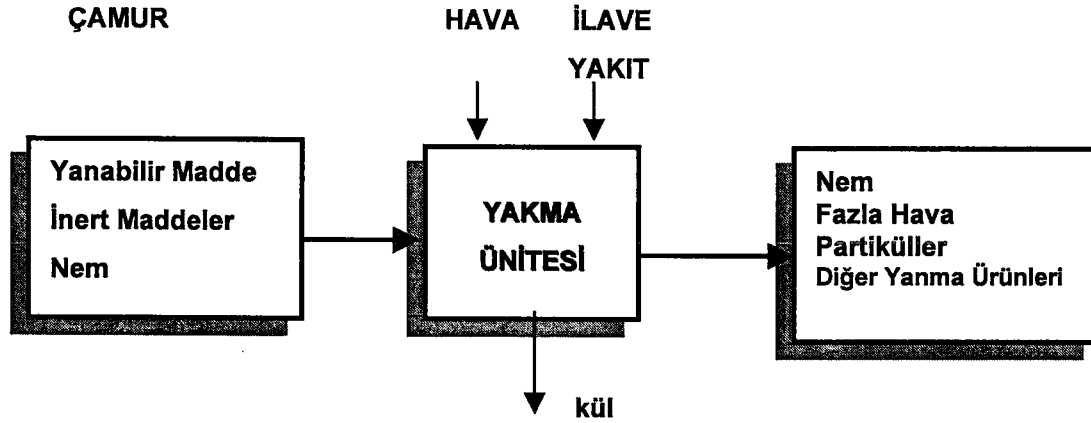
Şekil 1.13: Çok gözlü fırında sıcaklık profili (Loll, 1996)

Diğer faydalı bir bilgi G.Afrika'da bir tuğla üretim fabrikasındaki tecrübelerden elde edilmiştir. Tesiste çamur kille karıştırılmakta ve tuğla bir tunel fırından geçirilmektedir. Çamurun uçucuların 150 °C'de piroliz ve yanmaya başladığını bunun da tuğlanın sıcaklığında bir artışa sebep olduğunu göstermiştir. Vesilind ve Ramsey (1996), laboratuvar ölçekli bir çalışmada 150 °C sıcaklığa kadar ısı değerinin sabit kaldığını ancak bundan sonra hızla azaldığı ve 400 °C'de artığın ısı değerinin kalmadığını göstermiştir.

1.9.2. Yakma

Yakma işleminde esas amaç, yanabilir nitelikteki atıkların kontrollü bir yanma işlemi sonucu önemli oranda hacim ve kütle azaltılması ve açığa çıkan ısı enerjisinin özellikle yerel ihtiyaçları karşılamak için kullanılmasıdır. Yakma çoğunlukla çamur uzaklaştırma imkanlarının sınırlı olduğu büyük tesislerde uygulanır. Yakma işlemine tabi tutulan çamurlar genellikle susuzlandırılmış ancak işlenmemiş çamurlardır ve yakma öncesi stabilizasyon gerekmemektedir. Çünkü aerobik veya anaerobik olarak çamurun stabilize edilmesi sonucu çamurun organik madde içeriği azalacağından yakma işleminde gerekli yakıt miktarı artacaktır.

Çamur yakma işleminin temel akım şeması Şekil 1.14'de verilmektedir.



Şekil 1.14: Çamur yakma işleminin genel akım şeması (Toprak, 1996)

Bir yakma ünitesi genellikle;

- çamur yoğunlaştırıcı
- yumuşatıcı veya ayrıştırıcı
- susuzlaştırma ünitesi (vakum filtre, santrifüj filtre veya pres filtre gibi.)
- yakma ünitesi besleme sistemi
- hava kirliliğini önleme sistemi
- kül bertaraf ünitesi ve
- bunlarla ilgili otomatik kontrol sistemlerini içerir (Toprak, 1996).

Yakma işlemi öncesinde çamurun ısıtılması çamurun yanmasını kolaylaştırır ve yanma süresince ilave yakıt kullanımına gerek kalmaz.

Aritma çamurları tek başlarına yakılabileceği gibi enerji maliyetinin artması nedeniyle kentsel katı atıklarla birlikte de yakılabilir. Mekanik (fiziksel) yöntemler kullanılarak veya atmosferik şartlarda kurutularak (kum yatakları) su içeriği azaltıldıktan sonra, parçalanmış katı atıklarla karıştırılarak yakma işlemi uygulanır. Elde edilen ısı enerji üretimi için elektrik enerjisine dönüştürülür.

Özellikle endüstriyel nitelikli bazı çamurlar; uçucu maddeler, klorürler, fluorürler, toksik bileşenler ve benzer maddeler içerebilmektedir. Bu tür maddelerin varlığı yakma işlemlerinin işletme masraflarını artıran hava kirliliği kontrol sistemlerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

1.9.2.1. Çamurun Yanma Mekanizması

Çamurun yanma mekanizmasının bilinmesi son derece önemlidir. Ağırlıkça maksimum %80 nem içeren, %50 kül (kuru kütle), %90 uçucu madde (kuru ve kül dışındaki kütle) ve %10'dan az sabit karbon içeren çamurun kömürden farklı kok özelliği göstermesi beklenir (Werther ve Ogada, 1999).

Çamurun kurutulması, uçucu maddelerin yanması ve serbest kalması, yüksek kül içeren kok kalıntının yanması, çamurun bütün yanma prosesini etkileyeceği açıktır. Parçalanma (fragmentasyon), büzülme ve aşındırma gibi fiziksel değişimler kadar kurutma, piroliz ve kok ve uçucu maddelerin yanması konusundaki bilgiler çamur yakma sistemlerinin tasarımı, işletilmesi ve bakımı için son derece faydalıdır. Bu bilgiler CO, C_xH_y, NO ve N₂O gibi gazlı kirletici emisyonların kontrolü içinde ayrıca önem taşımaktadır.

1.9.2.2. Yakma Süreci

Yakma işlemi iki kademeli bir süreçtir:

1. Kurutma (50-150 °C)
2. Tutuşma ve yanma

Yakıt ve havaya ilaveten ayrıca yeterli bir bekleme süresi ve türbülans /karıştırma tam reaksiyon (yanma) için gerekli unsurlardır. Kurutma kademesi, susuzlaştırma işlemi ile karıştırılmamalıdır. Bu işlem genellikle mekanik olarak yapılır ve yanma verimini artırır. Yaklaşık %75 nem içeriğine sahip çamur, yakma ünitesine alınır. Tipik bir çamur 3 kg su/kg k.m.'lık bir su oranına ve %75'lik bir uçuculuğa sahip olduğundan, suyu buharlaştırmak için gerekli olan ısıнын tamamı kuru katıların yakılmasından karşılanır (Toprak, 1996).

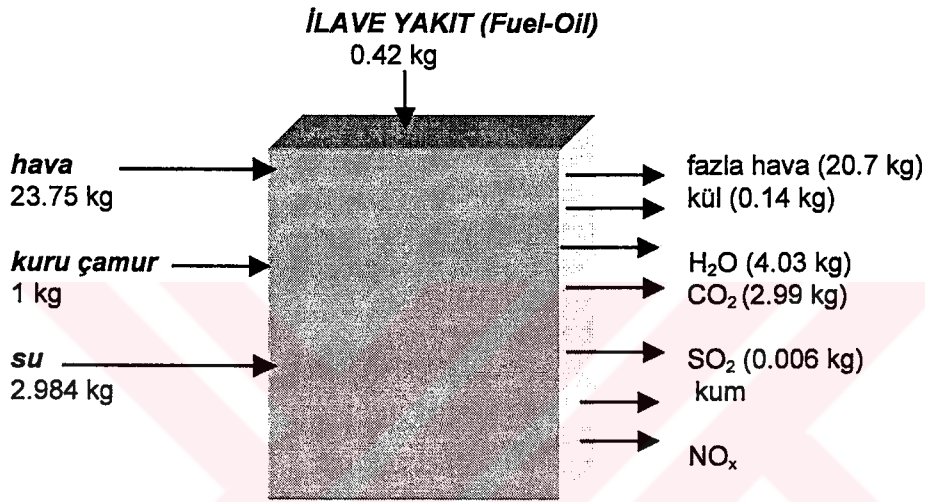
Kurutma ve yakma işlemi şu fazlardan oluşmaktadır:

- Besleme çamurunun sıcaklığı 100 °C'ye çıkartılır. Böylece su, çamurdan buharlaştırma yolu ile uzaklaştırılır.
- Kurutulmuş çamur uçucuların (organik maddelerin) sıcaklığı tutuşma noktasına arttırılır.

1.9.2.3. Materyal Dengesi

Verimli bir yakma sistemi materyal ve enerji dengesini içermelidir. Şekil 1.15 akışkan yataklı yakma ünitesinin materyal dengesini göstermektedir.

Çamur girdisinin tam olarak bilinmesi gerektiğinden, çamur sürecinin iyileştirilmesi ve numune alma işlemleri gereklidir.

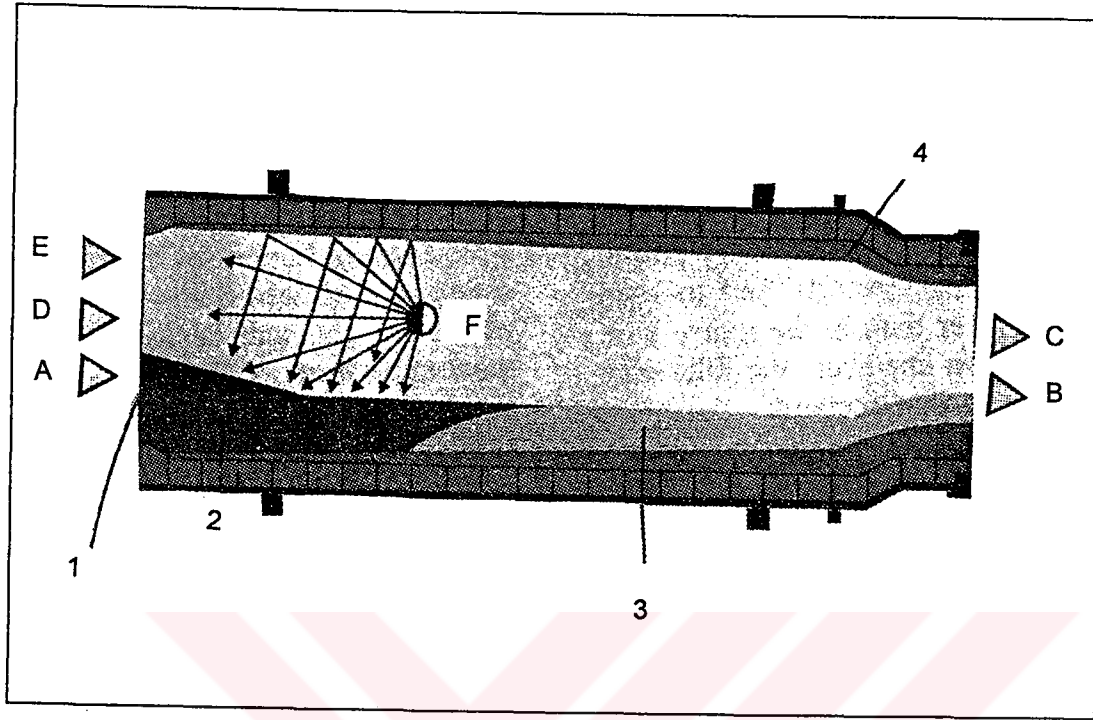


Şekil 1.15: Akışkan yataklı fırında arıtma çamuru yakma için materyal dengesi (Toprak, 1996)

1.9.3. Döner Fırın

Bu tip yakma fırınları yatay düzleme küçük bir açıyla yerleştirilmiş refrakter kaplı yatay ekseninde dönen çelik bir silindirik yapıdan oluşurlar (Şekil 1.16). Döner fırının yüksek tarafından beslenen katı atık şarjı karşı taraftan kül olarak toplanır. İşletme sıcaklığı 800-1600 °C aralığında olabilir. Döner fırın içinde hareketli bir ekipman yoktur. Döner fırından sonra ikinci bir yanma hücresi vardır. Birincil ve ikincil yanma odalarıyla iki aşamalı yakma sistemine sahip, katı atıklar ve zararlı atıkların yakılarak yok edilebilmesinde etkili bir yakma sistemidir (Dilek, 1993).

Döner fırınla çalışan özellikle Japonya'da 20 adet tesis mevcuttur ancak yanma verimleri yeteri kadar yüksek değildir ve ayrıca ÇGF ve özellikle AYP'lerle rekabet şansı fazla yoktur.



A-Atık/besleme
B-Kül/cüruf
C-Baca gazları
D-İlave yakıt

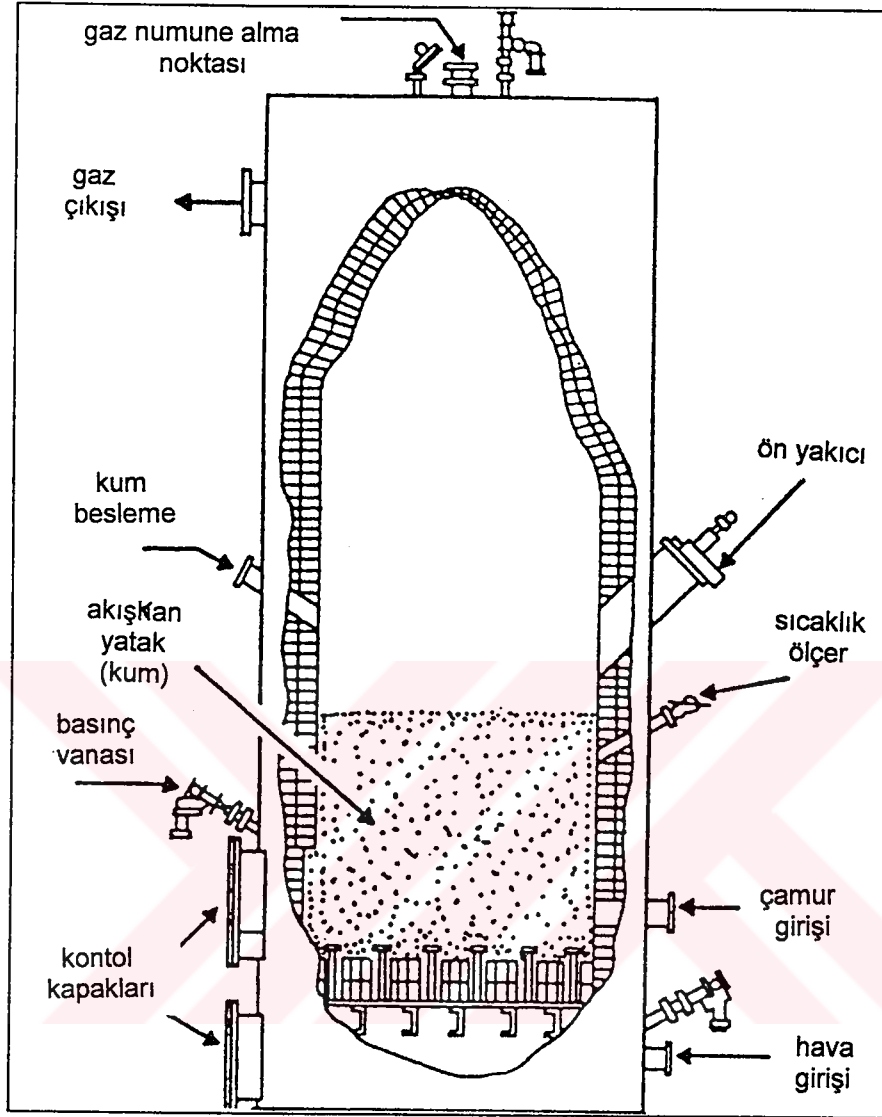
E-Hava
F-Yakma sıcaklığı

1-Atık
2-Yakılacak atık
3-Kül/cüruf
4-Cüruf kaplama

Şekil 1.16: Döner fırın (UNIDO, 1992)

1.9.4. Akışkan Yataklı Fırın (AYF)

Akışkan yataklı yakma sistemleri evsel katı atık, arıtma çamuru, tehlikeli atık, sıvı ve gaz atıklar gibi çok değişik atık türlerinin yakılmasında özellikle son yıllarda kullanılan sistemlerdir. Arıtma çamurlarının yakılması amacıyla ilk AYF uygulaması ise 1962 yılında ABD’de yapılmıştır. Avrupa’da ise ilk akışkan yatak çamur yakma uygulaması 1964 yılında Almanya’da rafineri çamurlarının yakılması için kurulmuştur. Bundan yaklaşık 1 yıl sonra İsviçre’de evsel arıtma çamurları yakılması amacıyla tesis uygulamaya konmuştur. AYF’lar 5-100 t/gün’lük kapasitelere sahiptirler (Restec, 2002). Şekil 1.17’de akışkan yataklı yakma fırınına ait boy kesit gösterilmektedir.



Şekil 1.17: Akışkan yataklı yakma fırınına ait boyuna kesit (Toprak, 1996)

AYF alt kısmında sıcak ($750-850\text{ }^{\circ}\text{C}$) kum yatağının bulunduğu kapalı düşey bir silindirik üniteden oluşur. Akışkan yatak reaktörüne girmeden önce çamura santrifüj veya vakum filtre ile susuzlaştırma işlemi uygulanır. Akışkan yatak, çamur girmeden önce yaklaşık $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar fuel-oil veya gaz kullanılarak ön ısıtma işlemine tabi tutulmalıdır. Akışkan yataklı reaktörlerde, çamur yanma işlemi $815\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki askıda halde bulunan sıcak kumda meydana gelmektedir. Ortamın akışkanlığını sağlamak üzere, kum yatağın altından yukarı doğru fırına $24000-34000\text{ Pa}$ basınç ile hava üflenmektedir.

Akışkanlaşma:

Akışkanlaşma olayı, içi ince katı partiküllerle dolu tabanında geçirgen bir plaka bulunan, silindirik bir kolon altından bir akışkan (sıvı veya gaz) verilmesiyle partiküllerin sıvıya benzer bir davranış göstermesidir.

Büyük bir bölümü yanmaya katılmayan (kül, kum, absorbent) sadece bir ısı deposu işlevi gören maddelerden oluşan akışkan yatak, plaka altından verilen yakma havası kaldırma kuvvetiyle yatak kararsız bir dinamik davranışa zorlanır (Urkan ve ark, 1986).

Akışkan yataklı yakma fırınlarında yanma verimini etkileyen faktörler;

- havanın hızı,
- partikül çapı,
- partikül yoğunluğu,
- gaz yoğunluğu,
- gaz viskozitesi,
- partiküllerin şekli,
- başlangıç yatak boşluğu.

Yatak malzemesinin seçimi işlenecek atık malzemeye bağlıdır. Yatak malzemesi ya kimyasal olarak nötrdür ve sadece bir ısı transfer ortamı olarak görev yapar yada atıkla reaksiyona girebilir. Yatak malzemesi ve atık arasındaki reaksiyonlarla yatak partiküllerinin istenmeyen bir aglomerasyonuna sebep olabilen ve böylece reaktörün işlevini zorlaştıran bazı düşük ergime bileşikler oluşturabilir. Yatak malzemesinin aglomerasyonu yatak malzemesinin erimeye başladığı çok yüksek sıcaklıktaki reaktörden de olabilir. Dikkat edilecek bir diğer faktör atığın tane iriliğidir. Bu üniform ve belirli sınırlarda olmalıdır (Kiely, 1997).

Yanma sonucu oluşan gazlar, kül ve su buharı, ıslak külün uzaklaştırılacağı ıslak sıyırıcıya gider ve daha sonra bacadan dışarı çıkar. Kül sıyırıcıdan siklon separatörle ayrılır. Sıyırıcı suyundan oluşan geri devir akımı, akışkan yatağa giren 1 kg kuru katı madde için yaklaşık 25-40 L civarındadır. Külün büyük kısmı (%99) sıyırıcı suyunda tutulur. Bu suda katı madde içeriği yaklaşık girişteki kuru katı maddenin %20-30'u kadardır. Normal şartlarda geri devir akımı kül lagünlerine gönderilir (Metcalf ve Eddy, 1991).

Akışkan yataklı yakma fırınlarında hava kirliliğini önlemek için ilave sistemlere ihtiyaç vardır. Bunun için ısı değiştiricileri önüne yerleştirilen siklon seperatörler kullanılmaktadır. Aynı amaçla ıslak sıyırıcılar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar emisyon oranının 0.5 kg/t kuru katı maddeden az olduğunu göstermiştir.

Akışkan yataklı reaktörler emniyetli olmalarına rağmen kompleks sistemlerdir ve yetişmiş personele ihtiyaç duyarlar. Genellikle büyük tesislerde kullanılırlar. Sıcak gazlarla teması olan hareketli mekanik kısımların olmayışı, nispeten düşük hava hızları (uygulamada yaklaşık %40), aralıklı çalışma, alan başına yüksek ısı yoğunluğu elde edilmesi, iyi bir karışım, daha az fazla hava ile çalışma, düşük işletme sıcaklığı sonucu (NO_x) oluşumunu doğal olarak azaltması gibi avantajlara sahip akışkan yatak, yatak ve malzeme seçim güçlüğü, yüksek işletme maliyeti ve yüksek bakım giderleri gibi dezavantajları da içermektedir. Ayrıca AYT'da uygun olmayan atık türleri ise şu şekilde sıralanabilir: dolaşımında 25 mm ve kabarcıklıda 75 mm gibi iri atıklar, yüksek sodyum içerikli inorganik tuzlar, yüksek ağır metal içerikli ve düşük ergime noktasına ($< 850^\circ\text{C}$) sahip atıklar (Guyer, 1998).

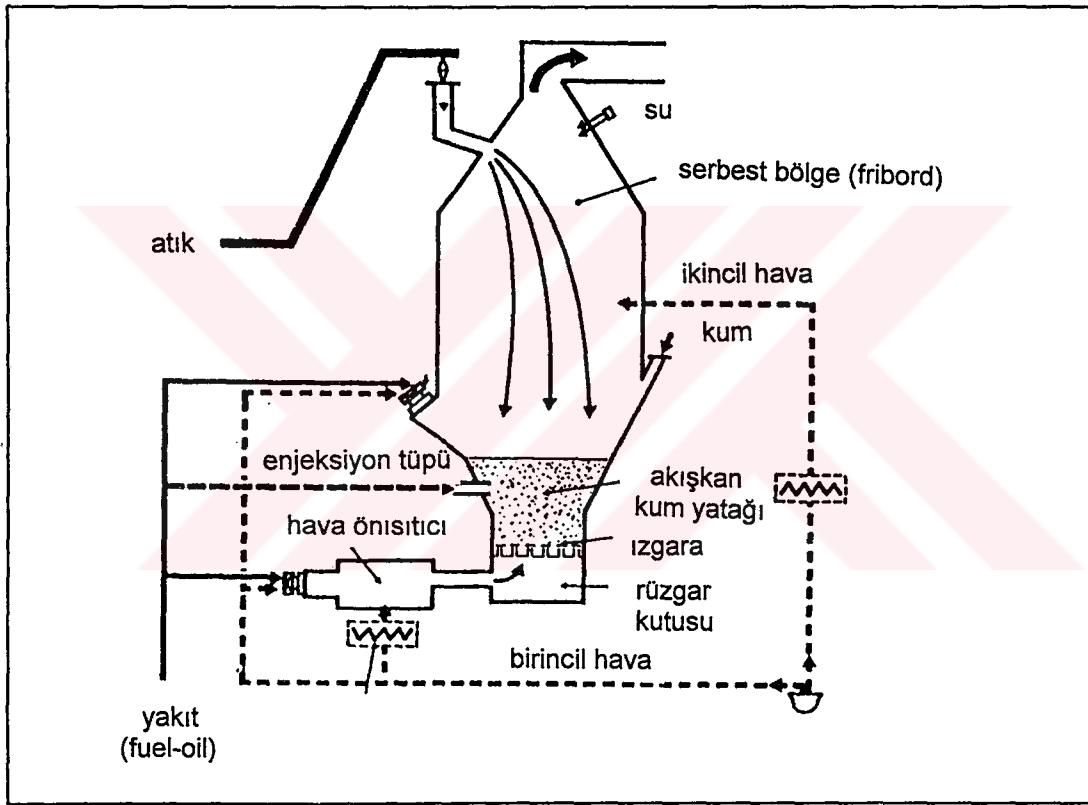
Derinliği 0.5-0.8 m olan kum yatağı, hem termal hemde mekanik (susuzlandırılmış kek yığınlarının dağıtılması) bir role sahiptir. Hava akışı (debi) kuru kekin akışkanlaşmasını (yani yatağın hareket ettirilebilmesi) ve yanmanın gerçekleşmesi (tüm uçucu maddelerin oksitlenmesi) için gerekli oksijeni sağlayabilecek bir seviyede olmalıdır. Aksi takdirde fazla hava kumların saçılmasına neden olur ve yanma verimi azalır. Bu nedenle, ızgaradan geçen hava akışı sadece dar bir aralıkta değişmektedir.

Kurutma ve gazlaştırma kum yatağında meydana gelir. Oldukça yüksek miktardaki ince, kuru katılar ve uçucu katılar 900°C sıcaklıktaki akışkan yatak üzerindeki serbest bölgede tam yanma gerçekleşir. Bu yatağın kendisinden yaklaşık $100-150^\circ\text{C}$ daha yüksek bir sıcaklıktır. İkincil havanın enjeksiyonu genellikle bu aşamada gerçekleşir.

Yakılacak çamur yüksek nem içeriyorsa, taze hava ve çamur akışı daha eşit bir şekilde yatak yüzeyine dağıtılmalıdır.

Gerekli (dış) yakıt ilavesi birkaç yolla uygulanabilir (Şekil 1.18):

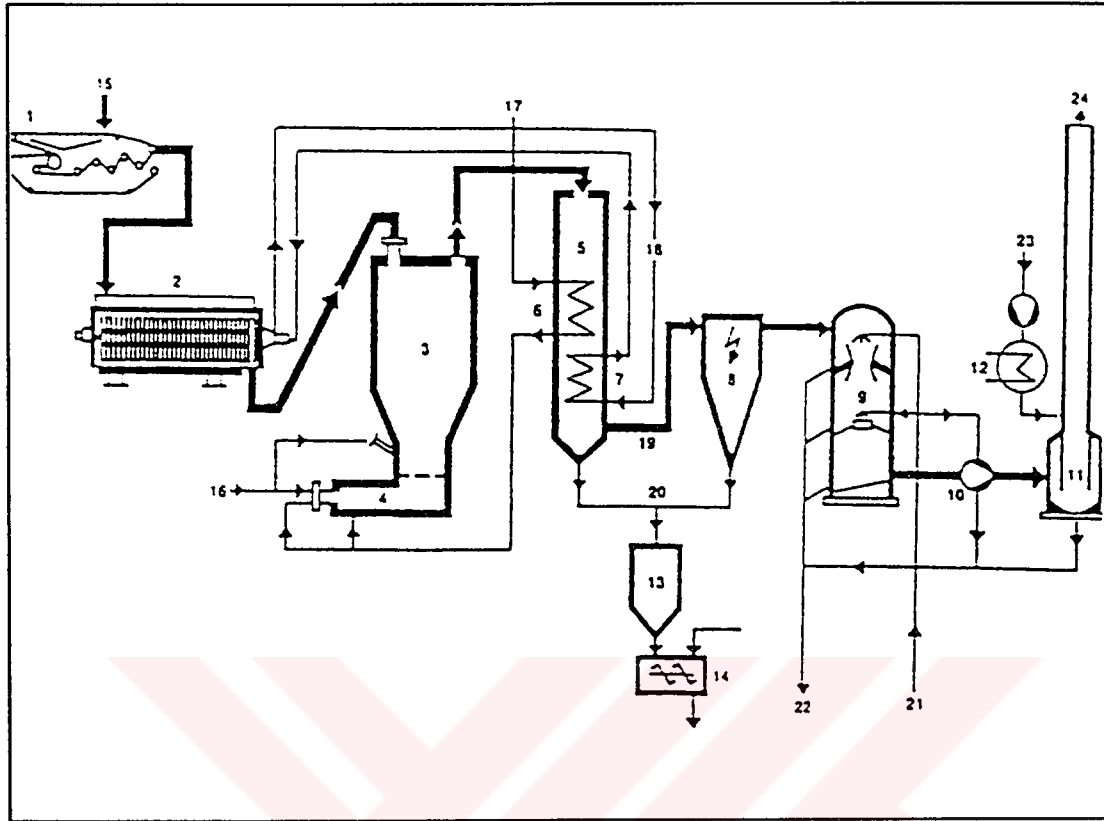
- i- Izgara altındaki rüzgar kutusuna yollanmadan önce ön ısıtma ünitesinden geçirilerek,
- ii- Akışkan yatağın üzerine yerleştirilen ilave ve/veya hareketi başlatıcı yakıcı ile,
- iii- Yatağa fuel-oil, gaz veya kullanılmış yağlar gibi doğrudan verilen yakıt enjeksiyon tipleri ile.



Şekil 1.18: Akışkan yataklı fırına yakıt ilavesi (Degremont, 1991)

Baca gazındaki 800-900 °C sıcaklıkta fırını terkeden tüm yanmış maddeler uçucu kül yapısındadır. Bu inorganik külün uzaklaştırılması birkaç yolla olabilir:

- i- Siklon ve/veya bir kaç soğutma bölümünden sonra elektrostatik filtre ile kuru uzaklaştırma,
- ii- Islak uzaklaştırma.

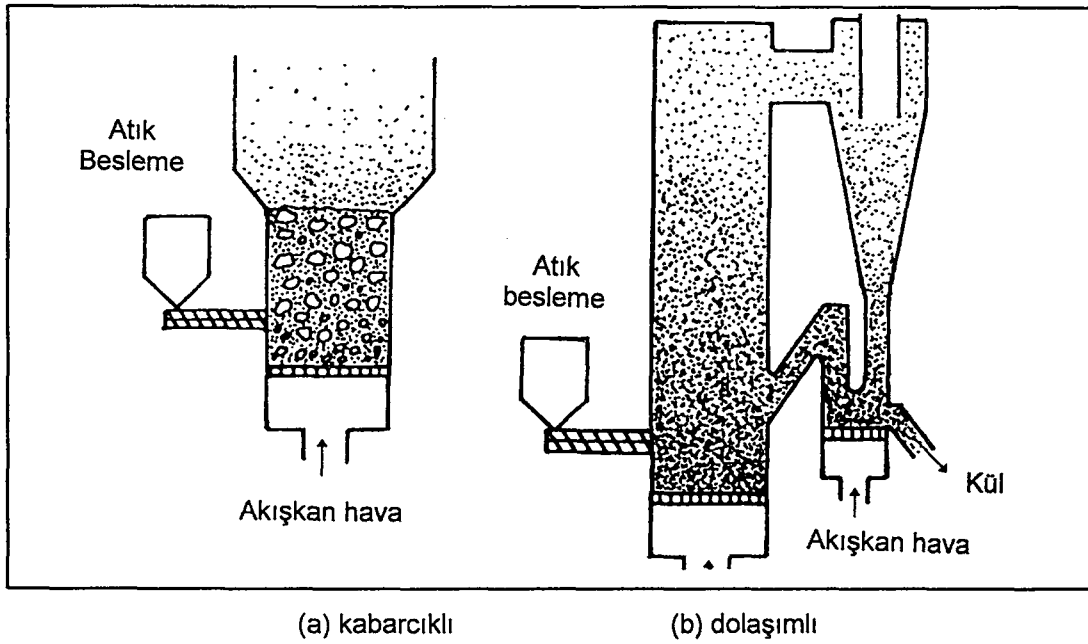


- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Belt pres (sürekli) | 13. Kül silosu |
| 2. Kurutucu | 14. Karıştırma |
| 3. Akışkan yataklı yakma fırını (AYF) | 15. ARITMA ÇAMURU |
| 4. Yanma ünitesi | 16. Yakıt (fuel-oil, doğal gaz veya biogaz) |
| 5. Son yakma odası | 17. Hava |
| 6. Hava ısıtıcı | 18. Isı transfer ortamı |
| 7. Isı kazanımı | 19. Baca gazı |
| 8. Elektrostatik filtre | 20. Kül |
| 9. Radyal akışlı yakıcı | 21. Temizleme sıvısı |
| 10. Fan | 22. Pissu arıtma |
| 11. Baca | 23. Hava |
| 12. Hava ısıtıcı | 24. Temizlenmiş gaz |

Şekil 1.19: Akışkan yataklı yakma fırını proses akım şeması (UNIDO, 1992)

AYF'ları iki ana grupta değerlendirmek mümkündür (Şekil 1.20):

- i. kabarcıklı (KAY) fırınlar ve
- ii. dolaşımli (DAY) fırınlar.



Şekil 1.20: Kabarcıklı ve dolaşimli akışkan yatağın şematik diyagramı (Buekerns ve Schoeters, 1984)

Çizelge 1.13'te ise DAY, KAY ve döner fırının maliyet, malzeme besleme, kirlilik kontrolü ve yanma verimleri bakımından mukayesesi gösterilmektedir.

Çizelge 1.13: Dolaşimli akışkan yatağın (DAY), KAY ve döner fırınla mukayesesi (Rickman ve ark, 1985)

	DAY	KAY	Döner Fırın
Maliyet:			
Sermaye	\$	\$ +yıkayıcı +ekstra besleyici	\$\$ (2 KAT) +yıkayıcı+afterburner
İşletme	\$	\$ +bakım masrafları +daha çok besleyici + daha fazla kireçtaşı +yıkayıcı	\$\$ (2 KAT) +daha çok ilave yakıt +fırın bakım masrafları +yıkayıcı
Kirlilik Kontrolü:			
Cl, S, P	Kireçtaşı (kuru)	Yıkayıcı	Yıkayıcı
NO _x , CO	Türlülanstan dolayı düşük	Yüksek	Yüksek NO _x
Besleme Sistemi:			
Çamur besleme	Doğrudan	Filtre/atomizer	Filtre/atomizer
Besleme boyutu	25 mm'den daha az	13 ve 6 mm'den daha az	Daha iri
Kapladığı alan	Az	2 kat fazla	4 kat fazla
Verim:			
Termik	>78	<75	<70
Karbon	>98	<90	-

Dolaşımlı akışkan yataklar katı, sıvı ve çamur formundaki atıkları maliyeti yüksek ıslak yıkayıcı olmaksızın, asidik gazları kuru kireçtaşı kullanarak yakabilmektedirler. Pilot ölçekte yapılan çalışmalar dolaşımlı yatağın temiz ve etkin bir şekilde işletildiğini ve ekonomik olduğunu göstermektedir. Reaksiyon bölgesindeki yüksek türbülans afterburner, yıkayıcı vs. gerektirmez ayrıca >%99.99 yanma verimi, >% 99 HCl tutma oranı, 40/1 oranında hacim azalması ve <100 mg/L NO_x ve CO emisyonları elde edilebilmektedir (Rickman ve ark, 1985).

Aşağıda sadece dolaşımlı tip üzerinde durulmaktadır.

1.9.4.1. Dolaşımlı Akışkan Yatak (DAY) Fırınları

Bu tip fırınlarda akışkanlaşma hızı yaklaşık 5-9 m/sn arasındadır. Yüksek akışkanlaşma hızı nedeniyle yataktan taşınan partiküller siklon/larla yatağa geri beslenmektedir. DAY uygulamalarında siklon hattı (*düşme borusu*) ve yanma odası (*reaktör, yükselme borusu*) arasında akışkanlaştırılmış ortamda yoğunluk farkı oluşturularak yatak dolaşıma zorlanır. Bu da reaksiyon sürelerinin uzatılarak yanma verimi, kapasite ve SO₂ absorpsiyon etkinliğinin artırılmasını sağlar.

Akışkan Yataklı Yakma sisteminin hem genel olarak hemde çamur için sağladığı avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmektedir (Holmes ve ark, 1993; Werther, 2000):

Avantajları:

- Isı transferi için uygun inert yatak malzemesinin sahip olduğu geniş yüzey alanı ve yüksek türbülans yatakta tam yanmayı sağlayan çok iyi karışım sağlar.
- Yığın halindeki çamurun sıcak yatakta kalma süresi özellikle dolaşımlı tiplerde yeteri kadar uzundur (5-8 sn veya daha fazla) ve ayrıca ileri bir yakma ünitesi gibi hareket eden fribord (serbest bölge), organik maddelerin termik olarak tamamen bozunmasını sağlar.
- Yüksek kül, kükürt ve nem içerikli, düşük ısı değere sahip atıkların çevre kirliliğine sebep olmayacak şekilde yakılmasına imkan verir.
- Çamur kompozisyonu veya su içeriğindeki kısa süreli değişimleri büyük ısı rezervuarı tarafından dengelendiği için sıcak inert yatak malzemesinin büyük bir

kısmı ani sıcaklık değişimlerini önleyen ve ayrıca refraktere zarar veren termal şokları azaltan bir termal volan gibi hareket eder. Bu özellik ayrıca sıcak zonda hareketli kısım olmaması dolayısıyla düşük bakım maliyeti sağlar (pek çok AYW'da refrakter 20 yıl kullanılabilir).

- Yaklaşık 5 °C/s'lik düşük yatak soğuma hızı aralıklı çalışmaya izin verir.
- Kazandaki sıcaklık nisbeten düşüktür. Bu nedenle NO_x oluşumu azdır ve kül ergimesi olmaz.
- Kireçtaşı ve dolomit gibi absorbanların ilavesiyle yanma sonrasında kükürt oksitlerin yüksek oranda tutulması mümkündür.
- Yatak içerisinde ısı aktarım (transfer) katsayıları yüksektir (Bu da yanabilirliği düşük olan atıkların daha hızlı tutuşmasını sağlar).
- Çok iyi bir gaz-katı ve katı-katı karışımı sağlaması nedeniyle çabuk yanma sağlanır.
- Yüksek yanma verimlerine sahiptir. Genel olarak yanma verimi %97.5-99.5 arasındadır. Özellikle yanmamış karbon kaybı oldukça azdır.

Dezavantajları :

- Yüksek gaz geçiş hızları nedeniyle taneciklerin sürüklenmesi yanma verimini azaltır
- Akışkan yataklarda küçük ölçekten büyük ölçeğe doğru tasarım yapmak zor olabilir. Özellikle yatak çapları ve yüksekliği tasarım teknolojisiyle sınırlıdır.
- Külün uzaklaştırılması potansiyel bir problem oluşturabilir.

