

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL ARITMA ÇAMURLARININ VAKUM KURUTMA
PROSESİ İLE KURUTMA KARAKTERİSTİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Bahar AKYÜZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Arslan SARAL

Temmuz, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL ARITMA ÇAMURLARININ VAKUM KURUTMA
PROSESİ İLE KURUTMA KARAKTERİSTİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Bahar AKYÜZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Arslan SARAL

Temmuz, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL ARITMA ÇAMURLARININ VAKUM KURUTMA
PROSESİ İLE KURUTMA KARAKTERİSTİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Bahar AKYÜZ tarafından hazırlanan tez çalışması 13.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Arslan SARAL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Arslan SARAL, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Doğan KARADAĞ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Atakan ÖNGEN, Üye

İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa

Danışmanım Arslan SARAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Endüstriyel Atık Çamurların Vakum Kurutma Prosesi ile Kurutma Karakteristiklerinin Araştırılması adlı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bahar AKYÜZ
İmza



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FBA-2018-3480 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, benden desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgi ve birikimini benimle paylaşan Prof. Dr. Yaşar AVŞAR, Dr. Fatih İLHAN'a ve hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Arslan SARAL'a sonsuz teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, hayatta her zaman bana destek olan, iyi bir eğitim almam için bütün olanaklarını sonuna kullanan bütün zor zamanlarımda yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bahar AKYÜZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	6
2 KURUTMA	7
2.1 Suyun Üç Hali	7
2.2 Buharlaştırma İçin Gereken Isı	10
2.3 Kurutmada Isı İletimi	11
2.4 Kurutmanın Statiği	12
2.5 Kurutmanın Kinetiği	13
2.6 Kurutma Yöntemleri	15
2.6.1 Güneşte Kurutma	15
2.6.2 Güneş Kolektörü ile Kurutma	15
2.6.3 Dondurarak Kurutma	16
2.6.4 Mikrodalga ile Kurutma	17
2.6.5 Vakum ile Kurutma	18
2.6.6 Ultrasound Destekli Vakum Kurutma	20
2.6.7 Diğer Kurutma Yöntemleri	22
2.7 Sanayide Kullanılan Kurutma Sistemleri	22
2.7.1 Akışkan Yataklı Kurutma	22
2.7.2 Tünel Kurutucular	23
2.7.3 Sprey Püskürtmeli Kurutucular	24
2.7.4 Diğer Kurutucular	25
3 ARITMA ÇAMURU	26
3.1 Arıtma Çamuru Kaynakları	26

3.2 Arıtma Çamurunun Özellikleri.....	27
3.3 Arıtma Çamuru Karakterizasyonunda Önemli Parametreler	28
3.3.1 Özgül Ağırlık	28
3.3.2 Çamur Katı Madde İçeriği	29
3.3.3 Uçucu Katı Madde	29
3.3.4 Çamur Partikül Boyutu	30
3.3.5 Zeta Potansiyeli	30
3.3.6 Çamurun Isıl Değeri	31
3.3.7 Çamurun Akışkanlık Özelliği	31
3.4 Arıtma Çamuru Bertarafı	32
3.5 Çamur Kurutma	34
3.5.1 Çamur Kurutma Teknikleri	34
3.5.2 Sanayide Uygulanan Çamur Kurutma Sistemleri	42
4 MATERYAL VE METOT	45
4.1 Materyaller	45
4.1.1 Arıtma Çamuru	45
4.1.2 Kullanılan Ekipmanlar	45
4.2 Metot	51
4.2.1 Çamurların Hazırlanması.....	51
4.2.2 Deney Düzeneği	52
4.2.3 Çamur Sıcaklıklarının Ölçülmesi	54
4.2.4 Çamurun Nem Muhtevasının (Başlangıç Nemi) Hesaplanması	54
4.2.5 Çamurun Nem İçeriğinin Hesaplanması	54
4.2.6 Çamurun Nem Oranının Hesaplanması.....	55
4.2.7 Kuruma Sabitlerinin (k) Belirlenmesi	55
4.2.8 Toplam Organik Madde Tayini (TOM).....	57
5 BULGULAR	58
5.1 Sıcaklık, Yığın Şekli ve Yüzey Alanının Çamur Kurumasına Etkileri	58
5.1.1 30 mbar Vakumlu Ortamda Kurutma Sonuçları	58
5.1.2 1000 mbar Basıncılı Ortamda Kurutma Sonuçları	60
5.2 Farklı Şartlarda Kurutulan Çamurlara Ait Kuruma Sabiti Değerleri	62
5.3 Farklı Sıcaklıklarda Kurutulan Çamur Kütleleri İçin ANOVA- Kuruma Süresi Karşılaştırması	70
5.4 Farklı Sıcaklık ve Çamur Şekillerinde Buharlaşma ile Meydana Gelen Kütlesel Kayıpların Karşılaştırması	75

