

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**ARITMA ÇAMURLARININ BERTARAFINDA KULLANILAN
KURUTMA SİSTEMLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

SÜLEYMAN SAPMAZ

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ARITMA ÇAMURLARININ BERTARAFINDA KULLANILAN
KURUTMA SİSTEMLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

SÜLEYMAN SAPMAZ

Prof. Dr. İbrahim KILIÇASLAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Yasin KİŞİOĞLU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Ömer ÖZYURT
Jüri Üyesi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniv.

Prof. Dr. İsmail TOSUN
Jüri Üyesi, Isparta Süleyman Demirel Üniv.

Dr. Öğrt. Üyesi Muharrem EYİDOĞAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.12.2021

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Süleyman SAPMAZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Süleyman SAPMAZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Enerji tüm sanayi sektörlerinin ham maddesi, ticaret ve günlük yaşamın vazgeçilmez ögesidir. Aynı zamanda ülkelerin gelişmişlik düzeyleri enerji sarfiyatları ile doğru orantılı fakat enerji yoğunlukları ile ters orantılıdır. Ülkemiz gelişmişlik seviyesini artırabilmek için sanayi üretimini arttırmak aynı zamanda birim ürün başına harcanan enerjiyi azaltmak durumundadır. Bu nedenle enerji sarfiyatını azaltmak yolundaki her çalışma ülke ekonomisine ve gelişmişlik seviyesine katkı anlamına gelmektedir.

Atıksu Arıtma Tesislerinde ve tesiste oluşan çamurların işlenmesinde göz ardı dileyebilecek yoğunlukta enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Bu çalışmada bu enerjinin azaltılması için ne tür işlemler yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Bu tez alanındaki bilgi ve uygulama eksikliğini gidermek amacıyla akademik bilgi ve endüstriyel uygulama verilerini bir araya getirmektedir.

Çalışmanın gerçekleştirilmesi için ekipman ve altyapı desteği sunan fikirleri ile beni destekleyen Adem Kaynak'a ve Kaynaklar Metal ailesine teşekkürü borç bilirim.

Zorlu süreç boyunca beni destekleyen danışmanım Prof. Dr. İbrahim KILIÇASLAN'a, salgın sürecinde aramızdan ayrılan ve çalışmanın ilerlemesinde değerli destekler veren Prof. Dr. Durmuş KAYA hocamıza teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma kapsamında tesislerine ait verileri paylaşan ve kullanmama izin veren İstanbul (İSKİ), Bursa (BUSKİ), Antalya (ASAT) Büyükşehir Belediyeleri bünyesinde yer alan Su ve Kanalizasyon İdarelerine teşekkür ederim.

Aralık - 2021

Süleyman SAPMAZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
GİRİŞ.....	1
1. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN AMACI.....	7
1.1. Literatür Taraması	7
1.2. Ülkemizde yapılan çalışmalar	15
1.3. Tezin Amacı.....	16
2. ARITMA ÇAMURU OLUŞUMU VE İŞLENMESİ	19
2.1. Atık Su Arıtımı.....	19
2.2. Çamur Stabilizasyon İşlemleri	25
2.2.1. Çürütme (Aerobik ve Anaerobik)	26
2.2.2. Alkali İlavesi.....	29
2.2.3. Kompostlama	30
2.3. Kurutma	30
2.3.1. Çamur Bertaraf İşlemleri	31
2.3.2. Düzenli Depolama ve Toprakta Kullanma	32
2.3.3. Termal Bertaraf İşlemleri: Yakma, Gazlaştırma ve Piroliz	33
3. ÜLKEMİZDE UYGULANAN YÖNTEMLERİN ANALİZİ	39
4. KURUTMA PROSESLERİ	47
4.1. Dolaylı Kurutma Prosesi.....	51
4.2. Çamur Kurutmada Kullanılan Kurutucu Türlerinin Tanıtımı.....	55
4.2.1. Doğrudan Kurutucu Sistemler	55
4.2.2. Dolaylı Kurutucu Sistemleri	60
4.3. Ön işlemlerin kurutma davranışına etkisi	62
5. TEMASLI, KARIŞTIRICILI TİP KURUTUCUNUN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ	64
5.1. Kurutucu Isı ve Kütle Denkliği	67
5.2. Kurutma Enerji Verimliliği Göstergeleri.....	69
5.3. Kurutucu Deney Düzenegi ile Enerji Verimliliğinin Analizi	71
5.4. Veri İşleme.....	78
5.5. Atık Isının Geleneksel ve Yenilikçi Kullanımı	79
5.6. Parametre Etkilerinin İncelenmesi Deney Tasarım Metodu.....	83
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	87
6.1. Çalışma Parametrelerinin Tam Kurutma ve Kısmi Kurutma Durumunda Enerji Verimliliğine Etkisinin Analizi	88
6.1.1. Tam Kuruma Durumu (TK, %85KM)	91
6.1.2. Kısmi Kurutma Test Verileri	94
6.2. Atık Isı Kullanımı ile Enerji Verimliliğinin Artırılması.....	96

6.3.	Mevcut Tesislerde Enerji Tüketimi ve Emisyonlarda Sağlanabilecek Azaltımın Değerlendirilmesi	99
6.3.1.	Deneysel sonuçların kuramsal bir makine kullanılması durumunda elde edilecek verimliliğin analizi	100
6.3.2.	Mevcut tesislerin enerji verimliliği değerlendirmesi	101
6.3.3.	Yakma tesisinin analizi.....	103
6.3.4.	Genel Değerlendirme	103
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
	KAYNAKLAR	108
	KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	120
	ÖZGEÇMİŞ.....	121



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	AAT işlem akışı	22
Şekil 2.2.	Çamur işleme sistemi işlem akışı	23
Şekil 2.3.	AB genelinde üretilen AÇ'ye uygulanan bertaraf uygulamalarının zamana bağlı değişimi	32
Şekil 3.1.	2018 yılı çamur bertaraf uygulamalarının dağılımı.....	39
Şekil 3.2.	Değerlendirilen tesislerde genel akış şeması	40
Şekil 3.3.	İncelenen tesislere ait ısı ve elektrik enerji talebi	41
Şekil 3.4.	Biyogaz Üretim Miktarları (Sm ³ /m ³ Atık Su)	44
Şekil 3.5.	AAT Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	44
Şekil 4.1.	Kuruma prosesi kütle akış döngüsü.....	47
Şekil 4.2.	Islak katı partiküllerle beraber görülen su yapıları.....	48
Şekil 4.3.	Dolaylı ve doğrudan kurutma proseslerinin şematik gösterimi	48
Şekil 4.4.	Temaslı kurutma için penetrasyon teorisine göre kuruma cephesi karıştırma öncesi ve sonrası durumu	53
Şekil 4.5.	Döner kurutucuya ait örnek çizim	56
Şekil 4.6.	Döner kurutucuda kürek yapısı ve dönme sayesinde meydana gelen karışma hareketi.....	57
Şekil 4.7.	Arıtma çamuru kurutma prosesi için tasarlanmış döner kurutucu ve gaz yıkama sistemi.....	58
Şekil 4.8.	Bantlı kurutucu.....	58
Şekil 4.9.	Huber SE firması tarafından tasarlanmış otomatik karıştırıcılı bir solar kurutma tesisi	59
Şekil 4.10.	Disk tipi çamur kurutucu sistemi ve kesit görünümü	61
Şekil 4.11.	SMS firması tarafından tasarlanan yatay ince film kurutucu sistemi	62
Şekil 5.1.	Kürekli kurutucu ekipmanları ve malzeme akışları	64
Şekil 5.2.	Kürekli kurutucuda ısı transfer adımları	65
Şekil 5.3.	Kürekli kurutucu kürek, tahrik ve kızgın yağ başlığı sistemleri görünümü	65
Şekil 5.4.	Kurutma haznesi kütle dengesi	67
Şekil 5.5.	Kurutma haznesi enerji dengesine katılan akımlar.....	68
Şekil 5.6.	Kurutucu enerji dengesi.....	69
Şekil 5.7.	Ön çalışmalarda kullanılan prototip KK ön görünüm	72
Şekil 5.8.	Prototip KK küreklerinin üst görünümü	72
Şekil 5.9.	KK Dişli tahrik ve yağ başlığı sistemi.....	73
Şekil 5.10.	Ön testlerde kullanılan çamur görünümü ve nem değeri.....	74
Şekil 5.11.	KK besleme ve çıkış bölgesinde çamur yoğunluğu	75
Şekil 5.12.	Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine patlak görünüm	76
Şekil 5.13.	Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine ekipmansız görünüm	76
Şekil 5.14.	Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine enstrümanları ve ölçüm ekipmanları	76
Şekil 5.15.	Veri toplama sistemi bileşenleri.....	77
Şekil 5.16.	Nihai tasarıma ait çizimler	77
Şekil 5.17.	Veri toplama yazılımı ekran görüntüsü	78
Şekil 5.18.	Kurutmada atık ısı kazanımının kullanılmadığı durum	79
Şekil 5.19.	Baca gazının atık ısı geri kazanımında kullanımı	81

Şekil 5.20. ORC çevrimi şematik görünümü.....	82
Şekil 5.21. Atık ısının ORC ile geri kazanımı ve kurutmada kullanımı	82
Şekil 6.1. Tüm testlere ait nem oranı zaman grafiği.....	88
Şekil 6.2. Çalışmada elde edilen örnek enerji verimi ve Kirscher eğrisi (220C 30DD Sıcak baca gazı)	89
Şekil 6.3. Farklı nem değerlerinde anlık buharlaşma miktarları.....	89
Şekil 6.4. Kurutma süreleri (Tam ve Kısmi kurutma durumları için)	90
Şekil 6.5. Tam ve Kısmi kurutma için kuruma hızları.....	91
Şekil 6.6. TK durumu için SG oranlarının grafik gösterimi.....	93
Şekil 6.7. SG oranlarının grafik gösterimi	95
Şekil 6.8. Zaman-Kütle grafiği	96
Şekil 6.9. Değişken sıcaklıkta kuruma hızı- nem oranı grafiği a) normal kurutma durumu b) atık ısı uygulaması	97
Şekil 6.10. Nem oranına bağlı olarak kuruma hızı ve enerji tüketim grafiği	97
Şekil 6.11. Atık ısı ve normal testlerde Nem oranı EV grafiği	98
Şekil 6.12. Atık ısı testlerinde elde edilen EV değerlerinin değişimi	99
Şekil 6.13. Farklı nem değerlerinde ortalama EV değerleri (180 °C testi için).....	99
Şekil 6.14. Tesislerde revizyon sonrası elde edilecek ısı enerjisi talep grafiği.....	104

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Ham ve Çürütülmüş çamurun kimyasal bileşimi ve özellikleri	24
Tablo 2.2.	Çamur türlerinin susuzlaştırma öncesi su ve organik madde bileşimleri.....	27
Tablo 2.3.	Farklı atıklardan elde edilebilecek biyogaz ve elektrik üretimi	27
Tablo 2.4.	Aritma çamurundan üretilen biyogazın genel bileşimi	29
Tablo 2.5.	Stabilizasyon şartlarını sağlamak için gerekli kireç taşı miktarı.....	29
Tablo 2.6.	Çeşitli çamur türlerine ait ısı değer aralıkları	34
Tablo 2.7.	Çamur termal bertaraf işlemleri için yatırım maliyeti tablosu	34
Tablo 3.1.	Tesis işletme verileri.....	40
Tablo 3.2.	AAT Aritma, elektrik tüketimi ve biyogaz üretim verileri	43
Tablo 5.1.	KK ölçüleri.....	74
Tablo 5.2.	Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine ölçüleri	75
Tablo 5.3.	FT tasarımda 2 faktör ve 3 seviyeli bir deney için gerekli deney listesi ...	84
Tablo 5.4.	Taguchi metoduna göre oluşturulmuş sembolik deney listesi	85
Tablo 5.5.	Gerçek seviye değerlerini gösteren deney planı	86
Tablo 6.1.	Tam kurutma durumu için elde edilen kurutma verileri	91
Tablo 6.2.	Tam ve kısmi kurutma durumu için elde edilen enerji tüketim ve kuruma hızı verileri.....	92
Tablo 6.3.	TK durumu için SG oranlarının ağırlıklandırılmış dağılımı	93
Tablo 6.4.	TK durumu için veri ortalamalarının ağırlıklandırılmış dağılımı	94
Tablo 6.5.	Kısmi kurutma durumu için elde edilen kurutma verileri	94
Tablo 6.6.	Taguchi yöntemiyle hesaplanan SG oranları	94
Tablo 6.7.	KK durumu için veri ortalamalarının ağırlıklandırılmış dağılımı	95
Tablo 6.8.	Değerlendirilecek kurutucu kapasitesi ve kurutma parametreleri.....	100
Tablo 6.9.	Ortalama ve en iyi durum arasında enerji kazanımı tablosu.....	100
Tablo 6.10.	Deneysel sistemle 5 ton/saat kapasitede elde edilebilecek tasarrufun değerlendirilmesi.....	101
Tablo 6.11.	Deneysel kazanım oranları ile farklı tesislerde elde edilebilecek tasarrufun değerlendirilmesi.....	101
Tablo 6.12.	Toplam tasarrufun değerlendirilmesi.....	101
Tablo 6.13.	Nem değerlerinin değiştirilmesi ile sağlanacak kurutma yükü azaltımı.....	102
Tablo 6.14.	Nem değerlerinin değiştirilmesi elde edilebilecek enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı	102
Tablo 6.15.	Reaktör ısıtmasındaki yakıt ile kurutucu çıkış gazlarındaki enerjinin karşılaştırması	102
Tablo 6.16.	Reaktör ısıtmasından elde edilecek tasarrufun değerlendirilmesi	103
Tablo 6.17.	Yakma tesisinde ototermal yanma ile elde edilecek tasarruf.....	103

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Δh_{ev}	: Buharlaşma Enerjisi
d/d	: Dönme Hızı (devir/dakika)
P	: Ortam Basıncı
PC	: Kirletici Konsantrasyonu
P_g	: Kuru Havanın Kısmi Basıncı
P_{toplam}	: Toplam Basıncı
$P_v(T)$: Gaz Karışımındaki Su Buharının “T” Sıcaklığındaki Kısmi Basıncı
$P_{v,su}$: Sıvı Fazdaki Suyun Buhar Basıncı
X_{denge}	: Denge Nem Oranı
X_{kritik}	: Serbest Suyun Tükendiği Nem oranı

Kısaltmalar

AAT	: Atık Su Arıtma Tesisi
AÇ	: Arıtma Çamuru
APLR	: Yıllık Kirletici Yüğü
CPLR	: Kümülatif Kirletici Yüğü
DAF	: Çözünmüş Hava Flotasyonu
DK	: Dolaylı Kurutucu
DT	: Deney Tasarımı
EAAT	: Evsel Atık Su Arıtma Tesisi
EİGM	: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EN-yıl	: Eşdeğer Nüfus-yıl
EQ	: İstisnai Kalite
KAAT	: Kentsel Atık Su Arıtma Tesisi
KK	: Kürekli Kurutucu
KM	: Katı Madde Oranı
RTD	: Bekleme Süresi Dağılımı
SDP	: Çamur Kuruma Potansiyeli
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
YSA	: Yapay Sinir Ağı

ARITMA ÇAMURLARININ BERTARAFINDA KULLANILAN KURUTMA SİSTEMLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Atıksu Arıtımından kaynaklanan çamurlarının işlenmesi ve bertarafı kentleşmenin artması ile büyüyen bir problemdir. Çamur atık sulardaki katı kirleticilerin, ağır metallerin patojenlerin ve organik maddenin bileşiminden oluşan bir karışımdır. Kalorifik değeri nedeniyle katı yakıt, mikro element içeriği nedeniyle gübre olarak görülebilmektedir. Fakat her iki kullanım için de sağlanması gereken özel şartlar vardır. Çamur bertarafı için her belediye kendine uygun metodu uygulamaktadır. Çoğunlukla çamurlar depolama sahalarına dökülerek bertaraf edilmektedir. Fakat bu uygulama uzun vadede sürdürülebilir değildir. Bu nedenle belediyeler kurutma ve yakma tesisleri kurmaktadır.

Kurutma işlemi ile çamur miktarı azaltılarak sterilizasyon sağlanmaktadır. Kuru çamur yakıt olarak çimento tesislerinde, katı yakıtlı enerji tesislerinde veya müstakil yakma tesislerinde yakılarak kullanılabilir. Çamur kurutma işlemi enerji yoğun bir işlemdir. Bu işlemin en verimli şekilde gerçekleştiği sistemler temaslı tip kurutuculardır. Buna rağmen bu kurutucularda da enerji verimliliğini artıracak çözümler bulunmaktadır.

Bu çalışmada temaslı tip kurutucuda çalışma parametrelerinin ve kurutma atık ısının geleneksel ve inovatif yöntemlerle kullanımları ve enerji verimliliğine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğalgaz tasarrufu ve emisyon azaltım potansiyeli olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre mevcut tesislerde maliyet gerektirmeyen tedbirlerle büyük miktarda kazanım sağlanabilmektedir. Kısmi kurutma ve atık ısı geri kazanım uygulaması ile yakma tesislerinde tüketilen ek yakıt miktarı azaltılabilmektedir.

Çamur işleme süreçleri, susuzlaştırma ekipmanlarından başlanarak kurutucu çıkışı ve yakma tesisi parametrelerine kadar enerji verimliliği açısından irdelendiğinde kamu idareleri tarafından büyük mali tasarruf ve ülkemiz açısından emisyon azaltım imkânları sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Arıtma Çamuru, Bertaraf, Enerji Verimliliği, Temaslı Kurutucu.

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF DRYING SYSTEMS USED FOR DISPOSAL OF SEWAGE SLUDGE

ABSTRACT

The processing and disposal of sludge from Wastewater Treatment is a growing problem with increasing urbanization. Sludge is a mixture of solid pollutants, heavy metals, pathogens and organic matter in wastewater. It can be seen as a solid fuel due to its calorific value and as a fertilizer due to its microelement content. However, there are special conditions that must be met for both uses. Each municipality applies its own method for sludge disposal. Mostly sludge is disposed of by dumping in landfills. However, this practice is not sustainable in the long run. For this reason, municipalities are establishing drying and incineration plants.

With the drying process, the amount of sludge is reduced and sterilization is provided. Dry sludge can be used as fuel in cement plants, solid fuel power plants or incinerators. Sludge drying is an energy-intensive process. The most efficient dryers are the contact-type dryers. However, some solutions can increase energy efficiency in these dryers as well.

In this study, optimizing working parameters and the use of conventional and innovative methods of drying waste heat in a contact dryer and its effect on energy efficiency are examined. The results obtained are calculated as natural gas savings and emission reduction potential. According to the test results, a large amount of gain can be achieved with measures that do not require cost in existing facilities. With partial drying and waste heat recovery application, the amount of additional fuel consumed in incineration plants can be reduced.

When the sludge processing processes are examined in terms of energy efficiency, starting from the dewatering equipment to the parameters of the dryer outlet and incineration plant, it has been seen that great financial savings and emission reduction opportunities can be provided by public administrations for our country.

Keywords: Sewage Sludge, Disposal, Energy Efficiency, Contact Dryer.

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun artışına paralel olarak tüketim ve buna bağlı olarak üretilen atık miktarı artmaktadır. Atıklar; evsel atıklar, sanayi tesislerinden kaynaklanan endüstriyel atıklar, zirai faaliyetlerden kaynaklanan bitkisel atıklar vb. çeşitli gruplarda incelenebilirler. Endüstriyel atıklar tesiste uygulanan işlemlere bağlı olarak çeşitli ve değişken kimyasal özelliklerde ve katı ya da sıvı fazda olabilirler. Evsel kaynaklı atıklar ise katı atıklar ve sıvı atıklar olarak 2 ana başlıkta incelenebilir. Katı atıklar bölgesel olarak mahallelerde bulunan konteynerlerden toplanarak atık bertaraf/biriktirme tesislerine nakledilmektedir. Sıvı atıklar ise kanalizasyon sistemleri ile toplanarak işlenmekte ya da deşarj tesisleri ile denize, akarsulara, göllere salıverilmektedir.

Su kaynaklarına salıverilen atıkların sağlık ve çevresel açıdan etkileri yakın zamana kadar göz ardı edilmekteydi. Çevresel kaynaklı hastalıkların ve afetlerin artması ile çevre konusunda duyarlılık sürekli olarak gelişmektedir. Bu duyarlılık artışı sayesinde günümüzde yasal mevzuat ile bu eksiklik giderilmiş, atık su arıtma tesisleri (AAT) kurularak deşarj edilecek olan sıvı ve katının birbirinden ayrılması, deşarj edilecek sıvının belirli kirleticiler açısından uygun değerlerde olması şartı aranmaya başlanmıştır. Arıtma çamuru, atık sulara uygulanan fiziksel, kimyasal veya biyolojik işlemler sonucunda sıvı veya yarı katı halde ve kokulu olarak ortaya çıkan bir yan üründür. Evsel atık su arıtma tesislerinde elde edilen çamurun işlenen toplam suya hacimsel oranı çok küçük olmasına rağmen toplam işletme maliyetinin %50'si çamurun işlenmesine harcanmaktadır.

Ülkemizde 2018 yılı verilerine göre nüfusun %85'i kanalizasyon şebekesine bağlı durumdadır. Kanalizasyon şebekesi ile hizmet veren 1357 belediyede toplam 991 atık su arıtma tesisi kuruludur. Bu tesisler arıtma yöntemlerine göre 55 fiziksel, 527 biyolojik, 203 gelişmiş 206 doğal arıtma olarak hizmet vermektedir. Toplam atık suyun (4.236.419.000 m³/yıl) %24'ü fiziksel, %27'si biyolojik, %47'si gelişmiş, %0,3'ü ise doğal arıtma tesislerinde işlenmektedir.

Belediyeler tarafından kişi başına günlük 188 litre atık su deşarjı gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde 1994 yılında atık suyun %90'ı arıtılmadan (%90 oranında akarsu ve denizlere) deşarj edilmekteydi. 2018 yılı verilerine göre atık suyun %88,3'ü arıtılmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2016 verilerine göre belediyelerde çevre harcamalarının

(6.832.311.196 TL) yaklaşık %63'ü su hizmetlerine, %30'u ise atık su hizmetlerine harcanmaktadır(URL-1). Ülkemizde 2018 yılı verilerine göre 3,5 kg/EN-yıl çamur oluşmaktadır. Bu durumda yıllık olarak 900.000 ton susuzlaştırılmış çamurun bertaraf edilmesi gerekmektedir. Çamur bertarafında uygulanan 3 yöntem vardır. Bunlar yakma, depolama ve toprak katkısı olarak kullanılmaktadır. 2018 yılında ülkemizde arıtma tesislerinden çıkan 857.000 ton çamurun % 57'si düzenli depolama sahalarına dökülerek bertaraf edilmiştir. Çamurun %23'ü ise yakılarak bertaraf edilmiştir. Gelecekte depolamanın azalması ve yakma/diğer termal işlemlerin oranlarının artması öngörülmektedir.

AB ile beraber ülkemizde üretilen çamurun büyük kısmı deponi sahalarında biriktirilmektedir. Yakma uygulamasının ise ülkemizde henüz yaygınlık kazanmadığı görülmektedir. ABD'de çamurun %41'lik kısmı tarımsal olarak kullanılmaktadır. Çamurların düzenli depolanması uygulayıcılar açısından en kolay yöntemdir. Fakat depolama uygulamasında çok fazla alan gereksinimi olması ve depolama sahalarına taşıma sırasında oluşabilecek bulaşma riskleri de göz önüne alınmalıdır.

Arıtma çamurları bünyesinde Azot, Fosfor, Potasyum gibi besin elementleri içerdiği için bitkiler için gübre niteliği taşımaktadır. Stabilize edilmiş ve kurutulmuş çamurların gübre potansiyeli olanlar biyokatılar olarak adlandırılmakta ve küresel pazarda yer alan ticari bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Biyokatı terimi çamur katı maddesinin biyolojik stabilizasyon ve/veya çürütme işlemlerinin ardından faydalı olarak kullanılacak bir organik madde olduğunu göstermektedir(Syed-Hassan ve diğ., 2017). Ülkemizde "Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına dair Yönetmelik" ile toprakta uygulama süreçleri düzenlenmiştir. Yönetmelik ile çamurda bulunan kimyasalların alıcı ortamlara bulaşması, vektörlerle taşınması ve gıda maddeleri ile insan vücuduna girişini engelleyecek tedbirler alınmıştır. ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA) evsel kaynaklı atık suların işlenmesi sonucu ön çökeltmeden ileri arıtma işlemlerine kadar olan süreçte çıkan tüm katı ve yarı katı (çamur, köpük, sediment vb.) özellikteki atıkları biyokatı olarak sınıflandırmaktadır(URL-3). Biyokatıdan beklenen özellikler ve kullanım (toprakta kullanım ve yakma) şartları (EPA CFR 40 Part 503) belirlenmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde biyokatılar, çamurun gördüğü işlemlere bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Değerlendirme kirletici ve patojen limit miktarlarına göre yapılıyor.

İstisnai Kalite (EQ), Kirletici Konsantrasyonu (PC), Kümülatif Kirletici Yüğü (CPLR), Yıllık Kirletici Yüğü (APLR) olmak üzere 4 sınıfta değerlendirilmektedir. EQ sınıfı çamurun tüm kirletici limitlerinin altında olması ve patojen seviyesinin A sınıfı olması gerekmektedir. PC için kirletici kriteri aynı olmakla beraber patojen seviyesi B sınıfı olan çamurları ifade etmektedir. Bu iki sınıf biyokatı piyasada kullanım alanı ve miktarında sınır olmaksızın satılabilmektedir. CPLR ve APLR sınıfı biyokatılar kirletici limitlerini aşsa da konsantrasyon limitlerinin altında kalan biyokatılardır. Bu ürünlerin kullanım alanları ve miktarlarının raporlanması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Çamurun toprakta kullanımını ülkemizde yaygın değildir.

Ülkemiz birincil enerji kaynakları açısından dışa bağımlı durumdadır. Enerji denge tabloları incelendiğinde 2020 yılında toplam enerji arzının (147 MTEP) %77'si ithal kaynaklardan sağlanmıştı(URL-7). Ülkemiz 2020 yılı elektrik üretiminin yaklaşık %44'ü ithal kaynaklar (doğalgaz ve kömür) ile gerçekleştirilmiştir. Yerli kaynaklardan üretimin artırılabilmesi için yerli kömür ve hidroelektrik başta olmak üzere yenilenebilir kaynaklara dayalı santral kurulumları teşvik edilmektedir. Çamurun termal yollarla bertaraf edilmesi enerji üretim ve tüketim dengesi açısından değerlendirilmelidir.

Çamurların yakarak bertaraf edilmesinde enerji (elektrik) üretimi, farklı sektörlerde (çimento sanayi) kullanım ile tek başına yakma ve biyokütle santrallerinde ek yakıt olarak yakma gibi çeşitli yöntemler izlenebilir. Çamurlar, enerji üretim amaçlı kullanımda; biyokütle/kömür yanında ikincil yakıt olarak yakılabilir. Burada kullanılacak çamurun asıl yakıt oranı yaklaşık %5 değerinde olmalıdır. Bu bileşimde susuzlaştırılmış çamur kullanımını yanma sıcaklığında belirgin bir azalmaya neden olmamaktadır(Stasta ve diğ., 2006). Farklı çalışmalarda çamurun toplam yakıt içerisindeki oranı %40'a kadar artırılmış ve belirgin bir problem oluşmamıştır(Rajczyk ve diğ., 2014). Çamur ısı değeri yüksek ise tek başına yakıt olarak da kullanılabilir. Bu işlem için akışkan yataklı çamur yakma kazanları kullanılır. Akışkan yataklı kazanlar kül bırakan yakıtların yakılmasında işletme kolaylığı sağlamaktadır. Bu tür bir kazanda ısı değeri dikkate alınarak çamur susuzlaştırılmış veya kurutulmuş olarak beslenebilir. Susuzlaştırılmış çamurun akışkan yataklı kazanlarda yakılmasında genellikle ek yakıt kullanılmaktadır. Güncel durumda en çok karşılaşılan yakarak bertaraf yöntemi çimento fabrikalarında yakma işlemidir. Bu tür bertaraf işleminde yakıt ve ham madde tasarrufu sağlanmaktadır. 1 ton kuru çamur

yakılmasıyla 1/3 ton ham madde kazancı elde edilmektedir. Yanma sonucu oluşan kül klinker yapısına katıldığı için bu yöntem ilave atık oluşturmayan bir bertaraf yöntemidir(Stasta ve diğ., 2006). Ürün kalite beklentisi dikkate alınarak beslenecek çamur ve ana yakıt oranı optimize edilmelidir.

Atık çamur kurutucudan beklenenler; istenen nem değerinin patojenler giderilerek ve kokuya neden olmadan bertaraf işlemine hazırlanmasıdır. Fakat kurutma işlemi enerji yoğun bir süreçtir. Kurutma kaynaklı enerji tüketimi 1988 yılının verilerine göre AB ve İngiltere endüstriyel enerji tüketiminin %10'unu oluşturmaktadır. 1996 yılında yapılan bir çalışmaya göre ise İngiltere endüstriyel enerji tüketiminin %12'si kurutma proseslerinde kullanılmaktadır(Kemp, 2014). Toplam enerji tüketimleri ve yukarıda belirtilen oranlar dikkate alınırse kurutma prosesinin enerji yoğunluğu hakkında net bilgi sahibi olunabilir.

Uygulanan yöntemle göre birim buharlaşan su miktarı başına enerji tüketimleri (2500-5000 kJ/kg su) değişmektedir(Bennamoun ve diğ., 2013). Saf suyun normal atmosfer basıncında 100 °C sıcaklıkta buharlaşması için gerekli teorik enerji miktarı 2500 kJ/kg olarak verilmektedir(Bianchini ve diğ., 2015). Çoğu endüstriyel kurutma prosesinde, bir saatte tonlarca suyun buharlaştırması gerekmektedir. Bu veriler ile bakıldığında kurutma işlemi ile çalışan proseslerde çevresel, ekonomik, rekabetçilik konularında gelişme sağlanabilmesi için kurutma prosesinin enerji verimliliği açısından incelenmesi gerekmektedir. Teorik enerji tüketimleri ve endüstriyel pratiğin karşılaştırması, kurutucu enerji tüketimlerinin azaltılması konusunda çalışma yapılması gerektiğini göstermektedir(Mujumdar, 2007).

Kurutma bilimi insanoğlunun medeniyet süreci kadar eski bir proses olmakla beraber günümüzde bilim insanların bu alana ilgisi yoğun olarak devam etmektedir. Bazı ürünlere ait kurutma davranışları halen net olarak anlaşılmış değildir. Piyasada pek çok temaslı çamur kurutucu olmakla beraber ürün tasarımı ve hesapları tecrübi gözlemlere ve deneysel verilere dayanmaktadır(Arlabosse ve Chitu, 2007). Katı fazdan sıvıyı buharlaştırmanın oldukça basit olması ve kurutma işleminin tarihi bir alt yapısı olmasına rağmen; kurutma prosesinin bilimsel olarak halen olgun bir alan olamamasının çeşitli nedenleri vardır. Bu nedenler kurutulacak ürün ile ilgili olarak; içsel ve dışsal olarak sınıflandırılabilir. İçsel faktörler olarak kurutulacak ürünün akışkan/katı vb. farklı

formlarda olması, yeni geliştirilen proses gereği yeni bir ürüne ait kurutma karakteristiği ile karşılaşılması, kurutulacak malzeme/ürünlerin zaman/nem oranı/kurutucu konumuna bağlı olarak doğrusal olmayan kurutma davranışları, ısı ve kütle iletimlerinin dinamik olarak değişmesi sıralanabilir. Ürün dışındaki etkenler olarak kurutucu ortamın (yanma gazları, sıcak hava, kızgın buhar vb.) çeşitli özellikleri (akış hızı, bağıl nem, sıcaklık vb.), küresel piyasalarda rekabet edebilmek için maliyet etkin, kaliteli; çevresel sorunlara sebep olmamak için enerjiyi verimli kullanarak salımları arttırmayan, sağlık açısından zehirli gazların tam olarak emilmesini sağlayacak; üründe yanıcı-patlayıcı özelliği tamamen giderecek bir kurutma işlemi beklenmesi sıralanabilir. Bu ölçütler göz önüne alındığında kurutma sürecinde hala bilimsel olarak çalışılması gereken çok fazla alan bulunmaktadır.

Literatürde kurutma alanında çok sayıda yayın yer almaktadır. Fakat her ürünün kurutma karakteri farklıdır. Bu nedenle kurutma proseslerine ait sorunlar, ürüne özeldir. Uluslararası literatürde bu çalışmanın konusuna giren; arıtma çamurlarının kurutma davranışına ilişkin çalışmalar 2000'lerin başından itibaren dikkate değer konuma gelmektedir. Bununla beraber bu alanda az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genellikle temaslı kurutma davranışını anlamaya yönelik çalışmalardır(Arlabosse ve diğ., 2007; Ferrasse ve diğ., 2002; Fraikin ve diğ., 2015). Bazı çalışmalarda deneysel kurutma davranışları, oluşturulan kurutucu modelleri ile karşılaştırılarak güvenilirlikleri test edilmektedir(Arlabosse ve diğ., 2004). Ayrıca akademik çalışmalarda sürekli akışlı prosesleri test etmek için yığın tipi deney düzenekleri kullanıldığı görülmektedir(Arlabosse ve diğ., 2005).

Çamur kurutucundan beklenenler; istenen nem değerinin, patojenler giderilerek, kokuya neden olmadan, enerjiyi etkin kullanarak sağlanmasıdır. Mevcut araştırmalar ilk 2 maddeyi irdelerken 3. maddeye genellikle odaklanmamaktadırlar. Çamur kurutma parametrelerinin enerji verimliliğine etkisi literatürde herhangi bir çalışmada incelenmemiştir. Temaslı tip kurutucularda atık ısı kullanımını da herhangi bir çalışmada konu alınmamıştır.

Çamur kurutma prosesi AAT tesislerinin tasarımı ve işletme sorumluluğu açısından Çevre Mühendisliği, arıtma aşamalarında uygulanacak işlemler ve kurutma sürecinde gerçekleşen kütle ve ısı taşınım olayları açısından Kimya Mühendisliği, kurutma

cihazlarının mekanik tasarımı açısından Makine Mühendisliği araştırma alanlarına giren disiplinler arası bir konudur. Bahsedilen konu yukarıda belirtilen alanlarla ilgili pek çok kriter dikkate alınarak enerji verimliliği yüksek bir tasarım geliştirilmesi için çalışılmıştır. Arıtma tesislerinin toplam işletme maliyetinin % 50-60'ını çamur işleme prosesi oluşturmaktadır(Kütük ve Aksoy, 2013). Bu nedenle sistem enerji verimliliğinin artırılması, kurutulmuş çamurun yakıt olarak kullanılabilir olması atık çamur kurutulması prosesini Enerji Mühendisliği alanının konuları arasına getirmektedir. Bu nedenle kurutma prosesi 3 farklı disiplinin -Kimya, Mekanik ve Enerji- kesişiminde yer alan bir temel işlem olarak değerlendirilebilir(Land, 2011).

Ülkemizde tarımsal ürünlerin, orman ürünlerinin, özel kimyasal ürünlerin kurutulması gibi çeşitli sektörlerde çeşitli tip kurutucular kullanılmaktadır. Geleneksel ürünlerin kurutulması amacıyla kullanılan bazı kurutucu türleri yerli bilgi ve kaynaklarla üretilebilmektedir. Tez kapsamında incelenen temaslı tip kurutucuların tasarımları deneysel ön çalışmalarla elde edilen veriler ile gerçekleştirilebilmektedir. Ülkemizde temaslı tip kurutucuların tasarım kapasitesine sahip, bu alanda uzman firma bulunmamaktadır. Bu çalışma temaslı kurutucu sistemlerinin yaygınlaşması ve tasarım bilgisi oluşturulabilmesi için de dayanak oluşturmaktadır.

Çamur bertarafı için çeşitli yöntemler önerilmekte/uygulanmaktadır. AAT sorumluluğu kamuya ait olduğu için bertaraf ve diğer işlemler için yatırım ve işletme maliyetleri kamu bütçesinden karşılanmaktadır. Yapılan literatür ve mevzuat taramasında çamurun bertaraf uygulamalarında kurutma prosesinin mutlaka kullanılması gerektiği görülmüştür. Kurutma prosesi ise enerji yoğun ve işletme maliyeti yüksek bir işlemdir. Kamu kaynaklarının verimli kullanılması, enerji verimliliğinin sağlanması ve belediye çevresel maliyetlerinde tasarruf sağlanabilmesi için genelde bertaraf süreçleri ve özelde kurutma prosesinin enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca çamur kurutma sanayisinde ülkemizde yerli sanayiye ve bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Kurutucu tasarım bilgisinin geliştirilmesi ile yerli üretim ekipman kullanım imkanları artmaktadır. Bu durumda sanayici açısından yeni teknolojiler kazanılmış ve kamuya ait yatırım maliyetlerinde azalma imkânı sağlanmaktadır.

1.1. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN AMACI

1.2. Literatür Taraması

Tunçal T, 605.000 m³/gün kapasiteli bir EAAT’nde polielektrolit ve kireç taşı gibi katkı maddeleri ile çamur organik madde içeriğinin kurutma üzerindeki etkilerini incelemiştir(Tunçal, 2010). Çalışmada incelenen çamur türleri biyolojik çamur, kaba birincil çamur, karışık çamur, susuzlaştırılmış çamur ve kireçlenmiş çamur olarak ifade edilmiştir. Halojen radyasyonu ile kurutma yapılan numunelerin kuruma performansları üzerinde lineer regresyon modeli ile istatistiksel analiz yapılmıştır. Çalışma sonucunda her bir çamur tipinin farklı kuruma potansiyeli olduğu ortaya çıkmıştır. Çamur organik bileşimi ve kullanılan katkı maddeleri kuruma potansiyelini belirgin ölçüde etkilemektedir. Elde edilen sonuçlara göre polielektrolit katkısı kuruma potansiyelini azaltmaktadır. Bu nedenle bu katkı miktarının optimize edilmesi gereklidir. Polielektrolitten farklı olarak kireç taşı dozajında meydana gelen artış SDP (kuruma potansiyeli) değerini artırmaktadır. Ayrıca organik bileşen miktarının artışı kurutma potansiyelini azaltmaktadır. Bu nedenle birincil çamur ve biyolojik çamuru oranı optimize edilerek elde edilen karışım çamurları ile biyolojik çamurların kurutma ve susuzlaştırma işlemi daha verimli hale getirilebilir

Arlabosse, yaptıkları çalışmada deneysel yığın kurutma cihazından çamurun kurutma sırasında gösterdiği farklı fazlara ait özgül ısı, desorpsiyon enerjisi gibi değerleri kürekli tip bir kurutucu modelinde kullanarak deneysel çalışması yapılan belirli tip çamurun kürekli tip kurutucuda kuruma potansiyelini ortaya koymuşlardır(Arlabosse ve diğ., 2004). Model üzerinde yapılan çalışma sahada kürekli tip bir kurutucu ile doğrulanmıştır. Kurulan model geleneksel kurutma eğrilerinde görülen farklı kuruma karakteristiklerini de göz önünde tutmaktadır. Bu sayede çamurun yapışkan – granül faz geçişini dikkate almakta ve gerçeğe yakın değerler sunmaktadır. Bu çalışma ile herhangi bir çamurun deneysel düzeneğe analizinin ardından kürekli tip kurutucu ile hangi kuruluk derecesine kurutulabileceği ortaya konmuştur.

Ferrasse ve ark, kurutma sürecinde ısı momentum ve kütle hareketlerini anlamak üzere kurdukları deney düzeneğinde çamurun kurutmanın bir noktasında yapışkan bir kıvama geçtiğini ve karıştırıcının tüm kütleyle beraber olarak karıştırmaya başladığını

gözlemişlerdir(Ferrasse ve diğ., 2002). Geçişin olduğu noktada nem oranı 2,2 kg su/kg kuru madde olarak ölçülmüştür. Meydana gelen dönüşümde çamurun öncelikle genleştiğini ve sonrasında farklı parçaların aglomere olarak bütün bir yapı olarak dönmeye başladığını gözlemlemişlerdir. Sıcaklığın kurutma üzerinde etkisi ise birinci aşamada süreyi kısaltmak yönündedir. Ancak yapışkan fazın geçirdiği süre artan kurutma sıcaklığı ile artmaktadır. Bu nedenle endüstriyel tesislerde kurutma süresini kısaltmak için sıcaklığın optimize edilmesini önermektedir. Yığın karıştırmalı kurutucu için kritik bir karıştırıcı hızı olduğu ve bu hızın 40-60 d/d arasında olduğu da gözlenmiştir. Kritik hız değerine kadar ısı transferi artarken kritik değerlerin üstünde belirgin bir artış görülmemiştir.

Léonard ve arkadaşları 2 farklı AAT'den elde edilen arıtma çamurlarının konvektif bir kurutucuda kurutma davranışlarını kurutucuya beslenen hava sıcaklığı, akış hızı, nem oranı gibi kriterlerin etkisini incelemiştir(Léonard ve diğ., 2005). A tesisinin çamurlarında sabit bir kurutma akısı görülürken B tesisinde uzun ve azalan bir kurutma akısı görülmüştür. Yapılan hassasiyet analizleri işletme sıcaklığının kurutma kinetiğini etkileyen en önemli faktör olduğunu göstermiştir. İncelene her 2 tesise ait çamurda da su buharlaşma kapasitesi ve maksimum kurutma akısı arasında doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. Kurutma süresi çamur tipinden bağımsız olarak hız ve sıcaklık ile doğru ilişkide iken nem ile ters orantılıdır.

Arlabosse ve arkadaşları kürekli tip kurutucuları termal tasarımını geliştirmek üzere yaptıkları çalışmada çamurun kurutma sırasındaki davranışını gözlemek üzere bazı laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar yapmışlardır(Arlabosse ve diğ., 2005). Bu çalışma ile çalışılan çamur için bileşim, özgül ısı, sorpsiyon eğrisi toplam desorpsiyon ısısı gibi değerleri elde etmişler ve yığın kurutucuda çamurun kuruma kinetiğini incelemiştir. Bu veriler ile bir sürekli tip kurutucu modeli oluşturmuşlardır. Modelde kuruma hızının sabit olduğu ve lineer olarak azaldığı iki farklı bölge tanımlanarak çalışma yapılmıştır. Model sonuçları ve deneysel sonuçların tutarlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Milhe ve arkadaşları çamurun kuruma sırasında kurutucu içerisinde akışını modellemek için Markov Zinciri teorisini kullanmışlardır(Milhe ve diğ., 2015). Kürekli tip kurutucu için yapılan çalışmalarda şaft üzerinde yer alan her bir kürek bir hücre olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan model sirkülasyon süresine (dönme hızı) ve hücre hacmine

(doldurma oranı) bağlıdır. Sirkülasyon oranı dağılım genişliğini yani çamurun kurutucu boyunca homojen dağılımını etkilemektedir. Doluluk oranı ise çamurun kurutucuda ortalama kalma süresi ve nihai nem oranını etkilemektedir.