1) DAY' ta Yakma Olayı

DAY'ta yakma sürecini üç bölgeye ayırarak incelemek mümkündür. Bunlar;

i- alt (yığın) bölge

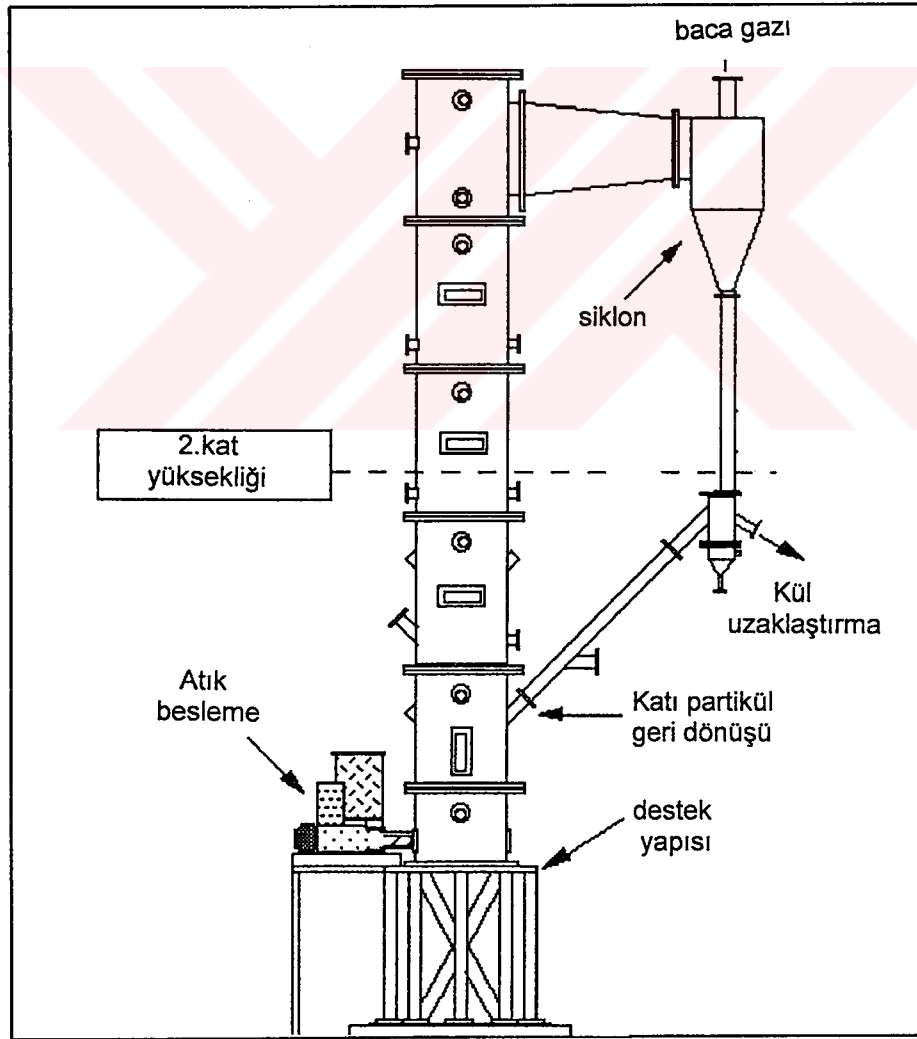
ii- üst (seyretilik) bölge

iii- geri dolaşım borusu

DAY'ın dönüş borusu, geri besleme yatağı ve bağlantı borularında meydana gelen yanma diğer bölümlerle mukayese edildiğinde ihmal edilebilir (Şekil 1.21).

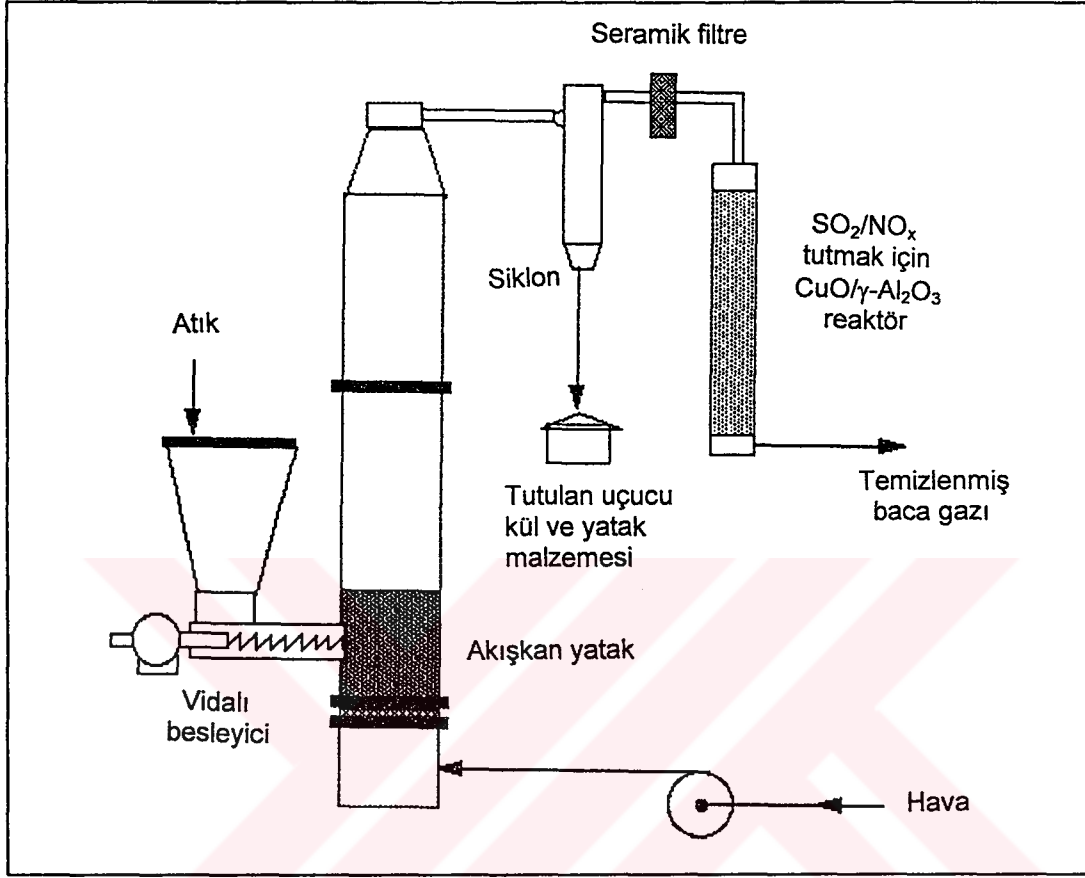
Yoğun bölgede akışkanlaşma yatağı beslenecek arıtma çamuru için gerekli hava miktarının birincil hava ile sağlanmaktadır. Bu bölgeye vidalı besleyiciden taşınan çamur ile dönüş siklonundan geri beslenen yanmamış çamur taneleri gelmektedir. Henüz yanmasını tamamlayamayan çamur tanecikleri birincil ve ikincil siklonda tutularak bu bölgeye taşınmaktadır. Uçucu salınımı ve kısmi yanma bu bölgede gerçekleşir. Ticari uygulamalarda bu bölgede aşınma problemi yüzünden refrakter kaplanmaktadır.

Yakılacak çamur uçucu madde içeriğine bağlı olarak NO_x emisyonunu önlemek için verilecek ikincil hava ile kademeli yakma uygulanır. Yatak içerisindeki yanmanın çok az bir kısmı siklon bölümünde gerçekleşmektedir.



Şekil 1.21: Dolaşimli akışkan yatağın şematik gösterimi (ACERC, 1999)

DAY'ta gaz temizleme sistemi Şekil 1.22'de gösterilmektedir.

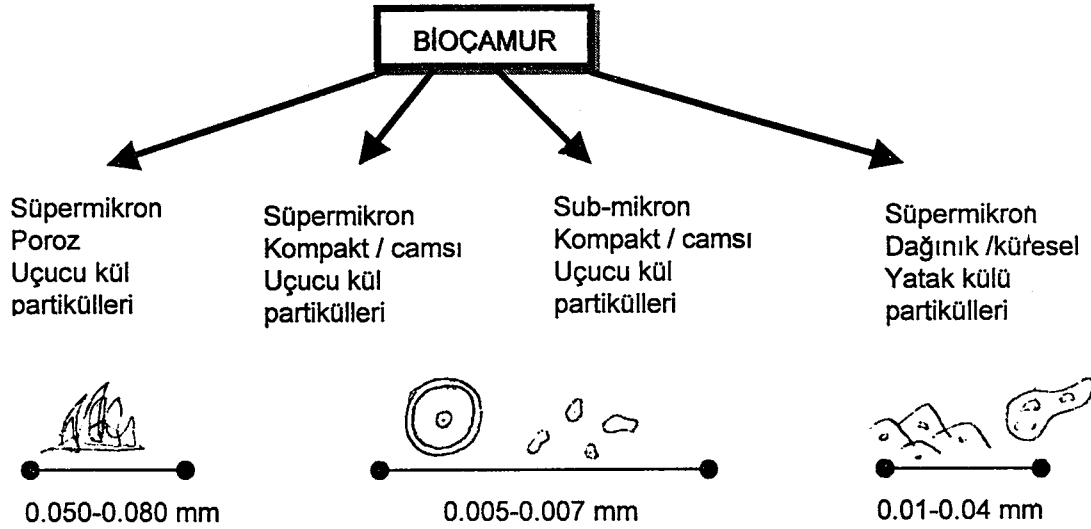


Şekil 1.22: DAY'ta gaz temizleme sistemi (ACERC, 1999)

1.9.4.2. Akışkan Yatakta Kül Yapısı

Akışkan yatakta yakma sonucu bioçamur atıkta (biyolojik atık) 4 temel kül yapısı oluşmaktadır (Şekil 1.23). Bunlar;

- i- Süpermikron poroz uçucu kül partikülleri
- ii- Süpermikron kompakt küresel uçucu kül partikülleri
- iii- Sub-mikron kompakt küresel uçucu kül partikülleri
- iv- Süpermikron yatak külü partikülleri (dağınık veya küresel)



Şekil 1.23: Çamurdaki yakma boyunca oluşan kül yapısı (Rink ve ark, 1995)

1.9.4.3. AYF Boyutlandırma

Akışkan yataklı yakma fırını kullanarak arıtma çamuru yakma tesisinin boyutlandırılmasına ait bir örnek aşağıdaki şekilde gösterilebilir. Ekonomik bir çamur yakma işlemi minimum boyutta bir tesis gerektirir. Bunun için:

$$\text{Susuzlaştırılmış çamur (k.m. = \%25)} = 0.6 \text{ t/s k.m.}$$

$$\text{Kurutulmuş çamur (k.m. > \%33)} = 0.9 \text{ t/s k.m.}$$

K.m., kuru katı miktarını ifade eder; şöyle ki 0.6 t/s k.m. %96-98'lik bir su içerikli pissu çamurunun 15-30 t/s'e tekabül eder.

Bir akışkan yataklı yakma fırınının maksimum akış hızı kapasitesi yaklaşık 10 t/s k.m.'dir, ancak birkaç daha küçük yakma fırını temin etmek daha uygun olabilir.

Bir yakma tesisinin tasarımı için şu bilgiler gereklidir (UNIDO, 1992):

Yakıt:

- Tipi, Belediyeye ait arıtma çamuru
- Endüstriyel arıtma çamuru
- Kontamine olmuş toprak, atık yağ v.s.;

Su içeriği;

Kuru maddenin yanabilen kısmı;

Termal güç ve k.m.'nin (C, H, N, O, Cl, F) analizi

Çıktı:

Atığın gerekli akış hızı; veya

İstenen buhar çıkışı veya tasarım ısısı;

Tesisin çalışma süresi (s/gün, gün/hafta)

Enerji Üretimi:

Türü (buhar, sıcak su, elektrik v.s.);

Enerji verisi (sıcaklık, basınç, elektrik voltajı)

Yardımcı Malzemeler:

Çalıştırmak için ilave yakıt (petrol, doğal gaz)

Yüksek termal gücünde tehlikeli atık

Soğutma suyu, elektrik

Yasalar/Tüzükler/Normlar:

Çevre güvenliğini göz önünde bulunduran ulusal, bölgesel, yerel tüzükler

Bir yakma tesisinin ilave yatırım maliyetleri Çizelge 1.14'te gösterilmektedir.

Çizelge 1.14: Çamur yakma tesisinin yatırım maliyetinin kısımları (UNIDO, 1992)

Seçenekler	Kümülatif %
Dağıtım, depolama, çamur susuzlaştırma, yakma, baca gazı ekstraksiyonu	100
+ sprej soğutucu, elektrostatik filtre	115
+ atık ısı kazanı ve ekonomizer	165
+ proses kontrol sistemi	190
+ aktif karbon filtre ve ısı değiştirici	225
+ DeNO _x -tesisi	240

1.9.5. Çok Gözlü Fırın (ÇGF)

Çok gözlü yakma fırınları, basit ve dayanıklı olması ve besleme hızında salınımlar olsa bile çok değişik maddelerin (evsel ve endüstriyel nitelikli katı atıklar ve arıtma çamurlarının) yakılması amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Evsel atıksu arıtma sisteminden açığa çıkan çamurların yakıldığı ilk çok gözlü yakma fırını 1935 yılında kullanılmıştır.

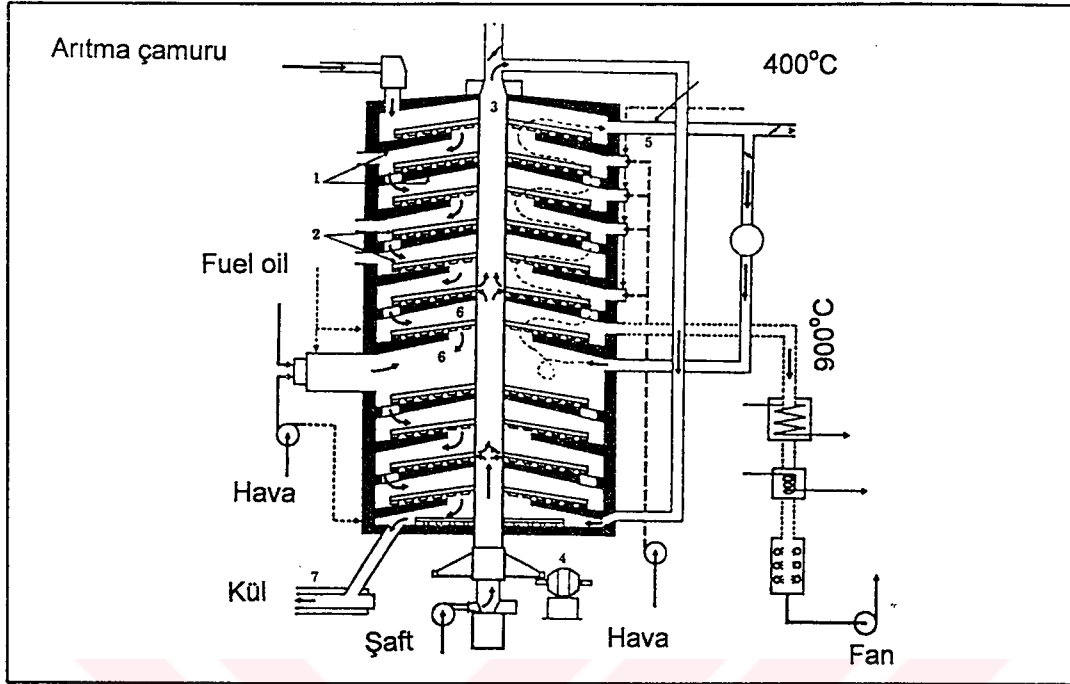
ÇGF silindir şeklinde bir üniteden ibaret olup, gözlerin iç yüzeyleri ısı yansıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. Merkezde her bir göze ait birer kolun bağlı olduğu dönen bir shaft vardır. Kapasiteleri 3-100 t/gün kuru çamur arasında değişmektedir.

Susuzlaştırılmış çamur (kek) en üstteki ocaktan reaktöre girer ve yukarıdan aşağı merkeze doğru dönen kolların etkisiyle bir gözden diğerine hareket eder (Şekil 1.24). En yüksek sıcaklık çamurun yandığı ve yanmayı sağlamak ve fırını ısıtmak amacıyla yardımcı yakıtı ihtiyaç duyulan ortadaki ocakta olmaktadır. Yanma bölgesinde sıcaklık 760-925 °C arasında değişmektedir.

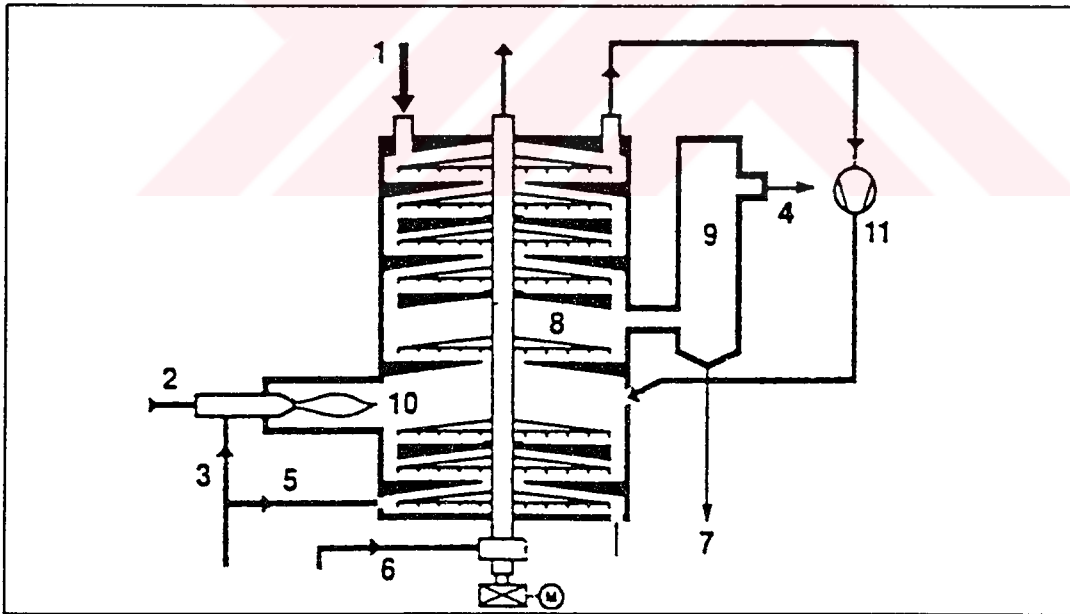
ÇGF'da çamur suyunun uzaklaştırılması sistemlerine ilaveten ikincil prosesler olarak kül işleme sistemleri ve hava kirliliğini önlemek için gerekli sistemler de yer almaktadır (Şekil 1.25). Uygun işletme şartlarında atmosfere verilen partikül miktarı yaklaşık 0.65 kg/1000 kg kuru çamur'dan daha azdır.

Fırına verilen çamur, fırının maksimum buharlaşma kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı, %15'den daha fazla katı madde içeriğinde olmalıdır. %15-30 k.m. içeren çamurların yakılması sırasında genellikle yardımcı yakıtı ihtiyaç vardır. Çamurun %50'den daha fazla katı madde içermesi durumunda standart fırınlarındaki limit sıcaklığı aşacak sıcaklıklar oluşabilir. Ortalama ıslak çamur keki yükleme oranı yaklaşık 40 kg/m².s (m² etkili ocak alanı) seçilebilir. Eğer arıtma çamuru yüksek miktarda uçucu madde içeriyorsa ek yakıtı ihtiyaç olmayacaktır. Ek yakıt ihtiyacı, çamurun ısı değerine ve nem içeriğine bağlıdır (Metcalf ve Eddy, 1991).

Çok gözlü yakma fırınları, suyu alınmış çamur kekini inert küle dönüştüren proseslerdir. Proses kompleks olduğundan ve özel olarak yetişmiş operatöre ihtiyaç duyduğundan 0.2 m³/s'den daha büyük debisi olan tesislerde kullanılmaktadır. ABD'deki yakma fırınlarının %60'ı, Japonya'daki fırınların ise yaklaşık yarısı ÇGF'dır (Winkler, 1993).



Şekil 1.24: Çok gözlü yakma fırını (Degremont, 1991)



- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| 1. Arıtma çamuru veya katı atık | 7. Kül |
| 2. Yakıt | 8. Çok Gözlü Fırın |
| 3. Hava | 9. Son yakma odası |
| 4. Baca gazı | 10. Ateşleme odası |
| 5. Kül soğutma havası | 11. Sirkülasyon fanı |
| 6. Soğutma havası | |

Şekil 1.25: Çok gözlü yakma fırını proses akım şeması (UNIDO, 1992)

1.10. Diğer Termik İşlemler

1.10.1. Islak (Yaş) Hava Oksidasyonu

Islak hava oksidasyonu (IHO), herhangi bir yanabilir maddenin 120-370 °C arasında su içeren bir ortamda –sulu fazda- oksitlenebileceği esasına dayanır. Bu sürecin işletilmesi, çok düşük miktarda katı içeren çamurun suyunun uzaklaştırılmasında oldukça zordur. Genelde, uygun sıcaklık, basınç (1-12 MPa), reaksiyon süresi ve yeterli basınçlı hava veya oksijen sağlanırsa istenen yakma verimi elde edilebilir.

IHO süreci 'Zimpro' süreci olarak patentlenmiştir. Bu süreç aynı zamanda, *ıslak yakma* veya *ıslak tutuşturma* olarak da anılır. IHO süreci, diğer alışlagelen yakma sistemlerinde uygulanması gereken ön susuzlaştırma veya kurutma işlemlerini gerektirmez. Çamurdaki su oranı %99 mertebesinde olabilir.

IHO sürecinde diğer yakma ünitelerinde yakma işlemi için gereken 750-1300 °C'lik yüksek sıcaklıklar gerekmez. Organik maddelerin ıslak oksidasyonu 150-200 °C'de gerçekleşir. IHO sürecini diğer sistemlerden ayıran en önemli fark alevsiz oksidasyonun oluşmasıdır. Oksidasyon su içerisinde düşük ısıda gerçekleştiğinden hava kirlenmesi sorunu oluşmaz. Uçucu kül, toz, kükürt dioksit veya azot oksitler meydana gelmez.

Prosesle ilgili uygulamalara ve aşamalarına gelince: İlk endüstriyel uygulama Hollanda'da 22800 t/yıl k.m. kapasiteli bir tesiste gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık %5 katı içerikli arıtma çamuru 3-5 mm tane boyutuna öğütülmüş, homojenleştirilmiş ve reaktöre saf oksijenle birlikte süspansiyon olarak beslenmiştir. Organik maddeler en az 280 °C sıcaklıkta ve yaklaşık 10 MPa basınçta dağıtılmaktadır. Atık çamurdaki mevcut S, Cl ve P çözünen ve prosesi sıvı formda terkeden sülfat, klorit ve fosfat bileşiklerine dönüşmektedir (Voorneburg ve Veen, 1993).

1.10.2. Piroliz

Organik maddelerin 300-900 °C arasında değişen sıcaklıklarda oksijensiz ortamda termal bozunması işlemidir. Piroliz bir seri karmaşık kimyasal reaksiyonlar içerir. Elde edilen piroliz ürünleri ise şu şekildedir: - Piroliz gazı - kok ve yağ

Gaz, yakıt olarak kullanılabilir. Kok, yakıt olarak yakılabilir veya bertaraf edilebilir. Oysa yağ kimyasal endüstriler için bir hammadde veya yakıt olarak kullanılabilir (Rumphorst ve Ringel, 1994).

Çamurdan yağ üretim prosesi (OFS) :

- Ön kurutulmuş çamur oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklarda ve çamurun organik kısmını buhara dönüştüren atmosfer basıncından daha yüksek basınçlarda ısıtılır.
- Bu buharlar hidrokarbonlara dönüştürülür.
- Çamurdaki yüksek silikat ve bakır içeriği reaksiyon için ilave katalist görevi görür.
- Elde edilen yağ yüksek vizkoziteye ve ısı değere (6925-9075 kcal/kg) sahiptir (Loll, 1996).

Prosesin avantajları:

- Çamurun küçük hacimli inert artığa dönüştürülmesi
- Çeşitli kimyasal proseslerde kullanılabilen yüksek kaliteli yağ üretimi
- Düşük çalışma sıcaklıkları ve ağır metallerin çoğunlukla yan ürünlere bağlanmasından dolayı katran ve dioksinler gibi zararlı yan ürünlerin oluşumunun gerçekleşmemesi.

Almanya'da Tübingen Üniversitesinde bu proses 300 °C gibi düşük bir sıcaklıkta uygulanmış ve kg kuru çamur başına %20-30 yağ üretilmiştir (Hudson ve Love, 1996).

1.11. Birlikte Yakma (co-combustion)

Aritma çamuru tek başına yakılabileceği gibi, kömürle çalışan termik santrallerde, katı atık yakma tesislerinde ve diğer proseslerle birlikte yakılması da mümkündür. Çoğu kez çamur, proses veya ürünün olumsuz etkilenmemesi için tesis kapasitelerinin sadece küçük bir kısmını karşılamak üzere kullanılmaktadır.

Birlikte yakma işleminin avantajları şunlardır (Reimann, 1995):

- i- İş yürütecek iyi eğitilmiş ve deneyimli personelle yakma tesisinin uygun kapasitede kullanımı mümkündür. Bu durum, uzun ve yorucu olan çamur yakma fırınının inşası için onay alındığı durumlarda kısa vadeli bertaraf imkanı sağlayabilir. Mevcut atık yakma tesislerindeki evsel atıklarla birlikte yakılması için ilave bir onay gerekmemektedir.
- ii- Günümüzde modern termik santraller, çamurla birlikte yakma boyunca emisyonlardaki beklenen artışın üstesinden gelebilen baca gazı temizleme sistemiyle donatılmışlardır.

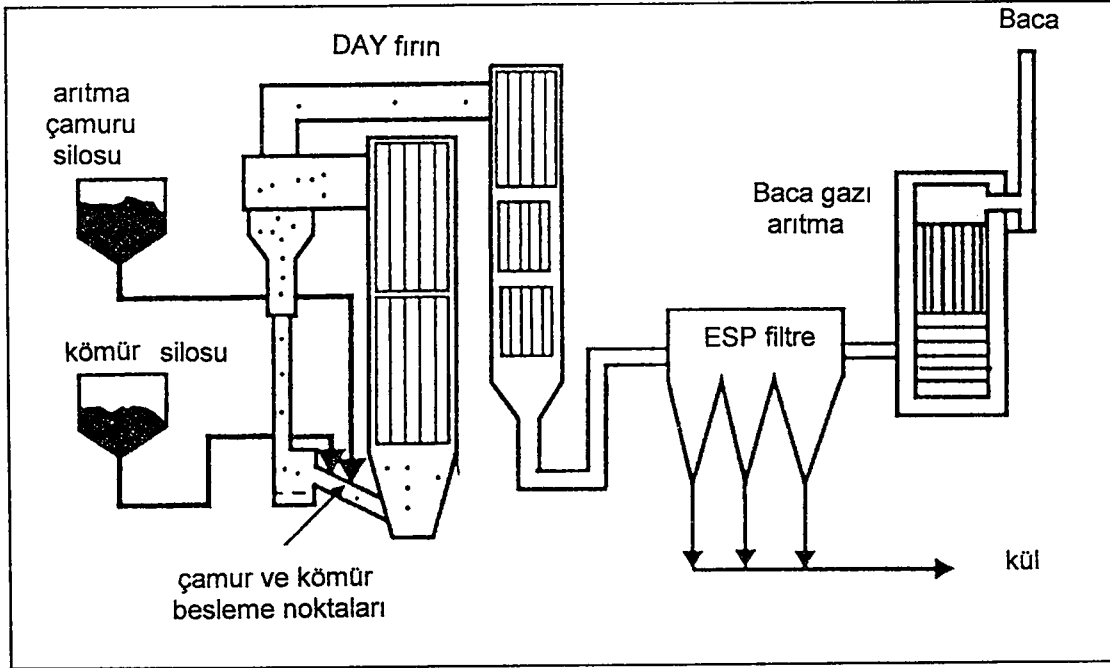
1.11.1. Termik Santrallerde Yakma

Aritma çamurunun kömürle birlikte termik santrallerde birlikte yakılması için yakıt hazırlama, yakma sisteminin modifikasyonu ve açığa çıkan kirletici yan ürünlerin taşınması hususlarının dikkate alınması gerekir. Genellikle çamur ön kurutmaya tabi tutulur ve pulverize sistemlerde ayrıca öğütülür.

1.11.1.1. Pulverize Sistem

Pulverize kömürle çalışan termik santrallerde, kömür partiküllerinin %90'ı – 0.075 mm'ye öğütülerek daha sonra havayla yakma ünitesine taşınmaktadır. Yüksek verimli yanma ve düşük emisyon değerleri elde etmek için bazı yakma metodları kullanılmaktadır. Burada; çamur önce kurutulmakta, öğütülmekte ve pnömatik olarak kazanlara beslenmektedir. Aritma çamuru ya kömürle harmanlanarak birlikte, yada çoklu-yakıt kullanımına elverişli yakıcı kullanılıyorsa ayrı ayrı beslenebilmektedir. Çamur yakma işlemi yüksek sıcaklıklarda meydana gelmekte, çamur külü ve kömür ergimiş yapıda sistemden uzaklaştırılmaktadır (Şekil 1.26).

Yakma, kok kömürüyle gerçekleştirildiğinde sadece %10'a kadar su içerikli çamura izin verilirken, kazanın nispeten yüksek nem oranına sahip yakıtlarla çalışmak üzere tasarlandığı linyit esaslı kazanlarda %40-50'ye kadar kabul edilebilmektedir (Hein ve Spliethoff, 1995).



Şekil 1.26: Pulverize kömürle çalışan termik santralde arıtma çamuru kurutma ve birlikte yakma prosesi (Römer, 1991)

Arıtma çamuru, filtre preste susuzlaştırılmadan önce şartlandırma için flokülant madde ile karıştırılır. Filtre keki daha sonra pulverize kömür yakma ünitesine girmeden önce döner fırında kurutulur. 16 t/s %25 k.m. içerikli çamur kömürle birlikte sistemde yakılır. Almanya’da 300 MW elektrik üretim kapasiteli bir termik santralde 2000 saatlik bir tesis çalışmasında 4000 t kuru çamur 4 kazandan birinde birlikte yakılmış ve kömüre eklenen kurutulmuş çamur %2-20 oranında kademeli olarak kazana ilave edilmiştir. Sonuçta yakma esnasında tesisin çalışmasında önemli bir problem olmadığı ancak çamurun yüklenmesini sağlayan ekipmanda malzeme aşınmaları olduğu tesbit edilmiştir (Billotet, 1992).

Hollanda-Amsterdam’da pulverize kömürle çalışan 630 MW kapasiteli bir termik santralde 1500 t (3 haftalık) ve 13000 t (5 haftalık) kuru çamur (2865 kcal/kg ısı değere sahip) birlikte yakma testleri sonucunda;

- NO_x emisyon seviyelerinde artış olmadığı,
- Hg hariç; Cl, F ve ağır metal emisyonlarında artış olmadığı,

-kömüre nazaran çamurun yüksek kül içeriğinden dolayı katı artık ürünlerin özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı,

-briket formunda verilen (beslenen) kuru çamurun gevrek olduğu ve taşıma-depolama esnasında toz haline kolayca ayrılacağı,

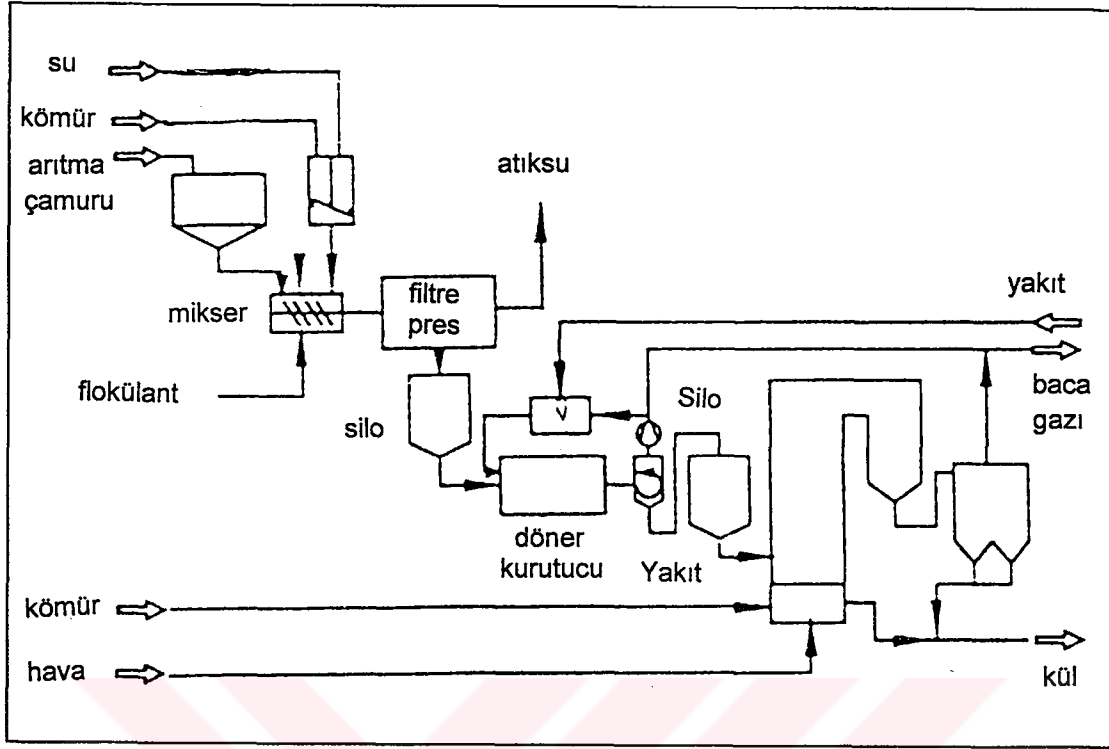
-çamurla birlikte yakmanın sebep olduğu ciddi bir kirlenme probleminin olmadığı,

-%6-10 (ağırlıkça) oranlarında çamurun kömürle birlikte yakılmasının fırında korozyon problemi yaratmadığı, tespit edilmiştir.

Yine Amsterdam'da yapılan ve bölgesel arıtma çamuru üretimine eşdeğer 75 bin t/yıl kuru çamurun birlikte yakılması çalışmalarına 1998 yılında başlanmıştır (Ponsen, 1998). Bir diğer uygulama da İngiltere'de %30 birlikte yakma oranında gerçekleştirilmiş ve yanmada herhangi olumsuz bir etki gözlenmemiştir (Abbas ve ark, 1992).

1.11.1.2. Akışkan Yataklı Sistem

Almanya'da 93 t/s kapasiteye sahip bir termik santralde %30 k.m. içerikli arıtma çamuru kömürle birlikte AYT'da sisteme beslenmiş ve yanma ve emisyon özellikleri bakımından son derece iyi sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 1.27). SO₂, NO_x, CO ve partikül emisyonları bakımından, hem kömür hemde atık yakma için sağlanması gereken standartlara ulaşılmıştır. Arıtma çamurundaki kül içeriği kömürden daha yüksek olmasına rağmen, özellikle ağır metal konsantrasyonlarının nisbeten düşük olduğu ve külün inert olarak değerlendirilebileceği ancak Hg emisyonlarında artış beklendiği ve Hg'nin %95'inin ESP sonrası yerleştirilen ventüri adsorberi ile azaltıldığı ve bu olumlu sonuçlar sonrası, 1995 yılında 65 000 t/yıl kuru bazda çamurun kömürle birlikte yakılmasına izin verildiği belirtilmektedir (Bierbaum ve ark, 1997).



Şekil 1.27: DAY'lı termik santralde kömür ve arıtma çamurunun birlikte yakılması (Bierbaum ve ark, 1997)

1.11.2. Evsel Katı Atıklarla (MSW) Birlikte Yakma

Katı atıklarla birlikte yakmada esas amaç, çamur ve katı atıkların yakma maliyetlerinin birleştirilmesidir. Proses, katı atık ve arıtma çamurunun yanmasını destekleyerek ve istendiğinde ilave yakıt kullanılmaksızın buhar üreterek çamurun kurutulması için gereken ısıyı üretebilmektedir (Loll, 1996). Ayrıca modern baca gazı temizleme teknolojisine sahip bazı katı atık yakma fırınlarının kapasiteleri de bu şekilde kullanılabilir. Katı atık yakma tesislerinin bir çoğu tam kapasiteyle çalışmasına ve çamurla birlikte yakma fırsatı sağlamıyor olmasına karşın, Almanya'da çamurla katı atığın birlikte yakıldığı 10 adet tesis mevcuttur. Sadece Danimarka, Japonya, İsveç ve İsviçre'de üretilen atığın %50'den fazlası yakılmaktadır (Çizelge 1.15).

