

**T.C.
İZMİR DEMOKRASİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ARITMA ÇAMURLARINDAN ENERJİ ELDESİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tunç KÖKSAL

**Danışman
Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN**



İZMİR-2021

**T.C.
İZMİR DEMOKRASİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ARITMA ÇAMURLARINDAN ENERJİ ELDESİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tunç KÖKSAL

**Danışman
Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN**



İZMİR-2021



Tunç KÖKSAL

ARITMA ÇAMURLARINDAN ENERJİ ELDESİNİN ARAŞTIRILMASI

2021

TEZ ONAYI



TAAHHÜTNAME

Bu tezin İzmir Demokrasi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Tunç KÖKSAL



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLO DİZİNİ.....	vii
TEŞEKKÜR	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	11
1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	12
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	14
3. GENEL BİLGİLER.....	16
3.1 Arıtma Çamuru.....	16
3.1.1 Arıtma Çamuru Kaynakları.....	16
3.1.2 Arıtma Çamuru İçerikleri.....	16
3.1.3 Arıtma Çamuru Isıl Değeri.....	17
3.2 Arıtma Çamuru Potansiyeli	18
3.2.1 Dünyada Arıtma Çamuru Potansiyeli	18
3.2.2 Türkiye’de Arıtma Çamuru Potansiyeli	21
3.2.3 İzmir İli Arıtma Çamuru Potansiyeli.....	23
3.2.4 İzmir’de İşletilmekte Olan Atık Su Arıtma Tesisleri.....	26
4. YÖNTEM	29
4.1. Arıtma Çamurlarının Kurutulması	29
4.1.1 Kurutma Yöntemleri	30
4.2 Çamur Yakma Sistemleri	34
4.3 Atık Su Arıtma Çamurlarının Yakılması.....	36

4.3.1	Ayrı Yakma Sistemleri	38
4.3.2	Birlikte Yakma Sistemleri.....	43
4.3.3	Alternatif Prosesler.....	53
4.4	Yakma Sisteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	54
4.4.1	Avantajlar	54
4.4.2	Dezavantajlar.....	54
5.	ANALİZ.....	55
5.1	Sistem Açıklaması	55
5.2	Termodinamik Analiz.....	58
5.2.1	Duman Gazının Özgül Isı Kapasitesinin Belirlenmesi	58
5.2.2	Atık Su Çamurunun Isıl Değerinin Belirlenmesi	63
5.3	Enerji Analizi	65
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	68
	KAYNAKÇA	71
	ÖZGEÇMİŞ.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

AÇ

AAT

AİD

ÜİD

KM

KOİ

SBR

EN

TÜİK

TEP

BTEP

CFB

VOC

MSW

BGT

İE

Kg

°C

MJ

KJ

Kcal

KWh

MW

MWt

GW

GWt

MWth

KWth

C

Açıklamalar

Arıtma Çamuru

Atık Su Arıtma Tesisi

Alt Isıl Değer

Üst Isıl Değer

Kuru Madde

Kimyasal Oksijen İhtiyacı

Ardışık Kesikli Reaktör

Eşdeğer Nüfus

Türkiye İstatistik Kurumu

Ton Eşdeğer Petrol

Bin Ton Eşdeğer Petrol

Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı

Uçucu Organik Bileşikler

Evsel Katı Atık

Baca Gazı Temizliği

Isı Eşanjörü

Kilogram

Derece Santigrat

MegaJoule

KiloJoule

Kilokalori

Kilowattsaat

Megawatt

Megawattsaat

Gigawatt

Gigawattsaat

Isısal Megawattsaat / ısısal güç

Isısal Kilowattsaat/ ısısal güç

Karbon

H	Hidrojen
O	Oksijen
N	Azot
S	Kükürt
Fe	Demir
Cu	Bakır
Al	Alüminyum
Hg	Cıva
Cd	Kadmiyum
As	Arsenik
Co	Kobalt
Pb	Kurşun
Cr	Krom
Cl	Klor
Br	Brom
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
HC ₄	Metan
NH ₃	Amonyak
HCl	Hidroklorik Asit
HF	Hidrojen Florür
NO _x	Azot Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
K ₂ O	Potasyum Oksit
Na ₂ O	Sodyum Oksit
ZnO	Çinko Oksit
CuO	Bakır Oksit
Rb ₂ O	Rubidium Oksit
CdO	Kadmiyum Oksit
PbO	Kurşun Oksit
NiO	Nikel Oksit

MnO	Mangan Oksit
SO	Sülfür Oksit
CuO	Bakır Oksit
BaO	Baryum Oksit
SO ₂	Kükürt Dioksit
SiO ₂	Silikon Dioksit
CO ₂	Karbon Dioksit
TiO ₂	Titanyum Dioksit
ZrO ₂	Zirkonyum Dioksit
Y ₂ O ₃	İtriyum Trioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum Trioksit
Fe ₂ O ₃	Demir Trioksit
SO ₃	Kükürt Trioksit
P ₂ O ₃	Fosfor Trioksit
Cr ₂ O ₃	Kromyum Trioksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Türkiye’deki mevcut atık su arıtma tesislerinden (AAT) çıkan arıtma çamurlarının bertaraf yöntemlerinin çamur miktarlarına göre dağılımı [8].....	13
Şekil 3.1. Avrupa ülkelerinde mevcut AAT’lerden (2017 yılı) oluşan arıtma çamurlarının nihai bertaraf yöntemlerinin çamur miktarlarına göre dağılım [25].....	19
Şekil 3.2. Kişi başına düşen günlük arıtma çamuru kuru madde miktarı [27].....	21
Şekil 3.3. Türkiye’nin arıtma çamuru kuru madde potansiyelinin bölgesel dağılımı.	22
Şekil 3.4. İzmir ili 2018 yılında sanayi kaynaklı arıtma çamurunun yönetimi [29] ...	23
Şekil 3.5. İzmir ilçeleri günlük arıtma çamuru kuru madde miktarı.....	24
Şekil 4.1. Yakma sistemi [37].....	35
Şekil 4.2. Çamurlara uygulanan ısı işlemler	38
Şekil 4.3. Çok hücreli yakma fırını [41]	41
Şekil 4.4. Akışkan yataklı yakma sistemi [41]	42
Şekil 4.5. Döner yakma fırını [43]	42
Şekil 4.6. Kömürle çalışan pülverize yakma sistemli termik santrallerde arıtma çamuru kurutma ve birlikte yakma prosesi [46]	45
Şekil 4.7. Termik santralde kömür ve arıtma çamurunun birlikte yakılması [50].....	47
Şekil 4.8. Arıtma çamurunun katı atıklarla birlikte yakılması için başlıca alternatif prosesler [54].....	49
Şekil 5.1. Sistem Teçhizatlarının Şematik Diagramı	56
Şekil 5.2. Külün ve külsüz duman gazının özgül ısılarının sıcaklıkla değişimi	60
Şekil 5.3. Hava ve külün özgül ısının sıcaklığa karşı varyasyonu	61
Şekil 5.4. Kuru bazlı arıtma çamuru için yıllık alt ısı değer dağılımı.....	64
Şekil 6.1. Sistem enerji akış diyagramı.....	69
Şekil 6.2. Ayık bazda elektrik üretim dağıtımı	69

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Arıtma çamurunun tipik ısı değerleri [23]	18
Tablo 3.2. Seçilen ülkeler bazında 2017 yılına ait arıtma çamuru bertarafı [25]	20
Tablo 3.3. Türkiye'nin arıtma çamuru kuru madde potansiyeli- bölgesel bazlı	22
Tablo 3.4. İzmir için ilçe bazlı nüfus dağılımı [30].....	25
Tablo 3.5. 2018 yılı için İzmir ili atık su arıtma tesisleri ve arıtma miktarları [31]...	26
Tablo 4.1. Çeşitli ülkelerdeki yakılan katı atık miktarları [52]	48
Tablo 4.2. Çimento ve arıtma çamuru külünün bileşimleri [59]	51
Tablo 5.1. Atık su arıtma çamuruna ait genel değerler	56
Tablo 5.2. Doğalgaza ait genel değerler	57
Tablo 5.3. Duman gazına ait genel değerler	57
Tablo 5.4. Sıkıştırılmış havaya ait genel değerler	57
Tablo 5.5. Kül bileşiminin oksitler olarak gösterimi (ağırlık %)	59
Tablo 5.6. Arıtma çamuru külünün tipik kimyasal bileşimi.....	62
Tablo 5.7. Kuru bazlı atık su arıtma çamuru elementel analiz değerleri.....	64
Tablo 5.8. Birlikte yanma için yakıt karışımına ait elementel analiz değerleri.....	64
Tablo 5.9. Sistem bileşenleri için enerji kaybı denklemleri	66
Tablo 5.10. Sistemdeki her bir nokta için termodinamik özellikler	67

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her safhasında yardımcı olan, bilgi ve tecrübeleri ile bana ışık tutan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN'na, lisansüstü öğrenim serüvenimde tüm zorlu aşamalarında her yönden destek olan, akademik olarak birlikte çalışmaktan keyif aldığım ve örnek aldığım, kendisini tanıdığımından dolayı onur duyduğum Sayın Doç. Dr. Can COŞUN' a, kaynak araştırma konusunda çalışmalarına katkı sağlayan yakın arkadaşım Can ALTIN' a, çalışmalarım sırasında bana destek olan zaman yaratan değerli yöneticim Lutfi TAY' a, öğrenim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen, yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Tunç KÖKSAL
İzmir, 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ARITMA ÇAMURLARINDAN ENERJİ ELDESİNİN ARAŞTIRILMASI

Tunç KÖKSAL

**İzmir Demokrasi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN

Bu tez çalışmasında, susuzlaştırılmış kentsel atık su arıtma çamuru ve doğalgazın birlikte yakıldığı bir enerji santralinin performans incelemesi yapılmıştır. Enerji santralinin toplam kapasitesi 1 MW'e indirgenmiş ve tüm analiz sonuçları buna göre ölçeklendirilmiştir. Enerji santralinin enerji performansı, termodinamik analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Kuru bazlı kentsel atık su arıtma çamuru $C_{4,13}H_{8,58}O_2N_{0,61}S_{0,04}$ bileşiği ile formüle edilmiştir. Santraldeki enerji kayıpları ayrıntılı olarak tespit edilmiştir. Net santral verimi %9,095 olarak bulunmuştur. Kurulum kapasitesi bağlamında değerlendirildiğinde, yıllık bazda sistem kapasite kullanım oranı %81,9'dur. Enerji santrali, 1 MW kurulu güç için yıllık 7,177 GWh elektrik üretilmekte ve yıllık yaklaşık 72.416 ton kentsel atık su çamurunu ortadan kaldırabilmektedir. Elektrik üretiminden meydana gelen ortalama CO₂ salınımı değeri ise 888 gram CO₂/kWh olarak bulunmuştur. Bu çalışmada literatürde ilk defa olarak duman gazının özgül ısısı iki ayrı bileşene ayrılarak hesaplanmış ve önemli denklemler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kentsel Atık Su Arıtma Çamuru, Birlikte Yakma, Enerji Santrali, Enerji, Termodinamik Analiz

2021, 78 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF ENERGY RECOVERY FROM SEWAGE SLUDGE

Tunç KÖKSAL

**İzmir Demokrasi University
The Institute of Science
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN

This study aims to examine the performance of the co-combustion of municipal dewatered sewage sludge and natural gas in a power plant. The total capacity of the power plant was reduced to 1 MW and all results of the analysis were scaled accordingly. Thermodynamic analysis methods were carried out to evaluate the energetic performance of the power plant. The dry-based municipal sewage sludge was formulated as the fictive molecule of $C_{4.13}H_{8.58}O_2N_{0.61}S_{0.04}$. Energy losses in the power plant were determined in detail. The net plant energy efficiencies were found to be 9.095%. When evaluated in terms of installation capacity, the annual system capacity utilization rate is 81.9%. The power plant can generate annual electricity of 7.177 GWh for 1 MW of installed power and can eliminate approximately 72,416 tonnes of municipal dewatered sewage sludge annually. The average value of CO₂ emissions from electricity generation was found to be 888 g of CO₂/kWh. In this study, for the first time in the literature, the specific heat of smoke was calculated by dividing it into two separate components and significant equivalences were obtained.

Keywords: Municipal Wastewater Sewage Sludge, Co-combustion, Power Plant, Energy, Thermodynamic Analysis

2021, 78 pages

1. GİRİŞ

Birincil enerji, değişim ve dönüşüme uğramamış enerji biçimidir. Kömür, petrol, doğalgaz, nükleer, biyokütle, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi kaynaklar birincil enerji kaynaklarına örnektir. Birincil enerji kaynakları ihtiyaca yönelik enerji biçimlerine dönüştürülerek ikincil enerji kaynakları elde edilebilir. Kömür, petrol, doğalgaz ve rüzgâr gibi birincil enerji kaynakları elektrik enerjisine dönüştürülerek, ikincil enerji kaynağı elde edilebilmektedir [1].

Türkiye her yıl 6 exajoule birincil enerji tüketmektedir [3]. Tüketilen enerjinin %80'ninden fazlası fosil yakıttır [2]. Başlıca tüketilen fosil yakıtlar; %31 petrol, %28 doğalgaz ve %27 kömür olarak karşımıza çıkmaktadır [4]. Türkiye'de fosil yakıtların tüketimi fazla olduğundan dolayı, yılda kişi başına 6 tondan fazla sera gazı emisyonu ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple enerji politikası olarak, Türkiye ithalatının %25'ini oluşturan fosil yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir [5].

Kişi başı yıllık ortalama enerji tüketim miktarı; Türkiye'de 1,59 ton eşdeğer petrol (TEP), dünyada 1,87 TEP'e eşdeğerdir. Elektrik tüketiminin kişi başı yıllık ortalama miktarı ise Türkiye'de 3.058 kWh, dünyada 3.155 kWh'dir. Karbon salınımı yıllık ortalama, Türkiye'de 4,31 ton/kişi, dünyada 4,88 ton/kişi'dir. Dünyada birincil enerji kaynağı kullanımı; %30,3 kömür, %33,1 petrol, %23,7 doğalgaz, %6,4 hidrolik, %4,9 nükleer ve %1,6 diğer yenilenebilir kaynaklar şeklinde sıralanır. Dünyada elektrik enerjisinin üretimi; %41 kömür, %21 doğalgaz, %16 hidroelektrikten elde edilir. Dünyada 2011 yılı enerji üretimi 32.228,9 BTEP (Bin TEP)'dir. Enerji tüketiminde ise Türkiye, 114.480,2 BTEP ile dünyada 23. Sıradadır. 2011 yılı Türkiye'deki birincil enerji kaynakları; %50 linyit, %14 hidrolik, %8 odun, %8 petrol, %5 jeotermal, %4 taş kömürü şeklindedir. Enerji tüketiminde kullanılan kaynaklar ise; %33 doğalgaz, %27 petrol, %15 taş kömürü, %14 linyit, %4 hidrolik, %2 odun, %2 petrokok, %1 jeotermal, %1 bitki-hayvan atıkları, %1 güneş, %1 jeotermal, şeklindedir. Büyük oranı ithal edilen petrol ve doğalgaz, enerji ihtiyacının yaklaşık %60'ını karşılamaktadır. Artan nüfus ve ihtiyaçlar neticesinde enerji kaynaklarının yeterliliği yıllar içerisinde azalmaktadır. Türkiye'de enerji yerlilik payı 1990'da %48,1 iken 2011 yılında %28,2'ye düşmüştür [6].

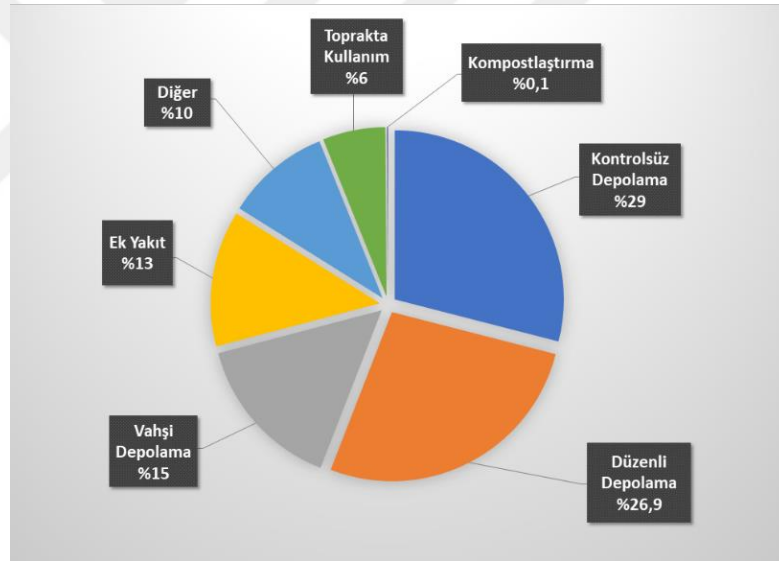
1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Rüzgâr, jeotermal, güneş, biyokütle ve hidrolik çokça tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji potansiyeli, Türkiye’de 19 GW olarak hesaplanmıştır [6].

- **Hidrolik enerji:** Çoğunlukla barajlardaki suyun potansiyel-kinetik enerji dönüşümüyle elektrik enerjisi elde edilir. Türkiye hidroelektrik potansiyeli 36.603 MW/yıl olarak hesaplanmıştır. 2011 yılı elektrik üretiminin %22,8'i hidroelektrikten karşılanarak 53 TWh elektrik enerjisi üretilmiştir. Doğalgaz elektrik üretim santrallerinin yaygınlaşmasıyla hidroelektriğin payı yıllar içinde düşmüş göstermiştir. 2004 yılında %30,6 olan hidroelektrik kullanımı, 2011'de %22,8'e gerilemiştir.
- **Jeotermal enerji:** Jeotermal enerji kapasitesinde, Türkiye dünyada 7. sıradadır. 5 milyon konut ısıtabilecek, 31.500 MWt jeotermal gücü bulunmaktadır. 4 milyar kWh/yıl jeotermal elektrik kapasitesi olduğu hesaplanmıştır. 2011 yılında toplam yedi bölgede, toplam 114 MW kapasiteli jeotermal elektrik tesisi bulunmaktadır. 400 MW'lık kapasiteli 13 bölgede çalışmalar devam etmektedir.
- **Biyoenjerji:** Biyodizel üretimi yapan firma sayısı Türkiye'de azınlıktadır. Tüketilen benzinin %7'sine yetecek kapasitede firmalar bulunmasına rağmen, biyodizel üretimi benzin tüketiminin %2'sinde anca değerlendirilmektedir. Türkiye'deki biyogaz potansiyeli ise yaklaşık 2.608 milyon m³ 'dür.
- **Güneş enerjisi:** Güneş santralleri, güneş pilleri ve güneş kolektörleri vasıtası ile güneşin enerjisinden faydalanılır. Güneş kolektörleri, su ısıtmada yaygın olarak kullanılır. Ülkeler bazında; 118 GWt Çin, 9,3G Wt Türkiye, 9,2 GWt Almanya, 4 GWt Japonya. Fotovoltaik solar piller ise şebekenin olmadığı; trafik lamba ve işaretleri, deniz feneri, park ve otoyol aydınlatmaları gibi bölgelerde kullanılmaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu kapasitesi 5 MW olarak hesaplanmıştır.
- **Rüzgâr enerjisi:** Türkiye’de rüzgâr enerji kapasitesi 1.729 MW’dır. Dünyada 17. sıradadır. 2011 yılında toplam enerji üretimin %2,07'si rüzgâr santrallerinden karşılanarak, 4.726 milyar kWh elektrik üretimi yapılmıştır [6].

Dünyadaki nüfus yoğunluğu ve sanayi artışı, enerji ihtiyacı ve çevresel sorunlarda artış meydana getirmektedir. Birçok ülke doğal kaynak ve çevreye zarar veren atıkları bertaraf etmek için alternatif çözümler üretmektedir. Arıtma çamurlarının değerlendirilmesi atık bertarafı ve enerji üretimi için bir örnektir. Ülkeler, enerjide dışa bağımlılığı azaltabilmek ve ekonomilerine katkıda bulunabilmek için çalışmalar yapmaktadır. Türkiye, atıkların çevre zararlarını önlemek için arıtma tesisleri devreye almaktadır. Atık su arıtma tesislerinin sayısı arttığından dolayı arıtma çamuru miktarları da günden güne artış göstermektedir [7].

2014 yılı arıtma çamuru bertaraf yöntemlerinin çamur miktarlarına göre dağılımı Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Buna göre üretilen çamurun %29’u kontrolsüz, %26,9’u düzenli ve %15’i vahşi depolanmakta olup, %13’ü ek yakıt olarak ve %6’sı ise toprakta kullanılmaktadır. Diğer uzaklaştırma yöntemleri ise %10 civarındadır [8].