Fraikin ve arkadaşları farklı tip çamurların farklı parametrelerle kurutulmasını inceledikleri çalışmalarında 5 güne kadar olan bekleme süresinin kurutma davranışı üzerinde etkisi olmadığını tespit etmişlerdir(Fraikin ve diğ., 2015). Bu çalışmada maksimum kurutma akısının kurutucu hava akış hızı ve sıcaklığının artışı, nemim azalması ile arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu çalışma kurumanın yumuşak/sakin olduğu durumda (düşük sıcaklık ve hız, yüksek nem) kuru ürün hacminin daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca kurutma öncesinde ekstrüzyona tabi tutulan çamurlarda ekstrüzyon basıncının artışı ile kurutma akısının azalması arasında doğrusal ilişki olduğunu tespit etmişlerdir.

Wzorek ve Tanczuk evsel arıtma çamurlarından biyokatı yakıt üretim prosesinin teknik ve ekonomik analizini yapmıştır(Wzorek ve Tańczuk, 2015). Bu çalışmada Polonya’da yasal mevzuat gereği 2016 yılı başından itibaren kuru maddede organik karbon oranı %5 den fazla olan ve kalorifik değeri 6 MJ/kg üstünde olan çamurların deponi sahalarında biriktirilmesinin yasaklanacağını beyan etmektedir. Yaptıkları çalışmada 1,5 ton/saat çamur besleme kapasitesinde bir tesisin ekonomik olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca maliyet kalemleri arasında en büyük oranının kurutma maksatlı kullanılan doğalgaza ait olduğunu ve doğalgaz fiyatında meydana gelebilecek %10’luk artışın projenin ekonomik olmasını engellediğini tespit etmişlerdir.

Bianchini çamur kurutma prosesinin atıkları yakarak enerji üreten atık yakma tesisine entegrasyonu ile gerçekleştirilebileceğini ve bu sayede tesis enerji verimliliğinin artacağını ifade etmiştir(Bianchini ve diğ., 2015). Örnek çalışmanın yapıldığı tesiste entegrasyon ile 1 MW ısı enerjisinin baca gazından geri kazanılabileceği ve baca gazı işleme ünitesinde yılda 10300 ton su tasarrufu sağlanacağı ortaya konmuştur. Ayrıca yapılan hesaplar sonucunda kurutulan çamurun direk yakma ile kullanılması durumunda 1,5 MW ısı enerjisi üretilebileceği ortaya konmuştur

Stasta ve arkadaşları arıtma çamurlarının Çek Cumhuriyeti ve AB ülkelerinde mevzuat ve bu ülkelerdeki termal işleme tabi tutulan çamur miktarına ait istatistikleri vererek

yakarak bertaraf işlemlerinin gelecek yıllarda yaygınlaşacağını ifade etmişlerdir(Stasta ve diğ., 2006). Isıl bertaraf yöntemlerini özetleyerek bir çimento fabrikası için klinker ocağında çamurun yakılmasının enerjik, ekonomik ve yasal açıdan incelemiştir. 36 adet arıtma tesisi ve çimento fabrikalarının konumlarını inceleyerek 20 arıtma tesisini aday tesis olarak belirlemiştir. Projelendirilen çalışmada kömür ve çamur oranının fırına eşit miktarda besleneceği ve ton çamurun yakılması ile 0,4 ton kömür tasarrufu yapılacağı ortaya konmuştur. İşletme, bakım, hammadde kazancı gibi etkenler de dikkate alınarak 81,2 \$/saat tasarruf yapılacağı ortaya konmuştur.

Vaxelaire, 1993 yılında Puiggali tarafından ağaç kurutması ile ilgili olarak ortaya koyduğu kurutma potansiyeli kavramını arıtma çamurlarının konvektif kurutması için düzenlemiştir(Vaxelaire ve Bongiovanni, 2000). Buna göre kurutmada dış parametreler olan kurutucu akışın sıcaklık, bağıl nem ve akış hızına bağlı olarak elde edilebilecek bir kurutma potansiyeli vardır. Bu parametrelerin optimizasyonu yapılarak istenen kurutma potansiyeli sağlanabilir. Bu durumda işletme maliyetleri ve donanım verimi artırılacaktır.

Kemp ve arkadaşları deneysel kurutma kinetiği verilerinin işlenmesini incelemiştir(Kemp ve diğ. 2001). Kurutma eğrilerinin uydurulması ve yumuşatılmasına ilişkin çeşitli metotlar değerlendirilmiş ve kıyaslanmıştır. Aşırı yumuşatma yaparak hayati verilerin kaybolmasını önleyerek endüstriyel tasarım için kullanılabilir eğrilerin üretilmesi için metotlar önermişlerdir. Kurutma Oranı, nem içeriği, Krischer grafiklerinin elde edilmesi için gerekli ölçüm ve deney düzeneği hakkında bilgi vererek konuyla alakalı formülleri vermişlerdir.

Spinosa ve arkadaşları arıtma çamurlarının işlenmesine yönelik inovatif çözümleri derlemiştir(Spinosa ve diğ., 2011). Bu çalışmada Evsel atık su arıtma tesislerinde elde edilen çamurun işlenen toplam suya hacimsel oranı çok küçük olmasına rağmen toplam işletme maliyetinin %50 si çamurun işlenmesine harcandığı belirtilmektedir. Çamur kurutma tesislerinin sayısının hızla arttığı ifade edilerek bu sayının 1500'e ulaştığı bildirilmektedir. Susuzlaştırma işleminin kurutma sistemi ile entegre olması ve kurutma verimini maksimum olduğu susuzluk derecesinde kurutma işlemi yapılması önerilmektedir. Temaslı kurutucularda yaygın olarak görülen yapışkan fazın çamurun

hidrodinamik karakterini değiştirdiğini, ısıl temas yüzeyini düşürdüğünü ve bölgesel birikime neden olduğunu belirtmişlerdir

Kudra endüstri ve teknolojiye bağlı olarak kurutmanın endüstriyel enerji tüketiminde önemli yer tutabileceğini belirtmiştir (Kudra, 2004). Buna örnek olarak çoğu orman ürününün üretiminde toplam enerji tüketiminin %70'i, tekstil ürünlerinde %50, kâğıt üretiminde %27, hamur üretiminde %33'ü kurutma işleminde harcanmaktadır. Kurutucu cihazların enerji verimliliği değerlendirilmesinde eşdeğerliğin olmadığı belirtilmektedir. Bunun nedeni ise kurutucu enerji performansının hacimsel buharlaşma hızı, buharlaşma verimi, yüzey ısı kayıpları, buhar tüketimi, birim ısı tüketimi, enerji verimliliği, ısıl verim vb. gibi çeşitli göstergelerle analiz edilmesi gösterilmektedir.

Mujumdar ve Zhonghua kurutulacak ürün karakteristiğinin çok çeşitli olması, çok çeşitli ısı transfer mekanizmalarının etkin olması, sıcaklık ve basınç aralıklarının çok geniş olması, kurutma sürelerinin saniyeler ve aylar arasında değerşken olması gibi nedenlerle malzemenin temel özellikleri ve taşınım olayları üzerinden genelleştirilmiş bir kurutma teorisi ortaya koymanın gerçekçi olmadığını belirtmektedir. Çok ölçekli modellemenin önemli olduğunun anlatıldığı makalede kurutma prosesi ile ilgili taşınım olaylarının yanında kalite faktörlerinin (besleyici kaybı, renk kaybı, büzülme, deformasyon) de modellenmesi gerektiği belirtilmektedir. Günümüzde yaygın kullanılan kurutucu cihazlarda dahi bu tür modellemenin zor olduğu belirtilmektedir.

Agbashlo ve arkadaşları kurutma teknolojisinde Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanımına ilişkin yaptıkları derleme çalışmasında YSA uygulamasının endüstriyel uygulanmasına yönelik çalışmaların nadir olduğunu belirtmişlerdir. MPC, ters model tabanlı kontrol, adaptif kontrol yaklaşımlarının kurutma modellemesi kullanılmasını önermişlerdir(Aghbashlo ve diğ., 2015). Ayrıca çalışmada YSA uygulamalarının endüstriyel uygulamaya geçmeden önce daha fazla pilot ölçekli laboratuvar çalışması yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Arlabosse ve Chitu penetrasyon teorisini esas alan çalışmalarında dolaylı kurutucuda kurutma hızını etkileyen kısıtlayıcı mekanizmaları ortaya çıkarmaya çalışmışlardır(Arlabosse ve Chitu, 2007). Bu çalışmada kurutucu duvar sıcaklığı, karıştırıcı hızı, partikül boyutu değerşkenleri incelenmiştir. Yazarlar çalışmada kurutmayı

kurutucu duvar sıcaklığı ve çamur yapısındaki en büyük çaplı partikül arasındaki temas direncinin kontrol ettiği sonucuna varmışlardır. Karıştırıcı için ideal bir devir değerinin olduğu ve bu aralık üzerinde kurutma oranında gözle görülür bir değişim gerçekleşmediğini belirtmişlerdir. Arıtma çamuru için ideal karıştırıcı hızının 40-50d/d arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca kurutma hızının kurutma potansiyeli ile doğrusal, partikül çapının kareköküyle ise ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir.

Deng ve arkadaşları kondüktif kurutma işlemine işlem karakteristiklerinin etkisini süpürücü hava varlığında incelemişlerdir(Deng ve diğ., 2009). 140, 160 ve 180 °C sıcaklıkta yapılan deneyler kurutucu duvar sıcaklığının artışının kurutma hızını önemli oranda arttırdığını ortaya koymuştur. 7-17 d/d hızlarında yapılan testlerin sonucunda bu aralıkta meydana gelen karıştırıcı hızı artışının kurutma hızını arttırdığını ifade etmişlerdir. Yazarlar hava debisinin 0,5 m³/h değerinden 1,3 m³/h değerine artışı ile kurutma hızında %0,43 artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Bu artışa rağmen hava debisinin artışının toz oluşumuna neden olabileceğini bildirmişlerdir.

Ferrasse ve arkadaşları kurutma sürecinde ısı momentum ve kütle hareketlerini anlamak üzere kurdukları deney düzeneğinde çamurun kurutmanın bir noktasında yapışkan bir kıvama geçtiğini ve karıştırıcının tüm kütleli beraber olarak karıştırmaya başladığını gözlemişlerdir(Ferrasse ve diğ., 2002). Geçişin olduğu noktada nem oranı 2,2 kg su/kg kuru madde olarak ölçülmüştür. Meydana gelen dönüşümde çamurun öncelikle genleştiğini ve sonrasında farklı parçaların aglomere olarak bütün bir yapı olarak dönmeye başladığını gözlemlemişlerdir. Sıcaklığın kurutma üzerinde etkisi ise birinci aşamada süreyi kısaltmak yönündedir. Ancak yapışkan fazın geçirdiği süre artan kurutma sıcaklığı ile artmaktadır. Bu nedenle endüstriyel tesislerde kurutma süresini kısaltmak için sıcaklığın optimize edilmesini önermektedir. Yığın karıştırmalı kurutucu için kritik bir karıştırıcı hızı olduğu ve bu hızın 40-60 d/d arasında olduğu da gözlenmiştir. Kritik hız değerine kadar ısı transferi artarken kritik değerlerin üstünde belirgin bir artış görülmemiştir.

Arlabosse ve arkadaşları yaptıkları çalışmada deneysel yığın kurutma cihazından çamurun kurutma sırasında gösterdiği farklı fazlara ait özgül ısı, desorpsiyon enerjisi gibi değerleri kürekli tip bir kurutucu modelinde kullanarak deneysel çalışması yapılan belirli tip çamurun kürekli tip kurutucuda kuruma potansiyelini ortaya koymuşlardır(Arlabosse

ve diğ., 2004). Model üzerinde yapılan çalışma sahada kürekli tip bir kurutucu ile doğrulanmıştır. Kurulan model geleneksel kurutma eğrilerinde görülen farklı kuruma karakteristiklerini de göz önünde tutmaktadır. Bu sayede çamurun yapışkan – granül faz geçişini dikkate almakta ve gerçeğe yakın değerler sunmaktadır. Bu çalışma ile herhangi bir çamurun deneysel düzenekte analizinin ardından kürekli tip kurutucu ile hangi kuruluk derecesine kurutulabileceği ortaya konmuştur.

Deng ve arkadaşları dolaylı kurutma cihazlarında ısı kaynağı olarak kullanılan doymuş buhar, kızgın yağ ve baca gazlarının her birinin ısı dirençlerini karşılaştırmıştır(Deng ve diğ., 2013). Ayrıca dolaylı kurutma olayında görülen aracı akışkan-ısıtma yüzeyi arasındaki konvektif direnç, ısıtma yüzeyinin kondüktif direnci, ısıtma yüzeyi ve çamur arasındaki temas direnci ve çamurun içerisinde ısının penetrasyonu ile ilgili dirençlerin aracı akışkana bağlı olarak değişimini incelemiştir. Çalışma sonucunda baca gazı ile kurutma işleminde toplam ısı transfer kat sayısının alternatiflere göre çok düşük olduğu bildirilmiştir. Baca gazı ile kurutma işleminde ısının gazdan temas yüzeyine aktarımı işleminde çok büyük bir direnç olduğu görülmüştür. Doymuş buhar kaynaklı kurutma işleminde toplam ısı direncin büyük kısmı ısı enerjisinin penetrasyonu aşamasında gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Yağ ile yapılan kurutma deneylerinde ise sırasıyla penetrasyon ve konvektif direncin toplam direncin büyük miktarını oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Toplam ısı transfer kat sayısı analizlerinde ise doymuş buharın ısı transfer kat sayısının kızgın yağa oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Fakat buhar basıncının yüksek olması nedeniyle özel malzeme ihtiyaçları olabileceği ve kurulum maliyetlerinin artabileceği belirtilmiştir

Milhe ve arkadaşları kürekli kurutucuda çamur akışını incelemiştir. Mevcut durumda kürekli kurutucularda çamur akışının stokastik (olasılıksal) olarak gerçekleştiğini belirterek deneysel olarak bekleme süresinin tespiti için kullanılan Bekleme Süresi Dağılımı (RTD) yaklaşımı tanıtılmıştır(Milhe ve diğ., 2015). Bu çalışmada akışı modellemek üzere Markov Zinciri teoremi kullanılmıştır. Bu teoreme göre kurutucu kürek sayısı (n) kadar hücreden oluşan bir zincir yapısındadır. Kurutucuda her dönme hareketi ile bir sonraki hücreye belli miktarda akış gerçekleşmektedir. Ayrıca kurutucu doluluğuna bağlı olarak bir miktar katı da gerideki hücreye dökülmektedir. Küreklerin sonunda yer alan çıkış toplama haznesi (n+1) geri beslemenin olmadığı bir hücre olarak

tanımlanmaktadır. Çalışmanın sonucunda geri besleme kat sayısı ve katı madde miktarının olarak 2 parametreye bağlı bir model oluşturulmuştur. Geri besleme kat sayısının dağılım genişliği ve kurutma işleminin eşdeğerliği üzerinde etkisi olduğu ve katı madde miktarının bekleme süresi ve kurutucu çıkışı nem değeri üzerinde etkisi olduğu ifade edilmiştir.

Milhe ve arkadaşları kürekli bir kurutucuda işletme parametreleri katı madde miktarı ve geri sirkülasyon katsayılarının performansa etkisini incelemiştir(Milhe ve diğ., 2015). Penetrasyon teorisini esas alarak yapılan çalışmada geri sirkülasyon katsayısının performans üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüş ve çalışma katı madde miktarı üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Deneysel Tasarım (DT) konsepti ile katı madde miktarını etkileyen parametrelerin etki ağırlıkları çıkartılmıştır. Çeşitli etkenlere bağlı olarak çamur bekleme süresinin kurutucu çıkışındaki ürün nemine etkisi deneysel ve teorik olarak sunulmuştur. Çalışma sonucunda ürün çıkış nemi ve bekleme süresinin doğrusal bir ilişki gösterdiği ve çalışmanın sonuçlarının ısı ve kütle transferi modeli ile entegre edileceği ifade edilmiştir.

Deng ve arkadaşları kurutma sırasında görülen yapışma problemlerinin giderilebilmesi için kireçtaşı (CaO) ve odun talaşı ilavesinin çamur yapışkanlığına etkisini incelemiştir(Deng ve diğ., 2017) Testler karıştırıcılı ve karıştırıcı olmayan şartlarda gerçekleştirilmiştir. Karıştırıcısız durumda CaO ilavesi adhezyonu arttırmış sonuç olarak kurutucu cidarına yapışmayı arttırmıştır. Karıştırıcılı durumda ise kohezyon kuvvetinin azalması etkisiyle karıştırıcı torku düşmüştür. Kaba odun talaşı ilavesi ise çamurun granül haline dönüşmesini engellemiş ve ortalama karıştırıcı tork değerini arttırmıştır.

Horttanainen ve arkadaşları arıtma çamurlarının kurutma prosesinde çıkan gazlarda nitrojen geri kazanım imkânlarını incelemiştir. Kurutma testinde gaz fazında bulunan amonyak miktarları ve iyonik amonyum bileşimi ölçülmüştür(Horttanainen ve diğ., 2017) Sıcaklığın amonyum salımına etkisini incelemek için 3 farklı sıcaklıkta çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca pH değerinin amonyum salımı üzerindeki etkisi bilinmesine rağmen gerçek bir kurutma prosesi ile benzeşim kurulabilmesi için pH düzeltilmesi yapılmamıştır. Çalışmada çamur bünyesindeki toplam azotun (53000 mg/kg KM) %81'lik kısmının kurutma prosesi sonucu salındığı diğer kısmının ise hücre yapısında

bağlı organik azot olarak kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca artan sıcaklıkla azot salımı arasında doğrusallık olmadığı tespit edilmiştir.

Gorazda ve arkadaşları arıtma çamuru yanması sonucu ortaya çıkan küllerden gübre üretimini incelemiştir(Gorazda ve diğ., 2017). Mineral asit ve nötralizasyon kullanılarak yeni bir fosfor kazanım yöntemi önerilmiştir. Krakow Üniversitesi tarafından patentli bir yöntem geliştirilerek %80–96 fosfor kazanım verimi elde edildiği belirtilmiştir. Elde edilen gübrenin Fosfor ana besleyici olmak üzere; Kalsiyum ve Magnezyum ikincil besin maddeleri ve Demir, Çinko ve Bakır gibi mikrobeyiciler de içerdiği ifade edilmektedir. Standart gübrelere yer alan metal ve ağır metal şartlarının aşılmadığı belirtilmiştir.

1.3. Ülkemizde yapılan çalışmalar

Ülkemizde arıtma tesisleri, tesis tasarımı ve işletilmesi gibi konularda çalışan akademisyen sayısı yüksektir. Ancak arıtma çamuru üzerinde ve kurutma açısından konuyla ilgilenen akademisyen sayısı oldukça sınırlıdır. Arıtma çamuru konusunda ülkemizde gerçekleştirilen en kapsamlı çalışma 2010–2013 yılları arasında gerçekleştirilen “Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi” başlıklı Tübitak Kamag 1007 – 108G167 projesidir(URL-10)

Proje kapsamında çeşitli faaliyetler planlanmış olup kurutma ve nihai bertaraf süreci ile ilgili İş Paketinde (İş Paketi 11) beklenen çıktılar aşağıda belirtilmiştir.

- Arıtma çamurlarının hangi koşullar altında kurutulmasının uygulanabilirlik ve ekonomik fizibilite bakımından mümkün olabileceği ortaya konmuş olacaktır.
- Yönetmelikler gereği nüfusu 1 milyonun üzerinde olan yerleşim yerleri için yapılması gereken çamur kurutma işlemi ile ilgili, sürecin uygunluğu, hangi koşullarda uygulanabilir olduğu ve ülkemiz koşullarında kullanılabilecek yöntemler konusunda ÇŞB’na somut önerilerde bulunulacaktır.
- Arıtma çamurlarının bir çimento tesisinde ve bir kireç tesisinde yakılarak bertaraf edilmesi konusunda tam ölçekli tesis bazında veriler elde edilmiş olacaktır.
- Çimento fabrikalarının ve kireç tesislerinin ülkemizde oluşmakta olan arıtma çamurlarının ne kadarının bertarafında kullanılabileceği ortaya konmuş olacaktır.

- Çimento fabrikaları ve kireç tesisleri hariç diğer potansiyel yakma tesisleri ortaya konmuş olacaktır.
- Arıtma çamurlarının hangi koşullar altında yakılmasının uygulanabilirlik ve ekonomik fizibilite bakımından mümkün olabileceği ortaya konmuş olacaktır.

Bu kapsamda çamurların çimento fabrikalarında bertarafına ilişkin deneysel ve fabrika çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ülkemiz AAT ve çamurlarının çok detaylı anket verileri toplanmış ve pek çok laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber proje kapsamında bertaraf öncesi zaruri işlem olan çamur kuruma prosesine ait bilgiler mevcut literatürden kaynak gösterilerek ifade edilmiş ve herhangi bir deneysel çalışma gerçekleştirilmemiştir.

Bu çalışma haricinde “Mekanik Susuzlaştırılmış Endüstriyel Arıtma Çamurlarının Kuruma Potansiyellerinin İyileştirilmesi, Eş Zamanlı Kurutma ve Stabilizasyon Yöntemlerinin Araştırılması” başlıklı ve 111Y209 Nolu 1001 projesi TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

2018 tarihli Enerji Verimli ve Enerji Pozitif Atıksu Arıtma Tesislerinin Geliştirilmesi Projesi (5178602 (ÇTÜE.17.384)) proje sonuç raporu içerisinde çamurdan enerji üretimine ilişkin temel bilgiler verilmiştir(URL-2).

Türkçe literatürde yer alan diğer kaynaklarda; çamurun farklı kullanımalarının değerlendirilmesi(Ayvaz, 2000; Yapıcıoğlu ve Demir, 2017; Yüksekdağ ve diğ., 2020), biyogaz üretimleri(Türkmenler ve diğ., 2018), yakma uygulamaları(İrdemez ve diğ., 2016), toprakta kullanım (Angin, 2016; Uzun ve Bilgili, 2011) uygulamaları konusunda genel değerlendirmeler yer almaktadır.

1.4. Tezin Amacı

Atık bertarafı sürecinde mekanik susuzlaştırma ve ardından ısı kurutma işlemi en yaygın çözümdür. Susuzlaştırılmış arıtma çamurunun müstakil yakma tesislerinde yakılması durumunda ek yakıt tüketimi artmaktadır. Çimento fabrikaları ise çamur kurutulmuş değilse ek ücret talep etmektedir. Diğer yakma tesisleri de kurutulmamış çamuru kabul etmemektedir. Bu nedenle kurutma işlemi AÇ bertarafının kaçınılmaz bir adımıdır. Isıl kurutma işlemi ile çamurun stabilizasyonu gerçekleşirken hacmi azaltılır ve kokusu

giderilir(Deng ve diğ., 2009). Bu sayede nakliye maliyetleri azaltılmakta ve depolama imkânı sağlanmaktadır. Fakat kurutma için yüksek miktarda enerji tüketimi gerekmektedir. Bu nedenle kurutma sisteminde enerji verimliliğinin artırılması ve bazı kurutucu türlerinde teknoloji geliştirilmesi gerekmektedir.

Kurutma enerji veriminin artırılabilmesi için öncelikli mevcut kurutma sistemlerinin enerji açısından irdelenmesi ve mevcut durumun tespit edilmesi gerekmektedir. Kurutucu sistemlerde enerji verimliliği artırıcı genel çözümler 3 kısma ayrılmaktadır. Bunlar; susuzlaştırma işleminin buharlaştırma yükünü en aza getirecek şekilde yapılması, ısı kayıplarını önleyici ve ısı geri kazanımı sağlayan uygulamalarla kurutucu verimini arttırmak, kurutucu enerji kaynağı olarak alternatif yakıt kullanımı, CHP ve/veya ısı pompası sistemleri kullanarak, kazan verimini arttırarak geliştirmeler sağlamaktır(Kemp, 2014).

Isıl kurutma işleminin gerçekleştirildiği cihazlar dolaylı (kondüktif), doğrudan (konvektif) ve kombine (kondüktif + konvektif) olarak sınıflandırılmaktadırlar(Deng ve diğ., 2013). Kurutucu ekipman türlerinin çeşitliliği genel geçer bir çalışmayı imkânsız kılmaktadır. Dolaylı kurutucuların bilimsel olarak gelişmeye açık olması, bu tip kurutucuların çeşitli ürünlerin (çamur dışındaki toz ve granül şeklindeki ürünler vb.) kurutulmasına da uygulanabilir olması, kurutma sıcaklığının esnek olması gibi nedenler göz önünde tutularak kondüktif kurutucular üzerinde çalışma yapılmaktadır. Literatür taramasında dolaylı kurutma işleminin ısı veriminin alternatiflerinden daha yüksek olduğu görülmüştür(Arlabosse ve Chitu, 2007; Deng ve diğ., 2013). Bu çalışmada çamurumsu bileşenler için kullanımı uygun olan kürekli tip karıştırıcılı kurutucular üzerinde çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında kurutma işleminin verimliliğinin artırılabilmesi için ısı kazanı atık ısısının geleneksel ve inovatif yöntemlerle kazanımı ve kurutucu çalışma parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmaktadır. Ayrıca yakıt kaynağı olarak tesiste üretilen biyogazın kullanım imkânı da araştırılmaktadır. AAT belediye sorunluluğunda olduğu için çamur bertarafı da kamu kaynakları ile gerçekleştirilen işlemlerdir. Belediyelerde farklı bertaraf süreçleri gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerin derlenmesi de tezin amaçları arasındadır.

Bu çalışma kapsamında Evsel AAT'den çıkan çamurların bertarafında yüksek maliyetli kurutma işleminin gerekliliği akademik literatür ve ülkemiz mevzuat ve uygulamaları üzerinden tartışılmaktadır. AÇ bertaraf işleminde enerji tüketimi ve enerji kazanım imkânları araştırılmıştır. Yerleştirilmesi henüz yapılmamış olan dolaylı kurutucu prototip tasarımı ve imalatı yapılarak çamur kurutmada enerji verimliliği analizi gerçekleştirilmiştir.



2. ARITMA ÇAMURU OLUŞUMU VE İŞLENMESİ

2.1. Atık Su Arıtımı

Atık sular, arıtma tesisine geliş kaynağına göre 3 kısma ayrılırlar;

- Evsel Atık Su, evlerde kullanılmış atık sular,
- Endüstriyel Atık Su, endüstriyel işlemler sonucu oluşmuş atık sular,
- Kentsel Atık Su, Evsel ve Endüstriyel atık suların karışmasıyla oluşmuş atık sular(Wiesmann ve diğ., 2006).

Atık su içerisinde fekal materyal (dışkı), fiber, mil, gıda atıkları, biyolojik floklar, inorganik maddeler ve ağır metaller gibi çökelebilen katılar içerebilir(Turovskiy ve Mathai, 2006). Yukarıdaki sınıflandırmaya ek olarak atık sulardaki kirleticiler çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Örneğin fiziksel özelliklerine (çözünbilir ve çözünemez), kimyasal özelliklerine (organik, inorganik), mikroorganizmalara hassasiyetlerine (biyobozunur ve biyobozunmaz), kaynağına (insan veya hayvan, bitki kaynaklı) ve etkilerine göre (zehirli ve zehirsiz) sınıflandırılabilir. Atık sudaki kirleticiler bu sınıflardan sadece birine ait olmak zorunda değildir. Çözünür, biyobozunur, organik bir madde olabileceği gibi, çözünmez biyobozunur organik bir madde de olabilir(Grady ve diğ., 2011).

Atık su arıtma işleminin amacı alıcı ortamlara verildiğinde zararlı olabilecek kirleticilerin giderilmesidir. Düşük çözünmüş oksijenin sudaki yaşama olumsuz etkisi nedeniyle ilk tesisler sudaki oksijeni tüketerek düşük çözünmüş oksijene sebep olabilecek kirleticileri gidermeyi amaçlamıştır. Kirleticilerin olumsuz etkilerinden birisi de içeriğindeki fosfor ve azot gibi besin maddeleri nedeniyle deşarj bölgelerinde ötrafikasyona sebep olmalarıdır. Ötrafikasyon alıcı ortamın tamamında veya bir kısmında besin maddesi konsantrasyonunun yükselmesi nedeniyle aşırı bitkisel ve algal yaşam formu oluşmasıdır. Bu nedenle atık su arıtımının diğer amacı da besin maddelerinin (Azot ve fosfor gibi) giderimi olmuştur. Yakın zamanda ise toksik bileşenlerin giderilmesi konusu dikkat çekmektedir. Bu bileşenlerin çoğu organik olduğu için oksijen tüketen malzemelerin giderimi için kullanılan yöntemler bunlar üzerinde de etkilidir(Grady ve diğ., 2011).

Atık su arıtma teknikleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerle atık sudaki katı maddeleri gidermeyi amaçlar. Bu prosesler farklı kademelerde incelenebilir. Bunlar kaba tanelerin ve kumların elek ve ızgaralarda tutulduğu ön işlemler, çökebilen katıların çöktürme (sedimentasyon) ya da yüzdürme yöntemleri ile giderildiği birincil işlemler, organik bileşenlerin bakteriler tarafından gerçekleştirilen biyokimyasal reaksiyonlarla giderildiği ikincil işlemler ve belirli kirleticilerin ya da ikincil arıtmada giderilemeyen bileşenlerin giderildiği üçüncü işlemlerdir(Campello ve diğ., 2020).

AAT'ye kanalizasyon hattı ile toplanan atık sular girer. Tesisin çıktıları ise yasal mevzuatla belirlenmiş kirletici sınır değerlerini sağlayan temizlikte su ve bu değerleri sağlamak için sudan ayrılan ve/veya yapılan işlemler sonucu oluşan katıların da içinde olduğu çamur çıkar. Çamur; (1) arıtma işleminde sıvıdan ayrılmış ve herhangi bir stabilizasyon işleminden geçmemiş biriken katı madde, (2) kimyasal işlem, koagülasyon, flokülasyon, çökeltme, yüzdürme veya su ve atık suyun biyolojik oksidasyonu sonucu oluşan ve sudan ayrılan malzeme (3) suyun veya atık suyun arıtılması sırasında sudan ayrılan ve beraberinde yüksek oranda su içeren katı maddedir(Bahadori ve Smith, 2016).

Elek, ızgara ve yağ tutucu ekipmanlar içeren ön arıtma işleminde, tesis işletmesinde kullanılan pompa, karıştırıcı ve boru hatlarına zarar verebilecek olan kaba katılar, kum ve yağlar su akımından ayrılır. Eleklerde göreceli olarak büyük parçacıklar ayrılır. Bunlar yaprak, plastik parçaları, şişeler gibi parçacıklardır. Ayrıştırılan artıklar genellikle deponi sahalarına gönderilmektedir. Eleklerden geçen su kum tutuculara gönderilir. Burada kum, kül ve benzeri inorganik maddeler ile mısır, buğday, bitki tohumları, kahve gibi atıklar ayrıştırılır. Burada ayrılan atıklar da genellikle deponi sahalarına gönderilir. Bazı tesislerde kum tutma işlemi birincil çöktürme kademesinde de gerçekleştirilebilmektedir(Turovskiy ve Mathai, 2006).

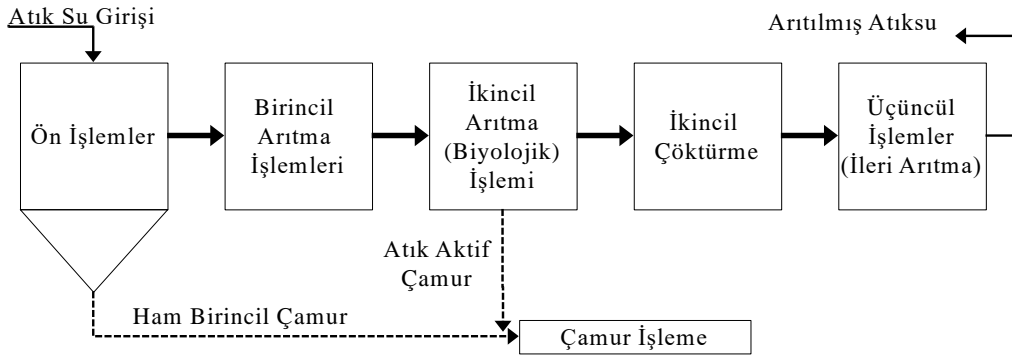
Birincil arıtmada fiziksel işlemler ile yüzen ve çökebilen katılar ayrıştırılır. İleri birincil arıtmada ise kimyasal katkıları kullanılarak daha fazla askıda katı maddenin ve bir miktar da çözünmüş katının ayrıştırılması sağlanır. Burada çökelen çamur birincil çamur olarak adlandırılır ve atık sudan sıyrıcılarla ayrılarak çamur işleme tesisine gönderilir. Atık su ise ikincil arıtma kademesi için havalandırma havuzuna aktarılır. Endüstriyel atık sularda çökmeyen küçük katı partiküllerin ve kolloidlerin çökebilmesi için kimyasal ilavesi ile koagülasyon ve flokülasyon işlemleri gerçekleştirilir. Kolloidler 0,1-1 nm büyüklükte ve

genellikle negatif yüklü parçacıklardır. Parçacıkların küçük olması nedeniyle çökelme süresi çok uzundur (yaklaşık 3 yıl). Aynı yüklü parçacıkların birbirini itmesi nedeniyle büyük parçalar da oluşturamazlar. Kimyasal (Alüminyum sülfat, demir klorür, kireç taşı ve polimerler) ilavesi ile parçacıkların nötralize olması sağlanır(Singh, 2015). Bu işlemin ardından atık suya düşük hızlarda karıştırma işlemi uygulanır. Bu sayede kolloidlerin birbirine bağlanarak büyük ağırsı yapılar oluşmasına flokülasyon denir(Bahadori ve Smith, 2016). Bu sayede parçacıklar birleşerek (aglomerasyon) çökerler. Bu nedenle endüstriyel çamurların karakteri çok değişken olabilir.

İkincil arıtma işleminde kimyasal ve biyolojik işlemler kullanılarak organik madde büyük oranda giderilir. Biyolojik arıtma işleminde atık suda bulunan bakterilerin çoğalması ve atık sudaki çok küçük boyutlardaki organik maddeyi bünyesine alarak tüketmesi sağlanır. Literatürde çeşitli biyolojik arıtma sistemleri geliştirildiği ve uygulandığı görülmektedir. Ülkemizde yaygın olarak klasik aktif çamur ve uzun havalandırmalı aktif çamur sistemine sahip ileri biyolojik arıtma sistemleri kullanılmaktadır.

Aktif çamur sisteminde, havalandırma havuzlarında atık suya hava beslemesi yapılarak biyolojik canlıların çoğalması sağlanır. Bu canlıların su içerisindeki çözünmüş organik maddeyi kullanması ve bünyesine alması sağlanmış olur. İşlem sonucu oluşan atık su son çökeltme tankına aktarılarak çökeltilir. Çökelen ve canlı bakterileri de içeren çamur aktif çamur olarak adlandırılır. Aktif çamurun bir kısmı, havalandırma tankında gerekli miktarda bakteri bulunmasını sağlamak için havalandırma havuzuna aktarılır. Fazla kısmı ise atık aktif çamur olarak işleme tesisine aktarılır.

İleri arıtmada ise fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerin çeşitli kombinasyonları ile önceki aşamalarda giderilemeyen askıda katıların ve diğer bileşenlerin sudan ayrıştırılması sağlanır(Tchobanoglous ve diğ., 2018). Son çökeltme tankından çıkan su kimyasal, ultraviyole dezenfeksiyon işlemlerinden geçirilerek sulamada ve sanayide tekrar kullanılabilir. Aktif çamur sistemine göre çalışan bir arıtma tesisinde işlem akışları şematik olarak Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. AAT işlem akışı

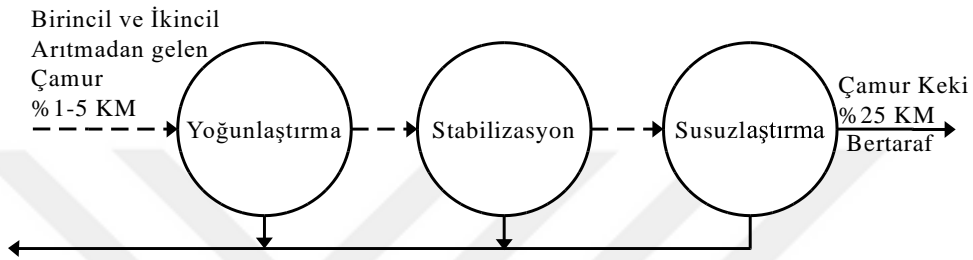
Atık suyun arıtılması saatler sürerken atık suyun yaklaşık %1 ini oluşturan çamurun işlenmesi, bertarafı veya faydalı amaçlarla kullanımı için haftalarca süre ve çok daha karmaşık sistemler gerekmektedir(Turovskiy ve Mathai, 2006). KAAT de oluşan çamur işlenen su hacminin çok küçük bir kısmı olmasına rağmen çamurun işlenmesi toplam işletme maliyetinin %50' sini oluşturmaktadır(Spinosa ve diğ., 2011).

Çamur atık sudan ayrıştırıldıktan sonra çamur işleme hattında çeşitli işlemlerden geçirilir. Bahsedilen çamur yüksek oranda su içermektedir bu nedenle sıvı kıvamında ve akışkan yapıdadır. Herhangi bir işlem görmemiş çamurlar ham çamur olarak ifade edilir. Aktif çamur sistemine sahip bir arıtma tesisinde birincil çöktürme havuzundan gelen ham birincil çamur (%2-%7 katı madde) atık sudan oluşacak çamurdaki toplam katı maddenin yaklaşık %50 sini oluşturur(Turovskiy ve Mathai, 2006). Birincil çamurun susuzlaştırılması kolaydır. Fakat herhangi bir işlemde geçirilmeden bekletilirse hızlıca bozunur ve koku yayar. Bir arıtma tesisinde oluşan arıtma çamuru miktarı 0,1–0,3 kg katı madde/m³ atık sudur. Genel olarak bu değer 0,05 kg/kişi olarak da verilmektedir(Turovskiy ve Mathai, 2006).

Biyolojik arıtma prosesinden gelen çamur ham ikincil çamur veya ham biyolojik çamur olarak ifade edilir. Buradaki katı kütlelerin büyük kısmı sistemde çoğalan bakteri külesidir ve biyokütle, biyokatı olarak da ifade edilir. Ham ikincil çamur (%0,4-%1,5 katı madde) içeriğinde bulunan biyolojik floklar nedeniyle susuzlaştırılması ham birincil çamurdan daha zordur.

Endüstriyel atık sular farklı kirleticiler içerirler ve genellikle değişken, konsantre ve zehirlidirler(Tunçal ve Uslu, 2014). Endüstriyel tesislerde kullanılan özel malzemeler ve

kimyasallar nedeniyle atık sularında klasik yöntemlerle ayrıştırılamayan bileşenler içerebilir. Bu durumda kimyasal ilave edilerek bu bileşenlerin birbirlerine bağlanması ve daha büyük parçacıklar halinde çökmesi mümkün hale getirilir. Bu tür tesislerden elde edilen çamura kimyasal çamur adı verilir. Bazı tesislerde aktif çamur sisteminde de kimyasal ilavesi kullanılabilir. Endüstriyel çamurlar prosese göre farklı bileşenleri barındırabilir. Bu nedenle çevresel açıdan her tesis başlı başına değerlendirilmelidir (Lechtenberg ve Lechtenberg, 2011).



Şekil 2.2. Çamur işleme sistemi işlem akışı

EAAT den çıkan birincil ve ikincil çamurlar, içerisindeki su oranını azaltmak üzere fiziksel ya da kimyasal etkilerle çalışan yoğunlaştırma proseslerinden geçirilir. Yaygın kullanılan yoğunlaştırma sistemleri çökeltme tankı, çözülmüş hava flotasyonu (DAF), santrifüj, graviteli yoğunlaştırıcı ve bantlı yoğunlaştırıcıdır (Bahadori ve Smith, 2016). Yoğunlaştırma işleminin amacı bir sonraki kademede işlenecek hacmi azaltmaktır. Bu sayede gerekli pompalama gücü, bekletme tankları hacmi ve susuzlaştırma ekipmanı kapasitesi azaltılmış olur. Yoğunlaştırma işleminden geçirilen çamur (%2-5 katı madde) susuzlaştırma ünitelerine geçer.

Susuzlaştırma işleminin verimi katı parçacıkların boyutu, parçacıkların boyut dağılımı ve katıların kimyasal kompozisyonuna bağlıdır (Tunçal ve Uslu, 2014). Susuzlaştırılmış arıtma çamurunun termal kurutma gibi bir işlemde geçirilmesi ile alt ısı değer açısından ısı özellikleri iyi olan bir RDF elde edilebilir (Bianchini ve diğ., 2015).

Bölüm 2.1’de tanımlanan çamurun ne oranda su içerdiği ile ilgili herhangi bir tanımlama yoktur. Fakat çamurun özellikleri içeriğindeki katı maddenin miktarına ve özelliklerine bağlı olduğu için çoğu zaman çamur türü ile beraber katı madde oranını veya çamurun hangi işlemde geçirilmiş olduğunu da belirtmek gerekmektedir. Bu çalışmada ifade edilen çamur, susuzlaştırma işleminden geçirilmiş (\approx %20–40 katı

madde) çamurdur. Genellikle susuzlaştırılmış çamur, çamur keki olarak adlandırılmaktadır. Çamur kekinin bileşimi Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Ham ve Çürütülmüş çamurun kimyasal bileşimi ve özellikleri

Bileşen	Ham Birincil Çamur	Çürütülmüş Çamur
Toplam Katı Madde (% KM)	2- 8	6- 12
Uçucu Katı Madde (KM içinde %)	60- 80	30- 60
Protein (KM içinde %)	20- 30	15- 20
Azot (KM içinde %)	1,5- 4	1,6- 6
Fosfor (KM içinde %)	0,8- 2,8	1,5- 4,0
Potasyum (KM içinde %)	0,0- 0,1	0,0- 3,0
Selüloz (KM içinde %)	8- 15	8,8- 15
Demir (KM içinde %)	2,0- 4,0	3- 8
Isıl Değer (KM)	23000- 29000	9300- 14000

Çamurun değerlendirilmesinde, daha önceden suyu etkilemekte olan ve bu nedenle sudan ayrıştırılan kirleticileri toprağa ve havaya yönlendirmekten kaçınılmalıdır. Yerel şartlara uygun olmayan bertaraf işlemleri nedeniyle bazen bu hataya düşülebilmektedir. Ayrıca çamurun uygulamada (geri dönüşüm, toprakta kullanım veya diğer bertaraf süreçleri) sebep olacağı kokunun belirlenmesinde katı madde içeriğindeki uçucu bileşenler önemli birer etkidir(Ayvaz, 2000).

AAT enerji kendine yeterliği ve net enerji üreticisi olması konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir(Gandiglio ve diğ., 2017; Hao ve diğ., 2015; McCarty ve diğ., 2011). Fakat bunu sağlamak için yapılan önerilerin yatırım ve işletme maliyetleri göz ardı edilmektedir. AAT enerji (elektrik) tüketiminin büyük kısmı havalandırılmalı aktif çamur sistemin için gerekli basınçlandırılmış havanın üretiminden kaynaklanmaktadır. Havalandırma için kullanılan enerji toplam enerji tüketiminin %50–70 oranına ulaşabilmektedir. Tipik olarak enerji tüketiminin ortalama %54’ü havalandırma için kullanılan hava pompalarında gerçekleşmektedir. Bunu takip eden ise (%14) pompa sistemleridir. AAT işletmesinde havalandırmanın optimize edilmesi ile enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Bunun için giriş kirlilik yükleri ile orantılı olarak havalandırma gerçekleştirilmelidir(Gülsoy, 2018).