Çizelge 1.15: Çeşitli ülkelerdeki yakılan katı atık miktarları (Liem, 1995)

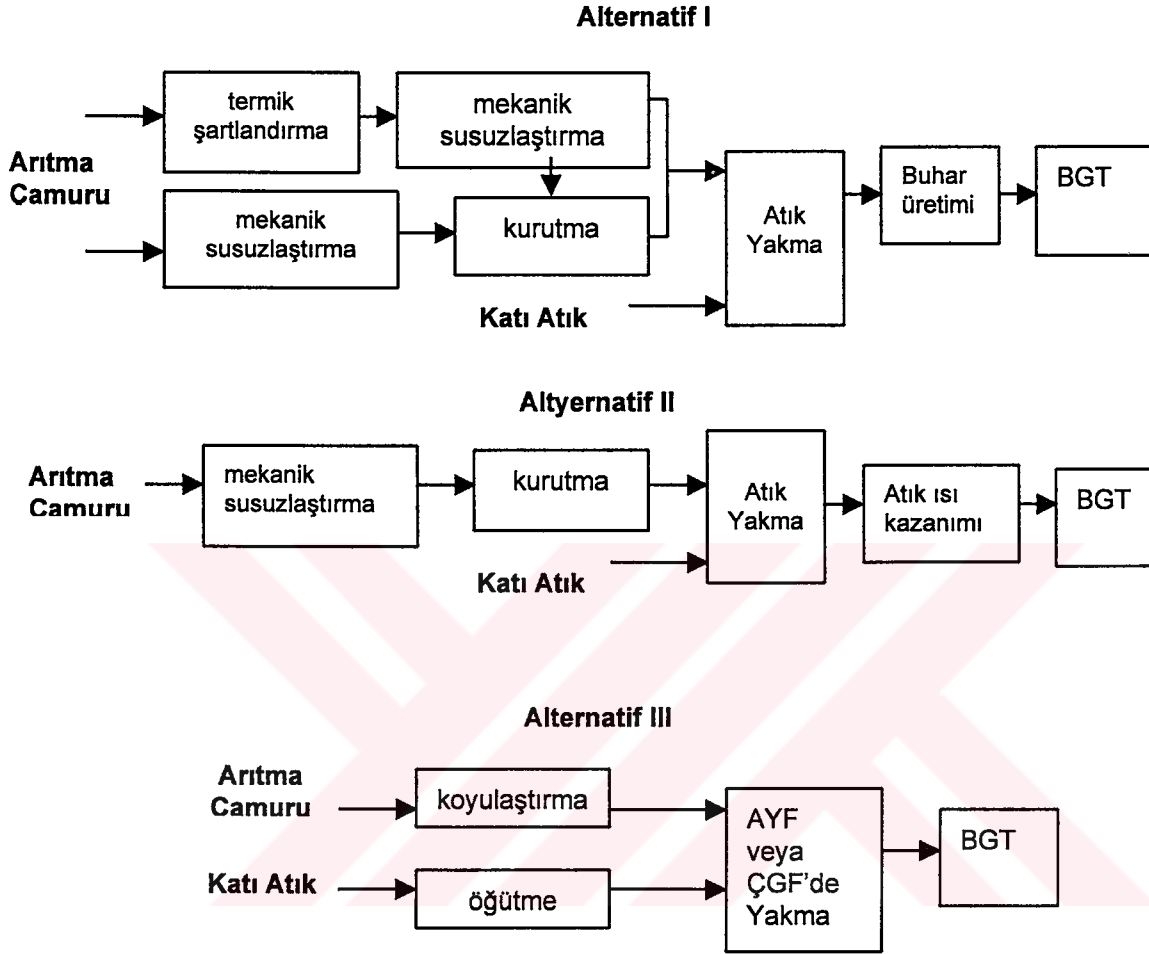
ÜLKE	YAKILAN KATI ATIK MİKTARI ($\times 10^6$ t/yıl)	YAKILAN ATIĞIN TOPLAM KATI ATIĞA ORANI (%)	KATI ATIK YAKMA TESİSLERİNİN SAYISI
Avusturya	0.3	18	2
Almanya	9.3	23	49
ABD	28.9	16	152
Danimarka	1.5	70	48
Fransa	6.4	40	260
Hollanda	2.8	46	11
İsveç	1.6	55	22
İsviçre	2.3	80	48
İngiltere	2.8	10	33
İtalya	2	10	54
Japonya	37.6	73	1841
Kanada	1.1	4	13
Norveç	0.4	23	50
TOPLAM	97	44	2583

Çamurun evsel katı atıklarla birlikte yakıldığı tesislerde çamur/katı atık oranı genellikle 1/3 seviyesindedir ve neticede iyi bir yanma verimi elde edilmektedir.

Mevcut teknoloji düzeyinde atık çamurun katı atıklarla birlikte yakılması için 3 alternatif proses önerilmektedir (Şekil 1.28).

İlk iki alternatifte atıktan elde edilen ısı termik şartlandırma ve/veya çamur kurutma için yararlanılabilen buhar üretiminde kullanılmaktadır. Ön-kurutma çamurunun ısı değerini artırmak ve ototermal yanmayı sağlamak için %55-65 civarındaki atığa tekabül eden çamur katı içeriğine müsaade etmektedir. III. alternatif ise normalde Çok Gözlü Fırın veya Akışkan Yatakta uygulanmakta ve burada yaş çamurla karıştırılan ve yanma ünitesine beslenen atığın küçük boyutlara öğütülmesi gerekmektedir.

Geleneksel arıtma çamuru/katı atık birlikte yakma uygulamalarında çamurdaki nem seviyesi yanma prosesinin verimini etkilemekte, fırın sıcaklığını düşürmekte, tam yanmayı engellemekte ve besleme oranları düşmektedir. ABD’de Massachusetts’te pilot tesiste yapılan çalışmada (EPA, 2002), yakma ünitesinde oksijen seviyesinin %21’den %25’e artırıldığı ve böylece %10'lara kadar arıtma çamuru/katı atık oranlarında birlikte yakmanın başarıyla gerçekleştirildiği belirtilmektedir.



BGT : Baca Gazı Temizleme

Şekil 1.28: Arıtma çamurunun kıatı atıklarla birlikte yakılması için başlıca alternatif prosesler (Bierbach ve Thomas, 1991)

Hollanda'da, 230 000 t/yıl evsel kıatı atıkların (%28 nem içerikli), 130 000 t/yıl arıtma çamurunun (%20-30 k.m.) ve 550 000 t/yıl gübrenin (%10 k.m.) kombine arıtımının gerçekleştirildiği tesiste 11 MW enerji üretilmekte ve bunun 6 MW'ı tesis içinde (çamur ve sıvı gübrenin kurutulması dahil) diğer 5 MW'ı yerel elektrik şebekesine elektrik olarak verilmektedir (Colin ve ark, 1991).

ABD-Minesota’da 400 t/gün MSW ve kuru bazda 2.72 t/s arıtma çamurunun (%78 nem, %53 uçucu ve 5250 kcal/kg u.k. ısı değere sahip) akışkan yataklı bir sistemde bazı problemlere karşın birlikte yakıldığı belirtilmektedir (Saxena ve Jotschi, 1994).

1.11.3. Diğer Proseslerde Yakma

1.11.3.1. Çimento Fabrikalarında

Arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında hammadde olarak kullanılması ve ikincil bir yakıt olarak yakılması konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda bunlardan bazıları verilmektedir:

1996 yılında Hollanda-Maastricht’te 975 bin t/yıl klinker kapasiteli çimento fabrikasında 1500 ton kuru evsel arıtma çamuru (3630 kcal/kg k.m) ve 1500 ton kağıt çamuru kullanılmış ve kağıt çamurunun yerine evsel çamura öncelik verilmesi gerektiği, kuru evsel çamurun %20 ilave yakıt ve klinker üretimi için %1.5 ilave hammadde sağladığı, kendi kendine yanmayı önlemek için kontrollü depolama gerektiği, çevresel emisyon değerlerinin çimento fabrikaları için Hollanda’da izin verilen limit değerler içinde kaldığı test sonuçlarıyla elde edilmiştir. Yine 1998 yılında 12 000 t/yıl kuru çamur, çimento fabrikasında ilave yakıt/hammadde olarak kullanılmıştır. 1999 yılında ise 20 000 ton kuru çamur bu amaçla kullanılacaktır. Fabrikanın 45 000 t/yıl kuru çamur işleme kapasitesi potansiyeli olduğu ve bunun da toplam bölgesel çamur üretiminin %150’sini oluşturduğu belirtilmektedir (Ponsen, 1998).

Belçika’da 2.5 milyon t/yıl çimento kapasiteli fabrikada yaklaşık 10 yıldır alternatif yakıt ve ham ürün olarak atığın (çamur dahil) kontrollü kullanımı sözkonusudur. 1997 yılında 300 000 ton atık, yakıt ve hammadde olarak kullanılmıştır. Termik ikame yaklaşık %30-35’tir. Bir atık peletleme tesisinin yapımı devam etmektedir (Ponsen, 1998).

İsviçre’de Siggenthal çimento fabrikasında 25 000 ton kuru çamur kullanılarak 12 000-15 000 ton çimento hammaddesi yerine ikame edilmektedir. Bu sayede fosil yakıtlarla ve doğal ham maddelerle yer değiştirerek ülkede büyük baskı

oluşturan çamur bertarafı gerçekleştirilmektedir. Çamur kullanıldığında dahi NO_x , CO_2 gibi emisyonlar İsveç Temiz Hava Yönetmelik sınır değerlerinden daha düşük olmaktadır (<http://194.178.172.86>).

Avusturya'daki bir çimento fabrikasında ise 280 ton çamurun 2 haftalık bir birlikte yakma testleriyle başarıyla yakıldığı belirtilmektedir (Lang ve Obrist, 1987). Bu sonuçlar diğer tecrübelerle birleştirildiğinde şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Ön kurutma işleminden geçmiş çamuru, ikincil kademede birlikte yakılması çamur partiküllerinin tam yanmaması ve daha yüksek CO emisyonuna neden olmasına rağmen, birincil veya ikincil yakma kademelerinde kömürle beraber yakılabilmektedir.

- Bu tür uygulamalarda genel bir kural olarak, azami çamur besleme oranı çimento fabrikalarının klinker üretim kapasitesinin %5'inden daha fazla olmamalıdır. Örneğin, 2000 t/gün kapasiteli bir çimento fırını için azami 100 t/gün kuru çamur kullanılabilir. Klinkerin kalitesi çamurun yakılmasından dolayı kötüleşmez.

- Emisyonlar için ise, askıdaki ince kireçtaşı partikülleri çamurun yakılmasıyla oluşan asidik gazlı kirleticilerin uzaklaştırılmasında etkin rol oynar. Çamurdaki ağır metaller partiküller tarafından absorbe edilir ve elektrofiltrede ayrıldıktan sonra fırına tekrar geri döner. Ancak, eğer çamur %0.2-0.5'ten daha fazla Cl içeriyorsa siklonun tıkanması söz konusu olabilir.

- Eğer çamur çimento fırınında birlikte yakılacaksa bu durumda kireçle stabilizasyon tavsiye edilmektedir. Kireçle stabilize edilmiş ve şartlandırılmış çamur (normalde 0.3-0.5 kg CaO/kg kuru çamur) külü çimentoya yakın bir bileşime sahiptir (Çizelge 1.16).

Çizelge 1.16: Çimento ve arıtma çamuru külünün bileşimleri (Peschen, 1997)

değerler ağırlıkça % k.m. olarak verilmiştir

Bileşim	Çimento	Çamur külü	0.3 kg CaO/kg	0.4 kg CaO/kg	0.5 kg CaO/kg
SiO_2	21-24	30-49	19-30	15-25	10-16
Al_2O_3	4-6	8-15	5-10	4-8	3-5
Fe_2O_3	3-4	5-23	3-14	3-12	2-8
CaO	64-66	9-22	43-51	55-61	70-73
MgO	1.5	1-2	0.5-1	0.5-1	0.5-1

1.11.3.2. Tuğla Üretiminde

Güney Afrikada yapılan çalışmada, arıtma tesisinden alınan ve santrifüjle susuzlandırılmış ve termik olarak şartlandırılmış 45 t/gün çamur, 15 km uzaklıktaki bir tuğla tesisinde kullanılmıştır (Slim ve Wakefield, 1991). Çamur, yüzey tuğlasında %30 ve yığma tuğlada da %5-8 oranında kille karıştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

-Ortalama basınç dayanımı 40.7 ve 38.3 MPa olan ve G.Afrika standartlarını karşılayan (17 ve 14 MPa) değerler elde edilmiş,

-24 saatlik su emme sonuçları %13 civarında (bu değer çamursuz yapılan testlerde %30 düzeyindeyken) tesbit edilmiş ancak bu değer her hangi bir olumsuzluk yaratmayacağı aksine daha iyi bir harç yapışkanlığı sağladığı için avantaj olarak değerlendirileceği,

-1000 tuğla başına 55 L yakıt tasarrufu sağladığı tesbit edilmiştir.

Komissarov ve arkadaşları (1994) tarafından yapılan laboratuvar çalışmalarında deri prosesinden çıkan ağırlıkça %40'a kadar endüstriyel arıtma çamuru kullanılarak nisbeten iyi kalitede tuğlalar elde etmiş, tuğlanın basınç dayanımı çamurun kildeki oranıyla azalmış ancak fırın sıcaklığı ile artış göstermiştir.

1.12. Kurutma ve Yakma Tesisinin Temel Bileşenleri

Kurutucu ve fırın bir kurutma ve yakma tesisinin tek başına bileşenleri değildir. Temel birimleri şunlardır:

- Çamur besleyici
 - ayarlamalı veya ayarlamasız depolama birimleriyle, ekskavatörle,
 - kırıcı veya kırıcısız,
 - bant konveyörle
- Kurutucu ve/veya uygun fırın
- Havalandırma sistem(ler)i
 - yanma gazı veya hava, akışkan hava, çeşitli soğutma havaları,
 - pozitif veya negatif basınçta çalışma için,

- kurutma/yakma ünitesi için bir veya birkaç giriş noktasıyla
- Isı kazanım ünite(ler)i
- Yardımcı ısı kaynağı
- Kurutma/yakma ünitesi kontrolü (sıcaklıklar, negatif veya pozitif basınçlar, dumandaki oksijen, çamur hızı, hava hızı v.s.)
- Toz kontrolü
 - siklonla,
 - ıslak tip (püskürtme, ventüri yıkayıcı, vs.)
 - elektrostatik
- Kül uzaklaştırma ünitesi
 - sürekli veya aralıklı
 - kuru, etrafı kapalı konveyörlerde
 - hidrolik (200-300 g/L'den daha az konsantrasyonlu süspansiyonu pompalayarak)
 - açık konteynerlerde ıslatılmış olarak

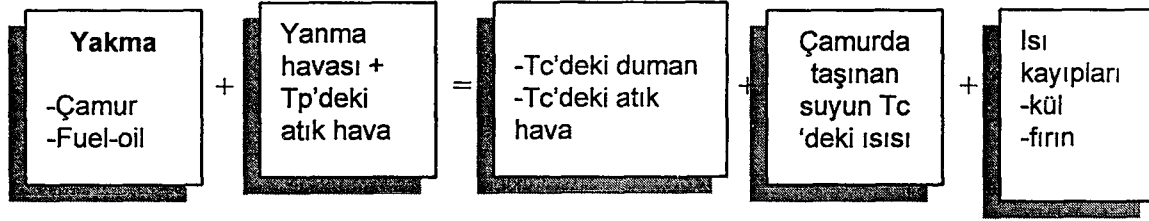
1.13. Isı Dengesi

Farklı türlerdeki atıksu arıtma çamurunun analizlerinde ortalama organik madde bileşimi şu şekildedir:

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Evsel:				
Ham çamur	56-62	7.9-8.7	26.5-29	3.5-6.8
Çürütülmüş çamur	53-59	7.2-8.5	28-31	3-7
Endüstriyel:				
Deri	62-77	8.6-8.8	10-19	3-6.9
Kağıt	42-44	5.3-5.7	34-48	0.1-0.3
Boya	37-39	4.5-4.9	26-29	0.3-0.5

Evsel atıksu arıtma çamurunun Net Kalorifik Değeri (NKD) genellikle 4500-6000 kcal/kg u.k. (uçucu katı) arasında değişmektedir.

Genel bir kural olarak, ısı balansı şu şekilde gösterilebilir:



$$(P+F)+\gamma(PV_B+V_F)C_A T_P=(PV_G+V_F)C_F T_C+(\gamma-1)(PV_B+V_F)C_A T_C+\frac{1-S}{S}\nabla_{H_2O}+0.05(P+F) \quad (2)$$

S

P = Kuru çamurun Net Kalorifik Değeri (NKD)

F = Taze yakıt (Fuel-oil)

 γ = Atık hava katsayısı (stoimetrik yanmada, $\gamma=1$) V_B = Çamurun yanma kapasitesi V_F = Yakıtın yanma kapasitesi C_A = Özgül hava ısısı T_P = Yanma hava sıcaklığı V_G = Çamurun duman çıkarma kapasitesi V_C = Yakıtın duman çıkarma kapasitesi C_F = Dumanın özgül ağırlığı T_C = Reaktör çıkışındaki dumanın sıcaklığı (genellikle yanma sıcaklığı)

S = Çamur k.m.

 $\nabla_{H_2O} = 20^\circ\text{C}$ ve T_C arasındaki su entalpi farkı

kcal/s'teki basitleştirilmiş denge şu şekilde kurulabilir:

$$\text{Isı girişi CE} = (Q_v \times \text{NKD}) + [(EXA + V_{BV}) \times 0.242 \times T_P]$$

$$\text{Isı çıkışı CS} = (0.301 \times T_C \times (Q_s + V_{BV} + Q_{H_2O} + EXA)) + (Q_{H_2O} \times 586)$$

$$\text{Isı kayıpları PTH} = 10^{(5 + \frac{3\sqrt{CN}}{K})}$$

Eğer $CE < CS + PTH$: dışarıdan yakıt ilavesi gerekirEğer $CE > CS + PTH$: sistem kendini ısıtır

Burada:

 Q_v : Yakma için uçucu katıların kütlesi (kg/s)

NKD : Uçucu katıların net kalorifik değeri (kcal/kg u.k.)

V_{BC} : Yanma kapasitesi (kg hava/s)

$$V_{BC} = Q_V \times \frac{NKD}{1000} \times 1.405$$

EXA : Atık hava kütlesi (kg hava/s)

$$EXA = \frac{(VFH + 1.244 Q_{H_2O}) \times T_{O_2}}{(0.209 - T_{O_2})} \times 1.287$$

T_{O_2} : ıslak baca gazındaki oksijen oranı (örneğin %7'de $T_{O_2}=0.07$)

VFH : ıslak baca gazının hacmi (Nm^3/s)

(basitleştirilmiş formülü : $VFH = V_{GH} \times 0.76$)

V_{GV} : uçucu katının duman oluşturma kapasitesi (kg duman/s)

$$(Q_{GV} = Q_V + V_{BV})$$

Q_S : Yakılacak kuru katı maddenin kütlesi (kg/s)

Q_{H_2O} : Buharlaşan suyun miktarı (kg/s)

C_N : ırının nominal yükü (kg kek/s)

K : Fırının tipine göre değişen katsayı

- akışkan yatak için $K = 35$
- çok gözlü fırın için $K = 26-29$

Not : Bu basitleştirilmiş dengeğin uygulama alanları şu şekildedir:

- belediye (evsel) atıksu çamuru
- $4000 < NKD < 6000$ (kcal/kg u.k.),
- akışkan yataklı fırın veya çok gözlü piroliz fırın,
- 1-10 t/s kek arasında fırın yükü,
- 750 ve 950 °C arasında T_C ,
- T_P ; akışkan yatakta maksimum 550 °C, piroliz fırında maksimum 630 °C

Enerji maliyetlerini sınırlamak için, havanın akış hızı mümkün olduğu kadar yanma kapasitesine yakın olmalıdır. Ancak uygulamada, atık havanın %30-40'ından daha aşağı indirmek zordur. Yanma ünitelerinin ve esasen sıcak gazların kazanımı teknolojisine bağlı olarak tek başına buharlaşma için gerekli ısı 1195-1790 kcal/kg su arasında değişecektir (Degremont, 1991).

1.14. Çamurun Kendine Özgü Özellikleri

Genellikle kömür yakmadaki NO_x ve N_2O oluşum mekanizmalarının çamur yakma içinde uygulanabilmesi beklenebilir. Ancak çamurun özel karakteristiklerinin göz önünde bulundurulması gerekebilir (Çizelge 1.17). Bir tarafta yüksek azot, uçucu madde ve kül içeriği diğer tarafta düşük sabit karbon içeriği. Bir başka özgün durum yaş çamur için yüksek nem içeriği.

Çizelge 1.17: Bazı arıtma çamurların kömürle kıyaslandığında elementer analizleri (Ogada, 1995)

Kömür ve Çamur Türü		Su (%)	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (%)	N (%)
Kömür	Bitümlü kömür	6	28	44	-	1.3
	Linyit	36	48	58	-	1.4
Arıtma Çamuru	Ön-kurutma çamuru	13	51	93	1.2	6.5
	Yaş çürütülmüş çamur	76	52	92	3.2	8.8
	Yaş ham çamur	78.5	25		2	5
	Yaş kireçli çamur	55	40		0.8	4.8

Arıtma çamurunun azot içeriği %10'a kadar çıkabilmekte ancak normalde ağırlıkça %6-8 (waf) değerleri arasındadır. Yakıttaki azotun önemli bir kısmı amonyak bileşikleri yapısında bağlanır. Çamurun kurutulması esnasında amonyak kısmı serbest kalır. Ölçümler bir çamur kurutucunun 150-350 °C kurutma sıcaklıklarında 190-2310 mg/L NH_3 içerdiğini göstermektedir. Böylece mekanik olarak susuzlandırılmış ön kurutma çamurundan daha yüksek bir azot içeriğine sahiptir. Azot içeriği bağlamında yaş çamur arasında da farklılıklar çamurun stabilizasyon ve uygulanan şartlandırma yöntemine bağlı olmaktadır. Örneğin çamurun stabilizasyonu ve termal şartlandırması amonyağın buhar olarak kısmen uzaklaştırılmasına ve böylece daha düşük azot içermesine neden olur (Reimann, 1989).

Diğer bir husus piroliz boyunca çamurdaki azotun önemli bir kısmının ayrılmasıdır. Çamur partikülleri 800 °C'de piroliz edilmiş ve çamur azotunun %56-78 'inin uçucularla serbest kaldığı gösterilmiştir (Rumphorst, 1995).

Yaş arıtma çamuru yakmada göz önünde tutulması gereken diğer önemli bir husus kurutmanın ve uçucuyla azotlu türlerin oksidasyonunun etkisidir. Kurutma ve piroliz prosesinin herbiri paralel olduğundan çok düşük sıcaklıkta yer değiştirir.

Yüksek kül içerikli olmasından farklı olarak çamurun yanması boyunca oluşan kül yüksek CaO ve Fe_2O_3 içeriğine sahiptir. Raczeck (1992), ön kurutma çamurunun yakılması boyunca ağırlıkça %9 Fe_2O_3 ve %18 CaO bulunmuştur. Eğer yatakta veya ızgarada biriktiğinde hem NO_x hemde N_2O azalması fakat aynı zamanda oluşumu için uygun bir aktif yatak oluşabilir.

Sonuç olarak, çamur, çok düşük sabit karbona ve yatak içinde düşük karbon yüküne sahiptir. NO_x ve N_2O azaltımı ve oluşumu konusunda charın etkisi kömür yakmada olduğu kadar önemli olmadığı göz önünde bulundurulur.

1.15. Kirletici Emisyonlar, Kontrolü ve Arıtımı

Yakma sonucu çamurun kimyasal içeriğine bağlı olarak ortaya çıkan muhtemel kirleticiler şunlardır:

- ağır metallerin yayılması;
- katı artıkların taşınması (dip ve filtre külü);
- HCl, HF, C_xH_y , SO_2 , NO_x , N_2O , CO, dioksin ve furan emisyonları.

Ağır Metaller: Çamurdaki ağır metallerin konsantrasyonu çamurun oluşması boyunca yürütülen endüstriyel faaliyetlere bağlıdır ve hidroksit, karbonat, fosfat, silikat ve sülfat yapısındadır. Atıksu arıtma prosesi boyunca çamurun içinde kalırlar (Ried ve Leonhard, 1987). Özellikle civa, kadmiyum, kurşun, krom ve arsenik gibi zehirli metaller hem sulu hayatı hemde insanları olumsuz etkilemektedir.

Kül: Yüksek kül içeriğine sahip çamur, baca gazında çok yüksek konsantrasyonlara ulaşabilir. Baca gazından ve yataktan uzaklaştırılan bu küller, Döner ve Çok gözlü fırınlarda akışkan yataklı fırınlardakinden sırasıyla yaklaşık %20 ve %10 oranında beklenmelidir (Loll, 1996).

Diğer kirleticiler: N_2O ve CO gibi kirleticiler kadar NO , SO_2 , HCl ve HF gibi asidik gazlarda açığa çıkmaktadır. Bu bileşiklerin emisyonları çamurdaki S, N, Cl

bileşiklerine bağlıdır. Çamurdaki kükürt içeriği genellikle kömürdekinden daha azdır ve yanma boyunca SO_2 olarak uzaklaşır. Azot içeriği ise kömürdekinden daha yüksektir ve bu yüzden çamur yakma boyunca NO_x ve N_2O emisyonlarının daha yüksek olması beklenir. NO_x (%90 NO , %10 N_2O) asit yağmurlarına sebep olmakta ve atmosferde fotokimyasal oksidant olarak hareket etmektedir (Williams, 2000).

Dioksin ve furanlar: Küçük konsantrasyonlarda bile toksik olduklarından kimyasal prosesler, piroliz ve yanma proseslerinde istenmeyen yan ürün olarak bulunmaktadır. Bu bileşikler deri hastalığına sebep olabilmekte ve sinir sistemine zarar verebilmektedir.

1.15.1. Kül ve Ağır Metaller

Yüksek kül içeriğine sahip arıtma çamuru, baca gazında çok yüksek konsantrasyonlara ulaşabilir. Evsel katı atık ve arıtma çamuru yakma tesislerinin birçoğunda külü uzaklaştırmak için 400 °C sıcaklığa kadar çalıştırılabilen elektrostatik toz tutucular (ESP) kullanılır. Bazı durumlarda ESP'den önce kül yükünü azaltmak amacıyla ve baca gazındaki iri partiküllerin atık ısı kazanı, ısı değiştiriciler, fanlar vs. gibi koruma ünitelerini aşındırması nedeniyle bu partikülleri uzaklaştırmak için bir ön temizleyici olarak siklon/lar yerleştirilebilir. ESP ve yıkayıcı kombinasyonu çıkış baca gazındaki toz partiküller için limitleri karşılayabilmektedir.

Arıtma çamurundaki ağır metallerin konsantrasyonu çamurun kaynağını oluşturan endüstriyel faaliyetlere bağlıdır. Çamurdaki ağır metaller hidroksit, karbonat, fosfat, silikat ve sülfat yapısındadır ve arıtma prosesi boyunca çamurda kalır (Reid ve Leonhard, 1987). Çamurdaki ağır metallerin azaltılması asidik ortam H_2SO_4 , HCl , HNO_3 çözeltileri kullanılarak elde edilir. Ancak büyük ölçeklerde, çamurdaki ağır metalleri azaltmanın yolu atıksuyun kanalizasyona verilmeden önce kaynağında azaltılmasıdır.

Yakma tesislerinde ağır metal bileşiklerinin çoğu yüksek yanma sıcaklığında buharlaşır, ancak daha sonra bu metal bileşikleri buharlaştırıcının (evaporator) daha soğuk kısımlarında kül partiküllerinin yüzeyine yoğunlaşarak külle birlikte

uzaklaştırılır (Hirth ve ark, 1990). Analizler arıtma çamurunda mevcut Cd, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn'nun yaklaşık %78-98'inin külde kaldığını oysa civanın %98'inin baca gazıyla atmosfere bırakılabildiğini göstermektedir (Kozinski ve ark, 1995). Küldeki ağır metallerin dağılımı ise üniform değildir. Pb, Cd, Cr, Cu ve Ni gibi ağır metaller genellikle partikül çekirdeğine yakın bölgelerde yerleşirken, daha hafif metaller (Si, Al, Ca, Na, K) partikül yüzeyinde en yüksek konsantrasyonla bir partikülün kesitinde bulunur.

Baca gazındaki ağır metal emisyonlarının kontrolü, külün uzaklaştırılmasının etkin bir şekilde uygulanmasına bağlıdır. Yakma sistemlerindeki mevcut uygulama ventürü yıkayıcı, ESP ve ionize ıslak yıkayıcı gibi konvansiyonel kül uzaklaştırma cihazları kullanması şeklindedir (Lee ve Chun, 1993). Çamur yakma sonucu oluşan kül yüksek ağır metal konsantrasyonlarından dolayı inşaat sanayiinde kullanılamaz ve ağır metallerin çözünmediği ve böylece yüzey sularını kirletebileceği düşünülürse özel deponi alanlarında depolanması gerekmektedir. Ağır metallerin çözünürlüğünün depolanan külün miktarından çok daha tehlikeli olacağı göz önünde tutulmalıdır (Hirth ve ark, 1990).

Avrupa ülkelerinde üç tür depolama mevcuttur. Bunlar:

- i- inert atık için,
- ii ve iii-bertaraf edilecek atığın ağır metal konsantrasyonuna bağlı olarak tehlikeli olmayan ve tehlikeli atık için.

Akışkan yataklı yakma fırınlarından elde edilen tecrübeler dip külünün inert deponi alanına, siklon külünün tehlikeli olmayan deponi alanına ve baghouse filtre külünün tehlikeli atık deponi sahasına boşaltmasının uygun olacağını göstermektedir. Küldeki ağır metallerin konsantrasyonları da bu sırayla artmaktadır (Lundberg ve ark, 1977).

Evsel katı atıklardaki ağır metal konsantrasyonları çamurdakinden daha yüksek olduğu için katı atıklarla birlikte yakmada külün kalitesi bundan daha kötü olamaz. Çamurun tuğla yapımında kullanımı veya çimento üretiminde birlikte yakılması durumunda ağır metaller tuğla matriksiyle bağlanır ve çözünmez, çimento

üretimi boyunca çamurdaki ağır metaller partiküllerde absorbe edilir ve elektrostatik ayırma sonrası fırına geri döner (Slim ve Wakefield, 1991).

1.15.2. Diğer (NO_x , N_2O , SO_2 , HCl ve HF) Emisyonlar

1.15.2.1. AYF'da Tek Başına Yakmada

1) Ön Kurutma Çamurunda

Ön-kurutma çamurlarının kabarcıklı ve dolaşimli akışkan yataklı fırınlarda yakılması sonucu oluşan NO_x ve N_2O emisyonları ile ilgili mevcut bilgiler çamur ve kömürün benzer özellikler sergilediğini göstermektedir.

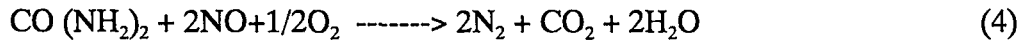
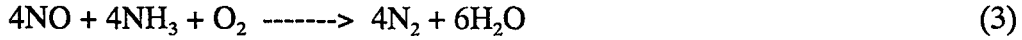
Pels ve ark (1993), arıtma çamurunun çoğu kömürden daha düşük dönüşüm oranı (yakıt azotun NO_x ve N_2 'e dönüşümü) gösterdiğini belirtmiştir. Arıtma çamurundaki düşük dönüşüm oranları NO_x ve N_2O 'nun azaltılmasında etkin olan çamurun yüksek CaO ve Fe_2O_3 içerikleriyle açıklanabilir. NO_x ve N_2O 'e dönüşüm oranlarının uçucu madde içeriğindeki artışla bir azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir (Ogada, 1995). Ancak bu her zaman geçerli değildir. Bu yüzden laboratuvar deneylerinde gözlenen genel eğilimler ticari yakma sistemlerinden farklı olabilmektedir. Bu durumu açıklamak için büyük ölçekli tesislerden elde edilecek daha fazla veriye ihtiyaç vardır (Kichener ve ark, 1992).

Werther ve ark (1995), tıpkı kömürde olduğu gibi çamur partiküllerinden NO_x ve N_2O emisyonlarının fazla hava oranındaki artışla arttığını göstermektedir. Artan yanma sıcaklığı yüksek NO_x ve düşük N_2O emisyonlarına öncülük etmektedir.

Kademeli yakma işlemi ön-kurutma çamurlarının yakılmasında emisyon kontrolü için de faydalıdır. CO , NO_x ve N_2O emisyonlarının önemli bir azaltımının kademeli yakma uygulanmasıyla elde edildiğini belirtmekte, NO_x emisyonlarının $900\text{-}1300\text{ mg/m}^3$ seviyelerinden 260 mg/m^3 'lere azaltılabileceğini ve N_2O emisyonlarının da 300 mg/m^3 lerden 100 mg/m^3 altına kadar düşebileceğini göstermektedir.

Serbest bölge sıcaklığının artırılmasıyla da N_2O ve CO emisyonlarında önemli azalma sağlanabilmektedir. Ogada (1995) tarafından baca gazında %6'lık sabit bir oksijen konsantrasyonunda $850\text{ }^\circ\text{C}$ yatak ve serbest bölge sıcaklığında

gerçekleştirilen deneylerde yanma boyunca ön-kurutma çamuruna 2-4 düşük mol oranıyla hem NH_3 (3. reaksiyon) hemde üre (4. reaksiyon) enjekte edilmiş ve NO_x değerlerinde 700-1050 mg/m^3 oranlarından 200 mg/m^3 'e kadar bir azalma elde edilmiştir.



2) Yaş Çamurda

Ön-kurutma çamurundan farklı olarak mekanik olarak susuzlandırılmış (yaş) çamur kömürle benzer NO_x karakteristikleri sergilememektedir.

- i- Ön-kurutma çamurundan daha yüksek azot içermesine rağmen hem kabarcıklı hemde dolaşımli akışkan yatakta yaş çamurun yakılması boyunca çok düşük NO_x değerleri ölçülmüştür.
- ii- Yaş çamur farklı bir NO_x/O_2 eğilimi gösterir. Oksijen konsantrasyonu artarken NO_x azalır ve yanma sıcaklığının NO_x üzerindeki etkisi önemsizdir. Kademeli yakma durumunda NO_x 'te bir azalma elde edilmemektedir. Philippek ve Werther (1995) ve Ogada (1995) bu kendine özgü NO_x özelliğini çamurdaki yüksek NH_3 'e bağlamaktadır.

Yukarıda bahsedilen yaş çamurun davranışı bütün çamur türleri için söylenemez. Uygulanan çamur stabilizasyonu ve şartlandırma yöntemi önemli olabilir. Örneğin Ogada (1995) kireçle stabilize olmuş ve termal olarak şartlandırılmış çamuru kabarcıklı akışkan yatakta, yine Philippek (1996) kireçle stabilize edilmiş çamuru dolaşımli akışkan yatakta yakma deneylerine tabi tutmuş, her iki durumda da O_2 ile artan NO_x değerleri %4 ve üzerindeki oksijen konsantrasyonlarında NO_x seviyesi ön-kurutma çamurunun tek kademeli yakılmasıyla benzerlik gösterdiği tesbit edilmiştir. Her iki çamurda düşük NH_3 içeriğine sahiptir.

1.15.2.2 Kömürle Birlikte Yakmada

1) Pulverize Sistemde

Abbas ve ark. (1992) tarafından 0.75 m çapa ve 7 m yüksekliğe sahip 500 kW'lık pulverize kömür yakma sisteminde kömürün arıtma çamuru ile birlikte yakılması konusunda 3 farklı grupta (%100 kömür, %16 çamur ve %100 çamur) deneyler yapılmıştır. Her durumdada çamur ön kurutmaya tabi tutulmuş, öğütülmüş ve pulverize yapıda ya ayrı ayrı yada kömürle birlikte harmanlanmak suretiyle yakma ünitesine beslenmiştir.

Yanma ve CO emisyonları: Arıtma çamuru iyice kurutulur ve 0.1-0.2 mm altına öğütülürse, yanma verimi önemli bir şekilde etkilenmez. %97-99 yanma verimi ve tıpkı biomasta olduğu gibi düşük CO emisyonları elde edilmektedir. Ancak artan kül oluşumundan dolayı daha yüksek bir çamur kütle oranında yanma verimi biraz azalmakta ve %100 çamur oranında bile CO'te ve yakıcı sıcaklığında önemli bir değişiklik gerekmemektedir (Kicherer ve ark, 1992).

NO_x emisyonları: NO_x emisyonlarını etkileyen bir kaç faktör sözkonusudur:

- arıtma çamuruyla harmanlanan kömür karışımının tek kademede yakılması süresince çamurdaki yüksek azot içeriğinin etkisi oldukça önemlidir. Çamur miktarının artmasıyla NO_x artıyor. Ancak yapılan bir başka araştırmada da (Morgan ve Kamp, 1995) kütleli olarak %50'den daha fazla çamur yakma oranlarında NO_x emisyon oranlarının bir pik oluşturduğu ve bundan sonra çamur oranındaki artışla NO_x 'te azalmanın tesbit edildiği belirtilmektedir.

- çamur ve kömürün çoklu-yakıtlı yakıcıda ayrı ayrı beslendiği durumda çamurun kömürle merkeze beslenmesi durumunda düşük NO_x emisyonlarının elde edildiği aksi durumda yüksek NO_x emisyonları olduğu tesbit edilmiştir.

SO₂, HCl: SO₂ ve HCl emisyonları çamurdaki kükürt ve klorür içerikleriyle sıkı bir ilişkiye sahiptir. Yakıttaki kükürtün %90-100'ü yanma boyunca SO₂'ye dönüşmekte, daha yüksek S girişi ile daha yüksek SO₂ emisyonları çıkmaktadır. Bu HCl içinde geçerlidir. Bu yüzden çamurun kömürle çalışan termik santrallerde birlikte yakılmasında eğer çamurdaki sülfür ve klorür içeriği kömürdekinden daha fazla ise SO₂ ve HCl emisyonlarında artış beklenebilir.

2) Akışkan Yataklı Sistemde

Aritma çamurunun akışkan yataklı fırında kömürle birlikte yakılmasının emisyon özellikleri konusunda ayrıntılı bilgi Doorn ve ark. (1995) tarafından bildirilmektedir. Buna göre kuru çamurun kömürle 5.1 m yüksekliğindeki 350 kW'lık bir kabarcıklı akışkan yatakta yakılması deneysel olarak incelenmiş, pulverize kömürle yakmadan farklı olarak AYW'da baca gazında NO ve CO konsantrasyonlarında önemli olmayan bir artışa neden olduğunu göstermiştir. NO_x emisyonlarının çamur oranındaki artışla arttığı, çamur külünün katalitik özelliğinin etkisinin azot girdisindeki artışa rağmen NO_x seviyelerinin sabit kalmasına yardımcı olduğu ancak SO₂ ve HCl konsantrasyonlarının çamur ilavesiyle hızla arttığı tesbit edilmiştir. 75/25 kömür/çamur oranında %100 kömür yakmadan 10 kat daha fazla olan 463 mg/m³ HCl ölçülmüştür.

Çamurdaki yüksek kül içeriği baca gazındaki külün şiddetli artışına ve külün yatakta toplanmasına neden olmaktadır. Kömürle kıyaslandığında yüksek kül içerikli çamurun daha yüksek yanma verimi siklonda ve filtre külünde %75'den %20'ye karbon azalmasıyla sonuçlanmıştır.

Yaş çamurun kömürle birlikte yakılmasında NH₃'ün etkin NO₃ azaltma özellikleri de uygulanabildiğinde ilginç bir durum ortaya çıkmaktadır. Philippek (1996) ağırlıkça %76 nem, %8.8 N ve %3.2 NH₃ (waf) içeren yaş çamurla kömürü DAY'ta birlikte yakmış, çamur-kömür oranı (α) nda,

$$\alpha = \frac{m_{\text{çamur,kuru}}}{m_{\text{çamur,kuru}} + m_{\text{kömür,kuru}}} \quad (\text{kg/kg}) \quad (5)$$

yaklaşık %20 oranına kadar NO_x 'in azaldığını ancak bundan sonra NO_x 'in tekrar artış gösterdiğini belirtmektedir.