Şekil 1.1.Türkiye’deki mevcut atık su arıtma tesislerinden (AAT) çıkan arıtma çamurlarının bertaraf yöntemlerinin çamur miktarlarına göre dağılımı [8]

Bu çalışmada Türkiye ve İzmir ili için arıtma çamuru potansiyelinin ortaya çıkarılarak değerlendirme olanaklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Arıtma çamurunun yakılarak enerji elde edilmesinde verimliliğin ve emisyon miktarının belirlenmesi ortaya çıkarılması amaçlandığı için analizler için gerçek bir arıtma çamuru sisteminin verileri kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Son zamanlarda külleştirme işlemi Avrupa Birliği'ne üye devletlerde atık su çamurunun ortadan kaldırılmasındaki en önemli yöntem olarak görülmeye başlanmıştır. Bunun en önemli sebebi atık sahalarının kısıtlı olması ve tarım uygulamalarını ilgilendiren kriterlerin gitgide zorlaşmasıdır. Bu yolla elde edilen enerji elektrik enerjisi üretilmesi için buhar üretmekte kullanıldığı gibi direkt olarak sistemin kendisinde de kullanılabilir. Külleştirme, atık su çamurunun kütle ve hacmini büyük oranda azaltan bir imha yöntemidir. Hollanda, Almanya ve Fransa gibi pek çok ülke atık su çamuru ve içindeki kirletici maddelerin hacmini azaltmak için yanma alternatiflerini tercih etmektedir [9]. Gitgide artan arıtma çamuru üretimi ve imhası günümüzde çevreyi etkileyen en önemli sorunlardan biridir. Yayımlanmış literatürde piroliz, gazlaştırma, yanma ve çift yanma gibi atık su çamurunu enerji üretimi için kullanmaya yönelik çeşitli termal teknolojiler vardır [10,11]. Sirkülasyonlu akışkan yataklı (CFB) sistemde yakma, atık su çamuru için kendine has organik bileşimlerinden ötürü en çok tercih edilen teknolojilerden biridir.

Son yıllarda farklı ikincil yakıtlara odaklanan bazı önemli kentsel atık su çamuru çift yanma araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Yayımlanan literatür, kentsel atık su çamurunun çift yanması için tercih edilen ikincil yakıtların kömür ve biyokütle olduğunu göstermektedir. Stelmach ve Wasielewski (2008); Polonya'da kurumuş atık su çamuru ve kömürün tozlaşmış kömür kazanı içindeki çift yanmasını incelemiştir. Enerji santrallerinde atık su çamuru ve kömürün çift yanmasının Polonya'da atık su çamurunu kullanmanın kısa vadede en iyi çözümü olduğunu öne sürmüşlerdir [12]. Rajeyzk vd. (2014); bir akışkan yataklı kazanda kömür ve atık su çamurunun çift yanmasını incelemiştir. SEFAKO tarafından yapılan ve Morag, Polonya'da bulunan Kentsel Isıtma Şirketi (Municipal Heating Company)'de köpüren akışkan yataklı kazanda kömür ve kentsel atık su çamurunun çift yanmasını analiz etmişlerdir. Kazanın performansını, emisyonlarını ve kül kalitesini incelemiştir [13]. Vamvuka vd. (2019); bir akışkan yataklı atık su arıtma tesisinde atık su çamurunu modellemiş ve emisyonları optimize etmişlerdir. Bir atık su arıtma tesisinden alınan bir biyo-katı atığın yanma performansını verim ve gaz emisyonunu göz önüne alarak bir köpüren sıvı yatak biriminde deneyler yaparak ve tarımsal atıkla karşılaştırma yaparak incelemiştir [14]. Nordin vd. (2020); kentsel atık su çamuru ve biyokütlenin çift

yanmasını ızgaralı kazanda incelemiştir. Deneysel çalışma için 8 MWth ızgaralı kazanın yanı sıra laboratuvar ölçekli, sabit yataklı bir reaktör kullanmışlardır [15]. Ren ve Li (2015); tarımsal samanın kentsel atık su çamuru ile çift yanmasını köpüren akışkan yatak reaktörü içinde gözlemlemiştir (5 KWth) [16].

Atık su çamurunun birincil yakıt, doğal gazın da ikincil yakıt olarak kullanıldığı enerji üretimi senaryoları Ashwekar vd. (2017) tarafından yüksek lisans tezlerinde araştırılmıştır. Susuzlaştırılmış atık su çamurunun doğrudan yanmasıyla alakalı senaryolar incelenmiştir. Atık su çamurunun imhası bakış açısı üzerinden teorik santral performansını hesaplamışlardır. Mevcut atık su çamuru imha çözümü üzerinden atık su çamuru yakılmasının çevreye etkisini karşılaştırmışlardır [17].

Literatürde bir enerji santralinde kentsel atık su çamuru ve doğal gazın birlikte yanmasının gerçek performansı konusunda bir boşluk bulunmaktadır. Bu araştırmanın ana amacı kentsel atık su çamuru ve doğal gazın çift yanmasını ilk defa gerçek bir enerji santrali performansını kullanarak belirlemek ve literatüre kazandırmaktır.

3. GENEL BİLGİLER

3.1 Arıtma Çamuru

Arıtma çamuru, atık sulara uygulanan fiziksel, kimyasal veya biyolojik işlemler sonucunda sıvı veya yarı katı halde ve kokulu olarak ortaya çıkan bir yan üründür.

3.1.1 Arıtma Çamuru Kaynakları

Arıtma çamuru kaynakları üç madde olarak aşağıda incelenmiştir.

- Belediyelerce işletilen atık su arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurları; evsel atık su, endüstriyel atık su ve yağmur suyunun arıtıldığı atık su arıtma tesisleri
- İçme suyu arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurları; içme suyunun kullanımdan önce arıtılması zorunludur. İçme suyu arıtma tesislerinde oluşan çamur miktarları diğer atık su arıtma tesislerinde oluşan çamur miktarına oranla çok düşüktür.
- Endüstriyel atık su arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurları; Bu çamurlar, çökebilen katı maddelerden kaynaklanan ön çökeltme çamurları, koagülasyon ve arıtma etkisiyle çıkan kimyasal çamurlar, biyolojik arıtma tesislerinden çıkan biyolojik çamurlar ve içme suyu arıtma tesislerinden çıkan çamurlar gibi arıtma tipi ve nedeniyle ilişkili olarak sınıflandırılabilir [18].

3.1.2 Arıtma Çamuru İçerikleri

Arıtma çamurunda; asit, baz, sülfat, yağ, Pb, Co, Fe, Hg, Cr, As, Cu, Al, Cl vb. elementler, organik azot ve fosfor gibi maddeler bulunabilir [19]. Arıtma çamurları genellikle zengin içerikli olduğundan dolayı geri kazanımı önemlidir. Arıtma çamurlarında geri kazanımında üç kriter önemlidir: (i) Sağlığa zarar verebilecek nitelikte olmamalı. (ii) İçeriğindeki element ve organik maddelerin yan etki oluşturma ihtimalinin olmaması. (iii) Çamurun, depolama gibi yöntemlere uygun olması [20].

3.1.3 Arıtma Çamuru 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 çamuru, yüksek oranlarda gres ve yağ içeriyorsa, ısı değeri 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 içeriği arttırıldığı için ısı değeri ham çamurdan daha düşüktür.

Fiziksel-kimyasal arıtma çamurları inert madde içeriğinden dolayı düşük ısı değere sahiptirler. Genellikle ham çamurun ısı değeri yaklaşık 4.180 kcal/kg kuru madde (KM) iken çürütülmüş çamurda bu değer 2.500 kcal/kg KM olabilmektedir [21].

Çeşitli arıtma çamuruna ait tipik ısı değerler Tablo 3.1’de özetlenmektedir. Çamurun tipik ısı değerleri ise 3.040-6.080 kcal/kg KM arasındadır [22]. Çamurun ısı değeri düşük kalitedeki bazı kömürlerin ısı değerine eşdeğerdir. Arıtma çamuru belli oranlarda su içerdiğinden 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 gerekmektedir.

Tablo 3.1. Arıtma çamurunun tipik ısı değeri [23]

Çamur Çeşiti	Ortalama Isıl Değeri (kcal/kg KM)
Ham Çökeltim Çamuru	6.080
Aktif Çamur	4.970
Biyolojik Filtre Çamuru	4.700
Ön Çökeltim Çamuru (Kimyasal Madde İlaveli)	3.880
Anaerobik Çürütülmüş Çamur	3.040

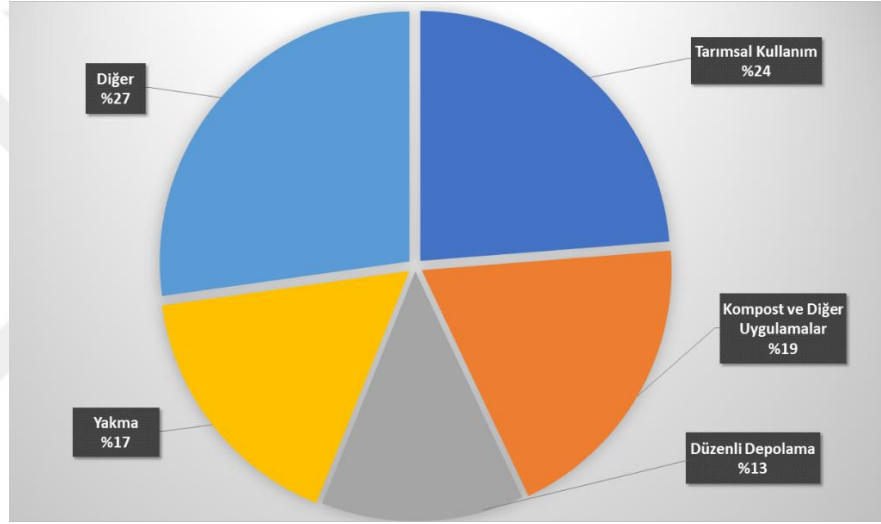
3.2 Arıtma Çamuru Potansiyeli

3.2.1 Dünyada Arıtma Çamuru Potansiyeli

Arıtma çamurlarının bertarafında eskiden yaygın uygulanan yöntemler arasında, düzenli veya büyük çamur havuzlarında depolama, kurak iklim bölgelerinde güneşte kurutma, okyanusa dökme gibi bertaraf metotları uygulanmaktaydı. Günümüzde çoğu ülkeler daha faydalı kullanım ihtiva eden yöntemler tercih etmektedir. Örneğin; susuzlaştırılmış çamur kompostlaştırılarak veya çürütülerek tarımda gübre olarak veya bozulmuş yerleri iyileştirmede kullanılabilir. Çamurun enerjisinden faydalanmak için ise tek başına veya birlikte yakılması prosesleri tercih edilmektedir. Çamur bertarafında her ülkenin belirlediği farklı yönetmelikler ve politik hedefler olabilmektedir. Örneğin; Avrupa ve Baltık denizi kıyısındaki ülkeler farklı çamur bertaraf yöntemleri kullanılmaktadır. Çamur bertaraf stratejileri her bölgede değişim gösterebilmekte olup, özellikle Baltık Denizi kıyısında yer alan ülkeler çamuru tarımsal kullanımda veya yakılması sonucu enerji olarak geri kazanımda değerlendirdiğinden çamuru faydalı olarak kullanmaktadırlar. Aynı bölgede kompostlaştırmaya tabi tutulmuş veya yakın yöntemle hijyeni elde edilmiş çamur, park ve bahçe gibi yeşil alanlar için kullanılabilir [24].

Avrupa İstatistik Ofisinin (Eurostat) 2017 yılı verilerine göre; Avrupa Birliği ülkelerinin tamamına yakınında yaklaşık olarak 4 milyon ton KM/yıl çamur üretimi gerçekleşmektedir. Bu çamurların bertarafı ve geri dönüşümü için kullanılan yöntemlerin yüzdesel dağılımı Şekil 3.1’de verilmiştir.

- Tarımsal Kullanım: %24,
- Kompost ve Diğer Uygulamalar: %19,
- Düzenli Depolama: %13,
- Yakma: %17,
- Diğer: %27



Şekil 3.1.Avrupa ülkelerinde mevcut AAT’lerden (2017 yılı) oluşan arıtma çamurlarının nihai bertaraf yöntemlerinin çamur miktarlarına göre dağılımı [25]

Tablo 3.2.Seçilen ülkeler bazında 2017 yılına ait arıtma çamuru bertarafı [25]

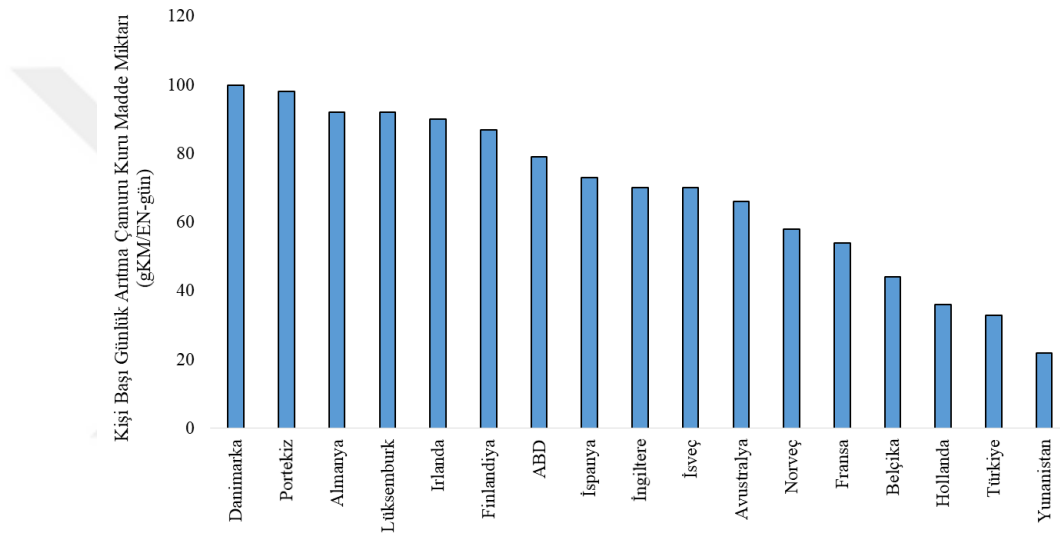
Ülke	Toplam Bertaraf	Toplam Bertarafın yüzdelik dağılımı (%)				
	Bin Ton / Yıl	Tarımsal Kullanım	Kompost ve Diğer Uygulamalar	Düzenli Depolama	Yakma	Diğer
Arnavutluk	98,12	10,5	-	0	0	89,5
Belçika	153,27	20	-	0	79	1
Bulgaristan	45,3	49,5	8,5	15	0	30
Bosna Hersek	1,3	-	-	100	0	0
Çek Cum.	223,27	46	33	10	11	0
Fransa	809	37	39	1,5	18,5	4
Hırvatistan	3,37	32,2	0,1	57,2	0	10,5
Hollanda	232,1	12	59,5	0,5	28	0
İrlanda	58,77	79	17	0,15	0	3,85
Letonya	24,47	13,5	23,4	0,1	0,4	62,6
Litvanya	40,87	50,95	40,85	7,85	0,35	0
Lüksemburg	8,62	13	53	0	15	19
Malta	10,3	0	0	100	0	0
Norveç	121,4	54	28	14	0	4
Polonya	584,46	18,6	4,4	2,6	18,2	56,2
Romanya	283,32	12,38	0,6	59,45	0,01	27,6
Sırbistan	13	0	0	100	0	0
Slovenya	36,6	0	1	0,8	34	64,2
Slovakya	54,52	0	45	14,5	22,5	18
Türkiye*	620,90	6	0,1	27	13	54

(*Eurostat – Avrupa İstatistik Ofisinin Sitesinde 2017 Türkiye verileri olmadığından dolayı, 2014 yılı verileri verilmiştir.)

Tablo 3.2’de Avrupa ülkelerinin çamur potansiyeli ve nihai bertaraf yöntemleri incelenmiştir. Fransa 809 bin ton/yıl arıtma çamuru potansiyeline sahip iken Türkiye 620,9 bin ton/yıl ile en fazla potansiyeline sahip 2. ülke olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ülkeler ekseninde arıtma çamuru bertarafı ve yeniden değerlendirilme metotları incelendiğinde, çamurun tarımsal faaliyetlerde kullanımı, düzenli depolama bölgelerinde değerlendirilmesi ve yakarak uzaklaştırma çoğu ülke tarafından en fazla tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır [26].

Avrupa Birliği ülkelerindeki kentsel AAT'lerden oluşan ve susuzlaştırma işleminden sonra çamur keki halinde bertaraf edilen ortalama biyokatı miktarı (Eşdeğer nüfus (EN): Kentsel AAT sisteminde arıtılan atık suyun 120 gr KOİ/kişi.gün kabulüyle hesaplanan eşdeğer nüfusu göstermektedir) ~ 60 g KM/EN.gün'dür. İSKİ'nin büyük kapasiteli AAT'lerindeki ortalama çamur oluşumu 50-60 g KM/EN.gün civarındadır. Türkiye'de bu değer, bölgesel bazda seçilen tesisler özelinden değerlendirilirse kuru madde esas alınarak, 35 ± 12 gr KM/EN.gün ortalama çamur miktarı olduğu hesaplanmaktadır. Şekil 3.2 'de ülkeler bazında kişi başına düşen günlük arıtma çamurunun kuru madde miktarları görülmektedir [27].



Şekil 3.2. Kişi başına düşen günlük arıtma çamuru kuru madde miktarı [27]

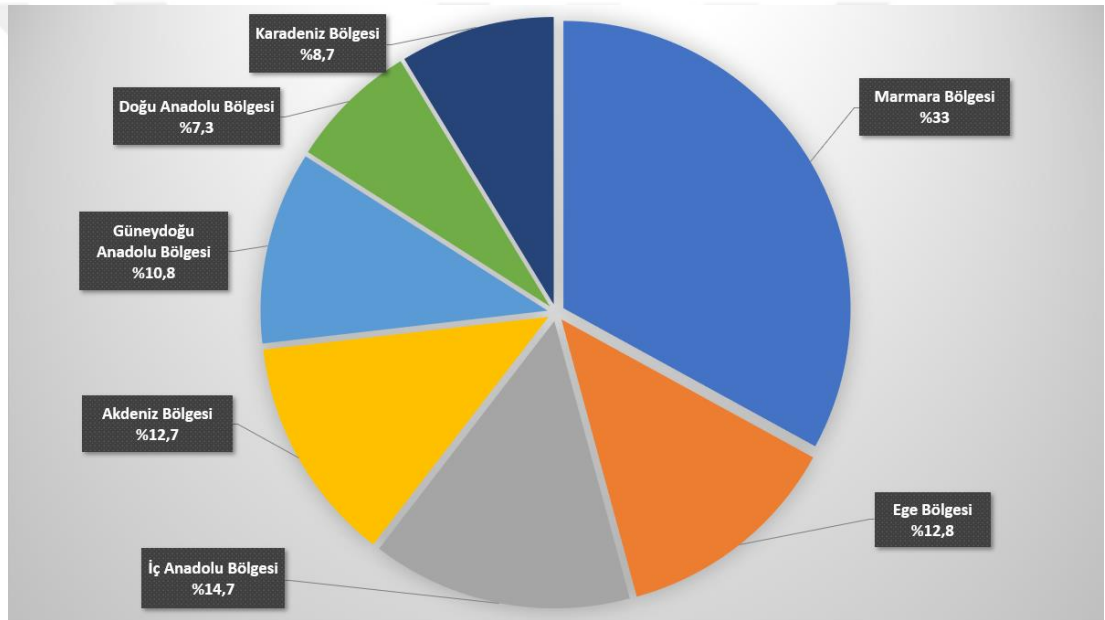
3.2.2 Türkiye’de Arıtma Çamuru Potansiyeli

Türkiye’de nüfusunun $\sim 70\%$ i 30 büyükşehir nüfusunun toplamına karşılık gelmektedir. Başta İstanbul olmak üzere bütün büyükşehirlerde kentsel Atık Su Arıtma Tesisi (AAT) çamurlarının yönetiminde önemli sorunlar meydana gelmektedir.

Türkiye’de, arıtma çamurunun kuru madde potansiyeli kişi başı 35 gr referans alınarak 7 bölge bazında analiz edilmiş ve Tablo 3.3’te değerleri Şekil 3.3’te ise yüzdelik olarak dağılımı verilmiştir.