Atık yönetimi yönetmeliği geri dönüşüm ve bertaraf kavramlarını tanımlamaktadır. Buna göre geri dönüşüm; enerji geri kazanımı ve yakıt olarak kullanımı ya da dolgu yapmak üzere atıkların tekrar işlenmesi hariç olmak üzere, organik maddelerin tekrar işlenmesi dâhil atıkların işlenerek asıl kullanım amacı ya da diğer amaçlar doğrultusunda ürünlere, malzemelere ya da maddelere dönüştürüldüğü herhangi bir geri kazanım işlemini ifade etmektedir. Yönetmelik ekinde listelenen geri dönüşüm işlemleri arasında kompostlama, yakıt olarak kullanma ve arazi ıslahı amacıyla kullanım yer almaktadır. Bertaraf kavramı ise ikincil amacı enerji geri kazanımı olsa dahi geri kazanım olarak kabul edilmeyen işlemlerdir. Yönetmelik ekinde verilen işlemlerden günümüzde uygulanan yöntemler düzenli depolama, yakma ve toprakta (arazi ıslahı) kullanımındır.

Çamur işlenmesi ile ilgili kaynaklarda stabilizasyon ve bertaraf işlemlerinin birbirine geçtiği (aynı yöntemin hem stabilizasyon hem de bertaraf başlığına alındığı), bazı kaynaklarda ise listelerin değişken olduğu görülmektedir. Bu karmaşıklığın sebebi bazı bertaraf işlemlerinin hem stabilizasyon hem bertaraf ihtiyacını karşılaması veya çamurdaki patojenlerin giderilmesinin bertaraf olarak görülmesi olabilir. Bu nedenle öncelikle kavramların tanımlarının net olarak ifade edilmesi gerekmektedir.

2.2. Çamur Stabilizasyon İşlemleri

Katılar ve biyokatılar, patojenleri azaltmak, rahatsız edici kokuları gidermek ve bozuşma potansiyelini önlemek, azaltmak veya gidermek amacıyla stabilize edilirler. Bu sonuçların elde edilebilmesi, stabilizasyon işleminin çamurun organik ve uçucu bileşenleri üzerindeki etkisine bağlıdır. Çamurda bakterilerin çoğalmasına müsaade edilirse yukarıda sayılan problemler ortaya çıkar. Bunun önlenmesi için uçucu kısımların biyolojik olarak giderilmesi ve kimyasal katkıları ile çamurun mikroorganizmalar için yaşama elverişsiz hale getirilmesi gerekir(Tchobanoglous ve diğ., 1994).

Stabilizasyon; arıtma çamurlarının, bozunma potansiyelini düşürmek, koku oluşumunu engellemek ve patojenleri azaltmak bu sayede çamurun kullanım ve bertaraf işlemleri için stabil bir ürün haline getirilmesi amacıyla işlenmesidir. Stabilizasyon için kullanılan yöntemler çürütme (anaerobik, aerobik, ototermal termofilik) sistemleri, alkali stabilizasyon (genellikle kireç), kompostlama, termal kurutma işlemleridir(Turovskiy ve Mathai, 2006). Atık Yönetimi Yönetmeliğine göre Biyolojik ayrışabilirliğinin ve

kullanımından kaynaklanan sağlık tehlikelerini önemli ölçüde azaltmak üzere, biyolojik, kimyasal ya da ısııl işlemden, uzun süreli depolama ya da diğer uygun işlemlerden geçirilen evsel ve kentsel arıtma çamurları stabilize arıtma çamuru olarak adlandırılmaktadır.

Katılar ve biyokatılar, patojenleri azaltmak, rahatsız edici kokuları gidermek ve bozuşma potansiyelini önlemek, azaltmak veya gidermek amacıyla stabilize edilirler. Bu sonuçların elde edilebilmesi Stabilizasyon işleminin çamurun organik ve uçucu bileşenleri üzerindeki etkisine bağlıdır. Çamurda bakterilerin çoğalmasına müsaade edilirse yukarıda sayılan problemler ortaya çıkar. Bunun önlenmesi için uçucu kısımların biyolojik olarak giderilmesi ve kimyasal katkıları ile çamurun mikroorganizmalar için yaşama elverişsiz hale getirilmesi gerekir(Tchobanoglous ve diğer., 1994).

2.2.1. Çürütme (Aerobik ve Anaerobik)

Anaerobik çürütme işlemi, yoğunlaştırılmış çamurun havasız ortamda, mezofilik (30–38 °C) ya da termofilik (50–57 °C) şartlarda mikroorganizmalar yardımıyla içeriğindeki karmaşık organik maddelerin basit formlara dönüştürülmesidir. Çürütme işlemi kademeli olarak gerçekleşmektedir. Hidroliz aşamasında çözünmeyen organik bileşenler ve yüksek molekül ağırlıklı bileşenler çözünebilir organik bileşenlere dönüştürülür. Bu bileşenler sonraki aşamada asidojenik bakteriler tarafından uçucu yağ asitleri, NH₃, CO₂ H₂S e dönüştürülür. Takip eden kademede asetojenik bakteriler tarafından asetik asit, CO₂ ve H₂'ye dönüştürülür. Son aşamada ise ortamdaki bileşenler metanojenik bakteriler tarafından metan gazına dönüştürülür(Appels ve diğer., 2008).

Arıtma çamurlarından biyogaz üretim verimini artırmak için ön işlemler kullanılmaktadır. Ön işlemlerin genel olarak amacı hücre duvarlarının parçalanmasıdır. Böylelikle hücre içi sıvılar salınarak anaerobik bakterilerin bu maddelere ulaşımı kolaylaştırılarak anaerobik çürüme performansı geliştirilebilir(Waclawek ve diğer., 2019). En yaygın ve gelişmiş ön işlem termal ve biyolojik hidroliz işlemleridir. Termal hidroliz işleminde reaktöre beslenecek olan çamur 30 dakika boyunca yüksek sıcaklık (165 °C) ve yüksek basınçta (7 Bar) tutularak homojen ve kolay parçalanabilir bir yapıya dönüştürülmektedir(Mills ve diğer., 2014). Kullanılan ön işlemler fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak sınıflandırılabilir. Biyogaz işleminin performansını etkileyen faktörler

sıcaklık, çürütme süresi, beslenen malzeme türü, pH, asetik asit oranı, su/katı oranı, C/N oranı, reaktör karıştırıcı hızı ve beslenen malzemenin partikül boyutudur(Appels ve diğ., 2008; Demirbas ve diğ., 2016).

Anaerobik çürütme işleminin avantajı mikroorganizmalar tarafından yürütülen sürecin sonucunda metan gazı (CH₄) üretilmesidir. Üretilen metan gazı çeşitli sistemlerde yakılarak ısı ve/veya elektrik üretilir. Biyogaz işlemi sonucunda ham çamurdaki katı maddenin organik kısmının %30-%65 kadarı giderilir(Turovskiy ve Mathai, 2006). Genel olarak %50 oranında giderim başarılı sayılmaktadır. Farklı çamur türleri için su ve organik madde miktarı Tablo 2.2’de verilmektedir(Scholz, 2016).

Tablo 2.2. Çamur türlerinin susuzlaştırma öncesi su ve organik madde bileşimleri

Çamur Türü	Su Oranı (%)	Organik Madde Oranı (% KM)
Birincil Çamur	93–97	48–80
Aktif Çamur	98–99,5	65–75
Çürütülmüş Çamur	96–99	30–60

Çürütme işlemi kapalı reaktörlerde gerçekleştirilmektedir. Verimli bir giderim işlemi için arıtma çamurunun reaktörde bekleme süresi 21–28 gündür. Bu süre sonunda çamur reaktörden çekilerek susuzlaştırma işleminden geçer. %70–80 katı madde içeren çamur keki oluşur. Farklı atıklardan anaerobik çürütme işlemi ile edilebilecek biyogaz ve elektrik üretimi verileri Tablo 2.3’te verilmektedir(Achinas ve diğ., 2017).

Tablo 2.3. Farklı atıklardan elde edilebilecek biyogaz ve elektrik üretimi(Achinas ve diğ., 2017)

Atık	Biyogaz Üretim Potansiyeli (m ³ /ton ham atık)	Elektrik Üretim Potansiyeli (kWh/ton ham atık)
Arıtma Çamuru	47	96
Büyükbaş Hayvan Atığı	55–68	122,5
Tavuk Atığı	126	257,3
Yağ	826–1200	1687,4
Meyve Atıkları	74	151,6
Evsel Atık	101,5	207,2

Anaerobik fermantasyon prosesi sonunda üretilen gaz miktarı çamurda bertaraf edilen uçucu organik madde miktarına bağlıdır. Bertaraf edilen 1 kg uçucu maddeye karşılık 0,8–1,2 m³ biyogaz üretimi mümkün olmaktadır(Cao ve Pawłowski, 2012). Yaklaşık olarak 1 ton arıtma çamuru (yoğunlaştırılmış, susuzlaştırılmamış) işlenmesi ile 47 m³

biyogaz üretilebilmektedir(Achinas ve diğ., 2017). Farklı kaynaklarda 1 ton çamur katı maddesi için 300 m³ biyogaz üretilebileceği bildirilmektedir(Mills ve diğ., 2014). Susuzlaştırılmış çamurun yaklaşık %20 katı madde içerdiği değerlendirilirse bu değerler birbiri ile örtüşmektedir. Üretilen biyogaz %53–70 metan içermektedir(Appels ve diğ., 2008). Biyogaz enerji içeriği 6,0–6,5 kWh/m³ olarak ifade edilmektedir(Waclawek ve diğ., 2019). Bu durumda %35 elektriksel verimi olan bir kojenerasyon sisteminde 2,2 kWh/m³ biyogaz kapasitesinde elektrik üretim imkânı sağlamaktadır. Bu oran kuru madde bazında 1 ton çamur ile 660 kWh elektrik enerjisi üretilebileceğini göstermektedir. Fakat yatırım değerlendirilmesi yapılırken biyogaz tesisinin kendi iç ihtiyaçları düşülerek net enerji üretimi hesaplanmalıdır.

Biyogaz yaklaşık %65 Metan gazı içeriği ile gaz yakıt özelliği taşımaktadır. Bu yakıt yakılarak üretilen ısı enerjisi ile biyogaz reaktör ısıtması veya susuzlaştırılmış çamurun kurutulmasında enerji girdisi olarak kullanılabilir. Biyogazdan üretilen elektrik enerjisine devlet teşvikleri sayesinde yüksek fiyat ve alım garantisi verilmesi nedeniyle arıtma çamurundan biyogaz üretilen tesislerde genellikle elektrik üretimi tercih edilmektedir. Bu tesislerde biyogazın kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde içten yanmalı motorlar (Gaz Motoru) ve gaz türbinleri kullanılabilir. Gaz türbini uygulamasında baca gazının ekipmandan yüksek sıcaklıkta sistemlerinde atık ısıdan buhar üretimi de gerçekleştirilebilmektedir.

Biyogaz uygulaması ile çamur sadece stabilize edilmektedir. Çamur miktarı azaltımı sağlanmaktadır. Fakat reaktörden çıkan stabilize arıtma çamurunun nihai bertaraf işlemlerine tabi tutulması gerekmektedir. Susuzlaştırma işleminden geçirilerek yarı katı ve sıvı fazda iki farklı bileşene dönüştürülebilir. Sıvı kısmı arıtma tesisine geri beslenir. Bu atıkların katı kısmı bitki besleyici özelliğe sahip (besin elementi miktarları yüksek) ve kirleticiliği limit değerlerinin altında ise toprakta kullanılabilir. Aksi takdirde deponi sahasına veya yakma tesislerine gönderilmesi gerekmektedir. Brezilyada arıtma çamurundan biyogaz tesisleri ile enerji üretiminin maliyet analizi yapılan bir çalışmaya göre 50.000 nüfus ve üzerindeki şehirlerin %86'sında biyogaz yatırımının karlı olduğu ve geri ödeme süresinin 2,61 yıl olarak tespit edildiği bildirilmektedir(Campello ve diğ., 2020). Biyogaza ait takribi bileşim Tablo 2.4'te verilmektedir(Santos ve diğ., 2016).

Tablo 2.4. Arıtma çamurundan üretilen biyogazın genel bileşimi

Gaz	Oran (%)
CH ₄	50- 75
CO ₂	24- 45
H ₂	1- 22
CO	0- 0,3
N ₂	1- 5
H ₂ S	0,1- 0,5
H	0- 3
O ₂	Eser Miktarda

Aerobik çürütme işlemi tanklarda oksijen yardımıyla çamurun organik madde içeriğinin tüketilmesidir. 20.000 m³/gün kapasite altı tesislerde en yaygın stabilizasyon işlemidir(Turovskiy ve Mathai, 2006). Bu işlem aktif çamur işleminin devamı olarak görülebilir. Organik madde bakteriler karbondioksit, amonyum ve suya indirgenir. Çürüme işleminin devamında amonyum nitrata dönüştürülür.

2.2.2. Alkali İlavesi

Ham çamura alkali bileşenler ilave edilerek pH değerinin yükseltilmesi sağlanır. Yüksek pH ortamı koku oluşumuna neden olan ve taşıyıcıları çeken mikrobik reaksiyonların oluşmasını engeller veya çok büyük oranda yavaşlatır(Tchobanoglous ve diğ., 1994). Alkali olarak yaygın şekilde kireç taşı kullanılır. Kireçtaşı ile stabilizasyon uygulamasında standart metot çamurun pH değerini 12 ye getirecek ve bu değerde 2 saat kalmasını sağlayacak miktarda kireçtaşı eklenmesidir(Turovskiy ve Mathai, 2006).

Tablo 2.5. Stabilizasyon şartlarını sağlamak için gerekli kireç taşı miktarı(Tchobanoglous ve diğ., 1994)

Çamur Türü	Katı Madde Oranı (%)		Kireç Taşı Gereksinimi (g kireç taşı/kg katı madde)	
	Aralık	Ortalama	Aralık	Ortalama
Birincil	3-6	4,3	60-170	120
Aktif Çamur	1-1,5	1,3	210-430	300
Anaerobik Çürütülmüş	6-7	5,5	140-250	190

Kireçtaşı katı olarak veya sıvı karışım olarak uygulanabilmektedir. Gerekli bileşen miktarı uygulanan yöntem, çamurdaki katı madde oranı, stabilize çamurun nerede kullanılacağı gibi etkenlere göre belirlenmektedir. Farklı çamur türleri ve katı madde miktarına göre 12 pH değerini 30 dakika boyunca sağlamak için ihtiyaç duyulan kireç

miktarı Tablo 2.5'te verilmektedir(Tchobanoglous ve diğ., 1994). Çamurlara kireç uygulaması susuzlaştırma öncesi veya sonrasında gerçekleştirilebilir(Uzun ve Bilgili, 2011). Kireç ilavesi çamurun susuzlaştırma verimini de artırmaktadır(Deng ve Su, 2014).

2.2.3. Kompostlama

Kompostlama işleminde susuzlaştırılmış arıtma çamurunun organik bileşenleri oksijenli ortamla kapalı tanklarda ve ya açık alanda bakteriler yardımıyla parçalanır. Kompostlama işleminin verimli ilerleyebilmesi için katkı maddelerine ihtiyaç duyulur. Ağaç parçaları ve talaşı, pirinç kabuğu, saman gibi katkı maddeleri kullanılabilir. Katkı maddeleri kompostlama için gerekli karbon/azot (C/N) oranı ve havalandırmanın sağlanması görevlerini yerine getirirler. Kompostlamanın başlaması için idea C/N oranı 20–30/1'dir(Kliopova ve Makarskiene, 2015).

Kompostlama işlemi ile organik bileşenler CO₂ formuna dönüştürülür ve bu sayede kokusuz bir ürün üretilir. Fakat işlem sırasında koku oluştuğu için koku yönetimi yapılması gerekir. Çürütülmüş çamurlar da kompostlama işleminden geçebilir. Bu durumda kompost tesisi sistemlerinin kapasitesi %40 oranında küçültme sağlanabilir(Tchobanoglous ve diğ., 1994). Kompostlama işleminin avantajları çamur kütesinin, su buharlaşması ve organik maddenin yıkımı sayesinde azaltılması, organik kirleticilerin giderilmesi ve patojenlerin giderilmesidir(Poulsen ve Hansen, 2003).

Kompostlama süreci sonunda amaç gübre özelliğine sahip bir ürün üretmektir. Bu nedenle ağır metal ve patojen miktarları yasal sınırlar dâhilinde olan ve gübre potansiyeli yüksek olan çamurların işlenmesinde tercih edilmektedir. Süreçte gerçekleşen ekzotermik reaksiyonlar nedeniyle çamur içerisindeki patojenler büyük oranda giderilebilir(Alvarenga ve diğ., 2015).

2.3. Kurutma

Kurutma prosesinde susuzlaştırılmış çamur içerisindeki su (%70- 80 su) genelde özel üretilmiş reaktörlerde ısı enerjisi kaynaklarının yardımıyla bazı durumlarda ise açık alanda veya seralarda güneş enerjisi yardımıyla buharlaştırılır. Kurutma ile çamur nem içeriği %10 ve altına düştüğünde stabilizasyon sağlanmış olur. Bu işlemde çamur sıcaklığı 60 °C üstüne çıkıyorsa pastörizasyon da gerçekleşmiş olur. Çamur kurutma prosesi sonucu

hacmi azaltılan çamur nihai bertaraf işlemine gönderilir. Çamur kurutma prosesi Bölüm 3'te detaylı olarak anlatılmaktadır.

2.3.1. Çamur Bertaraf İşlemleri

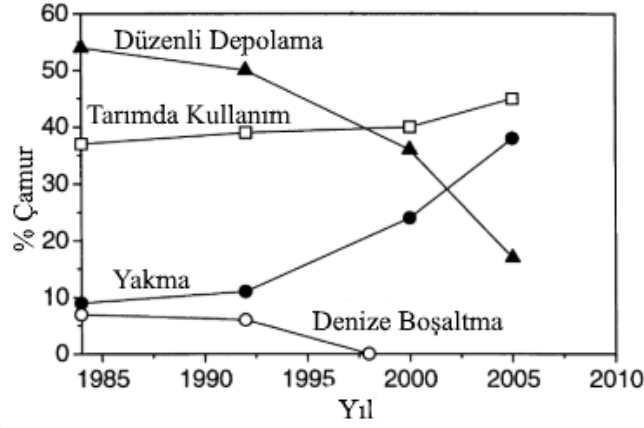
Stabilizasyon işlemlerinden geçen çamurun bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bertaraf işlemi, Atık Yönetimi Yönetmeliğinin tanımlar başlığı altında, ikincil amacı enerji geri kazanımı olsa dahi geri kazanım olarak kabul edilmeyen ve EK-2/A'da yer alan işlemlerden herhangi biri olarak tanımlanmıştır. EK-2/A' ya göre atıkların düzenli depolanması, toprakta kullanım ve yakma uygulaması bertaraf kapsamına girmektedir("Atık Yönetimi Yönetmeliği," n.d.). Termal Bertaraf işlemi ise literatürde çamurun tekli veya kömür ile beraber yakılması ile çimento tesisleri vb. belirli tesislerde yakılmasını ifade etmektedir(Hroncová ve diğ., 2017). Çamurun termal bertarafında yakma, piroliz ve gazlaştırma işlemleri kullanılmaktadır(Samolada ve Zabaniotou, 2014; Werther ve Ogada, 1999). Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik tanımlar başlığında piroliz, gazlaştırma veya plazma tesisleri de yakma tesisi olarak kabul edilmektedir(Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik, 2010).

Eskiden bertaraf uygulaması olarak denize boşaltma yaygın olarak kullanılmaktaydı. Günümüzde bu işlem yasaklanmıştır. Günümüzde yaygın kullanılan bertaraf işlemleri düzenli depolama, toprakta kullanım (gömme, gübre uygulaması, toprak ıslahı) ve yakma (ve diğer termal bertaraf işlemleri) uygulamasıdır. Bu yöntemlerin de kendi içerisinde farklı uygulama şartları ve işlemleri bulunmaktadır. Nihai olarak stabilizasyona tabi tutulmuş arıtma çamurunun (stabilize çamur) nasıl kullanılacağı yada bertaraf edileceği kanunlarla düzenlenmektedir.

Yakma işlemi toprakta kullanım ve depolama alternatiflerine göre çıkan kül hacminin belirgin ölçüde azaltılması, toksik bileşenlerin yıkılması ve çamur ısıl değerinin bazı kömürlerle eşdeğer olması nedeniyle enerji kazanımı gerçekleştirebilmesi gibi avantajlar sunmaktadır(Werther ve Ogada, 1999).

Avrupa Birliği mevzuatı çamurun kirlilik yükü düşük ve organik miktarı yüksek ise toprakta kullanımı değilse yakılmasını teşvik etmektedir. Depolama sahalarına dökülmesi ise tercih edilen uygulama değildir. Ülkemiz mevzuatı yorumlandığında da benzer yaklaşım ortaya çıkmaktadır. Fakat depolama uygulaması kolay olduğu için ülkemizde

sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil (2.3)'te görüldüğü üzere AB ülkelerinde yakma ve toprakta kullanım artarken depolama uygulaması azalmaktadır(Werther ve Ogada, 1999).



Şekil 2.3. AB genelinde üretilen AÇ'ye uygulanan bertaraf uygulamalarının zamana bağlı değişimi(Werther ve Ogada, 1999)

2.3.2. Düzenli Depolama ve Toprakta Kullanma

Arıtma çamurlarının düzenli depolanması en kolay ve düşük maliyetli çözüm olarak görülmektedir. Fakat çamur içerisindeki kirleticilerin diğer toprak ve yer altı suyunu kirletme riski oluşmakta ve çok fazla kara alanı kullanılmaktadır(Han ve diğ., 2012). Ülkemizde stabilize arıtma çamurunun toprağın üzerine serilmesi veya toprağın üstüne ve içine herhangi bir biçimde uygulanması Evsel Ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik kapsamında düzenlenmiştir.

Hijyenizasyon işleminden geçen çamur, içerdiği Azot, Fosfor, Potasyum, Magnezyum, organik madde ve diğer besin elementleri nedeniyle toprak düzenleyici ya da gübre olarak kullanılabilir. Fakat özellikle endüstriyel bölgelerde evsel çamurlara genellikle ağır metaller bulaştığı için tarımda kullanımına izin verilmemektedir(Hartman ve diğ., 2005).

Atık Yönetimi Yönetmeliğine göre arıtma çamurlarının toprağa uygulanmasının yasak olduğu durumlar aşağıda listelenmektedir;

- Toprağın pH değeri 6 dan küçükse stabilize arıtma çamuru toprağa uygulanamaz.
- Stabilize arıtma çamurunun doğal ormanlarda kullanımı yasaktır.
- Organik madde içeriği %5'den fazla olan topraklarda stabilize arıtma çamuru uygulanmaz.

- Organik madde içeriği %40'dan az olan stabilize arıtma çamurları toprağa uygulanmaz.
- 8/1/2006 tarihli ve 26047 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliğinde yer almayan endüstrilerin atık sularından elde edilen stabilize arıtma çamurları toprağa uygulanmaz.
- Toprağa uygulanacak stabilize arıtma çamurunun pH değeri 6.0-8.5 arasında olmalıdır.

Toprakta kullanımı için gerekli koşullar Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına dair Yönetmelik ile belirlenmiştir. Yönetmeliğe göre arıtma tesisinin susuzlaştırma sürecinden sonra herhangi bir işlem görmemiş çamurun (ham arıtma çamuru) toprakta kullanımı yasaklanmıştır. Çamurun toprakta kullanılabilmesi için stabilize edilmesi (stabilize arıtma çamuru) gerekmektedir. Burada canlı sağlığını korumak üzere gerekli olan şartlar ülkemizde üretilen arıtma çamuru tarafından genellikle sağlanamaması nedeniyle çamurların toprakta kullanımı yaygın değildir. Arıtma çamurunun besin elementleri ile beraber taşıdığı ağır metaller, patojenler, genetiği değiştirilmiş organizma (GDO) ve dioksinlerin toprakta kullanım nedeniyle gıda zincirine girmesi tehlikesi nedeniyle toprakta kullanım uygulaması azalmaktadır (Groß ve diğ., 2008). Pek çok ülkede patojenlerin ve diğer bileşenlerin taşınması riski nedeniyle çamurun gıda üretiminde kullanımı kısıtlanmaktadır (Kacprzak ve diğ., 2017).

2.3.3. Termal Bertaraf İşlemleri: Yakma, Gazlaştırma ve Piroliz

Yakma işlemi yüksek sıcaklıklarda ve fazla oksijen varlığında karbon bazlı bileşenlerin enerji açığa çıkararak CO₂, H₂O ve başka bileşenlere termokimyasal olarak dönüşümü işlemidir (Syed-Hassan ve diğ., 2017). Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmeliğe (AYY) göre yakma tesisi; Atık kabul birimi, geçici depolama birimi, ön işlem birimi, atık besleme ve hava besleme sistemleri, kazan, baca gazı arıtım sistemleri, yakma sonucu oluşan kalıntıların düzenli depolanması ve atık suların arıtılması için tesis içinde yer alan birimler, baca, yakma işlemlerini kontrol etmek ve yakma şartlarını izlemek ve kaydetmek için kullanılan ölçüm cihazları ve sistemler de dâhil olmak üzere tesiste yer alan bütün birimleri kapsayan, ortaya çıkan yanma ısısını geri kazanabilen veya kazanamayan, atıkların oksitlenme yoluyla yakılması, piroliz, gazlaştırma veya plazma işlemleri gibi diğer termal bertaraf işlemleri de dâhil olmak üzere termal yolla bertarafına yönelik her türlü sistemi ifade eder. Farklı çamur türlerine ait kalorifik değerler Tablo 2.6'da verilmektedir (URL-10).

Tablo 2.6. Çeşitli çamur türlerine ait ısı değer aralıkları(URL-10).

Çamur Türü	Isıl Değer (Aralık-kJ/kg)	Isıl Değer (Yaygın Görülen- kJ/kg)
Ham Çamur	5497–6931	6094
Aktif Çamur	3824–5497	5019
Anaerobik Çürütme Çamuru	2151–3107	2629
Kimyasal Çöktürme Çamuru	3347–4302	3824
Biyolojik Filtre Çamuru	3824–5497	4660

Yakma veya beraber yakma işlemine tabi tutulmadan önce atığın tehlikeli atık olup olmadığı, atık içeriğinde radyoaktif madde bulunup bulunmadığı belirlenir. Tehlikeli ve tehlikesiz atıkların yakılmasına veya beraber yakılmasına ilişkin aynı emisyon limit değerleri uygulanır.

Yönetmelik gereği yakma tesisleri, cüruf ve taban küllerinin toplam organik karbon (TOK) içeriğinin %3'ten veya tutuşma sırasındaki kaybın materyalin kuru ağırlığının %5'inden az olacağı bir yakma seviyesine ulaşacak şekilde işletilmesi gerekmektedir.

Yakma işleminde geleneksel yakma ve insinerasyon işlemlerinin anlam ayrımının yapılması gerekmektedir. Geleneksel anlamda yakma, farklı amaçlarla enerji (ısı) elde etmek için gerçekleştirilir. İnsinerasyon kavramında ise temel amaç girdi miktarının yakma yöntemi ile azaltılmasıdır(Syed-Hassan ve diğ., 2017). Literatür kaynaklarında çamurun yakılması için insinerasyon yerine yakma ifadesi kullanılmakta ve pek çok uygulamada enerji geri kazanımı da değerlendirilmektedir. Fakat yakma tesislerinde ek yakıt tüketim miktarları irdelenmeli ve yakma tesislerinin net enerji üretiminin analiz edilmesi gerekmektedir. Tablo 2.7'de farklı çamur termal bertaraf işlemleri için yatırım maliyetleri verilmektedir.

Tablo 2.7. Çamur termal bertaraf işlemleri için yatırım maliyeti tablosu(URL-10).

Teknoloji	Maliyet (Euro)
Termal Kurutma (%45- 90 KM)	500.000- 2.000.000
Izgaralı Yakma	60.000.000- 100.000.000
Akışkan Yataklı Yakma	20.000.000- 40.000.000
Birlikte Yakma	60.000.000- 100.000.000
*Mevcut Tesislerde çamur yakma için ek yatırım	3.000.000- 5.000.000
Yığın Kompostlaştırma	500.000- 3.000.000
Tünel Kompostlaştırma	1.500.000- 5.000.000

Yakma ve beraber yakma tesisinde oluşumu engellenemeyen, azaltılamayan veya geri dönüşümü mümkün olmayan kalıntılar Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliğin Ek 2-A'sına göre bertaraf edilir. Beraber yakma yapılan tesislerde yakıt anma ısı güç değerinin %40'dan fazlasını atıktan karşılıyor ise, bu tesis yakma tesisi olarak değerlendirilir. Ancak biyokütleyi katı yakıt olarak kullanan tesisler için bu sınırlama uygulanmaz. Yakılan atıkların tür ve miktarlarına (tesisin kapasitesine) bağlı olmaksızın, baca gazından çıkan dioksin ve furanların konsantrasyonları 0,1 ng/Nm³ TE (toksikite eşdeğeri) sınır değerini aşamaz. Ayrıca, yakma işlemini iyileştirmek amacı ile araştırma, geliştirme, test amaçlı kullanılan ve yılda 50 tondan az atık bertaraf eden pilot tesisler, bu Yönetmeliğin kapsamı dışında tutulmaktadır.

Çamurun yakılarak bertarafında beraber yakma veya tekli yakma uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Tekli yakma işleminde üretilen ısı susuzlaştırılmış arıtma çamurunun kurutulmasında ya da buhar ve/veya elektrik formunda enerji dönüşümünde kullanılabilir. Günümüzde enerji kullanımı daha yaygındır(Rulkens, 2008). Beraber yakma uygulamasında çamur kömür(Hroncová ve diğ., 2017; Otero ve diğ., 2007; Rajczyk ve diğ., 2014; Rulkens, 2008), biyokütle yakıtlı (Chen ve diğ., 2021) tesislerde ya da çimento sektöründe kullanılan kalsinasyon fırınlarında ek yakıt olarak kullanılabilir. Çamurun çimento sektöründe alternatif olarak yakılması en uygun yöntem olarak ön plana çıkmaktadır(Samolada ve Zabaniotou, 2014). Avrupa ülkelerinde ton KM için tekli yakma işlemi maliyeti 438€, beraber yakma 375€, kurularak yakma ise 240€ olarak verilmektedir(Kacprzak ve diğ., 2017).

Çamurun yakma işleminde akışkan yatak, döner insineratör, ızgaralı fırın, çok kalpli fırınlar kullanılabilir(Hartman ve diğ., 2005). Fakat modern akışkan yataklı kazanlar yatırım ve işletme maliyeti açısından alternatiflerini geride bırakmaktadır(Samolada ve Zabaniotou, 2014).

Çamurun tekli yakılması durumunda kuruma, devolatilizasyon ve yanma işlemlerinin tamamı yakma ünitesinde gerçekleşmektedir(Murakami ve diğ., 2009). Katı yakıtların yanma reaksiyonlarında sıcaklık artışı ile beraber uçucu bileşenlere gaz fazına geçerek katı maddeden ayrışırlar. Uçucu gazlar çok hızlı şekilde yandığı için katı maddenin tutuşmasına ve kararlı yanmaya destek olurlar. Çamurun devolatilizasyon sıcaklığı kömürlere kıyasla (kömür 300–400 °C, çamur 150 °C) oldukça düşüktür(Syed-Hassan ve

diğ., 2017). Bu nedenle homojen yanma sağlanabilmektedir(Han ve diğ., 2012). Kuru çamurun akışkan yataklı kazanda deneysel yakılması için yapılan testlere göre kuru çamur yatağa beslendiği anda devolatilizasyon başlamaktadır. Bu uçucu gazların yanma ürünü genellikle CO₂ ve H₂O ile beraber az miktarda CO ve C_xH_y formunda hidrokarbon olmaktadır. Çamurdaki karbonun %80 inin uçucularla beraber salındığı tahmin edilmektedir(Hartman ve diğ., 2005). Kuru çamurun yanmasında %98' in üzerinde yanma verimleri elde edilebilmektedir(Vamvuka ve diğ., 2019). Susuzlaştırılmış çamurun yanma karakteri incelendiğinde, çamur yatağa beslendiği durumda yatak ısı tüketimi artmakta, yatak sıcaklığı düşmekte ve oksijen difüzyonu azaldığı için daha fazla yanmamış bileşen baca gazları ile taşınmakta ve yanmamış CO miktarı artmaktadır(Han ve diğ., 2012). Kuruma için gerekli duyulur ısının yüksek olması nedeniyle kuruma ve yanma için gerekli süre uzamakta ve tam yanma için gerekli enerjiyi artırmaktadır. Net ısı değeri 4 MJ/kg civarında ve %80 nem oranında çamur ototermal yanma için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. Bu durumda doğalgaz veya ham petrol gibi ek yakıt kullanılarak enerji desteği gerekmektedir(Syed-Hassan ve diğ., 2017). Ototermal yanmanın gerçekleşebilmesi için Werther (Werther ve Ogada, 1999) %50 KM, Hartman (Hartman ve diğ., 2005) 4 MJ/kg veya %70 – 50 KM oranında, Meisel ise (Meisel ve diğ., 2019) 4,5 MJ/kg kalorifik değer olması gerektiğini ifade ediyor. Başka bir çalışmada ise 11 MJ/kg ve %60 nem değerinde ototermal yanma gerçekleştiği ifade edilmektedir(Li ve diğ., 2014). Susuzlaştırılmış çamur yakmanın ek yakıt gereksinimi dışındaki dezavantajı yüksek miktarda su buharının baca gazı ile beraber taşınmasıdır. Atık gaz hacmi arttığı için gaz temizleme ekipmanlarının daha yüksek kapasitede seçilmesi gerekmektedir(Werther ve diğ.,2001).

Susuzlaştırılmış çamurun (%20- 30 KM) yakılmasında ek yakıt tüketiminin yüksek olması aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Çamur sıcaklığı, kuruma süresince ortam basıncındaki suyun buharlaşma sıcaklığında kalmaktadır,
- Nem oranı yüksek olduğu için kuruma süresi kuru yakıtın (kömür, talaş) veya doğalgazın tutuşma süresinden çok daha uzun,
- Çamur bu süre boyunca kum yatağından ısı çekiyor. Böylece yatak sıcaklığını tutuşma sıcaklığının altına indiriyor.

–%100 kuru çamurun kalorifik değeri yukarıdaki maddelerde belirtilen (buharlaştırma + ısınma) için gerekli enerjiyi karşılayamadığı için ototermal yanma gerçekleşmiyor.

Çamur beraber yakılmasında katı yakıt için yakıt özelliklerini ve yanma prosesini kömür ile kıyaslama yapmak mümkündür. Örnek bir çalışmada kömür ve çamurun ağırlıkça kül oranı %7,82 ve çamur için %32-36 olarak verilmektedir. Kömürün kalorifik değeri 31,37 MJ/kg olarak ölçülmüştür. Çamurda ise bu değer 13,12 ile 12,24 ise MJ/kg olduğu tespit edilmektedir(Magdziarz ve Werle, 2014). Çamur kalorifik değerleri düşük kalite kömürlerle kıyas edilebilir düzeydedir(Vamvuka ve diğ., 2019). Ayrıca çamur yüksek oranda (kül hariç kütlece %85) uçucu yanıcı bileşenler(Hartman ve diğ., 2005) içerdiği ve sabit karbon oranı çok düşük(Otero ve diğ., 2007) olduğu için yanma karakteristiği kömürden farklıdır. Fakat termogravimetrik analizlerde kömürün %10'u oranında çamur varlığı yanma karakteristiği ve kütle kaybında belirgin bir etkiye sahip değildir(Otero ve diğ., 2007). Kömür yakıtlı bir tesiste (6 MW_{ısı}) toplam yakıtın kütlece sırasıyla %15–40–60 çamur (%53,42 KM, 5796 kJ/kg) içerecek şekilde gerçekleştirilen yakma testinde %40 kadar çamur oranının işletme parametrelerinde herhangi bir bozulmaya neden olmamaktadır. Çalışma tesiste çamura özgü hiçbir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Çamurla çalışacak bir tesis için kazan yüksekliğinin artırılması gerektiği ve atık gaz temizlik sistemlerinde geliştirme sağlanması gerekmektedir(Rajczyk ve diğ., 2014). Çamur yakma işleminde sistem verimini artırmak içinde alternatif prosesler geliştirilmektedir(Murakami ve diğ., 2009).

Çimento tesislerinde yakma işlemi enerji ve malzeme kullanımı açısından en uygun yöntemdir. Çimento klinker fırınında kur çamur yakılarak bertaraf işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Oluşan kül ise klinker bünyesine katılmaktadır. Bu nedenle bu bertaraf yöntemi ek atık oluşturmayan bir yöntemdir. Çamur KM içinde kül oranı %20-40 arasında değişmektedir(Cui ve diğ., 2006; Magdziarz ve Wilk, 2013; Nordin ve diğ., 2020; Akdağ ve diğ., 2018). Uygulamanın kısıtlayıcı şartları klinker fırınına beslenecek çamurun yakıtla oranla belirli bir seviyede olması gerekmesi, çamurun kurutulmuş olması gerekliliği ve AAT ile çimento tesisleri arasındaki mesafeden kaynaklı taşıma maliyetleridir.

Günümüzde insinerasyon işlemi atıkların toksitesinin bertaraf edilmesi ve miktarının azaltılmasında küresel olarak dikkat çekmektedir. Fakat çamurların doğrudan yakılması,

çamurun yüksek nem oranları nedeniyle maliyet etkin değildir ve teknik olarak da dengesiz bir yanma gerçekleşmektedir. Bu nedenle yüksek nem içeren atıkların verimli yakılabilmesi için kurutma gerekli bir ön işlemdir(Ma ve diğ.,2016).

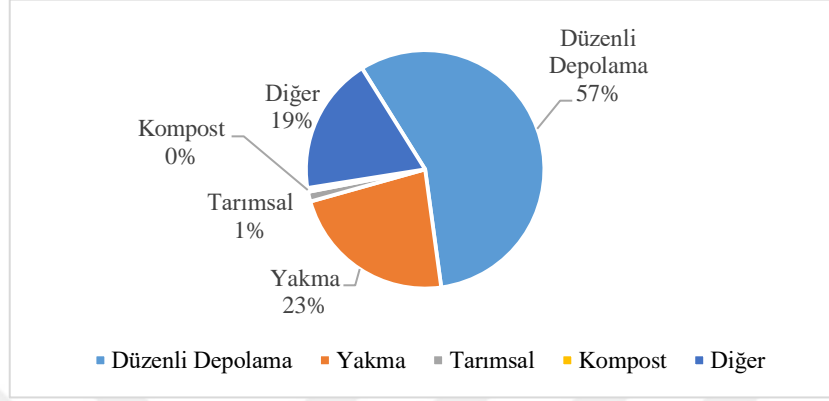
Gazlaştırma kısmi oksijen ortamında çamur yapısındaki organik maddenin termokimyasal dönüşümüdür. İşlem sonucunda uçucu bileşenler ve sabit karbon gaz yakıtı (sentez gazı-H₂,CO,CH₄) ve katı atığa dönüştürülür(Hernández ve diğ., 2013). Yüksek sıcaklıkta ve tam yanma için gerekli oksijen miktarından daha düşük oksijen içeren ortamda bileşenlerin kısmi yanması sağlanır. Reaktör içerisindeki biyokütle yanarak reaksiyonların devamı için gerekli enerjiyi sağlar(Ayol ve diğ., 2019). Gazlaştırma işleminin verimli olabilmesi için çamurun KM oranının %10-15 aralığında olması gerekmektedir(Zhai ve diğ., 2013). Gazlaştırma işlemi arıtma çamurunun faydalı enerji kaynaklarına dönüştürülmesi için küçük ve orta kapasite için uygun ve gelecek vadede bir termokimyasal işlemdir(Werle ve Dudziak, 2014).

Piroliz malzemelerin inert gaz ortamında ısıl olarak bozulmasıdır. Reaksiyon sonucunda gaz yakıt, sıvı piroliz yağı ve kömür (sentetik, yar kok) oluşur. İşlem 350-600 °C aralığında gerçekleştirilir(Kelessidis ve Stasinakis, 2012). Gaz ve sıvı faz reaktörden gaz fazdan çıkar. Bu gazın soğutulmasıyla yoğunlaşan sıvı (piroliz yağı) farklı organik bileşiklerin karışımından oluşmaktadır(Wang ve diğ., 2012). Gaz ve yağ ürünlerin enerji kaynağı olarak kullanımı uygundur. Biyokok ise toprakta kullanılabilir(Chen ve diğ., 2015; Figueiredo ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2012).

Gazlaştırma ve Piroliz teknikleri üzerinde çok sayıda akademik çalışma yürütülmektedir. Fakat henüz ticari olarak yaygınlık kazanmış teknolojiler değildir.

3. ÜLKEMİZDE UYGULANAN YÖNTEMLERİN ANALİZİ

Türkiye’de 2018 yılında arıtma tesislerinden çıkan çamurun bertaraf yöntemlerinin kullanım oranlarını gösteren grafik Şekil 3.1’de görülmektedir(URL-9).



Şekil 3.1. 2018 yılı çamur bertaraf uygulamalarının dağılımı(URL-9).

Yukarıda verilen ve birbirine alternatif olabilen (stabilizasyon ve bertaraf) yöntemlerin sayısı ve uygulama bilgileri değerlendirildiğinde Türkiye belediyelerinde birbirinden çok farklı uygulamaların gerçekleştirildiği ve hepsinin enerji ve maliyet fizibilitesinin farklı olduğu değerlendirilmektedir. Örneğin arıtma çamurunun kurutulmuş çimento tesislerine kabulünde bazı bölgelerde ücret karşılığı bertaraf yapılmaktadır. Bazı uygulamalarda ise ücret alınarak bertaraf yapılmaktadır.

Bu nedenle ülkemizde yaygın kullanılan yöntemlerin tespiti için ülke nüfus sıralamasına göre en kalabalık 10 büyükşehir belediyesinden çamurun susuzlaştırma aşamasından nihai bertaraf sürecine kadar olan işlemlere ait veriler 02.08.2021 tarih ve E-94127629-100-93463 sayılı yazımızla (EK-1) talep edilmiştir. Bilgi talep edilen işletmeler 2018 yılı verilerine göre ülkemizde biyolojik ve ileri biyolojik arıtma tesislerinde arıtılan toplam (3.199.123.000) atık suyun %46’sının (1.489.253.000) işlendiği tesislerdir. Değerlendirme kapsamında olup resmi cevap alınamayan belediyeler için ilgili Su ve Kanalizasyon İdaresine ait Faaliyet Raporlarındaki bilgilerden faydalanılması öngörülmüştür.