Birlikte yakma daha yüksek bir CO ve N₂O emisyonuna öncülük edebilir. Ancak bu emisyonlar serbest bölge sıcaklığına artırılarak veya bir afterburner ünitesi kullanılarak kolayca azaltılabilir. Akışkan yatakta düşük sıcaklık dolayısıyla oluşan SO₂ 'yi kireçtaşı kullanılarak azaltmak mümkündür.

1.15.3. Civa

Çamur, çeşitli bileşiklerde normal olarak kg kuru madde başına 1-4 mg civa içerir. Yanma yüzeyinde düşük kaynama sıcaklığından dolayı civa bileşikleri buharlaşır ve yakma sonrası gaz yapısında sistemi terkeder (Fahlke ve Bursik, 1995). Ancak yüksek sıcaklıklarda gaz yapısındaki civa bileşiklerinin stabil olmamasından dolayı 700 °C üzerinde bileşikler elementer civa yapısına ayrışır. Elementer civa kolayca çözünmez ve böylece ağır metallerden farklı olarak baca gazı arıtımıyla külle birlikte uzaklaştırılmaz.

Civanın diğer baca gazı bileşikleriyle reaksiyonu emisyon kontrolü için önemlidir çünkü iyonik yapıdaki civa çözünebilir ve baca gazı arıtımının ıslak yıkayıcı aşamalarında uzaklaştırılabilir. Deneyler civanın SO_2 , NO_x , NH_3 ve H_2S ile reaksiyonunun önemsiz olduğunu ancak klor bileşikleri oluşturmak için HCl , Cl_2 ve O_2 ile reaksiyona girdiğini göstermektedir (Hall ve ark., 1996). Sonuç olarak ister elementer civa ister civa klorür (HgCl_2) olsun yıkama sisteminin girişinde baca gazındaki hakim türlerdir. Diğer civa türlerinin konsantrasyonları (HgO , HgCl , Hg_2Cl_2 ve HgSO_4) anılan sıcaklık oranlarında düşüktür (Huang ve Livengood, 1996). Çamurun Cl içeriğindeki artışla yakma sonrası ham gazdaki civa emisyonlarındaki elementer türlerin oranı genellikle azalır. Evsel katı atıklardaki Cl içeriği çamurdakinden daha yüksek olduğundan çamur yakma boyunca yüksek oranda elementer civa türleri beklenir. Elementer civa oranının çok yüksek olduğu çamur yakma tesislerinde emisyon limitlerini karşılamak için yüzeysel aşındırma (scrubbing) yeterli değildir. Bu yüzden ilave kontrol sistemleri gereklidir. Elementer civa aktif karbon yüzeyine adsorblanarak uzaklaştırılabilir.

1.15.4. Dioksin ve furanlar

Dioksin ve furanlar dibenzo-p-dioksin (PCDD) ve dibenzofuran (PCDF) içeren bileşikler ifade eder. Çok düşük konsantrasyonlarda bile toksik olduğundan kimya sanayi, piroliz ve yanma proseslerinin istenmeyen yan ürünleridir. Bu bileşikler cilt hastalığına neden olabileceği gibi sinir sistemini de etkiler (Richter, 1992). Atık yakma sonucu oluşan PCDD ve PCDF emisyonları ve bunların yapısını

etkileyen faktörler atığın konsantrasyonu ve özellikleri, yanma şartları, baca gazı kompozisyonu, baca gazı sıcaklık profili, toz tutma cihazlarının işletme sıcaklığı ve gaz kontrol metodlarıdır (Kilgroc, 1996).

Çamur yakma boyunca dioksin ve furanların oluşumu üç nedene bağlı olabilir (Geiger ve ark, 1992). Bunlar;

- i- PCDD/PCDF içeren bileşiklerin yanma odasında tam bozunamaması,
- ii- Dioksin ve furanların klorofenol veya klorobenzen gibi fırında mevcut olan klor bileşiklerinden de oluşabilmesi,
- iii- İnorganik klor bileşiklerinden veya organik bileşiklerden PCDD/PCDF' nin yeniden oluşması.

Bu daha sonra normal olarak ısı kazanım boylerinde düşük ısı aralığında ve 250-400 °C arasında ESP'de uçucu küldeki metalik bileşikler gibi bir katalistin yardımıyla gerçekleşir. PCDD ve PCDF oluşumunu teşvik eden metal bileşikleri demir, çinko, nikel ve alüminyum oksitler kadar bakır klorür, oksit ve sülfat içerir (Kilgroc, 1996).

PCDD/PCDF emisyonlarını etkileyen 2 parametre klor içeriği ve çamurdaki sülfür/klor (S/Cl) oranıdır. Çoğu deneyler yakıtın klor içeriğindeki artışla PCDD/PCDF emisyonlarının arttığını göstermektedir. Geiger ve ark. (1992), S/Cl oranının artmasıyla dioksin ve furan konsantrasyonlarının azaldığını deneysel olarak göstermiştir.

Yakma 600 °C'den daha yüksek sıcaklıklara ulaştığından dioksin ve furanlar tamamiyle dağılır ve bu yüzden atık yakmadan kaynaklanan dioksin ve furan emisyonlarının kontrolünde temel yöntem baca gazı yolunda yeniden birleşmelerini engellemektir. Bu, külde düşük bir karbon içeriği (<%0.5) tutularak veya bir siklon yardımıyla daha yüksek sıcaklıkta (doğrudan yanma odasından sonra) külün %80'inin uzaklaştırılmasıyla elde edilebilir. Dioksin ve furanların %80'i filtre külünde kalır. Bu kalan kısım ilave aktif char veya kok kullanılarak uzaklaştırılabilir (Richter, 1992). Dioksin ve furanlar aktif kömür yüzeyinde adsorblanır. Verimliliği artırmak için adsorber iodinle, sülfürik asitle veya elementer sülfürle doyurulabilir.

Almanya'da 3 bin arıtma tesisinden alınan çamur örneklerindeki dioksin ve furan içeriklerinin analizi, ortalama dioksin ve furan içeriğinin yaklaşık 50-60 ng TE/kg kuru madde olduğunu göstermiştir (Anonymous, 1995).

Katı atıklarla benzer şekilde çamur yakma sıcaklıklarında da dioksin ve furanlar yakma fırınında çok düşük konsantrasyonlarda bulunduğundan tamamiyle dağılır. Ancak 450 °C'nin altındaki gaz sıcaklığındaki baca gazı temizleme aşamasında yeni dioksin ve furan oluşumu gerçekleşebilir. Ancak dioksin furan seviyesi evsel katı atık yakma fırınlarındakinden daha düşüktür. Çünkü oluşan yeni PCDD/PCDF oranı MSW yakma fırınlarında çamur yakma fırınlarındakinden daha yüksektir. Zira çamurdaki S/Cl oranı evsel katı atıktakinden 7-10 kat daha yüksektir. Daha öncede bahsedildiği gibi yüksek kükürt içeriğinin varlığı dioksin furan oluşumunu engeller. Böylece çamur yakma tesislerinde 0.1 ng TEG/m³ limitini karşılamak zor değildir. Çamurun yakılması dioksin ve furanın bir kaynağı değildir (Durante ve ark, 1993). Materyal dengesi %94'ünün yakma boyunca bozulduğunu, %1'den daha azının baca gazıyla atmosfere kaçtığını ve %5'inin külde kaldığını göstermektedir.

1.16. Kirletici Emisyonlar İçin Yasal Düzenlemeler

Arıtma çamurunun yakma fırınlarında birincil atık olarak yakıldığı durumlarda, USA-EPA tarafından 503 Yönetmeliği ile yapılan düzenleme ile bazı ağır metaller (Pb, As, Cd, Cr ve Ni) ve toplam hidrokarbonlar için müsaade edilebilir sınırlar belirtilmekte, izleme ve ölçüm sıklıkları yer almaktadır (Bauer ve Sieger, 1993).

Avrupada ve ülkemizde çamur yakma için özel düzenlemeler mevcut değildir. Genel olarak atık yakma işlemindeki emisyon limitleri baz alınmaktadır. Bu da termik santrallerde uygulanan emisyon standartlarından genellikle daha sıkı olmaktadır. Bazı ülkelerdeki atık yakma için izin verilen emisyon limitleri Çizelge 1.18'de verilmektedir.

Çizelge 1.18: Bazı ülkelerdeki atık yakma için izin verilen emisyon limitleri (Werther ve Ogada, 1999)

* Cd+Tl

** Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn (a) Hg+Ti+Cd (b) As+Ni+Cr+Co (c) Pb+Cu+Mn

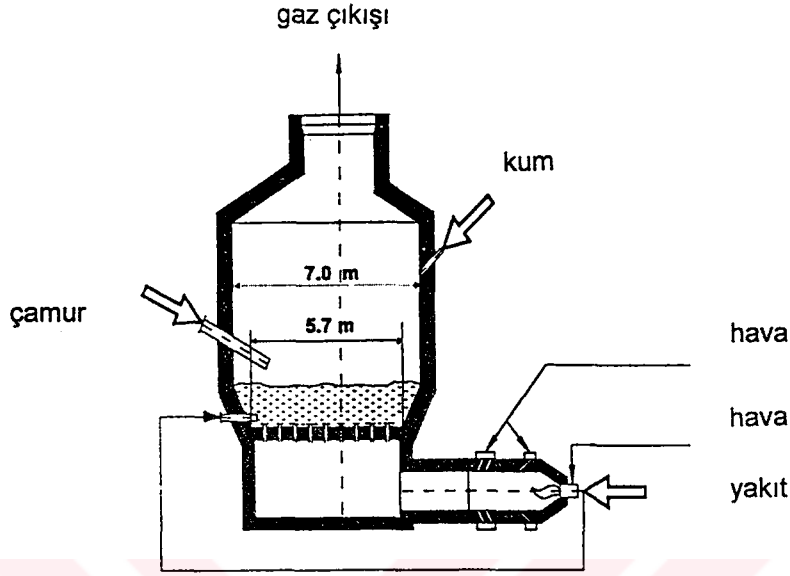
*** çamur yakma limitleri (EPA, 1990)

**** çöp ve atıkların yakıldığı tesislerde

<i>KİRLİTİCİ PARAMETRELER (mg/m³)</i>	<i>Almanya</i>	<i>Çekoslovakya</i>	<i>Hollanda</i>	<i>EPA***</i>	<i>İngiltere</i>	<i>Türkiye****</i>	<i>Avrupa Birliği</i>
Toz	10	30	--	20	20	10	--
CO	50	100	50	50	80	50	50
NO ₂	200	500	70	650	450	400	-
SO ₂	50	300	40	300	80	50	25
HCl	10	30	10	30	30	10	5
HF	1	2	1		2	1	1
Organik karbon, C	10	20	10			10	5
Ağır metaller	0.1 *	I. grup 0.2 (a)	0.05 *	I.grup:0.2		--	0.05 *
	0.5 **	II. grup 2 (b) III. grup 5 ©	1 **	II.grup: 1.0			0.05 **
PCDD+PCDF (ng/m ³)	0.1	--	0.1	1.0	1.0	0.1	--

1.17. Büyük Ölçekli AYF Çamur Yakma Uygulamaları

Almanya-Berlin’de 5000 m³/gün çamur (%2-3.5 k.m.) kapasitesine sahip arıtma tesisinde çamur %24-28’e susuzlaştırılmakta ve daha sonra pompalarla AY yakma ünitesine beslenmektedir (Şekil 1.29). Tesis, herbiri 4 besleme noktasına sahip 3 yakma ünitesine sahiptir. Her bir ünite %25 k.m. içerikli 15 t/s yaş çamura eşdeğer maksimum 3.7 t/s çamur alabilmektedir. İlave yakıt olarak endüstriyel yağ kullanılmaktadır. Fribord sıcaklığı 850 °C civarındadır. Atık ısı, boylerde ve hava önısıtıcısında kazanılmaktadır. Tesiste 35 ton yatak kumu kullanılmakta, yaklaşık 45 ton/gün kül oluşmaktadır. Baca gazı arıtma tesisi olarak desülfürizasyon ünitesi (FGD) ve ıslak yıkayıcı (scrubber) kullanılmaktadır. SO₂ emisyonları 2500 mg/m³’ten 30 mg/m³’e azalmaktadır. FGD’de 2.5 t/gün CaO tüketilmekte ve 7 t/gün jips oluşmaktadır (Römer, 1991).



Şekil 1.29: Almanya’da akışkan yataklı bir fırının şematik gösterimi (Römer, 1991)

Japonya-Tokyo’da 1984 yılından beri çalışmakta olan 80 t/gün kapasiteli arıtma çamuru (3000 kcal/kg k.m. alt ısı değerine sahip) yakma tesisinde, kurutma olmadan doğrudan (%78 nem) çamur keki ve yeni geliştirilen dolaylı kurutma sonrası ön-kurutma çamuru beslenmektedir. ısı kazanımlı ve ısı kazanımsız olarak işletme maliyetleri Çizelge 1.19’da verilmektedir.

Çizelge 1.19: Japonya’da ısı kazanımlı ve ısı kazanımsız bir AY çamur yakma tesisinin işletme maliyetleri (Henmi ve ark, 1986)

Parametre	Birim	KURUTMASIZ	KURUTMALI
Çamur keki	t/gün	80	96
Nem	%	78	75-78 (78)
Yanabilen kısım	% k.m.	56-64	56-64
Alt Isıl Değer	kcal/kg k.m.	3000	3000
İlave yakıt	L/s	312	47
	L/t kek	94	12
Fırın sıcaklığı	yatak kumu, °C	800	800
	çıkışta, °C	850	800
Fazla hava oranı		1.40	1.56

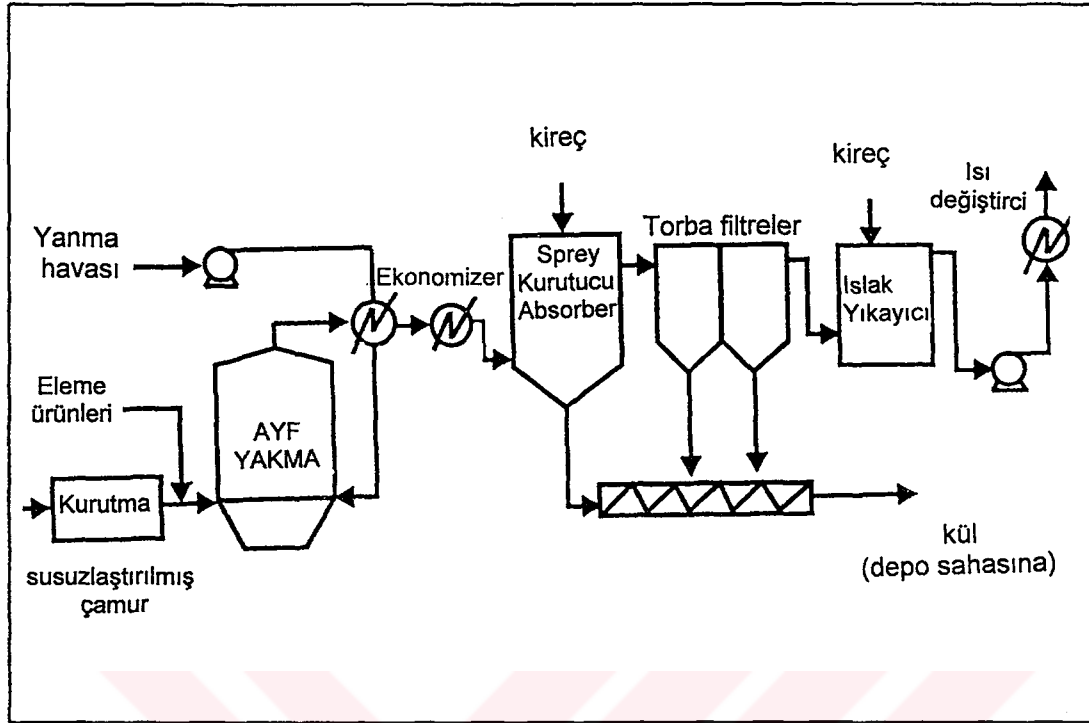
Çizelge 1.19 (devam)

Parametre	Birim	Birim maliyet	ISI KAZANIMSIZ		ISI KAZANIMLI	
			Miktar	Maliyet	Miktar	Maliyet
Tesis Kapasitesi	t/gün		80		96	
İşletme Maliyeti	\$/gün					
1. İlave yakıt	\$/L	0.35	6360	2216	2.304	806
2. Elektrik	\$/kws	0.1	10800	1080	10300	1030
3. Kimyasal (NaOH)	\$/kg	0.35	220	77	151	53
4. Yağlayıcılar	\$/L	2.6	0.8	2	0.8	2
Toplam Maliyet	\$/gün			3385		1891
Birim Arıtma Maliyeti	\$/gün			42.3		19.7

Söz konusu tesiste ısı kazanım ekipmanının ilavesi ile; AYF kapasitesinin %20 arttığı, yatırım maliyetinin etkilenmediği, işletme maliyetinin yaklaşık %50 azaldığı, emisyon limitlerinin çok altında seviyelere ulaşıldığı ve koku probleminin olmadığı belirtilmektedir.

Japonya’da ayrıca (Ebora Corp.) 1993 yılından beri 50 adet evsel katı atık ve 10 adet endüstriyel katı, sıvı ve çamur atıklar AYF’larda yakılmaktadır. Yine, Kobe yerleşim bölgesinde açığa çıkan 85 000 t/yıl arıtma çamuru her biri 150 t/gün kapasiteli 3 adet AYF’da yakılmakta ve elde edilen atık ısı şehrin sıcak su ihtiyacında kullanılmaktadır (Kayano ve ark, 1992).

İngiltere’de Seven Trent Water’a ait 16 000 t/yıl kuru çamur kapasiteli yakma tesisinde %23-25 k.m. içeriğine susuzlaştırılan çamur %35’e kadar kurutulmakta ve sonra karıştırılarak yakma ünitesine beslenmektedir (Şekil 1.30). Yanma havası 650 °C’ye ısıtılmaktadır (ön ısıtma). Tesiste külü uzaklaştırmak için torba filtre, asidik gazları uzaklaştırmak için sprey kurutucu, ağır metalleri uzaklaştırmak için de bundan daha etkili bir yağ yıkayıcı kullanılmaktadır (Goldsmith, 1994).



Şekil 1.30: Ön-kurutma çamuru yakma tesisi akış diyagramı (Goldsmith, 1994)

Yine İngiltere’de Güney Londra’da 1999 yılında Lurgi firması tarafından yapılan ve 2.5 milyon nüfusu kapsayan ve yaklaşık 200 milyon \$ yatırım tutarındaki 2 adet yakma tesisinde, çamur önce 12 adet membran filtre ile %32 k.m. içeriğine susuzlaştırılmakta ve 850 °C’de AYF’da yakılmaktadır. Çamurun nem içeriği ototermal (kendi kendine) yanmaya yeterli olup, ateşleyici olarak doğal gaz ilave edilmektedir. Tesislerde 13 MW enerji üretilmektedir. Hg uzaklaştırmada aktif kömür kullanılarak DAY adsorbsiyon ünitesi, HCl ve HF gibi asidik bileşenleri uzaklaştırmak için ıslak yıkayıcı, SO₂’yi uzaklaştırmak için kostik soda kullanılmaktadır (Schitttenhelm, 1997).

ABD-New Jersey’de 36 t/gün kapasiteli AYF’da filtre pres çamur keki pompalarla yakma ünitesine beslenerek yakılmaktadır. Tesisin işletme şartları şu şekildedir:

Çamur besleme (yaş)	5.75 t/s
Çamur nem içeriği	%77.4
Çamur ısı değeri (kuru)	3821 kcal/kg

Kuru çamur uçucu oranı	%76.5
Kuru çamur bileşimi (C,H,O,N)	%41.2, %5.5, %24.7, %4.1
Fuel oil tüketimi	120 L/s

Tesiste ventüri yıkayıcı, soğutucu, ıslak ESP kontrol sistemi mevcut olup, SO₂ seviyesi sınır değerin ¾'ünden daha az, HCl ve diğer ağır metaller 1/10'undan daha az; iyi karışım ve üniform yatak sıcaklığı, fribordda 870 °C'de 6 saniyeden fazla kalma süresi nedeniyle VOC ve CO seviyesi 1/10'undan daha az, NO_x seviyeleri sıcaklığın düşük olması nedeniyle düşük elde edilmiş ve fazla hava oranı %40'ta sabitlenmiştir (Zaman, 1995).

Hollanda-Dordrecht'te 1993 yılında kurulan 54 000 t/yıl k.m. kapasiteli DAY çamur yakma tesisinde, ön-kurutma çamuru, Hg'yı azaltacak bir sabit yatak absorberini takiben HCl ve SO₂'yi uzaklaştırmak için çok kademeli yakmaya tabi tutulmuş, sonuçta NO_x emisyonlarının 200 mg/m³ altına indirilebildiği tesbit edilmiştir. Ayrıca laboratuvar çalışmaları O₂'deki artışla NO_x'in azaltılacağını da gösteren NO_x/O₂ eğilimini göstermiştir.

Almanya'da ikisi ÇGF ve dokuz adedi AYF olmak üzere toplam oniki tesisten elde edilen CO, NO_x ve N₂O emisyonları Çizelge 1.20'de gösterilmektedir. Bu tesislerin dördünde endüstriyel çamur yakılırken diğerlerinde kentsel çamur yakılmaktadır. Nem oranları ise %53-72 arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- gerek çürütülmüş ve ham çamur ve gerekse evsel ve endüstriyel çamur arasında emisyon farkı gözlenmemiştir. İkincil hava uygulamasının önemi çamurun karakteristiğine bağlı olduğu ancak aynı zamanda tek kademeli yakmada hala çok düşük NO_x emisyonları (19-145 mg/m³) tesbit edilmiştir.
- CO, NO_x ve N₂O performansı laboratuvar ölçekli deney sonuçlarıyla aşağı yukarı aynı olduğu tesbit edilmiştir. Bu da deneysel parametrelerin dikkatli seçildiğinde planlanan çamur yakma birimlerinin emisyon performanslarının yerinde tahminine imkan veren laboratuvar ölçekli birimlerin önemini göstermektedir.

Burada yatak ve serbest bölge sıcaklığı kadar önemli diğer parametreler de şunlardır:

- i- besleme karakteristikleri,
- ii- baca gazındaki O₂ konsantrasyonu,
- iii- hava oranı ve baca gazının kalma süresi.

Çizelge 1.20: Çeşitli yakma tesislerinde elde edilen CO, NO_x ve N₂O emisyonları (Anonymous, 1997)

Ç : Çürütülmüş

Not: Tüm ölçümler baca gazında hacimce %11 O₂'e göre hesaplanmıştır

Tesis	Fırın tipi	Çamur kaynağı	Çamur türü	Kurutma	Girişteki H ₂ O, %	Yatak sıcaklığı, °C	Fırın sıcaklığı, °C	CO, mg/m ³	NO _x , mg/m ³	N ₂ O, mg/m ³
1,2	AYF	Evsel	Ham	Yok	72	700	875	25-35	19	151
3	ÇGF	Evsel	Ç	Yok	59	-	900	20	200	-
4	AYF	Evsel	Ham	Var	55-60	850	890	58	230	-
5	AYF	Evsel	Ç	Var	55	780	850	15	145	200
6	AYF	Evsel	Ham	Var	65	735	840	18	50	118
7	AYF	Evsel	Ç	Var	54	800	910	51	186	105
8	AYF	End	Ham	Yok	53	800	975	33	72	-
9	AYF	End	Ham	Yok	53	870	975	25	129	7
10	ÇGF	End	Ham	Yok	65	870	1000	36	161	-
11	AYF	End	Ham	Yok	62	780	875	18	217	-

İtalya'da 2000 yılında faaliyete giren ve ortalama %50 nem ve 1000 kcal/kg alt ısı değere sahip kağıt endüstrisi arıtma çamurları, 120 t/gün çamur (k.m.) yakma kapasitesine sahip bir AYF'da yakılmakta ve toplam 3.5 MW elektrik enerjisi (2.9 MW'ı net, 0.6 MW'ı tüketim olmak üzere) elde edilmektedir. Denitrifikasyon (DeNO_x) için üre solüsyonu, desülfürizasyon (DeSO_x) için alçıtaşı (CaCO₃), tehlikeli ağır metaller için aktif karbon ünitesi bulunmaktadır. Tesisin çamur bertaraf maliyeti ise 51 Euro/t 'dur. Tesis sayesinde enerji üretimi yapılmakta ve ayrıca yeni deponi alanlarının açılması önlenmekte, kaynak kazanımı sağlanmakta, çok düşük hava ve toprak kirliliği gibi çevresel faydalar elde edilmektedir (Caputo ve Pelagagge, 2001).

AB’de yürütülen ‘Biyomas/Arıtma Çamuru ve Kömürlerin Birlikte Yakılması’ konusundaki proje çerçevesinde Almanya’da 10.8 MW’lık bir AYF yakma tesisinde yapılan büyük ölçekli yakma uygulamasında kömür ve tane boyutu 10 mm’yi geçmeyen ön-kuru çamur karışımı birlikte yakılmış ve direktiflerdeki sınırlar içinde kalan emisyon seviyeleri ölçülmüştür. Ancak sürekli besleme uçucu kül birikmesine (deposition) ve fırının bazı bölgelerinde yapışmalara sebep olmuş ancak fribord yüksekliğinin artırılması ve kül için sıcak gaz siklonu yerleştirilmesi önerilmiştir. 2 MW’lık başka bir tesiste ise gerek CO gerekse NO_x değerleri düşük çıkmış ve sorunsuz yakma gerçekleştirilmiştir. Tesiste halojenli organik kirleticiler için filtrasyon sistemi eklenmiştir. Etkin bir toz tutma sonrası baca gazında 0.1 ng TE/m³’ten daha az bir dioksin içeriği tesbit edilmiştir (Hein ve Bemtgen, 1998).

Akışkan yatak teknolojisinin ülkemizdeki ilk uygulaması olarak Çanakkale-Çan Termik Santrali (2x160 MW) kurulacak olup, yöredeki düşük kaliteli ve yüksek kükürt içeren kömürlerin değerlendirilmesi amacı ile yapımına devam edilmektedir. Bu teknoloji ile;

- daha etkin bir yanma sağlanmakta,
- kazanda düşük kalite linyitlerden kaynaklanabilecek kayıplar önlenilmekte,
- SO₂ emisyonları kazana yapılan kireçtaşı enjeksiyonu ile düşürülmekte, dolayısıyla ilave FGD tesisi kurulması gerekmekte,
- geleneksel sisteme göre CO₂ emisyon miktarları %15-20 azalmakta,
- uygun tasarımla biyomas+liniyit karışımları, çöp v.b. düşük ısı değere sahip yakıtlar da yakılabilmektedir (Tüzüner, 2000).

1.18. Dünyadaki Arıtma Tesisleri ve Çamur Uygulamaları

1.18.1. Bazı Atıksu Arıtma Tesisleri

<i>Yeri</i>	:	<i>Japonya-Tokyo (15 adet)</i>
Tesis Kapasitesi	:	5 300 000 m ³ /gün
Çamur Miktarı	:	120 000 m ³ /gün
Çamur Katı Oranı	:	% 0.5

Susuzlaştırılan Çamur Miktarı :	3 300 m ³ /gün
Bertaraf Yöntemi :	Açığa çıkan çamurun %75'i yakılarak bertaraf edilmekte, geri kalanı yanma ürünü küllerle birlikte Tokyo Körfezine boşaltılmaktadır.
<i>Yeri</i> :	<i>Almanya *</i>
Tesis Kapasitesi :	100 000 m ³ /gün
Çamur Miktarı :	1 000 t/gün
Çamur Katı Oranı :	% 4-5
Susuzl. Çamur Miktarı :	45 t/gün
Bertaraf Yöntemi :	Yakma. 10-13 t/gün kül açığa çıkmaktadır.

* Almanya'da yılda 50 milyon ton çamur açığa çıkmakta ve bunlar 12 evsel, 4 endüstriyel mono-insineratörde yakılarak bertaraf edilmektedir. Yanma ürünü 200 000 t/yıl kül açığa çıkmaktadır (Wiebousch ve ark, 1997).

<i>Yeri</i> :	<i>ABD- Indianapolis (2 adet)</i>
Tesis Kapasitesi :	930 000 m ³ /gün
Bertaraf Yöntemi :	Yakma (Çok Gözlü Fırın). Yakma sonucu 132 t/gün kül açığa çıkmakta olup bu küller lagünlere veya terkedilmiş aktif karbon tanklarına boşaltılmaktadır.

<i>Yeri</i> :	<i>Singapur (6 adet)</i>
Tesis Kapasitesi :	800 000 m ³ /gün
Bertaraf Yöntemi :	Açığa çıkan çamur bitki ve ağaçlar için toprak şartlandıcı olarak uygulanmakta veya düzenli depolama alanlarına boşaltılmaktadır.

1.18.2. Arıtma Çamuru Uygulamaları

Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde 1990 yılında 7 milyon ton (kuru) evsel atıksu arıtma çamuru açığa çıkmaktadır. Bu rakamın 2005 yılında 15-20 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Aitken, 1995).

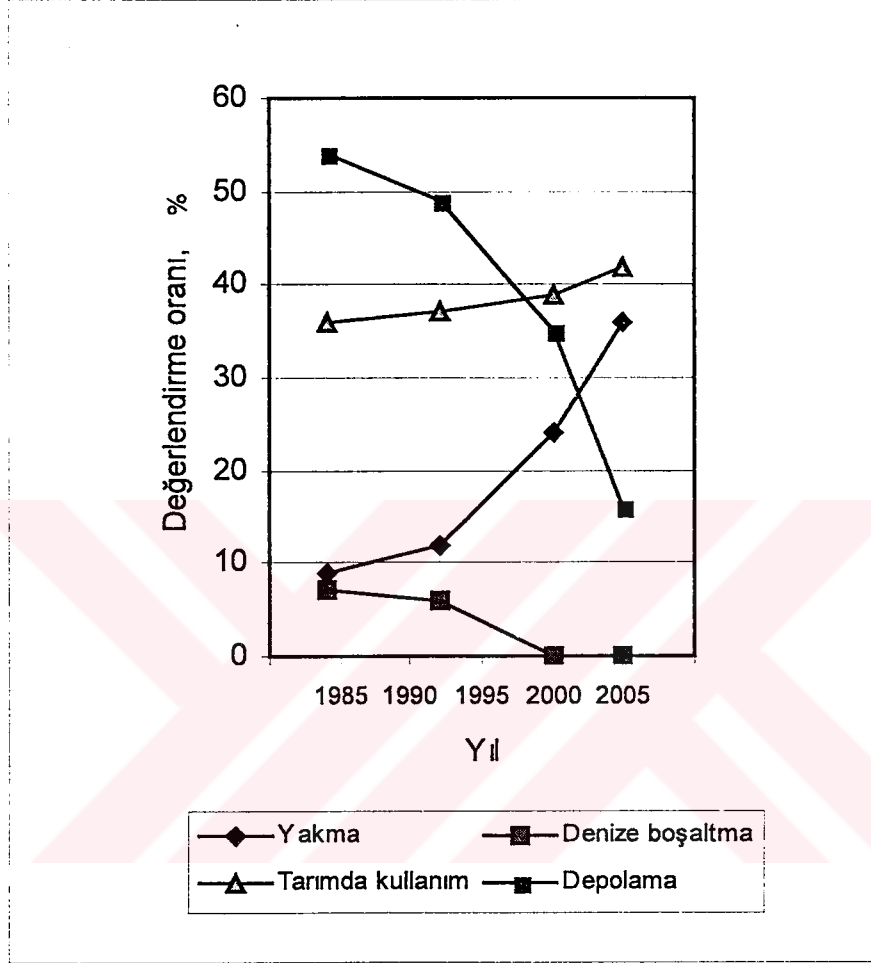
Arıtma çamurunun başlıca bertaraf yöntemi %48 ile düzenli depolamadır. Bunu %32 ile araziye uygulama, %13 ile yakma ve %5 ile denize boşaltma uygulamaları gelmektedir (Çizelge 1.21). Çamur bertarafı her ülkede farklılıklar göstermektedir. İrlanda, İspanya ve İngiltere 1999 yılında yürürlüğe giren arıtma çamurunun denize boşaltılması yasağından özellikle etkilenmektedir. Ayrıca düzenli depolama için uygun alanlar azalmakta ve çamur yakmadaki sınırlamalar tartışılmaktadır.

Çizelge 1.21: Avrupa Birliğindeki evsel atıksu arıtma çamurunun miktarı ve bertaraf oranları (Aitken, 1995)

ÜLKE	TARIMDA KULLANIM (%)	DÜZENLİ DEPOLAMA (%)	YAKMA (%)	DENİZE BOŞALTMA (%)	ÇAMUR MİKTARI (1000 t k.m./yıl)
Almanya	25	65	10	-	2750
Belçika	57	43	-	-	35
Danimarka	43	29	28	-	150
Fransa	27	53	20	-	900
Hollanda	53	29	10	8	280
İngiltere	51	16	5	28	1500
İrlanda	23	34	-	43	23
İspanya	61	10	-	29	300
İtalya	34	55	11	-	800
Lüksemburg	80	20	-	-	15
Portekiz	80	12	-	8	200
Yunanistan	10	90	-	-	200
TOPLAM					7153

Avrupa Birliği ülkelerinde arıtma çamurunu değerlendirme yöntemlerinin 2005 yılına kadarki tahmini eğilimi Şekil 1.31’de gösterilmektedir. Düzenli depolama en çok uygulanan yöntem olmasına karşın, hemen hemen bütün ülkeler dolgu alanı için gerekli alanların azalması, yüksek maliyet, daha sıkı çevre standartları ve geri dönüşümü teşvik eden politikalardan dolayı bu durumun gelecekte sürdürülemeyeceğinin farkına varmaktadırlar. Bazı ülkeler organik atığın geri dönüşümünü artıracak ve depolama sahalarından çıkan metan ve çözünür emisyonların sınırlandırılması için tedbirler almaktadırlar. Almanya, Danimarka ve Fransa gibi ülkelerde gelecekte düzenli depo alanları arıtma çamurunu sadece yakma ürünü kül olarak kabul edebilecektir (Werther ve Ogada, 1999). Yaklaşık %40’lar

düzeyinde olan düzenli saha depolama uygulamaları 2005 yılına kadar %15-20'lere azalacaktır.



Şekil 1.31: Avrupa Birliğinde 2005 yılına kadar arıtma çamuru değerlendirmedeki eğilim (Werther ve Ogada, 1999)

Diğer taraftan tarımda iyileştirici (zirai amaçlı) olarak kullanımı da çamurdaki yüksek ağır metal ve organik kirletici riski ile yüksek oranda azot ilavesi zorunluluğu çamurun tarımsal amaçlı kullanımını sınırlandırmaya devam edecek faktörlerdir.

Yakma, uygulanan yöntemlerden bir diğeridir ve bu yöntemle sayıları gittikçe artan arıtma tesislerinden çıkan çok büyük miktarlardaki arıtma çamurunun etkin bir şekilde üstesinden gelinebilecektir. Gelecekte de yakma uygulamalarının artması

beklenmektedir. Bugün %20'lere yaklaşan yakma oranı 2005 yılında %35-40 seviyelerine ulaşacaktır. Japonya'da ise bu oran halen %55 seviyelerindedir.

Sonuç olarak, gerek Avrupa'da gerekse Dünyada, yakma sistemlerindeki yatırım maliyetinin yüksek olmasına, yakma kriterlerinin sıkılığına, emisyon gazlarının işlenmesi/arıtılması ile ilgili maliyetlerin artmasına ve uçucu küllerle yanma ürünü küllerin bertarafı işlemlerinin zorlaşmasına rağmen, yakma konusuna olan ilgi önümüzdeki yıllarda artmaya devam edecek ve ayrıca diğer termal yöntemler de önem kazanmaya başlayacaktır. Oluşan büyük çamur hacimlerinin mekanik olarak susuzlaştırılan çamur hacminin sadece %10'una karşılık gelen küçük, stabil kül haline dönüştürülmesi ve toksik organik bileşiklerin termal olarak bozunmasının sağlanması yakma (incineration) yöntemini etkin kılmaya devam edecektir (Wesilind ve Ramsey, 1996).