Tablo 3.3.Türkiye'nin arıtma çamuru kuru madde potansiyeli- bölgesel bazlı

Bölge Adı	Nüfus	Günlük Ortalama Kuru Madde Potansiyeli (ton KM/EN.gün)	Yıllık Ortalama Kuru Madde Potansiyeli (ton KM/EN.yıl)
Marmara	27.667.114	968,35	353.447,4
Ege	10.733.118	375,66	137.115,9
Akdeniz	10.674.967	373,62	136.371,3
Karadeniz	7.309.045	255,82	93.374,3
İç Anadolu	12.319.306	431,18	157.380,7
Doğu Anadolu	6.090.923	213,18	77.810,7
Güneydoğu Anadolu	9.105.900	318,71	116.329,15
Toplam:	83.900.373	2936,51	1.071.829,45



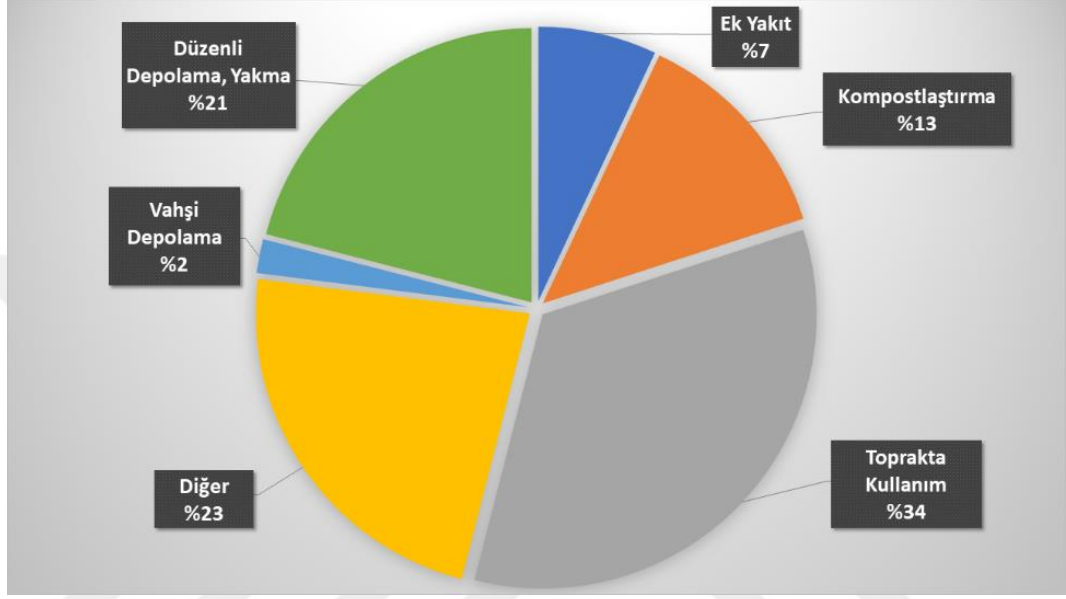
Şekil 3.3.Türkiye'nin arıtma çamuru kuru madde potansiyelinin bölgesel dağılımı

Türkiye'nin arıtma çamuru kuru madde potansiyeli Tablo 3.3'de görüleceği üzere, 2.936,51 ton KM/EN. gündür. Yıllık olarak yaklaşık 1.071.829,45 ton KM/EN.yıldır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 2016 yılında yayınladığı Türkiye Çevre Durum Raporunda; Türkiye de 2014 yılında mevcut evsel/kentsel nitelikte AAT'lerinden oluşan arıtma çamuru miktarı yıllık 620.907,09 ton/yıl kuru madde olarak verilmiştir. 2023 yılında ise bu miktarın 895.581,92 ton/yıl kuru maddeye ulaşacağı bilgisi tahmini olarak verilmiştir [28].

3.2.3 İzmir İli Arıtma Çamuru Potansiyeli

İzmir ili 2018 yılı Çevre Durum Raporuna göre; kentsel atık su arıtma tesislerinde 286.833.533 m³/yıl atık su arıtılmıştır. Oluşan atık su arıtma tesisi sulu çamuru miktarı yaklaşık olarak 205.914 ton/yıldır [29]. Bu çamurların bertarafı ve geri dönüşümünde tercih edilen yöntemlerin yüzdesel dağılımı Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4.İzmir ili 2018 yılında sanayi kaynaklı arıtma çamurunun yönetimi [29]

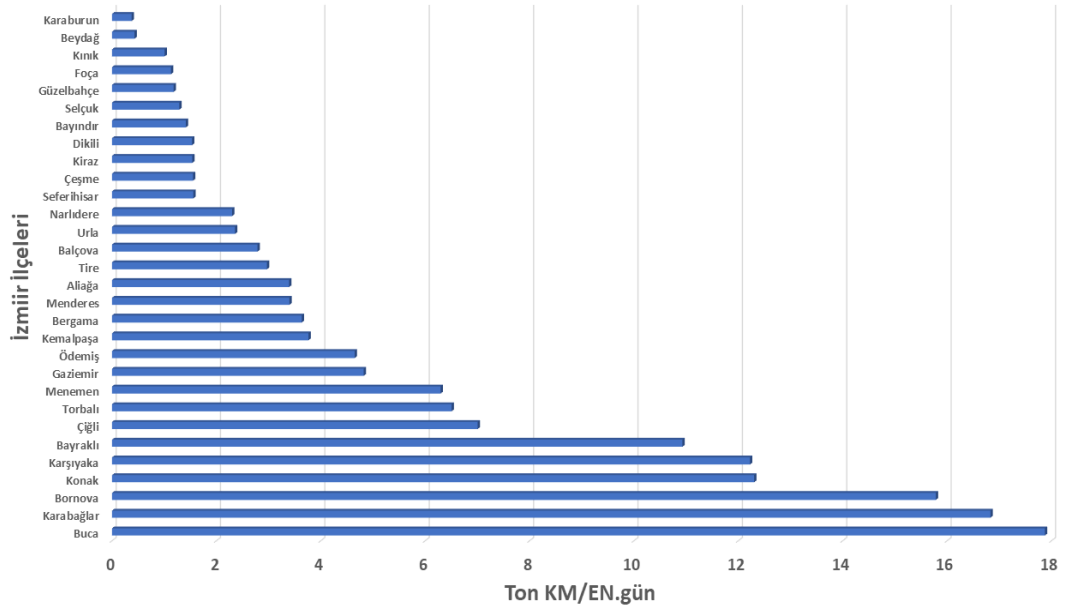
2020 Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) araştırma sonuçlarına göre Türkiye nüfusu 83.000.000’u aşmıştır. İzmir ili nüfusu 4.367.251’dir. Enerji ve çevresel sorunlar özellikle gelişmiş şehirlerde ciddi problemler oluşturmaktadır. Ege bölgesi, bu sorunlarla en fazla karşı karşıya gelen bölgelerden biridir.

Türkiye’de bölge bazında seçilmiş atık su arıtma tesislerinin değerlendirilmesi neticesinde kuru madde temel alındığında ortalama çamur miktarı 35±12 gr KM/EN. gün olduğu hesaplanmıştır [27].

İzmir nüfusu için (4.367.251 kişi); arıtma çamurunun kuru madde potansiyeli alındığında minimum 100 ton KM/EN. Gün, maximum 205 ton KM/EN. gün çamur potansiyeli olduğu hesaplanmıştır.

İzmir ilinde yıllık ortalama, 55.845 ton KM/EN. gün. yıl arıtma çamuru kuru madde potansiyeli bulunmaktadır. 2018 İzmir İli Çevre Durum Raporunda, atık su arıtma tesislerinden oluşan sulu çamur miktarı yaklaşık olarak 205.914 ton/yıl olarak verilmiştir. Bu çamur içerisindeki kuru madde potansiyel miktarda düşünülecek olursa, karışımın %27'si kuru madde, %73'ü su olarak düşünülebilir.

İzmir ilçelerinin nüfusa göre günlük arıtma çamuru kuru madde potansiyelleri Şekil 3.5 ve Tablo 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.5.İzmir ilçeleri günlük arıtma çamuru kuru madde miktarı

Tablo 3.4.İzmir için ilçe bazlı nüfus dağılımı [30]

İlçe	Nüfus 2019	(%)
Buca	510.695	11,7
Karabağlar	480.925	11
Bornova	450.992	10,3
Konak	351.572	8,1
Karşıyaka	349.290	8
Bayraklı	312.264	7,2
Çiğli	200.211	4,6
Torbalı	185.908	4,3
Menemen	179.881	4,1
Gaziemir	137.808	3,2
Ödemiş	132.876	3
Kemalpaşa	107.556	2,5
Bergama	103.867	2,4
Menderes	97.123	2,2
Aliağa	96.974	2,2
Tire	84.804	1,9
Balçova	79.681	1,8
Urla	67.339	1,5
Narlıdere	65.737	1,6
Seferihisar	44.526	1
Çeşme	44.363	1
Kiraz	43.925	1
Dikili	43.806	1
Bayındır	40.414	0,9
Selçuk	36.824	0,8
Güzelbahçe	33.725	0,8
Foça	32.264	0,7
Kınık	28.802	0,7
Beydağ	12.340	0,3
Karaburun	10.759	0,2
TOPLAM	4.367.251	100

3.2.4 İzmir’de İşletilmekte Olan Atık Su Arıtma Tesisleri

2018 yılı içinde Atık Su Arıtma Dairesi Başkanlığı tarafından yürütülen atık su arıtma hizmetleri kapsamında, İzmir ilinde 22 tanesi Avrupa Birliği standartlarında arıtım yapan ileri biyolojik, 39 tanesi biyolojik, 6 tanesi doğal atık su arıtma tesisi olmak üzere, günlük toplam atık su arıtma kapasitesi 948.531 m³/gün olan 67 adet atık su arıtma tesisi mevcuttur.

2018 yılında faaliyet gösteren 67 atık su arıtma tesisinde toplam 272.991.594 m³/yıl atık su arıtılmıştır [31]. Atık su arıtma tesisleri, kapasiteleri, işletmeye alınma yılları, arıtma yöntemleri ve arıtma miktarları Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5.2018 yılı için İzmir ili atık su arıtma tesisleri ve arıtma miktarları [31]

No	Tesis Adı	İlçe	Kapasite (m ³ /gün)	İşletmeye Alınma Yılı	Arıtma Yöntemi	Arıtılan Atık Su Miktarı (m ³ /yıl)
1	Çiğli	Çiğli	604.800	2000	İleri Biyolojik	192.353.361
2	Teleferik	Balçova	120	2015	Aktif Çamur Paket (SBR)	20.040
3	Menemen	Menemen	21.600	2010	İleri Biyolojik	5.672.972
4	Türkelli	Menemen	3.000	2017	İleri Biyolojik	716.581
5	Villakent Doğu	Menemen	250	2015	Aktif Çamur Paket	-
6	Villakent Batı	Menemen	250	2015	Aktif Çamur Paket	-
7	Çukurköy	Menemen	200	2014	Doğal Arıtma	30.200
8	Kemalpaşa	Kemalpaşa	12.960	2010	İleri Biyolojik	3.087.270
9	Halilbeyli Köyü	Kemalpaşa	1.000	2007	Aktif Çamur	106.826
10	Aliğa	Aliğa	21.600	2010	İleri Biyolojik	3.999.591
11	Hacıömerli Köyü	Aliğa	250	2008	Biyodisk	91.250
12	Foça	Foça	9.763	2008	İleri Biyolojik	1.693.739
13	Yeni Foça	Foça	10.000	2017	İleri Biyolojik	1.971.535
14	Ilıpınar	Foça	130	2018	Aktif Çamur Paket(SBR)	56.350
15	Kozbeyli Köyü	Foça	500	2007	Aktif Çamur	182.500
16	Bağarası	Foça	2.100	2008	Aktif Çamur	166.301
17	Bergama	Bergama	14.304	2014	İleri Biyolojik	1.433.812

Tablo 3.5.(Devam)

No	Tesis Adı	İlçe	Kapasite (m ³ /gün)	İşletmeye Alınma Yılı	Arıtma Yöntemi	Arıtılan Atık Su Miktarı (m ³ /yıl)
18	Dağıstan Köyü	Bergama	100	2015	Aktif Çamur Paket	36.500
19	Aşağıkırıklar Köyü	Bergama	200	2014	Aktif Çamur Paket	73.000
20	Terzihaliller Köyü	Bergama	100	2015	Aktif Çamur Paket	13.700
21	Karaveliler Köyü	Bergama	300	2015	Aktif Çamur Paket	109.500
22	Süleymanlı Köyü	Bergama	100	2015	Aktif Çamur Paket	36.500
23	Çandarlı	Dikili	15.204	2014	İleri Biyolojik	1.251.420
24	Bademli	Dikili	450	2014	Aktif Çamur	164.250
25	Salihler Köyü	Dikili	1.000	2015	Aktif Çamur	365.000
26	Güneybatı	Narlıdere	21.600	2001	İleri Biyolojik	7.963.699
27	Gödençe Köyü	Seferihisar	250	2010	Aktif Çamur paket	41.650
28	Urla	Urla	21.600	2009	İleri Biyolojik	5.872.958
29	İyte	Urla	2.250	2008	Aktif Çamur	314.605
30	Seferihisar	Seferihisar	10.800	2010	İleri Biyolojik	4.430.619
31	Doğanbey	Seferihisar	25.000	2013	İleri Biyolojik	3.840.522
32	Gümüldür	Menderes	960	2008	Aktif Çamur	2.829.456
33	Özdere	Menderes	25.000	2013	İleri Biyolojik	305.791
34	Havza	Menderes	21.600	2004	İleri Biyolojik	5.890.592
35	Ayrancılar	Torbalı	6.912	2010	İleri Biyolojik	2.862.155
36	Torbalı	Torbalı	21.600	2010	İleri Biyolojik	7.116.441
37	Helvacı Köyü	Torbalı	100	2002	Aktif Çamur paket	26.960
38	Çakırbeyli Köyü	Torbalı	200	2007	Doğal Arıtma	52.100
39	Korucuk Köyü	Torbalı	200	2007	Doğal Arıtma	65.300
40	Selçuk	Selçuk	10.200	2008	Doğal Arıtma	3.181.933
41	Çamlık Köyü	Selçuk	225	2014	Aktif Çamur	123.127
42	Gökçealan Köyü	Selçuk	300	2014	Aktif Çamur	153.571
43	Şirince Köyü	Selçuk	200	2014	Aktif Çamur	151.915
44	Bayındır	Bayındır	6.912	2009	İleri Biyolojik	1.167.950
45	Hasköy	Bayındır	2.000	2017	İleri Biyolojik	417.588
46	Zeytinova Köyü	Bayındır	500	2014	Aktif Çamur	98.949

Tablo 3.5.(Devam)

No	Tesis Adı	İlçe	Kapasite (m ³ /gün)	İşletmeye Alınma Yılı	Arıtma Yöntemi	Arıtılan Atık Su Miktarı (m ³ /yıl)
47	Yusuflu Köyü	Bayındır	100	2015	Aktif Çamur	-
48	Çeşme	Çeşme	21.900	2014	İleri Biyolojik	6.445.056
49	Reisdere Köyü	Çeşme	150	2014	Aktif Çamur Paket(SBR)	111.600
50	Bodrum	Karaburun	300	2014	Aktif Çamur paket	109.500
51	Kuyucak	Karaburun	300	2014	Aktif Çamur paket	109.500
52	Eğlenhoca Köyü	Karaburun	300	2014	Aktif Çamur	108.000
53	Kösedere Köyü	Karaburun	300	2014	Aktif Çamur	108.000
54	İnecik Köyü	Karaburun	100	2014	Aktif Çamur	36.000
55	Sarpıncık Köyü	Karaburun	100	2014	Aktif Çamur	36.000
56	Saip Köyü	Karaburun	300	2014	Aktif Çamur	108.000
57	Ambarseki Köyü	Karaburun	100	2014	Aktif Çamur	36.000
58	Hasseki Köyü	Karaburun	100	2014	Aktif Çamur	36.000
59	Yaylaköy Köyü	Karaburun	100	2014	Aktif Çamur	36.000
60	Ödemiş	Ödemiş	15.765	2014	İleri Biyolojik	3.922.188
61	Hamamköy	Ödemiş	150	2014	Aktif Çamur paket	54.750
62	İlkkurşun Köyü	Ödemiş	100	2014	Aktif Çamur paket	36.600
63	Kızılcaavlu Köyü	Ödemiş	100	2014	Aktif Çamur paket	24.500
64	Kiraz	Kiraz	2.000	2014	Aktif Çamur	730.000
65	Tire	Tire	6.976	2018	İleri Biyolojik	192.321
66	Yenişehir Köyü	Kiraz	350	2014	Doğal Arıtma	127.750
67	Kırtepe Köyü	Tire	250	2014	Doğal Arıtma	83.750
TOPLAM			Toplam Kapasite: 948.531 m ³ /gün		Arıtılan Atık Su Miktarı: 272.991.594 m ³ /yıl	

4. YÖNTEM

Arıtma Çamurlarının bertaraf edilmesinde tarımsal kullanım, kompost düzenli depolama, yakma gibi yöntemler kullanılmaktadır. Çalışmada arıtma çamurunun yakılarak bertaraf edilmesi konu olması dolayısı ile yakma yöntemleri açıklanacaktır. Yakma proseslerinde arıtma çamuru kurutulmuş veya direk olarak yakma işlemi yapılmaktadır. Bu nedenle kurutma işlemi ve yakma yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır.

4.1. Arıtma Çamurlarının Kurutulması

Kurutma, atık su arıtma tesislerinden çıkan çamurun öncelikli olarak hacminin azaltılması amacıyla kullanılan termal bir prosestir. Termal kurutmanın en önemli avantajları, düşük taşıma masrafları, patojenlerin düşürülmesi ve kurutulmuş çamurun daha verimli pazarlama ve depolanma alternatifleri vermesidir. Termal olarak kurutulmuş çamur toprak veya gübre faydalı olarak hızlıca pazarlanabilmekte ve depolama ile yakmada değerlendirilebilmektedir.

Kurutma genellikle piroliz ve yakmadan önce ön işleme olarak hizmet verir. Bunun yanı sıra kurutulmuş ürün birlikte yakma tesislerinde ikincil yakıt olarak kullanılabilir. Kurutulmuş çamur aynı zamanda arazide kullanılabilir ya da depolanabilir. Kurutulmuş çamur genellikle 1-4 mm granül boyutuna, %5-10 nem muhtevasına ve %'1'den daha fazla olmayan toza sahiptir. Susuzlaştırılmış çamur içerisindeki katı madde miktarı %18-35 mertebelerindedir.

Arıtma çamurundan elde edilen yakıt ve gübrenin kalitesinde etkili olan özellikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 1) Mikro organizmaların yeniden oluşma zamanı
- 2) Çamurun su tutma niteliği
- 3) Çamurdaki bakteri, mantar, toksin ve virüs içerikleri
- 4) Arıtma çamurundaki organik maddeler
- 5) Gübre olarak kullanılacaksa çamur içerisindeki besin içeriği, (potasyum, fosfor ve azot miktarları)
- 6) Ağır metallerin çamurdaki oranı

5 ve 6 atık su içeriğiyle ve arıtma metoduyla ilişkiliyken, 4 ve 2 organik madde sindirim sistemi ile alakalıdır.

Artıma çamurunun patojen içerme ihtimali ciddi bir sorundur ve dikkatle önemsenmelidir. Bu doğrultuda patojen içerme ihtimalini düşürmek için doğru seçilmiş kurutma sisteminin uygulanması istenilmektedir. Bu proste kalma zamanı/kalma zamanı dağılımı, sıcaklığı, tanecik ebatı ve ısıl geçirgenliği en güvenli işlemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bazı kurutma faaliyetleri esnasında $N-NH_3$ 'ün bir bölümü yok olabilir. Bu sebeple bu durum ciddi ve zararlı ise, yok olan katkı maddeleri ilave edilebilir.

Reel akış durumu, kurutucu alternatifleri (direk/dolaylı) ve her bir mamuldeki kuru katı miktarı (ortalama: %90-70) gibi durumlarla ilişkilidir. Kurutucular arasında farklılıklar vardır. Dolaylı kurutucular ile ısı geri kazanımı daha verimli olabilirken, direk kurutucular ayrı patikülizasyon gerektirmeyebilir [32].

4.1.1 Kurutma Yöntemleri

Kurutma makinesi sektöründe şu an ortalama 20 makine imalatçısı vardır. Farklı kurutma işlemleri ve yapılarına bakıldığında en öne çıkan yöntemler dolaylı (indirect) ve direk (direct) kurutma yöntemleridir. Isı transferi yöntemiyle kurutulan çamur, dolaylı veya direkt kurutma yöntemlerden birisi seçilerek kurutulmaktadır [32].