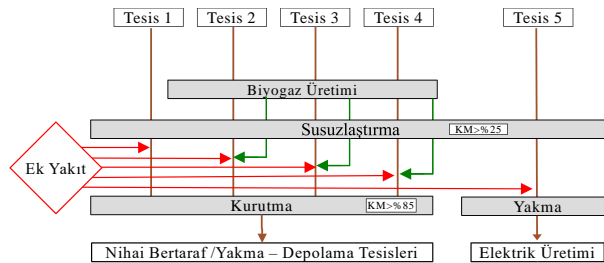
4 farklı Kanalizasyon İdaresi yazımıza detaylı bilgi vererek cevap vermiştir. Temin edilen veriler (4 arıtma tesisi ve 1 yakma tesisi) Tablo 3.1’de verilmektedir. Faaliyet

raporlarındaki bazı veriler açık olmadığı için tabloda verilmemiştir. Tesis adları tez kapsamında önemli olmadığı için karartılmıştır.

Tablo 3.1. Tesis işletme verileri

	Tesis 1	Tesis 2	Tesis 3	Tesis 4	Tesis 5
Susuzlaştırma Ekipmanı	Dekantör	Dekantör	Dekantör	Dekantör	Dekantör
Susuzlaştırılmış Çamur Debisi (ton/gün)	120	421	197,8	115	365
Susuzlaştırma Enerji Tüketimi (kWh/ton yaş çamur)	85,99	75	30,75	22,34	6,5
Dekantör Çıkışı KM Değeri (%)	21,64	25,38	25,95	18–20	20–22
Kurutucu Çıkışı KM Değeri (%)	97,42	95,18	97,8	>90	-
Kurutucu Enerji Tüketimi (kWh/ton yaş çamur)	2408	1122	806	1051	-
Buharlaştırma Enerjisi (kJ/kg Su)	11144	5507	3920	4864	-
Çamur Kalorifik Değer(kJ/kg)	3000	1900–2300	2400	3890	4027
Kurutucu Akım Türü	Buhar	Kızgın Yağ	Buhar	Kızgın Yağ	-
Biyogaz Üretimi (m ³ /gün)	-	20725	7701	16700	-
Kurutmada Kullanılan Biyogaz (m ³)	-	20725	6504	9077	-
Ek Yakıt (Doğalgaz) Tüketimi (m ³ /gün)	Bilgi yok	2813	5339	3550	21284
Çamurdan Elektrik Üretimi (kWh/ton çamur)					131,25

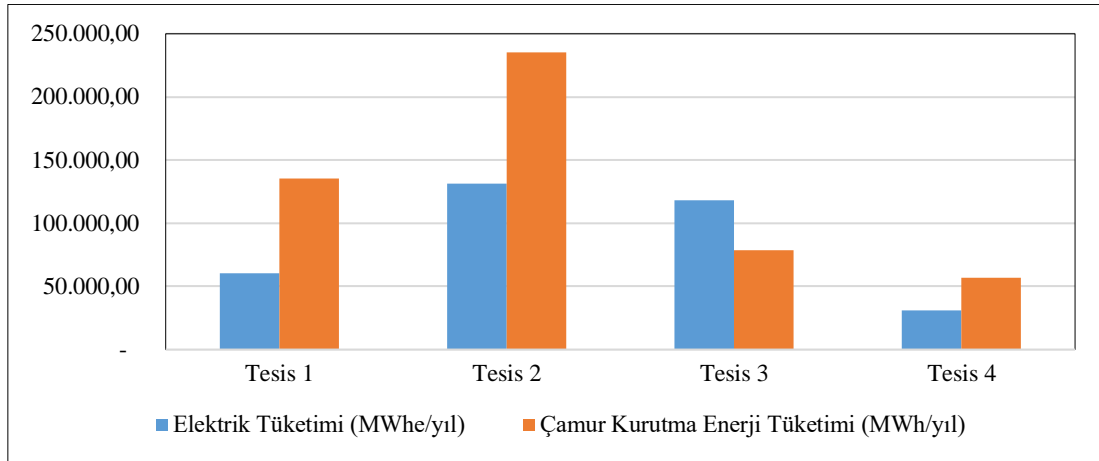
Bilgi talep edilen tesisler çamur yönetimi uygulaması açısından tüm çeşitleri kapsayıcı olacak şekilde seçilmiştir. Bu sayede farklı uygulamalar arasında enerji ve maliyet kıyaslaması yapılabilmesi öngörülmüştür. Bilgi talep edilen 15 tesisten 5 tanesine ait elde edilen verilerle kurutma ve susuzlaştırma işlemlerinde enerji tüketimleri ile biyogaz ve yakma uygulamalarının değerlendirilmesi mümkündür. Tesis 1-4 İleri biyolojik arıtma tesisleridir. Tesis 5 ise müstakil bir çamur yakma tesisidir.



Şekil 3.2. Değerlendirilen tesislerde genel akış şeması

Tesis 1 de biyogaz üretimi (çamur çürütme uygulaması) yoktur. Tesis 2–4 te çamurdan biyogaz üretimi gerçekleştirilmektedir. Hiçbir tesiste biyogaz ile elektrik üretimi

gerçekleştirilmemektedir. Tesis 1–3 te harici bir kojenerasyon ünitesinde doğalgaz kullanılarak elektrik üretimi yapılmakta ve atık ısı ile buhar/yağ ısıtılarak kurutmaya aktarılmaktadır. Ayrıca tesiste üretilen biyogaz ve doğalgaz kullanılarak atık ısı kazanına takviye olarak enerji girdisi sağlanmaktadır. Tesis 4’te doğalgaz ve biyogaz yağ kazanında yakılarak kurutma ısı tesis edilmektedir. Kızdırılan yağ, bantlı kurutucuda yağ/hava eşanjörlerinden geçirilerek havanın ısıtılması sağlanmaktadır. Tesiste üretilen biyogazın bir kısmı da reaktörlerin ısıtılması için kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. İncelenen tesislere ait ısı ve elektrik enerji talebi

Şekil 3.3’te incelenen tesislere ait yıllık elektrik enerjisi tüketimi ve kurutma işleminde tüketilen ısı enerji grafiği verilmektedir. Çamur işleme işleminin maliyetinin yüksek olmasının nedenlerinden birisi kurutma enerjisinin yüksek olmasıdır.

Alternatif yöntemlerde de benzer maliyetler oluşmaktadır. İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSU) Kullar AAT için yapılan bir çalışmada çamurun dışarıda bertaraf edildiği duruma ait veriler incelendiğinde bertaraf maliyetinin tesis elektrik tüketiminin 2010 yılı için %74, 2011 yılı için %88’ine eşit olduğu verilmektedir(Nurbay, 2014). Bu durumda susuzlaştırılmış çamur kurutma maliyetinden kaçınıldığında bertaraf maliyetinin daha düşük olacağı öngörüsü hatalıdır.

Kurutulmuş çamur çimento ve diğer yakma tesislerinde yakılabilecek bir yakıttır. Bu nedenle ücret karşılığı satışı yapılabilmektedir. Ayrıca miktarı azaltılıp kokuşma riski giderildiği için depolamaya da uygun hale getirilmiştir. Çamur kurutulduğunda kütle azaldığı için nakliye masrafı da düşmektedir. Çamurun ücret karşılığı satılmadığı

durumlarda dahi çamurun miktarı azaldığı ve yapısı değiştiği için toplam bertaraf maliyetinin azaltılabilmektedir.

Kurutma süreçlerinde enerji verimliliği artışı sağlanarak Şekil 3.3 te görülen ısı enerjisi tüketiminin ve ilgili maliyetin azaltılması sağlanabilir. Bu noktada tesis tasarımcıları ve işletmecileri atık su arıtım prosesi kadar sürecin doğal çıktısı olan çamurun işlenmesini de önemli olarak görmelidir.

Susuzlaştırma sistemi çamur katı maddesinin sıvıdan ayrıştırılması için kullanılan sistemlerdir. İncelenen tesislerde ve genel olarak AAT'lerde Santrifüj dekantörler kullanılmaktadır. %1-5 KM içeren çamur-su karışımından dekantör çıkışında suyun bir kısmı ayrıştırılarak \approx %25 KM içeren çamur keki oluşturulmaktadır. Enerji tüketimleri 85-6 kWh/ton susuzlaştırılmış çamur aralığındadır. Kurutmada gerçekleşen enerji tüketimleri ile kıyaslandığında mekanik susuzlaştırmanın çok daha verimli olduğu görülmektedir. 1 ton susuzlaştırılmış çamur (%25 KM) üretilirken, 50 ton %5 KM içeren sıvı çamur işlenmektedir.

Susuzlaştırma sonunda (1 ton susuzlaştırılmış çamur için) nem oranı %25 yerine %20 olması ile kurutmada buharlaştırılması gereken su miktarı 50 kg artmaktadır. Tablo 3.1'de verilen tesislerin ortalama günlük çamur üretimleri (213 ton/gün) ve kurutma verimleri (1760 kWh/ton Su) günlük ilave enerji tüketimi 18.744 kWh/gün olmaktadır. Enerji ihtiyacının tamamen doğalgazdan karşılanması durumunda (10.55 kWh/Sm³, 2,476712 TL/m³) günlük ilave maliyet 4400 TL olmaktadır.

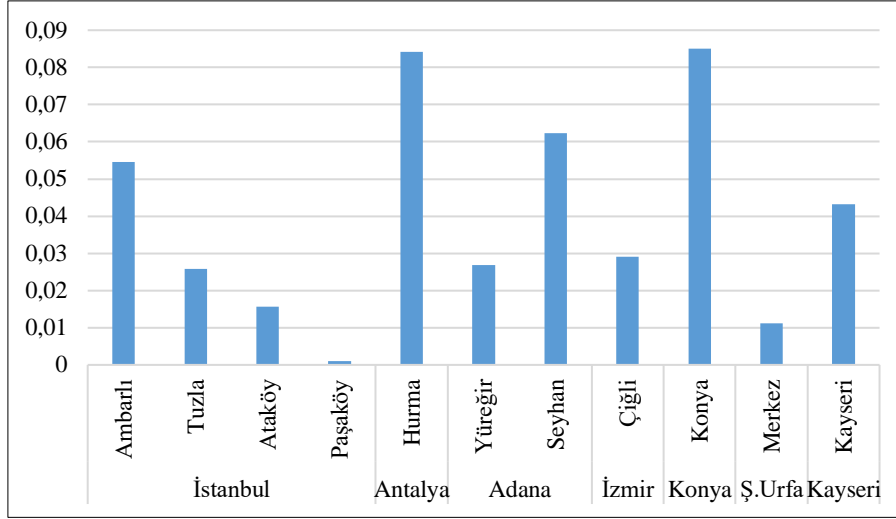
Kurutucuda birim su buharlaştırmak için gereken enerji, kurutulan ürünün KM oranı ile doğru orantılıdır. Bunun nedeni serbest suyun miktarında azalma ile birlikte partikül içerisindeki nemin yüzeye difüzyonu için teorik buharlaşma ısısına ilave olarak enerji girdisi gerekmesidir. Tesis 1-3'te çamurun kurutucu çıkışı kuru madde oranının %97 ye ulaştığı görülmektedir. Ürünü kurutulacağı azami nem değeri depolama ve bekletme şartlarına göre seçilmelidir. Çamurun 30 °C ve %60 bağıl nem (BN) değerindeki desorpsiyon testlerinde denge nem oranı yaklaşık %12 olarak verilmektedir (Houssayne ve diğ., 2018). Bu durumda kurutulan çamurlar ortamdan (30 °C sıcaklık, %60 BN) nem çekecektir. Ortam ile nem dengesine geldiğinde KM oranı %88 civarına ulaşması beklenmektedir. Bu nedenle kurumunun %85 KM değeri altında devam etmesi ekonomik

değildir. Ayrıca bu çamurların çimento tesislerinde yakıldığı bilgisi mevcut değildir. Ticari bir beklenti olmadığı, ürünün ortam neminden korunacak şekilde depolanacağı belirtilmediği durumlarda KM oranının denge nem oranı üzerine çıkarılmaması gerekmektedir. %25 KM içeren 1 ton çamurun %90 ve %97 KM oranında kurutulması durumunda kurutucu çıkış kütlelerinde değişim 0,06 ton civarındadır. İncelenen tesislerin ortalama kapasitesi dikkate alınırsa (213 ton/gün) günlük 12 ton daha az atık çıkışı olacaktır. Bu durumda nakliye masrafı ve ücret karşılığı bertaraf ettiriliyorsa bertaraf maliyeti azaltılabilir. Fakat kurutma enerji tüketimi de aşırı derecede yüksek olacaktır.

Tablo 3.2. AAT Arıtma, elektrik tüketimi ve biyogaz üretim verileri

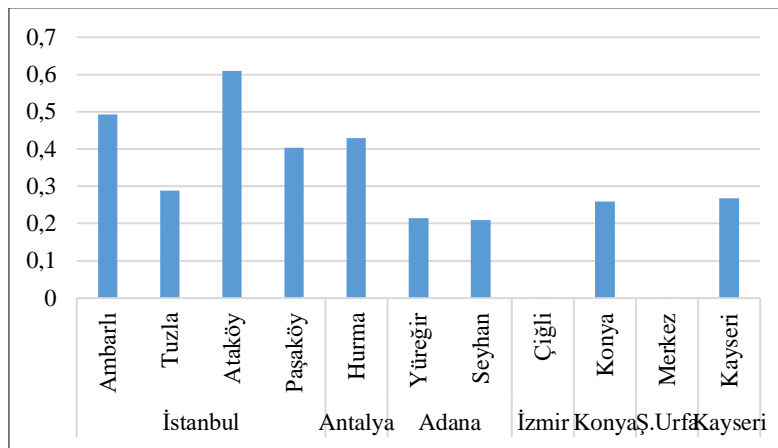
İl	AAT	Arıtılan Atık Su Miktarı (m ³ /gün)	Yıllık Elektrik Tüketimi (kWh/gün)	Biyogaz Üretimi (m ³ /gün)
İstanbul (URL-13)	Ambarlı	374.353	184.759	20.456
	Tuzla	384.691	110.970	9.929
	Ataköy	406.693	247.617	6.334
Antalya (URL-5)	Paşaköy	175.992	70.858	-
	Hurma	180.000	77.400	15.166
Adana(URL-4)	Yüreğir	73.113	15.727	1.966
	Seyhan	160.139	33.452	9.978
İzmir(URL-14)	Çiğli	522.386	-	15.159
Konya (URL-16)	Konya	181.094	46.810	15.408
Şanlıurfa(URL-19)	Merkez	62.441	-	699
Kayseri(URL-15)	Kayseri	158487	42445	6843

Arıtma tesislerinde biyogaz üretimi giderek yaygınlaşan bir uygulamadır. Biyogaz uygulaması ile çamur miktarında azaltma ve stabilizasyon işlemleri gerçekleştirilmekte ve gaz yakıt üretilebilmektedir. Atık su özellikleri farklı olduğu için biyogaz üretim oranları da farklılık göstermektedir. Fakat değerler arasındaki değişkenlik oldukça yüksektir. Ülkemizde arıtma tesislerinde kurulu biyogaz tesislerinin verimli tasarlanması/işletilmesi konusunda herhangi bir değerlendirme literatürde yoktur. Tablo 3.2’de ülkemizde kurulu bazı biyogaz tesislerinin enerji tüketim ve biyogaz üretim değerleri verilmektedir. Tesislerin tasarımları, atık su özellikleri giren çıkan organik madde miktarları gibi bilgiler elde olmadığı için herhangi bir yorum yapılamamaktadır.



Şekil 3.4. Biyogaz Üretim Miktarları (Sm³/m³ Atık Su)

Bölüm 2.3'te analiz edildiği üzere çamurların bertarafında depolamadan yakmaya doğru bir geçiş mevcuttur. Yakma tesisleri tekli yakma (sadece çamur) olabileceği gibi kömür, biyokütle, çimento tesislerinde yakma uygulamaları da mevcuttur. Yakma tesisleri çamurun kuru ve yüksek kalorifik değerinde olması durumunda ücret ödemeyi kabul etmektedir. Aksi durumda ise bertaraf maliyeti kamu idaresi tarafından karşılanmaktadır. Çamur dışarıda bertaraf edildiği durumlarda nakliye masrafı da maliyete eklenmektedir. Çamur kurutulmadığı için nakliye maliyeti (kuru çamura göre) 4-5 katına çıkmaktadır. Bazı belediyeler müstakil yakma tesisleri inşa ederek çamuru yerinde bertaraf etmektedir. Bu tesisler genellikle akışkan yataklı yakma tesisleridir.



Şekil 3.5. AAT Enerji Tüketimi (kWh/m³)

Ülkemizin linyit kaynaklarının %54'ü 1000-1500 kcal/kg, %23'ü 1500-2500 ve 18'i de 2500-3500 kcal/kg enerji içeriğine sahiptirler(URL-21).Enerji İşleri Genel Müdürlüğü

(EİGM) 2019 yılı verilerine göre ülkemizde 83.000.000 ton linyit kömürü üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimin enerji eş değeri 15.609.000 TEP olarak verilmektedir (URL-7). Buradan hareketle üretilen kömürün ortalama kalorifik değerini 1800 kcal/kg olduğu hesaplanabilir. Tablo 3.1’de verilen kalorifik değerler göz önüne alındığında çamurların yerli üst kalite linyit ile kıyaslanabilir bir yakıt olduğu görülmektedir.

Tez kapsamında veri temin edilen işletmede çamur susuzlaştırılmış durumda yakılmaktadır. Bu nedenle ototermal yanma gerçekleşmemektedir. Ek yakıt olarak doğalgaz kullanılmaktadır. İncelenen tesiste 1 ton susuzlaştırılmış çamurun yakılması için 58 Sm³ doğalgaz (617 kWh/ton çamur) tüketimi gerçekleşmektedir. Yakma tesisinin enerji verim hesabı Denklem (3.1)’e göre yapılabilir.

$$\eta = (Q_{\text{üretim}} / Q_{\text{girdi}}) * 100 \quad (3.1)$$

Yakma tesisine enerji (1 ton çamur için) girdisi Tablo 3.1’de verilen çamur katı madde oranı, çamur kalorifik değeri ve beslenen ek yakıt miktarı ile hesaplanabilir.

$$Q_{\text{girdi}} = \dot{m}_{\text{çamur(KM)}} h_{\text{çamur}} + \dot{V}_{\text{doğalgaz}} h_{\text{doğalgaz(hacimsel)}} \quad (3.2)$$

$$Q_{\text{girdi}} = 0,214,89 + 58,2 * 10,55 = 615 \text{ kWh/ton çamur}$$

Tesiste elektrik üretimi ($Q_{\text{üretim}}$) 131,25 kWh/ton çamur (Tablo 3.1) olarak verilmektedir. Denklem (3.1)’e göre tesis elektriksel verimi %21 olarak hesaplanmaktadır.

$$\eta = (131,25 / 615) * 100 = \%21$$

Geleneksel buhar çevriminde doğalgaz yakıtlı kazanın elektriksel verimi %30-35 aralığındadır. Çamur yakmada ek yakıt olarak kullanılan doğalgaz geleneksel bir enerji üretim çevriminde kullanılsaydı 214 kWh elektrik üretimi mümkün olacaktı.

Tesis verilerinin karşılaştırılabilmesi için susuzlaştırılmış çamurun yakıldığı başka bir tesise ait verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat veri talep edilen tesislerden bilgi alınmadığı için kıyas yapmak mümkün değildir. Gaziantep Su ve Kanalizasyon idaresine ait tesiste kısmen kurutulmuş (%60 KM) çamurun yakılarak bertaraf edilmektedir. Tesiste elektrik üretimi gerçekleştirilmemektedir. Tesise ait detaylı bilgiler çeşitli kaynaklarda yer almaktadır (Abusoglu ve diğ., 2012; Demir , ve diğ., 2015; İrdemez ve diğ., 2016;

Kütük ve Aksoy, 2013). Anaerobik fermentörlerden geçirilen çamur susuzlaştırılarak (%27 KM) temaslı kurutucuda kurutulmaktadır. Kurutma için gerekli ısı yakma tesisinden elde edilmektedir. Kurutucu çıkışında %40 KM içeren çamurlar akışkan yataklı kazanda yakılarak bertaraf edilmektedir. Yanmanın karalı halde devam edebilmesi için ek yakıt olarak kömür kullanılmaktadır. Tesiste 180 ton/gün, ortalama 2500 kcal/kg ısıl değerde çamur yakılırken 6 ton/gün (yazın 4 ton/gün), 2975 kcal/kg ısıl değere sahip kömür ek yakıt olarak yakılmaktadır (İrdemez ve diğ., 2016).

Bu değerlendirme ışığında ülkemizde çamurların bertarafında uygulanan kurutma yöntemlerinin enerji ve maliyet açısından değerlendirilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Yakma tesis yatırımları yapılırken kısmi kurutma uygulamasının sisteme katkısı mutlaka değerlendirilmelidir. Bu çalışma kapsamında mevcut örnekler üzerinden kurutma sistemleri göz önünde bulundurularak çamur işlemede elde edilebilecek enerji, maliyet ve emisyon kazanımları detaylı olarak Bölüm 6.3'te değerlendirilmektedir.

4. KURUTMA PROSESLERİ

Kurutma işlemi; ısı etkisiyle uçucu bileşenleri katı fazdan ayrıştırılmasını sağlayan ve ayrışma işleminin buharlaşma yoluyla gerçekleştiği temel işlemdir. Ayrıştırılan bileşen genelde su olsa da solventler ve organik asitler de bu sistemlerle ayrıştırılabilirler.

Kurutma işlemi tanımı gereği ürün içerisindeki sıvının ısı yöntemleri kullanılarak buharlaştırılmasını ifade edilmektedir. Bu nedenle sıvının uzaklaştırılması veya ayrıştırılması için kullanılan mekanik (filtre, santrifüj vb. ekipmanlar) ya da kimyasal yöntemler kurutma işlemi tanımının dışında kalmaktadır.

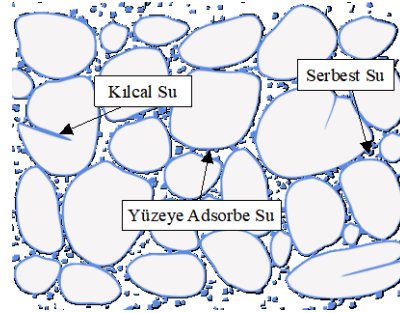
Kurutma işlemi katı –gaz ara yüzeyinde gerçekleşmektedir. Kuruma sırasında çevrim halinde iki ısı ve kütle transferi gerçekleşir. Birinci aşama çevreden kurutulacak ürüne ısı geçişi ile yüzeyden buharlaşma, ikincisi ürün iç kısmından yüzeye suyun difüzyonu ve birinci olayın tekrarı ile buharlaşma. Birinci aşamanın verimi sıcaklık, kurutucu ortam nemi, ortam basıncı ve temas alanına bağlıdır. İkinci kademe ise katının fiziksel özelliği, sıcaklık ve nem oranına bağlıdır (Mujumdar, 2007). Kurutma proseslerinde ürün özelliğine bağlı olan suyun difüzyon hızına müdahale edilemez. Fakat dışsal faktör olan ısı iletimi ve buharlaşan suyun tahliyesi proseslerine kısmen müdahale edilebilir (Warren, Julian, ve Peter, 1993).



Şekil 4.1. Kuruma prosesi kütle akış döngüsü

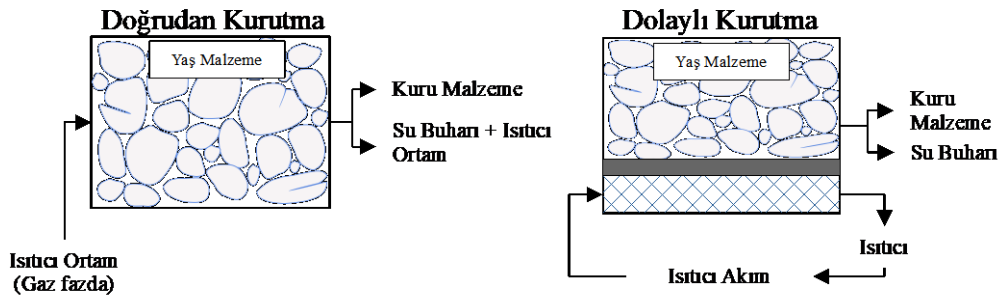
Katı bileşen içindeki su, bağlı ve serbest su olarak sınıflandırılır. Serbest su partikül yüzeyindeki fiziksel sudur. Mekanik işlemler ile kısmen katıdan uzaklaştırılabilir. Kuruma sırasındaki davranışı katıdan bağımsızdır. Bağlı su ise katıyla kimyasal etkileşim halinde bulunmaktadır. Kimyasal ya da fiziksel olarak katı yüzeyine adsorpsiyon ile bağlanmış su, katı fazda çözünmüş su, hücre yapısındaki su, katı yüzeyindeki ince boşluk ve çatlaklarda bulunan su bağlı suya örnektir. Sadece serbest su bulunduran katılar

higroskopik olmayan katı olarak adlandırılır. Higroskopik katılar ise her iki tür suyu da bulundurlurlar.



Şekil 4.2. Islak katı partiküllerle beraber görülen su yapıları

Buharlaştırma için gerekli ısının kurutulacak olan ürüne transferi iletim, taşınım ve radyasyon ile veya bunların birlikte kullanımı ile gerçekleştirilebilir. Bunlardan konduktif (ısı iletimini esas alan), konvektif (ısı taşınımını esas alan) 2 genel yöntem yoğunlukla kullanılmaktadır. Işınımı esas alan sistemler arasında mikrodalga ve kızılötesi ışık kullanılarak kurutma işlemleri de sayılabilir. Konduktif yöntemde ısı taşıyıcı ortam (kızgın yada doymuş buhar, kızgın yağ, sıcak su veya gazlar vb.) ve ürün birbiriyle temas etmeden, ikisi arasında yer alan cidarlar vasıtasıyla ısı aktarımı sağlanır. Ürün sıcak yüzeye temas ederek enerji kazanır ve kuruma gerçekleşir. Konvektif proseste ise ısı taşıyıcı akım (sıcak hava, yanma sonu gazları, kızgın buhar) ürün ile temas ettirilerek buharlaştırma sağlanır. Sıcak gazlarla ürünün daha iyi karışabilmesi için mekanik karıştırıcılar, tambur dönme hareketi gibi uygulamalar gerçekleştirilebilir. Işınımla kurutma işleminde sıcak ortamdan veya elektrikselsel bir kaynak kullanılacak üretilen ışınım enerjisi sayesinde ısı transferi gerçekleştirilir.



Şekil 4.3. Dolaylı ve doğrudan kurutma proseslerinin şematik gösterimi

Buharlaştırma işlemi endotermik bir işlemdir. Prosesin en önemli göstergesi birim efektif kurutma alanında birim zamanda meydana gelen buharlaştırma (\dot{m} , $\text{kg/m}^2\text{s}^{-1}$) miktarıdır.

Birim sıvı madde miktarı (kütle veya mol) buharlaşması için gerekli enerji buharlaşma entalpisi (Δh_{ev} , kJ/kg ya da kJ/kmol) olarak adlandırılmaktadır. Sistem enerji dengesi kurularak ürüne aktarılan ısı enerjisi $q_{buharlaşma}$ hesaplanmalıdır. Kuruma hızı Denklem (4.1)'e göre hesaplanabilir.

$$\dot{m} = q_{buharlaşma} / \Delta h_{ev} \quad (4.1)$$

Sıvı fazdaki suyun buhar basıncı ($P_{v,su}$), ortam basıncına (P) eşit veya ondan daha büyük olduğunda buharlaşma meydana gelir. Buharlaşma sırasında sıvı faz, buharlaşma enerjisini (Δh_{ev}) kaybederek sıcaklığı düşer. Sıvının buhar basıncı ortam basıncı ile eşit olana kadar buharlaşma devam eder. Süreç sonunda termodinamik denge kurulur. Vakum altında gerçekleştirilen kurutma uygulamalarında ortam basıncı uygun değerlere düşürülerek oda sıcaklığında kurutma işlemi yapılması ve bu sayede sıcaklığa duyarlı ürünlerin güvenli şekilde kurutulması sağlanabilir (Intelvi, 2009).

Ortam havası kuru hava ve su buharının bir karışımıdır. Ortam havası altında gerçekleşen kurutma işlemlerinde ortam nem değerlerinin de kurutmada etkisi vardır. Su içeren atmosferik havanın basınç dengesi için Denklem (4.2) yazılabilir. Burada P_{toplam} ortam basıncı, $P_v(T)$ gaz karışımındaki su buharının T sıcaklığındaki kısmi basıncı, P_g ise kuru havanın kısmi basıncını ifade etmektedir.

$$P_{toplam} = P_v(T) + P_g \quad (4.2)$$

Atmosferik şartlarda buharlaşmanın gerçekleşmesi için ıslak katı maddede yer alan suyun buhar basıncının ($P_{v, su}$), havadaki (kurutucu akım olarak baca gazı kullanıldığında baca gazındaki) su buharının basıncına ($P_{v, gaz}$) eşit olması yeterlidir.

Yukarıdan anlaşıldığı üzere kuruma; ortam (veya ortam bileşenleri) ile ıslak katı arasında basınç farkı etkisiyle gerçekleşmektedir. Vakum altında yapılan kurutmada basınç farkı doğrudan oluşturulmaktadır. Atmosferik kurutma işlemlerinde ise katı içindeki sıvının buhar basıncının yükseltilebilmesi için sıcaklığının yükseltilmesi gerekmektedir.

Kurutma başlangıcında Şekil (4.2)'de gösterilen serbest su öncelikle buharlaşır. Serbest su partikül dışında olduğu için kuruma için gerekli enerji düşüktür. Belirli bir nem değerine gelindiğinde tüm serbest su buharlaşmış ve ürün yüzeyi kurumuştur (Tsotsas ve

diğ., 2010). Kurumanın bu birinci evresine sabit kuruma hızı evresi veya zorlanmamış kuruma denilmektedir. Bu andaki nem değeri ise kritik nem değeri (X_{kritik}) olarak ifade edilir. Kurumanın ilk fazında herhangi bir partikül veya yatak (kurutulan ürün yığını) direnci olmadığı için bu andaki kuruma hızı maksimum kuruma ($\dot{m}_{maksimum}$) hızıdır(Intelvi, 2009). Bu aşamadan sonra yüzeyden buharlaşmanın devam edebilmesi için başka bir kütle transfer mekanizması devreye girer. Yüzeyi kuru olan partikülün kılcal çatlaklarda ve partikül içinde bulunan suyun yüzeye sıvı veya gaz fazında difüzyon ile ulaşması gerekmektedir. Burada bulunan suyun buhar basıncı serbest suyun buhar basıncından daha düşüktür. Bu nedenle kuruma hızı ilk aşamadan daha düşüktür. Bundan sonraki aşamalara azalan kuruma hızı evresi denmektedir. Kuruma hızı azalan nem oranı ile beraber düşerken belirli bir nem değerinde kuruma hızı çok hızlı düşmeye başlar ve sıfıra yaklaşır. Bu andaki nem değeri higroskopik denge nem içeriği (denge nem değeri, X_{denge}) olarak adlandırılır. X_{kritik} ve X_{denge} arasındaki değişimin gözlemlendiği nem değeri ise maksimum higroskopik nem değeri olarak adlandırılır. Kuruma sırasında görülen bu üç faz Şekil 4.2’de karakteristik bir kuruma eğrisinde gösterilmektedir.

Doğrudan kurutma işlemi tasarımı ve üretimi kolay olduğu için en yaygın kullanılan sistemdir. Gaz fazdaki bir bileşen sıvı bir ortamla temas ettiği zaman sıvının bir kısmı buharlaşarak gaz karışımına katılır. Gaz fazına su buharının geçişi, içerisinde su buharının kısmi basıncı mevcut sıcaklıktaki doyma basıncı değerine ulaşana kadar devam eder. Gaz fazın ne kadar su alabileceği veya ürünü kurutmak için gereken havanın özellikleri psikrometrik tablolar ile belirlenebilmektedir. Sürekli bir kurutucudaki kütle dengesi Denklem (4.3)’e göre hesaplanabilir. Bu denklemde F ve G sırasıyla ürün ve gaz kütleli debisi (kg/s), X ve Y sırasıyla ürün ve gaz nem (kg su/(kg katı veya kuru hava) oranıdır.

$$F(X_1 - X_0) = G(Y_0 - Y_1) \quad (4.3)$$

Kurutulacak ürünün nem içeriğinin toplam katı maddeye oranı yüzdesel olarak ifadesi yüzde nem oranı olarak ifade edilir ve H harfi ile gösterilir. Bu ifade anlatımda nem miktarının kolay anlaşılabilir halde verilmesini sağlamaktadır. Fakat hesaplama işlemlerinde yüzdenin dönüşümü ve ifadenin hesaplanmasında kullanılacak olan su içeriği ve toplam kütlelerin kuruma sırasında meydana gelen buharlaşma ile değişmesi sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle hesaplamalarda değişmeyen bir değer olan katı

maddeye dayanan bir oranlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle hesaplama işlemlerinde, ürünün nem içeriğinin toplam katı maddeye oranlanmasıyla elde edilen nem değeri kullanılır ve X harfi ile gösterilir. H ve X ifadeleri ile bu ifadelerin dönüşümünü veren formüller Denklem (4.4)-(4.6) da verilmiştir.

$$H = \left(\frac{m_{kg, su}}{m_{kg, \text{çamur}}} \right) \times 100 \quad (4.4)$$

$$X = \frac{m_{\text{çamur, nemli}} - m_{\text{katı}}}{m_{\text{katı}}} = \frac{m_{su}}{m_{\text{katı}}} \quad (4.5)$$

$$X = \frac{H}{(100-H)} \quad (4.6)$$

Konvektif kurutma davranışı anlık kurutma akısı ve çamurun nem oranını gösteren karakteristik kuruma eğrisi (Krischer Eğrisi) ile tanımlanır. Temaslı kurutma için karakteristik bir eğri oluşmaz (Bennamoun ve diğ., 2013). Konvektif kurutma grafiği üzerinde öncelikle kurutma akısında kısa süreli bir artış gözlenmektedir. Bu aşamanın sonrasında azalan kuruma hızı aşamasına geçilmektedir. Çamurun özelliğine bağlı olarak birden fazla azalan kuruma hızı aşaması da görülebilir. Bu aşamalarda nemin azalmasına bağlı olarak kuruma akısı sürekli düşer.

4.1. Dolaylı Kurutma Prosesi

Dolaylı kurutucularda (DK) kurutma için gerekli ısı transferi işlemi, enerjinin ısıtılmış bir cıvardan kurutulacak ürüne aktarılması ile sağlanır. DK ise kürekli kurutucular (KK) (paddle dryers), ince film (thin film dryers) ve disk kurutucular (rotary disc dryers) olarak sınıflandırılmaktadır. Arıtma çamurlarının dolaylı kurutulması sırasında görülen yapışkan faz nedeniyle kurutucunun tıkanması sık görülen bir durumdur. KK'larda bulunan oluklu kurutma yatağı, sıyırıcı bıçak ve karıştırıcı yapısı nedeniyle tıkanma olayı görülmemektedir.

Geleneksel kurutucu türlerinin tasarımları genellikle ürün özelliklerini de içeren deneysel bağıntılar ile gerçekleştirilmektedir. Fakat kurutulacak ürün türleri çeşitlendiği için deneysel bağıntılar tüm ürünleri kapsamamaktadır. Prototip ölçekli cihazlarla yapılan testler yardımı ile ölçeklendirme yapabilmek ise mümkündür. Burada karşılaşılan sorun

kurutma hızının kurutmaya ilişkin parametrelerle (ürün su içeriği) doğrusal olarak değişmemesidir. Özellikle çamur gibi su ve organik bileşen içeriği yüksek ürünler farklı nem oranlarında ısı/kütle transfer davranışının değiştiği ve fiziksel olarak çeşitli (yapışkan, granül, büzülme) yapılarda bulunmaktadır. Bu nedenle kurutucu tasarımında ürüne ait özellikler temel olmakla beraber kurutma sırasındaki tüm davranışların her faz için özel olarak irdelenmesi gerekmektedir.

Dolaylı kurutma işleminde cidar malzemesi ile ürün arasında ısı transferi (iletim) gerçekleşir. Bazı durumlarda kurutma haznesine hava beslemesi yapılmaktadır. Bunun amacı kurutma haznesindeki buharı hızlı şekilde tahliye ederek yoğunlaşmasını engellemektir. Burada verilen hava debisi ve ısı yükü doğrudan kurutma sistemlerindeki kurutucu akıma kıyasla çok düşüktür. Temaslı kurutmada ürünün sıcaklığı yükselerek ilk halinden (T_{doyma}), T_v sıcaklığına ulaşır. Toplam buharlaşmanın büyük kısmı T_v sıcaklığında gerçekleşir. Vakum altında gerçekleşen kurutmada T_v ortam basıncında suyun buharlaşma sıcaklığına eşittir. Süpürücü gaz kullanıldığında ise T_v süpürücü gazın yaş termometre sıcaklığına yakın veya ona eşittir (Warren ve diğ., 1993).

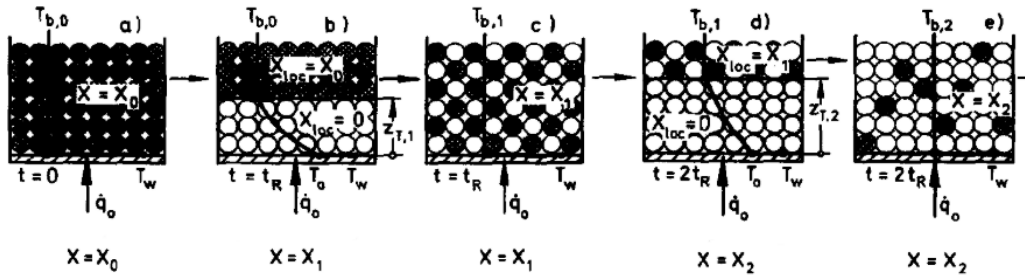
Taranan modelleme teorileri arasında karıştırmalı temaslı kurutma proseslerinde kuruma hızını kapsamlı ve etkili şekilde hesaplamayı sağlayan yöntemin Penetrasyon Teorisi olduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında modelleme kullanılmamıştır. Temaslı kurutma mekanizmasının anlaşılabilmesi için destekleyici olarak faydalanılmıştır.

Karıştırmalı temaslı kurutma işleminde kuruma hızı; ısı transferi ve buhar tahliyesine bağlıdır. Isı transferi ile ilgili olarak cidardan malzemeye ısı geçişini belirleyen temas direnci, tek partikül içerisinde ısı penetrasyon direnci, ve yığın içerisinde ısı penetrasyon direncidir. Buhar tahliyesi açısından ise partikül ve yığın kütle transferi olarak iki farklı direnç söz konusudur.

Kurutmanın başlangıcında ürün sıcaklığının cidar sıcaklığına eşit olduğu anda ısı penetrasyon direnci meydana gelmediği ve buharlaşma başlamadığı için kütle transfer direncinin de olmadığı tespit edilmiştir. Bu noktada gerçekleşen tek direnç ısı temas direncidir. Bu durumda toplam maksimum kuruma hızı Denklem (4.7) ile hesaplanabilmektedir.

$$\dot{m}_{\text{maks}} = h_{\text{temas}} (T_{\text{cidar}} - T_{\text{doyma}}) / \Delta h_{\text{ev}} \quad (4.7)$$

Kürekli kurutucuda gerçekleşen sürekli karışma olayı ve ısı/ kütle transferi olayı; penetrasyon teorisine göre belirli bir t_k süresinde mükemmel karışma ve geçici bir t_R süresinde statik (hareketsiz) çamur yatağında ısı ve kütle transferi gerçekleşmesi ile benzeşim kurmaktadır (Arlabosse ve Chitu, 2007). Durağan süre içerisinde cidardan malzemeye ısı transferi gerçekleşmekte ve kuruma olayı olmaktadır. Teoriye göre durağan sürede cidardan belirli mesafeye kadar tüm partiküller kurumaktadır. Bu mesafeye ve kuru ile yaş malzemeyi ayıran hatta kuruma cephesi adı verilmektedir. Karıştırma işlemi neticesinde kurumuş partiküller ve yaş partiküller bulunmaktadır mükemmel şekilde karışmaktadır. Bu durumda cidar ile temas halindeki partiküllerden bazıları kuru bazıları yaştır. Bundan dolayı takip eden durağan süreçte kuruma cephesi daha ileri bir konuma ilerler. Bu süreç döngüsel olarak tüm yığın kuruyana kadar devam eder. Kuruma cephesi, karıştırma ve durağan süreç Şekil 4.4'te grafik olarak verilmektedir.



Şekil 4.4. Temaslı kurutma için penetrasyon teorisine göre kuruma cephesi karıştırma öncesi ve sonrası durumu (E. Tsotsas ve Schlünder, 1986)

Tüm kuruma olayı partikül yüzeyinde meydana geldiği durumda incelenmesi gereken tek ısı direnç (temas direncine ilave olarak) yığın penetrasyon direncidir. Bu durumda elde edilecek kuruma hızı “ \max_m ” değerinden daha düşük olacaktır. Ayrıca azalan nem oranı nedeniyle kuru partiküller ıslak partiküllerin cidar ile temasının engelleyeceği için kuruma hızını azaltacaktır.

Isı transferi çözümlemesi için Fourier teorisi kullanılmıştır. Durağan durumda cidar ve malzeme arasında sıcaklık dağılımının hesaplanması için Fourier denkleminin sabit yüzey sıcaklığı için Neumann tarafından geliştirilen çözümü uygulanmıştır. Bu durumda kuruma cephesinin indirgenmiş konumunu veren denklem yığın yatak ısı difüzyon

değerine bağlı olarak elde edilmiştir. İlgili denklemlerin analitik olarak çözümlenmesiyle penetrasyon direnci katsayısına ilişkin elde edilen eşitlik Denklem (4.8)'de verilmektedir.

$$h_{\text{pen}} = \frac{2}{\text{erf}(\zeta)} \sqrt{\frac{\rho \Delta C_p}{\pi t_R}} \quad (4.8)$$

Tamamen kuru durumda olan malzeme için kuruma cephesi konumundan bahsedilemez. Bu durumda $\text{Erf}(\text{zeta})=1$ olur. Buradan yola çıkılarak tamamen kuru yatak için ısı Penetrasyon direnci hesaplanmasında Denklem (4.9) kullanılabilir.

$$h_{\text{kuru}} = 2 \sqrt{\frac{\rho \Delta C_p}{\pi t_R}} \quad (4.9)$$

Modelin çözmeye çalıştığı asıl problem kuruma cephesi konumunun tespit edilmesidir. Buna ilişkin önerilen denklem aşağıda verilmektedir. Kuruma cephesi konumu (indirgenmiş kuruma cephesi konumu-zeta) bilindiğinde Denklem (4.10) kullanılarak ısı Penetrasyon direnci farklı cephe konumları için kademeli olarak hesaplanabilir. Zeta değerinin hesabı için kuru yatak ısı Penetrasyon direncine bağlı olarak Denklem (4.11)'in kullanılabilceği ifade edilmiştir.

$$\sqrt{\pi} \zeta \exp(\zeta^2) \left[1 + \left(\frac{h_{\text{ws}}}{h_{\text{dry}}} - 1 \right) \text{erf}(\zeta) \right] = \left(\frac{h_{\text{ws}}}{h_{\text{dry}}} - 1 \right) / \xi \quad (4.10)$$

$$\xi = \frac{X \Delta h_{\text{ev}}}{C_p (T_w - T_b)} \quad (4.11)$$

Penetrasyon direnci (h_{wet}) hesaplandığında ısı transferi ve buharlaşma hızı Denklem (4.12) ve Denklem (4.13) kullanılarak hesaplanabilir.

$$q = h_{\text{wet}} (T_w - T_b) \quad (4.12)$$

$$\dot{m} = \frac{q \exp(-\zeta^2)}{\Delta h_{\text{ev}}} \quad (4.13)$$

Her bir durgun faz sonrası kuru partiküllerin sıcaklığı arttığı için yağın ortalama sıcaklığı da her kademedede artmaktadır. Yağın sıcaklık değişimi kuruma cephesi konumunu

etkilediği için her seferinde tekrar hesaplanması gerekmektedir. Yığın sıcaklık değişimini elde etmek için Denklem (14.4) kullanılmaktadır.

$$\Delta T_b = \frac{\Delta h_{ev}}{C_{p+X} C_{p,su}} \left(\frac{1 - \exp(-\zeta^2) \Delta X}{\exp(-\zeta^2)} \right) \quad (4.14)$$

Yukarıdaki denklemi her bir durgun süre için tekrar hesaplayarak döngüsel olarak zeta değerinin hesaplanması ve Penetrasyon direncinden itibaren tekrar hesaplanarak elde edilen veri ile kuruma hızı $\dot{m}(X)$ grafiği elde edilebilir.