1.19. Ülkemizdeki Arıtma Tesisleri ve Çamur Uygulamaları

1.19.1. Bazı Evsel Atıksu Arıtma Tesisleri

<i>Tesis Adı</i>	:	<i>Ankara ASKİ Biyolojik Atıksu Arıtma Tesis</i>
Tesis Kapasitesi	:	700000 m ³ /gün
İşletmeye Alındığı Tarih	:	1997
Çamur Miktarı	:	400 t/gün
Çamur Katı Oranı	:	%25-30
Susuzl. Yöntemi	:	Belt pres
Bertaraf Yöntemi	:	Ham çamur çürütme tanklarından (8 adet) geçirilerek, oluşan biogaz (%70 metan, %30 CO ₂) enerjiye dönüştürülmekte (1.7 MW) ve arıtma tesisinin enerji ihtiyacının önemli kısmı (%90) karşılanmaktadır. Geri kalanı TEDAŞ'a satılmaktadır. Çamur keki kamyonlarla Sincan-katı atık düzenli depolama alanına boşaltılmakta ve kısmen de yöredeki tarımsal arazilerde gübre olarak kullanılmaktadır (dönüm başına yaklaşık

1.5 kamyon çamur uygulanmaktadır). Önümüzdeki 10 yıl içinde tesisin kapasitesi 1milyon m³/gün'e, oluşacak çamur miktarının da günlük 800 tona ulaşacağı tahmin edilmektedir.*

Tesis Adı	:	İzmit Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi
Tesis Kapasitesi	:	35000 m ³ /gün
İşletmeye Alındığı Tarih	:	1996
Çamur Miktarı	:	50 t/gün
Çamur Katı Oranı	:	%25
Susuzlaştırma Yöntemi	:	Belt pres (3 adet, 8 m ³ /s). Yoğunlaştırma tankından gelen çamur polielektrolit solüsyonu ile karıştırılarak preslere sokulur ve katı madde konsantrasyonu %25 olan çamur kekine dönüştürülmektedir (Şekil 1.32).
Bertaraf Yöntemi	:	%25'lik çamur keki, kireç ile karıştırılarak %40 katı madde konsantrasyonuna ulaştırılmakta ve kamyonlarla Evsel ve Endüstriyel Katı Atık Düzenli Depolama Alanına gönderilmektedir. Yakın gelecekte kurutma-peletleme tesisi kurulması planlanmaktadır. Pelet haline getirilecek çamur daha sonra toprak iyileştirici olarak kullanılmak üzere nihai bir ürün şeklinde kullanılabilecektir.**

Tesis, İzmit'in doğu kesiminde yer alan bazı endüstri kuruluşlarının ve Yahyakaptan, Uzunçiftlik yerleşim bölgelerinin atıksularının, yönetmeliklerde belirtilen deşarj limitlerine uygun olarak arıtılmasını sağlayan ve klasik aktif çamur yöntemi ile çalışan bir biyolojik arıtma tesisidir (Resim 1.2). Atıksular tesise, Çevre Entegre Projesi kapsamında yapılmış olan ve çapları 600-1400 mm arasında değişen

*İ. BAKICI, 1999, Sözlü görüşme, ASKI atıksu Arıtma Tesisi, Ankara

** M. MÜSTECAPLIOĞLU, 2001, Sözlü görüşme, İZAYDAŞ Atıksu Arıtma Tesisi, İzmit

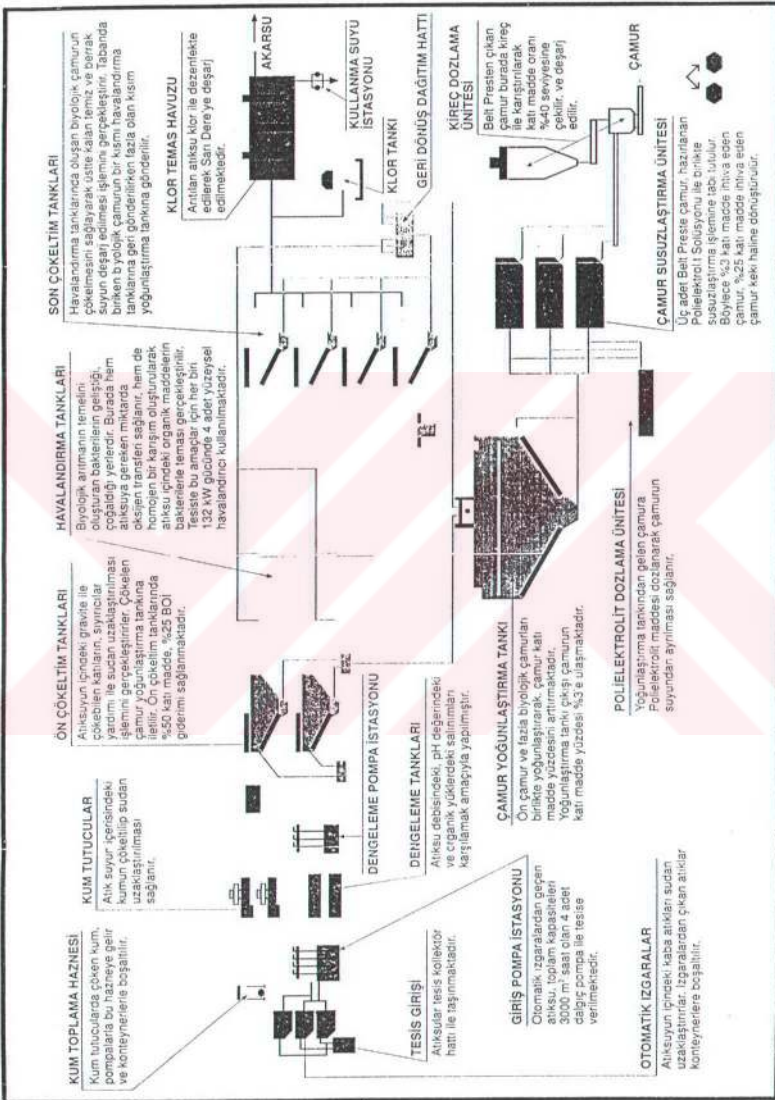
yaklaşık 18 km. uzunluğundaki kollektör hattı ile taşınmaktadır (Arıtım Dünyası, 1999).



Resim 1.2: İzmit Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinden genel görünüm

Tesis Adı	:	Tuzla İSKİ Biyolojik Atıksu Arıtma Tesis
Tesis Kapasitesi	:	225000 (I)+ 450000 (II)+ 900000 (III) m ³ /gün
İşletmeye Alınacağı Tarih	:	--
Çamur Miktarı	:	200 t/gün (son durumda)
Çamur Katı Oranı	:	%25-30
Susuzlaştırma Yöntemi	:	Santrifüj
Bertaraf Yöntemi	:	Çamur keki kamyonlar ile uzaklaştırılacaktır. Çamurların yakılması amacıyla Avrupa yakasında Baltalimanı ve K.Çekmece'de, Asya yakasında ise Riva ve İstanbul-Tuzla'da sabit ve akışkan yataklı çamur yakma tesisleri planlanmaktadır.*

H. ŞENER, 1998, Yazılı görüşme, İSKİ, İstanbul



1.19.2. Bazı Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisleri

Tesis Adı	:	İstanbul-Tuzla Deri OSB Atıksu Arıtma Tesis
Tesis Kapasitesi	:	36 000 m ³ /gün
İşletmeye Alındığı Tarih	:	1993
Çamur Miktarı	:	160 t/gün
Çamur Katı Oranı	:	%25-30
Susuzlaştırma Yöntemi	:	Belt pres
Bertaraf Yöntemi	:	Çamur keki kamyonlarla Belediyenin gösterdiği alana boşaltılmaktadır. 15 t/s kapasiteli bir yakma tesisi planlanmaktadır.

Tuzla Yakma Tesis (Atıktan Enerji Üretimi Projesi):

İstanbul Tuzla Organize Deri Sanayi Bölgesinde imalat atıkları ve atıksu arıtma çamurlarının (%25 k.m., 320 t/gün) yakılarak toplam tehlikeli atık hacmi %95 azaltılacaktır. İlave yakıt olarak doğal gaz ve nafta kullanılacaktır (%70-75). Proses sonucu kalacak kül miktarı %5-10 civarında olacaktır (İODSD, 2001).

Atığın karakteristiği şu şekildedir:

Arıtma çamuru : C:58.7, H:6.5, O:41.1, N:3.7, LHV:4040 kcal/OM

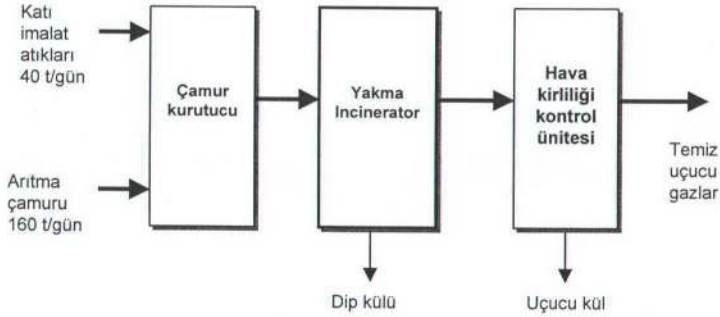
Katı (imalat) atıklar : C:53.1, H:7.8, O:35.4, N:3.7, LHV:5000 kcal/OM

Proje 2 aşamadan oluşacaktır:

1. aşama: Atıkların yakılarak yok edilmesi

2. aşama: Atıktan enerji üretimi (KO-JENERASYON)

1.aşamada yakma işlemi çamurun ve katı atıkların kurutulması ile başlayacaktır (Şekil 1.33). Daha sonra doğal gaz ile yakılacaktır (CAG, 1997).



Şekil 1.33: Tuzla çamur yakma tesisi akış diyagramı (İODSB, 2001)

Tuzla Deri OSB arıtma çamurları için önerilen alternatif yakma sistemleri şu şekildedir:

Firma	Kapasite (ton/yıl)	Kurutma	Yakma sistemi	Yakma sıcaklığı	Boyutları
Hölter (Almanya)	110 000 (15 t/s)	Ön kurutma (%30-40 k.m.)	AYF	750-850 °C	Yük : 17 m Yatak çapı: 5 m Fribord çapı: 8.5 m
CRSS (A.B.D)	1.aşama: 160 t/gün 2.aşama: 320 t/gün	Kurutma (%15-20 nem)	Döner Fırın	1050 1.fırın: 760-1370 2.fırın: 980-1200	
Degremont (Fransa)		%72.5 nem	ÇGF (piroliz yakma)		

Tesis Adı	:	Bursa OSB Atıksu Arıtma Tesisi
Tesis Kapasitesi	:	40000 m ³ /gün (Maksimum 50000 m ³ /gün)
İşletmeye Alındığı Tarih	:	1998
Çamur Miktarı	:	100 m ³ /gün
Çamur Katı Oranı	:	%25
Susuzlaştırma Yöntemi	:	Belt pres

Bertaraf Yöntemi : Oluşan çamur keki 10 günlük bir depo hacmine sahip kek depolama sahasına bant konveyör yardımıyla boşaltılmaktadır. Çamur k.m. oranını %40'a çıkaracak kurutma prosesi çalışmaları devam etmektedir. Buna göre 7.5 m uzunluğunda, 1.7 m genişliğinde ve 2.5 m yüksekliğinde ve iç hacmi 9.3 m^3 olan bir çamur kurutucuya %25 olarak beslenen çamur %40 oranına yükseltilebilecektir.

Tesis Adı : *İzmir-Atatürk OSB Atıksu Arıtma Tesisi*

Tesis Kapasitesi : $12000 \text{ m}^3/\text{gün}$ (Maksimum $21000 \text{ m}^3/\text{gün}$)

İşletmeye Alındığı Tarih : 1991

Çamur Miktarı : 18-20 t/gün

Çamur Katı Oranı : %25

Susuzlaştırma Yöntemi : Belt pres + kurutma yatağı

Bertaraf Yöntemi : Günde 1-2 kamyon çamur keki bölgeye 1.5 saatlik mesafedeki tehlikeli atıkların toprağa gömme yoluyla imha edildikleri bir tesis olan İzmir Büyükşehir Belediyesine ait Harmandalı düzenli depolama alanında tehlikeli ve zararlı arıtma çamurları için gösterilen yere boşaltılmaktadır.

Tesis Adı : *Menemen Deri OSB Atıksu Arıtma Tesisi*

Tesis Kapasitesi : $9000 \text{ m}^3/\text{gün}$ (Nihai Kapasite $18000 \text{ m}^3/\text{gün}$)

İşletmeye Alındığı Tarih : 1993

Çamur Miktarı : 80-100 t/gün

Çamur Katı Oranı : %20-25

Susuzlaştırma Yöntemi : Belt pres + kurutma yatağı

Bertaraf Yöntemi : Tesiste oluşan krom çamuru kurutma yataklarında kurutulmakta, kimyasal ve biyolojik

çamurlar ise yoğunlaştırma havuzlarında yoğunlaştırıldıktan sonra debisi 21 m³/s kapasiteli 2 adet belt pres ile kek haline getirilmektedir. Kurutma yatağında %35 katı oranına yükseltilecek çamur keki kamyonlarla (günde 9-10 kamyon) 35 km mesafedeki İzmir Büyükşehir Belediyesine ait Harmandalı düzenli depolama alanına boşaltılmaktadır. 2. Kademesinin de tamamlanması ile her biri 33 m³/s kapasiteli 3 adet satrifüj dekantörde devreye girecek ve toplam 300 t kek/gün'ü aşacaktır.*

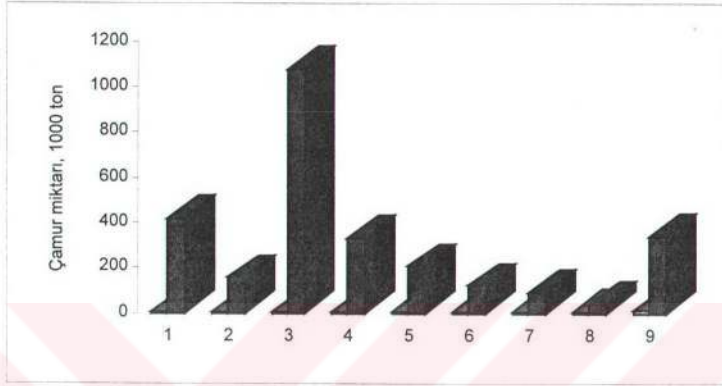
1.19.3. Arıtma Çamuru Uygulamaları

Ülkemizde özellikle son yıllarda yasal düzenlemelerle birlikte atıksu arıtma tesislerinin sayısında önemli artışlar sağlanmış ve beraberinde de açığa çıkan çamurlar büyük miktarlara ulaşmıştır. Ülkemizde çamur bertarafı genellikle katı atıklarla birlikte depolama veya araziye gömme şeklinde gerçekleşmektedir. Bu yöntemler ucuz olmalarına karşılık, kullanılacak alanların azalması ve taşıma masrafları dolayısıyla alternatif yöntemler aranmaktadır.

Çamurun tarımsal arazide kullanılarak bertaraf edilmesinde çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Özellikle N ve/veya P miktarı bitkinin ve toprağın yıllık ihtiyacından fazla olmamalıdır. Bunun yanı sıra çamurların içeriğinde bitki ve toprak için zararlı toksik maddeler ve ağır metaller bulunabileceğinden tarımsal arazide kullanım sürekli kontrol ve dikkat gerektirmektedir (Akça ve ark, 1996).

Türkiye'de 65'i devlete 278'i özel sektöre ait olmak üzere toplam 343 adet endüstriyel atıksu arıtma tesisinde yaklaşık 2.8 milyon ton arıtma çamuru açığa çıkmaktadır. Bu çamurun 421 000 tonu tarımda ve 156 000 tonu diğer amaçlarla kullanılırken; 1,08 milyon tonu araziye, 333 bin tonu belediye çöplüğüne, 211 000 tonu denize boşaltılarak, 121 000 tonu gömülerek, 91 000 tonu düzenli depolanarak ve 43 000 tonu yakılarak bertaraf edilmektedir (Şekil 1.34).

*Cüneyt ÖZTÜRK, Çevre Müh., 1999, Sözlü görüşme, İDESBAŞ, Menemen-İzmir



Kullanım:

1. Tarımda kullanım

2. Diğer

Bertaraf:

3. Araziye Boşaltma

4. Belediye Çöplüğüne Atma

5. Denize Boşaltma

6. Gömme

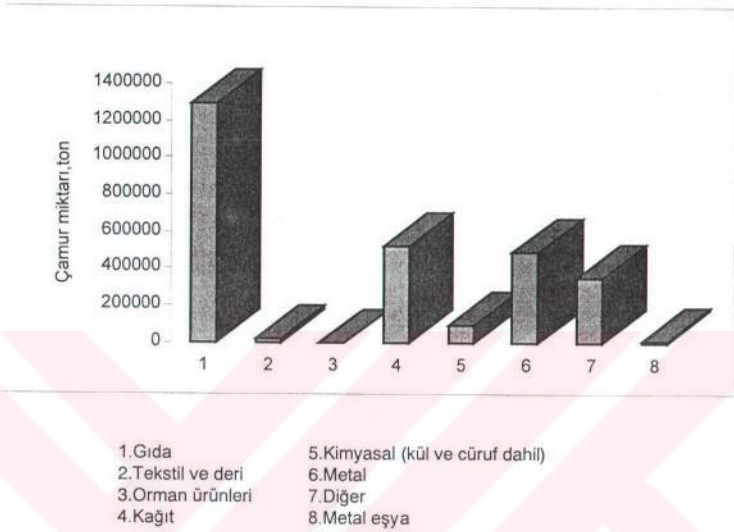
7. Düzenli Depolama

8. Yakma

9. Diğer

Şekil 1.34: Kullanım/bertaraf yöntemlerine göre endüstriyel arıtma çamuru miktarı (DİE, 1994)

Sanayi grubuna göre endüstriyel atıksu arıtma çamurlarının miktarı Şekil 1.35’de verilmektedir. Buna göre 1,3 milyon tonu gıda esaslı olmak üzere, 524 000 tonu kağıt, 487 000 tonu metal, 100 000 tonu kimyasal, 16 000 tonu tekstil ve deri, 13 000 tonu metal eşya, 2400 tonu orman ürünleri esaslı sanayi grubundan açığa çıkmaktadır.



Şekil 1.35: Sanayi gruplarına göre endüstriyel arıtma çamuru miktarı (DİE, 1994)

1.19.4. Organize Sanayi Bölgelerinde (OSB) Durum:

Ülkemizde özellikle 1990'lı yıllardan sonra yapımına hız verilen büyük kapasiteli endüstriyel atıksu arıtma tesislerinden her yıl yaklaşık 270 000 ton arıtma çamuru ortaya çıkmaktadır. Özellikle deri sanayiinden kaynaklanan (%65-70) ve büyük miktarlara ulaşan bu atıkların 1 milyon tona ulaşacağı beklenmektedir (Çizelge 1.22).

Çizelge 1.22: OSB'lerindeki arıtma tesisleri ve açığa çıkan/çıkacak çamur miktarları (STB, 2001)

OSB ADI	ALAN (Ha)	ATIKSU DEBİSİ (m ³ /gün)	GÜNLÜK ÇAMUR KEKİ MİKTARI (t)	YILLIK ÇAMUR KEKİ MİKTARI (t)
I. İŞLETMEYE ALINANLAR				
1. BURSA	150	40000-50000	65-85	25000-30000
2. DENİZLİ	400	42000	70	25000
3. HATAY-ISKENDERUN I	180	1200-2400	2-4	750-1500
4. İSTANBUL-TUZLA (DERİ)	240	36000	300	110000
5. İZMİR-ATATÜRK I. Kademe	600	12000	20	7500
6. İZMİR-MENEMEN (DERİ) I	200	9000	120	45000
7. MANİSA I	150	6500	10	4500
8. TEKİRDAĞ-ÇERKEZKÖY I	440	21000	35	13000
9. ADANA I+II	1100	36000-61000	60-100	22000-36000
10. ÇANKIRI-KORGUN	110	2000-4000	4-8	1500-3000
TOPLAM (I)				253500-274000
II. İNŞAATI DEVAM EDENLER				
1. BURSA-İNEGÖL	300	24000-65000	40-110	15000-40000
2. G. ANTEP	1.300	30000-90000	50-150	18000-55000
3. İZMİR-ATATÜRK II	600	6000	10	3600
4. İZMİR-MENEMEN (DERİ) II	200	13000	180	65000
5. MALATYA	300	24000	40	15000
6. MANİSA II	200	12000	20	7000
7. UŞAK (DERİ)	260	24000	320	120000
TOPLAM (II)				247000-311000
TOPLAM (I+II)				500.000-585.000
III. PROJE VE İHALE HAZIRLIĞINDAKİLER				
1. ANTALYA	196	10000-20000	15-35	5500-13000
2. BARTIN	50	1000-2000	2-4	750-1500
3. BOLU-GEREDE (DERİ)	100	4000-12000	30-90	11000-33000
4. BURDUR	70	2500-5000	5-10	2000-4000
5. BURSA (DERİ)	167	10000-15000	120-200	45000-75.000
6. İSPARTA-S. DEMİREL	252	4000-6000	10-15	3600-5500
7. İZMİR K. PAŞA	410	24000-36000	40-60	15000-22000
8. KAYSERİ	600	12500-25000	20-40	7500-15000
9. NIĞDE-BOR (DERİ)	292	8000-12000	100-150	36000-55000
10. TEKİRDAĞ-ÇORLU (DERİ)	120	20000	270	100.000
11. TRABZON-ARSIN	100	1500-3000	3-5	1100-2000
12. UŞAK I	360	24000	40	15000
TOPLAM (III)				240000-340000
TOPLAM (I+II+III)				740000-925000

1.20. Çamurla ilgili Ükemizdeki Yasal Mevzuat

- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usüller Tebliği
- Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
- Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
- Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 1988)- Teknik Usüller Tebliği:

Bu tebliğde arıtma çamurlarının yoğunlaştırılması, stabilizasyonu ve susuzlandırılması hususlarında teknik detaylar yer almaktadır. Ayrıca arıtılmış suların sulamada kullanılması konusuna da yer verilmektedir.

Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (KAKY, 1991):

Evsel (kentsel) atıksu arıtma tesisinden elde edilen (atılan) arıtma çamurları ile zararsız atık sınıfına girmeyen sanayi (endüstriyel) atıksu arıtma tesisi çamurları söz konusu yönetmelik kapsamındadır. Bu yönetmelikte;

Arıtma çamuru: Evsel ve evsel nitelikteki endüstriyel atıksuların, fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemleri sonucunda ortaya çıkan , suyu alınmış kurutulmuş çamuru,

Ham çamur: Çürütme, kurutma ve su alma (susuzlandırma) gibi ön işlemlere tabi tutulmamış arıtma çamurunu,

Epidemik kusursuz çamur: Kimyasal ve termik şartlandırma, termik kurutma, ısıtma, kompostlaştırma, kimyasal stabilizasyon veya diğer işlemlerle hastalık mikrobi öldürülmüş çamuru ifade etmektedir.

Yönetmeliğin 38. maddesi arıtma çamurunun evsel katı atıklarla birlikte depolanmasını düzenlemektedir. Buna göre arıtma çamurunun depolanabilmesi için içinde bulunan su oranının %65 olması gerekmektedir. Ancak depo yeri işletmecileri, çamurun su oranının daha fazla olması halinde, deponun stabilizesini bozmayacağı, koku problemi ortaya çıkarmayacağı kanaatine varılırsa, su oranı %75'e kadar olan çamurları kabul edebilirler.

Katı atıkların kompostlaştırılması ve tarımda kullanılmak istenen kompostun kalite kriterleri, ayrıca, yakma konusundaki teknik hususlarda belirtilmektedir. Evsel arıtma çamuru ve evsel katı atık benzeri endüstriyel atıkları yakmak amacı ile inşa edilecek yakma tesislerinde, ağırlıkça toplam katı atık miktarının %1'ini geçen organik bağlı klor veya 1 kg atıkta 50 mg'dan daha fazla halojenli organik madde ihtiva eden tehlikeli atıkların yakılmasının yasak olduğu belirtilmektedir.

Yine arıtma çamurlarının tarımda kullanılmasının şartları yönetmeliğin 44 ve 45. maddelerinde yer almaktadır. Buna göre;

- Arıtma çamuru kullanmadan önce, kullanılmak istenen toprağın pH değeri, kurşun, kadmiyum, krom, bakır, nikel, civa ve çinko muhtevaları yönünden analiz edilmesi,
- Arıtma çamuru verilen toprağın ağır metal analizlerinin yaptırılması (her 6 ayda bir) ve sınır değerlerin aşılması durumunda arazi uygulamasının durdurulması, zorunludur.

Tarımda kullanılacak arıtma çamurunda izin verilen maksimum ağır metal içerikleri Çizelge 1.23'te gösterilmektedir.

Çizelge 1.23: Tarımda kullanılacak arıtma çamuruna ait ağır metal sınır değerleri (KAKY, 1991)

Ağır metal	Sınır değer (mg/kg çamur k.m.)
Kurşun , Pb	1200
Kadmiyum, Cd	20
Krom, Cr	1200
Bakır, Cu	1200
Nikel, Ni	200
Civa, Hg	25
Çinko, Zn	3000

Ayrıca ham çamurun tarımda ve ormanda sebze ve meyva tarımında kullanılması yasaktır. Epidemik olarak kusursuz olmayan çamurun mera ve otlaklarda, bitki yaşadığı sürece kullanılması yasaktır.

Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (TAKY, 1995):

Kentsel ve endüstriyel atıksu arıtım tesisleri *tehlikeli atık üretilmesine neden olan faaliyetler* sınıfına girmektedir. Ayrıca sanayi atıklarının bertarafı işleminden kaynaklanan atıklar ve evsel atıkların yakılmasından kaynaklanan atıklar özel değerlendirmeye tabi tutulacak atık olarak değerlendirilmektedir.

Bu tür atıkların yasal bertaraf yöntemleri şu şekilde belirtilmektedir:

- Toprağın altına düzenli depolama (boş maden yatakları vb.)
- Toprağın üstünde düzenli depolama (arazide depolama vb.)
- Arazi işleme (sıvı veya çamur atıkların toprakta biyolojik bozunmaya uğraması vb.)
- Derine enjeksiyon (pompanabilir atıkların kuyulara veya doğal boşluklara enjeksiyonu vb.)
- Yüzey doldurma (sıvı veya çamur atıkların kovuklara, havuzlara ve lagünlere doldurulması)
- Özel işlemlerle arazi depolaması
- Yakma (özel yakma fırınlarında)
- Nihai depolama (bir madende konteyner içine yerleştirme vb.)

Atık beyan formları ile endüstriyel tesislerin arıtma ünitelerinden (Çöktürme tanklarından, ikincil çöktürme tanklarından (biyolojik arıtma sonrası), kimyasal çöktürmeden) kaynaklanan çamur miktarları (ton/yıl veya kg/ay) ve çamurdaki su oranı (% olarak) istenmektedir. Ayrıca çamurla ilgili analiz sonuçları da atık beyan formunda belirtilmesi gerekmektedir. Burada alüminyum, bakır, civa, çinko, kadmiyum, krom (IV), kurşun, nikel ölçülen analiz parametre olarak alınmakta ve ölçü birimi, yıllık ortalama konsantrasyon, ölçüm yöntemi, ölçüm sıklığı yer almaktadır.

Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (TAKY, 1995)'nde Ek-11 A'da belirtilen değerlere göre bu tür atıklar;

i- sırf tehlikeli atık (tehlikeli atık üst sınırını geçiyorsa depolamadan önce artırılır, yoksa özel depolama alanına gönderilir)

- ii- tehlikeli atık (tehlikeli atık sınıfına giriyorsa)
- iii- tehlikesiz atık (tehlikeli atık alt sınırı ile inert atık üst sınırı arasındaysa)
- iv- inert atık (inert atık üst sınırını geçmiyorsa)

olarak sınıflanmaktadır. Çizelge 1.24'te bu sınır değerler verilmektedir.

Çizelge 1.24: Atıkların düzenli depo tesislerine depolanabilme kriterleri (TAKY, 1995)

Parametre	Inert atık (mg/L)	Tehlikeli atık limitleri (mg/L)
pH	4-13	4-13
TOC	<200	40-200
Kurşun, Pb	<5	0.4-2.0
Kadmiyum, Cd		0.1-0.5
Krom, Cr IV		0.1-0.5
Bakır, Cu		2.0-10.0
Nikel, Ni		0.4-2.0
Civa, Hg		0.02-0.1
Çinko, Zn		2.0-10.0
Arsenik, As III		0.2-1.0
Fenoller	<10	20-100
Fluorür, F	<5	10-50
Amonyum	<50 (mgN/L)	200-1000
Klorür, Cl	<500	1200-6000
Siyanür, CN ⁻	<0.1	0.2-1.0
Sülfat, SO ₄ ²⁻	<100	200-1000
Nitrit	<3	6.0-30.0

Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (TKKY, 2001):

Bu yeni Yönetmelikle arıtma çamurunun toprağa uygulanmasında ağır metal sınır değerlerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Buna göre, Cd 40 mg/kg'a, Cu 1750 mg/kg'a, Ni 400 mg/kg'a ve Zn 4000 mg/kg'a çıkarılmıştır. Ayrıca, toprakta on yıllık dönem esas alınarak bir yılda verilmesine müsaade edilen ağır metal yükü belirtilmekte ve 'Arıtma Çamuru Analiz Belgesi' örneği sunulmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Ho ve arkadaşları (1988) tarafından laboratuvar ölçekli bir akışkan yatakta endüstriyel atıksuların biyolojik arıtımı sonucu açığa çıkan %60 nem içerikli katı kek formundaki biyolojik çamur kullanılarak (hem yaş hemde kuru çamur şeklinde) yapılan deneysel çalışmada; yakmanın bir fırındakinden çok daha hızlı gerçekleştiğini, yanmanın ilk dakikasında %96'lık bir yanma veriminin elde edildiğini, aynı yanma verimine elektrikli bir fırında ancak 25 dakikada ulaşılabilirdiği ve yaş çamur yanma hızının kuru çamura göre biraz daha düşük olduğunu, yaş çamur için %90'a kuru çamur için %75'e varan hacim azalması elde edildiği ve yanma prosesinin iki farklı sıcaklıktan (750 °C ve 880 °C) etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Probst (1992) tarafından 0.3 MW ve 10.8 MW yarı-pilot ölçekli DAYF'da yapılan çalışmada, kömürün çamurla birlikte yakıldığı ve çamur oranındaki artışla CO ve N₂O emisyonlarında artış gözlemlendiği ancak yüksek sıcaklıkta uzun gaz tutma süresi sağlayan bir siklonla bu değerlerin düşürülebileceği belirtilmektedir.

Van Doorn ve ark. (1992), arıtma çamurunun kömürle birlikte yakılması ile oluşan emisyon özelliklerini tespit etmişlerdir. Buna göre AYT'da birlikte yakmanın baca gazında NO ve CO konsantrasyonlarında çok az bir artış olduğu ve NO_x emisyonlarının çamur oranıyla bir miktar arttığı ancak SO₂ ve HCl konsantrasyonlarında çamur ilavesiyle hızlı bir artış olduğu tesbit edilmiştir.

Rink ve ark. (1993) tarafından döner fırın ve akışkan yataklı yakma fırınında kül, azot ve oksijen içerikleri oldukça farklı olan iki kağıt değirmen çamurunun yakılması amacıyla bir seri pilot deneyler yapılmıştır. 61 cm iç çapa sahip, 61 cm uzunluğunda 130 kW pilot ölçekli döner fırın ve 9 m yüksekliğinde ve 61 cm dış, 26 cm iç çapa sahip 130 kW dolaşimli akışkan yatakta nominal sıcaklıkta (827 °C) yapılan deneylerde; hidrokarbon, CO, O₂, NO ve CO₂ gazları sürekli analiz edilmiştir. Döner fırındaki NO üretimi reaktördeki azot (çamurdaki) ve oksijen (gaz fazındaki) teminine bağlı olduğu, AYT'da CO konsantrasyonlarının yatak üzerinde birden yükseldiği, hem AYT hemde Döner Fırında yanmamış hidrokarbonların baca gazında mevcut olduğu tespit edilmiştir. Uçucu küllerin yapısının yakılan

malzemenin (çamur, çamur ve silis kumu karışımı) türünden bağımsız olduğu, AYF deneylerinde daha küçük uçucu kül ve dip külü taneciklerinin oluştuğu belirlenmiştir.

Hajicek (1994) tarafından kuru evsel arıtma çamuru kullanılarak yapılan ve Los Angeles Eyaleti tarafından da desteklenen çalışmada 1-MW pilot ölçekli AYF’nda yakma testleri uygulanmış; yanma verimi, işletme ve termik verim ve baca gazı emisyonları açısından iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu tür bir atığı yakacak boylerin (kazan) konfigürasyonu nisbeten yüksek ikincil hava oranlarıyla çalışacak, dip külünün toplam küle oranı da yüksek olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneysel çalışmalar boyunca sıcaklığın artmasıyla SO_2 ve NO_x emisyonlarının arttığı, yüksek sıcaklıklarda kükürdün %94’ünün tutulduğu fakat daha yüksek kalsiyum-kükürt oranının gerektiği tesbit edilmiştir. Yakıt 494 °C’lik bir yanma sıcaklığında beslenmeye başlanmış, yaklaşık 827 °C’ye ulaşan yanma sıcaklığına kadar açığa çıkan kokunun rahatsız edici boyutta olduğu, ancak daha yüksek fırın sıcaklığında yakıt beslemeye başlandığında koku probleminin azaldığı tespit edilmiştir.

Werther ve ark. (1995) 100 mm iç çapa ve 15 m yüksekliğe sahip pilot ölçekli nır DAY’ta mekanik olarak susuzlaştırılmış (yaş) çamur üzerinde yaptığı çalışmalarda son derece düşük NO_x emisyonlarının elde edildiği ve çamurdaki yüksek nem içeriğinin CO emisyonları üzerinde etkisinin olmadığı ve Almanya’daki standartları (50 mg/m³) kolayca karşıladığını tespit etmiştir.

Kozinski ve ark. (1995) tarafından 23 cm çapında 7 m yüksekliğinde 300 kW’ya kadar yanma kapasitesine sahip pilot ölçekli dolaşimli bir akışkan yataкта 3 ayrı yatak malzemesi (silis kumu, ultrasorb ve alumina partikülleri) ile boya prosesinde açığa çıkan ve kurutulan 3650 kcal/kg ısıl değere sahip çamurun (%9.25 nem, %19.57 kül, %37.85 C ve %28 O) yanma karakteristikleri (akışkanlaşma, gaz konsantrasyonu, duvar sıcaklığı ve basınç) belirlenmiştir. Reaktör boyunca CO_2 seviyesinin artış, CO konsantrasyonunun hızlı düşüş gösterdiği; en düşük CO_2 ve en yüksek CO miktarının yatak seviyesinin tam üzerinde elde edildiği tespit edilmiş ve en yüksek gaz sıcaklığı 1400 °C’de bu bölgede gözlenmiştir.

Deneyden önce AYF 0.4 m/sn hızda ve 65 kW yakma oranında 10 saat ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Deneylerde kullanılan çalışma şartları şu şekilde belirlenmiştir:

Yakma oranı	:	165 kW
Ortalama oksijen seviyesi	:	%9.7
Yatak sıcaklığı	:	657 °C
Kalma süresi	:	1.9 sn
Hız	:	0.6 m/sn
Çamur besleme oranı	:	6.8 kg/s

Kirletici gazların emisyon oranları çıkışta düşük seviyelerde tespit edilmiştir: NO_x -42.8 mg/L, CO-61.6 mg/L ve THC-5.5 mg/L. Baca gazında oksijen seviyesi ise %8.9-10.1 arasında değişmektedir. Ağır metallerin ise çamur yüzeyinden ziyade çekirdeğinde yerleştiği belirlenmiştir. Bunun pratik anlamı ise toksik metallerin partikül içerisinde hareketsiz halde olması durumunda uçucu külün potansiyel çevresel etkilerinin azaltılabileceği demektir.

Doorn ve ark. (1995) tarafından biomas ve çamurun AYF'da kömürle birlikte yakıldığı ve yanma davranışı ile baca gazı emisyonlarının belirlendiği çalışmada; yatak malzemesinde aglomerasyon olduğu ve yanma şartlarının ticari uygulamalara uyarlanması gerektiği, deneysel çalışmalarda nisbeten düşük çalışma sürelerinden dolayı kül aglomerasyonunun sorun teşkil etmediği belirlenmiş ve oldukça yüksek SO_2 ve nispeten düşük NO_x değerleri elde edilmiştir.

Zander ve ark. (1996) %50-60 nem içerikli susuzlandırılmış kağıt endüstrisi çamurunun peletlenmesi ve %20 nem oranına kurutulması sonrası yaklaşık 8 birim biomas (tahta tozu) ve 1 birim çamur pelet (290±170 kcal/kg ısı değere sahip) oranında yanma ünitesi sıcaklığı ortalama 480±60 °C olan endüstriyel bir kazanda kontrollü olarak yakma deneylerine tabi tutmuşlardır. Yakma sonucu %3±1.3 uçucu kül ve %13±5 dip külü açığa çıkmıştır. Temel kirletici emisyon olarak CO, NO_2 ve SO_2 emisyonları ABD standartları içerisinde kalmıştır.

Swithenbank (1996) çamur, kömür ve biyomasın (tavuk gübresi) AYT'da 700-900 °C arasında birlikte yakılması konusunda çalışmalar yapmıştır. Değişik işletme şartlarında ısı aktarım oranı, yatak sıcaklığı ve baca gazı kompozisyonları ölçülmüş ve sonuçta propan ile %100'lük bir yanma verimine ulaşılmıştır.

Mininni ve ark. (1997) enerji kazanımlı bir çamur yakma tesisi tasarım modeli geliştirmiştir. Çamur kurutulmaksızın yüksek yakıt (metan) tüketimine (%25 çamur keki konsantrasyonunda 149-192 Nm³/t) karşın 391-515 kW_s/t-çamur keki elektrik enerjisi elde edilmiş, kurutma işlemini müteakip %44 katı konsantrasyonuna ulaşan çamurda yakıt tüketiminin 20 Nm³/t'a kadar düştüğü tespit edilmiştir. Akışkan yatakta ototermik yanma olduğu için yakıt sadece ikincil yakma odasında gerekli olmuştur. Enerji üretimi 54.5 kW_s/t kek olarak elde edilmiştir. Bu model 35 t/gün %25 kek konsantrasyonu ve %65 uçucu katı madde içeren toplam çamura sahip 500 000 nüfusa cevap verebilecek bir yakma tesisinin boyutlandırılması için uygulanmıştır. Çalışma şartları şu şekildedir:

AY yüksekliği	:	2 m
Serbest bölge yüksekliği	:	5 m
Basınç	:	107.7-122.1 kPa
Yatak sıcaklığı	:	750 °C
Fribord sıcaklığı	:	850 °C
Hız	:	0.9-1.2 m/sn
Çamur besleme oranı	:	6.8 kg/s

Swithenbank ve ark. (1997) tarafından 4180 kcal/kg ısı değere sahip; %72 nem, %25.4 kül, %42.3 C içeren ve yakma öncesi %30-35 katı oranına susuzlandırılan arıtma çamuru ile kömür, tavuk gübresi ve bıçkıtozu karışımının 700-900 °C'de 20 cm çaplı küçük-ölçekli bir döner akışkan yataklı fırında yakılması başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Döner yatak statik yataktan mekanik olarak daha kompleks olmasına karşın; yüksek yanma verimi, iyi karışım, düşük emisyon, artan ısı transfer oranı gibi çeşitli avantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada ısı transfer oranı, yatak

sıcaklığı ve baca gazı bileşiklerinin ölçümü değişik çalışma şartlarında uygulanmıştır. Rotasyonel kuvvetlerin temel akışkanlaşma karakteristiklerine (basınç düşüşü, minimum akışkanlaşma ve partikül karışımı) olan etkisi de bir model üzerinde araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar; döner AYF'nin daha yüksek yanma şiddeti üretebileceğini, düşük toksik emisyonlara (temiz teknoloji) ve geleneksel akışkan yataklı fırından daha kolay ve hızlı ateşlemeye sahip olduğunu göstermiştir. Yaklaşık 100 000 nüfusa sahip orta ölçekli bir yerleşim yerinde açığa çıkan tüm arıtma çamurunun yakılması için tahminen sadece 50 cm uzunluğunda 80 cm çapında bir fırının yeterli olabileceği belirtilmektedir. Yakma verimi propan yakıtla %100, kömürle %90 üzerinde elde edilmiştir.