4.1.1.1 Dolaylı Kurutucular

Bu tip kurutucularda, bir ısı transfer düzlemi vasıtasıyla, dolaylı olarak ısı iletilir. Bu sistemde ısı ekipmanı (örneğin: buhar, termal yağ) arıtma çamuru ile doğrudan temas halinde değildir. Meydana gelen su buharının iletilmesi için düşük ölçekte bir cebri hava kullanılabilir. Genellikle dolaylı kurutucularda hava kullanımı yoktur, koku önleme maliyetini minimuma çekmek için ise ısı izolasyonu en verimli tipte seçilmektedir. Dolaylı kurutucular;

- Pedallı Kurutucular
- Çukur Kurutucular
- Disk Kurutucular
- Çok Rafı Kurutucular

Disk kurutucular, dolaylı kurutucular içerisinde en sık kullanılan prosestir. Disk kurutucular hızlı, dönmeyen (rotating) sistemlerdir. Bu sistemlerin öne çıkan özellikleri, basit olması ve işletilme kolaylığıdır.

Sistemin hareketli olmayan tarafı (stator) kuruma ihtiyacı olan ürünü içerisine alan silindirik formata yakın, yatay bir davuldan (drum) imal edilmiştir. Davulun içerisinde, davula bağlı olan ve karıştırıcı işlemini yapan sıyırıcı çubuklar bulunmaktadır. Hareketli olmayan kısmın (stator) üst tarafında, toz ayırıcı ve kaçak buhar toplayıcı bir aralık bulunur. Kurutucu, genellikle düşük alçak basınçta çalıştırılır.

Sistemin hareketli kısmı (rotor) paralel şekilde dizilmiş, yatay bir mile kaynatılmış içi boş disklerden yapılmıştır. Buhar veya diğer ısıtıcı ürünler bu içi boş disklerin içerisinde hareket etmektedir. Karıştırıcılar (agitator) bu disklerin üzerine kaynaklanmıştır. Sistemin çalışması yönünden az miktarda hava akımının bulunması olumlu durum oluştursa da kurutma aşaması tamamen hava olmadan da kolaylıkla devam ettirilebilir. Toz ayrıştırma ve koku azaltma maliyetlerini düşürmek için havanın kullanılmaması veya düşük miktarda kullanılması gerekmektedir.

Isı transferinde verimlilik ve süreklilik sağlamak için ısı transfer düzleminin (diskleri) temizliğini korumak şarttır. Arıtma çamurunun yapışkan özelliği disklerin temizliğini koruması için olumlu olmayan bir durumdur.

Disk kurutucular yapışkan nitelikteki ürünleri işleyebilmek için çoğunlukla aşağıdaki özelliklerde üretilir:

- Isı transfer alanının kendi içinde temizlik özelliği: disklerin kurutulacak ürün içinde yavaş sürtünmeyle dönmesi

- Karıştırıcı ve sıyırıcıların eş zamanlı devreye girmeleri ve yüksek ısı transferi; kurutucu içerisinde hareket eden ürünün yapışmadan ve tıkanıklık oluşmadan geçişine imkân tanımaktadır [32].

4.1.1.2 Direkt Kurutucular

Direkt kurutucularda, kurutmada kullanılan gaz ısısı, arıtma çamuruna doğrudan iletilmektedir. Bu yöntem gaz ve arıtma çamurunun arasında yüksek birliktelik olmasını sağlamaktadır. Direkt kurutucular ısı verme özelliklerine göre farklı şekillerde imal edilebilmektedirler.

- Pnömatik Kurutucular
- Döner Davul Kurutucular
- Akışkan Yataklı Kurutucular

Direk kurutucular içerisinde yoğunlukla tercih edilen sistemler döner davul ve akışkan yataklı kurutucu tipleridir.

Döner davul kurutucusunda arıtma çamuru davulun bir ucundan beslenmektedir. Dönme işlemi ve davul iç yapısı kaynaklı çamur davulun diğer ucuna yer değiştirmekte ve eş zamanlı olarak sıcak gazlarla yakın temas kurmaktadır. Son madde %90 kuru katı değere sahip tanecikli arıtma çamurudur. Davul içinde tıkanıklığa sebebiyet vermemek için döner davul aşamasına gelen arıtma çamurunun kuru katı yüzdesi %65'ten yüksek olması gerekmektedir. Bu aşamaya gelmek için ıslak arıtma çamurunun önceden kurutulmuş arıtma çamuru ile karıştırılması gerekmektedir.

Akışkan yataklı kurutucularda sıcak gazların yükselmesi ile yoğun temas sağlanmaktadır. Yükselen gazlar arıtma çamurunu kurutuncaya kadar çalkalaya çalkalaya taşır. Arıtma çamuru çeşidine göre kuru arıtma çamuru %90'dan fazla kuru katı yüzdesine sahip, tozdan ayrılmış, partiküllere dönüşür. Emisyon gazı içinde yer alan toz, gaz akımı içinde taşınır, siklonlar ile bölündükten sonra kurutulmuş atık çamuru ile beraber karıştırılır ve yeniden kurutucuya verilir. Akışkan yatak sistemine

ısı alışveriş imkânı yaratan ekipmanların eklenmesi dolaylı ve direkt kurutma yöntemlerinden meydana gelen akuple bir kurutma sistemi sağlamaktadır.

Arıtma çamuru ve gaz ve arasında meydana gelen yoğun temas ve verimli ısı transferi neticesinde direk kurutucuların özel performanslarının dolaylı kurutuculardan iyi olduğu gözlemlenebilmektedir. Olumlu yönlerine ilave olarak direk kurutucular mekanik dizayn yönünden basit yapılardır. Diğer taraftan direk kurutucuların bazı dezavantajları da bulunmaktadır:

- Kullanılan gazlar kokuya sebep olan bileşenler gibi yoğun oranda kirletici içermektedir. Bu sebeple yüksek oranda gaz arıtımı yapılmaktadır.
- Bu tip kurutucular düşük ısı ortamında çalışmak için çok uygun değildir. Bu şartlar döner davul kurutucusu için özellikle geçerlidir.
- Patlama riski bulunmaktadır.

Gazların sisteme yeniden sirküle edilmesi imkânı uygulanabilse de bu metot karmaşık kurutma ekipman dizayn ihtiyacı doğurmakta ve böylece direkt kurutucuların olumlu yanlarını büyük ölçekte azaltmaktadır. İki sistem de genel olarak kullanılsa da dolaylı ve direkt kurutma teknolojileri arasındaki seçim arıtma çamuru özelliklerine ve farklı yerel değerlerle yakın ilişkilidir [32].

4.1.2 Kurutmanın Avantajları ve Dezavantajları

Harcanan enerji tarafından bakıldığında bir hacimden suyun, kurutma veya buharlaştırma metoduyla uzaklaştırılması diğer mekanik yöntemlerle uzaklaştırmaktan maliyet olarak daha yüksektir. Bu yüzden su çıkarma işlemi mekanik olarak, kurutma öncesinde tamamlanmalıdır.

Patikül üretme adımlarını içeren kurutma işletmeleri diğer yöntemlerin birçoğuna nazaran daha çok mali yatırım ihtiyacı olsa da diğer yandan kurutma işlemi, arıtma çamurunun hacminde büyük oranlarda azalmaya sebep olabilmekte ve depolanan, hijyenik bir madde üretmektedir. Hacimdeki ciddi azalma dolayısıyla kuru arıtma çamuru; işleme, nakliye ve depolama maliyetlerini büyük ölçekte azaltmaktadır [33].

Diğer yöntemlerle kıyaslandığında arıtma çamurunun kuru fazda olmasının en önemli olumlu tarafı ise son ürünü en doğru zamanda belirli alanlara pazarlama ihtimalidir:

- Ormancılık ve tarımda gübre halinde değerlendirilmesi.
- Enerji işletmelerinde, çimento tesislerinde ve yakma ünitelerinde enerji olarak tüketilmesi.
- Üst toprak peyzajı, düzenli depolama ve dolgu için değerlendirilmesi. Isı yardımıyla kurutulmuş arıtma çamurunun hijyenizasyon ve önemli oranda hacim azaltma işlem adımlarından geçmiş olması birçok uygulama için ciddi değer yaratmaktadır [32].

4.2 Çamur Yakma Sistemleri

Arıtma çamurlarını depolamak için uygun depolama alanı bulma ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Depolama alanlarının azalması ve depolamanın yasal uygulamalarla kısıtlanması, çamurun çeşitli alanlarda değerlendirilme imkanını gündeme getirmiştir. Çamurun toprakta gübre olarak değerlendirilmesi veya yakıt olarak değerlendirilmesi verimli kullanım alanlarına örnektir. Fakat arıtma çamurlarında ağır metaller, çeşitli patojenler gibi kirleticilerin yer alması toprakta değerlendirme ihtimalini kısıtlamaktadır. Bu sebeple arıtma çamurunun yakılması tercih edilen bir metottur. Depolama bölgesi yeterli değilse ya da böyle bir alan yoksa, toprakta kullanım imkanı çamur içeriği sebebiyle mümkün değilse ya da ekonomik değilse yakma metodu tercih edilir.

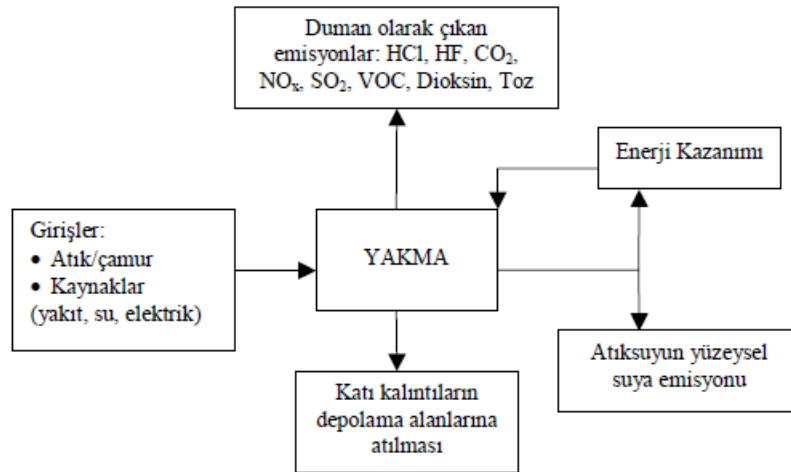
Arıtma çamurları organik madde yönünden zengin donanım içermektedir. Çamurdaki organik madde yakılarak ısı da elde edilir. Bu ısı direkt proseste değerlendirilebilir veya ikincil enerji olarak elektrik enerjisi üretilebilir. Yakma, çamur hacmini ve kütlesini ciddi oranda azaltan bir bertaraf metodudur. Yanma sonunda çamurun hacmi, susuzlaştırılmış çamur hacminin %10'una tekabül eder. Yakma işlemi adımlarındaki en önemli zorluk, arıtma çamurunun nem oranının yüksek olmasıdır. Bu sebeple yakma öncesinde kurutma prosesi uygulamaya alınır. Yanma için ihtiyaç olan kuruluk oranı yüksektir, bu sebeple çamur kurutulmalıdır. Bununla beraber kurutma prosesi, enerji talebi yüksek ve pahalı bir metottur.

Susuzlaştırılmış çamur, gerekli oksijen içeren bir alanda 420°C ila 500°C arasındaki sıcaklıklarda tutuşabilir. Organik katıların tamamının yakılması için 760-820°C sıcaklık aralığına çıkılmalıdır. Çamur yakıldığında, organik katkı maddesi CO₂, su buharı ve kül gibi oksitlenmiş son ürünlere dönüşür [34].

Arıtma çamurlarının ısı değeri 2.500-3.500 kcal/kg civarındadır. Arıtma çamurlarının ısı değeri, arıtma işlem aşamaları ile direkt alakalıdır [35].

Yakma vasıtasıyla arıtma çamurlarının kütlesi ve hacmi ciddi ölçekte azalmaktadır. Bu durumun yanında yakma prosesinin farklı olumsuz yanları da vardır. Örneğin, çamurun yakılması için yeterli ısının karşılanmasında kullanılan yüksek yakıt sarfıyatı ve mali bedel olumsuz yanlarından bazılarıdır. Ek olarak hava kirliliği oluşma ihtimalinin de dengede tutulması gerekir ve hava kirliliğini engelleyen metotlar devreye alınabilmektedir. Bu da yatırım bedelinin artışına sebep olmaktadır.

Başka bir olumsuz yanı ise yakılan çamurun tamamının bertaraf edilememesidir. Yakılan çamur sonrası kalan kül toplam katı miktarının %30'u mertebesinde kalabilmektedir [36]. Şekil 4.1'de yakma sisteminin şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.1. Yakma sistemi [37]

4.3 Atık Su Arıtma Çamurlarının Yakılması

Günümüzde, arıtma çamurlarının en son değerlendirilme metodu olarak kullanılan yakma prosesi Avrupa'da arıtma çamurlarının toplam kütlesinin ortalama %15'i civarına uygulanmaktadır. Arıtma çamurları;

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

Arıtma çamurlarının ilk olarak zirai maksatlı değerlendirilmesi veya düzenli stoklama bölgelerine transfer edilerek uzaklaştırılması, zamanla artan yasal takiplere sebep olmaktadır. Bu yüzden, yakma prosesindeki yatırım bedellerinin yüksek olmasına, yakma şartlarının sıkılığına, emisyon gazlarının işlenmesi ile alakalı mali bedellerin yükselmesine ve uçucu küllerle yanma çıktısı olarak meydana gelen küllerin uzaklaştırılması adımlarının zorluğuna rağmen, arıtma çamurlarının yakılarak uzaklaştırılması metodunun zamanla daha fazla tercih edileceği beklenmektedir.

Ön kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, arıtma çamurları, yüksek kalorifik değer içerdiğinden dolayı, çimento fırınları içerisinde de yakılabilir. Bu durumda çamur içerisindeki kirleticiler de klinker içerisinde stabilize yapılmış olur. Ekonomik açıdan durum incelenerek bakıldığında, bu çalışmaların zirai amaçla kullanılamayan veya diğer evsel atıklarla birlikte yakılamayan çamurlar için değerlendirilmesi gerektiği anlaşılr. Stabilizasyon için tahmin edilen sistemlerden birisi de "vitrifikasyon"dur. Japonya bu konuda birçok tecrübeye sahiptir. Fakat yöntem oldukça maliyetlidir [38].

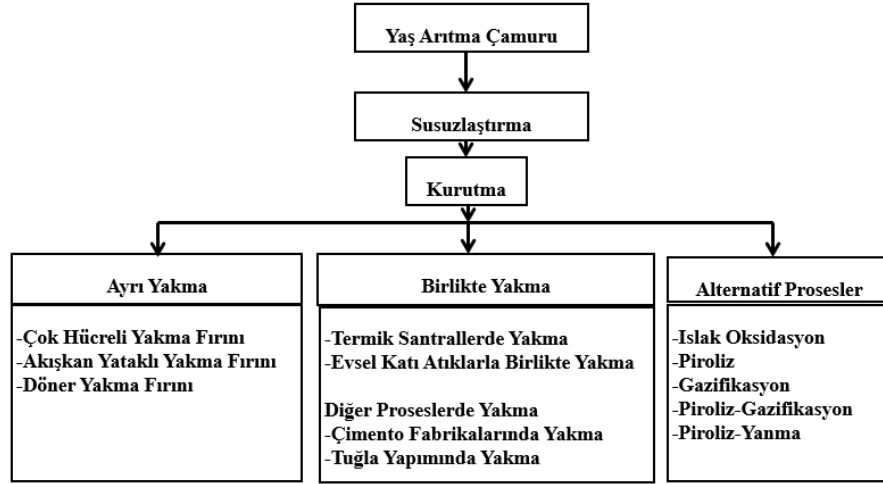
Yakma sistemleri ilk yatırım bedelleri yüksek olmasına rağmen, aşağıdaki gibi avantajlı olduğu tarafları da vardır [39].

- Yakma sistemleri çamur yoğunluğunu, hacmini ve zehirlilik niteliğini yüksek ölçekte azaltır,
- Hali hazırda bertaraf edilecek madde azalır,
- Atık küller tuğla, çimento, beton ve yol kaplaması gibi alanlarda değerlendirilebilir,
- Farklı sistemlerle kıyaslandığında çamur yakma sistemlerinin daha az yer işgal etmesi,
- Farklı sistemlerle kıyaslandığında yakma sistemi daha az zamanda faaliyete girmekte olup birleştirme ve toprağa karıştırma metotlarında olduğu üzere aylar ve yıllara ihtiyaç duymamaktadır,
- Çamur yakma ünitesi çamur kaynaklarının hemen yanı başına kurulabileceğinden transfer engeli oluşturmamaktadır,
- Isı geri kazanım imkanının mevcut olması,
- Çamur yakma ünitesinde çıkış bir konumda olduğundan dolayı basitçe analiz yapılabilmekte ve gerekli kontroller yapılabilir.

Susuzlaştırma işleminden sonra atık çamurun aşağıdaki fırınlarda yakılabilir:

- Çok Hücreli Yakma Fırınları
- Akışkan Yataklı Yakma Fırını
- Döner Yakma Fırını

Yanma bir oksidasyon tepkimesidir. Çamurların yanması, direkt veya dolaylı olabilmektedir. Direkt yakma da çamurlar genellikle evsel atıklarla beraber yakılırken, dolaylı yakmada ise enerji üretimi için yakıt olarak değerlendirilir veya çimento üretimi gibi sanayide başka yakıtlarla beraber hammadde ve enerji girdisi olarak kullanılır. Şekil 4.2’de çamur ısıtma işlem metotları verilmiştir.



Şekil 4.2.Çamurlara uygulanan ısı işlemler

4.3.1 Ayrı Yakma Sistemleri

Arıtma çamurunu yakabilecek özel yakma tesisleri uzun süredir işletilmektedir. Döner fırınlar ve klasik veya pirolitik özellikteki fırınlar zamanla yerlerini akışkan yataklı sistemlere bırakmaktadır. Akışkan yataklı sistemlerin işletilme kolaylığı en önemli tercih sebebidir. Bu sistemler;

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

Akışkan yataklı sistemler, iç kısmı ısı tuğlası ile sarılmış dikey bir yakma odasından oluşur. Yatağın alt kısmında yüksek sıcaklığa ulaştırılan bir kum tabakası bulunmaktadır. Bu kum içerisinden hava yüksek sıcaklıkta geçirilerek akışkan formatta tutulur. Bertaraf edilmek istenen arıtma çamurları bu kum yatağının içerisine veya üzerine bırakılır [32].

Akışkan yatak içindeki gaz, meydana gelen yanma çıktılarının tamamen parçalanması için 850 °C dereceye kadar ısıtılmalıdır. Mekanik metotla kurutulan arıtma çamurlarının yakma enerjisi olmadan tamamen yakılmaları mümkün gözükmemektedir. Yanma odasından çıkış yapan sıcak gazlardan ısı enerjisini geri kazanan bir ısı geri kazanım sistemi kullanılır. Bu ısıyı yeniden kullanmak ve geri kazanmak amacıyla üç metot kullanılabilir: ilk metotta, yakma gazı duman veya hava ısı eşanjöründen geçirerek ısıtılır. İkinci metotta, geri kazanım kazanında meydana gelen buhar vasıtasıyla arıtma çamurunun kuruması sağlanır. Üçüncü teknikte ise, fırının arkasında yer alan buhar kazanındaki ısı vasıtasıyla döner diskli bir kurutucuda arıtma çamuru ön kurutma işlemi yapılır .

İkinci metot, birinci metotta göre ısıl açıdan daha verimlidir, çünkü bu teknikte, ön kurutmaya girmeden önce %20-25 kuru madde miktarı ve %60-70 arasında uçucu madde/kuru madde yüzdesi ihtiva eden arıtma çamurlarının kendiliğinden yanması sağlanabilmektedir. Kurutucudan çıkan su buharının geri kazanılması ve yeniden kazan tankına geri ulaştırılması ısı kazanma verimliliği yönünden olumludur. Bunun gibi ağır malzeme ihtiyacı olan ve yatırım bedeli gerektiren yatırımların büyük yatırımlar (kapasitesi saatte 2,5 ton su buharlaştırma işleminden fazla) olmaları gerekmektedir. İkinci metot, Hollanda, Almanya ve İngiltere'de görülmektedir. Bu metotta içerisinde ortalama %23 kuru madde içeriğine sahip arıtma çamurları kendi kendine yakılabilmektedir [32].

4.3.1.1 Çok Hücreli Yakma Fırını

Çok hücreli yakma fırını madencilik endüstrisinde cevher işleme için tasarlanmış bir sistemdir. Bununla beraber uzun zamandır çamur yakma işleminde kullanılan en yaygın ekipmanlardandır. Çok hücreli fırınlarda diğer metotlardan farklı olarak, katı atıklar da çamurla beraber yakılabilmektedir [40].