5.4.1 30 mbar Vakumlu Ortamda Buharlaşma İle Meydana Gelen Kütlesel Kayıplar	75
5.4.2 1000 mbar Basıncılı Ortamda Buharlaşma İle Meydana Gelen Kütlesel Kayıplar	78
5.5 Çamur Örneklerinin Kurumasına Vakum Faktörünün Etkisi	80
5.5.1 Sabit Vakum ve Farklı Sıcaklıklarda Kurutma	80
5.5.2 Sabit Sıcaklık ve Farklı Vakum Değerlerinde Kurutma	82
5.6 Kuruma Sürecinde Çamurun Organik Madde Muhtevsındaki Değişim	85
5.6.1 30 mbar Vakum Ortamında Kurutulan Örnekler İçin Hesaplanan Organik Madde Kayıpları	85
5.6.2 1000 mbar Basıncı Ortamında Kurutulan Örnekler için Hesaplanan Organik Madde Kayıpları	87
6 TARTIŞMA	88
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKÇA	96
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	102

SİMGE LİSTESİ

Atm	Atmosfer Basıncı Birimi
kPa	Kilopaskal
MPa	Megapaskal
mbar	Milibar



KISALTMA LİSTESİ

ANO	Alınabilir Nem Oranı
TOM	Toplam Organik Madde



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1	Suyun faz diyagramı	10
Şekil 2. 2	Su için buhar basıncı sıcaklık derecesi eğrisi.....	11
Şekil 2. 3	Sorpsiyon izoterm eğrisinin kurutma açısından incelenmesi	13
Şekil 2. 4	Kurumanın kinetik eğrisi, $r=5\text{cm}$ gevşek çamur kütlesi için	14
Şekil 2. 5	Güneş kolektörlü kurutma sistemi	16
Şekil 2. 6	Dondurarak kurutma	17
Şekil 2. 7	Ultrason destekli vakum kurutma sisteminin şematik gösterimi: doğrudan (a) ve doğrudan olmayan (b)	21
Şekil 2. 8	Akışkan yataklı kurutucu.....	23
Şekil 2. 9	Tünel kurutucu	24
Şekil 2. 10	Sprey püskürtmeli kurutucu	25
Şekil 3. 1.	Arıtma çamuru örneği	26
Şekil 3. 2	(a) Yüklü tanecikler birbirini itmektedir ve (b) yüksüz tanecikler yumaklı bir yapı oluşturmaktadır	30
Şekil 3. 3	Tipik kuruma oranı eğrisi.....	35
Şekil 4. 1	KNFN920KT tipi vakum pompası	46
Şekil 4. 2	Nuve EV018 tipi vakum etüvü.....	47
Şekil 4. 3	S&A CW-5000 tipi soğutucu (yoğusturucu).....	48
Şekil 4. 4	Protherm marka PLF 115M model kül fırını.....	49
Şekil 4. 5	AND marka GR- 202 model hassas tartı	50
Şekil 4. 6	Extech marka VIR 50 model kızılötesi termometre	51
Şekil 4. 7	Rastgele gevşek yığın şeklindeki çamurlar	52
Şekil 4. 8	Sıkıştırılmış yığın şeklindeki çamurlar.....	52
Şekil 4. 9	Deney düzeneği şeması.....	53
Şekil 5. 1	30 mbar vakum altında, gevşek çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri	58
Şekil 5. 2	30 mbar vakum altında, sıkıştırılmış çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri	59
Şekil 5. 3	1000 mbar basınç altında, gevşek çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri	60
Şekil 5. 4	1000 mbar basınç altında, sıkıştırılmış çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri	61
Şekil 5. 5	30 mbar, 100 °C sıcaklıkta kurutulan 9 cm çaplı gevşek çamur yığını için dört farklı kinetik denklemi eğrisi	62

Şekil 5. 6	30 mbar vakum altında, farklı sıcaklıklardaki çamur örnekleri için ANO- kuruma süresi grafiği	70
Şekil 5. 7	1000 mbar vakum altında, farklı sıcaklıklardaki çamur kütleleri için ANO- kuruma süresi grafiği	73
Şekil 5. 8	30 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı	76
Şekil 5. 9	30 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı	77
Şekil 5. 10	30 mbar vakum değerinde, 50 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı	78
Şekil 5. 11	1000 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı	79
Şekil 5. 12	1000 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı	80
Şekil 5. 13	1000 mbar basınç altında ve farklı sıcaklıklardaki çamurların kuruma yüzdelerinin kıyaslanması	81
Şekil 5. 14	30 mbar basınç altında ve farklı sıcaklıklardaki çamurların kuruma yüzdelerinin kıyaslanması	82
Şekil 5. 15	10 mbar basınç altında ve farklı sıcaklıklardaki çamurların kuruma yüzdelerinin kıyaslanması	82
Şekil 5. 16	50 °C sıcaklıkta farklı vakum değerlerinde kuruma yüzdelerinin karşılaştırması	83
Şekil 5. 17	100 °C sıcaklıkta farklı vakum değerlerinde kuruma yüzdelerinin karşılaştırması	84
Şekil 5. 18	200 °C sıcaklıkta farklı vakum değerlerinde kuruma yüzdelerinin karşılaştırması	84