Rafineri çamurlarının pilot ölçekli bir AYF'da yakılması ile ilgili yapılan bir çalışmada %98'in üzerinde bir yanma verimi elde edilmiş ve bu tekniğin bu tür çamur atıklar için emniyetli ve etkin olduğu, bunun sadece toksisitenin uzaklaştırılması için değil aynı zamanda bertaraf edilecek çamurun hacminin de azaltılmasını sağlayan bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Sankaran, 1998).

Avrupa Birliği'nde 'Biyomas/Arıtma Çamuru ve Kömürün Birlikte Yakılması' konusunda yürütülen proje çerçevesinde ön-kurutma çamurunun kömürle birlikte yakıldığı pilot tesis çalışmalarında 700-950 °C sıcaklıkta, %30 çamur oranına kadar birlikte yakmada yeterli kadar yüksek bir yanma verimi (burnout) ve düşük CO emisyonları izlenmiştir. Biyomasla birlikte yakmada oldukça düşük SO₂ emisyonları, kademeli olmayan yakmada artan çamur oranıyla artan NO_x değerleri, inşaat sektöründe kullanılabilecek kalitede ağır metal seviyesi düşük kül elde edilmiştir (Hein, 1998).

Ön kurutma çamurunun DAY'ta yakılması boyunca NO ve N₂O emisyonlarının sonuçları çamur ile kömürün benzer özellik gösterdiğini ancak yaş çamurda bu benzer NO_x özelliklerinin tesbit edilmediği belirtilmiştir (Werther ve Ogada, 1999). Farklı bir NO_x/O₂ eğilimi ortaya çıkmıştır. Oksijen artışıyla NO_x'in azaldığı ve yanma sıcaklığının NO_x üzerinde önemli olmayan bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Lotito ve arkadaşları (2001), DAY ve döner fırında farklı besleme alternatiflerini (yaş çamurla; 250 kg/s, %20 k.m., kuru çamurla; 160 kg/s, %75 k.m., ve tehlikeli atıklarla) ve farklı işletme şartlarını denemek suretiyle yaptıkları pilot tesis çalışmalarında partikül, ağır metal ve asidik bileşenlerin kolaylıkla kontrol edilebildiklerini göstermiştir.

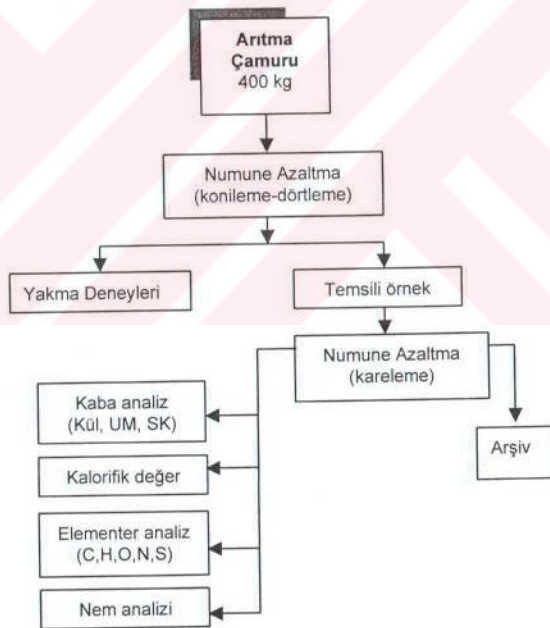
Fernandez ve arkadaşları (2001) Stuttgart Üniversitesinde yaptıkları çalışmada kömür ve çeşitli oranlardaki (%20 termik eşdeğerde, -4+2 mm peletler halinde) kuru evsel çamur karışımlarını pulverize yakma sisteminde birlikte yakmayı denemişler ve çinkonun birlikte yakma sonucu oluşan külde daha fazla yoğunlaştığını ve CO₂'i dengeleyen 'çevre dostu' bir ürün olarak çamurun ilave yakıt olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Sanger ve ark. (2001) tarafından yapılan deneysel AİY çalışmalarında; yarı-kurutulmuş (%68 nem) arıtma çamurunun emisyon davranışları araştırılmış ve mekanik olarak susuzlaştırılmış (yaş) ve kuru çamurla mukayese yapılmıştır. Sonuçta yaş çamurla benzer özellikler elde edilmiştir. NO_x seviyesi yaş çamurdan biraz yüksek ancak kuru çamurdakinden çok daha düşük elde edilmiştir. Serbest bölge sıcaklığı artırıldığında N₂O, CO ve NH₃'de hızlı bir düşüş görülmüştür.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

İzmit'te bulunan İzmit Büyükşehir Belediyesine ait Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisindeki 3 adet belt presle susuzlaştırılan ve yaklaşık %21 katı madde içeren çamurdan alınan 400 kg temsili örnek deneylerde kullanılmak üzere Gazi Üniversitesi Enerji Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon (GEÇER) Araştırma Merkezi ve Makine Mühendisliği Bölümüne ait Isıl Güç Laboratuvarlarına getirilmiştir (Resim 3.1). TS 9545'e göre alınan temsili deney örnekleri Şekil 3.1'de gösterilen örnek hazırlama akım şemasına göre hazırlanmıştır.



Şekil 3.1: Arıtma çamuru temsili örnek hazırlama akım şeması

Deneysel çalışmada ayrıca, Tunçbilek linyit kömürü ve biyomas (Ege Bölgesindeki zeytinyağı prosesinden çıkan küspe-pirina) atıklar kullanılmıştır.



Resim 3.1: Deneylerde kullanılan arıtma çamuru örneğinin laboratuvara getirilişi

3.2. Metod

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi GEÇER (Enerji Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon) Araştırma Merkezi ve Makine Mühendisliği Bölümüne ait Isıl Güç Laboratuvarlarında oluşturulan 50 kW ısıl gücünde **Dolaşımli/Sirkülasyonlu Akışkan Yatak (DAY)** ile yakma sistemlerinde yanma verimi (performansı), baca gazı emisyon özellikleri (CO , C_mH_n , NO_x , SO_2), sıcaklık ve basınç dağılımları, akış özellikleri ve ısı transferi ve enerji dönüşümünün incelenebileceği bir deney düzeneğinde yürütülmüştür. Ölçme sistemi olarak,

- baca gazı ölçme sistemleri,
- bölgesel gaz ölçme sistemleri,
- toz partikül örnek alma sistemi,

- sıcaklık ve basınç ölçme sistemleri ve
- hız ölçme sistemleri

kullanılmıştır.

İleriki kısımlarda laboratuvarda yürütülen deneysel çalışmaların altyapısı ve ölçme sistemleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmektedir.

3.2.1. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada; mekanik olarak susuzlandırılmış (yaş) atıksu arıtma çamurunun kömür ve/veya biomasla birlikte yaklaşık 50 kW_t ısı gücünde laboratuvar ölçekli bir dolaşimli model akışkan yatakta (DAY);

- operasyon şartları (sıcaklık, akışkan hızı, besleme oranı)
- yanma (ısı) performansı (yanma kayıpları ve verimi)
- baca gazı (CO, C_mH_n, NO_x, SO₂) emisyon davranışları

incelenmiştir.

Yapılan her deneydeki çalışmaları 3 aşamada belirtmek mümkündür. Bunlar:

- i- Deney öncesi hazırlık çalışmaları
 - yatak malzemesi
 - çamur, kömür ve biomas malzemenin hazırlanması
 - besleme sisteminin yerleştirilmesi
 - ölçme sistemlerinin hazırlanması
(gaz ve toz ölçüm sistemleri, sıcaklık ve basınç ölçme sistemleri)
 - veri toplama sisteminin ayarlanması
- ii- Deneyin yapılışı
- iii- Deney sonrası analizler ve değerlendirmeler

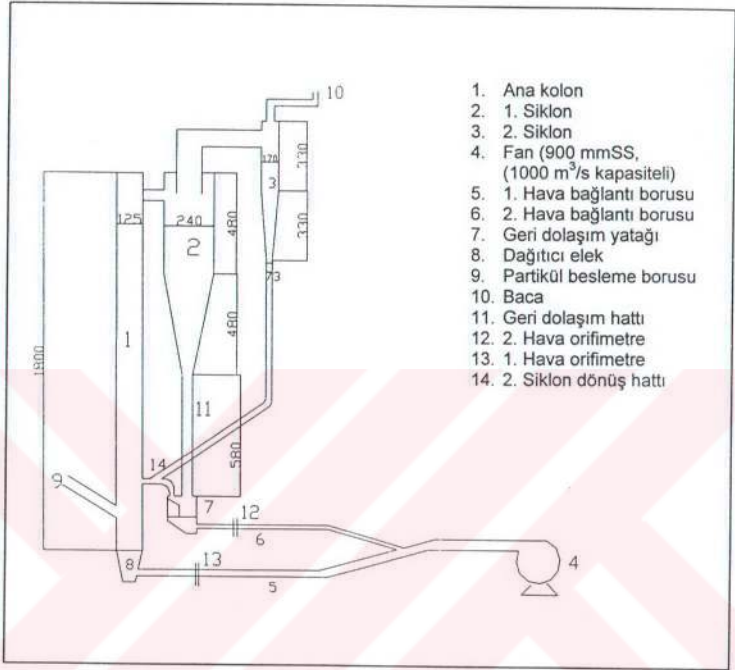
3.2.1.1. Yakma Deney Düzeneği

Deneysel çalışmaların yapıldığı DAY yakma sisteminin genel görünümü Resim 3.2' de verilmiştir.



Resim 3.2: DAY yakma deney düzeneğinin genel görünüşü

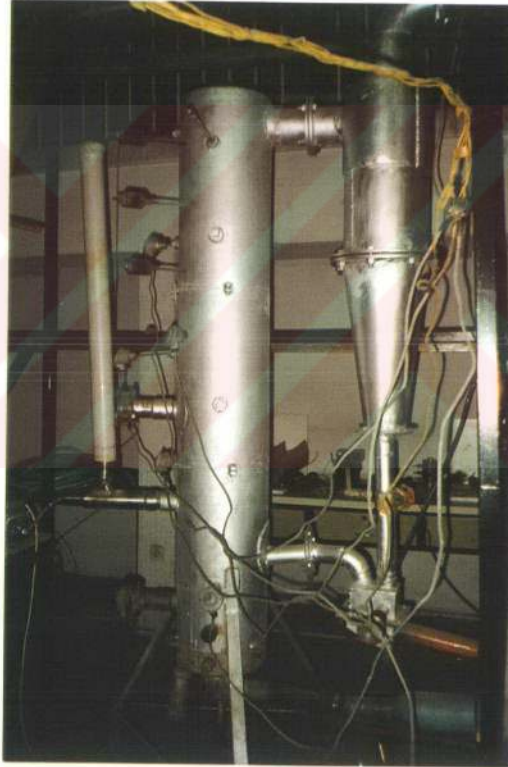
DAY yakma sisteminin yakma kolonu 0.125 m çapında ve 1.80 m yüksekliğinde olup; gövdesi 0.31 m dış çapında, 0.006 m et kalınlığında ve 0.60 m uzunluğunda birbirine bağlanmış 3 adet standart karbon çelik çekme borudan yapılmıştır. Kolon 0.085 m et kalınlığında olup refrakter harcıyla kaplanmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: DAY yakma sisteminin boyutlandırılması

Kolon birincil siklona (2) tepe noktasından 0.08 m iç çapında refrakter malzemesi ile kaplı bir boruyla bağlanmıştır. Birincil siklona teğetsel olarak giren yanma gazları içerisindeki katı partiküller (yatak malzemesi, çamur/kömür/biomas partikülleri) bir düşüş borusu ile (11) geri sirkülasyon yatak ünitesine beslenmiştir. Geri dolaşım sisteminde 0.10x0.14x0.10 m boyutlarında ikinci bir akışkan yatak (7) mevcuttur. Burada dağıtıcı elek (8) kullanılarak katı partiküllerin yatağa geri beslenmesi sağlanmıştır. Geri dolaşım bağlantısı yatağa dağıtıcı eleğin 0.37 m üzerinden yapılmıştır. Sistemden kül alma ise geri dolaşım yatağından devir sayısı kontrollü bir vidalı götürücü kullanılarak alınmıştır (Resim 3.3).

DAY yakma sistemini oluşturan yanma odası (kolon), birincil siklon, ikincil siklon, geri dönüş yatağı, hava besleme sistemi, çamur besleme ve kül alma sistemleri, ölçme sistemlerinin bir kısmı, çamur ve absorban siloları daha rahat bir çalışma imkanı oluşturmak için 3x1.5x3 m'lik bir çerçeve üzerine monte edilmiştir.



Resim 3.3: Sistemden kül alma mekanizması

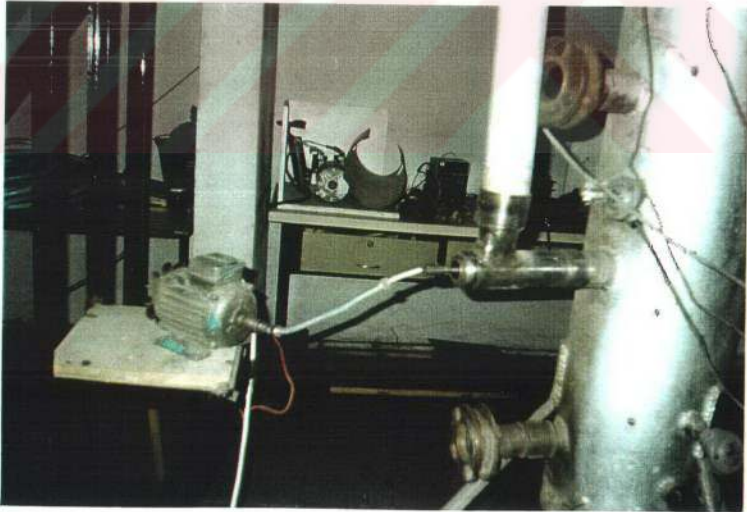
DAY yakma sisteminin gövdesinde, yatak basınç düşüşlerini, sıcaklık ve gaz konsantrasyonu profillerini detaylı bir şekilde tespit etmek için 0.20 m aralıklarla toplam 8 adet delik bulunmaktadır.

Yatak malzemesi yükleme:

Deneylerin başlangıcında yakma sisteminin ön ısıtılmasında yatak içerisine dağıtıcı plakanın ortasından bir bek ile beslenen doğal gaz kullanılmak suretiyle 500 °C-600 °C'ye kadar ısıtılıp silis kumu ve kül karışımı olan yatak malzemesi yüklenmektedir.

Çamur (+kömür/biomas) besleme ve kül alma:

Yatak malzemesinin 700 °C-750 °C'ye ısıtılmasından sonra yatağa atık numune beslemesi yapılmaktadır. Besleme, vidalı taşıyıcı kayış kasnak sistemi kullanılarak 0.5 BG gücündeki 0-1300 d/d devirli 3 fazlı bir elektrik motoru ile gerçekleştirilmektedir (Resim 3.4.).



Resim 3.4: Arıtma çamuru (+kömür/biomas) besleme sistemi

Aritma çamuru (+kömür/biomas) besleme ve kül alma işlemleri yapılırken sürekli olarak baca gazı konsantrasyonları ile yatak ve dağıtıcı basınç düşüşleri kontrol edilmektedir. Baca gazı O_2 ve CO_2 konsantrasyonu ve yatak sıcaklığı kontrol edilerek Mobil Emisyon Test Laboratuvarı (METL)'nda bulunan bir kumanda ile çamur besleme yapılabilir. Yatak toplam basınç düşüşü kontrol edilerek de yataktan kül alınabilmektedir.

Deney sonucunda alınan kül miktarları tartılmakta ve daha sonra kül yakma fırınlarında kül içindeki yanmamış karbon oranları belirlenmektedir.

Hava beslemesi :

Sisteme hava 3 hat üzerinden verilmektedir. Bunlar;

- kolon altından akışkanlaşma ve yanma havası olarak
- geri dolaşım yatağına ikincil hava olarak
- yatağın çeşitli bölümlerine soğutma havası olarak

3.2.1.2. Ölçme ve Veri Değerlendirme Sistemleri

Deney boyunca ölçme sistemlerinde (gaz analizi, sıcaklık ve basınç ölçümleri) bir veri toplama sistemi kullanılarak 3'er saniyelik ölçümler manyetik ortamda depolanmıştır.

Deneyler boyunca,

- baca gazından yanma performansını belirleyen O_2 ve CO_2 değerleri,
- yatak boyunca sıcaklık dağılımları,
- basınç düşüşleri (dağıtıcı, yatak)
- eksik yanma sonucu oluşan CO , C_mH_n gaz emisyonları ve
- SO_2 ve NO_x emisyonları

sürekli olarak ölçülmüştür.

Kapsamlı baca gazı analizlerinin yapıldığı, yatak sıcaklık ve basınç dağılımlarının ölçüldüğü METL'nda bulunan ölçme ve değerlendirme sistemleri ayrıntılı olarak EK-1'de verilmiştir.

Yakma sistemlerinde yanma ve emisyon özelliklerinin incelenebilmesi, gaz ve toz içerikli baca gazı analizlerinin tekniğine uygun olarak yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Baca gazı konsantrasyonlarının doğru olarak analizi, gaz örneklerinin standartlarda belirtildiği şekilde alınmasını ve hazırlanmasını gerektirmektedir.

Toz emisyon ölçümlerinin doğru olarak yapılabilmesi özellikle iri partiküllerin örneklenmesinde gaz örneğinin gaz hızının baca gazı hızına eşit olarak alınmasına bağlıdır. Örnek gaz hızının baca gazı hızının üzerinde olması durumunda, alınması gereken gaz örneğinden daha fazla miktarda alındığından hatalı ölçüm yapılabilmektedir. Bu durumda gerçek baca konsantrasyonunun üzerinde bir konsantrasyon elde edilir. Örnek gaz hızının, baca gazı hızının altında tutulması durumunda da ölçülen değerler gerçek baca gazı konsantrasyonunun altında kalmaktadır.

Partikül örneklemede kullanılan prob, MnCr alaşımlı yüksek sıcaklığa dayanıklı ve manyetik olmayan çelikten imal edilmiştir. İç çapı 26 mm olan proba uç noktasından soğutma ve taşıma amacıyla kılcal bir çelik boru kullanılarak azot gazı verilmektedir. Örnek alma deliği seviyesinde bir pitot tüpü ile örnekleme noktasındaki gaz hızı ölçülmüştür. Gaz ölçüm noktasında sıcaklık ölçümlerinde bir NiCr-Ni termocouple kullanılmıştır.

Yanma odasında yerel gaz konsantrasyonlarını belirtmek amacıyla bir gaz örnek alma ve ölçme sistemi tasarlanarak bir düzenek oluşturulmuştur. Bu düzenek kullanılarak yatak eksenine boyunca sekiz kesitte açılan deliklerden gaz örneği alınarak analiz edilmiştir. Bu sistem;

- gaz örnekleme problemleri,
- gaz taşıma hortumları,
- çok kanallı bir örnek alma odası,
- nem alıcı,
- membran tip bir pompa ve
- kimyasal hücreli portatif gaz ölçme cihazlarından oluşmaktadır.

Bu düzenekte örnek alınmasında kullanılan gaz analiz cihazı kimyasal hücreli gaz analiz cihazıdır. Gaz analiz cihazı, METL'da bulunan bilgisayar kontrollü kalibrasyon ünitesi ve sertifikalı kalibrasyon gaz tüpleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu analizör kullanılarak yanma gazları içerisinde bulunan O_2 , CO , CO_2 , SO_2 , NO_x ve C_mH_n gazları ölçülmüştür.

3.2.1.3. Deney Şartları

AYF deneysel çalışma şartları Çizelge 3.1'de verilmektedir. Buna göre çamur besleme oranları 0.5-1-1.5-2 kg/s, kömür besleme oranları 8-8.5-9.5 kg/s ve biomas besleme oranları 8-8.5-9-9.5 kg/s olmak üzere farklı beslenme alternatifleri değişik kütle oranlarında belirlenmiş; yatak sıcaklığı 850-900 °C arasında, akış hızı ortalama 2 m/sn, akışkan yatak malzemesi (silis kumu) ortalama 0.56 mm tane boyutunda hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1: DAYF deneysel çalışma şartları

Parametre	Birim	Değer
Akışkan Yatak Çapı	mm	125
Akışkan Yatak Yüksekliği	m	1.8
Isıl Kapasite	kW	50
Ortalama Oksijen Seviyesi	% (hacimce)	8-10
Ortalama Yatak Sıcaklığı	°C	850-900
Yatak Dolaşım Oranı	kg/m ² -s	10-12
Yatakta Kalma Süresi	sn	2-3
İşletme Gaz Hızı	m/sn	1.3-2
Yatak Kumu ve Yakıt Besleme Oranları		
Yatak (Silis) Kumu	kg/s	2
Aritma Çamuru	kg/s	0.5-2
Linyit Kömürü	kg/s	8-9.5
Biomas (Pirina)	kg/s	8-9.5
Ortalama Tane Boyutu		
Yatak (Silis) Kumu	mm	0.56
Aritma Çamuru	mm	%70'i -0.045 mm
Linyit Kömürü	mm	0.46
Biomas (Pirina)	mm	2.30

3.2.2. Numune Analiz Metodları

Numuneler üzerinde yapılan analizlerde kullanılan cihaz ve metodlar aşağıda sırasıyla verilmektedir.

3.2.2.1. Atık Kabul Analizi

Atık çamurun tehlikeli özellik taşıyıp taşımadığını belirleyen ve Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ndeki EK-11 A'da istenen eluat analizinde kullanılan metod ve cihazlar Çizelge 3.2.'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Arıtma çamuru atık kabul analizinde kullanılan cihaz ve analiz metodları

Analiz adı	Birim	Kullanılan Cihaz	Marka-Model
pH		pH metre	WTW-pH525
TOC	mg/L	TOC Cihazı	Rosemount Dohrmann DC-190
Kurşun	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Kadmiyum	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Krom IV	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Bakır	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Nikel	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Civa	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Çinko	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Arsenik	mg/L	ICP	Spectro-Spectroflame
Fenoller	mg/L	Spectrofotometre	Speckronic-Genesys 5
Fluorür	mg/L	lyonmetre	WTW-PH 340/ION-SET
Amonyum	mgN/L	Spectrofotometre	Speckronic-Genesys 5
Klor	mg/L	Titratör	Schott 1200
Siyanür	mg/L	Spectrofotometre	Speckronic-Genesys 5
Sülfat	mg/L	Spectrofotometre	Merc-Vega 400
Nitrit	mg/L	Titratör	Schott 1200

3.2.2.2. Kaba ve Elementer Analiz

Numunelerin kaba ve elementer analizlerinde kullanılan cihaz ve analiz yöntemleri Çizelge 3.3.'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3: Arıtma çamuru, kömür ve biomas atığın kaba ve elementer analizlerinde kullanılan cihaz ve analiz metodları

Analiz adı	Birim	Kullanılan Cihaz	Marka-Model
Nem Analizi	%	Kurutma Fırını (ETÜV)	WTC-Binder
Kül Analizi	%	Yakma Fırını	Heraeus-M110
Kalorifik (Isıl) Değer	kcal/kg	Kalorimetre	IKA-Kalorimeter C7000
Element Analizi			
Karbon, C	%	Leco CHN-600	
Hidrojen, H	%	Leco CHN-600	
Oksijen, O	%	Leco CHN-600	
Azot, N	%	Leco CHN-600	
Kükürt, S	%	Leco-432 SC-132	

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Analiz Sonuçları

4.1.1. Depolama Atık Kabul Analizi

Yaklaşık %65 nem (diğer bir ifadeyle %35 k.m.) içeriğine sahip arıtma çamuru numunesi üzerinde yapılan eluat analiz sonuçları *Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği* (TAKY)'ndeki Ek-11 A'da belirtilen sınır değerlerle mukayeseli olarak Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1: Atık kabul analiz sonuçları ve TAKY sınır konsantrasyon değerleri ile mukayesesi

Parametre	Eluat Konsantrasyon (mg/L)	TAKY/95'e göre tehlikeli atık limitleri (mg/L)
pH	12.7	4-13
Kurşun, Pb	0.0143	0.4-2.0
Kadmiyum, Cd	0.0014	0.1-0.5
Krom, Cr IV	0.0019	0.1-0.5
Bakır, Cu	3.51	2.0-10.0
Nikel, Ni	0.3379	0.4-2.0
Civa, Hg	0.0008	0.02-0.1
Çinko, Zn	0.2107	2.0-10.0
Arsenik, As III	0.0134	0.2-1.0
Fenoller	1.42	20-100
Fluorür, F ⁻	0.3	10-50
Amonyum	2.67	200-1000
Klorür, Cl	500	1200-6000
Siyanür, CN ⁻	0.048	0.2-1.0
Sülfat, SO ₄ ²⁻	40	200-1000
Nitrit	0.178	6.0-30.0

Eluat konsantrasyon değerleri arıtma çamurunun tehlikeli atık sınıfında olmadığını göstermektedir. Sadece bakır konsantrasyonu alt-üst sınır değer içinde yer almaktadır. Ayrıca kurşun, krom, kadmiyum, bakır, nikel, civa ve çinko konsantrasyonlarının toplamı için Yönetmelikte getirilen 5 mg/L sınır değerini aşmamaktadır.

4.1.2. Kaba (Proksimat) Analiz

Kullanılan arıtma çamuru, kömür ve biyomasın kaba (proksimat) analiz sonuçları Çizelge 4.2’de gösterilmektedir. Arıtma çamuru yüksek nem ve kül ile %9.86 uçucu katı madde ve %2.39 sabit karbon içerirken, kömür düşük nem ve nisbeten yüksek kül ile %27.5 uçucu katı madde ve %41.2 sabit karbon ile biyomas düşük nem ve kül ile %68.8 uçucu katı madde ve %15.6 sabit karbon içermektedir.

Çizelge 4.2: Arıtma çamuru, kömür ve biyomasın kaba analiz sonuçları

	Arıtma Çamuru	Tunçbilek Linyit Kömürü	Biyomas
	Ağırlıkça (%)		
Nem	79.28	7.50	6.53
Kül	8.37	23.70	9.01
Uçucu Madde	9.86	27.50	68.82
Sabit Karbon	2.39	41.30	15.64

Kuru bazda (wf) ele alındığında, arıtma çamuru yaklaşık %40 kül, kuru ve külsüz (waf) hesaplandığında yaklaşık olarak %81 uçucu katı maddeden ibarettir. Yüksek kül, yüksek uçucu katı madde ve düşük sabit karbon gibi bütün bu özellikler arıtma çamurunun tipik özelliklerindendir ve bu özelliği ile kömür ve biyomas atıktan oldukça farklıdır.

4.1.3. Elementer Analiz

Arıtma çamuru ve diğer örnekler üzerinde yapılan elementer analiz sonuçları Çizelge 4.3’de gösterilmektedir. Arıtma çamurunda yüksek kül, düşük karbon içeriğine karşın kömür ve biyomasta yüksek karbon içeriği ve nisbeten düşük kül içeriği söz konusudur. Arıtma çamurunun alt ısı değeri 2575 kcal/kg k.m. gibi düşük değerlerde iken, kömür ve biyomasta bu değerler sırasıyla 5268 kcal/kg ve 4680 kcal/kg ’dır.

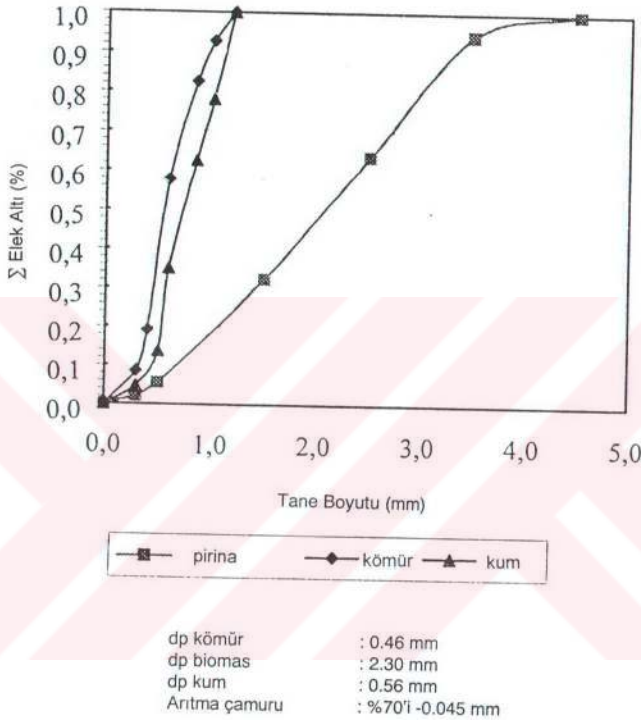
Çizelge 4.3. Kullanılan arıtma çamuru, kömür ve biyomasın elementer analizi ve ısı değerleri

Bileşenler	Yakıt Türü		
	Arıtma Çamuru (AÇ)	Tunçbilek Linyit Kömürü (TK)	Biyomas (Pirina)
Karbon,C (%)	30.45	59.29	46.80
Hidrojen,H (%)	5.54	4.61	6.07
Oksijen,O (%)	19.65	11.54	36.69
Azot,N (%)	3.04	2.10	0.68
Kükürt,S (%)	0.86	1.81	0.12
Kül (%)	40.15	20.65	9.64
HHV (üst ısı değeri) (kcal/kg)	3038	5540	4731
LHV (alt ısı değeri) (kcal/kg)	2575	5268	4680

Arıtma çamuru kuru ve külsüz bazda (wf) ele alındığında, %51 karbon, %10 hidrojen, %33 oksijen, %5 azot ve %1.4 kükürt içermektedir.

4.1.4. Boyut Dağılım Analizi

Arıtma çamuru/kömür/biyomas ve yatak malzemesine (silis kumu) ait tane boyutu dağılımları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan öğütülmüş kömürün ortalama tane boyutu 0.46 mm iken, biyomas atıkta ve silis kumunda bu değerler sırasıyla 2.56 mm ve 0.56 mm şeklindedir. Arıtma çamurunun ise büyük bir kısmı 0.045 mm altında kalmaktadır ve çok ince tane iriliğine sahip olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.1: Arıtma çamuru/kömür/biomas ve yatak malzemesine ait tane boyut dağılımları

4.1.5. Yatak Malzemesinin Özellikleri

Yatak malzemesinin özellikleri Çizelge 4.4'de verilmektedir. Buna göre silis kumu yaklaşık olarak %90 SiO_2 , %7 Al_2O_3 ve %3 diğer bileşiklerden oluşmaktadır. Yoğunluğu ise 1730 kg/m^3 'tür.

Çizelge 4.4: Yatak malzemesinin (silis kumu) özellikleri

Bileşen	%
SiO ₂	88.9
Al ₂ O ₃	7.1
CaO	0.9
K ₂ O	2.4
Fe ₂ O ₃	0.3
TiO ₂	0.2
MgO	0.2
Yoğunluk (kg/m ³)	1730

4.1.6. Arıtma Çamurunun Ağır Metal Analizi

Çamur ağır metal analizi (Pb, Zn, Cu, Cr, Cd, As, Mn, Sn, Ni) Çizelge 4.5'te verilmektedir. Buna göre çamurdaki çinko, bakır ve kurşun sırasıyla 48, 24 ve 8 mg/L civarındayken; kadmiyum, civa ve kobalt gibi ağır metaller eser miktarda bulunmaktadır. Genel olarak çamurdaki ağır metal içeriğinin düşük olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.5: Arıtma çamurunun ağır metal analizi

Element	Arıtma Çamuru (AÇ)
	mg/L
Kurşun, Pb	8.44
Kadmiyum, Cd	0.01
Nikel, Ni	0.755
Bakır, Cu	23.99
Çinko, Zn	48.20
Krom, Cr	2.31
Civa, Hg	0.01
Kobalt, Co	-
Arsenik, As	0.14
Mangan, Mn	19.03
Kalay, Sn	0.27

4.2. Dolaşım Akişkan Yatak (DAY) Deneyleri

Dolaşım Model Akişkan Yatak yakma deneyleri arıtma çamuru+kömür/biomas numuneleri üzerinde ve farklı karışım oranlarında 3 seri halinde gerçekleştirilmiş olup, her grup deney iki kez tekrarlanmış ve işletme şartları yaklaşık aynı tutulmaya çalışılmıştır.

Arıtma Çamuru=Mekanik susuzlaştırılmış (yaş) çamur (yaklaşık %79 nem)

	<u>Karışım</u>	<u>Kütleli oran (ağırlıkça %)</u>
1. Seri	Arıtma Çamuru (AÇ)/Kömür	0/100, 5/95, 10/90, 15/85, 20/80
2. Seri	Arıtma Çamuru (AÇ)/Pirina	0/100, 5/95, 10/90, 15/85, 20/80
3. Seri	Arıtma Çamuru (AÇ)/(Pirina/Kömür)	0/100, 5/5/90, 10/10/80, 20/20/60

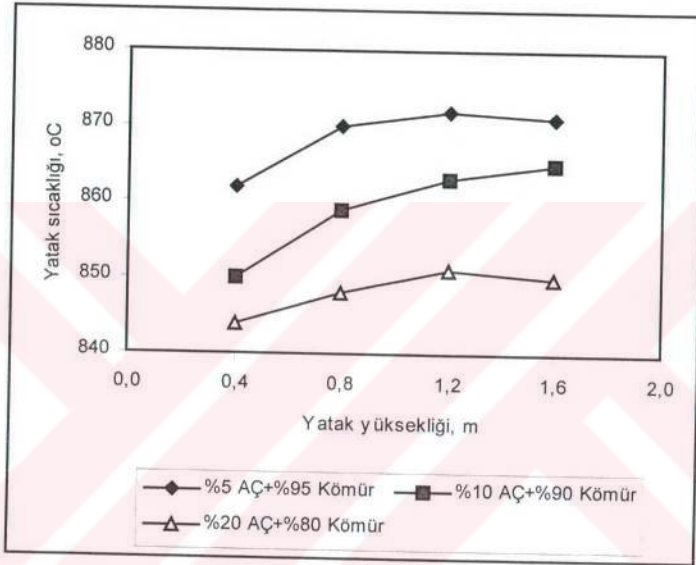
AYF önce 500 °C'ye ulaşınca kadar doğalgaz ile ısıtılmış ve daha sonra yatak malzemesi (silis kumu) sıcaklık 700 °C'ye ulaşınca kadar yatağa beslenmiştir. Depolan ve farklı kütleli oranlarda beslemeye hazır hale getirilen karışımlar (arıtma çamuru/kömür/pirina), yatak 700 °C-750 °C sıcaklığa ulaşıldıktan sonra yakma sistemine beslenmiştir. Bu arada doğalgaz beslemesi kademeli olarak azaltılmış ve karışım kendi kendine yanmaya başladıktan sonra tamamen durdurulmuştur.

Akişkan yataklı fırının işletilmesinde, organik maddeleri tümüyle okside edecek hava akış hızı ile yakıt besleme oranı ve yatak sıcaklığının kontrolü sağlanarak optimum yanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Proses, sürekli ve çok kısa aralıklarla besleme kesintileri dışında devam ettirilmiş dolayısıyla tutuşma sonrası ek yakıt gerekmemiştir.

4.2.1. Yatak Boyunca Sıcaklık Dağılımları

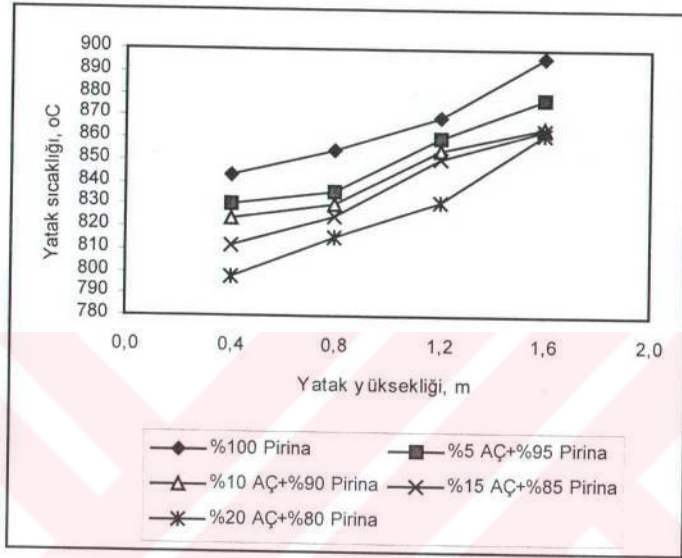
Çamur yakma boyunca ana kolon üzerinde 4 farklı seviyedeki sıcaklık ölçümleri sürekli olarak kaydedilmiştir. Sabit sıcaklığa ulaşıldıktan sonra baca gazı konsantrasyonları ölçülmüştür.

Şekil 4.2’de arıtma çamurunun kömürle olan birlikte yakma deneylerinde yatak boyunca (yoğun bölgeden serbest bölgeye doğru) elde edilen sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Arıtma çamuru+kömürün yakma işlemi boyunca ana kolondaki sıcaklık değişimi

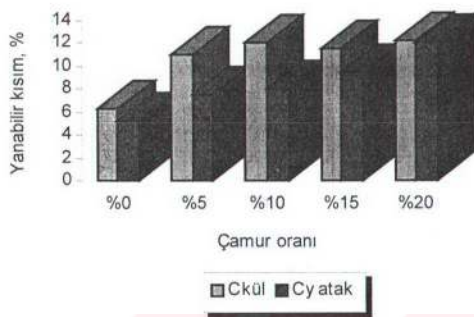
Kömürle birlikte yakmada 870 °C’ye çıkan serbest bölge sıcaklığı artan arıtma çamuru ilavesi ile 850 °C seviyesine inmiştir. Aynı şekilde biomasla yapılan deneylerde %20 arıtma çamuru ilavesinde yatak sıcaklığı çamurdaki yüksek nemin etkisi ile yaklaşık 40 °C azalmıştır. Serbest bölgede sıcaklık yoğun bölgeye (alt) göre yaklaşık 20 ila 60 °C arasında artmaktadır (Şekil 4.3.).



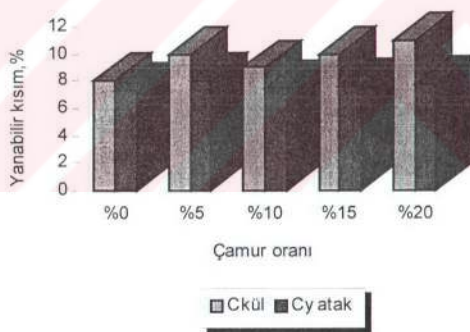
Şekil 4.3. Arıtma çamuru+biomasın yakma işlemi boyunca ana kolondaki sıcaklık değişimi

4.2.2. Kül Miktarları

Deney sonrası toplanan kül tartılarak yanabilir kısımların tespiti için analiz edilmiştir. Yanabilen kısmın miktarı kömürle birlikte yakmada ağırlıkça %8-11 ve biomasla yakmada %6-12 arasında bulunmuştur. Deney tamamlandıktan sonra yatak malzemesi de yanabilir kısmın tespiti için analize gönderilmiştir. Bu miktar kömürle olan birlikte yakmada %7-8 ve biomasla yakmada %5-12 arasında tespit edilmiştir (Şekil 4.4). Elde edilen bu sonuçlar deney için karbon dengesi oluşturmada kullanılmıştır.