Yakma fırını dikey silindir şekle sahip olup iç kısmı refrakter malzemelerle (tuğla veya ısıya dayanıklı beton) kaplı, dış kısmı ise çeliktendir. Fırının merkezinde dökme demirden üretilmiş olan içi boş bir şaft yer alır. Bu şaft döndürülerek şaft üzerindeki taraklı kollar ile çamur karıştırılır. Eş zamanlı olarak, karıştırma kollarındaki tarakların yapısından yararlanılarak spiral şeklinde bir hareket sağlanır ve üst kısımdan fırına alınan çamur fırın alt kısmına doğru yönlendirilir. Karıştırma işlemi sayesinde çamur küçük partiküllere ayrılır ve böylelikle yanma verimi artırılır. Şaftın soğutulması için şaft içerisindeki boşluğa alt kısımdan hava verilir ve hava şaft boyunca ilerleme sağlayarak şaftın üst tarafından tahliye edilir [40].

Genel itibariyle, çok hücreli fırın içerisinde kısmi olarak kurutulmuş çamur beslemesi yapılır. Fırının üst kısmı çamur içindeki nemin alındığı kurutma bölümü işlevi görür. Orta kısımda fırın çeperlerindeki brülörler kullanılarak yakma işlemi gerçekleştirilir. Alt kısımda yer alan hücreler ise külün soğutulması için kullanılır. Bu işlemlerin yapılabilmesi için fırının alt kısmından hava enjekte edilir. Dışarıdan alınan hava fırına girerken külden ısı alıp üst kısımda yer alan yanma hücresine geçer. Yanma hücresinde oksijen oranı azalan yüksek sıcaklıktaki hava fırının üst bölümünde çamurun kurutulmasında kullanılır ve ardından çamurdaki su buharı ile birlikte fırının dışına alınır. Bu havanın bir kısmı sisteme geri döndürülürken, diğer bir kısmı ise gaz yakıycılardan geçirilerek içerisinde bulunan tozun alındıktan sonra atmosfere salınımı gerçekleştirilir. Sistem içerisine %50-100 aralığında fazla hava verilir. Tam yanmanın sağlanabilmesi, içeriye verilen havadaki oksijen miktarının yeterliliğine bağlıdır. Aksi halde, CO emisyonu oluşumu söz konusu olur. Çamur içerisindeki uçucu gazların çıkışı ve koku oluşumu gözlenmesi durumunda ise ilave olarak son bir yakıcının kullanımına başvurulabilir. Ancak, fırının yanma bölümünün 900 °C seviyesindeki yüksek sıcaklığı sayesinde çoğunlukla bu tür problemler ile karşılaşılmamaktadır [40].

Kolay işletilebilen, çeşitli çamur ve atıkların yakılabildiği onaylanmış bir sistem olmasına rağmen, yatırım maliyetinin yüksek olması ve taraklı şaftın arıza yapması gibi dezavantajları mevcuttur. Şekil 4.3'te çok hücreli yakma fırına örnek verilmiştir [40].

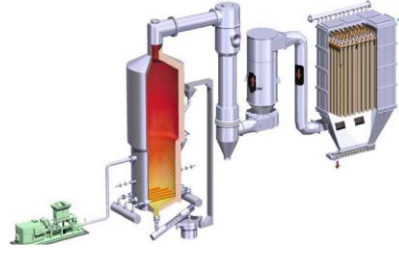


Şekil 4.3.Çok hücreli yakma fırını [41]

4.3.1.2 Akışkan Yataklı Yakma Fırını

Kurutma amacıyla da kullanabilen akışkan yataklı fırınlar iç kısmı refrakter malzemelerle kaplı bir ekipman olup, oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fırının alt bölümünde 0,8-1 m derinliğinde kum (kuvars) yer almaktadır. Kum tanecikleri 0,6-2,5 mm aralığında boyuta sahiptir. Yatak malzemesi olarak kullanılan kumun altında yatağa hava verilmesi maksadıyla konumlandırılmış bir ızgara mevcuttur. Bu noktadan verilen basınçlı hava vasıtasıyla kumun akışkan şekilde davranmasına olanak verilmektedir. Egzoz gazlarından ısı geri dönüşümü sağlanabilir. Bunun yardımıyla, giren havaya ön ısıtma yapılır. Çamur üst kısımdan fırına verilir ve sıcaklığı 900°C seviyelerinde tutulan kor formundaki kuvars ile karıştırılır. Böylelikle parçalanarak verimli bir yanma için uygun şekle gelir. Gaz brülörleriyle tutuşturulan çamur oldukça hızlı bir şekilde yanar. Eş zamanlı olarak, akışkan yatağın üzerinde yer alan bölümde gaz hale geçen uçucu organik maddeler de yanar. Tüm bu prosesler 1-2 dakikalık bir zaman diliminde gerçekleşmektedir [42].

Egzoz havasında mevcut olan toz alınması için siklondan geçer. Akışkan yatakta iyi bir çamur hava karışımının elde edilmesi hava ihtiyacındaki fazlalığı düşürür. Sistemde %20-50 arasında fazla havadan istifa edilir. Fırın boyutları belirlenirken yakılan çamurun hacmi ve dağıtım ızgarasından geçen havanın hızı dikkate alınır. Bu hız fırın işletiminin rejimine, kum yatağının büyüklüğü ve çamurun özelliklerine (nem, yanıcı olmayan katılar ve kül boyut dağılımı) doğrultusunda değişkenlik gösterir. Belirli çalışma süreleri sonucunda sisteme kum ilave edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.4'te akışkan yataklı yakma sistemine örnek verilmiştir [42].



Şekil 4.4.Akışkan yataklı yakma sistemi [41]

4.3.1.3 Döner Yakma Fırını

Yatayda konumlandırılan ve rulmanlar üzerinde dönen tambur içerisinde gaz veya sıvı formundaki yakıt brülörleriyle beraber yakma işlemi gerçekleşir. Tamburun çalıştırılmasında külün alındığı dış fırına doğru ufak bir eğim açısı verilir. Böylelikle üst kısımdan verilen çamur ilerleyerek sırasıyla kurur ve yanar, bunun sonucu olarak ısı ortaya çıkarır ve kül olarak dış fırına alınır. Kül, soğutma ünitesinde hava ile soğutulur ve pnömatik konveyörler vasıtasıyla sistem dışına çıkartılır. Uzunluğu 8-12 metre aralığında uzunluğa sahip olan yanma bölümünde sıcaklık 900-1.000°C mertebelerine kadar çıkmaktadır. Muhteviyatında yüksek kül ve nem bulunan çamurlar düşük baca gazı partikül emisyonlarıyla birlikte yakılabilmektedir. Bununla beraber büyük boyutları ve ağırlıkları ilk fazdaki yatırım maliyetlerini yükseltmektedir [42]. Şekil4.5'te döner yakma fırınına örnek verilmiştir.



Şekil 4.5.Döner yakma fırını [43]

4.3.2 Birlikte Yakma Sistemleri

Atık çamurlarının yakılmasında, evsel atık yakan yakma tesislerinden yararlanmak son derece cazip bir seçenektir. Bu durum yakma tesisinin arıtma çamurunun olduğu su arıtma tesisine konum olarak yakınlığı ve bilhassa evsel atık yakan tesisin kapasitesinin doyum noktasının altında olması daha da dikkat çekici bir alternatif yaratmaktadır.

Birlikte yakma ayrı yakma göre daha düşük maliyetli bir işlemdir. Bunun için yakma tesisinde çamur giriş sistemi gibi bazı noktaların modifikasyonuna gerek duyulabilir.

Evsel katı atıklarla arıtma çamurları karıştırılırken, karışımın enerji içeriğinin düşmesi sebebiyle işlem sırasında dikkatli olunmalıdır. Ayrıca ön-kurutmadan geçmiş veya hiçbir işlemde geçmemiş arıtma çamurlarının yakma tesislerine verilmiş durumu noktasında bir metot geliştirilmesi de gerekmektedir.

Bu yöntemlerden biri arıtma çamurlarının kuru madde içeriğini %65 seviyesine yükseltecek şekilde kurutulmasıdır. Bu durumda arıtma çamurunun kalorifik değeri evsel atığın kalorifik değerine yaklaşır (2000 kcal/kg) ve bu çamur doğrudan fırına verilebilir. Fırına verilecek evsel katı atık madde miktarının verilen arıtma çamuru ağırlığı ölçüsünde azaltılması gerekmektedir.

Arıtma çamurlarından yakılma işlemi sonrası çimento ve benzeri tesislerde ilave yakıt olarak istifa edilmesi ise diğer bir uygulamadır. Çamurun bu fırınlarda kullanılmasındaki temel etmen ise çamurun sahip olduğu kalorifik değerdir.

Arıtma çamurlarının çimento fabrikalarında yakılma işlemi için dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de çamur besleme oranının, cüruv üretim miktarının %5 inden daha fazla olmamasıdır. Bu doğrultuda, günde 2.000 ton işlemekte olan bir çimento fabrikasında günde maksimum 100 ton kuru çamur yakılabilmektedir. Bazı kaynaklarda çamurun yakılması işleminde dikkat edilmesi tavsiye edilen noktalardan biri ise çamurun çimento ürününün mekanik özelliklerini etkileyip etkilemediğinden emin olunması gerekliliğidir [32].

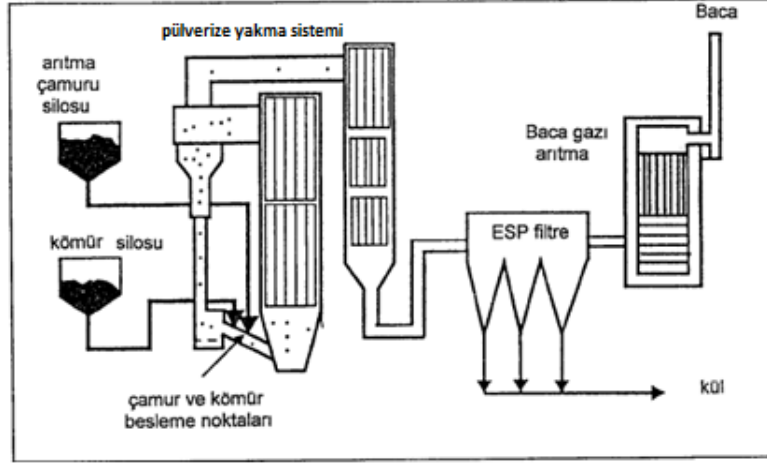
4.3.2.1 Termik Santrallerde Yakma

Arıtma 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 pülverize sistemlerde ayrıca öğütülür [44].

4.3.2.1.1 Pülverize Sistem

Pülverize kömürle çalışan termik santrallerde, kömür partiküllerinin %90'ı – 0,0075 mm'ye öğütülerek daha sonra havayla yakma ünitesine taşınmaktadırlar. Yüksek verimli yanma ve düşük emisyon değerleri elde etmek için bazı yakma metodları kullanılmaktadır. Burada; çamur önce kurutulmakta, öğütülmekte ve pnömatik olarak kazanlara beslenmektedir. Arıtma çamuru ya kömürle harmanlanarak birlikte, ya da çoklu-yakıt kullanımına elverişli yakıcı kullanılıyorsa ayrı ayrı beslenebilmektedir. Çamur yakma işlemi yüksek sıcaklıklarda meydana gelmekte, çamur külü ve kömür ergimiş yapıda sistemden uzaklaşmaktadır. (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 kazanda %40-50'ye kadar kabul edilebilmektedir [45]. Şekil 4.6'da Pülverize kömürle çalışan termik santralde arıtma çamuru kurutma ve birlikte yakma prosesinin örnek diagramı verilmiştir.



Şekil 4.6.Kömürle çalışan pülverize yakma sistemli termik santrallerde arıtma çamuru kurutma ve birlikte yakma prosesi [46]

Arıtma çamuru, filtre preste susuzlaştırılmadan önce şartlandırma için flokülant madde ile karıştırılır. Filtre keki daha sonra pülverize kömür yakma ünitesine girmeden önce döner fırında kurutulur. 16 t/s %25 KM içerikli çamur kömürle birlikte sistemde yakılır. Almanya’da 300 MW elektrik üretim kapasiteli bir termik santralde 2.000 saatlik bir tesis çalışmasında 4.000 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 tespit edilmiştir [47].

Hollanda-Amsterdam’da pülverize kömürle çalışan 630 MW kapasiteli bir termik santralde 1.500 t (3 haftalık) ve 13.000 t (5 haftalık) kuru çamur (2.865 kcal/kg ısı değere sahip) birlikte yakma testleri sonucunda;

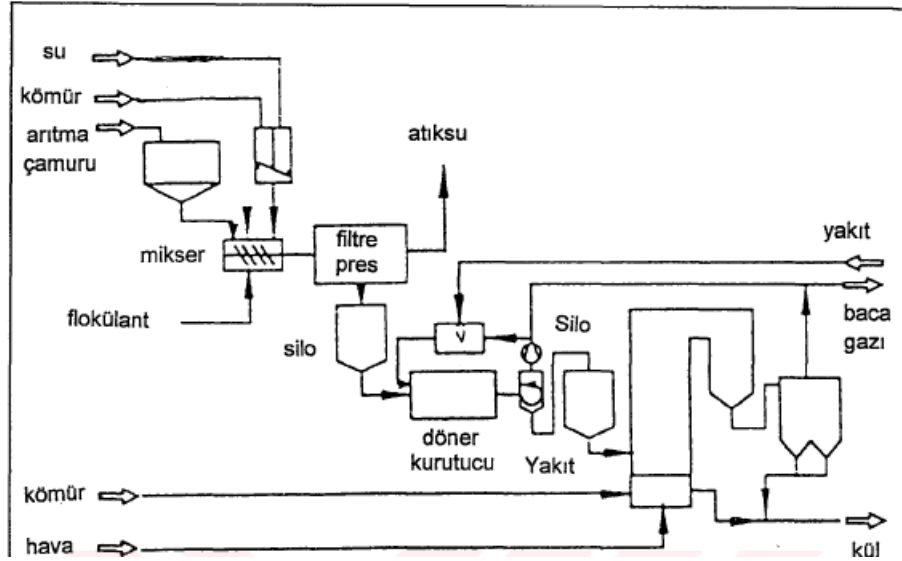
- NO_x emisyon seviyelerinde artış olmadığı,
- Hg hariç; Cl, F ve ağır metal emisyonlarında artış olmadığı,
- Kömüre nazaran çamurun yüksek kül içeriğinden dolayı katı artık ürünlerin özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı,
- Biriket formunda verilen (beslenen) kuru çamurun gevrek olduğu ve taşıma-depolama 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 başlamıştır [48]. Bir diğer uygulama da İngiltere'de %30 birlikte yakma oranında gerçekleştirilmiş ve yanmada herhangi olumsuz bir etki gözlemlenmiştir [49].

4.3.2.1.2 Akışkan Yataklı Sistem

Almanya'da 93 t/s kapasiteye sahip bir termik santrallerde %30 KM içerikli arıtma çamuru kömürle birlikte AİY'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 nispeten düşük olduğu ve külün inert olarak değerlendirilebileceği ancak Hg emisyonlarında artış beklendiği ve Hg'nin %95'inin ESP sonrası yerleştirilen ventüri adsorberi ile azaldığı ve bu olumlu sonuçlar sonrası, 1995 yılında 65.000 t/yıl kuru bazda çamurun kömürle birlikte yakılmasına izin verildiği belirtilmelidir [50]. Şekil 4.7'de kömürle çalışan pülverize yakma sistemli termik santralde kömür ve arıtma çamurunun birlikte yakılması prosesinin örnek diagramı verilmiştir.



Şekil 4.7. Termik santralde kömür ve arıtma çamurunun birlikte yakılması [50]

4.3.2.2 Evsel Katı Atıklarla (MSW) Birlikte Yakma

Katı atıklarla birlikte yakmada esas amaç, çamur ve katı atıkların yakma maliyetlerinin birleştirilmesidir. Proses, katı ve arıtma çamurunun yanması destekleyerek ve istendiğinde ilave yakıt kullanılmaksızın buhar üreterek çamurun kurutulması için gereken ısıyı üretebilmektedir [51]. Ayrıca modern baca gazı temizleme teknolojisine sahip bazı katı atık yakma fırınlarının kapasiteleri de bu şekilde kullanılabilir. Katı atık yakma tesislerinin birçoğu tam kapasiteyle çalışmasına ve çamurla birlikte yakma fırsatı sağlamıyor olmasına karşın, Almanya’da çamurla katı atığın birlikte yakıldığı 10 adet tesis mevcuttur (Tablo 4.1). Sadece Danimarka, Japonya, İsveç ve İsviçre’de üretilen atığın %50’den fazlası yakılmaktadır [52].

Tablo 4.1.Çeşitli ülkelerdeki yakılan katı atık miktarları [52]

Ülke	Yakılan Katı Atık Miktarı (X10 ⁶ T/Yıl)	Yakılan Atığın Toplam Katı Atığa Oranı (%)	Katı Atık Yakma Tesislerinin Sayısı
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

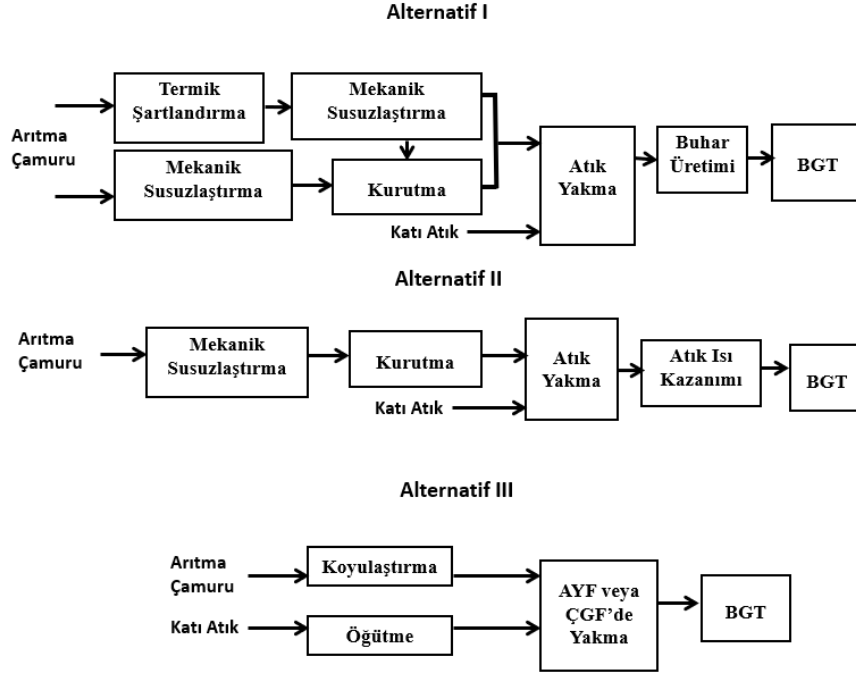
Çamurun evsel katı atıklarla birlikte yakıldığı tesislerde çamur/katı atık oranı genellikle 1/3 seviyesindedir ve neticede iyi bir yanma verimi elde edilmektedir.

Mevcut teknoloji düzeyinde atık çamurunun katı atıklarla birlikte yakılması için 3 alternatif proses önerilmektedir (Şekil 4.8).

İlk iki alternatifle atıktan elde edilen ısı termik şartlandırma ve/veya çamur kurutma için yararlanılabilen buhar üretiminde kullanılmaktadır. Ön-kurutma çamurunun ısı değerini arttırmak 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 çamur/katı atık birlikte yakma uygulamalarında çamurdaki nem seviyesi yanma prosesinin verimini etkilemekte, fırın sıcaklığını düşürmekte, tam yanmayı engellemekte ve besleme oranları düşmektedir. ABD’de Massachusees’te pilot tesiste yapılan çalışmada [53], yakma ünitesinde oksijen seviyesinin %21’den

%25'e arttırdığı ve böylece %10'lara kadar arıtma çamuru/katı atık oranlarında birlikte yakmanın başarıyla gerçekleştirildiği belirtildiği belirtilmelidir.



Şekil 4.8. Arıtma çamurunun katı atıklarla birlikte yakılması için başlıca alternatif prosesler [54]

Hollanda'da 230.000 t/yıl evsel katı atıkların (%28 nem içerikli), 130.000 t/yıl arıtma çamurunun (%20-30 KM) ve 550.000 t/yıl gübrenin (%10 KM) kombine arıtımın gerçekleştiği tesiste 11 MW enerji üretilmekte ve bunun 6 MW'ı tesis içinde (çamur ve sıvı gübrenin gübrenin kurutulması dahil) diğer 5 MW'ı yerel elektrik şebekesine elektrik olarak verilmektedir [55].