4.2. Çamur Kurutmada Kullanılan Kurutucu Türlerinin Tanıtımı

Ürün özellikleri, kuru üründen beklenen özellikler, hijyen şartları, yatırım ve işletme maliyetleri dikkate alınarak çok çeşitli kurutucu sistemleri geliştirilmiştir. Kurutucuların sınıflandırılmasında ısı taşıyıcı ortamın ürünle teması (doğrudan veya dolaylı), karıştırma durumu (karıştırıcılı veya karıştırıcısız), proses türü (yığın ve sürekli), ortam basıncı (atmosferik veya vakum) gibi pek çok etken dikkate alınabilir. Bu çalışma kapsamında arıtma çamurlarının kurutulmasında yaygın kullanılan sistemler incelenmiştir.

Yapılan iş sadece suyun buharlaşması olmasına rağmen her yöntemde farklı karakteristik kuruma davranışı görülür. Kondüktif kurutmada çamur ilk önce viskoz bir akışkan görünümündedir ve kurutma akısı nispeten yüksektir. Bu aşamadan sonra yapışkan bir kıvama geçerek kurutma hızı düşer. Bu aşamada çamur genleşmekte ve tek parça olarak hareket etmektedir. Bu nedenle ısıtıcı cidarlarla teması minimum seviyeye düşer. Bu aşamanın sonunda granül fazına geçiş olur. Yapışkan ve granül faz arasında geçişin olduğu bölgede çamur tamamen yapışkan bir hal alır ve karıştırma için gerekli tork başlangıçtaki değer 20 katına kadar ulaşabilir. Bu ikinci faz kurutma için sınırlayıcı faz olup aynı zamanda kuruma süresinin büyük bölümü burada geçmektedir (Ferrasse ve diğ., 2002).

4.2.1. Doğrudan Kurutucu Sistemler

4.2.1.1. Döner Kurutucu

Döner kurutucular işletmesi kolay ve ekonomik sistemlerdir. Ürün ve kapasite açısından oldukça esnekler. Çalışma parametreleri de ürün şartlarına göre değiştirilebilir. Bu

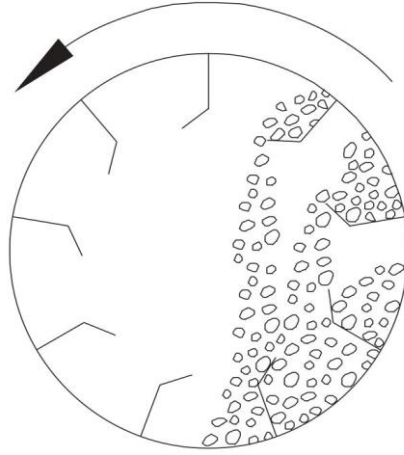
avantajlarıyla kurutma sistemleri arasında en yaygın kullanılan sistemlerdir. Döner kurutucuda kurutma işlemi, rulmanlar üzerinde yerleştirilmiş, yatayda eğimli şekilde yer aldığı metal bir tamburun içerisinde gerçekleştirilir.

Döner kurutucularda tambur uzunluğu genellikle çapın 8–10 katı kadar olmaktadır. Kurutucu tambur dişli veya zincir sistemi ile döndürülür. Dönme hızları ürüne bağlı olarak değişir. Ürün girişi makinenin üst tarafından özel bir davlumbazdan gerçekleşir. Kurutucu içerisinde belirli mesafe ve uzunlukta ve çeşitli geometrilerde kürekler bulunur. Bu kürekler ve dönme hareketi sayesinde ürün karıştırılır. Kurutma işlemi için sıcak hava veya sıcak baca gazları kullanılabilir.



Şekil 4.5. Döner kurutucuya ait örnek çizim(URL-17).

Çamur kurutma işlemlerinde sıcak yanma gazları kullanılır. Kurutucu içerisindeki gaz hızını, su buharı taşıma kapasitesini artırmak ve cehennemlikte aşırı ısınmayı önlemek için ilave ortam havası cehennemlik cidarından verilebilir. Yakıt olarak katı, sıvı gaz yakıtlar ve biyokütle kullanılabilir. Kapasite ve uygun olduğunda ortamda bulunan atık ısı kaynaklarından da faydalanılabilir. Kurutulan ürünün ve sıcak gazların akış yönü aynı olduğunda eş akışlı, ters olduğunda ise ters akışlı döner kurutucu olarak adlandırılabilirler. Kurutulan ürün, çıkış davlumbazından dökülür. Dönme devir sayısı çevresel hız değeri 0,2–0,5 m/s olacak şekilde ayarlanır(Dinçer ve Zamfirescu, 2015). Döner kurutucuda kurutma sırasında ürün akışının kesit görüntüsü resimde verilmektedir(Perry ve Green, 2008).



Şekil 4.6. Döner kurutucuda kürek yapısı ve dönme sayesinde meydana gelen karışma hareketi(Perry ve Green, 2008)

Döner kurutucuların mekanik kısımları aynı kalmak şartıyla ısı girişinin dolaylı şekilde olduğu buhar borulu ve elektrikli ısıtmalı sistemler de mevcuttur Fakat çamur kurutmada uygulaması yoktur.

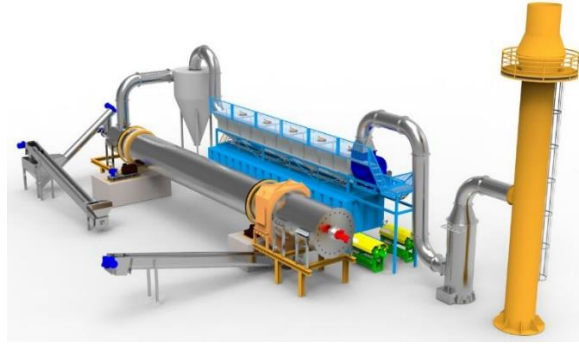
Döner kurutucular için temel geometrik ve proses tasarım parametreleri olan kurutucu uzunluğu (L), kurutucu çapı (D), kurutucu dönme devir sayısı (n_f), Kurutucuda bulunan ürün miktarı (H) ve kurutucu hacmi (V) arasındaki bağıntılar denklem (4.15)-(4.17) de verilmektedir(Mujumdar, 2007).

$$2 < \frac{L}{D} < 20 \quad (4.15)$$

$$5 < \frac{n_f}{D} < 10 \quad (4.16)$$

$$\%5 < \frac{H}{V} < \%15 \quad (4.17)$$

Döner kurutucular taneli yapıdaki ürünlerin işlenmesi için tasarlanmıştır. Arıtma çamuru yapışkan kıvamı nedeniyle kuruma hızının düşük olmasına neden olabilmektedir. Bu gibi durumlarda kurutulmuş ürünün belli bir kısmı besleme kısmından yeni çamurla birlikte kurutucuya beslenir. Makinelerin ilk çalıştırma işlemlerinde de bu yöntem uygulanabilmektedir.

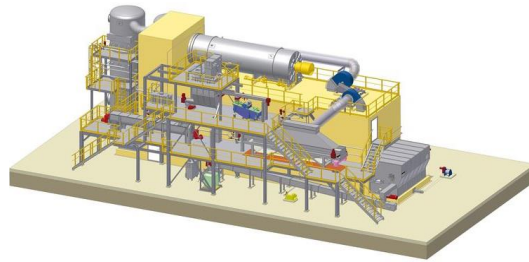


Şekil 4.7. Arıtma çamuru kurutma prosesi için tasarlanmış döner kurutucu ve gaz yıkama sistemi

Kurutma sırasında sıcak gazlarla taşınan tanecikler toz toplama ünitelerinde ayrıştırılır. Katı kısmı ayrılan gaz ise arıtma sisteminde gaz yıkama ve filtrasyon işlemlerinden geçirilerek koku giderimi yapılır.

4.2.1.2. Bantlı Kurutucu

Bantlı kurutucular kapalı bir kabin içerisinde hareketli taşıyıcı bant sistemi bulunur. Çamur besleme sistemi bant üzerine dengeli şekilde çamuru yayar. Bant olarak çelik malzemeden üretilmiş bantlar kullanılır. Bantın alt veya üst tarafındaki kanallardan sıcak gaz üflenir. Çamur kurutma işlemlerinde genellikle çok katlı bant kurutucular kullanılırlar. Üst banta beslenen ürün, bant sonunda ters yönde ilerleyen alt kattaki banta dökülür. Her katta dökülme ile karışma sağlanmış olur. Kuruma süresinin çok uzun olmaması için bant kesitinde bulunan çamur kalınlığının düşük olması gerekir.



Şekil 4.8. Bantlı kurutucu(URL-6).

Kurutmada kullanılacak sıcak akışkan harici bir sistemde hazırlanır. Yakıt olarak katı, sıvı gaz yakıtlar ve biyokütle kullanılabilir. Kurutucudan çıkan gazlar kullanılarak beslenen yakma havasının ön ısıtması yapılabilir. Çıkan gazdaki nem miktarı yüksek değilse bu akımın bir kısmı yeni ısıtılmış gazla karıştırılarak ısı tasarrufu sağlanabilir.

Bantlı kurutucuda kapasite değeri bantın uzunluğuna bağlıdır. Bant uzunluğu kat sayısını artırarak veya kurutucu uzunluğunu artırarak sağlanabilir. Kuruma hızının optimizasyonu bant hızı ve kurutucu ortam sıcaklığı ile sağlanabilir. Bantlı kurutucular da esnek, işletmesi kolay ve güvenilir sistemlerdir.

4.2.1.3. Solar Kurutucular

Solar kurutucular güneş ışınımının termal enerjisinin kullanımı ile kurutma sağlarlar. Pratik olarak güneş enerjisini doğrudan kullanımı mümkün olabildiği gibi güneş ile hava, su veya yağ ısıtılarak bunları kurutucu akım olarak da kullanmak mümkündür. Çamur kurutma işleminde güneş ışınımı genellikle doğrudan kullanılır. Bunun için büyük ölçekli, sera benzeri, güneş ışınımının azami derecede girişini sağlayacak kapalı bir hacim oluşturulur. Çatı uygun açıda eğimli ve ışınım geçiren malzemeler ile kapatılmış olmalıdır. Bu nedenle solar kurutma makine değil sistem olarak ele alınmalıdır.

Bazı uygulamalarda tesis etrafında kurulan sistemlerle güneş enerjisi kaynaklı hava ısıtması ve yağ ısıtması yapılabilmektedir. Bu şekilde mekâna beslenen havanın ön ısıtılması ya da zeminin ısıtılması sağlanabilir. Solar ışınımın yeterli görülmediği bölgelerde kısmi olarak ek ısıtma kaynakları da kullanılabilir. Bu sistemler ürün nem değeri, güneş ışınım değerleri ve çevre sıcaklığına göre devreye girer ya da çıkarlar.



Şekil 4.9. Huber SE firması tarafından tasarlanmış otomatik karıştırıcılı (çevirici) bir solar kurutma tesisi(URL-12).

Çamur zemine serilerek kurumaya bırakılır. Hava dolaşım fanları ile sıcak havanın çamur üzerine üflenir. Otomatik veya operatör kontrollü karıştırıcılar vasıtasıyla belirli sürelerde

ters yüze edilerek karıştırılır. Ortam sıcaklık ve nemi sürekli olarak kontrol edilir. Solar kurutma sistemlerinde enerji tüketimi diğer sistemlere oranla oldukça düşüktür. Fakat yüksek kapasitelerde işletilmesi için çok geniş alan ve güneş ışınımı gereklidir. Bu ise pek çok arıtma tesisi için mümkün değildir. Ayrıca bekleme süresi uzun olduğu için kokuşma gerçekleşebilir.

4.2.2. Dolaylı Kurutucu Sistemleri

Dolaylı kurutucu sistemlerinde kurutulacak ürüne ısı transferi, cidar malzemesinin; sıcak su, kızgın yağ, kızgın buhar gibi bir ısıtıcı ortamla temas ettirilmesi ile sağlanır. Bu tür sistemler mutlak ya da kısmi vakum altında da çalıştırılabilmektedirler. Dolaylı kurutucu sistemleri düşük hacimse yüksek ısı transfer alanı sağlanması nedeniyle kompakt makinelerdir.

4.2.2.1. Kürekli kurutucu

Kürekli kurutucularda çamurun döküldüğü kısım kurutma haznesi olarak adlandırılır. Hazne içerisinde, üzerinde karıştırıcı kürekler bulunan mil yer alır. Kürek sistemi ve kurutma haznesinin dış kısmı çift cidarlı ve içi boş yapıdadır. Kurutma sırasında kürek içinden ve cidardan ısıtıcı akışkan geçirilir. Çamur kurutma işleminde kızgın yağ ve kızgın buhar ısı taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Küreklerin monte edildiği mil düşük dönme hızlarında (5-50 devir/dakika) hareket eder. Kurutucu genellikle düşük bir eğimle tasarlanır. Kuruyan ürün hazne sonundaki bölümden dökülür.

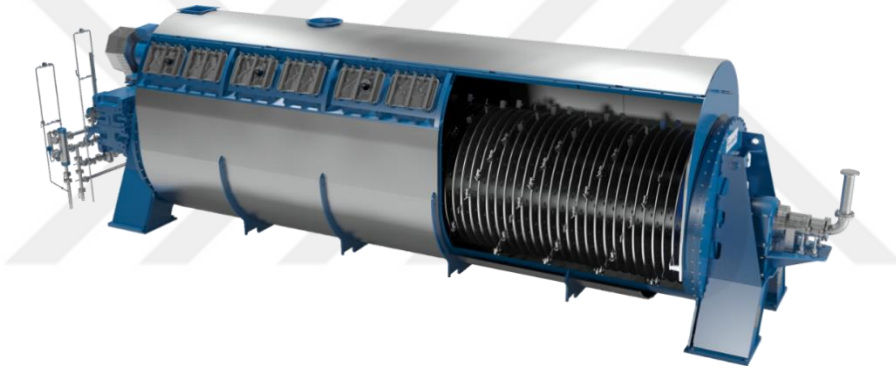
Kapalı haznede oluşan su buharını tahliye etmek için içeriye düşük hızda hava beslenir. Kuruyan çamurdan taşınan küçük boyutlu toz parçalarının alev almaması için hava - buhar karışımı sıcaklığı ve oksijen seviyesi kontrol edilir. Gerekli durumlarda asal gaz beslemesi ile oksijen oranı düşürülür.

Hazne içerisindeki milin uzunluğu ve kürek sayısı artışı ile toplam ısı transfer alanı da artmaktadır. Bu nedenle kurutucu kapasitesinin belirlenmesinde kürekler arası mesafe, kürek çapı ve kürek geometrisi önemli bir faktördür. Milin esnemesi, yağ sıcaklığının çıkış kısmında çok azalması mümkün olabileceği için haznedeki mil sayısı artırılarak ısı transfer alanı artırılır.

Kürekli kurutucuların çamur kurutma işlemindeki avantajı ısı transfer alanının yüksek olması, çalışma sıcaklığının yüksek olması ve çamur kuruma sırasındaki yapışkan davranışın olumsuz etkisinin giderilebilmesidir. Çamur kurutmada kullanılan kürekli kurutucularda genellikle çift mil bulunur. Miller birbirine ters yönde dönerler. Her küreğin arkasında karşı mildeki küreğe yapışan çamuru temizlemek için bir sıyırıcı bulunur. Bu sayede çamurun yapışması engellenerek gerekli karışma sağlanır.

4.2.2.2. Disk kurutucu

Disk kurucular kürekli kurutucular ile benzer yapıdadır. Temel farklılık karıştırıcı mekanizmanın geometrisidir. Disk kurutucuda mil üzerinde kürek yerine içi boş disk yer alır. Kürekli kurutucuya kıyasla diskin çapı daha büyüktür. Kurutucu akım olarak yağ ve buhar kullanılabilir. Hazne içinde oluşan buhar süpürücü hava ile taşınır.

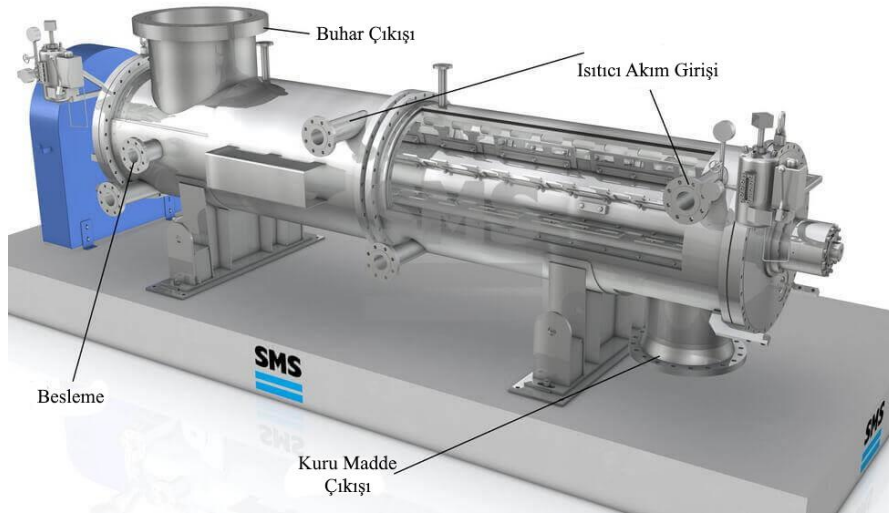


Şekil 4.10. Disk tipi çamur kurutucu sistemi ve kesit görünümü(URL-8).

Çamur kurutma sırasında disklere yapışan çamur hazneye sabitlemiş olan sıyırıcılarla temizlenir. Çamur kuruma sırasında tek yönde ilerleyerek kurur. Kuru malzeme hazne sonunda dökülerek tahliye edilir.

4.2.2.3. Yatay İnce Film Kurutucu

İnce film kurutucuda dairesel kesitli kurutma haznesi içine beslenen ürün, döner mil üzerinde yer alan sıyırıcılar yardımıyla sıcak cidara sıvanır. Dairesel kesit boyunca temas devam edecek şekilde taşınır. Kürekli ve disk kurutuculardan farklı olarak mil üzerinden ısıtma yapılmaz, kuruma haznesinde ürün birikimi olmaz ve bekleme süresi görece kısadır. Kuruyan ürün dökülerek kurutucudan tahliye edilir.



Şekil 4.11. SMS firması tarafından tasarlanan yatay ince film kurutucu sistemi(URL-11).

4.3. Ön işlemlerin kurutma davranışına etkisi

Pompalama; Kohezyon azalması nedeniyle meydana gelen adhezyon artışı çamurun geçirgenliğini azaltmaktadır. Kurutmanın ileri aşamalarında bağlı suların uçurulması için ihtiyaç duyulan geçirgenliğin azalması kurutma davranışını olumsuz etkilemektedir(Huron ve diğ., 2010).

Kireçleme; Atık su arıtma proseslerinde kullanılan kireç konvektif kurutma davranışını çamur türünden bağımsız olarak ortalama kurutma oranını arttırmakta ve buna bağlı olarak kurutma süresini kısaltmaktadır. Ayrıca ön kireçleme işleminin kurutma davranışı üzerinde son kireçlemeye göre daha iyi sonuçlar vermiştir(Huron ve diğ., 2010; Tunçal, 2010).

Çamur kimyası; Ham birincil çamuru ve Ham biyolojik çamurun kuruma potansiyeli çürümüş çamurdan daha yüksektir. Birincil çamurun kuruma potansiyeli ise ham biyolojik çamurdan daha yüksektir. Kurutma işleminde bu 2 tip çamurun karışı oranının optimize edilmesi önerilmektedir. Organik bileşen miktarı az olan çamurların kuruma potansiyelleri daha yüksektir(Tunçal, 2010).

İşletme parametreleri; Çamur yapısından bağımsız olarak konvektif kurutmada kurutma süresi; sıcaklık ve akış hızının artışı, kurutucu ortam nem oranının azalması ile kısalmaktadır(Léonard ve diğ., 2005). Kondüktif kuruma sürecinde ise sıcaklık artışı ile

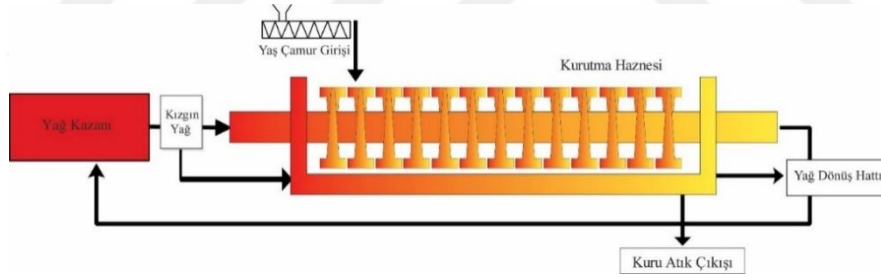
yapışkan fazın kuruma süresi artmaktadır. Ayrıca işlem sonrasında oluşan nihai granüllerin boyutu bekleme süresi ve karıştırma süresine bağlı olarak değişmektedir(Ferrasse ve diğ., 2002).

Koku; Çamurun katı maddesinin uçucu bileşenleri ise çamurun uygulama alanında yaratacağı potansiyel koku problemlerini belirlemede önemli bir etkidir ve bu bileşenler alkali stabilizasyon ve kompostlama gibi işlemlerle azaltılabilir(Ayvaz, 2000). Kurutucuda buharlaşan gazlar yanma odasına geri beslenerek kötü koku giderimi yapılmaktadır(Werther ve Ogada, 1999).

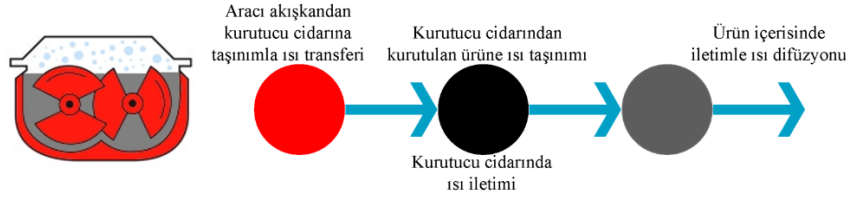
Büzülme; ortalama %70-80 su oranı ile kurutucuya giren çamurlar kurutma işleminin ilerleyen safhalarında suyun uçması nedeniyle hacimsel olarak küçülme gösterirler. Küçülme sebebiyle ısı transfer yüzey alanında azalma meydana gelmektedir. Bu nedenle ısı transferi modellerinde büzülme oranları dikkate alınmalıdır.

5. TEMASLI, KARIŞTIRICILI TİP KURUTUCUNUN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ

Dünya çapında kullanılan kurutucuların %70'i konvektif kurutucular olmakla beraber kondüktif kurutucular daha yüksek ısıl verim sağlamakta, ekonomik ve çevresel avantajlar sunmaktadır(Sahni ve Chaudhuri, 2012). Dolaylı kurutucularda ortalama ısı transfer kat sayıları değişkendir. Perry(Perry ve Green, 2008) kürekli kurutucu için ısı transfer katsayısının (hafif ve serbest akan, toz türü ürünler için) $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ile (yoğun, çamur benzeri ürünler için) $150 \text{ W/m}^2\text{K}$ arasında değişeceğini bildirmiştir. Ferrasse ve ark. (Ferrasse ve diğ., 2002) %80 nem oranında dolaylı kurutucuda çamur kurutma testlerinde kuruma ısı akısını yaklaşık $600 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak ölçmüşlerdir. Yapışkan fazda ise bu değer hızla düştüğü bildirilmiştir. Değerlerin farklılığı çalışma parametrelerinin ve kurutucu sistemin geometrik farklılığından kaynaklanmaktadır. Kapsamlı bir tarama çalışması sonucuna göre 17 farklı kurutucunun incelenmesi sonucunda konvektif tip kurutucu enerji verimliliği %20 civarındayken temaslı (kondüktif) tip kurutucularda bu oran %90'a kadar çıkmaktadır(Mujumdar, 2007).

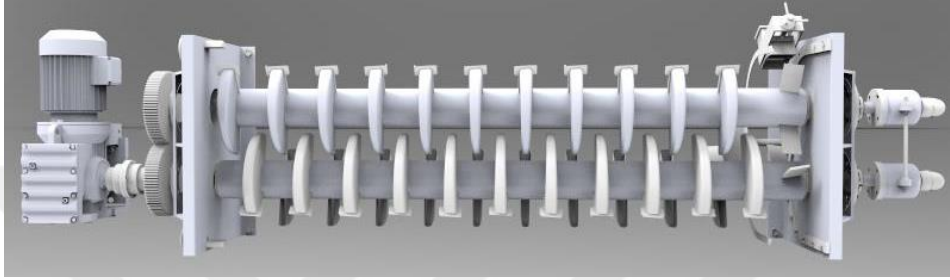


Temaslı kurutucu sistemlerinde ısı transferi 3 kademe gerçekleşmektedir. Sıcak akışkan ortam ile taşınan ısı cidar malzemesine (taşınım) aktarılmaktadır. Cidar boyunca iletim ile aktarılan ısı haznenin iç kısmında cidar-çamur ara yüzünde taşınım ile çamura aktarılmaktadır. Cidarla temas eden çamur katmanına aktarılan ısı ise difüzyon yoluyla çamurun içerisinde aktarılmaktadır.



Şekil 5.2. Kürekli kurutucuda ısı transfer adımları

$$m(X) = q_{\text{tanecik}} a_s = \frac{-dX}{dt} \Delta h_{v, T_1} + \frac{dJ}{dt} \quad (5.1)$$



Şekil 5.3. Kürekli kurutucu kürek, tahrik ve kızgın yağ başlığı sistemleri görünümü

Kurutucu ölçülendirme çalışmaları genellikle deneysel katsayıları elde etmek için tasarlanmış prototip cihazlarda yapılan testlere dayanmaktadır. Temaslı tip karıştırıcı kurutucularda ölçülendirme çalışması yapılabilmesi için kuruma hızı grafiğinin elde edilmesi gerekmektedir.

$$J = \int_{X_{\text{çıkış}}}^{X_{\text{giriş}}} \frac{dx}{\dot{m}(x)} \quad (5.2)$$

Denklemin entegrasyonu ile elde edilen birim katı madde girişi için elde gerekli alan ve sürenin çarpımını vermektedir. Denklemden elde edilen sonuç tasarlanan katı madde besleme hızı (kg/h) ile çarpılarak gerekli ısı transfer alanı bulunabilmektedir. Çalışmanın tutarlı olabilmesi için deneysel çalışma yapılan sistemin çalışma sıcaklığı, ısıtıcı ortam ve haznede kullanılan malzeme türü aynı, kürek ve hazne ölçüleri orantılı olmalıdır. Bu eşdeğerlikler arasında cidarda kullanılan malzeme türü her zaman aynı olamayabilir. Bu durumda deneysel olarak elde edilen düzeltme kat sayılarından faydalanılabilir.

Kuruma hızı grafiğinin elde edilemediği durumlarda ise Denklem (5.3) kullanılabilir. Burada A yüzey alanı (m²), m is katı madde besleme hızını (kg/saat) ifade etmektedir.

$$A_{\text{tasarım}} = A_{\text{prototip}} \frac{m_{\text{tasarım, katı madde}}}{m_{\text{prototip, katı madde}}} \quad (5.3)$$

Enerji kaynak ihtiyacının belirlenmesi için prototip kurutucu cihazda yapılan kurutma çalışmasında elde edilen toplam enerji tüketimi (kWh, kJ) bulunmalıdır. Denklem (5.4) kullanılarak deneysel sistemin ısı transfer alanı ve cidar sıcaklık farkı yardımıyla yerel ve ortalama ısı transfer katsayısı tespit edilebilir.

$$U = \frac{Q_{\text{prototip}}}{A \Delta T} \quad (5.4)$$

Denklem (5.4) ile elde edilen ısı transfer katsayısı ile kurutma için gerekli enerji miktarı hesaplanabilir. Isı transfer kat sayısı teorik olarak hesaplanmak istenirse ısı iletim sürecindeki ısı dirençlerinin hesaplanması gerekmektedir. Temaslı tip kurutucuda meydana gelen ısı transfer dirençleri Denklem (5.5)'te verilmektedir. Denklemdeki sıraya göre ısı transfer dirençleri; ısıtıcı ortam ve cidar malzemesi arasındaki direnç, cidar malzemesi içerisindeki iletim direnci, cidar malzemesi ve çamur yüzeyi arasındaki direnç (temas direnci), çamur bünyesinde ısı iletim direnci (penetrasyon direnci) ve buharlaşma yüzeyindeki dirençtir.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_v} \quad (5.5)$$

Fakat çamurun yapısal özelliklerinin değişken olması, akışın tanımlanamaması gibi nedenlerle bu değerlerin geleneksel ısı transferi formülleri ile teorik olarak hesaplanması mümkün değildir. Döner kurutucular gibi geleneksel sistemler için toplam ısı transfer kat sayısı ($W/m^2 K$) için çeşitli deneysel formüller ortaya konmuştur (Mujumdar, 2007; Perry ve Green, 2008). Bulunan değerler ise her ölçü ve çalışma sıcaklığı için tutarlı sonuç vermemektedir. Fakat temaslı kurutucular için buna benzer deneysel bir formül ortaya konmuş değildir. Temaslı tip kurutucular için U değerleri deneysel veriler olarak verilmektedir. Alternatif olarak Penetrasyon modeli kullanılarak dirençlerin hesaplanması mümkün görülmektedir.

5.1. Kurutucu Isı ve Kütle Denklği

Kurutucu haznesine yaş olarak giren çamur, kuruma işlemi sonucu buharlaşan su ve kuru çamur olarak kurutucudan çıkmaktadır. Isıtıcı ortam olan kızgın yağ hazne içerisine girmediği ve giren çıkan kütlesi değişmediiği için kütle dengesine eklenmemiştir. Kurutucudan çıkan kuru çamur ifadesi %15 (yaş bazda) nem içeren çamuru ifade etmektedir. Çamur içerisindeki toplam katı maddenin, kuruma işlemi boyunca değişmediiği kabul edilmektedir.



şekil 5.4. Kurutma haznesi kütle dengesini

Denklem (5.6) da belirtildiiği üzere, kurutucudan çıkan kuru çamur ve buharlaşma miktarının toplamı giren yaş çamur kütlesinin toplamına eşittir.

$$m_1 = m_2 + m_3 \quad (5.6)$$

Hesaplamalarda kolaylık sağlaması için nem oranı kuru madde bazlı olarak verilmektedir. Çamurun ierdiiği kuru baz nem oranı; ierdiiği su miktarının toplam katı maddeye oranlanması ile bulunabilir. Çamurun girişteki nem değerini X, kurutucu çıkışındaki nem değerini ise Y olarak ifade edilebilir. Bu durumda nem değerleri;

$$X = \frac{m_{çamur, nemli} - m_{katı}}{m_{katı}} = \frac{m_{su, giriş}}{m_{katı}} \quad (5.7)$$

$$Y = \frac{m_{çamur, kuru} - m_{katı}}{m_{katı}} = \frac{m_{su, çıkış}}{m_{katı}} \quad (5.8)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Kurutucuya giren ve çıkan; su ve katı madde miktarı X ve Y cinsinden Denklem (5.7) ve Denklem (5.8) de verilen değerkenlere göre ifade edilerek;

$$m_{su, giriş} = m_1 \left(\frac{X}{X+1} \right) \quad (5.9)$$

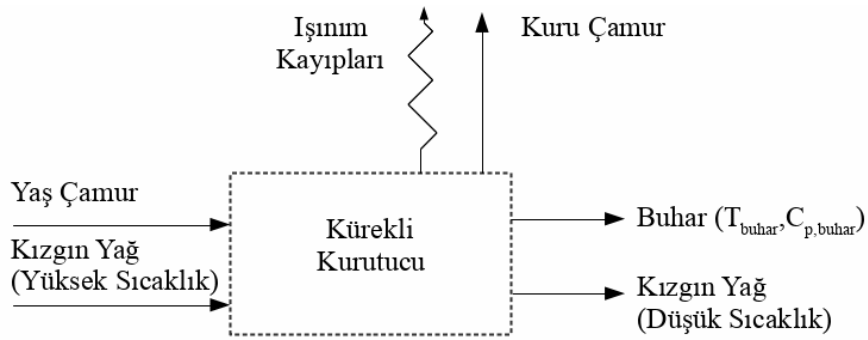
$$m_{katı madde} = m_1 \left(\frac{1}{X+1} \right) = m_3 \left(\frac{Y}{Y+1} \right) \quad (5.10)$$

$$m_{kuru çamur} = m_{katı madde, giriş} + m_{su, çıkış} \quad (5.11)$$

$$m_{su, çıkış} = m_3 \left(\frac{Y}{Y+1} \right) \quad (5.12)$$

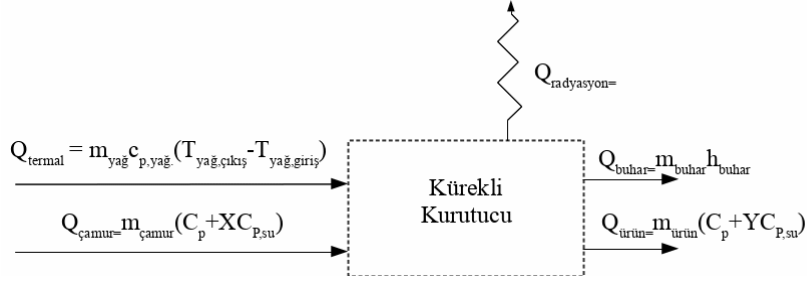
İfadeleri türetilir. Denklem (5.10) ve Denklem (5.11) de görüldüğü üzere kuru çamur ve katı madde (KM) tanımlarının birbirinden farklıdır. KM girişte ve çıkışta sabit olan toplam katı madde miktarıdır. Kuru çamur ifadesi ise kurutucu çıkışında elde edilen toplam kütledir. Çıkıştaki çamur genelde %100 KM değildir. Bu nedenle KM ve çıkıştaki su miktarının toplamı olarak ifade edilmelidir.

Kurutucu enerji dengesinde ısıtıcı ortamdan hazneye aktarılan ısı ve sistem gövdesinden ışınlım ve taşınım ile meydana gelen kayıplar dikkate alınmalıdır. Kurutucuda ısı dengesine katılacak olan girdiler Şekil 5.5'te verilmektedir.



Şekil 5.5. Kurutma haznesi enerji dengesine katılan akımlar

Şekil 5.5'te verilen akımlar dikkate alınarak kurutucu sistemin ısı dengesi Denklem (5.9)-(5.12) kullanılarak her bir faz için yazılmalıdır. Kurutucu ısı dengesinin şematik gösterimi Şekil 5.6'da verilmektedir.



Şekil 5.6. Kurutucu enerji dengesi

Kurutucuda çamura aktarılan ısı miktarı Denklem (5.13) ile hesaplanabilir. Bu Denklemde U, toplam ısı transfer katsayısı ($W/m^2 K$), A ısı transfer yüzey alanı (m^2), sıcaklık farkı terimi ise kurutulacak ürün ve kurutucu cidar sıcaklığı arasındaki farkı ifade etmektedir.

$$Q=UA(T_{\text{cidar}}-T_{\text{çamur}}) \quad (5.13)$$

Toplam ısı transfer kat sayısı teorik olarak Denklem (5.5) ile hesaplanabilir.

5.2. Kurutma Enerji Verimliliği Göstergeleri

Kurutucuların kıyaslanabileceği mutlak ve kabul edilmiş bir enerji verimliliği kıstası yoktur. Literatürde kullanılan göstergeler genellikle doğrudan enerji tüketimini ifade etmeyen, kurutucu performansı göstergeleridir. Yaygın kullanılan performans göstergesi birim zamanda birim alandan buharlaşma hızını ifade eden kuruma hızıdır. Kurutucu performansı hacimsel buharlaşma oranı, yüzey ısı kayıpları, buhar tüketimi, birim ısı tüketimi ve enerji (termal) verimliliği gibi değerlerle de verilmektedir. Termal verimlilik buharlaşmada harcanan enerjinin kurutucuya sağlanan enerjiye oranıdır (Mujumdar, 2007). Isıtılmış yüzeyden kurutma durumunda kuruma hızı;

$$N_w = \frac{1}{A} \frac{dm_{\text{buharlaşan su}}}{dt} = \frac{kg}{m^2.s} \quad (5.14)$$

denklemleri ile hesaplanabilmektedir. Karıştırma oranı yüksek ve sıcak gazla kurutma yapılan uygulamalarda alan yerine hacim de kullanılmaktadır. Termal verimlilik için ifade Denklem 5.15'te gösterildiği gibi verilebilir.

$$\eta_{\text{termal}} = \frac{Q_{\text{buharlaşma}}}{Q_{\text{toplam}}} = \frac{m_{\text{buharlaşan su}} \Delta H_{\text{buharlaşma,T,P}}}{Q_{\text{toplam}}} \quad (5.15)$$

Burada buharlaşma ve toplam enerji tüketimi arasındaki ayrıma dikkat etmek gerekmektedir. Toplam enerji tüketimine kayıplar da dâhildir. Buharlaşma enerjisi ise sadece esas amaç olan buharlaşma için harcanan enerjiyi ifade etmektedir.

Salt enerji biriminde; enerji tüketiminin birim beslenen katı madde (Denklem (5.16)) veya buharlaştırma miktarına oranı (Denklem (5.17)) kullanılmaktadır.

$$\frac{Q_{\text{toplam}}}{m_{\text{katı}}} = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{katı}}} \quad (5.16)$$

$$\frac{Q_{\text{toplam}}}{m_{\text{buharlaşan su}}} = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{su buharı}}} \quad (5.17)$$

Alternatif olarak kurutucu performansı, birim alan ve zamanda gerçekleştirilen enerji tüketimini ifade eden, kuruma için harcanan enerji ile kuruma hızının çarpımı ile elde edilebilir.

$$\frac{Q_{\text{toplam}}}{A t} = \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad (5.18)$$

Değerlendirilmesi uygun olabilecek diğer kıstas ise toplam enerji tüketiminin, buharlaşan kütleye oranlanması ile hesaplanabilir. İlgili gösterge Denklem (5.18) de verilmektedir.

$$EV = \frac{Q_{\text{toplam}}}{m_{\text{buharlaşma}}} = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (5.19)$$

EV'nin teorik değeri suyun buharlaşma enerjisidir. Bu değerin termal verimden farklı olarak yüzde olarak ifadesi mümkün değildir.

Kurutma işleminin performansı genel olarak Denklem 5.14'te verilen kuruma hızı ile ifade edilmektedir. Bu ifade farklı nem oranlarında ve farklı ürünlerin kurutulmasında kurutucu performansının göstergesi olabilir. Fakat kurutucuda gerçekleşen enerji tüketiminin ve enerji verimliliğini hesaplanmasında yeterli değildir. Ancak kurutma süresi besleme hızının tespit edilmesi ve yüzey alanı ise tasarlanacak makinenin

maliyetini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kuruma hızı ve enerji tüketimi etkenlerini beraber değerlendirilmesi de önem arz etmektedir.

Enerji verimliliğinin en doğal göstergesi Denklem (5.15)'te verilen termal verim ifadesidir. Fakat kuruma süresince sıcaklığın sabit olmaması nedeniyle buharlaşma enerjisinin farklı kütle değerleri için farklı değerler alması gerekecektir. Bunu sağlamak için ise çamur sıcaklığının sürekli ölçülmesi gerekecektir. Bu işlem hata ihtimali yüksek olduğu için Denklem (5.19)'da verilen EV ifadesi bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmıştır. Ayrıca kuruma hızları da Denklem (5.14)'e göre hesaplanarak analiz edilmiştir. Değerlendirmede başarı kriteri EV düşük ve kuruma hızının (KH) yüksek olmasıdır.

Kurutucu işletme parametrelerinin düzenlenmesiyle %10–30 arasında enerji verimliliği artışı sağlanabilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar kuruma hızının değişimini incelemektedirler. Fakat kurutucu enerji verimliliği genellikle göz ardı edilmektedir(Mujumdar, 2007).

5.3. Kurutucu Deney Düzeneği ile Enerji Verimliliğinin Analizi

Kurutucu sistemlerde enerji verimliliği artırıcı önlemler şu şekilde gruplanabilir;

- Kurutma Yükünün Azaltılması
- Isı üretim sisteminin verimliliğinin artırılması
- Kurutucu verimliliğinin artırılması

Arıtma çamurları santrifüj sistemlerde susuzlaştırma işleminden geçirilmektedir. Daha fazla su giderimi sağlanması durumunda enerji tüketimi orantısız şekilde artmakta ve toplam enerji verimliliği düşmektedir. Temaslı tip kurutucuda kullanılan ısı sistemleri ise geleneksel sıcak su/yağ ve buhar kazanlarıdır. Bu tür ekipmanlarda atık ısının (kazandan çıkan sıcak baca gazları) kullanımı ile enerji verimliliği artırılabilir. Kurutucu verimliliğinin artırılması ise her makine türü ve kurutulacak ürüne özel olarak araştırılması gereken bir başlıktır.

Prototip kürekli kurutucunun sınırlamaları ve kurutma işleminde enerji verimini ve makine performansını düşüren durumların tespit edilebilmesi için ön deneme çalışmaları

gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı sektörlerde kurutma işi için kullanılan cihazlar incelenmiştir. Temaslı karıştırıcı tip kurutuculardan olan disk tipi kurutucu Dilovası OSB arıtma tesisi işletmeci firması izni ile yerinde incelenmiş ve sistemle ilgili temel bilgiler alınmıştır. İstanbul deri OSB bünyesinde kurutucunun ise bantlı tip kurutucu olduğu ve tez konusu sistemlerle benzeşimi olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.7. Ön çalışmalarda kullanılan prototip KK ön görünüm

Günümüzde hem olgun hem de gelişmekte olan kurutucu teknolojilerinin; enerji verimliliği, proses güvenilirliği, esneklik, işletme parametrelerinin optimizasyonu, bilgi temelli proses ve ekipman tasarımı geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır(Menshutina ve Kudra, 2001). Bu çalışmalar yapılırken modelleme süreçleri ile birlikte deneysel analizlerin de gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Enerji analizi için toplam enerji tüketimi ve kuruma hızı grafiğinin elde edilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.8. Prototip KK küreklerinin üst görünümü

Dolaylı kurutma prosesini çalışan araştırmacıların pek çoğu mikro ölçekte düzenekler üzerinde araştırma yapmaktadırlar. Bu tür sistemlerde karıştırıcı olarak tek bir bıçak (pervane) kullanılmaktadır. Kurutucu haznesi olarak ise dikey bir silindir kullanılmaktadır(Ferrasse ve diğ., 2002). Bu testler çamurun temaslı tip kuruma

sırasındaki davranışını analiz etmek için kullanılmaktadır. Dolaylı kurutucu performans analizi (kuruma hızının farklı etkilere bağlı olarak değişimi) yapılan çalışmalar ise kurutucu enerji verimliliğini değerlendirmemektedir.