(a)



(b)

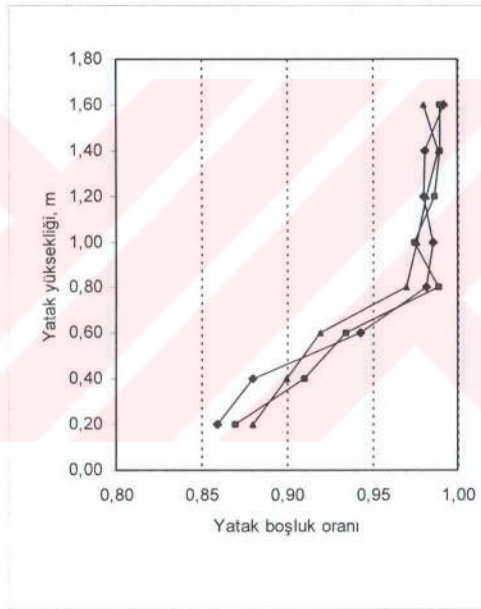
Cköl : Küldeki yanabilen kısım,%

Cyatak: Yatak malzemesindeki yanabilen kısım,%

Şekil 4.4: Küldeki ve yatak malzemesindeki yanabilir kısmın dağılımı: biomassla yakmada (a), kömürle yakmada (b)

4.2.3. Yataktaki Boşluk Dağılımları

Yataktaki boşluk oranı (voidage) dağılımı Şekil 4.5'te gösterilmektedir. İki fazlı (katı ve gaz) AY uygulamasında yatak içerisindeki gaz miktarının katı maddeye oranını ifade eden boşluk oranı, yatağın alt bölgelerinde 0.86-0.88 iken bu değer kolonun üst (serbest) bölgelerinde 0.98'e kadar yükselmektedir.



Şekil 4.5: Akışkan yatak içerisindeki boşluk (bed voidage) dağılımı

4.3. Arıtma Çamuru ve Kömürün Birlikte Yakılması

4.3.1. Yakma Şartları ve Yanma Verimleri

Çizelge 4.6'da arıtma çamuru ve kömür karışımlarının yakma şartları ve elde edilen yanma verimleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.6: (Arıtma çamuru+kömür) besleme oranları, kapasite ve yanma verimlerinin karşılaştırılması

Deney No	Yakıt Türü		Akışkan Yatak Sıcaklığı	Besleme Oranı	Isıl Kapasite	Yanma (Isıl) Verimi
			T_{ort}	M_y	Q_k	η
			°C	kg/s	kW	%
1		%100 Kömür	881	11.0	64.48	95.62
2	%5 Çamur	%95 Kömür	869	12.0	68.94	96.18
3	%10 Çamur	%90 Kömür	859	12.0	66.84	95.76
4	%15 Çamur	%85 Kömür	857	12.0	64.53	95.66
5	%20 Çamur	%80 Kömür	848	12.0	62.82	95.14

Besleme miktarı 11-12 kg/s oranlarında, sıcaklıklar ise 848 °C-881 °C arasında ortalama değerlerde tutulmuştur. Isıl kapasite ise 60 kW-70 kW arasında değişen oranlarda hesaplanmıştır.

İşletme parametrelerinden olan akışkan hızı ve kütle akısı değerleri Çizelge 4.7’de gösterilmektedir. İşletme gaz hızları 2.2-2.6 m/sn arasında, katı kütle akısı ise 9-10 kg/s-m² arasında değişmektedir.

Çizelge 4.7: (Arıtma çamuru+kömür) birlikte yakma deneylerindeki akışkan hızı ve katı kütle akısı

Deney No	Kütle Akısı	Akışkan (Gaz) Hızı
	Gs	Vo
	kg/s-m ²	m/s
1	9	2.6
2	9	2.3
3	10	2.2
4	10	2.2
5	10	2.2

Sistemin ısı performansını gösteren ve TS 4041'e göre (1986) hesaplanan (Ek-2) yanma kayıpları ve yanma verimleri ayrıntılı olarak Çizelge 4.8'de gösterilmektedir. Hesaplanan karbon yanma verimleri arasındaki %3-4'lük fark, CO₂ ve CO dışındaki ürünlerin oluşumunda etkili olan kimyasal reaksiyonlar nedeniyle ortaya çıkan karbon kayıplarından (K_{CO} , K_{CmHn} , K_C) meydana gelmektedir. Eksik yanmadan kaynaklanan küldeki yanmamış karbon kaybı arıtma çamuru ilavesiyle yatağa beslenen katı kütledeki kül artışından dolayı bir miktar artarak %3.1'e yükselmiştir. Endüstriyel uygulamalarda (Lurgi, 1988) yakma sisteminde genellikle bir kül işleme tesisi bulunmakta ve burada küldeki eksik yanma kayıpları geri kazanılabilmektedir.

Çizelge 4.8: (Arıtma çamuru+kömür) besleme durumundaki yanma kayıpları ve yanma verimleri

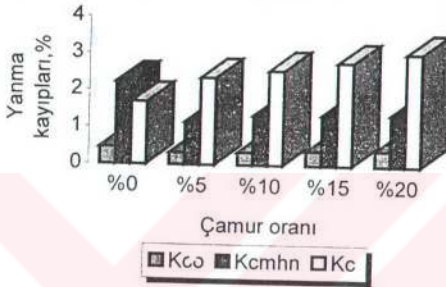
* sadece baca gazı (CO, CO₂) konsantrasyonları dikkate alınmıştır

Deney No	Yanma Kayıpları			Yanma Verimleri	
	K_{CO}	K_{CmHn}	K_C	η_{CE}	η_{CE}^*
	%	%	%	%	%
1	0.46	2.23	1.69	95.62	98.93
2	0.32	1.15	2.35	96.18	99.93
3	0.34	1.34	2.56	95.76	99.28
4	0.38	1.36	2.60	95.53	99.17
5	0.42	1.39	3.06	95.14	99.10

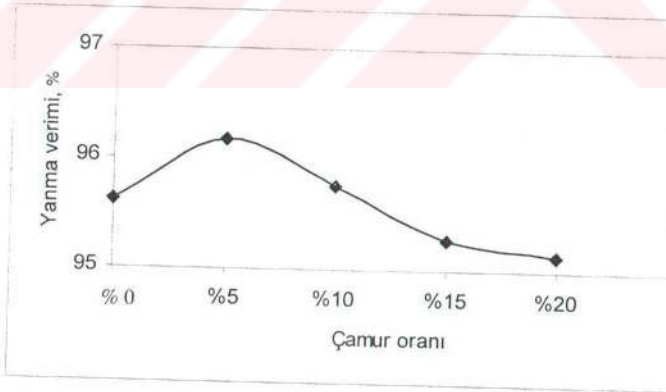
I. Seri deneylere ait arıtma çamuru besleme miktarına bağlı olarak elde edilen yanma kayıpları Şekil 4.6'da ve yanma verimleri Şekil 4.7'de sırasıyla gösterilmektedir. Buna göre, %20 arıtma çamuru ilavesinde bile yanma veriminde değişiklik olmamış ve yine yaklaşık %95 civarında bir yanma verimine ulaşılmıştır.

Hein ve Bemtgen (1998) tarafından yapılan arıtma çamurunun kömürle birlikte yakıldığı pilot tesis çalışmalarında 700-950 °C sıcaklıkta, %30 çamur oranına kadar birlikte yakmada yeteri kadar yüksek bir yakma verimi elde edilmiştir.

Abbas ve ark. (1992) tarafından %30 oranında arıtma çamuru+kömür birlikte yakma oranında deneyler gerçekleştirilmiş ve yanmada herhangi olumsuz bir etki gözlenmemiştir.



Şekil 4.6: I. Seri deneylere ait yanma kayıpları



Şekil 4.7: I. Seri deneylere ait yanma verimlerinin değişimi

4.3.2. Baca Gazı Emisyonları (CO , C_mH_n , NO_x , SO_2)

Arıtma çamurunun kömürle birlikte değişik oranlarda yakıldığı deneyler sonucunda ölçülen baca gazı emisyonları Çizelge 4.9'da gösterilmektedir. Deneyler de fazla hava oranı %75-80 arasında tutulmuştur.

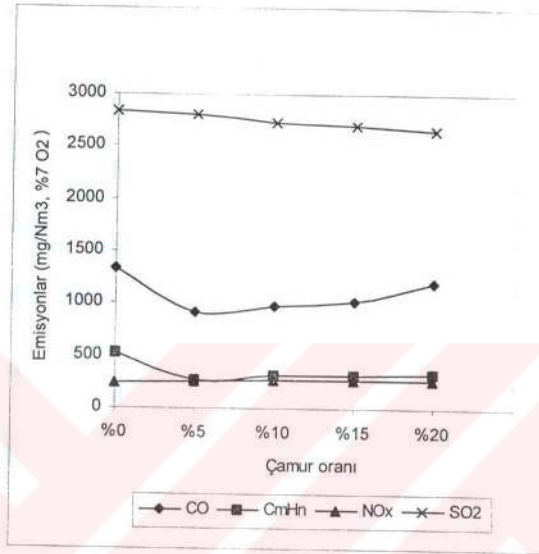
Çizelge 4.9: (Arıtma çamuru+kömür) besleme durumunda baca gazında ölçülen emisyon değerleri

Deney No	O_2	λ Fazla Hava	CO_2	CO	C_mH_n	NO_x	SO_2
	%			mg/L			
1	9.3	1.79	8.2	890	620	152	830
2	9.1	1.76	8.9	620	324	164	832
3	9.2	1.78	9.0	654	375	172	807
4	9.1	1.76	9.1	740	382	170	802
5	9.0	1.75	9.1	822	396	164	796

Baca gazında hacimsel olarak %7 O_2 ve %11 O_2 'ye göre hesaplanan emisyon değerleri ise Çizelge 4.10'da verilmektedir. Arıtma çamuru miktarına bağlı olarak elde edilen emisyon değişimleri ise Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.10: Baca gazında %7 O_2 ve %11 O_2 'ye göre gaz emisyon değerleri

Deney No	%7 O_2				%11 O_2			
	CO	C_mH_n	NO_x	SO_2	CO	C_mH_n	NO_x	SO_2
	mg/Nm ³				mg/Nm ³			
1	1331	530	244	2839	951	379	174	2028
2	912	272	259	2798	651	195	185	1999
3	970	318	273	2737	693	227	195	1955
4	1088	321	268	2697	777	229	191	1927
5	1199	330	256	2655	856	236	183	1896



Şekil 4.8: I.Seri deneylerdeki baca gazı emisyonlarının değişimi

Şekilden de görüldüğü gibi, baca gazında %7 hacimsel O₂ esas alındığında emisyon değerleri sırasıyla 912-1331 mg/Nm³ CO, 272-530 mg/Nm³ C_mH_n, 244-273 mg/Nm³ NO_x, 2655-2839 mg/Nm³ SO₂ şeklindedir. %5-10 çamur ilavesi ile birlikte CO emisyonları 1300 mg/L'den 900 mg/L seviyelerine azalmıştır. Ancak artan çamur ilavesiyle (%20) tekrar 1200 mg/L seviyelerine yükselmiştir. NO_x'te ise belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Ayrıca C_mH_n ve SO₂ emisyonlarında ise bir miktar azalma tespit edilmiştir. Van Doorn ve ark (1992) tarafından yapılan AYY yakma deneylerinde de çamur artışıyla birlikte çamurdaki azot içeriği ile birlikte NO_x'in bir miktar arttığı ve SO₂ konsantrasyonunun düşüş gözlemlendiği belirtilmiştir.

Werther ve arkadaşlarının (1995) pilot ölçekli DAY'ta mekanik olarak susuzlaştırılmış çamur üzerinde yaptığı çalışmalarda, düşük NO_x emisyonlarının elde edildiği ve çamurdaki yüksek nem içeriğinin CO emisyonları üzerinde önemli etkisinin olmadığı ve standartları karşıladığını tespit etmişlerdir. Kozinski ve ark. (1995) 300 kW'lık bir DAY'ta gerçekleştirdikleri birlikte yakma deneylerinde CO₂ seviyesinde artış, CO konsantrasyonlarında da düşüş elde edilmiştir. Yine, Hein ve Bemtgen (1998) tarafından yürütülen arıtma çamuru+kömür birlikte yakma çalışmalarının yürütüldüğü projede de %30 çamur ilavesine kadar yapılan testlerde düşük CO emisyonları tesbit edilmiştir.

Büyük ölçekli (endüstriyel) uygulamalarda ise, Almanya'da 93 t/s kapasiteye sahip bir termik santralde %30 k.m. içerikli arıtma çamuru kömürle birlikte AYF'da sisteme beslenmiş ve yakma ve emisyon özellikleri bakımından son derece iyi sonuçlar elde edilmiştir. SO₂, NO_x, CO ve partikül emisyonları bakımından, hem kömür hemde atık yakma için sağlanması gereken standartlara ulaşılmıştır (Bierbaum ve ark, 1992).

Sonuç olarak, çamurun kömürle birlikte yakılması sonucu elde edilen baca gazı emisyon değerlerinde olumsuzluk yaşanmadığı bu çalışmada bir kez daha gösterilmiştir.

4.4. Arıtma Çamuru ve Biomas (Pirina) Atığın Birlikte Yakılması

4.4.1. Yakma Şartları ve Yanma Verimleri

Çizelge 4.11'de arıtma çamuru ve biomas (pirina) atık karışımlarının (II. Grup deneylere ait) sırasıyla yakma şartları ve elde edilen yanma verimleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.11: (Arıtma çamuru+biomas) besleme oranları, kapasite ve yanma verimlerinin karşılaştırılması

Deney No	Yakıt Türü		Akışkan Yatak Sıcaklığı	Besleme Oranı	Isıl Kapasite	Yanma (Isıl) Verimi
			T_{ort}	M_y	Q_k	η
			°C	kg/s	kW	%
6		%100 Biomas	866	11.1	59.07	97.71
7	%5 Çamur	%95 Biomas	846	10.5	54.79	98.01
8	%10 Çamur	%90 Biomas	847	10.8	53.92	95.99
9	%15 Çamur	%85 Biomas	840	10.9	52.68	95.16
10	%20 Çamur	%80 Biomas	827	10.6	48.82	92.93

Besleme miktarı 10-11 kg/s oranlarında, sıcaklıklar ise 830-870 °C arasında ortalama değerlerde tutulmuştur. Isıl kapasite ise 50 ila 60 kW arasında değişen oranlarda elde edilmiştir.

İşletme parametrelerinden olan akışkan hızı ve kütle akısı değerleri Çizelge 4.12'de gösterilmektedir. İşletme gaz hızları 2.2-2.6 m/sn arasında, katı kütle akısı ise 9-10 kg/s-m² arasında değişmektedir.

Çizelge 4.12: (Arıtma çamuru+biomas) birlikte yakma deneylerindeki akışkan hızı ve katı kütle akısı

Deney No	Kütle Akısı	Akışkan (Gaz) Hızı
	Gs	V_o
	kg/s-m ²	m/s
6	9	2.6
7	9	2.3
8	10	2.2
9	10	2.2
10	10	2.2

II. seri deneylere ait sistemin ısı performansını gösteren yanma kayıpları ve yanma verimi ayrıntılı olarak Çizelge 4.13'de gösterilmektedir. Hesaplanan karbon yanma verimleri arasındaki %2-6'lık fark, CO₂ ve CO dışındaki ürünlerin oluşumunda etkili olan kimyasal reaksiyonlar nedeniyle ortaya çıkan karbon kayıplarından (K_{CO} , K_{CmHn} , K_C) meydana gelmektedir.

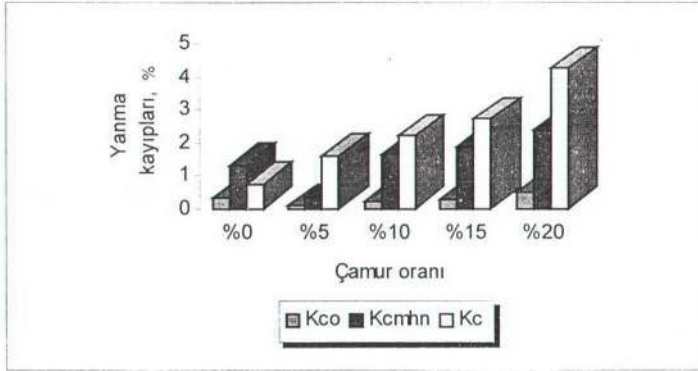
Eksik yanmadan kaynaklanan küldeki yanmamış karbon kaybı (K_C) artıma çamuru ilavesiyle yatağa beslenen katı kütledeki kül artışından dolayı artarak %4.2'ye ulaşmıştır.

Çizelge 4.13: (Artıma çamuru+biomas) besleme durumundaki yanma kayıpları ve yanma verimleri

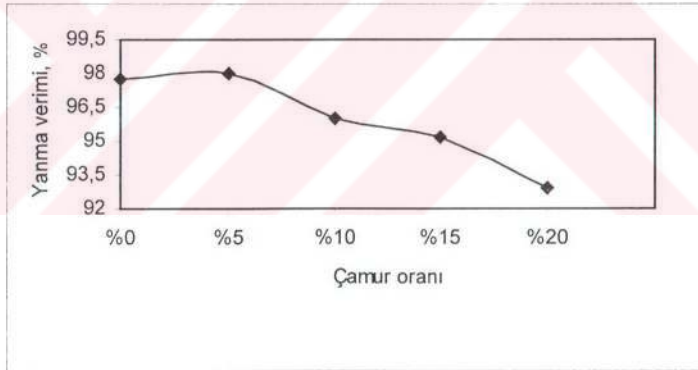
* sadece baca gazı (CO, CO₂) konsantrasyonları dikkate alınmıştır.

Deney No	Yanma Kayıpları			Yanma Verimleri	
	K_{CO}	K_{CmHn}	K_C	η_{CE}	η_{CE+}
	%	%	%	%	%
6	0.29	1.29	0.70	97.71	99.33
7	0.07	0.33	1.59	98.01	99.84
8	0.20	1.61	2.19	95.99	99.57
9	0.27	1.87	2.70	95.16	99.40
10	0.48	2.35	4.24	92.93	98.93

II. Seri deneylere ait yanma kayıpları ve verimleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmektedir. %20 artıma çamuru ilavesinde yatak sıcaklığı 40-50 °C azaldığından, daha fazla partikül sistemi yanmadan terketmekte ve dolayısıyla yanma verimi düşmektedir (%93).



Şekil 4.9: II. Seri deneylere ait yanma kayıpları



Şekil 4.10: II. Seri deneylere ait yanma verimlerinin değişimi

II. grup deneylerde % 93-99 arasında yanma verimlerine ulaşılmıştır. Çamur ilavesi başlangıçta verimi değiştirmezken, %20'lere varan kütsel çamur ilavesinde artan nem oranı ve nisbeten azalan sıcaklıklar dolayısıyla yanmamış hidrokarbonlar

arttığından, yanma verimleri %98'lerden %92 seviyelerine kadar düşmüştür. Topal ve ark (2002) tarafından aynı biomas atıklar (pirina) ile yapılan tek başına yakma deneylerinde de %93-98 yanma verimlerine ulaşılmıştır. Yine Abu-Quadis (1996) tarafından pirina atıklar üzerinde yapılan AYY deneylerinde hava hızına bağlı olarak %86-95 yanma verimlerine ulaşılmıştır.

4.3.2. Baca Gazı Emisyonları (CO, C_mH_n, NO_x, SO₂)

Aritma çamurunun kömürle birlikte değişik oranlarda yakıldığı deneyler sonucunda ölçülen baca gazı emisyonları Çizelge 4.14'de gösterilmektedir. Deneyler de fazla hava oranı %70-90 arasında tutulmuştur.

Çizelge 4.14: (Aritma çamuru+biomas) besleme durumunda baca gazında ölçülen emisyon değerleri

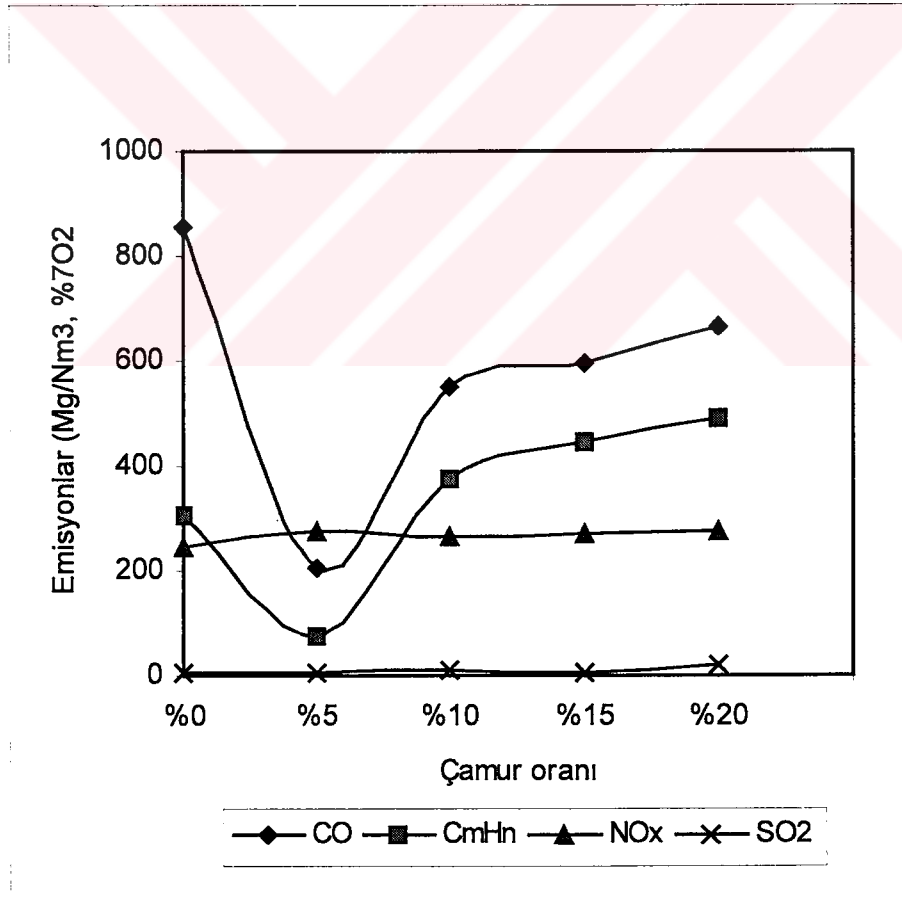
Deney No	O ₂	λ , Fazla Hava	CO ₂	CO	C _m H _n	NO _x	SO ₂
	%			mg/L			
6	9.8	1.88	8.2	547	344	145	2
7	8.6	1.69	9.4	145	96	181	2
8	8.9	1.74	9.1	389	462	175	3
9	9.2	1.78	8.8	402	523	171	2
10	9.9	1.89	8.1	428	546	164	5

Baca gazında %7 O₂ ve %11 O₂'ye göre hesaplanan emisyon değerleri Çizelge 4.15'de verilmektedir. Aritma çamurunun miktarına bağlı olarak elde edilen emisyon değişimleri ise Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Buna göre, baca gazında %7 O₂'ye göre emisyon değerleri sırasıyla 205-855 mg/Nm³ CO, 77-492 mg/Nm³ C_mH_n, 243-277 mg/Nm³ NO_x, 6-18 mg/Nm³ SO₂ olarak elde edilmiştir. CO emisyonlarında arıtma çamuru ilavesi ile birlikte önemli bir azalma elde edilmiş, başlangıçta %5 çamur ilavesinde azalan C_mH_n değerleri %20 kütleli ilavede prinanın tek başına yakılması sonucu elde edilen CH₄ değerlerini aşmıştır. NO_x emisyonlarında bir

miktar yükselme tesbit edilmiş, SO_2 'de ise %20 çamur ilavesinde çok az bir artış gözlenmiştir.

Çizelge 4.15: Baca gazında %7 O_2 ve %11 O_2 'ye göre gaz emisyon değerleri

Deney No	%7 O_2				%11 O_2			
	CO	C_mH_n	NO_x	SO_2	CO	C_mH_n	NO_x	SO_2
	mg/Nm ³				mg/Nm ³			
6	855	307	243	7	610	220	173	5
7	205	77	274	6	146	55	196	5
8	549	373	265	10	392	266	189	7
9	596	443	272	7	426	317	194	5
10	667	492	277	18	476	352	198	13



Şekil 4.11: II. Seri deneylere ait baca gazı emisyonlarının değişimi

4.5. Arıtma Çamuru, Kömür ve Biomasın Birlikte Yakılması

4.5.1. Baca Gazı Emisyonları (CO, C_mH_n, NO_x, SO₂)

Arıtma çamurunun kömür/biomasla birlikte değişik oranlarda yakıldığı deneyler sonucunda ölçülen baca gazı emisyonları Çizelge 4.16'da gösterilmektedir.

Karışım oranları şu şekildedir:

Deney No	Karışım Oranı, %
11	%25 Pirina+%75 Kömür
12	%5 Arıtma Çamuru+%5 Pirina+%90 Kömür
13	%10 Arıtma Çamuru+%10 Pirina+%80 Kömür
14	%20 Arıtma Çamuru+%20 Pirina+%60 Kömür

Deneyler de fazla hava oranı %50-65 arasında tutulmuştur.

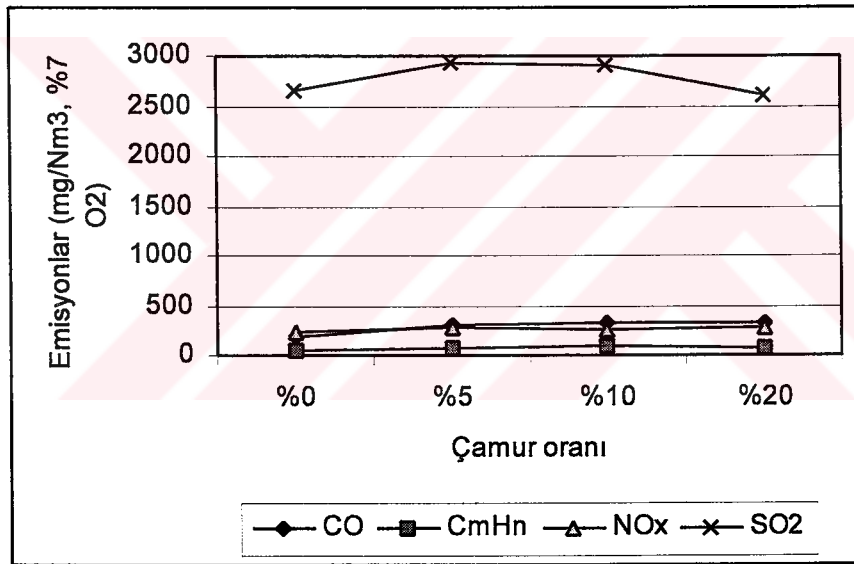
Çizelge 4.16: (Arıtma çamuru+kömür/biomas) besleme durumunda baca gazında ölçülen emisyon değerleri

Deney No	O ₂	λ, Fazla Hava	CO ₂	CO	C _m H _n	NO _x	SO ₂
	%			mg/L			
11	6.3	1.43	11.7	148	58	187	976
12	6.7	1.47	11.5	240	94	208	1048
13	7.5	1.56	10.5	251	123	188	977
14	8.3	1.65	9.8	255	102	191	827

Baca gazında gazında %7 O₂ ve %11 O₂'ye göre hesaplanan emisyon değerleri Çizelge 4.17'de verilmektedir. Arıtma çamuru miktarına bağlı olarak elde edilen emisyon dağılımları ise Şekil 4.12'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.17: Baca gazında %7 O₂ ve %11 O₂'ye göre hesaplanan emisyon değerleri

Deney No	%7				%11			
	CO	C _m H _n	NO _x	SO ₂	CO	C _m H _n	NO _x	SO ₂
	mg/Nm ³				mg/Nm ³			
1	176	39	239	2657	126	28	170	1898
2	312	66	273	2933	223	47	195	2095
3	327	91	261	2897	231	65	187	2069
4	331	80	282	2606	236	57	202	1862

**Şekil 4.12:** III. Seri deneylerdeki baca gazı emisyonlarının değişimi

III. Seri deneysel çalışmalarda % 6.3-8.3 O₂, % 1.43-1.65 fazla hava ve % 9.8-11.7 CO₂ ile 148-240 mg/L CO, 187-208 mg/L NO_x ve 827-1048 mg/L SO₂ konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Baca gazında %7 O₂'ye göre emisyon değerleri ise sırasıyla 176-331 mg/Nm³ CO, 39-91 mg/Nm³ C_mH_n, 239-282 mg/Nm³ NO_x, 2606-2933mg/Nm³ SO₂ elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada atıksu arıtma çamurunun karakteristik özelliklerinin belirlenmesinin yanısıra, yaklaşık 50 kW ısı gücündeki laboratuvar ölçekli dolaşımli model bir akışkan yataklı fırında (DAYF);

- işletme şartları (sıcaklık, yakıt besleme oranı, akışkan hızı),
- yanma (ısı) performansı (yanma kayıpları ve yanma verimi),
- baca gazı emisyon (SO_2 , CO, C_mH_n , NO_x) davranışları

incelenmiş ve sonuçları irdelenmiştir.

Deneylerde yakıt olarak karışık (evsel ağırlıklı) arıtma çamuru/kömür/biomas (pirina) karışımları kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan arıtma çamuru örneğine ait belirlenen karakteristik özellikler şu şekilde özetlenebilir:

- Yapılan kaba analize göre, arıtma çamuru yaklaşık %80 nem içeren mekanik olarak (belt pres) susuzlaştırılmış yaş çamur, %8.37 kül, %9.86 uçucu katı madde ve %2.39 sabit karbon içermektedir.
- Arıtma çamurunun elementer analizi neticesinde kuru bazda %30.45 C, %5.54 H, %19.65 O, %3.04 N ve %0.86 S içerdiği tespit edilmiştir.
- Çamurun alt ısı değeri (LHV) 2575 kcal/kg ve üst ısı değeri de (HHV) 3040 kcal/kg'dır.
- Çamurun boyut dağılımına bakıldığında ise yaklaşık %70'nin 0.045 mm'den ince olduğu tespit edilmiştir.
- Ağır metal konsantrasyonları düşük seviyelerdedir: 8.44 mg/L Pb, 0.01 mg/L Cd, 0.75 mg/L Ni, 23.99 mg/L Cu, 48.20 mg/L Zn, 2.31 mg/L Cr, 0.01 mg/L Hg, 0.14 mg/L As, 19.03 mg/L Mn ve 0.27 mg/L Sn.

3 seri halinde gerçekleştirilen akışkan yatak yakma deneylerinde elde edilen sonuçlar ise şu şekilde özetlenebilir:

- i. Kolon boyunca sürekli olarak ölçülen sıcaklık dağılımları serbest bölgede biraz daha yüksek olmak üzere 800-900°C arasında tespit edilmiştir.

Çamurdaki uçucu maddelerin serbest kalması ve yanma işlemi genellikle ana kolonun üst bölgelerinde ve yaklaşık 890-900°C'ye ulaşan sıcaklıklarda gerçekleşmiştir.

- ii. I. seri deneyler arıtma çamuru ve kömür karışımları olarak gerçekleştirilmiş ve farklı kütleli oranlarda (0/100, 5/95, 10/90, 15/85, 20/80) %95.1-96.2 arasında yanma (ısı) verimleri elde edilmiştir. Arıtma çamuru ilavesi yanma verimini olumsuz etkilememiştir. %20 çamur ilavesinde bile yanma verimi kömürün tek başına yakılması ile elde edilen değerden sadece %0.5 daha düşük elde edilmiştir. %1.75-1.79 fazla hava ile baca gazındaki %9.0-9.3 O₂ ile %8.2-9.1 CO₂ oranlarında yapılan deneylerde; 620-890 mg/L CO, 152-172 mg/L NO_x ve 796-832 mg/L SO₂ konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Baca gazında mukayese açısından %7 O₂'ye göre emisyon değerleri ise sırasıyla 912-1331 mg/Nm³ CO, 272-530 mg/Nm³ C_mH_n, 244-273 mg/Nm³ NO_x, 2655-2839 mg/Nm³ SO₂ şeklinde hesaplanmıştır. %5-10 çamur ilavesi ile birlikte CO emisyonları 1300 mg/L'den 900 mg/L seviyelerine azalmıştır. Burada yüksek yanma veriminin ve çamurun nisbeten yüksek reaktivitesinin etkisi söz konusudur. Ancak artan çamur ilavesiyle tekrar 1200 mg/L seviyesine yükselmiştir. Bunun nedeni serbest bölgedeki sıcaklığın (çamurdaki suyun buharlaşması ve dolayısıyla reaksiyon hızlarının düşmesi) azalması olabilir. Serbest bölge sıcaklığı artırılarak CO emisyonlarında daha fazla azalma elde edilebilir. NO_x'te belirgin herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Ayrıca C_mH_n ve SO₂ emisyonlarında ise bir miktar azalma tesbit edilmiştir. Ayrıca, deney sonrası toplanan külün yanabilir kısmı %8-11 arasında, yatak malzemesindeki yanabilir kısım ise %7-8 civarında tespit edilmiştir.
- iii. II. seri deneyler arıtma çamuru ve biomas (pirina) karışımları ile denenmiş ve 0/100, 5/95, 10/90, 15/85, 20/80 gibi farklı karışım oranlarında besleme gerçekleştirilerek % 93-99 arasında yanma verimlerine ulaşılmıştır. Arıtma

çamuru ilavesi başlangıçta verimi değiştirmezken, %20'lere varan kütleli çamur ilavesinde artan nem oranı ve nisbeten azalan sıcaklıklar dolayısıyla yanmamış hidrokarbonlar arttığından, yanma verimleri %98'lerden %92 seviyelerine kadar azalmıştır. %1.49-1.89 fazla hava ile baca gazındaki %6.9-9.9 O₂ ile %13.8-8.1 CO₂ oranlarında yapılan yakma deneylerinde; 73-423 mg/L CO, 182-164 mg/L NO ve 0-5 mg/L SO₂ konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Baca gazında %7 O₂'ye göre emisyon değerleri ise sırasıyla 91-667 mg/Nm³ CO, 0-492 mg/Nm³ C_mH_n, 242-277 mg/Nm³ NO_x, 0-18 mg/Nm³ SO₂ olarak hesaplanmıştır. CO emisyonlarında önemli bir azalma elde edilmiş, başlangıçta %5 çamur ilavesinde azalan C_mH_n değerleri %20 kütleli ilavede prininin tek başına yakılması sonucu elde edilen CH₄ değerlerini aşmıştır. NO_x emisyonlarından bir miktar yükselme tesbit edilmiş, SO₂'de ise %20 çamur ilavesinde çok az bir artış gözlenmiştir. Ayrıca, deney sonrası toplanan külün yanabilir kısmı %6-12 arasında, yatak malzemesindeki yanabilir kısım ise %5-12 civarında tesbit edilmiştir.

- iv. III. seri deneysel çalışmalar arıtma çamuru, biomas ve kömür karışımları (0/25/75, 5/5/90, 10/10/80 ve 20/20/60) kütleli oranlarında yatağa beslenmiş ve %1.43-1.65 fazla hava ile baca gazındaki %6.3-8.3 O₂ ile %9.8-11.7 CO₂ oranlarında yapılan yakma deneylerinde; 148-240 mg/L CO, 187-208 mg/L NO_x ve 827-1048 mg/L SO₂ konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Baca gazında %7 O₂'ye göre emisyon değerleri ise sırasıyla 176-331 mg/Nm³ CO, 39-91 mg/Nm³ C_mH_n, 239-282 mg/Nm³ NO_x, 2606-2933mg/Nm³ SO₂ elde edilmiştir.

Elde edilen laboratuvar sonuçları ve diğer çalışmalar ışığında aşağıdaki hususlar önerilmektedir:

- i. Arıtma çamurlarının önümüzdeki dönemlerde kurulacak yeni arıtma tesislerinin de devreye girmesi ile büyük miktarlara ulaşacağı dolayısıyla arıtma çamuru sorununun ülkemiz için yakın bir gelecekte önemli boyutlara ulaşacağı açıktır. Bu kapsamda; yakma işlemi, yüksek yatırım ve işletme maliyeti, nitelikli personel, kirletici hava emisyonları ve açığa çıkan külün çevresel etkilerinin sürekli kontrolü gibi çeşitli sınırlamalar içermesine karşın; maksimum hacim azaltma, patojen ve toksik bileşenlerin yok edilmesi, enerji kazanımı, yakma ürünü külün çeşitli alanlarda kullanılabilirliği (betonda agrega, yapı bloğu üretiminde ikame maddesi olarak kullanımı gibi) dolayısıyla sağlayacağı ekonomik kazanç gibi avantajlara sahip olması, yakma işlemini atık değerlendirme yöntemi olarak uygulanması gereken güvenli bir yöntem olarak ortaya çıkarmaktadır.
- ii. Arıtma tesisi atık çamurlarının enerji kaynağı olarak belirli oranlara kadar (%20'ye kadar) akışkan yataklı yakma fırınında kömürle birlikte yakılmasının mümkün olduğu görülmektedir. Ancak, %20'den daha fazla kütleli çamur oranlarında yatak sıcaklığı etkin bir yanmayı sağlayacak seviyelere ulaşmamış, özellikle yüksek nem dolayısıyla besleme problemleri yaşatmıştır. Bu tür kömür için dizayn edilmiş pilot ve endüstri ölçeğindeki akışkan yatak teknolojilerinde de emisyon kontrolleri, tasarım ve performans üzerinde minimum etki yaratması için alternatif yakıtlar ancak %10-20 ikame oranlarına kadar besleme yapılabilir ve bu sayede gerek çevresel açıdan gerekse ekonomik bakımdan şu avantajları getirecektir:
 - fosil yakıt kaynaklarının korunması,
 - fosil yakıtların yanma sonucu oluşan zararlı emisyonların azaltılması,
 - atık bertarafının minimize edilmesi.