ABD-Minesota'da 400 t/gün MSW ve kuru bazda 2,72 t/s arıtma çamurunun (%78 nem, %53 uçucu ve 5.250 kcal/kg U.K. ısı değere sahip) akışkan yataklı bir sistemde bazı problemlere karşın birlikte yakıldığı belirtilmektedir [56].

4.3.2.3 Diğer Proseslerde Yakma

4.3.2.3.1 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 1.500 ton kuru evsel arıtma çamuru (3.630 kcal/kg KM) ve 1.500 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 işletme kapasitesi potansiyeli olduğu ve bunun da toplam bölgesel çamur üretiminin %150'sini oluşturduğu belirtilmektedir [48].

Belçika'da 2,5 milyon t/yıl çimento kapasiteli fabrikada yaklaşık 10 yıldır alternatif yakıt ve ham ürün olarak atığın (çamur dahil) kontrollü kullanımı söz konusudur. 1997 yılında 300.000 ton atık, yakıt ve hammadde olarak kullanılmıştır. Termik ikame yaklaşık %30-35'tir. Bir atık peletleme tesisinin yapımı devam etmektedir [48].

İsviçre'de Siggenthal çimento fabrikasında 25.000 ton kuru çamur kullanılarak 12.000-15.000 ton çimento hammaddesi yerine ikame edilmektedir. Bu sayede fosil yakıtlarda ve doğal ham maddelerle yer değiştirilerek ülkede büyük baskı oluşturan çamur bertarafı gerçekleştirilmektedir. Çamur kullanıldığında dahi NO_x, CO₂ gibi emisyonlar İsveç Temiz Hava Yönetmelik sınır değerlerinin daha düşük olmaktadır [57].

Avusturya'daki bir çimento fabrikasında ise 280 ton çamurun 2 haftalık bir birlikte yakma testleriyle başarıyla yakıldığı belirtilmektedir [58]. 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 kapasitesi bulunan bir çimento fırını için azami 100 t/gün kuru çamur istifade edilebilir. Klinkerin kapasitesi 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 elektro filtrede ayrıldıktan sonra fırına tekrar geri döner. Ancak, eğer çamur %0,2-0,5'ten daha fazla Cl içeriyorsa siklonun tıkanması söz konusu olabilir.
- Çamur çimento fırınında birlikte yakılacaksa kireçle stabilizasyon önerilmektedir. Kireçle stabilize edilmiş ve koşullandırılmış çamur (normalde 0,3-0,5 kg CaO/kg kuru çamur) külünün bileşimi çimentoya yakın özellikler göstermektedir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2.Çimento ve arıtma çamuru külünün bileşimleri [59]

Bileşim	Çimento (%KM)	Çamur Külü (%KM)	0,3 kg CaO/kg (%KM)	0,4 kg CaO /kg (%KM)	0,5 kg CaO/kg (%KM)
SiO ₂	21-24	30-49	19-30	15-25	10-16
Al ₂ O ₃	4-6	8-15	5-10	4-8	3-5
Fe ₂ O 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

4.3.2.3.2 Tuğla Yapımında

Güney Afrikada yapılan çalışmada, arıtma tesisinden alınan ve santrifüjle susuzlandırılmış ve termik olarak şartlandırılmış 45 t/gün çamur, 15 km mesafede yer alan bir tuğla tesisinde kullanılmıştır [60]. Çamur, yüzey tuğlasında %30 ve yığma tuğlada da %5-8 oranında kille karıştırılmış ve bu işlem neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıdaki şekildedir:

- 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) tespit edilmiş ancak bu değer herhangisi bir olumsuzluk yaratmayacağı aksine daha iyi bir harç yapışkanlığı sağladığı için avantaj olarak değerlendirileceği,
- 1.000 tuğla başına yakıtta 55 L'lik bir tasarruf elde edildiği gözlenmiştir. Komissarov ve arkadaşları (1994) tarafından yapılan laboratuvar çalışmalarında deri prosesinden çıkan ağırlıkça %40'a kadar endüstriyel arıtma çamuru kullanılarak nispeten iyi kalitede tuğlalar elde etmiş, tuğlanın basınç dayanımı çamurun kildeki oranıyla azalmış ancak fırın sıcaklığı ile artış göstermiştir.

4.3.3 Alternatif Prosesler

Tek başına/birlikte yakmaya alternatif olan teknolojilerin araştırılmasını gerektiren birtakım sebepler mevcuttur. Büyük oranlardaki baca gazı emisyonları, çamur yakma boyunca oluşan kül, karmaşık ve pahalı baca gazı arıtma zorunluluğu bu sebeplerin başlıcalarıdır. Baca gazı hacmini kritik bir parametre yapan temel etmen, baca gazı arıtma tesislerinin boyutu, sermaye ve işletme maliyetini belirlemesidir [61].

Yakılma işlemi neticesinde oluşan büyük miktardaki külün uzaklaştırılması çamur değerlendirme maliyetini de yukarı çekmektedir. Bu çerçevede, hem kül miktarını hem de baca gazı hacmini düşürecek alternatif proseslerin tanıtılması amaçlanmaktadır. Alternatif yöntemleri şu şekilde sıralamak mümkündür:

Islak Oksidasyon: Organik maddelerin sulu ortamda oksidasyonu işlemidir.

Piroliz: Organik maddelerin havasız ortamda termal bozunması işlemidir. Piroliz işlemi boyunca çamurun organik bileşeni faydalı yakıta (piroliz gazı) dönüşmekte ve aynı zamanda düşük işletme sıcaklığı da SO₂ ve NO_x oluşumlarını önlemektedir. Yarı kok (char) ise depolama alanında depolanabilmekte veya bazı durumlarda gaz temizleme için adsorban malzeme olarak da kullanılabilir [62,63].

Gazifikasyon: Çamurun tek başına ve birlikte yakılması işlemi süresince birim kg kuru çamur başına 24-30 m³ baca gazı ortaya çıkarken, açığa çıkan bu değer saf oksijenle yapılan gazlaştırma işleminde 1,7 m³ seviyelerine kadar gerilemektedir. Açığa çıkan sentetik gaz ürün, yakıt olarak kullanılabilen madde olmasının yanı sıra kimya sanayi için de faydalı bir hammaddedir [64].

4.4 Yakma Sisteminin Avantaj ve Dezavantajları

4.4.1 Avantajlar

- Yanma sonrası arıtma çamurunun hacmi önemli ölçüde azalır. Yakma işlemiyle elde edilen bu hacim düşüşü, arıtma çamurunun organik madde içeriği ile ilişkilidir. Yakma işlemi, arıtma çamurunun hacminde %25-50 arasında düşüşe sebep olur.
- Arıtma çamurlarının ortaya çıkardığı enerjiden istifa edilmiş olur.
- Yakılma işlemi sonrası arıtma çamurunun oluşturduğu yan ürünlerin geri dönüşümü sağlanarak çeşitli süreçlerde kullanım imkanı mevcuttur. (asfalt yollarda dolgu maddesi, beton üretimi ve tuğla yapımı).
- Bu proses çamur bileşenine fazla hassas değildir.
- Güvenilirliği olan (bilinen / uygulanan) sistemlerdir.
- Kokular, sistemin kapalılığı ve yüksek sıcaklık faktörüyle minimal seviyededir.

4.4.2 Dezavantajlar

Yatırım anlamında maliyeti yüksek olan yakma tesisleri, ancak büyük hacimlerin bertarafında maliyet verimliliği anlamında avantajlıdır. Arıtma çamurlarının yakma tesislerinde bertaraf edilmesine, aşağıdaki maliyetler göz önüne alınarak karar verilmelidir [65].

- Gerekli depolama sisteminin maliyeti,
- Fırın maliyeti,
- Emisyon gazları ve yakma sonrası oluşan diğer atıkların (uçucu kül, klinker, yakmadan oluşan kül) işlenmesi ile ilgili maliyetler.
- Diğer muhtelif ilave maliyetler- mevcut tesisler ve yeni tesisler için geçerlidir.
- Sabit ve oransal işletme giderleri: İşgücü maliyeti, tüketilen maddelerin oluşturduğu maliyet (elektrik ve emisyon gazının temizliğinde kullanılan kimyasallar), bakım, vergi, vb.
- Arıtma çamurunun işleme sahasına lojistiğinin maliyeti,
- Kalite kontrol süreciyle ilgili maliyetler (ham arıtma çamuru ve yan ürünler),
- Geri dönüşümü sağlanacak muhtelif ürünlerin pazarlanmasının getireceği maliyetler

5. ANALİZ

5.1 Sistem Açıklaması

Bu analizde enerji üretim firmasının kurumsal gizlilik talebi sebebiyle enerji santralinin konumu ve toplam kapasitesine dair bilgi verilememektedir. Bu tez çalışmasında toplam enerji santrali kapasitesi 1 MW'e indirgenmiş ve sonraki tüm süreçler buna göre ölçeklendirilmiştir. Susuzlaştırılmış atık su arıtma çamuru yakan enerji üretim santralinin kapasitesi günlük 198,4 ton 'dur. Sistem için saatlik besleme oranı 8,26 ton/saat'tir. İncelenen arıtma çamuru, yüksek oranda nem (%76) ve kül (%6,336) ile nispeten düşük ısı değere (941 kcal/kg-ıslak baz) sahip olduğu görülmüştür. İncelenen enerji dönüşüm sistemi 7 ana birimden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla: akışkan yataklı yakma sistemi, ısı eşanjörleri, siklon filtreler, torba filtreler, türbin, yoğunlaştırıcı ve hava basınçlandırma sistemleridir (Şekil 5.1). Akışkan yataklı yakma sistemine ait genel bilgiler Tablo 5.1-4'te detaylı olarak sunulmuştur. Susuzlaştırılmış atık su arıtma çamuru, depolandığı alandan pompalar vasıtasıyla akışkan yataklı yakma sistemine iletilmektedir. Akışkan yataklı fırının altında üflenen 632°C'lik sıcak hava, kum yatağını akışkanlaştırmaktadır. Akışkan yatağa iletilen ve ortalama alt ısı değeri 3.709 kcal/kg olan susuzlaştırılmış atık su arıtma çamuru ve doğalgaz karışımı sıcak kum ve yakma havasıyla karıştırılır. Yanma işlemi sonrasında yakıt akışkan yatakta 867°C'de tamamen tepkimeye girmekte ve duman gazı ile küle dönüşmektedir.

Tablo 5.2.Doğalgaza ait genel değerler

2 Numara- Doğal Gaz	
Kütle (kg/s)	0,238
C (kg/s)	0,01785
H (kg/s)	0,00595
ÜID (kcal/kg)	14370
AID (kcal/kg)	13057

Tablo 5.3.Duman gazına ait genel değerler

3 Numara- Duman Gazı		
Kütle (kg/s)	7,06925	Kütlesel Oran (%)
CO ₂ (kg/s)	0,88799	%12,56
H ₂ O (kg/s)	2,02267	%28,61
SO ₂ (kg/s)	0,01102	%0,16
O ₂ (kg/s)	0,261704	%3,70
N ₂ (kg/s)	3,770940	%53,34
Kül (kg/s)	0,114925	%1,63
Özgül Isı/Cp (kJ/kg)	1,531	-

Tablo 5.4.Sıkıştırılmış havaya ait genel değerler

20 Numara- Sıkıştırılmış Hava	
Kütle (kg/s)	4,78
N (kg/s)	3,7284
O (kg/s)	1,0516
Fazla hava oranı (λ)	1,249

Atık ısı kazanında üretilen 41 bar ve 460°C’deki 7,315 ton/saat debideki buhar, buhar türbinine yollanarak 1 MW elektrik üretilmektedir. Atık ısı kazanından çıkan duman gazı içerisinde yer alan kül bileşenlerinin yakalanması için siklon filtreler kullanılmaktadır. 4 mikronun üstündeki parçacıklar siklon filtrelerinde oluşan sirkülasyonlu akış ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle toplanmakta ve böylelikle %80 oranında kül giderimi sağlanmaktadır. Siklon filtrenin çıkışında duman gazına aktif karbon dozajlaması yapılmakta ve duman gazındaki ağır metallerin (dioksin ve furan gibi maddelerin) giderilmesi sağlanmaktadır. Bu noktada, aktif karbonun yanı sıra kireç dozajlaması da yapılarak duman gazındaki SO₂ gibi bileşikler giderilmektedir. Atık su arıtma çamuru çoğunlukla yüksek oranda su içeriğine ve düşük oranda katı

maddeye sahiptir. İncelenen atık çamur içindeki su oranı %76'dır. Sonuç olarak bu durum ısı değeri göreceli olarak düşük olmasına sebep olmaktadır. Atık su arıtma çamuru, birlikte yakma sistemlerinin tasarımında birçok farklı yakıtla birleştirilebilmektedir. İncelenen sistemde kentsel atık su arıtma çamuru yanma için doğalgazla karıştırılmaktadır. Kütlesel bağlamda doğal gazın, ıslak çamura oranı incelenen sistem için 1,026/98,973'tür. Atık çamur içindeki su içeriğinin yüksek olmasından dolayı duman gazında da yüksek oranda su buharı (%28,61) açığa çıkmaktadır.

5.2 Termodinamik Analiz

5.2.1 Duman Gazının Özgül Isı Kapasitesinin Belirlenmesi

Yanma ürünleri, yanma işlemine bağlı olarak CO₂, SO₂, N₂, O₂, H₂O vb. farklı gazlar içerir. Duman gazının özgül ısı değeri, yakıtların kimyasal bileşimi, fazla hava oranı ve sıcaklığa bağlı olarak farklılık göstermektedir. Sistemin enerji analizlerinin hassas bir biçimde yapılabilmesi için özellikle duman gazı ve külünün özgül ısılarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Coşkun ve arkadaşlarının [66] yapmış oldukları çalışmada, duman gazının özgül ısı değerlerini etkileyen faktörler incelenmiştir. Yakıtların kimyasal bileşiği, fazla hava oranı ve duman gazı sıcaklığına bağlı olarak külsüz duman gazının özgül ısı kapasitesi buldukları bir denklemle öne sürülmüştür. Bu metodoloji, külsüz duman gazının özgül ısısını net bir biçimde hesaplayabilmemizi sağlamaktadır. Duman gazındaki uçucu kül içeriği artınca, duman gazının özgül ısısı da düşmektedir. Bu çalışmada literatürde ilk defa olarak duman gazının özgül ısısı iki ayrı bileşene ayrılarak hesaplanmıştır. İlk kısımda uçucu kül ikinci kısımda da külsüz duman gazı incelemeye alınmıştır. Bu nedenle bu araştırmada duman gazı, uçucu kül ve külsüz duman gazı olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Külsüz duman gazının özgül ısı kapasitesini hesaplamak için denklem 1 [66] kullanılmıştır.

$$Cp_{UG \text{ külsüz}}(T) = \frac{Cp_C(T)}{(a_C + b_N + C_H + d_S)^{-1}} \cdot \frac{m_{tot-steo}}{m_{UG \text{ külsüz}}} + f_A \quad (1)$$

Eşitlikte a, b, c, d ve f denklem 1'in model katsayılarıdır. $Cp_{UG\text{ külsüz}}(T)$, külsüz duman gazı ortalama özgül ısı değerini temsil eder. $Cp_C(T)$, CO_2 'nin özgül ısını ifade eder. Kentsel atık su arıtma çamurunun yakılmasıyla oluşan külünün özgül ısısı, kimyasal bileşik ve sıcaklığa göre değişiklik göstermektedir. Kentsel atık su arıtma çamuruna ait külünün ana parçaları SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve MgO 'dur. Oluşan çamur esasen kum boyutunda parçacıkları olan siltli bir maddedir. Atık su arıtma çamurunun yakılması sonucu oluşan külün özgül boyut aralığı ve özellikleri büyük oranda kayma sisteminin tipine ve atık su arıtma işleminde kullanılan kimyasal katkı maddelerine bağlıdır. Yanma sonrası oluşan kül, torba filtreler, siklon filtreler veya elektrostatik filtreler aracılığıyla duman gazlarından ayrıştırılmaktadır. Oluşan külün bileşimi Tablo 5.5'te sunulmaktadır. Oluşan kül öncelikli olarak silikon, demir ve potasyumdan oluşmaktadır.

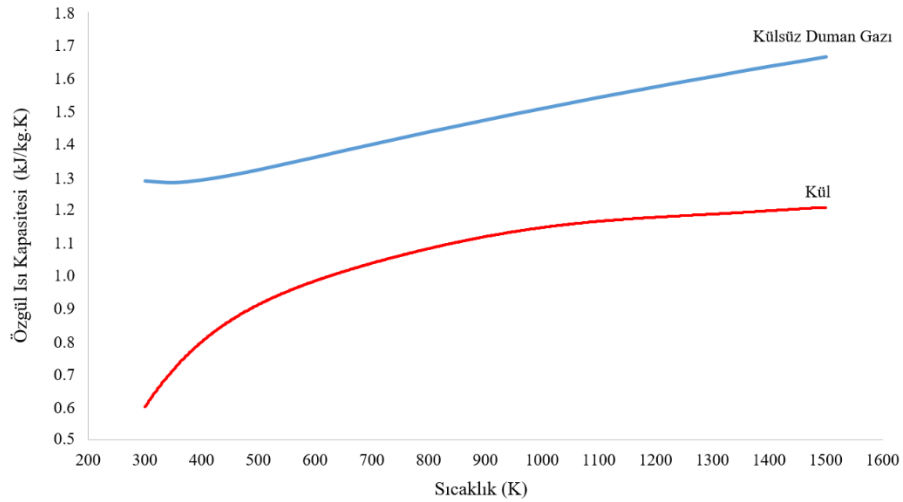
Tablo 5.5.Kül bileşiminin oksitler olarak gösterimi (ağırlık %)

SiO_2	28,74
CaO	25,69
P_2O_3	13,79
Al_2O_3	9,03
Fe_2O_3	8,88
K_2O	3,85
MgO	3,68
SO_3	1,76
Na_2O	1,64
TiO_2	0,85
ZnO	0,75
Cr_2O_3	0,17
CuO	0,12
Cl	0,19
Y_2O_3	0,004
Rb_2O	0,0014
Br	0,0029
CdO	0,0029
PbO	0,1151
NiO	0,1295
MnO	0,1007
SO	0,1295
CuO	0,1582
BaO	0,1870
ZrO_2	0,0288

İncelenen atık su arıtma çamuruna ait külün, sıcaklığa bağlı özgül ısı değeri formülü her bir bileşen dikkate alınarak aşağıdaki biçimde hesaplanmıştır.

$$Cp_{Kül}(T) = \frac{-197,633358909 + 1,164179485577 \cdot T}{(1 + 0,837598571067 \cdot T + 1,11480313463 \cdot 10^{-5} \cdot T^2)} \quad (2)$$

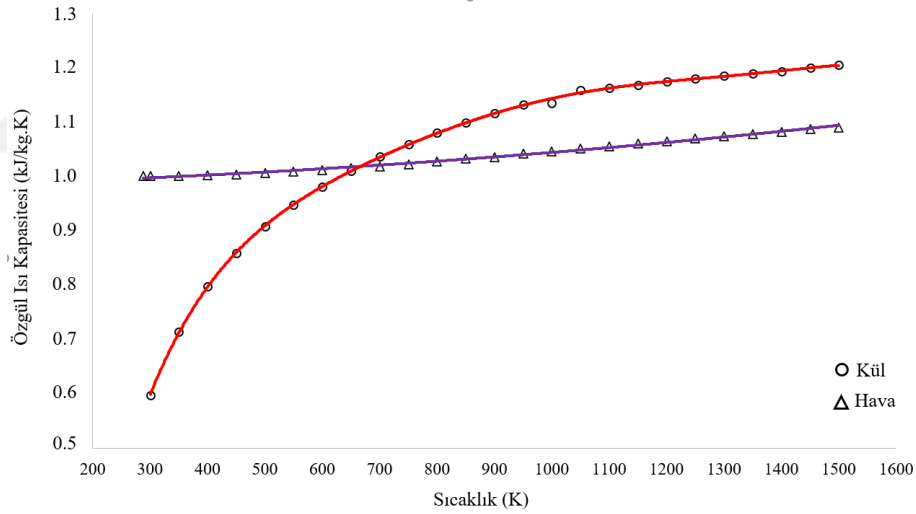
Külsüz duman gazının ve sadece külün sıcaklığa bağlı özgül ısı değerinin değişimi Şekil 5.2’de sunulmuştur. İncelenen atık su arıtma çamuru bileşimine göre, uçucu külün özgül ısı kapasitesi duman gazının özgül ısı kapasitesinden daha düşüktür. Kül bileşenin duman gazının özgül ısısını düşürdüğü belirlenmiştir. Külsüz duman gazın ve sadece külün özgül ısı değerleri arasındaki fark 300 K ve 1.500 K arasında %28,6’ya ulaşmaktadır. Yanmanın ardından külsüz duman gazı ve uçucu kül karışımındaki kül miktarı arttığında duman gazının özgül ısısı düşmektedir. İncelenen sistemdeki duman gazının yüksek su buharı içeriğinden (%28,61) dolayı, duman gazının özgül ısı kapasitesi diğer standart yakıtlarınkinden daha yüksek bir seviyededir. İncelenen sistemdeki duman gazının özgül ısısı, standart doğalgazın yanması sonrasında oluşan duman gazından ortalama %56 (300K/1.500 K) daha fazladır.