Kurutucu tasarımının yapılabilmesi için kuruma hızı ile birlikte enerji tüketimi ve çamurun kurutucu içerisindeki davranışının (yapışma, yüzey kullanım oranı) da incelenmesi gerekmektedir. Çamur kurutma çalışması için ilk testler akademik çalışmalar sırasında üretilen prototip kurutucuda gerçekleştirilmiştir. Bu sistem sürekli çalışmaya uygundur. Sistemde veri alma imkânı ise yoktur. Bu nedenle bu cihazda yapılan testlerde sadece kuruma sırasındaki yapısal değişimi incelenmiş ve deney sürecinin devamı bu gözlemlere göre ilerletilmiştir.



Şekil 5.9. KK Dişli tahrik ve yağ başlığı sistemi

Kullanılan sistem; çift cidarlı kurutma haznesi ve içerisinde çift cidarlı iki milde monte edilmiş olan kürek sistemi, hazne kapağı, motor-dişli kutusu, yağ ısıtma tankı ve pompası ile elektrik panosundan oluşmaktadır. Yağ ısıtma tankında elektrikli ısıtıcı vasıtasıyla ısıtılmaktadır. Tankta ısıtılan yağın sıcaklığı dijital termostat ile istenilen sıcaklıkta sabit tutulmaktadır. Santrifüj pompa kullanılarak yağın devir daimi sağlanmaktadır. Yağ 2 hatta ayrılarak hazne cidarına ve küreklerin bağlı olduğu millerin içerisinde dolaştırılarak ısıtma sağlanmaktadır. Hazne ısıtması için yağ besleşmesi tek noktadan gerçekleştirilmektedir. Isı transfer yağı dijital termostat ile istenilen sıcaklıkta sabit tutulmaktadır. Deneysel düzenek mekanik aksam ve kullanılan ekipman bilgileri Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1. KK ölçüleri

Özellik	Değer
Kurutucu hazne ölçüleri	240*1200*200 (mm)
Kürek sayısı (Çift Mil)	13 * 2 (adet)
Hazne efektif hacim	0,067 (m ³)
Kurutma yüzey alanı	1,89 (m ²)
Isıl kapasite	9 (kW)
Isı taşıyıcı	Kızgın yağ (1 m ³ /saat)

Testlerde kullanılmak üzere İSU Kullar AAT mekanik susuzlaştırma (dekantör santrifüj) çıkışından çamur alınmış ve yaş durumda nem tayini yapılmıştır. Nem değerleri %77 civarında olduğu ölçülmüştür. Çamur ortalama yoğunluğu 1050 kg/m³ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.10. Ön testlerde kullanılan çamur görünümü ve nem değeri

Prototip kürekli kurutucuda yapılan ön çalışmada elde edilen bulgular aşağıda listelenmektedir.

- Çamurun kuruma sırasında yapışkan faza geçmesi nedeniyle giriş kısmında birikme yaşanıyor.
- Kurumaya başlayan üründe hacim azaldığı için kürek teması azalıyor.

Bu problemlerin çözümü aşağıdaki uygulamalarla sağlanabilir;

- Kürek geometrisinin iyileştirilmesi—Hacmin azaldığı yerde daha sık kürek vb.
- Harici bir ısı girdisi ile temas olmayan bölgelerde ısı transferinin sağlanması



Şekil 5.11. KK besleme ve çıkış bölgesinde çamur yoğunluğu

Enerji verimliliği analizi için prototip ölçüde kürekli tip kurutucu kullanılmaktadır. Endüstriyel tasarım (kurutma sistemi ve bileşenler) açısından ticari ürünlere benzeşim sağlayabilen, tekrarlanabilir ve güvenilir veri üretmek için uygun bir deneysel cihaz tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir.

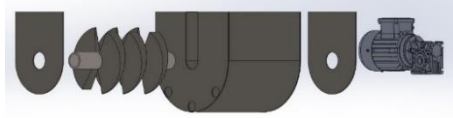
Kuruma hızı verisinin alınabilmesi için kurutmanın yığın proses olarak gerçekleştirilmesi ve sistemin ağırlığının sürekli ölçülmesi tasarlanmıştır. Kurutma analizi konusunda literatürde gerçekleştirilen çalışmalar yığın sistemlerle gerçekleştirilmektedir (Arlabosse ve diğ., 2004; Arlabosse ve Chitu, 2007; Deng ve diğ., 2013; Dittler ve diğ., 1997; Ferrasse ve diğ., 2002).

Buna göre tek mil üzerinde 3 kürekli bir sistem gerçekleştirilmiştir. Kürek cidar arası mesafe 1 cm olarak tasarım yapılmıştır. Sisteme ait ölçüler Tablo 5.2’de verilmektedir. Kütle verilerinde gürültüye sebep olabileceği değerlendirildiği için kazan sistemi cidara yerleştirilmiştir. Bu sayede pompa olmaksızın ısıtma sağlanabilmektedir. Cidarda ve mil içinde yağa dalmış durumda bulunan ısıtıcılar ile ısıtma yapılmaktadır. Döner mili enerji aktarımı için bilezik, kömür sistemi tesis edilmiştir.

Tablo 5.2. Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine ölçüleri

Özellik	Değer
Kurutucu Hazne ölçüleri	300*320*300 (mm)
Kürek Sayısı	3 (adet)
Kurutma Yüzey Alanı	0,39 (m ²)
Isıl Kapasite	3 (kW) Cidar + 2 (kW) Kürek
Isı taşıyıcı	Kızgın yağ

Karıştırıcı ile kurutucu altında yer alan motor arasındaki zincir dişli sistemi ile dönme hareketi sağlanmaktadır. Kürek hızı dijital optik takometre vasıtasıyla ölçülmektedir. Haznede oluşan buhar, süpürücü hava fanı yardımıyla hazne dışına aktarılmaktadır.

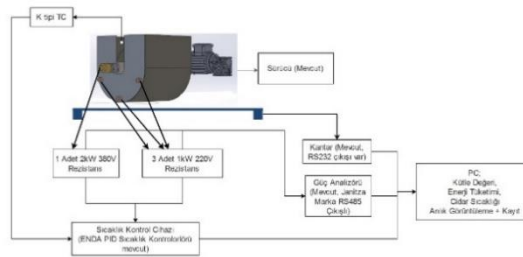


Şekil 5.12. Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine patlak görünüm

Kurutucu sistemin dışı 5 cm cam yünü ile izole edilmiştir. Tüm ekipmanlar 1/60000 taksimat oranına sahip 60 kg kapasiteli yük hücresi ile donatılmış kantar sistemi üzerinde bulunmaktadır.

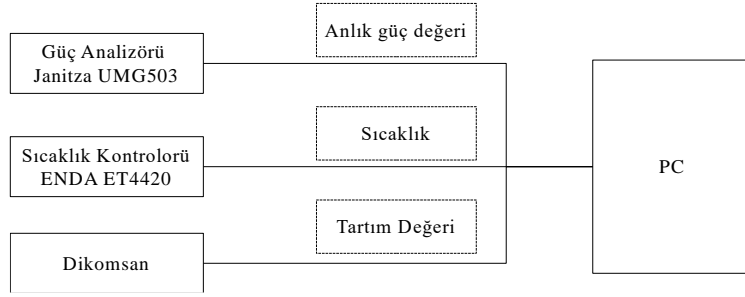


Şekil 5.13. Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine ekipmansız görünüm



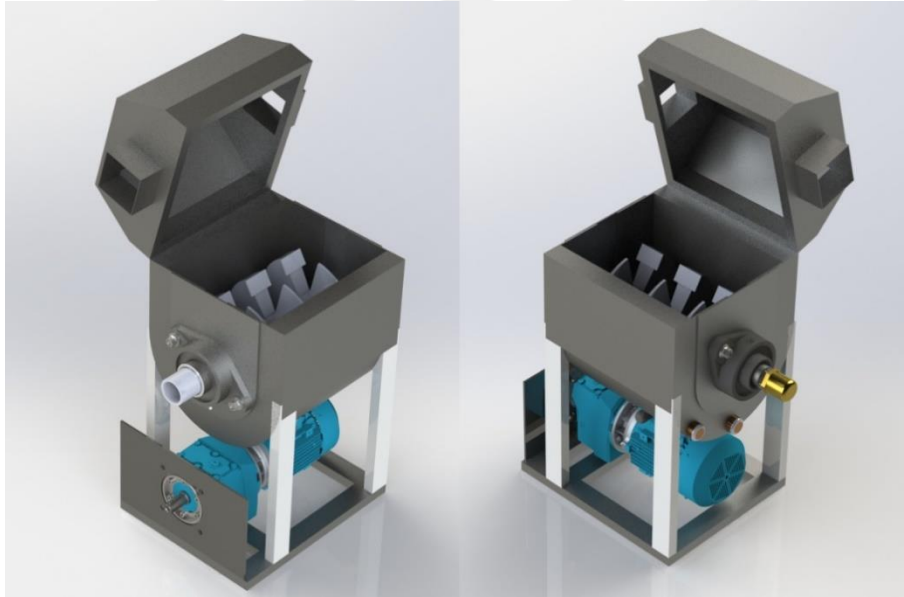
Şekil 5.14. Enerji verimliliği analizi için tasarlanan makine enstrümanları ve ölçüm ekipmanları

Elektrik ve kontrol panosunda yer alan sıcaklık kontrolörleri ve sürücüler ile makinenin istenen devir ve sıcaklıkta çalışması sağlanabilmektedir. Mekanik sistemin sağlıklı çalışmasından sonra veri alma sisteminin sağlıklı çalışması gerekmektedir. Isıtma için harcanan enerji miktarı enerji analizörü ile kayıt altına alınmakta ve RS485 protokolü ile bilgisayara kaydedilmektedir. Kantarda elde edilen kütle zaman verileri RS232 protokolü ile (540 veri/saniye) bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 5.15. Veri toplama sistemi bileşenleri

Deney sırasında kurutucu, önceden belirlenen cidar sıcaklığına ulaşana kadar ısıtılmıştır. Tüm yüzeylerin homojen şekilde ısınması için 5 dakika beklemiş ve iç yüzeyler optik pirometre ile kontrol edilerek istenen sıcaklığa ulaşıldığı kontrol edilmiştir. Kantar sıfırlanarak çamur beslemesi yapılmıştır. Kurutucu içerisinde yaklaşık 3 kg çamur olduğunda kapak kapatılarak veri toplama sistemi çalıştırılmıştır. Ayrıca kurutucuya beslenen çamurdan numune alınarak nem tayini yapılmıştır. Çamur kuru madde oranı %90 a ulaşana kadar kurutma işlemi devam ettirilmiştir.



Şekil 5.16. Nihai tasarıma ait çizimler

Deneysel sistemin üretim öncesi tasarımı Şekil 5.16'da verilmektedir. Motor ve mil arası güç aktarma işlemi zincir/dişli sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Veri toplama için kullanılan yazılıma ait ekran görüntüsü Şekil 5.17'de verilmektedir.



Şekil 5.17. Veri toplama yazılımı ekran görüntüsü

5.4. Veri İşleme

Kurutma testleri sırasında üretilen verilerin hata, gürültü, eksik veri nedeniyle işlenmesi gerekmektedir. Bu işlemin kurutma karakterinin analiz edilmesinde hataya sebep olmadan yapılabilmesi gerekli yöntemler literatürde verilmektedir (Kemp ve diğ., 2001). Bu çalışmada Kemp ve arkadaşları tarafından yayınlanan ve 8 farklı araştırma merkezinin ortak çalışmasını sağlayan AB destekli Kurutmada Kalite (QUID – Quality in Drying) Projesinin çıktısı olan çalışmadan faydalanılmıştır.

Kurutma testlerinde elde edilen verilerin yorumlanması ve anlamlandırılması gerekmektedir. Bu amaçla sıklıkla eğriler/grafikler kullanılmaktadır. Birbiriyle bağlantılı çeşitli grafikler kullanılarak kurutma testleri yorumlanmaktadır. Bunlar;

- Kuruma Eğrisi- Nem Oranı – Zaman (X-t)
- Kuruma Hızı Eğrisi – Kuruma Hızı – Zaman (N-t)
- Krischer Eğrisi (Zamandan bağımsız) – Kuruma Hızı - Nem Oranı (N-X)
- Sıcaklık-Zaman grafiği olarak sıralanabilir.

Kurutma testlerinden elde ettiğimiz veri noktası sayısı fazla olduğu için kütle- zaman verilerinin işlenmesinde teorik bir denkleme uydurulması seçeneği uygulanmıştır. Deneysel veriler 3. derecede polinoma %99,99 uyum sağlamıştır. Verilerde hatalı noktalar (anlık kütle değeri öncekinden yüksek olan noktalar, kurutma profiline uymayan aşırı düşük veriler) eğri geometrisini deneysel veri ile uyumunu düşürdüğü için silinmiştir. Diğer gürültülere dokunulmamıştır.

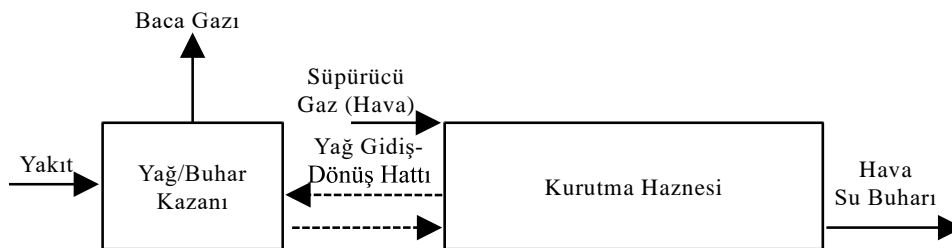
Bu metotların önerildiği çalışmada kurumanın son aşamasında (çok düşük nem, çok düşük buharlaşma hızları) gürültünün çok fazla olduğu ifade edilmektedir. Arıtma çamurunun kurutulmasında %85–90 KM oranı yeterlidir. Bu değer altında kuru çamur

nem değeri ortam nemi nedeniyle sabit kalamamaktadır. Bu nedenle çalışmada bu değerin altındaki veriler yok sayılarak analiz edilmiştir. Kurutmada sırasında enerji verimliliği değerlendirmesi yapabilmek için Enerji Verimliliği Eğrisi (Buharlaştırma Hızı- Anlık Enerji Tüketimi) grafikleri de oluşturulmuştur.

Yukarıdaki verilerden farklı olarak zamandan bağımsız olarak kurutma sırasında gerçekleşen ortalama enerji ve buharlaştırma hızlarının da analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kurutma başlangıç ve bitiş anlarındaki ham veriler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bölüm 5.2’de verilen enerji verimliliği parametreleri ilgili denklemlere göre hesaplanmaktadır.

5.5. Atık Isının Geleneksel ve Yenilikçi Kullanımı

Endüstriyel proseslerin sonucunda ortaya çıkan ve değerlendirilemeyen enerji kaynakları atık ısı olarak adlandırılmaktadır (Jouhara ve diğ., 2018). Atık ısı sıcak gaz, sıcak su, doymuş buhar ve benzeri şekillerde bulunabilir. Yaygın olarak karşılaşılan atık ısı kaynakları olarak yakma tesislerinin çıkışında meydana gelen baca gazları, içten yanmalı motorların egzoz gazları ve ceket soğutma suyu örnek verilebilir. Atık ısı taşıyan ortam doğrudan kullanılabilir gibi ısı değiştiriciler yardımıyla farklı bir akışkana enerji transfer edilebilir. Atık ısı kaynaklarına sıcaklıklarına göre yüksek sıcaklık ($T > 400$ °C), orta sıcaklık (400-100 °C) ve düşük sıcaklık ($T < 100$ °C) olarak sınıflandırılabilir (Brückner ve diğ., 2015). Kurutmada atık ısı kazanımının kullanılmadığı durum şematik olarak Şekil 5.18’de verilmektedir.



Şekil 5.18. Kurutmada atık ısı kazanımının kullanılmadığı durum

Temaslı kurutmada aracı akışkan olan kızgın yağ veya buhar doğalgaz yakıtlı kazanlarda üretilmektedir. Aracı akışkan sıcaklıkları 240–160 °C aralığında değişkenlik göstermektedir. Doğalgazın %20 fazla hava ile yakılması durumunda yaklaşık %17 oranında su içeren baca gazı oluşmaktadır (Kaya ve Eyidogan, 2010). Baca gazı ile farklı

akışkanların ısıtılması, beslenecek çamurun ön ısıtılması, süpürücü havanın ısıtılması gibi çeşitli uygulamalarda faydalanılabilir. Sıcak gazın doğrudan kurutma haznesine beslenmesi uygulaması baca gazındaki su buharının yoğuşma riski nedeniyle kaçınılmaktadır. Fakat çamurun giriş nem değerinin yüksek olması, çıkışta beklenen KM oranının (%90) çok yüksek olmaması gibi nedenle çamur için uygulama imkânı sağlamaktadır. Doğalgaz yakıtlı kızgın yağ kazanlarında baca gazının yoğuşma sıcaklığı 75-100 °C olarak verilmektedir(Durmuş Kaya, 2014). Baca gazı sıcaklıkları kazanda ısıtılan sıcak akım (kurutucu akışkan, kızgın yağ) sıcaklığının üzerindedir. Bu durumda sıcak baca gazlarının kurutma haznesine beslenmesi ile enerji geri kazanımı sağlanabilecektir. Baca gazından kazanılabilecek ısı miktarı Denklem (5.20) ile hesaplanabilir.

$$Q_{\text{baca}} = V_{\text{baca}} (T_{\text{kurutucu, giriş}} c_{v, \text{kurutucu giriş}} - T_{\text{kurutucu, çıkış}} c_{v, \text{kurutucu giriş}}) \quad (5.20)$$

Deneysel sistem 5 kW ısıtıcı kapasitesine sahiptir. Elektrik enerjisinin ısıya dönüşümünde gerçekleşen kayıp ihmal edilebilir. Bu durumda kurutucu ısı kapasitesi 5 kW olmaktadır. Kazan verimi %90 kabul edilirse bu gücü sağlayacak olan kazanın ısı kapasitesi Denklem (5.20)'ye göre 5,5 kW gücünde olmalıdır.

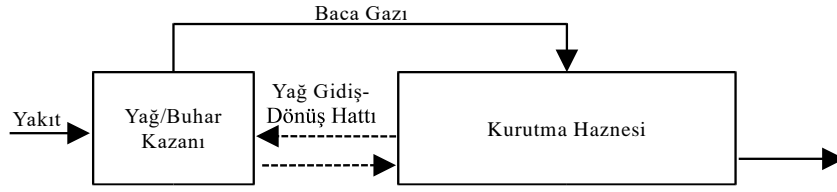
$$Q_{\text{kazan}} = Q_{\text{ısıt}} / \eta_{\text{kazan}} = \frac{5}{0,9} = 5,5 \text{ kW} \quad (5.21)$$

Gerekli ısı kapasiteyi sağlamak için gerekli doğalgaz miktarı ve oluşacak baca gazı debisi Denklem (5.21) ve Denklem (5.22)'ye göre hesaplanmaktadır. Doğalgaz ısı değeri ($h_{\text{doğalgaz}}$) 10,55 kWsaat/Sm³ alındığında gerekli doğalgaz hacimsel debisi,

$$V_{\text{doğalgaz}} = Q_{\text{kazan}} / h_{\text{doğalgaz}} = \frac{5,5}{10,55} = 0,52 \text{ Sm}^3/\text{saat} \quad (5.22)$$

İle hesaplanabilir. Endüstriyel kazanlarda 1 m³ doğalgazın yanması sonucu yaklaşık 12-14 m³ baca gazı oluşmaktadır(Durmuş Kaya, 2014). Baca gazının atık ısı geri kazanımında kullanımı Şekil 5.19'da verilmektedir.

$$V_{\text{baca gazı}} = V_{\text{doğalgaz}} \cdot 13 = 0,52 \times 13 = 6,76 \text{ m}^3/\text{saat} \quad (5.23)$$

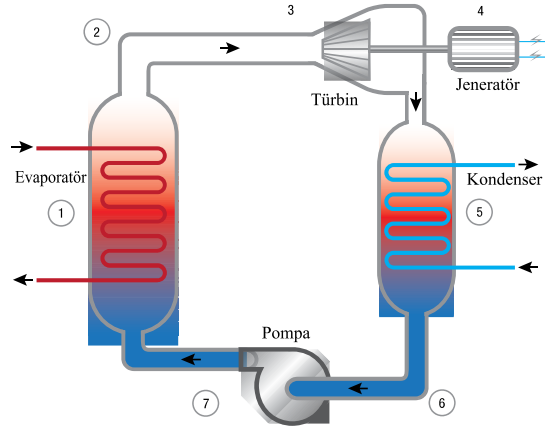


Şekil 5.19. Baca gazının atık ısı geri kazanımında kullanımı

Deneysel sistem elektrikli ısıtıcılarla ısıtıldığı için doğrudan baca gazı üretimi mevcut değildir. Bu nedenle ortam havasının ısıtılarak kurutma haznesine beslenmesi ile testler gerçekleştirilmiştir. Atık ısı uygulamasına benzeşim sağlaması için Denklem (5.23) ile hesaplandığı üzere $6,76 \text{ m}^3/\text{saat}$ debide fan yardımıyla ortam havası çekilerek elektrikli ısıtıcı ile donatılmış bir kanaldan geçirilerek kurutma haznesine beslenmektedir. Çıkış sıcaklığı PID sıcaklık kontrol cihazı ile ayarlanmaktadır.

Kurutma sisteminde oluşan atık ısı kaynaklarının kurutma haznesine beslenmesi ile enerji verimliliğinin artırılacağı öngörülmüştür. Çamura, topaklanma bölgesinde daha fazla ısı transferi mümkün olmaktadır. Kuruma hızının sınırlandırıldığı bu fazda geçen süre azaltıldığında kuruma hızında artış ve birim enerji tüketiminde azalma sağlanabilecektir.

Atık ısının yukarıda bahsedilen geleneksel kullanımına ek olarak Organik Rankine Çevrimi (ORC) ile elektrik üretimi de mümkündür. ORC, klasik rankine çevriminde yer alan aracı akışkan olan su yerine buharlaşma sıcaklığı daha düşük olan organik akışkanların kullanılmasıyla düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elektrik üretimini mümkün kılmaktadır (Schuster ve diğ., 2009). ORC sistemleri ile solar, jeotermal, biyokütle ve endüstriyel atık ısı kaynaklarından ($70-300 \text{ }^\circ\text{C}$) elektrik üretiminde faydalanılmaktadır (Eyidogan ve diğ., 2016). Klasik bir ORC çevrimi şematik olarak Şekil 5.20'de verilmektedir. Sistem; sıvının basıncını artıran bir pompa, ısı kaynağı ile akışkanın buharlaştırıldığı ısı değiştirici (evaporatör), buharın genişletilerek mekanik iş üretilen türbin ve türbinden çıkan gaz/sıvıyı soğutan ısı değiştiriciden (kondenser) oluşmaktadır (Lecompte ve diğ., 2015).

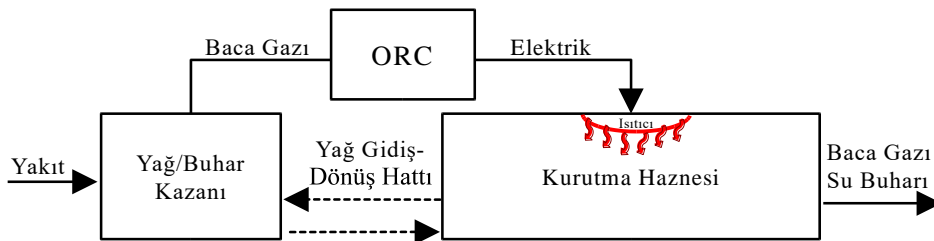


Şekil 5.20. ORC çevrimi şematik görünümü

Bir kaç kW güçten MW ölçeğine varan kapasitelerde ORC sistemleri ticari olarak tedarik edilebilmektedir. Ortalama elektriksel verim değerleri %10-21 arasında değişkenlik göstermektedir (Schuster ve diğ., 2009). Kurutucuyu besleyen kazan atık ısısı kullanılarak ORC sisteminden elektrik üretimi mümkündür. ORC girişindeki kullanılabilir ısı miktarı Denklem (5.24)'e göre hesaplanabilir. 6.76 m³/saat debide baca gazının 220 °C ($c_v=1,42$ kJ/m³), 100 °C ($c_v=1,38$ kJ/m³) sıcaklığa düşürülmesi ile kazanılabilecek enerji 327 W olarak hesaplanmaktadır.

$$Q_{ORC} = 6,76 \cdot (1,42 \cdot 220 - 1,38 \cdot 100) = 1178,94 \text{ kJ/saat} = 327 \text{ Watt} \quad (5.24)$$

Bu durumda kullanılması gereken ısıtıcı gücü yaklaşık 50 W olmaktadır. Fakat ısıtıcı ürünleri bu kapasitede üretilmediği için 250 W gücündeki ısıtıcı testlerde kullanılmıştır. Kullanılan lambanın özellikleri; Philips marka, 250 W, quartz elemanlı ve tek yön reflektörlüdür. Atık ısının ORC ile geri kazanımı ve kurutmada kullanımı Şekil 5.21'de verilmektedir.



Şekil 5.21. Atık ısının ORC ile geri kazanımı ve kurutmada kullanımı

Kızıl ötesi ışınlama kurutma uzun yıllardan beri uygulanan bir yöntemdir. Kâğıt, kumaş, boya gibi ince filmlerin ve sıcaklığa duyarlı malzemelerin kurutulmasında yaygın olarak

kullanılmaktadır. Günümüzde meyve kurutma işleminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Mutlak sıfır sıcaklığının üzerindeki her madde elektromanyetik ışınım yaymaktadır.

Işınımın özelliği dalga boyu (10^{-12} - 10^3 metre) ile değişmektedir. Işınımın ısıtma uygulaması temel olarak kızılötesi (0.1-100 μm) dalga boyu aralığındaki ışınım ile ışınım yapan maddeden, ışınım maruz kalan maddeye ısı transferi ile gerçekleştirilmektedir. Bu dalga boyu aralığında ışınım kısa dalga kızıl ötesi-NIR- (0.75–3.00 μm), orta dalga kızıl ötesi -MIR-(3.00–25 μm), uzak dalga kızıl ötesi-FIR-(25–100 μm) olarak sınıflandırılmaktadır (Evangelos Tsotsas ve Mujumdar, 2014).

Elektromanyetik spektrumda termal ışınımın gerçekleştiği dalga boyu 0,1 ile 1000 μm aralığındadır. Kısa dalga boylu ışınım (NIR) daha fazla enerji taşımakta ve daha derine nüfuz edebilmektedir. Gıda ürünlerinde ise MIR ve FIR kızılötesi ışınlarının daha etkili olduğu ifade edilmektedir (El-Mesery ve Mwithiga, 2015; Mujumdar, 2007).

Kızıl ötesi ışınım kaynakları elektrikli veya gaz yakıtlı olabilir. Elektrik kaynaklı sistemde elektriksel direnci yüksek bir eleman üzerinden elektrik akımının geçirilmesi ile elde edilir. Eleman sıcaklığı artarak ışınım yayar. Bu tür sistemler kızıl ötesi lamba olarak piyasada yer almaktadır. Diğer türde ise sıcaklık artışı gaz yakıtların yakılması ile elde edilir. Gaz yakıtlı sistemlerin işletme maliyeti genellikle daha düşüktür (Van't Land, 2011).

5.6. Parametre Etkilerinin İncelenmesi Deney Tasarım Metodu

Yukarıda (Bölüm ve Bölüm) verilen analizlere göre temaslı tip karıştırıcı kurutucuda kuruma performansı ve enerji verimliliğinin 3 farklı parametreye-Sıcaklık, Dönme, Hızı Atık Isı- ait farklı seviyelerde etkisi incelenmek istenmektedir. Bu parametrelerin her birinin bağımsız etkisini incelemek üzere diğer parametrelere ait birer seviye sabit kabul edilerek deney çalışmaları gerçekleştirilebilir. Örneğin sıcaklığın etkisini görmek için dönem hızı 20 D/D ve soğuk süpürücü gaz kullanılması durumunda 180- 200- 220 °C de testler gerçekleştirilmelidir. Fakat bu durumda parametrelerinin kuruma performansı ve enerji verimliliğine bağlı etkisi göz ardı edilmektedir.

Diğer bir yöntem ise tüm parametreler için her bir seviyede testler gerçekleştirilmesidir. Bu durumda 3 parametre ve 3 seviye olan bir sistemde $3^3=27$ test gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum çok daha fazla zaman gerektirmektedir. Bu problemi aşmak için deney tasarım metotlarının kullanılması gerekmektedir.

Deney Tasarımı bir proseste girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasıyla sonuç değişkeni üzerinde elde edilen değişikliğin gözlenmesi elde edilmesi ve ya-yorumlanmasıdır. Deney tasarımında amaç bir prosesteki kontrol edilebilir girdileri değiştirerek kontrol edilemeyen faktörlerin çıktı üzerinde etkisini en aza indirmektir. Çıktı üzerindeki değişikliklerin tespit edilebilmesi için deneylerde kullanılacak parametrelerin, parametrelere ait seviyelerin belirlenmesi ve gerekli deneyler yapıldıktan sonra gerçekleştirilecek istatistiksel analizlerin tamamı DT kavramı içerisindedir. Deney tasarım yöntemi yanıtta ki değişkenliği hangi faktörün ne kadar etkili olduğunu ve kısıtlı miktarda kaynakla hangi deney tasarımının bu etkileri ideal şekilde ifade ettiğini tespit etmeye yarayan yöntemdir(Ryan, 2007).

Deney tasarımında çeşitli yöntemler yer almaktadır. Günümüzde yaygın kullanılan metotlardan Faktöriyel Tasarım (FT) her seferinde tek bir değişkenin etkisini inceleyen yöntemlere göre daha verimlidir. Çoğu proseste deney sonucunu etkileyen girdi sayısı (faktör) birden fazladır. Faktöriyel Tasarımda her bir faktöre ait her olası etkileşimin deney tasarımında yer almaktadır. Örnek olarak 2 faktörlü (X, Y) ve her faktör için 3 seviye ($X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3$) olan bir sistem için deney listesi Tablo 5.3'te verilmektedir. Tablo 5.3 te görüldüğü üzere 2 faktör ve 3 seviyeli bir sistem için (3^2) 9 test yapılması gerekmektedir. Faktör ve seviye sayısı artırıldığında yapılması gereken deney sayısı da artmaktadır. Bu durum zaman ve kaynak tüketimini artırmaktadır.

Tablo 5.3. FT tasarımda 2 faktör ve 3 seviyeli bir deney için gerekli deney listesi

Deney Çiftleri (2 faktör, 3 seviye)		
$X_1 Y_1$	$X_1 Y_2$	$X_1 Y_3$
$X_2 Y_1$	$X_2 Y_2$	$X_2 Y_3$
$X_3 Y_1$	$X_3 Y_2$	$X_3 Y_3$

Araştırmacılar yüksek dereceli etkileşimlerin önemli olmadığı durumlarda faktöriyel tasarım için gereken testlerin $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ tekrar edilerek uygulanması ile ana etkilerin ve düşük

seviye etkileşimlerin düşük tutarlı olarak ortaya konulabileceğini tespit etmişlerdir. Bu yöntemlere ise kesikli faktöriyel tasarımlar (KFT) denmektedir.

FT ve KFT tasarımların uygulaması bilgi yoğun bir süreç olduğu için kullanımı zordu. Genichi Taguchi deney tasarımında farklı proses parametrelerinin prosten elde edilen performans karakteristiğinin ortalama ve varyans değerini ne kadar etkilediğini ortaya koymayı sağlayan bir metot geliştirmiştir. Bu yöntemde faktörlerin dağılımını görmek için dikey dizilerden faydalanılmıştır. Bu sayede faktöriyel tasarımlarda olduğu gibi her bir faktöre ait her bir seviye için test yapmak yerine farklı kombinasyonları üzerinden deneyler gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede zaman ve mali kazanım sağlamaktadır. Ayrıca bu yaklaşımda kategorik faktörlerin (sayısal olmayan faktörler) de kullanımı mümkündür.

Çalışmamızda yüksek seviyeli etkileşimlere ihtiyaç duyulmaması ve kategorik değişkenlerin kullanımına imkân sağladığı için Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi Deney Tasarım yaklaşımında 3 faktör ve her faktör için 3 seviyeden oluşan (3^3) bir planımız olduğu için L9 dizisi kullanılmıştır. L9 dizisi için genel sembolik deney listesi Tablo 5.4'te verilmektedir. Taguchi metodunun kullanılması ile 9 test 2 tekrar ile yapılarak etkiler analiz edilmiştir.

Tablo 5.4. Taguchi metoduna göre oluşturulmuş sembolik deney listesi

Test Numarası	Sıcaklık	Dönme Hızı	Atık Isı
Test 1	1	1	1
Test 2	1	2	2
Test 3	1	3	3
Test 4	2	1	2
Test 5	2	2	3
Test 6	2	3	1
Test 7	3	1	3
Test 8	3	2	1
Test 9	3	3	2

Tablo 5.4'teki sembolik listeye dayanılarak hazırlanan gerçek parametre ve seviyeleri içeren deney listesi Tablo 5.5'te verilmektedir. İmalat ve ürün kalitesini değerlendirmede gerçekleştirilen deneylerden farklı olarak kurutma prosesi sırasında elde edilen veriler (zamanda) sürekli ve çeşitlidir. Bu nedenle elde edilen deney planı ile çok boyutlu analiz

yapmak mümkün olmaktadır. Taguchi metodu ile yapılacak değerlendirme kapsamında kurutma enerji verimliliği (kJ/kg buharlaşma) değeri sistem yanıtı olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5.5. Gerçek seviye değerlerini gösteren deney planı

	Sıcaklık	Dönme Hızı	Atık Isı
Test 1	180	10	Süpürücü Gaz
Test 2	180	20	Sıcak Gaz
Test 3	180	30	ORC + Kızılötesi
Test 4	200	10	Sıcak Gaz
Test 5	200	20	ORC + Kızılötesi
Test 6	200	30	Süpürücü Gaz
Test 7	220	10	ORC + Kızılötesi
Test 8	220	20	Süpürücü Gaz
Test 9	220	30	Sıcak Gaz

Taguchi yönteminde deneylerin sonucunda elde edilen sistem yanıtları En büyük en iyi - Denklem (5.25) En küçük en iyi - Denklem (5.26), Optimum en iyi - Denklem (5.27)'a göre sinyal gürültü oranlarına (S/G) dönüştürülmektedir. Çalışmamızda amaç, enerji tüketimini en aza indirmek olduğu için en küçük en iyi durumu için Denklem (5.25)'e göre S/G hesaplanmıştır.

$$S/G_i = -10 \log(\Sigma(1/y^2)/n) \quad (5.25)$$

$$S/G_i = -10 \log(\Sigma(y^2)/n) \quad (5.26)$$

$$S/G_i = 10 \log(\Sigma(y^2)/s^2) \quad (5.27)$$

Yukarıda verilen denklemlerde i deney numarası, y deneyde elde edilen sonucun karesi, n deney tekrar sayısı ve s ise X. Deneylerden elde edilen sinyal gürültü oranları parametreye ve seviyelere ağırlıklandırılmaktadır. Faktör 1'in 3. seviyesi için S/G değeri Denklem (5.28)'e göre hesaplanmaktadır.

$$S/G_{1,3} = \frac{S/G_7 + S/G_8 + S/G_9}{3} \quad (5.28)$$

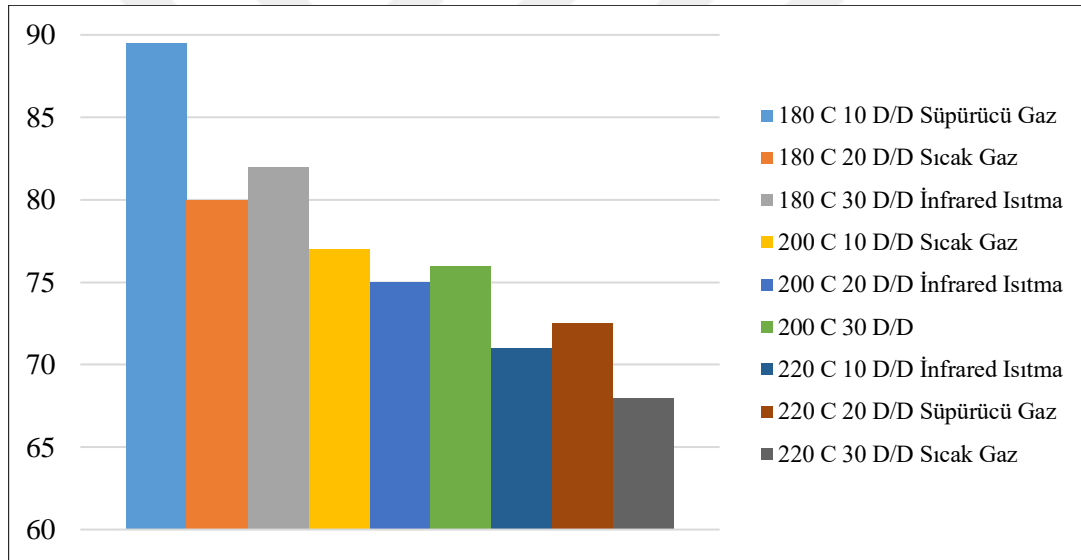
Her parametre için hesaplanan en büyük ve en küçük S/G değerleri arasındaki fark (R) hesaplanır. R değerinin büyüklüğü ilgili parametrenin sonuç üzerindeki etkisini ifade etmektedir. R değerleri kıyaslanarak sonuç üzerinde hangi parametrenin daha etkili olduğu analiz edilebilmektedir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bölüm 5'te tarif edilen deneysel sistemle kurutma testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlerin sonucunda kütle zaman verisi elde edilmiştir. Bu verilerin analizinde iki farklı yöntem izlenebilmektedir. İlk yöntem ortalama değerlerin alınmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu işlem için başlangıç ve bitiş nem değerleri arasındaki enerji tüketimleri, buharlaşma miktarları ve geçen süre tespit edilerek kuruma hızı (Denklem (5.14)) ve enerji verimliliği (Denklem (5.19)) denklemleri ile ortalama değerler üretilebilmektedir. İkinci yöntemde ise zaman üzerinde sürekli olan verilerin, farklı testler için grafikler üzerinden analizi ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde kurutma sürecinin ve diğer analiz parametrelerinin zamana ve nem oranına bağlı olarak değişimi analiz edilebilmektedir. Çalışmamızda elde edilen sonuçlar 3 aşamada analiz edilmektedir. İlk aşamada kurutucu çalışma parametrelerinin enerji verildiğine etkisi Taguchi metodu kullanılarak tespit edilmektedir. Taguchi metodu kullanılırken sistem yanıtı olarak ortalama enerji tüketimleri esas alınmıştır. Çalışma Tam Kurutma (%85 KM, TK) ve (%50 KM, KK) için gerçekleştirilmiştir. TK uygulaması çamurun tesis dışında bertarafı için kullanılan standart uygulamadır. KK uygulaması ise çamurun ototermal yanması için gerekli kuruluk derecesinin (%50 KM) sağlanması için uygulanmaktadır. Analiz sonucunda enerji verimliliği en yüksek olan yöntemin detaylı analizi yapılmak üzere ilave testler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada bu testlerde elde edilen zamana bağlı veriler detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu kısımda kurutma işleminin hızı (kuruma kinetiği) ve enerji tüketimi değerlerinin değişimi kurutma sırasında görülen farklı fazlar açısından incelenmektedir. Son kısımda ise mevcut AAT'lerde (Bölüm 3'te verilen, veri temin edilen tesisler için) uygulanmakta olan çamur termal bertaraf yöntemleri incelenmektedir. Burada incelen uygulamalar susuzlaştırma ve kurutma enerji tüketimleri ile yakma tesislerindeki ek yakıt tüketimleridir. Yakma tesisi ek yakıt tüketimi çamurun kalorifik değeri ve yakma tesisine beslendiği nem oranı ile ilişkilidir. Deneysel sistemle elde edilen enerji tüketimleri ve mevcut durumdaki enerji tüketimleri üzerinden potansiyel enerji ve doğalgaz tasarrufu ve sera gazı emisyonu azaltım miktarları hesaplanmaktadır.

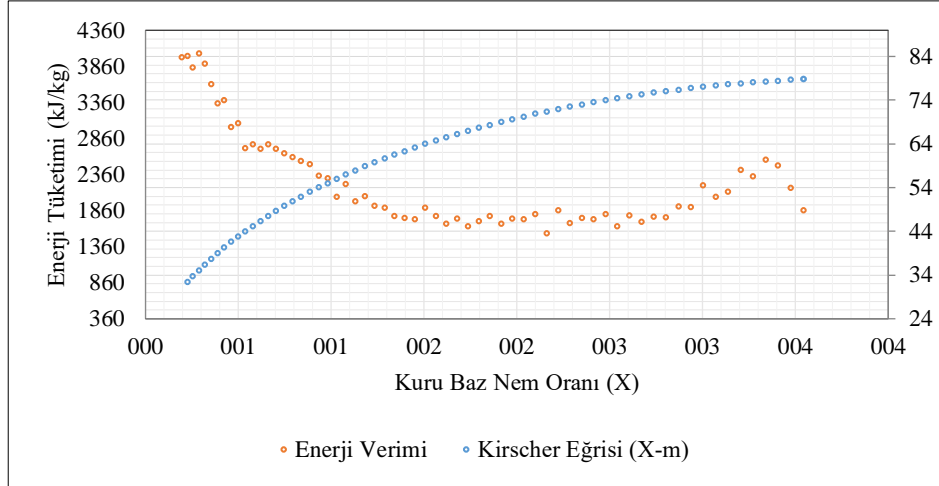
6.1. Çalışma Parametrelerinin Tam Kurutma ve Kısmi Kurutma Durumunda Enerji Verimliliğine Etkisinin Analizi (Tarama Testleri)

Deney tasarım metoduna uygun olarak Bölüm 5.6’da verilmiş deney planına uygun olarak rastgele sırada kurutma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1’de tüm testlere ait test süreleri grafiği verilmektedir. 3 kg çamur numunesi ile aynı ekipmanda yapılan testler sonucunda 90–68 dakika arasındaki farklı sürelerde %85 KM değeri sağlanmıştır. En uzun test süresi Test 1’de gerçekleşmiştir. Bu test en düşük sıcaklık, en düşük devir ve en düşük ısı girdisinin (atık ısı kullanımı yoktur) olduğu testtir. Her bir sıcaklık seviyesi için atık ısı uygulaması olan testlerde ise kuruma süresinin daha düşük olduğu görülmektedir. Sıcaklık artışı ile test süreleri kısalmaktadır. Devir değişiminin etkisi fark edilebilir seviyede değildir.