- iii. Bu atık çamurlar çimento fabrikalarında da ilave yakıt/hammadde olarak kullanılabilir. Ancak, çamur besleme oranının (uygulamada çıkabilecek muhtemel sorunlardan kaçınmak üzere) çimento fabrikasının klinker üretim kapasitesinin %5'inden fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Halen tesis çıkışında kireçle stabilize edilen bu çamurların çimento fabrikalarında doğrudan kullanımı mümkündür. Çimento üreticileri ile yapılan görüşmeler olumlu sonuçlar verebilecek düzeye gelmiştir.
- iv. Son söz olarak, yakma teknolojilerinin atıklara uygulanması ülkemiz gündemine de girmiş bulunmaktadır. İzmit'teki *Tehlikeli Atık Yakma* tesisi ve İstanbul'daki tıbbi atıkların yakıldığı tesis yanı sıra, İstanbul Deri Organize Sanayi Bölgesindeki proses ve ağırlıklı olarak arıtma çamurlarının yakılacağı ve enerji üretileceği projenin de hayata geçirilecek olması, belediye katı atıkları ve arıtma çamurlarının yakılacağı tesislerinde işareti olmaktadır. Bu konuda daha fazla laboratuvar-pilot çalışmaların yürütülmesi gerek ülkemiz ekonomisi adına ve gerekse çevre adına büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- ABBAS, T., COSTEN, P., GLASER, K., and OU J., 1992. Combine Combustion of Biomass, Municipal Sewage Sludge and Coal a Pulverized Fuel Plant. In Proceedings Combined Combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coals, Final Report EC- Research Project, APAS-contract COAL-92-0002.
- ACERC Lab., 1999. Utah, USA.
- AITKEN, M.N., 1995. Spreading the Benefits. Water and Environment, 14 (36).
- AKÇA, L., CUTİL, E., TÜF, N., 1996. Arıtma Çamurlarının Tarımsal Alanda Değerlendirilmesi. Tarım-Çevre İlişkisi Sempozyumu, Mersin Üniversitesi Yayını, İçel.
- ALFA LAVAL, 1997. Atıksu Arıtma Notları.
- ANONYMOUS, 1991. Thermal Treatment of Sewage Sudge-Current State. In: ATV Arbeitsbericht. Korrespondenz Abwasser 6: 814-821.
- , 1995. Combustion of Sewage- Sludge- Emissions. In: ATV Arbeitsberich Korrespondenz Abwasser, 11/95:2071-2078.
- , 1997. Diffussion Emission Significantly Reduced. Ummelt Magazin, September, p.68-69.
- ARITIM DÜNYASI, 1999, İZAYDAŞ Evsel ve Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisine Genel Bir Bakış, İnceleme, s.11-15.
- ARTAN, R., 1993. Arıtma Çamurlarında Su Giderimi, Çevre Teknolojisi, ÇEVRETED yayını, 8:30-35.
- BAUER T., SIEGER R.B., 1993. Sewage Sudge Incineration Under Part 503B. Water Engineering and Management, 140(10):22-23.
- BIERBACH H., THOMAS G., 1991. Processes for Thermal Co-Processing of Sewage Sludge. In: Klarschlamm Entsorgung 1, Daten-Dioxine, Entwässerung, Verwertung, Entsorgungs-vorschläge. Düsseldorf: VDI GbmH: 272-288.

- BIERBAUM K., LAMBERTZ J., THOMAS G., 1997. Sewage Sludge Co-Combustion in a Brown Coal-Fired Industrial Power Plant. *Chemie Ingenieur Technik*, 69(7/97):973-975.
- BILLOTET T., 1992. Combustion Tests with Dried Sewage Sludge in Coal-Fired Power Plants. In: *Proceedings Combined Combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coals*, Final Report, CEC-Research Project, APAS-Contract-COAL-92-0002.
- BLUE-TEC Prosesi, *Blueprint for Drying, Water and Environment*, May 1994, s.22.
- BUEKERNS, A., SCHOETERS, J., 1984. *Thermal Methods in Waste Disposal*. Study Performed for the EEC Under Contract EC1 1011/B7210/83/B, Free University of Brussels, Brussels.
- BURSA ÇEVRE MERKEZİ (BÇM), 2000. Arıtma Çamuru Nasıl Bertaraf Edilir? Aktüel Aylık Bülteni, BTSO, Nisan 2000. S.1-3. Bursa.
- CAG, 1997. *Waste to Energy A.Ş. Notları*.
- CAPUTO A.C., PELAGAGGE P.M., 2001. Waste to Energy Plant for Paper Industry Sludges Disposal: Technical-Economic Study. *Journal of Hazardous Materials* B81:265-283.
- COLIN F., NEWMAN P.J., PAULANNE Y.J., 1991. *Recent Developments in Sewage Sludge Processing*. Elsevier Applied Science. London, England.
- DAWIS R.D., 1996. The Impact of EU and UK Environmental Pressures on the Future of Sludge Treatment and Disposal. *J CIWEM*; 10:65-69.
- DEGREMONT, 1991. *Water Treatment Handbook*. Vol.1-2, Sixth Edition, France.
- DİE, 1994. *İmalat Sanayi Atık Envanteri Anket Sonuçları*, DIE yayını.
- DİLEK O., 1993. *Petrol ve Biyolojik Menşeli Çamurların Rotary Kiln İnsineratör Sistemiyle Bertaraf Edilmesi*", *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü II. Ulusal Sempozyumu ve Hava Kalitesinin Kontrolünde Ulusal Hedef ve Stratejiler, Yöresel ve Sektörel Uygulamalar Paneli*, 27-29 Eylül, Bildiriler Kitabı, Anadolu Üniversitesi yayını, No.786, s.241-261.
- DOORN J., BRUJN P., KOS B., VERMEIJ P., HANSE J., 1995. *Combined*

- Combustion of Biomass, Municipal Sewage Sludge and Coal in Atmospheric Fluidized Bed Installation, ECN Report No:ECN-C-95-096, 36 s.
- DURANTE J.L., INUMARU N., NAGATO S., 1993. Industrial Waste and Sludge-Fired FBC Experience", In:Rubow LN, editor. Proceedings of 12th Int. Conference on Fluidised Bed Combustion. San Diego, CA:ASME, p.743-749.
- EPA, International Protection Act, 1990, Process Guidance Note IPR 5/11, Sewage Sludge Incineration.
- EPA, 2002. ([HTTP://es.epa.gov/techinfo/facts/kocmbust.html](http://es.epa.gov/techinfo/facts/kocmbust.html))
- FAHLKE, J., BURSIK, A., 1995. Impact of the State-of-the Art of Flue Gas Cleaning on Mercury Species Emissions from Coal-Fired Steam Generators. Water, Air and Soil Pollution; 80, pp.209-215.
- FERNANDEZ, A., WENDT, J.O.L., CENNI, R., YOUNG, R.S., WITTEN, M.L., 2001. Resuspension of Coal and Coal/Municipal Sewage Sludge Combustion Generated Fine Particles for Inhalation Health Effects Studies, The Science of the Total Environment.
- FİLİBELİ, A., 1996. Arıtma Çamurlarının İşlenmesi, DEÜ Müh.Fak.Yayınları No.255, İzmir.
- GEIGER, T., HAGENMAIER, H., ROMER, R., SEIFERT, H., 1992. Influence of Sulphur on the Formation of Dioxins and Furans During Sewage Sludge Combustion. In: VGB Kraftwerktechnik, 72 (2):159-165.
- GOLDSMITH, P., 1994. Sanitary Solutions. The Chemical Engineer, 13-14.
- GRAY, N.F., 1998. Water Technology, GB, 520 s.
- GRUTER, H., MATTER, M., OEHLMANN, K.H., 1990. Drying of Sewage Sludge-an Important Step in Waste Disposal, Wat. Sci.Technology, 22 (12):57-63.
- GUYER, H.H., 1998. Industrial Processes and Waste Stream Management, USA.
- HAJICEK, D.R., 1994. Test Burn of Dried Municipal Sewage Sludge. Project Report.1993-1994 (<http://www.eerc.und.nodak.edu>).
- HALL, J.E., 1994. Waste Management-Sewage Sludge: Survey of Sludge Production,

- Treatment, Quality and Disposal in the EC. EC Reference No:B4-3040/014156/92, Report No:3646.
- HALL, B., SCHAGER P., LINDQVIST O., 1996. Chemical Reactions of Mercury in Combustion and Gasification Flue Gases. *Env. Sci. Tech*:30(8):2421-2426.
[HTTP://194.178.172.86/register/dataee/cce02232.htm](http://194.178.172.86/register/dataee/cce02232.htm)
- HUANG, WU J.M., LIVENGOD C.D., 1996. Development of Dry Control Technology for Emissions of Mercury in Flue Gas. *J Hazardous Waste and Hazardous Materials*: 13(1):107-119.
- HEIN, K., BEMTGEN, J.M., 1998. EU Clean Coal Technology-Co-Combustion of Coal and Biomass, *Fuel Processing Technology* 54, p.159-169.
- HEIN, K., SPLIETHOFF, H., 1995. Co-Combustion of Coal and Biomass in Pulverized and Fluidized Bed Systems, In: *Proceedings of 2nd Int. Conference on Combustion and Emissions Control*, 4-5 December, London, UK; p.127-136.
- HENMI, M., OKAZAWA, K., SOTA, K., 1986. Energy Saving in Sewage Sludge Incineration with Indirect Heat Drier, *National Waste Processing Conference*, Denver, ASMER.
- HIRTH, H., JOCHUM, J., JODEIT, H., WIECKERT, C., 1990. A Thermal Process for Decontaminating Fly Ash from Waste Incinerators. *Chem-Ing-Tech*; 62(12):1054-1055.
- HO, T.C., KU, P., HOPER, J.R., 1988. *AIChE Symposium Series*, 84 (262), 126.
- HOLMES, G., SINGH, B.R., THEODORE L., 1993. *Handbook of Environmental Management and Technology*. JWS Inc., NY. USA.
- HUDSON, J.A., 1995. Treatment and Disposal of Sewage Sludge in the Mid-1990s, *J.CIWEM*, 9, March, p.93-99.
- HUDSON, J.A., LOWE, P., 1996. Current Technologies for Sludge Treatment and Disposal. *J CIWEM*; 10:436-440.
- İODSD, İstanbul Organize Deri Sanayicileri Derneği, Atıktan Çevreci Enerji Üretimi Projesi, Fizibilite Raporu, 2001, İstanbul.
- KASSNER, W., 1992. Alternative Process for Sewage Sludge Disposal.

Entsorgungspaxis; 1-2: 36-40.

KAKY, Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 20814 Sayılı Resmi Gazete, 14 Mart 1991.

KAYANO, Y., SAGAI, M., TAKENAKA, K., 1992. Hot - Water Supply System Utilizing Waste Heat from a Sludge Incineration Plant. J.IWEM, (6):560-568.

KICHERER, A., GERHARDT, T., SPLIETHOFF, H., HEIN, K.R.G., 1992. Co-Combustion of Biomass/Sewage Sludge with Hard Coal in a Pulverised Fuel Semi-Industrial Test Rig. In: Combined Combustion of Biomass/Sewage and Coals. Final Reports, EC_Research Project, APAS-Contract COAL-92-0002.

KIELY, G., 1997, Environmental Engineering Technologies, UK.

KILGROC, J.D., 1996. Control of Dioxin, Furan and Mercury Emissions from Municipal Waste Combustors, J. Hazardous Materials, (47):163-194.

KOMISSAROV, S.A., KORCHUGANOVA, T.M., BELYAKOV, A.V., 1994. Contruction Materials Using Tanning Industry Wastes. Glass and Ceramics, 51 (1-2):32-34.

KOZINSKI, J.A., RINK, K.K., LIGHTY, J.S., 1995. Combustion of Sludge Waste in FBC: Distribution of Metals and Particle Sizes, Fluidized Bed Combustion, Vol.1, ASME, 139-147.

LANG, T., OBRIST, A., 1987. Combustion of Sewage Sludge in a Cement Kiln. Recycling von Klarschlamm. Berlin, p.285-291.

LEE, K.J., CHUN, S.A., 1993. Two-Stage Swirl Flow FBI of Sewage Sludge. In Rubow LN, editor. Proceedings 12ht International Conference on FBC, San Dego, CA, 1181-1188.

LIEM, D.A., ZORGE, J.A., 1995. Dioxins Andrelated Compounds, Status and Regulatory Aspects, ESPR-Env. Sci. and Pollut. Res., 2(1):46-55.

LOLL, U., 1996. Sewage Sludge, In:ATV Handbuch, 4th edn. Berlin:Ernst and Sohn.

- LOTITO, V., MININNI, G., DI PINTO, A.C., SPINOSA, L., 2001. Sludge Incineration Tests on Circulating Fluidised Bed Furnace. *Water Science and Technology*, 44(2-3):409-416.
- LOWE, P., 1995. Development in the Thermal Drying of Sludge Sludge. *Journal of CIWEM*, 9:306-316.
- LUNDBERG, M., HAGMAN, U., ANDERSSON, B., 1977. Environment Performance of the Kvaerner BFB Boilers for MSW Combustion-Analysis of Gaseous Emissions and Solid Residues. In: Preto FDS, editor. *Proceeding of 14th International Conference on FBC, Vancouver, Canada*,: 7-13.
- LURGI MG ENGINEERING, 1999. Thermal Disposal of Sludges, Hazardous and Special Wastes. *Seminer Notu*, 24-25 Mart.
- LURGI GMBH, 1988, CFB Combustion for Steam and Electric Power Generation, Express Information, Lurgi GmbH Gervinusstrabe, 17/19, Frankfurt-Germany.
- MUHLHAUS, 1991. Combustion of Sewage Sludge in a Fluidised Bed, In : *VDI Seminar, Klarschlammmentsorgung II*, Düsseldorf. Germany.
- MC GHEE, T.J., 1991. *Water Supply and Sewerage*, Mc Graw-Hill, NY.
- MANZEL, J., 1989. Sevar Drying Process in a Thin Bed, In *Klarschlammmentsorgung*, Dusseldorf: VDI-Bildungswerk, 74-81.
- METCALF and EDDY INC., 1991. *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse*. 3rd ed. NY:Mc Graw-Hill Inc.
- MININNI, G., ZUCCERELLO, R.D.B., LOTITA, V., SPINOSA, L., PINTO, A.C.D., 1997. A Design Model of Sewage Sludge Incineration Plants with Energy Recovery. *Water Science Technology*, 36(11)211-218.
- MORGAN, D.J., VAN DE KAMP, W.L., 1995. The Co - Firing of Biomass and Municipal Sewage Sludge with Pulverised Coals in Utility Boilers. In: *Proceedings second International Conference Combustion and Emissions Connetl*, London, UK., 4-5 Dec., p.159-168.
- MUHLHAUS, L., 1991. Combustion of Sewage Sludge in a Fluidised Bed. In: *VDI-Seminar, Klarschlammmentsorgung II*. Dusseldorf,

- OGADA, T.P.M., 1995. Combustion and Emission Characteristics of Sewage Sludge in a Bubbling Fluidised Bed Combustor. Ph.D. Dissertation, Technical University of Hamburg, Germany.
- ORHON, D., 1991. Ön Arıtmanın Projelendirilmesi. Endüstriyel Atıksuların Önarıtılması-Teknoloji İletimi Semineri No.1, ISO-SKATMK, s.131-173.
- ORHON, D., 1997. Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisleri İçin Proje Değerlendirilmesi, TMMOB Çevre Müh. Odası İst.Şb., Atıksuların Arıtılması Seminer Notları, İstanbul.
- PELS, J.R., MAREK, A., WOJTOWICS, X., MOULIJN, J.A., 1993. Rank Dependence of N₂O Emissions in Fluidised Bed Combustion of Coal. Fuel, 72(373-379).
- PESCHEN, N., 1997. Conditioning of Sewage Sludge with Lime for the Production of Secondary Raw Material. Umwelt Magazin, Bd; 27(5):44-47.
- PHILIPPEK, C., WERTHER, J., 1995. Sewage Sludge Combustion in a Circulating Fluidised Bed-Mechanisms of NO-and N₂O Formation and Destruction. In: Deutscher Flammentag, VDI-Gesellschaft Energietechnik-Dusseldorf:VDI GmbH, p.373-381.
- PHILIPPEK, C., 1996. Sewage Sludge Incineration in the CFB. Ph.D., Dissertation, Technical University of Hamburg, Germany.
- POLETCHNY, H., 1988. Sewage Sludge - Useful Dangerous for Agriculture. In:Entsorgungspraxis-Spezial. Klarschlamm:10-13.
- PONSEN, A.R., 1998. Volarization of Sludge Residuals, Vadenbroek Int., Holland.
- PROBST, H., 1992. Co-Combustion of Sewage Sludge in a Coal-Fired Combustion of Biomass/Sewage sludge and Coals, Final Reports, EC-Research Project, APAS-Contract COAL-92-0002.
- RACZECK, V., 1992. Experimental Investigation of the Emissions and Combustion Characteristics of Sewage Sludge in a Semi-Pilot Scale Fluidized Bed Combustor, Ph.D. Dissertation, Technical University Hamburg, Germany.
- REID, M., LEONHARD, K., 1987. Elimination of Heavy Metals from Municipal

- Sewage Sludges. In: Thome-Kozmiensky K., Loll U., editors, Recycling von Klarschlamm. P.29-35. Berlin.
- REIMANN, D.O., 1989. Thermal Conditioning of Sludge. In Klarschlamm Entsorgung, Düsseldorf: VDI-Bildungswerk, 12-26.
- , 1995. Heating Values and Heavy Metals from Sludge, In: Klarschlamm Entsorgung, Bieheft No.28 to Journal Müll and Abfall, 16-19.
- RESTEC, 2002. ([HTTP://www.restec.net/hearth.htm](http://www.restec.net/hearth.htm))
- RICHTER, E., 1992. Removal of Polychlorinated Dioxins and Furans from Flue Gas Using Active Coke Process, Chem-Ing-Tech, 64, 125-136.
- RICKMANN, W.S., HOLDER, N.D., YOUNG, D.T., 1985. Chemical Engineering Prog., 81 (3), 34.
- RINK, K.K., LARSEN, F.S., KOZINSKI, J.A., LIGHTY, J.S., 1993. Thermal Treatment of Hazardous Wastes: A Comparison of Fluidized Bed and Rotary Kiln Incineration, Energy & Fuels, (7):803-813.
- RINK, K.K., KOZINSKI, J.A., LIGHTY, J.S., 1995. Biosludge Incineration in FBC's: Behaviour of Ash Particles, Combustion and Flame, 100: 121-130.
- RICKMAN W.S., HOLDER N.D., YOUNG D.T., 1985. Chem.Eng. Prog., 81 (3):34.
- ROMER, R., 1991. Thermal Treatment of Sewage Sludge-Combustion, Drying, Energy Recovery, Emissions. In: Klarschlamm Entsorgung 1, Daten-Dioxine, Entwässerung, Verwertung, Entsorgungsvorschläge. Düsseldorf: VDI GbmH: 250-271.
- RUMPHORST, M.P., 1995. Investigation of the Sludge Pyrolysis Process. PhD. Thesis RWTH, Germany.
- SANAYİ ve TİCARET BAKANLIĞI (STB), 2001. Yatırım Programı, Ankara.
- SANGER, M., WERTHER, J., OGADA, T., 2001. NO_x and N₂O Emission Characteristics from Fluidized Bed Combustion of Semi-Dried Municipal Sewage Sludge, Fuel, 80:167-177.

- SANKARAN, S., PANDEY, D.S., SUMATHY, K., 1998. Experimental Investigation on Waste Heat Recovery by Refinery Oil Sludge Incineration Using Fluidised-Bed Technique. Environmental Science and Pollution Control, 33(5):829-845.
- SAXENA, S.C., JOTSCHI, C.K., 1994. Fluidized Bed Incineration of Waste Materials. Prog. Energy Combustion Sci., (20):281-324.
- SCHITTENHELM, A., 1997. A New Era for London, Water and Environment, 6(47):24-26.
- SWITHENBANK, J., NASSERZADEH, V., TAIB, R., STAGG, D., MOORE, D., WARD, M., BONE, J., 1997. Incineration of Wastes in Novel High-Efficiency Tumbling and Rotating Fluidized Bed Incinerator. Journal of Environmental Engineering, 123 (10):1047-1052.
- SLIM, J.A., WAKEFIELD, R.W., 1991. The Utilization of Sewage Sludge in the Manufacture of Clay Bricks. Water SA; 17(3); 197-201.
- SKKY, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği, 4 Eylül 1988, Resmi Gazete, Ankara
- ŞENGÜL, F., FİLİBELİ, A., 1992. Arıtma Çamurlarının Tasviyesi ve Bertarafı, Çevre Teknolojisi, Sayı:3, p.19-22.
- TAKY, TEHLİKELİ ATIKLARIN KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ, 22387 Sayılı Resmi Gazete, 27 Ağustos 1995.
- TKKY, TOPRAK KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ, 24609 Sayılı Resmi Gazete, 10 Aralık 2001.
- TOPAL, H., ATIMTAY, A., DURMAZ, A., 2002., Olive Cake Combustion in a CFB and Its Emission Characteristics. Proceedings 16th International Conference on Fluidised Bed Combustion, Canada.
- TOPAL, H., 1999, Dolaşım Akışkan Yatağın Hidrodinamik Yanma ve Emisyon Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 331 s., Ankara.
- TOPRAK, H., 1996. Atıksu Arıtma Sistemlerinin Tasarım Esasları, Cilt II(2. Baskı), DEÜ Müh.Fak. Yayını, No.241, İzmir.
- TRAUNER, E.J., 1993. Sludge Ash Bricks Fired to Above and Below Ash-

- Vitrifying Temperature, Journal of Environmental Engineering, Vol.119, No.3, pp.506-519.
- TS 4041, Kazanlar Anma Isıl Gücü ve Verim Deneyleri Esasları, TSE 1986, Ankara.
- TS 9545, Su Kalitesi-Su, Atık Su ve Çamur Analiz Metotları-Çamurdan Numune Alma Kuralları, TSE, Kasım 1991, Ankara.
- TS 9546, Su Kalitesi-Su ve Çamur Analiz Metotları-Çamur ve Sedimentlerde Kum Bakiye ve Su Muhteviyatının Tayini, TSE, Kasım 1991, Ankara.
- TÜZÜNER, A.S., 2000. İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Elektrik Enerjisi Üretimi. Türkiye 8. Enerji Kongresi Bildiriler Kitabı. Cilt II. s.299-309.
- UNIDO, 1993. How to Start Manufacturing Industries, File Z, Vol. V, Z29 9000 Sewage Sludge Incineration.
- URKAN, M.K., BİLGE, D., HEPERKAN, H., 1986. Akışkan Yatak Sistemleri, Mühendis ve Makine Dergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayını, Cilt 27, Sayı:320.
- VADEB, 1998. Thermal Treatment of Sewage Sludge Notes. Holland.
- VAN VOORNEBURG, F., VAN VEEN, H.J., 1993. Treatment and Disposal of Municipal Sludge in The Netherlands. J IWEM, 7:116-121.
- VELİOĞLU, S.G., 1980. Çamur Tasfiye ve Uzaklaştırma İşlemleri, Arıtma Sistemlerinin Tanıtılması, İTÜ İnşaat Fak. İstanbul.
- VESİLİND, P.A., RAMSEY, T.B., 1996. Effect of Drying Temperature on the Fuel Value of Wastewater Sludge. Wastewater Management and Research, 14:189-196.
- WATERS, P.L., 1975. Factors Influencing the Fluidized Combustion of Low Grade Solid and Liquid Fuels. In: Proceedings of the International Conference on Fluidized Combustion, Imperial College, London, UK, 16-17 Sept.1975.
- WERTHER, J., OGADA, T., BORODULYA, V.A., DIKALENKO, V.I., 1995. Devolatilisation and Combustion Kinetic Parameters of Wet Sewage Sludge in a Bubbling Fluidised Bed Furnace. In: Proc. Inst. of Enery's 2nd International Conference on Combustion and Emission Control, p.149-158, London, UK.
- WERTHER, J., OGADA, T., PHILIPPEK, C., 1995. Sewage Sludge Combustion in

- the Fluidized Bed Comparison of Stationary and Circulating Bed Techniques, 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion, p.951-962.
- WERTHER J., OGADA T., 1999. Sewage Sludge Combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 25:55-116.
- WERTHER, J., 2000. Combustion of Agricultural Wastes, Progress in Energy and Combustion Science, 26:1-27.
- WIEBUSCH, B., SEYFRIED, C.F., 1997, Utilization of Sewage Sludge Ashes in the Brick and Tile Industry, Water Sci. Tech., 36(11):251-258.
- WILLIAMS, P.T., 2000. Waste Treatment and Disposal. John Wiley and Sons Ltd, England, 417 s.
- WINKLER, M., 1993. Sewage Sludge Treatments, Chemistry and Industry, 7:237-240. London.
- YASUDA, Y., 1991. Sewage Sludge Utilization Technology in Tokyo, Water Science Technology, 23:1743-1752.
- ZAMAN, R.U., 1995. Performance of Two Fluid Bed Sludge Incinerators with Air Pollution Control Systems Consisting of a Venturi Scrubber and Wet Electrostatic Precipitator, 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion, p.1359-1366.
- ZANDER, A.K., THEIS, T.L., BRENNAN, M., 1996. Energy From Paper Sludge: Criteria and Hazardous Air Pollutants, Journal of Environmental Engineering, 122(8):758-760.

ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini buradaki çeşitli okullarda tamamladı. 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Maden Fakültesinden *Maden Mühendisi* olarak mezun oldu. 1991 yılında askerlik görevini Manisa’da tamamladı. 1993-1997 yılları arasında Çukurova Üniversitesi (Ç.Ü.) Maden Mühendisliği Bölümünde *Araştırma Görevlisi* olarak çalıştı. 1995 yılında aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde “**Termik Santral Uçucu Küllerinden Metal Kazanımı**” konusundaki tez çalışmasını tamamlayarak *Yüksek Mühendis* ünvanı aldı. 1997 yılından beri de Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Küçük Sanayi Siteleri ve Organize Sanayi Bölgeleri Genel Müdürlüğü-Tesisat Proje Şubesinde çalışmaktadır. 1999 yılından itibaren Çevre Bakanlığı *Tehlikeli Atık Yönetimi ve ÇED-İnceleme Değerlendirme* Komisyonlarında “*komisyon üyesi*” ve Türk Standartları Enstitüsü (TSE) Makine Hazırlık Grubunda “*konu raportörü*” olarak görev yapmaktadır. 2000 yılında İngiltere-Nottingham University-School of Chemical Mining and Environmental (SCheME) ve Environmental Technology Centre’de “**Su ve Atıksu Arıtımında Elektrokimyasal ve Membran Filtrasyon Teknolojilerinin Uygulanması**” konusunda 3 ay boyunca proje çalışmasında bulundu. Çoğunluğu çeşitli ulusal ve uluslararası sempozyumlarda sunulmuş 10 adet bilimsel yayını mevcut olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

EKLER

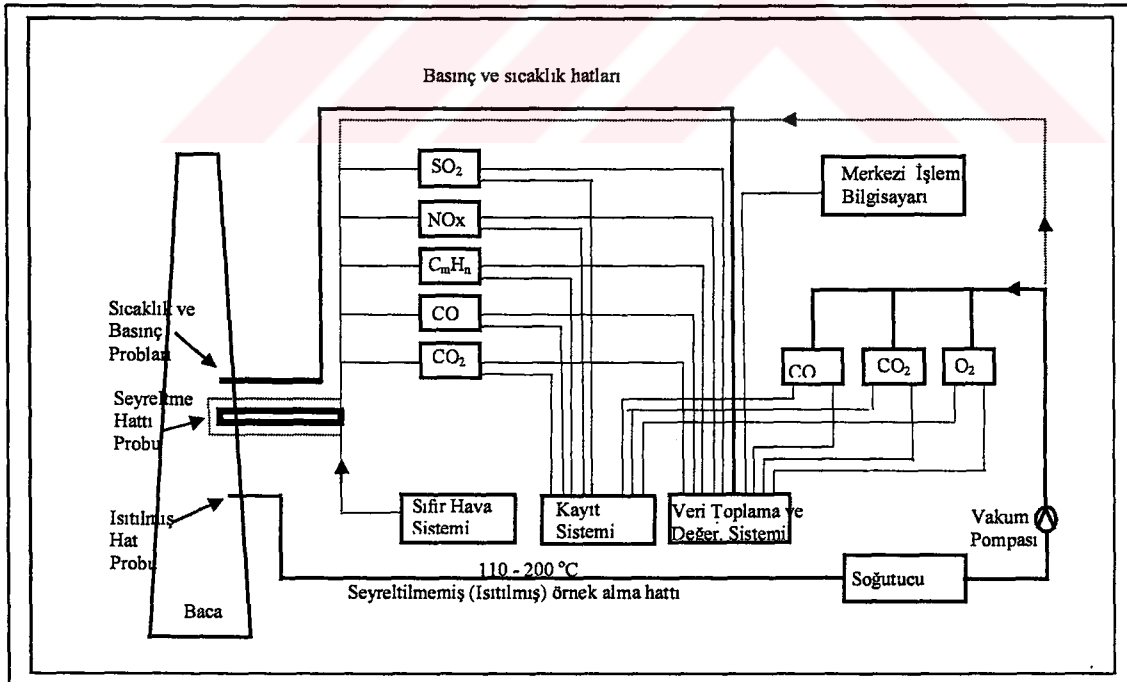
EK-1

MOBİL EMİSYON TEST LABORATUARI (METL)

METL sistem yapısı ve bağlantıları Şekil EK-1.1'de şematik olarak verilmiştir. METL örnek gaz alma ve hazırlama sistemi,

- ölçüm cihazları
- sıfır hava hazırlama sistemi
- kayıt sistemi
- basınç ve sıcaklık ölçme sistemleri
- veri toplama ve değerlendirme sistemi
- merkezi işlem bilgisayarı ve
- diğer yardımcı teçhizat

oluşmaktadır.



Şekil EK-1.1: Baca gazı ölçme ve veri değerlendirme sistemi

166

Baca gazı içerisinde bulunan gaz emisyonlarının doğru ve hassas bir şekilde analizi, örneklenen gaz kütesinin baca gazının gerçek özelliklerini göstermesine, tozsuz, kuru ve analiz sisteminin gerektirdiği fiziksel özelliklerde sisteme beslenmesine bağlıdır. METL’de bulunan çeşitli ölçme sistemleri ve yardımcı cihazlar Çizelge EK-1.1’ de verilmiştir.

Örnek Alma Sistemi :

Gaz emisyon ölçümlerinde seyreltilmiş ve seyreltilmemiş olmak üzere 2 örnekleme hattı bulunmaktadır. Örnekleme yapılan gaz konsantrasyonları gaz analiz sisteminin ölçme sınırlarının üzerinde olması durumunda, seyreltilmiş hat ile gaz örneği temiz hava ile seyreltilerek alınır.

Çizelge EK-1.1: METL’de bulunan bazı ölçme sistemleri ve yardımcı cihazlar

	Ölçme sistemleri ve yardımcı cihazlar
Analizörler	O ₂
	CO-CO ₂
	SO ₂
	HC
	NO _x
	Isıtılmış örnek gaz alma
Ölçüm sistemi	Baca çekişi
	Basınç farkı
Örnek gaz alma probu	Isıtılmış
	Seyreltilmiş
Diğer	Seyreltilmiş örnek gaz alma sistemi
	Bilgisayar kontrollü kalibrasyon sistemi
	Bilgisayar kontrollü veri toplama ve değerlendirme sistemi
	Kompresör ve hava tankı
	Sıfır hava hazırlama sistemi
	Soğutucu, yoğunlaştırıcı
	Regülatör
	Vakum pompaları
	Kalibrasyon gaz tüpleri (CO, CO ₂ , SO ₂ , CH ₄ , NO _x)
	Hidrojen tüpü
	Oksijen tüpü

Gaz Analiz Sistemleri :

Yanma gazlarının içerdiği gaz konsantrasyonlarının zamana bağlı olarak değişimlerinin analizi yapılmaktadır. Baca gazında analiz edilen gazlar ve analiz yöntemleri Çizelge EK-1.2' de gösterilmektedir.

Çizelge EK-1.2: Baca gazında analizi yapılan gazlar ve uygulanan analiz yöntemleri

¹ seyreltilmiş hat , ² direk hat

Ölçülen gaz	Ölçüm yöntemi	Ölçüm sınırı	Hassasiyeti
O ₂	O ₂ Molekülünün Paramanyetik Öz. Kullanılması	%0-100	±%1'den az
CO ₂	Saçınımsız Kızılötesi Işıma (NDIR)	%0-5 ¹ %0-25 ²	±%1
CO	Saçınımsız Kızılötesi Işıma (NDIR)	0-500 ppm ¹ %0-25 ²	±%1
SO ₂	Saçınımsız Morötesi Işıma (NDUV)	0-4000 ppm	<2 ppm
NO-NO ₂ -NO _x	Kimyasal Işıma	0-5000 ppm	1 ppm
C _m H _n	Alev İyonizasyon Yöntemi (FID)	0-10000 ppm	±%2

Kayıt Sistemi : METL içinde bulunan veri toplama sisteminde depolanan veriler kullanılmak suretiyle kazan verimi ve emisyonlar istenen birimlerde hesaplanarak kaydedilmiştir. METL'nda bulunan ölçüm aygıtlarında ölçülen değerler, analog sinyaller olarak kayıt sistemi ile veri toplama ve değerlendirme sistemlerine gönderilmektedir.

Kalibrasyon Sistemi : Kullanılan gaz analiz cihazlarının belirli aralıklarla kalibre edilmeleri gerekmektedir. CO, CO₂, SO₂, NO_x ve C_mH_n analizörlerinde sıfır kalibrasyonu için METL'nda bulunan temiz hava kullanılmaktadır. O₂ analizörü sıfır kalibrasyonu için ise diğer gazlardan herhangi biri kullanılmaktadır. Gaz analiz cihazlarında kullanılan kalibrasyon gazı ve konsantrasyonları Çizelge EK-1.3'te verilmektedir.

Çizelge EK-1.3: Gaz ölçüm analizörü, kalibrasyon gazı ve konsantrasyonları

Kalibrasyon tüpü gaz analiz cihazı	Kullanılan kalibrasyon gazı	Tüp konsantrasyonu
CO	CO	%10.3
CO ₂	CO ₂	%15.0
SO ₂	SO ₂	10100 ppm
NO _x	NO	4050 ppm
C _m H _n	CH ₄	77000 ppm

Sıcaklık, Basınç, Akış Ölçüm Sistemleri : Yapılan deneylerde;

Sıcaklık ölçümleri için

- ısıl çiftler,
- civalı termetreler,
- bimetal termetreler,
- lazerli radyasyon pirometresi,

Basınç ölçümleri için

- manometreler,
- emiş ölçerler,
- basınç transducerleri

Akış ölçümleri için;

- orifisetre,
- pitot tüpü,
- gaz sayacı,
- dijital anemometre

vb. cihazlar kullanılmaktadır.

Veri Toplama ve Değerlendirme Sistemi: Yanma performansı, emisyon özelliklerinin incelenmesinde genel olarak yanma ve yanma gazı analizi ile yakma sistemi sıcaklık ve basınç dağılımları incelenmiştir. Yatıkta radyal ve eksenel sıcaklık dağılımları, akış özellikleri, ısı transferi ve enerji dönüşümünün incelenmesinde, sıcaklık veri toplama ve değerlendirme sistemine ihtiyaç vardır. Bu amaçla METL'de 5 adet sıcaklık ölçer ile 36 kanal girişli bir veri toplama sistemi ile 14 adet fark basınç transduceri birlikte kullanılarak çeşitli parametrelerin karşılıklı olarak değişimi incelenebilmiştir.

EK-2

HESAPLAMALAR

YANMA (ISIL) KAPASİTESİ = Besleme Oranı (Yükü) x Alt Isıl Değer x Isıl Verim

$$Q_k \text{ (kcal/s)} = M_y \text{ (kg/s)} \times \text{HHV (kcal/kg)} \times \eta \text{ (\%)}$$

YANMA VERİMİ :

$$1) \quad CE = \frac{\text{Baca gazındaki CO}_2 \text{ \% 'si} \times 100}{\text{Baca gazındaki } (\% \text{CO}_2 - \% \text{CO})}$$

Yaygın olarak kullanılan yanma verimi hesabıdır. Ancak bu hesaplamada sadece baca gazı konsantrasyonları esas alınmakta ve beslenen yakıttaki (atık) tüm karbonun sadece tümüyle CO ve CO₂'e dönüştüğü ve karbon kaybı olmadığı varsayılmaktadır.

$$2) \quad CE = \%100 - \text{Toplam Yanma Kayıpları} \\ \%100 - (K_{\text{CO}} + K_{\text{Cmfln}} + K_c)$$

Kok eksik yanma Kaybı, K_c

$$K_c = \frac{F \times b \times H_{\text{ukok}}}{M_y \times H_u} \times 100 \quad (\%)$$

F: kg kül/s

b: kg C/kg kül

CO Eksik yanma Kaybı, K_{CO}

Baca gazındaki karbonmonoksitten kaynaklanan kayıpları ifade eder ve

$$K_{CO} = \frac{CO \times V_{Gkr} \times 3020}{H_u} \times 100 \quad (\%)$$

şeklinde hesaplanır. Burada;

3020 (kcal/Nm³) : Karbonmonoksitin alt ısı değerini vermektedir.

V_{Gkr} : Özgül baca gazı miktarı (Nm³/kg)

$C_m H_n$ Eksik Yanma Kaybı, K_{CmHn}

Baca gazındaki hidrokarbonlardan kaynaklanan kayıpları ifade eder ve

$$K_{CmHn} = \frac{C_m H_n \times V_{Gkr} \times 8609}{H_u} \times 100 \quad (\%)$$

şeklinde hesaplanır. Burada;

8609 (kcal/Nm³) : Metan gazı alt ısı değerini vermektedir.

Toplam hidrokarbonlar $C_m H_n$ burada metan eşdeğeri olarak ölçülmektedir.

V_{Gkr} (Nm³/kg) : Özgül baca gazı miktarı

H_u : Yakıt alt ısı değeri (kcal/kg)

Yanma kayıplarını dikkate alan ve gerçeğe daha yakın verimlere ulaşılan hesap yöntemidir ve bu çalışmada yanma verimi olarak ele alınmıştır.

KATI KÜTLE AKISI:

$$G_s = \frac{m}{V} \times U_{op}$$

G_s : Katı kütle akısı (kg/m²-s)

U_{op} : İşletme gaz hızı (m/sn)

m : Toplam katı kütle (kg)

V : İzokinetik emilen gaz miktarı (m³)