Şekil 5.2.Külün ve külsüz duman gazının özgül ısılarının sıcaklıkla değişimi

Literatürdeki pek çok pratik hesaplamada, külün özgül ısı değeri 0,25 kcal/kg°C'lik (1,046 kJ/kg°C) olarak alınmaktadır. Bu çalışmada incelenen kül bileşeni için 1,046 kJ/kg°C'lik özgül ısı değeri 710,2 K'de (437,05°C) elde edilebilmiştir. Hesaplamaları kolaylaştırmak için külün özgül ısısı bazen de havaninkiyile eşit kabul edilmektedir. Külün özgül ısı değeri havaninkiyile eşit olarak kabul edildiğinde 648 K'den yüksek veya düşük sıcaklıklarda yüksek oranda hataya sebep olmaktadır. Hava ve külün özgül ısı değerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.3'te sunulmaktadır.

Atık su arıtma çamuruna ait külünün kimyasal bileşimleri büyük oranda farklılık göstermektedir. Kimyasal bileşimlerdeki bu değişimler külün özgül ısı kapasitesine büyük oranda etki etmektedir. Bu tez çalışmasında, atık su çamurundaki inorganik maddelerin külün özgül ısı $Cp_{Kül}(T)$ değerine etkisi incelenmiştir. Literatürde yayınlanmış olan sekiz atık su çamuru kül numunesi incelenmiştir.



Şekil 5.3.Hava ve külün özgül ısılarının sıcaklığa karşı varyasyonu

Tablo 5.6’da literatürden alınan sekiz çamur külünün kimyasal içerik verisi sunulmuştur. Maksimum, minimum ve ortalama şartlar için özgül ısı kapasitesi modellenmiş ve aşağıdaki fonksiyonlarla sunulmuştur.

$$Cp_{Kül_{ort}}(T) = \frac{-1065,42123465+5,87054667144 \cdot T}{(1+4,06853430794 \cdot T+1,15491431776 \cdot 10^{-4} \cdot T^2)} \quad (3)$$

$$Cp_{Kül_{mak}}(T) = \frac{-123,286822492+0,717985182271 \cdot T}{(1+0,506634610331 \cdot T-3,59635260418 \cdot 10^{-6} \cdot T^2)} \quad (4)$$

$$Cp_{Kül_{min}}(T) = \frac{-227,411292894+1,21465245 \cdot T}{(1+0,822489322123 \cdot T+0,589787457066 \cdot 10^{-5} \cdot T^2)} \quad (5)$$

Formüllerde yer alan ‘T’ terimi sıcaklığı Kelvin cinsinden ifade etmektedir.

Tablo 5.6. Arıtma çamuru külünün tipik kimyasal bileşimi

Wt (%)	Bu Çalışma	Ref. [67]	Ref. [68]	Ref. [69]	Ref. [70]	Ref. [71]	Ref. [71]	Ref. [72]	Ref. [72]
SiO ₂	28,74	25,40	39,52	36,4	38,4	35,72	25,77	29,95	27,54
Al ₂ O ₃	9,03	7,64	17,17	12	11,9	6,70	9,54	9,46	8,60
Fe ₂ O ₃	8,88	20	11,91	12,3	10,3	9,56	5,12	8,60	9,15
TiO ₂	0,85	0,29	0,81	1,15	1,10	1	0,77	0,87	0,83
CaO	25,69	21,05	7,16	11,3	11	17,46	20,70	26,56	24,81
Na ₂ O	1,64	0,48	1,23	-	-	0,52	0,55	1,53	1,74
K ₂ O	3,85	0,78	2,72	1,80	1,70	1,61	1,87	3,47	4,22
MgO	3,68	1,63	2,13	1,08	1,70	4,51	4,48	3,52	3,84
Cr ₂ O ₃	0,17	0,02	-	-	-	-	-	0,16	0,16
CuO	0,12	-	-	-	-	0,06	0,13	0,11	0,13
ZnO	0,75	-	0,52	-	-	0,37	0,41	0,67	0,82
P ₂ O ₅	13,79	14,02	7,55	15,20	14,60	19	21,58	12,06	15,52
SO ₃	1,76	-	1,97	5,28	5,50	1,21	0,30	2,08	1,43
Cl	0,19	-	-	-	-	-	-	0,24	0,23
Diğer	0,86	0,86	7,31	3,49	3,80	2,28	8,78	0,72	0,98

Yanma işleminden sonra meydana gelen iki tür kül tipi vardır, bunlar sırasıyla uçucu kül ve dip küldür. Bu çalışmada yapılan incelemeye göre, dip külü kütle olarak toplam kül içeriğinin %21’ini oluşturmaktadır. Geriye kalan %79 oranındaki kül, uçucu kül olarak duman gazın içinde kalmaktadır.

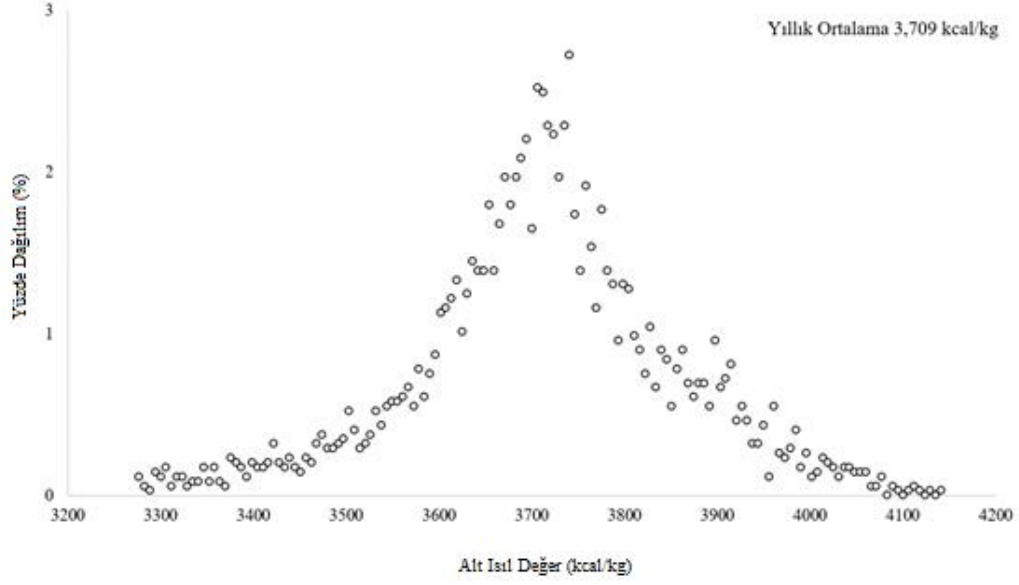
5.2.2 Atık Su Çamurunun Isıl Değerinin Belirlenmesi

Yapılan incelemede günlük bazda atık su arıtma çamuru numunesi toplanmış ve ısı değerleri (üst ve alt ısı değerleri) belirlenmiştir. Bu araştırmada incelemeye alınan atık su çamuru, %76 gibi yüksek bir oranda su içeriğine sahiptir. Enerji santralinin bacasından çıkan NO_x oranı 452 ppm (2,9743 g/s) olarak belirlenmiştir. Duman gazındaki NO_x oranına bağlı olarak tepkimeye giren nitrojen, toplam yakıt karışımının %0,066219'nu oluşturmaktadır. Yakıta ait üst ve alt ısı değerlerinin kcal/kg olarak hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda sırasıyla sunulmuştur:

$$AID = 78,33 C + 338,89 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 22,21 S + 5,78 N_{tepkimen} \quad (6)$$

$$AID = \ddot{U}ID - (9H + H_2O) \cdot 5,8278 \quad (7)$$

Burada, O, C, H ve N sırayla yakıttaki oksijen, karbon, hidrojen ve nitrojenin ağırlık kesirleridir. H₂O yakıttaki nem ağırlık kesrini ifade eder. Yıl içerisinde kuru bazlı atık su arıtma çamurunun üst ısı değeri (ÜID) 3.277 kcal/kg ve 4.142 kcal/kg arasında değişim göstermiş ve ortalamada 3.709 kcal/kg değerine ulaşmıştır. Kuru bazlı atık su arıtma çamurunun yıllık ÜID dağılımı Şekil 5.4'te sunulmaktadır. Kuru bazlı atık su arıtma çamurunun elementel analizi sonuçlarına göre en yüksek oran karbona aittir. Kuru bazlı atık su arıtma çamuru içerisindeki karbon yüzdesi %35,2 ve %42,6 arasında değişim göstermiş ve ortalamada %38,8 değerine ulaşmıştır. Farklı örnek numuneler için kuru bazlı atık su arıtma çamuru elementel analiz sonuçları Tablo 5.7'de verilmiştir. Yanma için fazla hava oranı %24,89 ($\lambda = 1,249$) olarak belirlenmiştir. Kentsel susuzlaştırılmış atık su arıtma çamuru birlikte yanma için akışkan yataklı yanma sisteminde doğalgazla karıştırılmaktadır. Doğalgazla karıştırıldıktan sonra, susuzlaştırılmış atık su arıtma çamurunun ÜID'i 941 kcal/kg'den 1.078 kcal/kg'ye çıkmıştır. Yakıt karışımının AID'i 569 kcal/kg olarak hesaplanmıştır. Yakıt karışımının elementel analiz sonuçları Tablo 5.8'de verilmektedir.



Şekil 5.4.Kuru bazlı arıtma çamuru için yıllık alt ısı değer dağılımı

Tablo 5.7.Kuru bazlı atık su arıtma çamuru elementel analiz değerleri

Kuru Bazlı Atık Su Arıtma Çamuru Numunesi	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	N (%)	Kül (%)	ÜİD (kcal/kg)	AİD (kcal/kg)
En Yüksek Isıl Değer	42,60	7,20	30,50	1,25	7,75	10,70	4.520	4.142
En Düşük Isıl Değer	35,20	4,50	18,0	0,90	6,50	34,20	3.516	3.280
Seçilen Gün	40,71	4,52	19,65	1,00	7,72	26,40	3.917	3.679

Tablo 5.8.Birlikte yanma için yakıt karışımına ait elementel analiz değerleri

Yakıt Karışımı (Doğal Gaz + Islak Atık Su Çamuru) (%)							
	C	H	O	S	N	Kül	H ₂ O
İncelenen Gün	10,44	1,33	4,668	0,238	1,834	6,271	75,22

5.3 Enerji Analizi

Duman gazı ve uçucu kül karışımının özgül ısı kapasitesi Denklem 8-10'daki korelasyonla hesaplanabilmektedir:

$$h_{Kül}(T) = T_{Kül} \cdot C_{pKül}(T) \quad (8)$$

$$h_{kÜlsüz DG}(T) = T_{kÜlsüz DG} \cdot C_{pKÜlsüz DG}(T) \quad (9)$$

$$h_{DG}(T) = x_{Kül} \cdot h_{Kül}(T) + x_{kÜlsüz DG} \cdot h_{kÜlsüz DG}(T) \quad (10)$$

Denklemden yer alan $h_{DG}(T)$ duman gazının entalpi değerini ifade etmektedir. $h_{Kül}(T)$ ve $h_{kÜlsüz DG}(T)$ sırasıyla sade külün ve külsüz duman gazının entalpi değerini belirtmektedir. h , belirli sıcaklık ve basınçta olan bir sistemin entropisidir ve h_0 bu fonksiyonların sırasıyla çevre sıcaklığı ve basıncındaki değeridir. Bu hesaplamada atık su çamurunun entalpi değeri su, kül ve kuru madde için sırasıyla %76, %6,336 ve %17,664 olarak hesaplanmıştır. $x_{Kül}$ terimi, tamamlanmış bir yanmadan elde edilen ürünün, uçucu külün kütle kesridir, birim başına ifade edilir.

$$h_{Çamur}(T) = x_{Kül} \cdot h_{Kül}(T) + x_{su} \cdot h_{su}(T) + x_{kuru madde} \cdot h_{kuru madde}(T) \quad (11)$$

Sistem bileşenleri için enerji kaybı ve sistemdeki her bir nokta için termodinamik özellikler Tablo 5.9 ve 5.10'da sırasıyla verilmektedir.

Tablo 5.9.Sistem bileşenleri için enerji kaybı denklemleri

Bileşenler	Enerji Kaybı
Isı Eşanjörü-1	$\dot{E}_{kayıp,IE-1} = (\dot{E}_3 + \dot{E}_{19}) - (\dot{E}_4 + \dot{E}_{20})$
Isı Eşanjörü-2	$\dot{E}_{kayıp,IE-2} = (\dot{E}_4 + \dot{E}_{21}) - (\dot{E}_5 + \dot{E}_{22})$
Isı Eşanjörü-3	$\dot{E}_{kayıp,IE-3} = (\dot{E}_{10} + \dot{E}_{15}) - (\dot{E}_{11} + \dot{E}_{16})$
Isı Eşanjörü-4	$\dot{E}_{kayıp,IE-4} = (\dot{E}_{11} + \dot{E}_{18}) - (\dot{E}_{12} + \dot{E}_{19})$
Isı Eşanjörü-5	$\dot{E}_{kayıp,IE-5} = (\dot{E}_{12} + \dot{E}_{14}) - (\dot{E}_{13} + \dot{E}_{15})$
Isı Eşanjörü-6	$\dot{E}_{kayıp,IE-6} = (\dot{E}_{25} + \dot{E}_{31}) - (\dot{E}_{26} + \dot{E}_{32})$
Siklon Filtre	$\dot{E}_{kayıp,M.S.} = (\dot{E}_5) - (\dot{E}_6 + \dot{E}_7)$
Torba Filtre	$\dot{E}_{kayıp,T.S.} = (\dot{E}_8) - (\dot{E}_9 + \dot{E}_{10})$
Türbin	$\dot{E}_{kayıp,Türb.} = (\dot{E}_{22}) - (\dot{E}_{23} + \dot{E}_{24})$
Yoğuşturucu	$\dot{E}_{kayıp,Kond.} = (\dot{E}_{23} + \dot{E}_{29}) - (\dot{E}_{25} + \dot{E}_{30})$
Hava Giderici	$\dot{E}_{kayıp,H.G.} = (\dot{E}_{24} + \dot{E}_{26} + \dot{E}_{27}) - (\dot{E}_{28})$
Akışkan Yatak	$\dot{E}_{kayıp,AYY} = (\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_{20}) - (\dot{E}_3)$

Sistemin net enerji verimi hesaplanırken türbininde üretilen elektrik miktarından, tüm santrallerin çalışması için gerekli olan pompalar, fanlar ve kontroller gibi elektriksel yükler çıkarılır [73].

Tablo 5.10.Sistemdeki her bir nokta için termodinamik özellikler

No.	Hal	Kütle (kg/s)	P (kPa)	T (K)	h (kJ/kg)	$\dot{E}$ (MW)
1	Aritma Çamuru	2,296	120	288	2943	6,757
2	Doğal Gaz	0,0238	120	288	55500	1,3209
3	Duman Gazı	7,06925	110	1125	1765,6	12,481
4	Duman Gazı	7,06925	108	968	1464,4	10,352
5	Duman Gazı	7,06925	107	479	629,8	4,453
6	Uçucu Kül	0,08964	101	476	418,5	0,038
7	Duman Gazı	6,9796	107	476	628,0	4,383
8	Duman Gazı	7,1258	107	472	622,3	4,434
9	Uçucu Kül	0,0253	101	469	410,8	0,010
10	Duman Gazı	7,1005	106	469	618,6	4,392
11	Duman Gazı	7,1005	106	460	604,9	4,295
12	Duman Gazı	7,1005	106	394	510,6	3,626
13	Duman Gazı	7,1005	106	343	442,1	3,139
14	Duman Gazı	7,1005	106	334	430,5	3,057
15	Duman Gazı	7,1005	105	384	496,5	3,526
16	Duman Gazı	7,1005	105	389	503,4	3,574
17	Duman Gazı	7,1005	115	390	508,2	3,608
18	Basınçlı Hava	4,78	120,2	370	371,0	1,773
19	Basınçlı Hava	4,78	120,2	500	503,8	2,408
20	Basınçlı Hava	4,78	120,2	905	939,6	4,491
21	Su	2,032	410	385	472,0	0,959
22	Buhar	2,032	410	733	3352,4	6,812
23	Buhar	1,880	190	392	2704,4	5,085
24	Buhar	0,152	190	392	2704,4	0,410
25	Su	1,880	190	316	179,6	0,338
26	Su	1,880	190	343	292,5	0,550
27	Su	0,087	190	293	83,4	0,007
28	Su	2,119	190	377	435,4	0,922
29	Su	221	150	313	167,0	36,907
30	Su	221	145	318	187,9	41,526
31	Su	5,150	140	343	292,4	1,506
32	Su	5,150	135	332	246,4	1,269
33	Dip Külü	0,03055	110	1140	1327,0	0,041

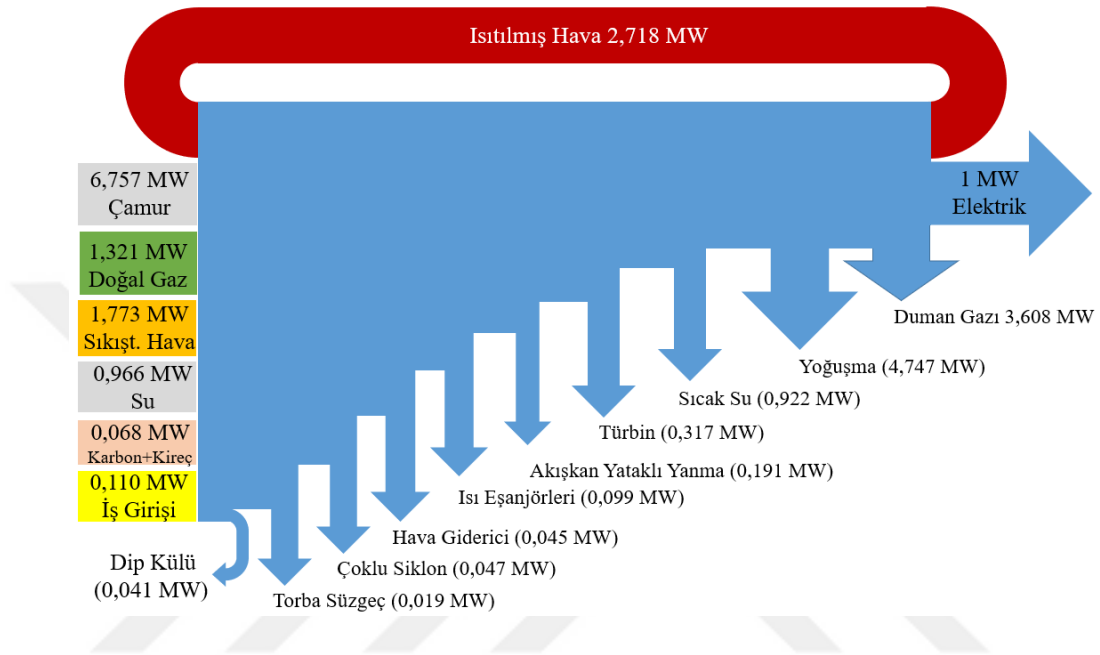
6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan analizler sonucunda sistemdeki enerji akışı Şekil 6.1’de verilmektedir. En yüksek enerji kaybı yoğunlaştırıcı biriminde 4.747 MW olarak gerçekleşmektedir. 1 MW’lık elektrik üretimi için 3,608 MW’lık termal enerji bacadan atmosfere bırakılmaktadır. Ölçüm sonuçları duman gazı sıcaklığının 867°C’den baca kısmında 117°C’ye düştüğünü göstermektedir. Yapılan hesaplamalarda duman gazında yüksek oranda enerjinin atmosfere bırakıldığı gözükmemektedir. Duman gazının yüksek orandaki enerjisinin en önemli sebebi, duman gazı içerisinde kütlece %28,6 oranında su buharı içermesidir. Doğalgaz yakma sistemlerinde bu oran %75,22 seviyesindedir. Çamurun içindeki klor (Cl) yanma sırasında hidrojen ile birleşerek Hidroklorik Asit (HCl) ortaya çıkarmaktadır. Duman gazının içinde yer alan HCl (6,3 kg/saat) sebebiyle, duman gazının sıcaklığı düşürülerek içindeki su buharı yoğunlaştırıldığında Hidroklorik Asitin de yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Su buharı ile yoğunlaşmış HCl, ısı geri kazanım cihazında korozyona ve yüzey hasarlarına neden olmaktadır. Bu çalışmada, duman gazın içinde yer alan HCl eşanjör yüzünde yıpranmaya sebep olduğundan yoğunlaştırulmadan bacadan atılmaktadır. Eğer su buharının yoğunlaştırulması istenirse ısı eşanjörleri için paslanmaz çelik malzeme kullanmak gerekmektedir. Bu şartlarda kullanılan ısı eşanjörlerinin kaliteli olmasına ve fiyatlarının yükselmesine sebep olmaktadır. Yatırım maliyetlerini azaltmak için ise duman gazının içinde yer alan su buharı yoğunlaştırulmadan atmosfere salınmaktadır.