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1	Tek bileşen içermekte olan bir sisteme faz kuralı uygulanması ile hesaplanmış serbestlik dereceleri (F)	8
Tablo 2.2	Suyun gizli ısı ve saturasyon dereceleri.....	10
Tablo 3. 1	Aktif çamurun yapısındaki su dağılımları.....	27
Tablo 3. 2	Aritma çamurlarının içermiş oldukları suya göre yapıları.....	28
Tablo 3. 3	Çeşitli arıtma kademelerinde oluşan çamurların katı madde konsantrasyonları	29
Tablo 3. 4	Çamur türlerine göre ortalama ısı değerler	31
Tablo 3. 5	Çamur bertaraf metotları	33
Tablo 4. 1	Aritma çamuru karakteristik tablosu.....	45
Tablo 5. 1	30 mbar vakum ortamında kurumaya bırakılan çamurların başlangıç kütleleri	60
Tablo 5. 2	1000 mbar basınç ortamında kurumaya bırakılan çamurların başlangıç kütleleri	61
Tablo 5. 3	30 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri	63
Tablo 5. 4	30 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri	64
Tablo 5. 5	30 mbar vakum değerinde, 50 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri	65
Tablo 5. 6	1000 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri	66
Tablo 5. 7	1000 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri	67
Tablo 5. 8	Kuruma kinetiği hesabı sonucunda hesaplanan kuruma sabiti değerlerinin özet tablosu	67
Tablo 5. 9	30 mbar vakum altında, 200 °C'de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri	71
Tablo 5. 10	30 mbar vakum altında, 100 °C'de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri	71
Tablo 5. 11	30 mbar vakum altında, 50 °C'de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri	72
Tablo 5. 12	1000 mbar vakum altında, 200 °C'de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri	73

Tablo 5. 13 1000 mbar basınç altında, 100 °C’de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri	74
Tablo 5. 14 Deney düzeneğinin ayarlanan ve gerçekleşen basınç değerleri	85



Endüstriyel Arıtma Çamurlarının Vakum Kurutma Prosesi İle Kurutma Karakteristiklerinin Araştırılması

Bahar AKYÜZ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Arslan SARAL

Arıtma çamuru bertarafı, dünya genelinde büyüyen bir çevresel problem durumundadır. Arıtma çamuru bertarafının önemli bir aşaması da, ilk adım olarak, su muhtevasının azaltılmasıdır. Her çamur kurutma prosesi, çamur kompozisyonu ve çamurdaki suyun dağılımı nedeniyle farklılık göstermektedir. Çamura uygulanacak bertaraf yöntemine göre farklı nem muhtevasına sahip çamurların kurutma işlemleri için hem doğal hem de mekanik susuzlaştırma ve kurutma yöntemleri geliştirilmiştir.

Literatürde çamur kurutma ile ilgili olarak birçok farklı proses mevcuttur fakat vakum kurutma yöntemiyle arıtma çamurlarının kurutulması konusu ile ilgili pek fazla çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışma ile endüstriyel atık çamurların, vakum kurutma yöntemi ile kurutma karakteristikleri incelenmiştir. 10 mbar, 30 mbar vakum değerlerinde ve 1000 mbar yaklaşık atmosfer basıncı değerinde; 50 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklıklarda; 5 cm, 9 cm ve 11 cm çaplı yüzey alanlarında; gevşek yığın ve sıkıştırılmış yığın şeklindeki iki farklı çamur yığın şekli için kurutma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kurumanın kinetiği çalışılmış ve çamurun süreye bağlı nasıl kuruma eğilimde olduğu belirlenmiştir. Son olarak, ham ve kuruyan çamurların organik madde muhtevası analiz edilmiş ve vakum kurutma prosesinde suyla beraber buharlaşan organik madde miktarları da belirlenmiştir.