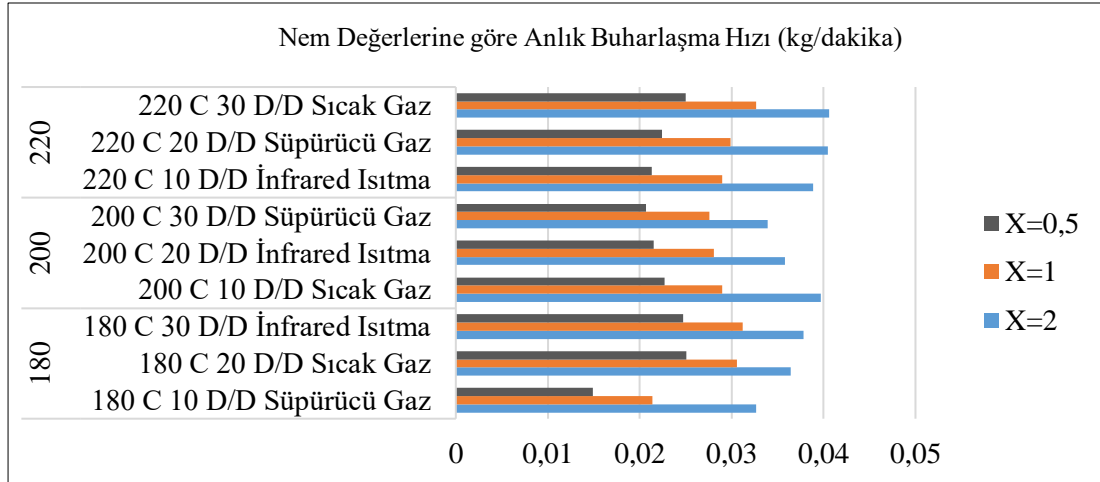
Şekil 6.1. Tüm testlere ait nem oranı zaman grafiği

Kurutucu performansının grafik olarak temel göstergesi farklı nem oranlarında (X) görülen anlık buharlaşma miktarlarının (m) gösterimidir. Bu grafiğe Krischer eğrişi denilmektedir. Bu çalışma kapsamında irdelenen değişken ise kurutmada enerji verimliliği göstergesi olan birim enerji tüketimi değeridir. Buharlaşma hızları ve enerji tüketimlerinin nem oranına bağlı değişimi Şekil 6.2’de verilmektedir. Grafikte buharlaşma hızının kısa bir süre sabit kaldıktan sonra azalmaya başladığı görülmektedir. %50 nem değerinin (X=1) altında ise buharlaşma hızı aşırı derecede düşmektedir. Enerji tüketimleri de X=1,5 noktasının sonrasında aşırı derecede artmaktadır.



Şekil 6.2. Çalışmada elde edilen örnek enerji verimi ve Kirscher eğrisi (220C 30DD Sıcak baca gazı)

Kirscher eğrisinde kuruma hızının nem değerinin azalmasıyla doğru orantılı olarak enerji tüketiminde de artış meydana gelmektedir. Bunun sebepleri enerji tüketimi sabit kaldığı halde kurutma hızının düşmesi nedeniyle birim buharlaşma için enerji veriminin düşmesi gösterilebilir. Çamur kuruma sırasında büzülerek hacim kaybetmektedir. Bu nedenle ısı temas yüzeyleri etkin olarak kullanılamamaktadır. Kurutmanın son aşamalarında partiküllerin yüzeylerini suya doygun hale getirecek kadar nem içermemesi nedeniyle partiküllerin sıcaklığı da artmaktadır.

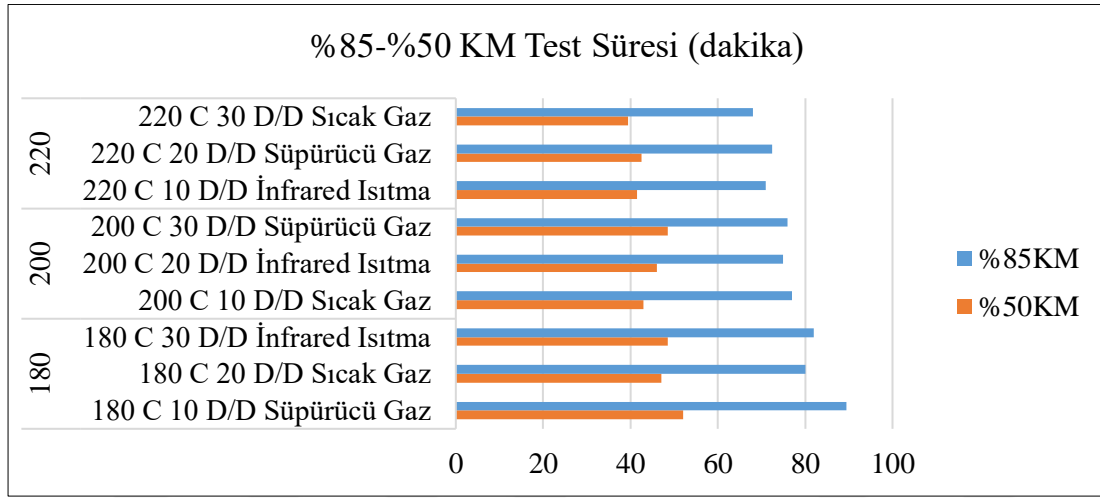


Şekil 6.3. Farklı nem değerlerinde anlık buharlaşma miktarları

Şekil 6.3'te farklı nem değerlerindeki anlık buharlaşma miktarları verilmektedir. Nem değerinde düşüşe bağlı olarak görülen buharlaşma hızı düşüşü 2 farklı etkene bağlıdır. Bunlardan birincisi ürüne bağlı bir özellik olarak ürün serbest suyunun buharlaşarak

tükenmesi sonucu kuruma hızının tanecik iç kısmından yüzeyine su difüzyonuna bağlı hale gelmesidir. Difüzyon olayı (kütle transferi) hızı kuruma hızını da sınırlandırmaktadır. Diğer bir etken ise büzülme nedeniyle ısıtıcı yüzeyle çamur temasının azalması sonucu ısı transfer hızının düşmesidir.

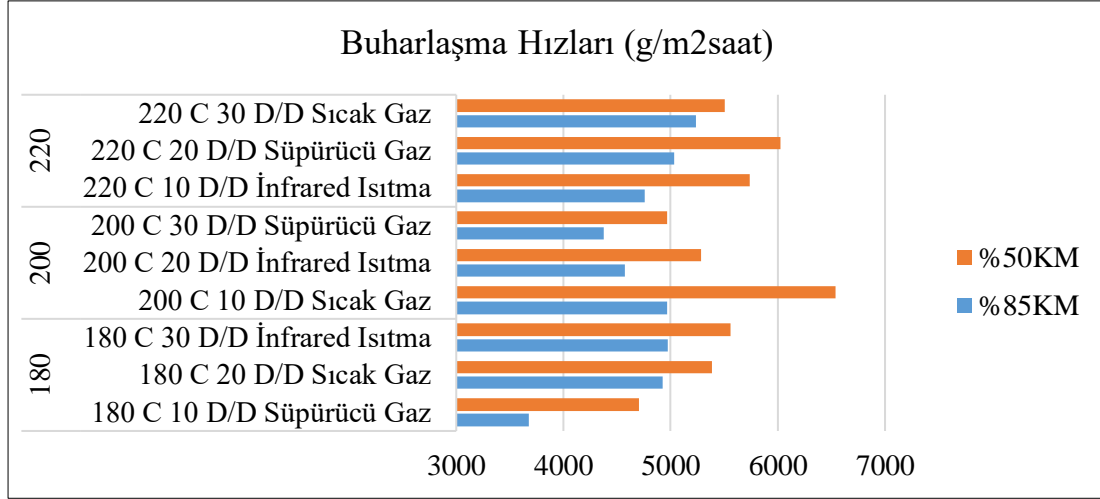
Çamur kurutma testleri aynı ısıtıcı yüzey alanı ve çamur özelliklerinde gerçekleştirildiği için belirli bir nem değerine ulaşılması için geçen süre kuruma hızının da göstergesidir. En düşük kuruma süresi sağlayan Test ise 9 numaralı (220 °C 30 d/d ve sıcak gaz) testtir.



Şekil 6.4. Kurutma süreleri (Tam ve Kısmi kurutma durumları için)

Kurutma işleminde kısmi kuruma uygulaması durumunda en kısa sürede biten 2 test sıcak gaz ile gerçekleştirilen testlerdir. Burada çamurun yoğunluğunun yüksek olması ve yüzey alanının geniş olması nedeniyle ısının nüfuzun yüksek olduğu görülmektedir. Test süreleri dikkate alındığında en kısa ve en uzun test arasında yaklaşık 20 dakika fark olduğu görülmektedir.

%50 ve %85 KM değerlerinde farklı kurutma parametrelerinin anlık buharlaşma hızına etkisi Şekil 6.5'te verilmektedir. %50 KM durumunda tüm testlerde kuruma hızı %85 KM testine göre daha yüksektir. Krischer eğrisinden de anlaşılacağı üzere üründeki nem oranı azaldıkça kuruma daha verimsiz hale gelmektedir. Bu nedenle çamur gibi doğrudan katma değerli ürüne dönüşmeyecek bir madde için ideal kuru madde değerinin enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi ve bu değerden daha yüksek kuru madde oranına (aşırı kurutma) çıkmaktan kaçınılması gerekmektedir.



Şekil 6.5. Tam ve Kısmi kurutma için kuruma hızları

Deney sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen veriler derlenerek (%85 KM ve %50 KM için) ortalama kuruma süresi, buharlaşma miktarı ve enerji tüketimi verileri elde edilmiştir. EV değerleri kullanılarak Bölüm 5.6’da verilen yöntemle uygun olarak veri analizi gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Tam Kuruma Durumu (TK, %85KM)

TK test sonuçları Tablo 6.1’de verilmektedir. Testlere ait son kütle değerleri beslenen ürün nem oranı ve besleme kütlesi ile hesaplanmıştır. Ham veride bu kütleyle karşılık gelen süre kuruma süresi ve bu ana kadar tüketilen enerji de toplam enerji sütununda verilmektedir.

Tablo 6.1. Tam kurutma durumu için elde edilen kurutma verileri

Deney Adı	Kuruma Süresi (Dakika)	İlk Kütle	Son Kütle	Toplam Buharlaşma	Toplam Enerji
180 °C10 D/D Süpürücü Gaz	89,50	3137,50	920,35	2,22	7303,15
180 °C20 D/D Sıcak Gaz	80,00	3129,00	929,57	2,20	6910,64
180 °C30 D/D İnfrared Isıtma	82,00	3176,00	935,50	2,24	7108,82
200 °C10 D/D Sıcak Gaz	77,00	3012,50	886,89	2,13	6702,95
200 °C20 D/D İnfrared Isıtma	75,00	3166,50	934,54	2,23	7003,05
200 °C30 D/D Süpürücü Gaz	76,00	3067,00	899,30	2,17	7143,90
220 °C10 D/D İnfrared Isıtma	71,00	3082,50	902,23	2,18	6784,78
220 °C20 D/D Süpürücü Gaz	72,50	3037,50	900,08	2,14	6974,22
220 °C30 D/D Sıcak Gaz	68,00	3068,00	847,41	2,22	6763,45

Değerler arasında kıyaslama yapılabilmesi için kuruma hızı ve birim kütle bazında enerji değerleri üretilmesi gerekmektedir. Tablo 6.1 de yer alan veriler kullanılarak elde edilen KH ve EV değerleri Tablo 6.2’de verilmektedir. KH değerlerinin sıcaklıkla arttığı görülmektedir. EV değerlerinin de artan sıcaklıkla genel olarak azaldığı görülmektedir. Deney listesi her parametre için tüm seviyeleri içermediği için tablo üzerinde doğrusallık görülmemektedir. Her bir sıcaklık seviyesi için dönme hızı göz ardı edildiğinde atık ısı kullanımının enerji verimliliğini artırdığı görülmektedir.

Atık ısı uygulamasında kurutucu haznesine aktarılan ilave enerji hâlihazırda kaybedilen ısı kaynağı olduğu için tüketim miktarına dâhil değildir. Bu nedenle bazı seviyelerde teorik buharlaşma enerjisine yakın değerler görülmesi anlamlıdır. Buna göre Test 9 (220 C, 30 D/D, Sıcak Gaz) testi en yüksek enerji verimliliği ile kurutma sağlamıştır. Test 1 de EV ve KH açısından en kötü sonucu vermektedir.

Tablo 6.2. Tam ve kısmi kurutma durumu için elde edilen enerji tüketim ve kuruma hızı verileri

Deney Adı	Enerji Tüketimi kJ/kg	Kurutma Hızı	Enerji Tüketimi kJ/kg	Kurutma Hızı
180 °C10 D/D Süpürücü Gaz	3293,93	3,81	3075,60	4,68
180 °C20 D/D Sıcak Gaz	3142,01	4,23	2819,23	5,17
180 °C30 D/D İnfrared Isıtma	3172,87	4,21	2887,88	5,05
200 °C10 D/D Sıcak Gaz	3153,42	4,25	2741,62	5,41
200 °C20 D/D İnfrared Isıtma	3137,63	4,58	2818,54	5,31
200 °C30 D/D Süpürücü Gaz	3295,61	4,39	2954,99	4,87
220 °C10 D/D İnfrared Isıtma	3111,89	4,72	2742,98	5,74
220 °C20 D/D Süpürücü Gaz	3262,92	4,54	2911,12	5,50
220 °C30 D/D Sıcak Gaz	3045,80	5,03	2696,17	6,36

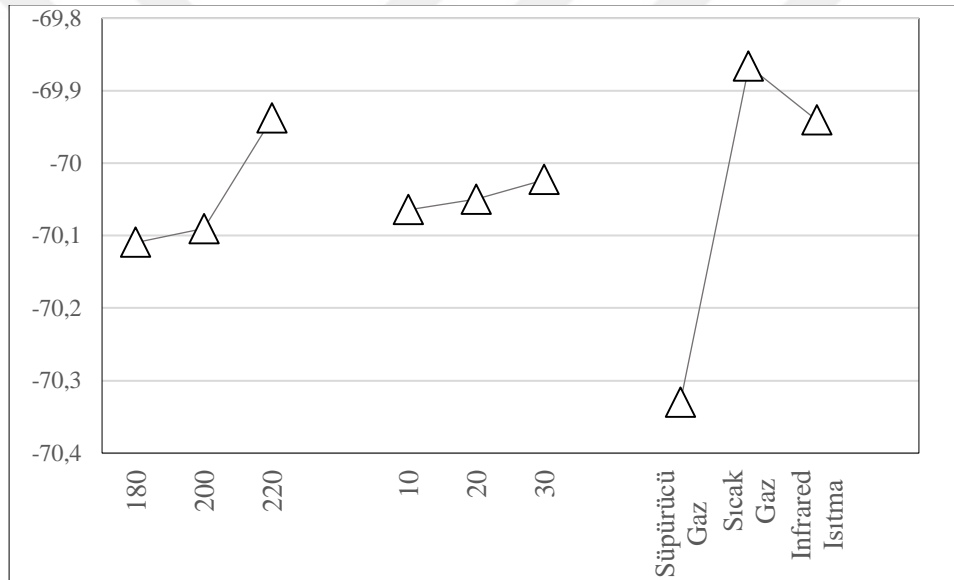
Parametrelerin etkisini değerlendirmek üzere en küçük en iyi fonksiyonuna göre SG oranları hesaplanmıştır. Fonksiyon yanıtı olarak EV değerleri kullanılmıştır. Elde edilen SG oranları parametrelere ait seviyelere göre ağırlıklandırılarak Tablo 6.3’te verilmektedir.

Tablo 6.3’te Fark (Etki şiddeti satırında verilen değerler ilgili parametrenin en büyük ve en küçük SG oranına sahip seviyeleri arasındaki farktır. Bu değer in büyüklüğü; parametrenin, incelenen değer üzerindeki etkisinin şiddetini göstermektedir. Etki sıralaması ise fark değerlerine göre faktörlerinin etkililiklerin sıralanmasıdır.

Tablo 6.3. TK durumu için SG oranlarının ağırlıklandırılmış dağılımı

Seviye	Parametre		
	Sıcaklık	Dönme Hızı	Atık Isı
1	-70,11	-70,06	-70,33
2	-70,09	-70,05	-69,87
3	-69,94	-70,02	-69,94
Fark (Etki Şiddeti)	0,17	0,04	0,46
Faktörlerin Etki Sıralaması	2	3	1

Tablo 6.3'te Fark satırında verilen değerler ilgili faktörün en küçük ve en büyük SG oranları arasındaki farktır. Bu değer ilgili faktörün sonuç (yanıt, EV) üzerindeki etkisinin şiddeti olarak değerlendirilmektedir. Atık ısı uygulamasının EV üzerindeki en etkili parametre olduğu görülmektedir. Dönme hızının EV üzerindeki etkisi ise oldukça düşüktür. Tablo 6.3'ün grafik gösterimi Şekil 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.6. TK durumu için SG oranlarının grafik gösterimi

TK durumu için enerji veriminin azami olduğu değerler Sıcaklık 220 (Seviye 3), Dönme Hızı 30d/d (Seviye 3), Atık Isı Sıcak Gaz (Seviye 2) olduğu görülmektedir. Bu test mevcut deney planında yer aldığı için (Test 9) tekrar testi yapılmasına gerek yoktur. Değerlendirilen seviye aralığında elde edilebilecek en düşük enerji tüketimi (Tablo 6.2) 3045,80 kJ/kg'dır. Tablo 6.4'te her parametrenin tüm seviyeleri için ağırlıklandırılmış ortalama EV değerleri verilmektedir. Tablo 6.4'te Fark (Etki şiddeti) satırında verilen değerler ilgili parametrenin en büyük ve en küçük ortalama EV değerine sahip seviyeleri arasındaki farktır. Etki şiddeti incelendiğinde en etkili faktörün atık ısı kullanımı olduğu görülmektedir.

Tablo 6.4. TK durumu için veri ortalamalarının ağırlıklandırılmış dağılımı

Seviye	Parametre		
	Sıcaklık	Dönme Hızı	Atık Isı
1	3202,93	3186,67	3284,75
2	3196,09	3180,95	3114,29
3	3140,86	3172,26	3140,84
Fark (Etki Şiddeti)	62,07	14,41	170,47
Faktörlerin Etki Sıralaması	2	3	1

6.1.2. Kısmi Kurutma Test Verileri

Çamurun yakma tesislerinde ototermal yanması için \approx %50KM değerinde yakma tesisine beslenmesi gerekmektedir. Kısmi kurutma durumundaki enerji analizi gerçekleştirmek üzere ham verilerde %50KM değerinin sağlandığını kütle değeri, süre ve enerji tüketimi dikkate alınarak Tablo 6.5'te verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 6.5. Kısmi kurutma durumu için elde edilen kurutma verileri

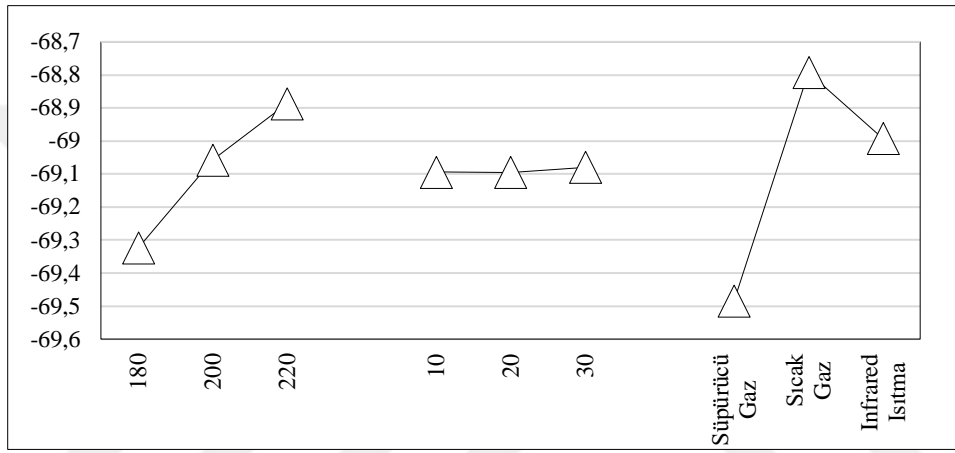
Deney Adı	Süre (Dakika)	İlk Kütle	Son Kütle	Toplam Buharlaşma	Toplam Enerji
180 °C10 D/D Süpürücü Gaz	52,00	3137,50	1555,17	1,58	4867,76
180 °C20 D/D Sıcak Gaz	47,00	3129,00	1552,00	1,58	4442,74
180 °C30 D/D İnfrared Isıtma	48,50	3176,00	1583,00	1,59	4600,84
200 °C10 D/D Sıcak Gaz	43,00	3002,50	1491,25	1,51	4142,63
200 °C20 D/D İnfrared Isıtma	46,00	3166,50	1578,25	1,59	4476,64
200 °C30 D/D Süpürücü Gaz	48,50	3067,00	1533,50	1,53	4530,96
220 °C10 D/D İnfrared Isıtma	41,50	3082,50	1533,50	1,55	4248,29
220 °C20 D/D Süpürücü Gaz	42,50	3037,50	1517,00	1,52	4425,57
220 °C30 D/D Sıcak Gaz	39,50	3068,00	1436,50	1,63	4391,30

KK durumuna ait EV ve KH verileri Tablo 6.2'de verilmektedir. Tüm testlerde KK durumunda, TK durumuna göre enerji verimliliğinin ve buharlaşma hızlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. KK durumu için SG oranlarının ağırlıklandırılmış dağılımı Tablo 6.6'da verilmektedir.

Tablo 6.6. Taguchi yöntemiyle hesaplanan SG oranları

Seviye	Parametre		
	Sıcaklık	Dönme Hızı	Atık Isı
1	-69,32	-69,09	-69,48
2	-69,06	-69,09	-68,79
3	-68,89	-69,08	-68,99
Fark (Etki Şiddeti)	0,44	0,02	0,69
Faktörlerin Etki Sıralaması	2	3	1

EV değeri üzerinde en etkili parametre atık ısı uygulaması olduğu Tablo 6.6'da görülmektedir. Ayrıca TK durumuna göre etkinin şiddetinde de artış meydana gelmektedir. Bunun genel sebebi çamur hacminin henüz azalmadığı için çamur yüzey alanının geniş olması sayesinde daha fazla ısı transferi gerçekleşebilmesidir. Atık ısı kaynaklarının (sıcak gaz ve infrared ısıtıcı) konumu sabit olduğu için sadece üst yüzeyden enerji transferi sağlanabilmektedir. Kurumunun ilerleyen fazlarında hacim azaldığında çamur yüksekliği ve yüzey alanı azalmaktadır. Tablo 6.6'da verilen SG oranlarının grafik gösterimi Şekil 6.7'de verilmektedir.



Şekil 6.7. SG oranlarının grafik gösterimi

Enerji verimliliğinin en yüksek olduğu seviyeler ise SG oranının en büyük olduğu değerlerdir. KK durumu için enerji veriminin azami olduğu değerler Sıcaklık 220 (Seviye 3), Dönme Hızı 30 d/d (Seviye 3), Atık Isı Sıcak Gaz (Seviye 2) olduğu görülmektedir. Bu test mevcut deney planında yer aldığı için (Test 9) tekrar testi yapılmasına gerek yoktur. Değerlendirilen seviye aralığında elde edilebilecek en düşük enerji tüketimi (Tablo 6.2) 2696,17 kJ/kg'dır. Tablo 6.7'de her parametrenin tüm seviyeleri için ağırlıklandırılmış ortalama EV değerleri verilmektedir.

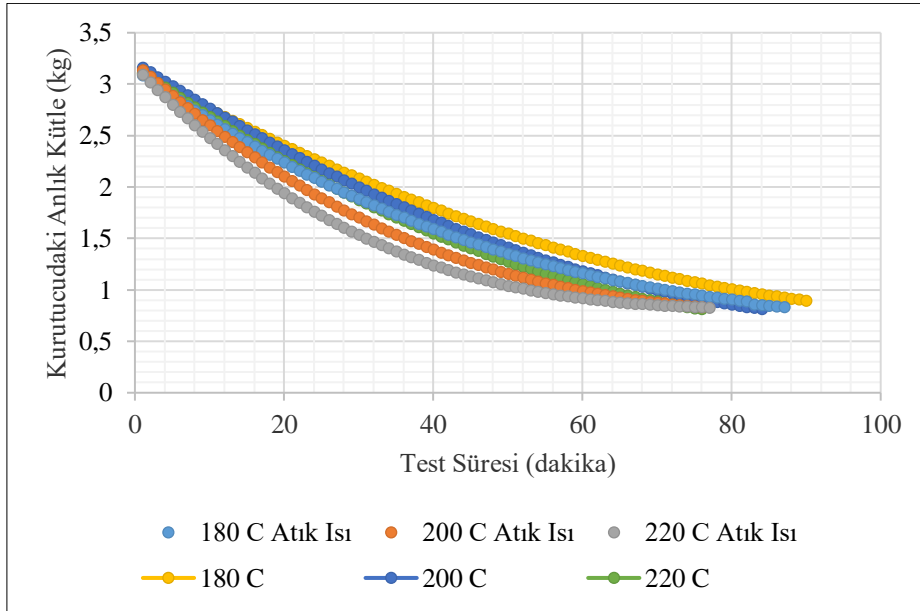
Tablo 6.7. KK durumu için veri ortalamalarının ağırlıklandırılmış dağılımı

Seviye	Parametre		
	Sıcaklık	Dönme Hızı	Atık Isı
1	2927,57	2853,40	2980,57
2	2838,38	2849,63	2752,34
3	2783,43	2846,35	2816,46
Fark (Etki Şiddeti)	144,14	7,05	228,23
Faktörlerin Etki Sıralaması	2	3	1

6.2. Atık Isı Kullanımı ile Enerji Verimliliğinin Artırılması

Sıcaklık ve atık ısının etkilerini analiz edebilmek için kurutma kinetiği ve enerji veriminin detaylı analizi için ek testler gerçekleştirilmiştir. Atık ısı yöntemi olarak en etkili yöntem sıcak gazın doğrudan kurutma haznesine aktarılmasıyla elde edilmiştir. ORC sistemi verimlilik artışı sağlamasına rağmen yatırım maliyeti gazın doğrudan kullanımına göre daha yüksek olduğu için değerlendirmeye alınmamıştır. Deneysel sistemle sıcaklığın ve sıcak baca gazlarının kurutmaya etkisini görmek için sabit devirde (20 D/D) ve 3 farklı sıcaklıkta (180, 200, 220 °C) kurutma testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, aynı devirde (20 D/D) her bir sıcaklık için (180, 200, 220 °C) atık ısı testleri gerçekleştirilmiştir.

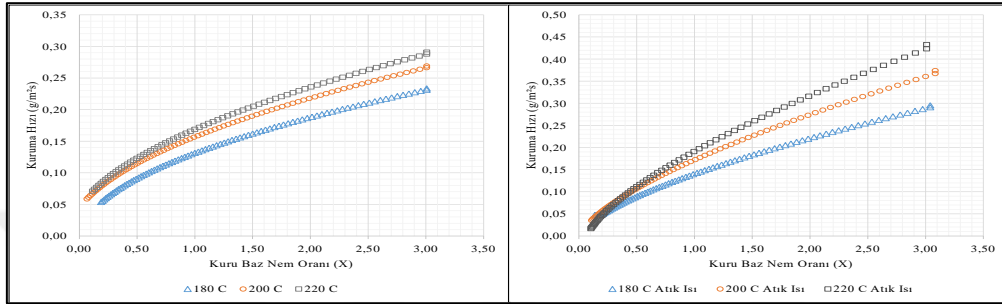
Tüm testlere ait kütle zaman grafiği Şekil 6.8’de verilmektedir. Bölüm 6.1’de verilen sonuçlara benzer şekilde, sıcaklıkla kurutma süresi azalmaktadır. Atık ısı testleri ise diğer testlerden gözle görünür şekilde ayrılmaktadır. 180°C atık ısı ve 220°C testleri ise sabit kuruma hızı bölgesi boyunca benzer kuruma karakteri göstermektedir. Fakat kuruma hızının azalması ile birlikte atık ısı testi olumlu şekilde ayrılmaktadır. Burada üstten sağlanan sıcak gazın çamur içine nüfuz etkisi ile kuruma hızını arttırdığı tahmin edilebilir.



Şekil 6.8. Zaman-Kütle grafiği

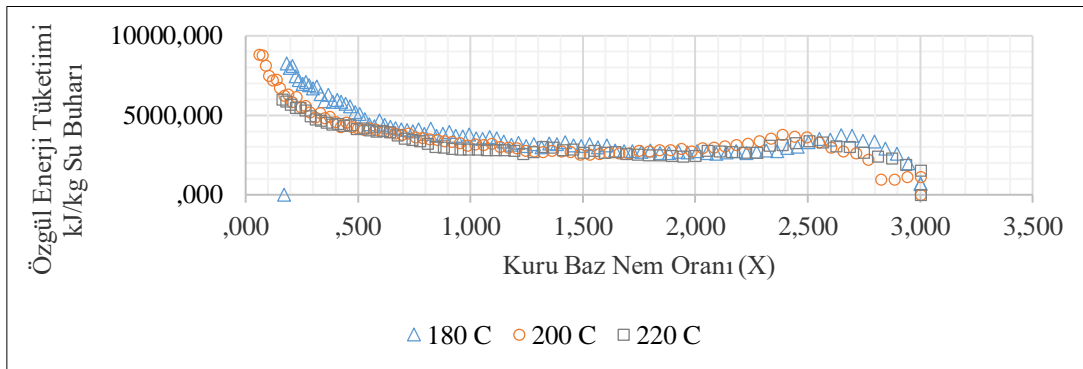
Değişken sıcaklıkta kuruma hızı- nem oranı Şekil 6.9’da verilmektedir. Kurumanın ilk aşamasında buharlaşma hızının yüksek olduğu fakat X=1 noktasının altında ise düştüğü

görülmektedir. Atık ısı uygulaması ile kuruma hızı tüm deney boyunca daha yüksektir. Kurumanın ilk aşamasında atık ısının etkisi daha yüksektir. Bu aşamada çamur yüzeyi suya doymuş durumda olması ve çamur yüksekliği fazla olduğu için ısı kaynağına yakın olması verimliliği artıran önemli etkenlerdir. Kurutmanın ilk aşaması ($X > 2,7$) dikkate alınırsa atık ısı testlerinde elde edilen kuruma hızları normal testlerde elde edilen değerlere göre azalan sıcaklık sıralamasıyla %32, %27 ve %20 oranında daha yüksektir.



Şekil 6.9. Değişken sıcaklıkta kuruma hızı- nem oranı grafiği a) normal kurutma durumu b) atık ısı uygulaması

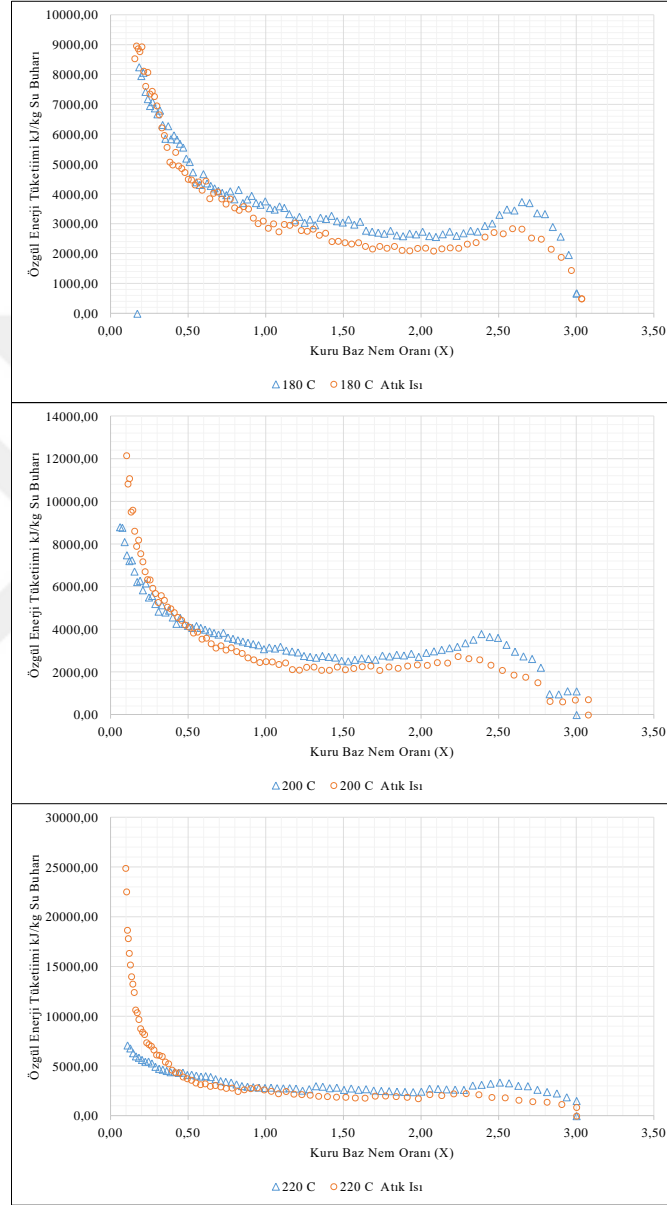
Enerji verimliliği göstergesi olarak Denklem (5.19) kullanıldığı durumun analizini gerçekleştirmek üzere Şekil 6.10'da verilen Enerji Tüketimi-Nem Oranı grafiği elde edilmiştir. Kurumanın ilk aşamasında çamurun ısınma süresinde enerji tüketiminin yoğun olduğu görülmektedir. Kurumanın son aşamasında ise çamurun hacminin azalması ve sadece bağlı suyun buharlaşması gerçekleştiği için enerji tüketimi yükselmektedir. Bu değerler arasında herhangi bir "X" değeri sabit tutulduğunda sıcaklık arttıkça Enerji tüketiminin düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.10. Nem oranına bağlı olarak kuruma hızı ve enerji tüketim grafiği

Bu durumda çamur kurutmada enerji tüketimi açısından 3 faz olduğu söylenebilir. İlk aşamada çamur $T_{besleme}$ sıcaklığından T_{doyma} sıcaklığına ısınmaktadır. Bu nedenle enerji

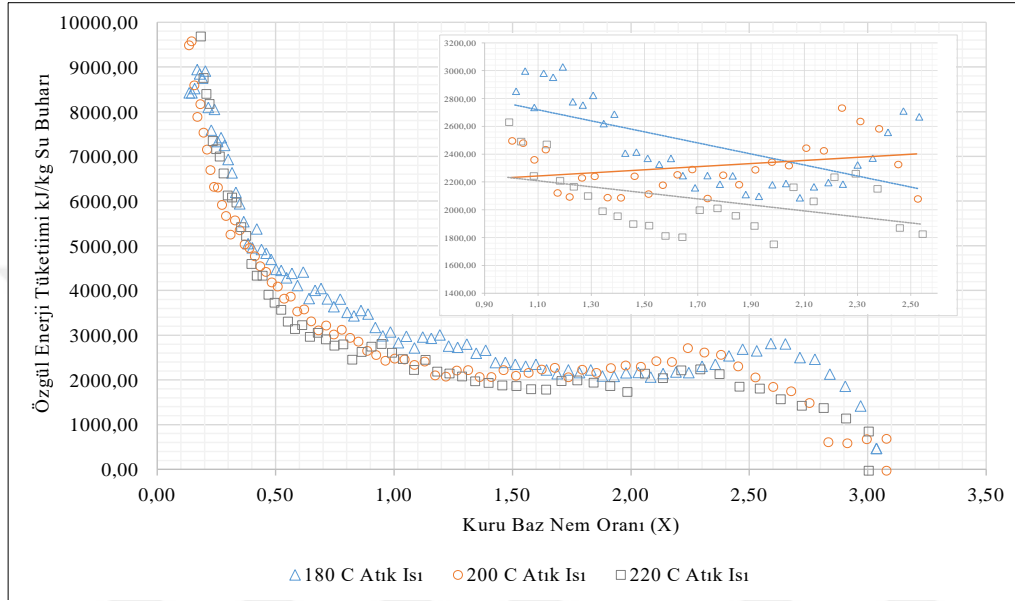
tüketimi yüksektir. İkinci aşama serbest suyun buharlaşma bölgesidir. Bu bölgede enerji tüketimleri daha az dalgalanma göstermektedir. Son bölge ise kuruma hızının düştüğü bölgedir. Bu bölgede tanecik iç yüzeylerinden su difüzyonu kuruma hızını limitlemektedir. Bu bölgede EV değerleri artmaktadır.



Şekil 6.11. Atık ısı ve normal testlerde Nem oranı EV grafiği

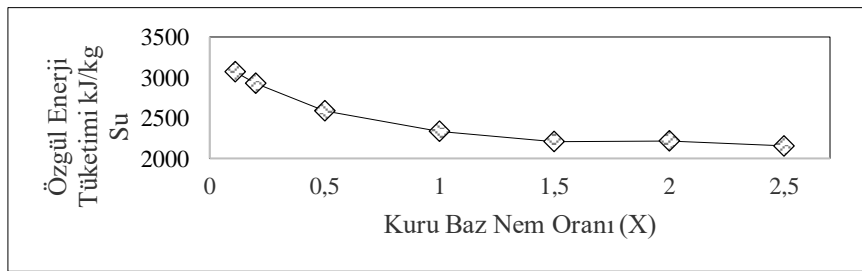
Tüm testlere ait Nem oranı - Enerji tüketimi grafiği Şekil 6.11’de verilmektedir. Çamurun ısınması için geçen süre her sıcaklık için atık ısı uygulaması durumunda daha hızlı gerçekleşmektedir. Sıcaklık değişken olarak ele alındığında ise ısınma sürecinin bittiği noktadaki nem değeri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Sıcaklık artışı ile ısıl girdi artışının

fazla olması buna neden olarak gösterilebilir. Isınma bölgesinin sonunda geniş bir aralıkta EV değerleri sabit kalmaktadır. Nem oranı 0,5-1 (%30-%50) arasına ulaştığında doğrusallık kırılmakta ve EV değerleri artmaktadır. Şekil 6.11’de atık ısı testlerine ait EV grafiği verilmektedir. Grafik detayında doğrusal bölgede görülen enerji tüketim değerleri verilmektedir. Sıcaklık ve enerji tüketimi arasında doğrusal ilişki olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. Atık ısı testlerinde elde edilen EV değerlerinin değişimi

Atık ısı testlerine ait enerji tüketim grafikleri ve doğrusal bölgenin detayı Şekil 6.12’de verilmektedir. Farklı nem değerlerinde elde edilen kümülatif EV değerleri Şekil 6.13’de verilmektedir.



Şekil 6.13. Farklı nem değerlerinde ortalama EV değerleri (180 °C testi için)

6.3. Mevcut Tesislerde Enerji Tüketimi ve Emisyonlarda Sağlanabilecek Azaltımın Değerlendirilmesi

Çamur bertaraf sürecinde termal yöntemlerin kullanımının artması beklenmektedir. Bu tesislerde harcanacak enerjinin ve yatırım maliyetlerinin doğru analiz edilmesi

gerekmektedir. Bu bölümde termal bertaraf uygulamalarında çalışma parametrelerinin optimizasyonu, atık ısının kullanımı, çamurun kurutucu çıkışındaki nem değerinin düzenlenmesi ve yakma tesisleri için kısmi kurutulmuş çamurla ototermal yanmanın uygulanması yöntemleri ile elde edilebilecek enerji tasarrufu ve emisyon azaltım imkanları incelenmiştir.

6.3.1. Deneysel sonuçların kuramsal bir makine kullanılması durumunda elde edilecek verimliliğin analizi

Tablo 3.1’de verilen kurutucuların ortalama kapasitesi yaklaşık 5 ton/saat’tir. Farklı ürünler için daha yüksek kapasitelerde kurutucularda tasarlanabilmektedir. Fakat daha büyük kapasitelerde makinelerin yedekli çalışabilmesi ve imalat, nakliye zorluklarının önüne geçilebilmesi için kurutucu sayısı artırılarak gerekli kapasite karşılanmaktadır. Bu nedenle deneysel sonuçların ölçeklenmesi için 5 ton/saat kapasite ile hesaplama gerçekleştirilecektir. Kurutma parametreleri olarak kurutucu girişi %25KM, kurutucu çıkışı %85 KM kullanılmıştır. Parametreler Tablo 6.8’de verilmektedir.

Tablo 6.8. Değerlendirilecek kurutucu kapasitesi ve kurutma parametreleri

Kurutucu Kapasitesi	5 Ton/saat
Giriş KM	25 %
Çıkış KM	85 %
Buharlaştırılacak Su	3,53 Ton/saat

Deneysel çalışmada en düşük enerji tüketimi 220 °C sıcaklık, 30 d/d dönme hızı (Test 9) ve baca gazlarının doğrudan kurutma haznesinde kullanılmasıyla elde edilmiştir. Test 9 tüm deney sonuçlarının ortalamasından %4 daha az enerji tüketimi sağlamaktadır. Ortalama ve en iyi durum arasında enerji kazanımı Tablo 6.9’da verilmektedir.

Tablo 6.9. Ortalama ve en iyi durum arasında enerji kazanımı tablosu

	Enerji Tüketimi kJ/kg	Kuruma Hızı	Enerji Tüketimi kJ/kg	Kuruma Hızı
Ortalama	3196,29	4,42	2849,79	5,34
En İyi	3045,80	5,03	2696,17	6,36
Fark	150,49	0,61	153,62	1,02
Fark (%)	5%	12%	5%	16%

1 kg su buharı için 150 kJ enerji tasarrufu sağlanmıştır. 5 ton/saat kapasite ve Doğalgaz ısı değeri 36 MJ/m³ için saatlik tasarruf potansiyelleri Tablo 10’da verilmektedir. Tek bir tesiste (5 ton/saat kapasite) atık ısınının kullanılması ve 220 °C de sıcaklıkta çalışma durumuna göre ortalama kıyasla saatte 14,75 m³ doğalgaz yakılması önlenmektedir. Bu

sayede yılda 245,83 ton karbondioksit emisyonu önlenecektir. Deneysel sistemle 5 ton/saat kapasitede elde edilebilecek tasarruf değerleri Tablo 6.10’da verilmektedir.

Tablo 6.10. Deneysel sistemle 5 ton/saat kapasitede elde edilebilecek tasarrufun değerlendirilmesi

Kurutucu Kapasitesi	5000,00	kg/saat
Giriş KM	25,00	%
Çıkış KM	85,00	%
Buharlaştırılacak Su	3529,41	kg/saat
Saatlik Tasarruf	531,14	MJ/saat
Doğalgaz Eş Değeri	14,75	Nm ³
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu	121720,38	Nm ³ /yıl
Önlenen Emisyon	245,83	Ton CO ₂ /yıl

Tasarruf potansiyeli mevcut tesisler için de elde edilebilir. Fakat tesislerde gerçekleşen enerji tüketimleri prototip cihazdan farklıdır. Bu durumda eş değerliği sağlamak için mutlak enerji tasarrufu (105 kJ/kg) yerine yüzde enerji tasarruf değerini kullanmak daha uygundur. Mevcut tesislerde enerji tüketimlerinde gerçekleşecek azaltım Tablo 6.9’da verilen %5 tasarruf oranı ile hesaplanabilir. Tablo 6.11’de deneysel kazanım oranları ile tesislerde elde edilebilecek tasarrufun değerlendirilmesi verilmektedir.