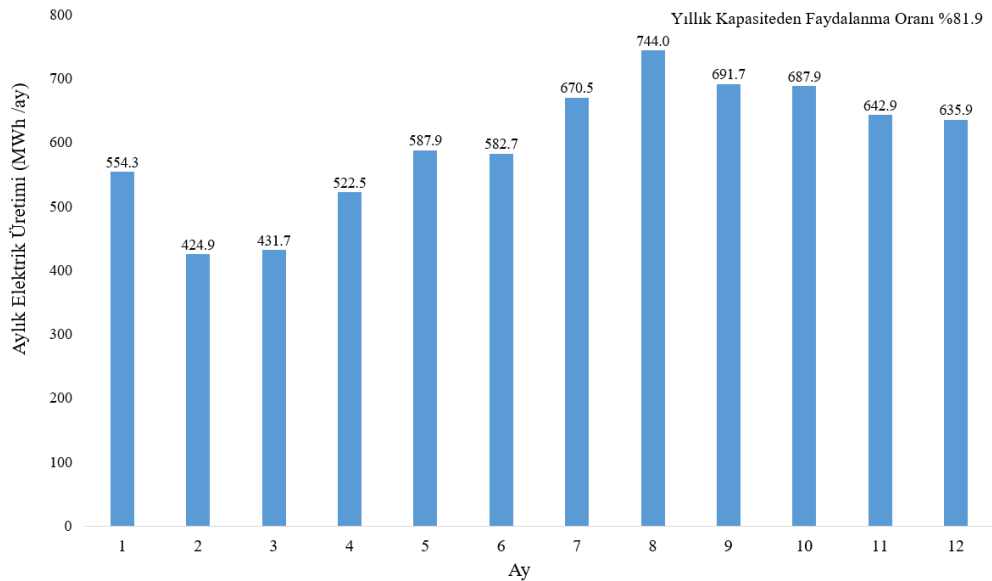
Girdi enerjisi doğal gaz ve atık su arıtma çamurdan gelmektedir. Doğal gazın giriş enerjisi toplam giriş enerjisinin %12’sine, çamurunki ise %61,45’ine tekabül etmektedir. 1 MW’lık elektrik üretimi için toplam girdi enerjisi 10,995 MW olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda sistemin ortalama enerji verimliliği %9,095 olarak belirlenmiştir.

Susuz ve külsüz atık su arıtma çamuru göz önüne alındığında, karbon ve hidrojenin ağırlık yüzdeleri kış döneminden yaz dönemine düşüş gösterirken oksijen oranı artmıştır. Bu değişimin en önemli sebeplerinden biri, halkın yaz döneminde düşük karbonhidratlı yiyeceklere ve meyve/sebze bazlı bir beslenme alışkanlığına geçmiş olmalarıdır. Kuru bazlı atık su arıtma çamurdaki kül içeriği kış mevsiminden yaza mevsimine geçiş döneminde yüzdesel olarak azalmıştır.

Kurulum kapasitesi bağlamında değerlendirildiğinde, yıllık bazda sistem kapasite kullanım oranı %81,9'dur. 1 MW kurulu güç için yıllık 7,177 GWh elektrik üretilmektedir. Elektrik üretimindeki aylık değişimler Şekil 6.2'de verilmektedir. En yüksek ve en düşük kapasite kullanım oranı sırasıyla Ağustos'ta (%100) ve Mart'ta (%58) gerçekleşmektedir.



Şekil 6.1. Sistem enerji akış diyagramı



Şekil 6.2. Aylık bazda elektrik üretim dağıtımı

Kapasiteden faydalanma oranındaki değişikliğin en önemli sebeplerinden biri günlük kentsel atık su çamuru miktarıdır. Atık su arıtma çamuru oluşumu en çok yaz aylarında meydana gelmektedir. Yıl boyunca oluşan çamur miktarı şehri ziyaret eden turistlerle birlikte değişim göstermektedir. Turist sayısının en çok olduğu zamanlar özellikle Temmuz ve Ağustos aylarıdır. Şehirde kişi başına ortalama 36,93 g kuru atık su çamuru üretilmektedir. 1 MW elektrik üretim sistemini beslemek için ortalama 1,296 milyonluk bir nüfus gerekmektedir. 1 MW kapasite için gereken sistem yatırım masrafı 910.000\$ olarak hesaplanmıştır. Yıllık işletim masrafı 100.100\$ olarak hesaplanırken, elektrik satışlarından elde edilen yıllık gelir 319.376,5\$ olmaktadır.

Mevcut araştırmadan ortaya çıkan nihai sonuçlar:

- Santral enerji verimliliği %9,095 olarak bulunmuştur. Türbin elektrik üretim verimliliği %76 olarak hesaplanmıştır.
- Sistemden yıllık faydalanılabilme oranı %81,9'dur. 1 MW'lik bir sistemden yıllık 7,177 GWh elektrik üretilebilmektedir. 1 MW kapasite için gereken sistem yatırım masrafı 910.000\$ olarak hesaplanmıştır.
- En büyük enerji kaybı 4,747 MW ile yoğunlaştırucu biriminde yaşanmaktadır.
- Araştırmanın yapıldığı şehirde kişi başına ortalama 36,93 g kuru atık su çamuru üretimi vardır.
- Elektrik üretiminden meydana gelen CO₂ emisyonu kWh başına ortalama 888 g olarak bulunmuştur.
- Kuru bazlı kentsel atık su arıtma çamurunun ortalama kimyasal bileşimi C_{4,13}H_{8,58}O₂N_{0,61}S_{0,04} olarak elde edilmiştir.

KAYNAKÇA

1. Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu. Koç, Prof. Dr. Erdem ve Şenel, Mahmut Can. 639, basım yeri bilinmiyor : Mühendis ve Makina, 10 Ekim 2015.
2. OECD Bölüm 1. 2019.
3. TÜİK Rapor. 2019. s. 71.
4. Total Primary Energy Supply (TPES) by source:Turkey. basım yeri bilinmiyor : Uluslararası Enerji Ajansı, 24 Ekim 2018.
5. Turkey's Energy İmport Bill Up 2.7 pct in Feb. 2019. basım yeri bilinmiyor : Anadolu, 29 Mart 2019.
6. Türkiye'de Enerji. basım yeri bilinmiyor : Wikipedia, 2021.
7. Arıtma çamurunun alternatif yakıt olarak kullanılabilirliği. Zorlu, Hakan ve Pehlivan, Hüseyin. 2016, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, s. 177-184.
8. Kunt, Müjgan, ve diğerleri. Türkiye Çevre Durum Raporu. Ankara : Sar Matbaa Yayıncılık, 2016.
9. URL 1 . [Çevrimiçi]
<https://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/WASTE%20BROCHURE.pdf>.
10. Manara, P. ve Zabaniotou, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical. A review. Renewable Sustainable Energy Rev 16. 2012. s. 2566-2582.
11. Calvo, A.I., ve diğerleri. Particulate emissions from the co-combustion of forest biomass and sewage sludge in a bubbling fluidised bed reactor. Fuel Processing Technology 114. 2013. s. 58-68.
12. Ra, S. ve Wasielewski, R. Co-combustion of dried sewage sludge and coal in a pulverized coal boiler. Mater Cycles Waste Manag 10 110–115 DOI 10.1007/s10163-007-0206-9. 2008.

13. Rajczyk, R., ve diğeri. Co-Combustion of Municipal Sewage Sludge and Hard Coal on Fluidized Bed Boiler WF-6. Archives of Environmental Protection 40 (3). 2014. s. 101 - 113.
14. Vamvuka, D., Alexandrakis, S. ve Galetakis, M. Combustion Performance of Sludge from a Wastewater Treatment Plant in Fluidized Bed. Factorial Modeling and Optimization of Emissions. Frontiers in Energy Research 7:43 doi: 10.3389/fenrg.2019.00043. 2019.
15. Nordin, A., ve diğeri. Co-Combustion of Municipal Sewage Sludge and Biomass in a Grate Fired Boiler for Phosphorus Recovery in Bottom Ash. Energies 13, 1708; doi:10.3390/en13071708. 2020.
16. Ren, Q. ve Li, L. Co-combustion of Agricultural Straw with Municipal Sewage Sludge in a Fluidized Bed: Role of Phosphorus in Potassium Behavior. Energy Fuels 29(7). 2015. s. 4321–4327.
17. Ashwekar, P., Jiang, Y. ve Pan, H. Feasibility Study of Energy Recovery by Incineration - A Case Study of the Triangle Wastewater Treatment Plant. Master of Environmental Management degree in the Nicholas School of the Environment of Duke University. Nisan 2017.
18. Özön, Nida Nurbay. Yeni Bir Atık Çamur Kurutma Sisteminin Tasarlanması ve Arıtma Çamurlarına Uygulanması. Doktora Tezi. Kocaeli : yazarı bilinmiyor, 18 07 2014.
19. Taşatar, B. Endüstriyel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Bazı Toprak Özelliklerine Etkileri. Ankara : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 1997.
20. Alpaslan, Mehmet Necdet. Arıtma Çamurları Atıksu Arıtma Tesislerinin Tasarım ve İşletim Esasları Kurs Notları. 2004.
21. Sewage Sludge Combustion. Werther, J. ve T., Ogada. basım yeri bilinmiyor : Progress in Energy and Combustion Science, 1999, Progress in Energy and Combustion Science, s. 25:55-116.
22. Treatment and Disposal of Sewage Sludge in the Mid-1990s. Hudson, J.A. 1995, s. 93-99.

23. Fibelli, A. Arıtma Çamurlarının İşlenmesi. İzmir : D.E Müh. Fak. Yayınları , 1996.
24. Evsel Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi Projesi Final Raporu. basım yeri bilinmiyor : Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015.
25. Ofisi, Avrupa İstatistik. Eurostat. Eurostat / Avrupa İstatistik Ofisi - AB Ülkeleri Arıtma Çamuru Verileri. [Çevrimiçi] 31 12 2017.
<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>.
26. Dilek, Serdar. Atıksu Arıtma Tesisi Atıklarının Bertarafı ve Yeniden Değerlendirilmesi İle İlgili Mevcut ve Yeni Teknolojik Yöntemlerin Karşılaştırılması. İller Bankası Anonim Şirketi. Eylül 2015.
27. Öztürk, Prof.Dr.İzzet. Atıksu Mühendisliği. İstanbul : İski, 2017.
28. Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü. Türkiye Çevre Durum Raporu. Ankara : T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016. s. 125.
29. İzmir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. İzmir İli 2018 Yılı Çevre Durum Raporu. İzmir : Türkiye Cumhuriyeti İzmir Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2018.
30. TÜİK. 2020.
31. İZSU. Tesisler ve Atıksu Arıtma Miktarları.
32. Kemirtlek, Aynur. Atıksu Arıtma Çamurlarının Çimento Fabrikalarında Ek Yakıt Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. İstanbul : yazarı bilinmiyor, 2013.
33. Aydın S. Atıksu Arıtma Tesisi Çamurlarının Değişik Amaçlarla Kullanımının Araştırılması. İstanbul : İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ekim 2004.
34. Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı. Türkiye Belediyeler Birliği. Ankara : yazarı bilinmiyor, 2015, s. 125-176.
35. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods– a review. Zabaniotou, A. ve Fytili, D. 2008, Renewable and Sustainable Energy Reviews, s. 116-140.

36. Modeling the adsorption of mercury in the flue gas of sewage sludge incineration. O., Malerius ve Werther J. 2003, Chemical Engineering Journal, s. 197-205.
37. Aydın, Serdar. Doktora Tezi. Atıksu Arıtma Tesisi Çamurlarının Değişik Amaçlarla Kullanımının Araştırılması. İstanbul : İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
38. DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti. Evsel ve Evsel Nitelikli Atıksu Arıtma Çamurunun Arıtımı.
<http://www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/evsel/13.doc>. 21 03 2011.
39. Filibeli, A. ve Ayol, A. Tehlikeli Atık Sınıfındaki Arıtma Çamurlarının. Bildiriler Kitabı. basım yeri bilinmiyor : Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu'08, 2008.
40. Çevik, A. Atık Su Arıtma Çamuru Susuzlaştırma Kurutma ve Yakmada Kullanılan Yöntem ve Ekipmanlar. Uzmanlık Tezi. basım yeri bilinmiyor : İller Bankası Anonim Şirketi (İLBANK), Mart 2017.
41. Atıksu Arıtma Çamuru Susuzlaştırma Kurutma ve Yakmada Kullanılan Yöntem ve Ekipmanlar. Mart 2017.
42. Mazlum, N., Mazlum, S. ve Öztürk, E. Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesinde Yeni Gelişmeler. İstanbul : TÜRKAY 2009 Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, YTÜ, 15-17 06 2009.
43. Feeco International <http://feeco.com/rotary-kilns/> ve <http://feeco.com/rotary-dryers/> adresinden 3 Mart 2017'de alınmıştır.
44. Toraman, Öner Yusuf. Doktora Tezi. Atıksu Arıtma Çamurunu Değerlendirme İmkanlarının Araştırılması. Adana : Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
45. Co-Combustion of Coal and Biomass in Pulverized and Fluidized Bed Systems. Hein, K. ve Spliethoff, H. London/UK : yazarı bilinmiyor, 1995. In: Proceedings of 2. Int. Conference on Combustion and Emissions Control. s. 127-136.

46. ROMER, R. Thermal Treatment of Sewage Sludge-Combustion, Drying, Energy Recovery, Emissions. In: Klarschlamm Entsorgung 1, Daten-Dioxine, Entwässerung, Verwertung, Entsorgungsvorschläge. 1991. s. 250-271.
47. Billotet, T. Combustion Tests with Dried Sewage Sludge in Coal-Fired Power Plants. In: Proceedings Combined Combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coals. 1992. Final Report, CEC Research Project, APAS-Contract-COAL-92-0002.
48. Ponsen, A.R. Volatilization of Sludge Residuals, Vadenbroek Int., 1998.
49. Abbas, T., ve diğerleri. Combine Combustion of Biomass, Municipal Sewage Sludge and Coal a Pulverized Fuel Plant. In: Proceedings Combined Combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coals. 1992. Final Reports EC-Research Project, APAS-contract COAL-92-0002.
50. Bierbaum, K., Lambertz, J. ve Thomas, G. Sewage Sludge Co-Combustion in a Brown Coal-Fired Industrial Power Plant. basım yeri bilinmiyor : Chemie Ingenieur Technik, s. 69(7/97):973-975.
51. Loll, U. Sewage Sludge. In: ATV Handbuch, 4. edn. Berlin:Ernst and Sohn. : yazarı bilinmiyor, 1996.
52. Liem, D.A. ve Zorge, J.A. Dioxins Andrelated Compounds, Status and Regulatory Aspects, ESPR-Env. Sci. and Pollut. Res. 1995. s. 2(1):46-55.
53. EPA. 2002.
54. Bierbach, H. ve Thomas, G. Processes for Thermal Co-Processing of Sewage Sludge. In: Klarschlamm Entsorgung 1, Daten-Dioxine, Entwässerung, Verwertung, Entsorgungsvorschläge. Düsseldorf: VDI : yazarı bilinmiyor, 1991. s. GbmH:272-288.
55. Colin, F., Newman, P.J. ve Paulanne, Y.J. Recent Developments in Sewage Sludge Processing. Elsevier Applied Science. 1991.
56. Saxena, S.C. ve Jotschi, C.K. Fluidized Bed Incineration of Waste Materials. Prog. Energy Combustion Sci. 1994. s. (20)281-324.

57. Toraman, Öner Yusuf. Atıksu Arıtma Çamurunu Değerlendirme İmkanlarının Araştırılması. Adana : Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002. s. 66. Doktora Tezi.
58. Lang, T. ve Obrist, A. Combustion of Sewage Sludge in a Cement Kiln. Recycling von Klarschlamm. Berlin : yazarı bilinmiyor, 1987. s. p.285-291.
59. Peschen, N. Conditioning of Sewage Sludge with Lime for the Production of Secondary Raw Material. Umwelt Magazin. 1997. s. Bd; 27(5):44-47.
60. Slim, J.A. ve Wakefield, R.W. The Utilization of Sewage Sludge in the Manufacture of Clay Bricks. Water SA. 1991. s. 17(3); 197-201.
61. Storm, C. ve ark. DGMK Tagungsber. Proceedings ICCS'97, Volume 2. 1997. s. 721-724.
62. Bridge, T.R. "Sludge Derived Oil-Wastewater Treatment Implications". Environ. Technol. Lett. Vol 3. 1982. s. 151-156.
63. Piskorz, J., Scott, D.S. ve Westerberg, I.B. "Flash Pyrolysis of Biomass". Ind. Eng. Chem. Proc. Design Develop, Vol 25. 1986. s. 265-270.
64. Rumphorst, M.P. ve Ringel, H.D. "Pyrolysis of Sewage Sludge and Use of Pyrolysis Coke". J. Anal and Applied Pyrolysis. 1994. s. 28:p.137-155.
65. DHV Consultants BV, R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti. Evsel ve Evsel Nitelikli Atıksu Arıtma Çamurunun Arıtımı. 21 03 2011.
66. Coskun, C., Oktay, Z. ve Ilten, N. A new approach for simplifying the calculation of flue gas specific heat and specific exergy value depending on fuel composition. Energy 34. s. 1898–1902.
67. Merino, I., Arévalo, L.F. ve Romero, F. Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives. Waste Manag. 2007. s. 27-1829-44.
68. Bouzid, J., ve diğerleri. A study on removal characteristics of copper from aqueous solution by sewage sludge and pomace ashes. J. Hazard Mater. 2008. s. 152:838-45.

69. Shiba, N.C. ve Ntuli, F. Extraction and precipitation of phosphorus from sewage sludge. Waste Manag. 2017. s. 60:191-200.
70. Ntuli, F., ve diğ erleri. P. Extraction and precipitation of phosphorus from sewage sludge: a feasibility study. In: 3rd international conference on medical sciences and chemical engineering (ICMSCE'2013). 25-26 December 2013.
71. Latosińska, J. ve Gawdzik, J. The Impact of Combustion Technology of Sewage Sludge on Mobility of Heavy Metals in Sewage Sludge Ash. Ecological Chemistry and Engineering . 2014. s. 21:465-75.
72. Erkekardes, E. Research of utilizabing dewatered sewage sludge energy and ultimate disposal. Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences M.Sc. Thesis. 2014.
73. Coskun, C., Oktay, Z. ve Dincer, I. New energy and exergy parameters for geothermal district heating systems Applied Thermal Engineering 29. 2009. s. 11-12; 2235-2242.



EĞİTİM:

- **(2019- D.E.) İzmir DEMOKRASİ ÜNİVERSİTESİ**
Fen Bilimleri Enstitüsü; Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans
- **(2013-2015) Eskişehir ANADOLU ÜNİVERSİTESİ**
(2.Üniversite/Yan Dal) Elektrik Enerjisi Üretimi, İletimi ve Dağıtımı Bölümü
- **(2011-2015) Konya SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**
Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
- **(2007-2011) İzmir ÇINARLI ANADOLU TEKNİK LİSESİ**
Elektrik-Elektronik Bölümü; Endüstriyel Otomasyon Dalı
- **(1999-2007) İzmir ÖZKANLAR İLKÖĞRETİM OKULU**

İŞ TECRÜBESİ:

- **KOÇ HO**(15.06.2012 – 15.09.2014) – Kısmi Zamanlı Öğrenci

AR-GE Departmanı: (2012) – 3 ay
(2013) – 2 ay
(2014) – 1 ay

YABANCI DİL:

- İngilizce

YAYINLAR:

COŞKUN C., OKTAY Z., KOKSAL T., BİRECİKLİ B., Co-combustion of municipal dewatered sewage sludge and natural gas in an actual power plant, ELSEVIER-ENERGY, 2020