Tablo 6.11. Deneysel kazanım oranları ile farklı tesislerde elde edilebilecek tasarrufun değerlendirilmesi

Tesis No	Enerji Tüketimi (kJ/kg Su)		Kapasite (ton/gün)	Enerji Tasarrufu (MJ/gün)
	Mevcut	Düzenlenmiş		
Tesis 1	11144,00	10619,31	120,00	62963,10
Tesis 2	5507,00	5247,71	421,00	109159,35
Tesis 3	3920,00	3735,43	197,80	36507,00
Tesis 4	4864,00	4634,99	115,00	26336,33
			Toplam	234965,78

Tablo 6.12’de deneysel kazanım oranları toplam yıllık doğalgaz tasarrufu ve emisyon azaltımı verilmektedir.

Tablo 6.12. Toplam tasarrufun değerlendirilmesi

Günlük Tasarruf	234965,78	MJ/gün
Doğalgaz Eş Değeri	6526,83	Nm ³
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu	1794877,52	Nm ³ /yıl
Yıllık Önlenen Emisyon	3624,93	ton CO ₂ /yıl

6.3.2. Mevcut tesislerin enerji verimliliği değerlendirilmesi

Tesis 1 ve 4 te susuzlaştırılmış çamurdaki nem oranının yüksek olduğu görülmektedir. Tesis 1, 2, 3 ve 4’te kurutucu çıkışındaki oranının ise denge nem oranından daha düşük olduğu görülmektedir. Bu tesislerde dekantör değişimi, revizyonu veya susuzlaştırma ç-öncesi

kullanılan polielektrolit miktarının düzenlenmesi ile susuzlaştırılmış çamur KM oranı yükseltilebilir. Kurutucu çıkışı nem oranlarının daha düşük olması ise besleme hızının artırılması ile sağlanabilir. Tesislerin mevcut durumu ve düzenlemelerle 1 ton yaş çamur için elde edilebilecek kurutma yükü tasarrufu Tablo 6.13’de verilmektedir.

Tablo 6.13. Nem değerlerinin değiştirilmesi ile sağlanacak kurutma yükü azaltımı

Tesis No	Giriş Nem (%)		Çıkış Nem (%)		1 Ton Çamur için elde edilen Kurutucu Yükü Azaltım (kg Su)
	Mevcut	Düzenlenmiş	Mevcut	Düzenlenmiş	
Tesis 1	21,64	25	97,42		71,99
Tesis 2	25,38	25,38	95,18	85	31,94
Tesis 3	25,95	25,95	97,8		39,96
Tesis 4	20	25	90		71,90

Toplam 4 tesiste elde edilebilecek kurutma yükü azaltımı ile bunun enerji ve emisyon karşılığı Tablo 6.14’te verilmektedir.

Tablo 6.14. Nem değerlerinin değiştirilmesi elde edilebilecek enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı

Tesis No	Çamur Kapasitesi (ton/gün)	Kurutma Yükü Azaltımı (kg Su/gün)	MJ/gün	Doğalgaz Tasarrufu m ³ /yıl	Emisyon Azaltımı kg CO ₂ /yıl
Tesis 1	120,00	8638,40	96266,33	735367,81	1485,15
Tesis 2	421,00	13444,88	74040,94	565590,54	1142,27
Tesis 3	197,80	7903,43	30981,46	236663,94	477,97
Tesis 4	115,00	8267,97	40215,42	307201,16	620,42

Tesis 4’e ait bilgi notunda çürütme ile elde edilen gazın bir kısmının (7623 m³) anaerobik reaktörlerin ısıtılmasında kullanıldığı bildirilmektedir. Anaerobik çamur çürütme reaktörleri mezofilik şartlarda çalışmaktadır. Mezofilik şartlarda çamurun 35-40 °C aralığında tutulması gerekmektedir. Bu sıcaklık değerleri herhangi bir yakma işlemi yapmadan kurutucu çıkış gazları ile taşınan su buharının yoğuşma enerjisi ile karşılanabilecek durumdadır.

Tablo 6.15. Reaktör ısıtmasındaki yakıt ile kurutucu çıkış gazlarındaki enerjinin karşılaştırması

Reaktör Isıtmasında Harcanan Biyogaz	Kurutucu Çıkış Gazında Kullanılabilir Enerji
7623,00 m ³ /gün	115,00 ton/gün Çamur besleme
23,00 MJ/m ³	89,44 ton/gün Su Buharı
175329,00 MJ/Gün	205722,22 MJ/gün

Biyogazla elde edilen ve kurutucu çıkış gazları ile taşınan enerjinin karşılaştırması Tablo 6.15’de verilmektedir. Bacada taşınan atık ısının biyogaz ile taşınandan fazla olduğu

dolayısıyla ısıtma için kullanılabilmesi görülmektedir. Dekantör ve kurutucu çıkış KM oranlarının optimize edilmesi durumunda dahi kurutucu çıkış gazlarında ısıtma için yeterli enerji (186705,88 MJ/gün) bulunmaktadır. 7623 m³ biyogazın kurutmada kullanılan 3550 m³ doğalgazı ikame etmesi mümkündür. Bu uygulama ile elde edilebilecek enerji tasarrufu Tablo 6.16’da verilmektedir.

Tablo 6.16. Reaktör ısıtmasından el edilecek tasarrufun değerlendirilmesi

Tasarruf Potansiyeli		
Doğalgaz Tasarrufu	3550,00	m ³ /gün
Enerji Tasarrufu	127800,00	MJ/gün
Yıllık Emisyon Azaltım	59149,04	ton CO ₂

6.3.3. Yakma tesisinin analizi

Kurutma işlemi maliyetli görülerek alternatiflere yönelmektedir. Fakat yakma alternatifinde bertaraf maliyetleri sıfırlanmamaktadır. Ayrıca yakma tesisi yatırım maliyetleri kurutma yatırımına kıyasla çok daha yüksektir. İncelenen yakma tesisinde (Tesis 5) 1 ton çamur bertarafı için 58,2 m³ doğalgaz tüketilmektedir. Çamurun ototermal yakılması ile elde edilebilecek enerji tasarrufu ve %50 kurutma için gerekli enerji tüketimlerinin kıyaslanması gerekmektedir. Tesis 5’te yakılan çamur %20 KM içermektedir. 1 ton çamurun %50 KM değerine kurutulması için gerekli kurutma yükü 600 kg Su olmaktadır. Kurutmanın deneysel sistemde kısmi kurutma için elde edilen en iyi sonuçla (2696,17 kJ/kg Su) gerçekleştirilmesi durumunda 1 ton çamurun bertarafında yaklaşık 45 m³ doğalgaz tüketimi gerçekleşmektedir. Bu durumda elde edilebilecek tasarruf ve emisyon azaltımı Tablo 6.17’de verilmektedir.

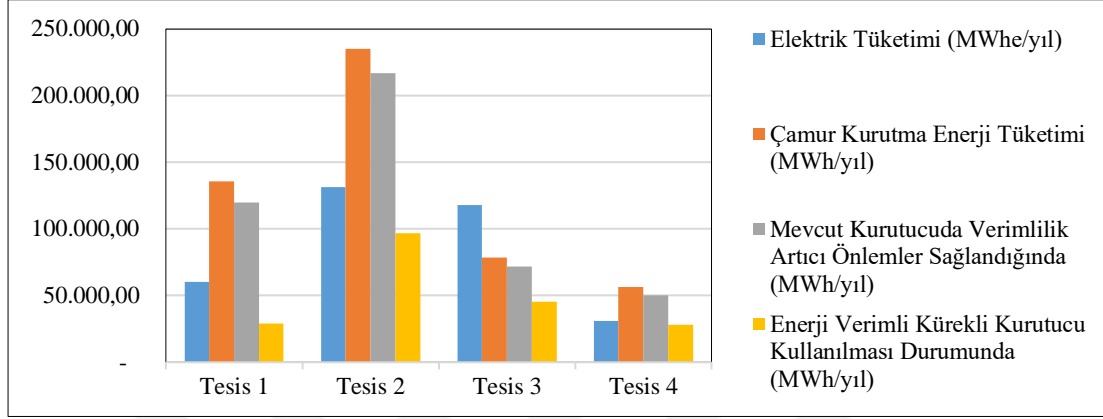
Tablo 6.17. Yakma tesisinde ototermal yanma ile elde edilecek tasarruf

Mevcut Tüketim	58,20	m ³ /ton çamur
Kurutmada Öngörülen Tüketim	45,00	m ³ doğalgaz /ton çamur
Tasarruf	13,00	m ³ doğalgaz /ton çamur
Çamur Besleme Kapasitesi	275,00	ton/gün ortalama
Tasarrufun Yıllık Doğalgaz Eşdeğeri	983125,00	m ³ doğalgaz /yıl
Yıllık Emisyon Azaltımı	1985,52	ton

6.3.4. Genel Değerlendirme

Çamur işleme tesislerinde enerji verimliliğinde artış sağlayabilecek tedbirler alınabilir. Bunlar iki kısımda değerlendirilmektedir. Öncelikle gerçekleştirilmesi için herhangi bir ek maliyet gerektirmeyen kurutma yükünün azaltılması işlemidir. Diğer tedbir ise enerji verimli kurutucu yatırımı yapılması/kurutucunun enerji verimliliğini artıracak şekilde revize

edilmesidir. Tesislerde mevcut kurutma enerjisi durumu ile bu iki durumda sağlanacak enerji talebi Şekil 6.14’te verilmektedir. Bu tedbirlere ek olarak her tesiste özgün enerji verimliliği artış imkânları da bulunabilmektedir. Bu nedenle tesislerin enerji verimi analizleri gerçekleştirilmelidir.



Şekil 6.14. Tesislerde revizyon sonrası elde edilecek ısı enerjisi talebi grafiği

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Su tüm canlıların hayatını sürdürebilmesi için gerekli temel ihtiyacdır. Kent yaşamında suyun sağlanması kadar tüketilen suyun doğru sürdürülebilir şekilde bertarafı da büyük bir ihtiyaçtır. Tüketilen suyun kirleticilerden kısmen arındırılması ve uygun ortamlara deşarj edilmesi gerekmektedir. Ülkemizde atık su arıtımı belediyelere yüklenen bir sorumluluktur. Atık suyun arıtılması sürecinin günümüz teknolojisinde kaçınılmaz çıktısı ise arıtma çamurudur.

AB uyum müktesebatı gereği çamurların uygun yöntemlerle bertaraf etmesi gerekmektedir. Öte yandan Türkiye Paris İklim Anlaşmasını imzalamış ve Niyet edilen Ulusal Katkı Beyanı 2012 yılını baz alarak tedbir alınmamış senaryoya göre 2030 yılındaki emisyonlarında %21 azaltma taahhüdünde bulunmuştur. Emisyonların hesaplanmasına dair IPCC kılavuzlarında Enerji, Toprakta Kullanım ve Atık başlıklarında değerlendirilmektedir.

Türkiye şehirlerinde oluşan çamuru bertaraf etmek zorundadır. 2018 yılında oluşan çamur miktarı 857.000 tondur. Bunun %57'si depolama sahalarına dökülmüştür. Fakat depolama sahalarına dökülen çamurların anaerobik fermantasyonu ile metan (CH₄) emisyonu oluşmaktadır. 2016 yılı verilerine göre ülkemizin metan emisyonununun %25'i atık sektöründen kaynaklanmıştır. Bunun büyük bölümü depolama sahalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle AB ülkelerinde organik madde oranı %5'ten fazla olan çamurların depolama sahalarına dökülmesi yasaklanmıştır. Çamurun toprakta kullanım uygulaması Bölüm 2.3.1'de ifade edildiği üzere oldukça sınırlıdır. Bu durumda çamur için termal bertaraf uygulamalarının artması beklenmelidir.

Arıtma çamurlarının bertaraf sürecinde (depolama, toprakta kullanım ve termal işlemler) kurutma işlemi uygulanması kaçınılmazdır. Kurutma ile çamur hacmi ve kütlesi azaltılır. Koku problemi ortadan kaldırılır. Yakma tesisleri için kullanıma hazır bir yakıt üretilmiş olur. Kurutma işleminde enerji tüketiminin yüksek olması nedeniyle tüm bertaraf sisteminin enerji verimliliği dikkate alınarak tasarlanması gerekmektedir.

Ülkemiz enerjide dışa bağımlı bir ülkedir. Bu nedenle kurutma ülkemizde yapılacak kurutucu yatırımlarının enerji tüketimi en düşük teknolojilere yönlendirilmesi

gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında çamur bertarafında en yüksek enerji verimine sahip sistem olan temaslı tip kurutucularda çalışma parametrelerinin ve atık ısı kullanımının enerji verimine ve kurutucu performansına etkisi incelenmiştir. Çalışma parametreleri olan kurutma sıcaklığı ve karıştırıcı dönme hızının etkisi incelenmiştir. Enerji verimliliği çalışılan aralıkta artan sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmakta birim su buharlaşması için gereken enerji tüketimi azalmaktadır.

Geleneksel atık ısı geri kazanımı ve ORC sistemi uygulaması ile referans duruma göre %6,7'ye varan artış (Test 9) sağlanmaktadır. Fakat ORC yatırım maliyeti ile getirdiği enerji verimlilik artışı karşılaştırıldığında fizibilite uygun olmayabilir. Yanma sonucu oluşan baca gazlarının kurutma haznesine beslenmesiyle aynı sıcaklıkta yapılan deneylere oranla 180, 200 ve 220°C kurutucu enerji tüketimi de sırasıyla %4,6, %4,3 ve %6,7 (Deney No: 2, 4, 9) azaltılmıştır. Bu deneylerin sonuçlarına göre elde edilen en iyi sonucun diğer deneylerin ortalamasına kıyasla %5 daha az enerji tüketimi gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu test parametrelerinin kullanılmasıyla kurutucu enerji tüketiminde 1 ton çamur (%25 KM-%85 KM) kurutmak için 2,95 m³ doğalgaz tasarrufu sağlanabilmektedir. Ortalama bir kurutucu kapasitesi 5 ton/saat olarak kabul edilirse tek bir makinede bir yılda 245 ton CO₂ emisyonu azaltımı sağlanabilir.

İncelenen tesislerde çamurun dekantörden yüksek nem oranında çıktığı (KM<%25) veya kurutucudan denge nem değerinin üstünde çıktığı (KM>85) görülmektedir (Bölüm 3). Bu değerlerin optimize edilmesi ile yıllık yaklaşık 1.8 milyon m³ doğalgaz ve 3725 ton CO₂ emisyon azaltımı gerçekleştirilebilir.

Ülkemizde çamurun termal bertarafında yaygın uygulanan yöntemler çimento fabrikalarında yakma ve tekli yakmadır. Çimento tesisleri kurutulmuş arıtma çamurlarının bertarafı için ücret ödemeyi kabul etmektedir. Buna alternatif olarak belediyeler tarafından müstakil yakma tesisi yatırımları gerçekleştirilmektedir. Çamurun biyokütle olarak tanımlanması ve teşvikli tarifede elektrik satışı yapılabilmesi bu yatırımları cazip göstermektedir. Fakat tesis tasarım ve çalışma parametrelerinin optimum şekilde seçilmediği de görülebilmektedir.

Mevcut tekli yakma tesislerinde susuzlaştırılmış çamurun (%75–90 KM) yakılabilmesi için doğalgaz ek yakıt olarak kullanılmaktadır. Ek yakıt tüketimi yaklaşık 60 m³

doğalgaz/ton susuzlaştırılmış çamur olarak verilmektedir. Tesis elektriksel verimi ise %21'dir. Arıtma çamurlarının %50 KM oranında ototermal yakılması mümkün görülmektedir (Bölüm 2.3.2). Bu nedenle çamurun kısmen kurutulmuş olarak %50 KM içeriğinde yakma tesisine beslenmesi durumunda enerji dengesi değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda (Deney 9)'a göre %50 KM kurutma yapılması durumunda 2696,17 kJ/kg Su Buharı, %85 KM kurutma yapılması durumunda 3045,80 kJ/kg Su Buharı enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Çamurların kısmi kurutma uygulanarak %50 KM oranında ototermal olarak yakılması durumunda ton başına 13 m³ doğalgaz tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu değer tesis kapasitesinde ölçeklendiğinde 980.000 m³ doğalgaz ve 1985 ton/yıl CO₂ emisyon azaltımı gerçekleştirilebilir.

Yukarıda verilen tedbirler mevcut tesislerde herhangi bir maliyet gerektirmeden büyük miktarda emisyon kazanımı sağlamaktadır. Yeni kurulacak tesislerde çamurun enerji kaynağı olarak görülmesi ve yatırım maliyetleri ile geri ödeme sürelerinin daha dikkatli yapılması gerekmektedir. Kamu idareleri çamurun mevcut durumundaki bertaraf maliyetini düşürmeyi hedeflemektedir. Bu durumda sürecin tüm boyutları ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Kurutma ve yakma gibi sürekli çalışan tesislerde çok küçük verimlilik kazanımları ile çok büyük yıllık mali tasarruflar sağlanabilmektedir. Bu nedenle yatırım planlaması yapılırken ilk yatırım maliyeti yüksek de olsa enerji verimli teknolojilerin tercih edilmesi gerekmektedir. Ekipmanlar çalışırken de enerji tüketimlerinin sürekli değerlendirilmesi ve iyileştirme yöntemleri aranmalıdır.

Çamurun işlenmesi yoğun enerji gerektiren aynı zamanda potansiyel bir enerji kaynağı olarak görülmelidir. İşlenmesinde harcanan enerjiyi en aza indirirken kullanımdaki enerjiyi en yüksek seviye çıkarmak hedeflenmelidir. Bu tez kapsamında bertaraf tesislerinde enerji ve mali tasarruf sağlayacak aynı zamanda emisyon azaltımı gerçekleştirecek teknikler geliştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abusoglu, A., Demir, S., Kanoglu, M. (2012). Thermoeconomic assessment of a sustainable municipal wastewater treatment system. *Renewable Energy*, 48, 424–435. DOI: 10.1016/j.renene.2012.06.005
- Achinas, S., Achinas, V., Euverink, G. J. W. (2017). A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering*, 3(3), 299–307. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.03.002
- Aghbashlo, M., Hosseinpour, S., Mujumdar, A. S. (2015). Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology—A Comprehensive Review. *Drying Technology*, 33(July 2015). DOI: 10.1080/07373937.2015.1036288
- Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., ... Cunha-Queda, C. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management*, 40(276), 44–52. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.027
- Angin, İ. (2016). Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonuna Alternatif Bir Yaklaşım: Vermistabilizasyon. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 47(2), 123–129.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.06.002
- Arlabosse, P., Chavez, S., Lecomte, D. (2004). Method for Thermal Design of Paddle Dryers: Application to Municipal Sewage Sludge. *Drying Technology*, 22(10), 2375–2393. DOI: 10.1081/DRT-200040041
- Arlabosse, P., Chavez, S., Prevot, C. (2005). Drying of municipal sewage sludge: From a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(2), 227–232. DOI: 10.1590/S0104-66322005000200009
- Arlabosse, P., Chitu, T. (2007). Identification of the Limiting Mechanism in Contact Drying of Agitated Sewage Sludge. *Drying Technology*, 25(4), 557–567. DOI: 10.1080/07373930701226955
- Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015). TC Resmi Gazete (29314, 2 Nisan 2015). ÇŞB (TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).
- Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (2010). TC Resmi Gazete (27721, 6 Ekim 2010). ÇŞB (TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).
- Ayol, A., Tezer Yurdakos, O., Gurgen, A. (2019). Investigation of municipal sludge gasification potential: Gasification characteristics of dried sludge in a pilot-scale downdraft fixed bed gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(32), 17397–17410. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.014

- Ayvaz, Z. (2000). Atıksu Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi. *Ekoloji Çevre Dergisi*, 9(35), 3–12.
- Bahadori, A., Smith, S. T. (2016). *Dictionary of Environmental Engineering and Wastewater Treatment*. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-26261-1
- Bennamoun, L., Arlabosse, P., Léonard, A. (2013). Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 29–43. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.043
- Bianchini, A., Bonfiglioli, L., Pellegrini, M., Saccani, C. (2015). Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant. *Waste Management*, 42, 159–165. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.04.020
- Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F., Lävemann, E. (2015). Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy*, 151, 157–167. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.147
- Campello, L. D., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., dos Santos, I. F. S. (2020). Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*, (0123456789). DOI: 10.1007/s10668-020-00689-y
- Cao, Y., Pawłowski, A. (2012). Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1657–1665. DOI: 10.1016/j.rser.2011.12.014
- Chen, H., Zhai, Y., Xu, B., Xiang, B., Zhu, L., Qiu, L., ... Zeng, G. (2015). Characterization of bio-oil and biochar from high-temperature pyrolysis of sewage sludge. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(4), 470–478. DOI: 10.1080/09593330.2014.952343
- Chen, L., Liao, Y., Ma, X. (2021). Economic analysis on sewage sludge drying and its co-combustion in municipal solid waste power plant. *Waste Management*, 121, 11–22. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.11.038
- Cui, H., Ninomiya, Y., Masui, M., Mizukoshi, H., Sakano, T., Kanaoka, C. (2006). Fundamental behaviors in combustion of raw sewage sludge. *Energy and Fuels*, 20(1), 77–83. DOI: 10.1021/ef050188d
- Demir, S., Karabasoglu, O., Akkerman, V., Abusoglu, A. (2015). Economic optimization of indirect sewage sludge heat dryer unit for sewage sludge incineration plants. *ASME 2015 9th International Conference on Energy Sustainability, ES 2015, Collocated with the ASME 2015 Power Conference, the ASME 2015 13th*

International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, and the ASME 2015 Nuclear Forum, 1, 1–8. DOI: 10.1115/ES2015-49155

- Demirbas, A., Taylan, O., Kaya, D. (2016). Biogas production from municipal sewage sludge (MSS). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(20), 3027–3033. DOI: 10.1080/15567036.2015.1124944
- Deng, W., Su, Y. (2014). Experimental study on agitated drying characteristics of sewage sludge under the effects of different additive agents. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 26(7), 1523–1529. DOI: 10.1016/j.jes.2014.05.019
- Deng, W., Su, Y., Yu, W. (2013). Theoretical Calculation of Heat Transfer Coefficient When Sludge Drying in a Nara-Type Paddle Dryer Using Different Heat Carriers. *Procedia Environmental Sciences*, 18, 709–715. DOI: 10.1016/j.proenv.2013.04.096
- Deng, W. Y., Yuan, M. H., Mei, J., Liu, Y. J., Su, Y. X. (2017). Effect of calcium oxide (CaO) and sawdust on adhesion and cohesion characteristics of sewage sludge under agitated and non-agitated drying conditions. *Water Research*, 110, 150–160. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.001
- Deng, W., Yan, J.-H., Li, X.-D., Wang, F., Lu, S.-Y., Chi, Y., Cen, K.-F. (2009). Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer. *Chemical Engineering Science*, 64(24), 5117–5124. DOI: 10.1016/j.ces.2009.08.015
- Dinçer, İ., Zamfirescu, C. (2015). *Drying Phenomena*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/9781118534892
- Dittler, A., Bamberger, T., Gehrman, D., Schlu, E. (1997). *Measurement and simulation of the vacuum contact drying of pastes in a LIST-type kneader drier*. 36, 301–308. DOI: 10.1016/S0255-2701(97)00004-4
- Kaya, D., Öztürk H. H. (2014). *Sanayide Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği: Uygulamalı Örneklerle*. Kocaeli: Umuttepe Yayınevi.
- El-Mesery, H. S., Mwithiga, G. (2015). Performance of a convective, infrared and combined infrared- convective heated conveyor-belt dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2721–2730. DOI: 10.1007/s13197-014-1347-1
- Eyidogan, M., Canka Kilic, F., Kaya, D., Coban, V., Cagman, S. (2016). Investigation of Organic Rankine Cycle (ORC) technologies in Turkey from the technical and economic point of view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 885–895. DOI: 10.1016/J.RSER.2015.12.158
- Ferrasse, J. H., Arlabosse, P., Lecomte, D. (2002). Heat, Momentum, and Mass Transfer Measurements in Indirect Agitated Sludge Dryer. *Drying Technology*, 20(4–5), 749–769. DOI: 10.1081/DRT-120003755

- Figueiredo, C., Lopes, H., Coser, T., Vale, A., Busato, J., Aguiar, N., ... Canellas, L. (2018). Influence of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of biochar from sewage sludge. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(6), 881–889. DOI: 10.1080/03650340.2017.1407870
- Fraikin, L., Herbreteau, B., Salmon, T., Nicol, F., Crine, M., Léonard, A. (2015). Use of an Experimental Design to Characterize the Convective Drying Behavior of Different Sludges. *Drying Technology*, 33(11), 1302–1308. DOI: 10.1080/07373937.2015.1026979
- Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto, A., Leone, P., Santarelli, M. (2017). Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants through co-digestion and fuel cell systems. *Frontiers in Environmental Science*, 5(October), 1–21. DOI: 10.3389/fenvs.2017.00070
- Gorazda, K., Tarko, B., Wzorek, Z., Kominko, H., Nowak, A. K., Kulczycka, J., ... Smol, M. (2017). Fertilisers production from ashes after sewage sludge combustion – A strategy towards sustainable development. *Environmental Research*, 154(July 2016), 171–180. DOI: 10.1016/j.envres.2017.01.002
- Grady, J. C. P. L., Daigger, G. T., Love, N. G., Filipe, C. D. M. (2011). *Biological Wastewater Treatment*.
- Groß, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J., Kimmerle, K., Gross, B., ... Kimmerle, K. (2008). Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification. *Waste Management*, 28(10), 1819–1826. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.08.016
- Gülsoy, İ. (2018). *Kentsel Atıksu Arıtma Tesisinin Online İzlenmesi ile Enerji Etüt ve Optimizasyonu*. Kocaeli Üniversitesi.
- Han, X., Niu, M., Jiang, X., Liu, J. (2012). Combustion characteristics of sewage sludge in a fluidized bed. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(32), 10565–10570. DOI: 10.1021/ie3014988
- Hao, X., Liu, R., Huang, X. (2015). Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China. *Water Research*, 87, 424–431. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.050
- Hartman, M., Svoboda, K., Pohořelý, M., Trnka, O. (2005). Combustion of dried sewage sludge in a fluidized-bed reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(10), 3432–3441. DOI: 10.1021/ie040248n
- Hernández, A. B., Ferrasse, J. H., Roche, N. (2013). Limiting the pollutant content in the sewage sludge producer gas through staged gasification. *Chemical Engineering and Technology*, 36(11), 1985–1996. DOI: 10.1002/ceat.201300103
- Horttanainen, M., Deviatkin, I., Havukainen, J. (2017). Nitrogen release from mechanically dewatered sewage sludge during thermal drying and potential for recovery. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1819–1826. DOI:

10.1016/j.jclepro.2016.11.102

- Houssayne, E., Khadir, E., Idlimam, A., Lamharrar, A. (2018). Experimental study of hygroscopic equilibrium and thermodynamic properties of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering*, 143(July), 521–531. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.048
- Hroncová, E., Ladomerský, J., Musil, J. (2017). Problematic issues of air protection during thermal processes related to the energetic uses of sewage sludge and other waste. Case study: Co-combustion in peaking power plant. *Waste Management*, 73(228), 574–580. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.08.025
- Huron, Y., Salmon, T., Crine, M., Blandin, G., L'eonard, A. (2010). Effect of liming on the convective drying of urban residual sludges. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 5, 909–914. DOI: 10.1002/apj
- Intelvi, M. (2009). *Contact Drying of Particulate Pharmaceuticals: Modelling And Simulation*.
- İrdemez, Ş., Yılmaz, A. E., and Anlatıcı, E. (2016). Evsel Atıksu Arıtma Çamurlarının Termal Kurutma-Yakma Prosesi ile Uzaklaştırılmasında Arıtma Verimi – Enerji İlişkisinin İncelenmesi. *Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der.*, 6(4), 65–73.
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., and Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6(April), 268–289. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.04.017
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., ... Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156(August 2016), 39–46. DOI: 10.1016/j.envres.2017.03.010
- Kaya, D., Eyidogan, M. (2010). Energy Conservation Opportunities in an Industrial Boiler System. *Journal of Energy Engineering*, 136(1). DOI: 10.1061/ASCE0733-94022010136:118
- Kelessidis, A., Stasinakis, A. S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, 32(6), 1186–1195. DOI: 10.1016/J.WASMAN.2012.01.012
- Kemp, I. C. (2014). Fundamentals of Energy Analysis of Dryers. In *Modern Drying Technology* (Vol. 4–4, pp. 1–45). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. DOI: 10.1002/9783527631728.ch21
- Kemp, I. C., Fyhr, B. C., Laurent, S., Roques, M. a., Groenewold, C. E., Tsotsas, E., ... Kind, M. (2001). Methods for Processing Experimental Drying Kinetics Data. *Drying Technology*, Vol. 19, pp. 15–34. DOI: 10.1081/DRT-100001350

- Kliopova, I., Makarskiene, K. (2015). Improving material and energy recovery from the sewage sludge and biomass residues. *Waste Management*, 36, 269–276. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.10.030
- Kudra, T. (2004). Energy aspects in drying. *Drying Technology*, 22(5), 917–932. DOI: 10.1081/DRT-120038572
- Kütük, M. . A., Aksoy, M. (2013). A Case Study on Sewage Sludge Incineration Plant:GASKİ. II. *International Conference on Water, Energy and the Environment*, 1, 1–6.
- Lechtenberg, D., Lechtenberg, M. V. W. (2011). *Dried sewage sludge as an alternative fuel*. (April), 36–39.
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., De Paepe, M. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 448–461. DOI: 10.1016/J.RSER.2015.03.089
- Léonard, A., Blacher, S., Marchot, P., Pirard, J.-P., Crine, M. (2005). Convective Drying of Wastewater Sludges: Influence of Air Temperature, Superficial Velocity, and Humidity on the Kinetics. *Drying Technology*, 23(8), 1667–1679. DOI: 10.1081/DRT-200065082
- Li, B., Wang, F., Chi, Y., Yan, J. H. (2014). Study on optimal energy efficiency of a sludge drying-incineration combined system. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(4), 684–692. DOI: 10.1007/s10163-014-0293-3
- Ma, J., Zhang, L., Li, A. (2016). Energy-efficient co-biodrying of dewatered sludge and food waste: Synergistic enhancement and variables investigation. *Waste Management*, 56, 411–422. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.06.007
- Magdziarz, A., Werle, S. (2014). Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS. *Waste Management*, 34(1), 174–179. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.10.033
- Magdziarz, A., Wilk, M. (2013). Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 114(2), 519–529. DOI: 10.1007/s10973-012-2933-y
- McCarty, P. L., Bae, J., Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved? *Environmental Science and Technology*, 45(17), 7100–7106. DOI: 10.1021/es2014264
- Meisel, K., Clemens, A., Fühner, C., Breulmann, M., Majer, S., Thrän, D. (2019). Comparative Life Cycle Assessment of HTC Concepts Valorizing Sewage Sludge for Energetic and Agricultural Use. *Energies*, 12(5), 786. DOI: 10.3390/en12050786

- Menshutina, N. V., Kudra, T. (2001). Computer Aided Drying Technologies. *Drying Technology*, 19(8), 1825–1849. DOI: 10.1081/DRT-100107275
- Milhé, M., Charlou, C., Sauceau, M., Arlabosse, P. (2015). Modeling of Sewage Sludge Flow in a Continuous Paddle Dryer. *Drying Technology*, 33(9), 1061–1067. DOI: 10.1080/07373937.2014.982252
- Milhé, M., Sauceau, M., Arlabosse, P. (2015). Influence of Operating Parameters on Sewage Sludge Drying in a Paddle Dryer: Design of Experiments for the Determination of Hold-Up and Water Content Profiles. *Drying Technology*, 33(11), 1276–1285. DOI: 10.1080/07373937.2015.1026976
- Mills, N., Pearce, P., Farrow, J., Thorpe, R. B., Kirkby, N. F. (2014). Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste Management*, 34(1), 185–195. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.024
- Mujumdar, A. S. (2007). *Handbook of industrial drying*. CRC/Taylor & Francis.
- Mujumdar, A. S., Zhonghua, W. (2007). Thermal Drying Technologies—Cost-Effective Innovation Aided by Mathematical Modeling Approach. *Drying Technology*, 26(1), 145–153. DOI: 10.1080/07373930701812606
- Murakami, T., Suzuki, Y., Nagasawa, H., Yamamoto, T., Koseki, T., Hirose, H., Okamoto, S. (2009). Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery. *Fuel Processing Technology*, 90(6), 778–783. DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.03.003
- Nordin, A., Strandberg, A., Elbashir, S., Åmand, L. E., Skoglund, N., Pettersson, A. (2020). Co-combustion of municipal sewage sludge and biomass in a grate fired boiler for phosphorus recovery in bottom ash. *Energies*, 13(7). DOI: 10.3390/en13071708
- Nurbay, N. (2014). *Yeni Bir Atık Çamur Kurutma Sisteminin Tasarlanması ve Arıtma Çamurlarına Uygulanması*. Kocaeli Üniversitesi.
- Otero, M., Gómez, X., García, A. I., Morán, A. (2007). Effects of sewage sludge blending on the coal combustion: A thermogravimetric assessment. *Chemosphere*, 69(11), 1740–1750. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.05.077
- Perry, R. H., Green, D. W. (2008). *Perry's chemical engineers' handbook*. McGraw-Hill.
- Poulsen, T. G., Hansen, J. A. (2003). Strategic environmental assessment of alternative sewage sludge management scenarios. *Waste Management and Research*, 21(1), 19–28. DOI: 10.1177/0734242X0302100103
- Rajczyk, R., Bień, J., Palka, H., Pogodziński, A., Smorağ, H. (2014). Co-combustion of municipal sewage sludge and hard coal on fluidized bed boiler WF-6. *Archives of*

- Environmental Protection*, 40(3), 101–113. DOI: 10.2478/aep-2014-0027
- Rulkens, W. (2008). Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: Overview and assessment of the various options. *Energy and Fuels*, 22(1), 9–15. DOI: 10.1021/ef700267m
- Ryan, T. P. (2007). *Modern Experimental Design*.
- Sahni, E. K., Chaudhuri, B. (2012). Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches. *International Journal of Pharmaceutics*, 434(1–2), 334–348. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2012.06.010
- Samolada, M. C., Zabaniotou, A. A. (2014). Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management*, 34(2). DOI: 10.1016/j.wasman.2013.11.003
- Santos, I. F. S. Dos, Barros, R. M., Tiago Filho, G. L. (2016). Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, 126, 504–514. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.072
- Scholz, M. (2016). Sludge Treatment and Disposal. In *Wetlands for Water Pollution Control* (pp. 157–168). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-444-63607-2.00021-6
- Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., Spliethoff, H. (2009). Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering*, 29(8–9), 1809–1817. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.08.016
- Sever Akdağ, A., Atak, O., Atımtay, A. T., Sanin, F. D. (2018). Co-combustion of sewage sludge from different treatment processes and a lignite coal in a laboratory scale combustor. *Energy*, 158, 417–426. DOI: 10.1016/j.energy.2018.06.040
- Singh, R. (2015). *Membrane Technology and Engineering for Water Purification / ScienceDirect*. Butterworth-Heinemann.
- Spinosa, L., Ayol, A., Baudez, J.-C. C., Canziani, R., Jenicek, P., Leonard, A., ... van Dijk, L. (2011). Sustainable and Innovative Solutions for Sewage Sludge Management. *Water*, 3(2), 702–717. DOI: 10.3390/w3020702
- Stasta, P., Boran, J., Bebar, L., Stehlik, P., Oral, J. (2006). Thermal processing of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering*, 26(13), 1420–1426. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.05.030
- Syed-Hassan, S. S. A., Wang, Y., Hu, S., Su, S., Xiang, J. (2017). Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(June), 888–913. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.262

- Tchobanoglous, G., Franklin, B. L., Stensel, H. D. (1994). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F. L. (Franklin L., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W. (2018). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*.
- Tsotsas, E., Schlünder, E. U. (1986). Contact drying of mechanically agitated particulate material in the presence of inert gas. *Chemical Engineering and Processing*, 20(5), 277–285. DOI: 10.1016/0255-2701(86)80021-6
- Tsotsas, Evangelos, Metzger, T., Gnielinski, V., Schlünder, E.-U. (2010). Drying of Solid Materials. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. American Cancer Society. DOI: 10.1002/14356007.B02_04.PUB2
- Tsotsas, Evangelos, Mujumdar, A. S. (2014). Process Intensification. In *Modern Drying Technology*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Tunçal, T. (2010). Evaluating Drying Potential of Different Sludge Types: Effect of Sludge Organic Content and Commonly Used Chemical Additives. *Drying Technology*, 28(12), 1344–1349. DOI: 10.1080/07373937.2010.482704
- Tunçal, T., Uslu, O. (2014). A Review of Dehydration of Various Industrial Sludges. *Drying Technology*, 32(14), 1642–1654. DOI: 10.1080/07373937.2014.909846
- Türkmenler, H., Dilekoğlu, M. F., Aslan, M., Can, Z. R. (2018). Arıtma Çamurundan Biyogaz Üretimi : Adıyaman İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Örneği. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 8733(3), 59–62.
- Turovskiy, I. S., Mathai, P. K. (2006). *Wastewater Sludge Processing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/047179161X
- Udo Wiesmann, In Su Choi, Eva-Maria Dombrowski. (2006). *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment* / Wiley.
- URL-1: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Belediye-Atıksu-Istatistikleri-2018-30667>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-2: https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/enver-n-ha--rapor_c-lt-ii-20180921103833.pdf, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-3: <https://www.epa.gov/biosolids/plain-english-guide-epa-part-503-biosolids-rule>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-4: <https://www.adana-aski.gov.tr/web/default.aspx>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-5: <https://www.asat.gov.tr/tr/kurumsal/faaliyet-raporu-25.html>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).

- URL-6: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/belt-drum-fluid-bed-dryers/bds-belt-dryer-sludge>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-7: <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tablolari>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-8: <https://haarslev.com/products/disc-dryer-2/>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-9: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env_ww_spd, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-10: <https://www.camur.itu.edu.tr/dokuman.php>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-11: <https://www.sms-vt.com/technologies/drying-technology/horizontal-thin-film-dryer/>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-12: <https://www.huber-technology.com/products/sludge-treatment/sludge-drying/huber-solar-active-dryer-srt.html>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-13: <https://www.iski.istanbul/web/tr-TR/kurumsal/faaliyet-raporlari1>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-14: <https://www.izsu.gov.tr/tr/Dokumanlar/Liste/11?AspxAutoDetectCookieSupport=1>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-15: <https://www.kaski.gov.tr/faaliyet-raporlari>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-16: <https://www.koski.gov.tr/sayfa/faaliyet-raporlari>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-17: <https://feeco.com/rotary-dryers/>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-18: http://www.eea.europa.eu/publications/GH-10-97-106-EN-C/at_download/file, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-19: <https://www.suski.gov.tr/kategori/46/0/faaliyet-raporlari>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-20: <https://cygm.csb.gov.tr/evsel-kentsel-aritma-camurlarinin-yonetimi-projesi-uyuru-33959>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- URL-21: <https://www.komurder.org/pdf/iccs-komurder-2019-sonuc-raporu.pdf>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2022).
- Uzun, P., Bilgili, U. (2011). Arıtma Çamurlarının Tarımda Kullanılma Olanakları. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(2), 135–146. DOI: 10.20479/uuzfd.39058

- Vamvuka, D., Alexandrakis, S., Galetakis, M. (2019). Combustion performance of sludge from a wastewater treatment plant in fluidized bed. Factorial modeling and optimization of emissions. *Frontiers in Energy Research*, 7(MAY), 1–10. DOI: 10.3389/fenrg.2019.00043
- Van't Land, C. M. (2011). Drying in the Process Industry. In *Drying in the Process Industry*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/9781118105818
- Vaxelaire, J., Bongiovanni, J. . . (2000). Thermal Drying of Residual Sludge. *Water Resource*, 13(17), 4318–4323. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.08.024
- Waclawek, S., Grübel, K., Silvestri, D., Padil, V. V. T., Waclawek, M., Cerník, M., Varma, R. S. (2019). Disintegration of wastewater activated sludge (WAS) for improved biogas production. *Energies*, 12(1). DOI: 10.3390/en12010021
- Wang, Z., Chen, D., Song, X., Zhao, L. (2012). Study on the combined sewage sludge pyrolysis and gasification process: Mass and energy balance. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 33(22), 2481–2488. DOI: 10.1080/09593330.2012.683816
- Warren, M., Julian, S., Peter, H. (1993). *Unit Operations in Chemical Engineering*. McGraw Hill.
- Werle, S., Dudziak, M. (2014). Gaseous fuels production from dried sewage sludge via air gasification. *Waste Management and Research*, 32(7), 601–607. DOI: 10.1177/0734242X14536460
- Werther, J., Ogada, T. (1999). Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25(1), 55–116. DOI: 10.1016/S0360-1285(98)00020-3
- Werther, J., Ogada, T., Sa, M. (2001). NO_x and N₂O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge. *Fuel*, 80(x), 167–177.
- Wzorek, M., Tańczuk, M. (2015). Production of biosolid fuels from municipal sewage sludge: Technical and economic optimisation. *Waste Management & Research*, 33(8), 704–714. DOI: 10.1177/0734242X15588584
- Yapıcıoğlu, P., Demir, Ö. (2017). Çamur Arıtımının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi- Genel Bakış. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2(2), 78–92.
- Yüksekdağ, M., Gökpınar, S., Yelmen, B. (2020). Atıksu Arıtma Tesislerinde Arıtma Çamurları ve Bertaraf Uygulamaları. *European Journal of Science and Technology*, (18), 895–904. DOI: 10.31590/ejosat.699952
- Zhai, Y., Wang, C., Chen, H., Li, C., Zeng, G., Pang, D., Lu, P. (2013). Digested sewage sludge gasification in supercritical water. *Waste Management and Research*, 31(4),



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Eyidoğan, M., Kılıç, F. Ç., **Sapmaz, S.** (2018). Bir otomobil montaj işletmesinde enerji verimliliği artırıcı çözümlerin irdelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 149–162.

Sapmaz, S., Kilic, F. C., Eyidogan, M., Taylan, O., Coban, V., Cagman, S., Kılıçaslan, İ., Kaya, D. (2015). Selection of compressors for petrochemical industry in terms of reliability, energy consumption and maintenance costs examining different scenarios by. *Energy Exploration & Exploitation*, 33(1), 43–62.

Kılıçaslan, İ., Kaya, D., **Sapmaz, S.** (2012). Waste Heat Recovery in Galvanising Industry. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 15(3), 135–139.

ÖZGEÇMİŞ

Süleyman Sapmaz ilk, orta ve lise eğitimini Kocaeli’nde tamamladıktan sonra 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Termal Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalında başlayan Yüksek Lisans Eğitimini 2014 yılında “Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Tasarrufu Uygulaması” konulu tez ile tamamladı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamış ve halen göreve devam etmektedir.