Farklı sıcaklık ve vakum değerlerinde çalışıldığında, sıcaklık yükseldikçe (50 °C'den 200 °C'ye) kurumada baskın parametre olduğu; buna mukabil sıcaklık azaldıkça düşük basınç (vakum) değerlerinin (10 mbar) kuruma prosesinde baskın etki gösterdiği görülmüştür. Çamurun gevşek yığın şeklinin, sıkıştırılmış yığın şeklinden daha hızlı kuruduğu tespit edilmiştir. Vakum kurutma ile suyla beraber buharlaşan

organik madde miktarının ise, sıcaklık arttıkça artış gösterdiği görülmüştür. Düşük sıcaklık değerlerinde ise vakum düştükçe buharlaşan organik madde miktarı artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Vakum kurutma, çamur kurutma, endüstriyel çamur, kurutma yöntemleri, susuzlaştırma



Investigation of Drying Characteristics of Industrial Treatment Sludge With Vacuum Drying Process

Bahar AKYÜZ

Department of Environmental Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Arslan SARAL

Handling of wastewater treatment sludge has been an important issue in terms of environmental concerns. It is most important to reduce the water content of the sludge in the very first step in handling and disposal. Sludge composition and the state of water in sludge show variations before and after drying in each drying process. There are both natural and mechanical dewatering and drying options for drying sludges with different water contents according to which the disposal method is to be applied.

There are numerous studies in the literature about sludge drying but very few about vacuum drying. In this study, drying characteristics of industrial waste sludge by vacuum drying method was examined and the effects of pressure, temperature and sludge mass surface area parameters on drying efficiency were investigated.

Drying characteristics were investigated at 10 mbar, 30 mbar vacuum and 1000 mbar approximate atmospheric pressures; at temperatures of 50 °C, 100 °C and 200 °C; on the sludge masses of 5 cm, 9 cm and 11 cm diameter surfaces in the forms of both loose and compacted masses. The drying kinetics has also been studied. Finally, organic matter contents of both initial and dried sludges were analyzed.

As drying temperature increased (from 50 °C to 200 °C), it became dominant against the effect of vacuum degree no matter how the vacuum pressure is low (down to 10 mbar). On the contrary, vacuum effect became dominant on drying as the temperature decreased. Loose mass form of the sludge dried faster than compacted mass form. Organic matter evaporation was increased as drying temperature increased in the vacuum drying process. Moreover, organic matter evaporation was also increased at low temperatures under higher vacuum (lower pressure) effect.

Keywords: Vacuum drying, sludge drying, industrial sludge, drying methods, dewatering



Bilindiği üzere atık çamur, dünya genelinde her geçen gün artmakta olan bir çevresel problem haline gelmiştir. Bu atık çamurların bertaraf edilmeden önce, ilk adım olarak su muhtevasının azaltılması oldukça önem taşımaktadır. Susuzlaştırma işlemi, mevcut çamurun su içeriğini %5 kuru katının altına indirgeyerek atık kütesinin ve hacminin düşmesine ve bu şekilde depolama ve taşıma maliyetlerinin azalmasına yardımcı olmaktadır (Leonard vd, 2008; Bennamoun, 2012). Öte yandan kurutma prosesi ile çamur, hijyenik hale gelmektedir (patojen mikroorganizmalardan arındırılarak) ve bu şekilde de çamurun yapısı iyileşmekte ve pazar değeri artmaktadır (Flaga, 2007)

Her çamur kurutma prosesi, çamur kompozisyonu ve çamurdaki suyun dağılımı nedeniyle farklılıklar göstermektedir. Çamura uygulanacak bertaraf yöntemine göre farklı nem muhtevasına sahip çamurların kurutma işlemleri için hem doğal hem de mekanik susuzlaştırma ve kurutma yöntemleri geliştirilmiştir. Çamur içerisinde bulunan suyun buharlaştırma ile uzaklaştırıldığı doğal kurutma prosesleri, mekanik kurutma proseslerine göre daha az karmaşık, işletilmesi kolay ve enerji ihtiyacı daha düşüktür. Mekanik kurutma proseslerinin ise, yüksek ilk yatırım, işletme ve enerji maliyetleri getirdiği belirlenmiştir (Bux, 2002).

Endüstriyel atıksu arıtma tesisi çamurlarının yönetimi çevresel ve teknik uygulamalar açısından ülkemizde ele alınması gerekmekte olan en öncelikli konulardandır. Endüstriyel atık çamurların, hacim olarak çok fazla yer kaplaması ve su içeriğinin fazla olması nedeniyle nakliyesi, bertarafı, ve tesis içinde depolanacak yer bulunamaması açısından problem yaratmaktadır (Cebeci, 2012). Bu nedenle endüstriyel çamurların kurutulması oldukça önem taşımaktadır.

Endüstriyel arıtma çamurlarının vakum kurutma sistemi ile kurtulması literatürde henüz yaygın çalışma alanı bulmuş bir yöntem değildir. Vakum kurutma ile yapılan çalışmalar genelde gıda kurutulması ve ilaç sanayii gibi kısıtlı sektörlerde kullanılmaktadır. Vakum kurutma, nemli gıdaların negatif basınç altında dehidrasyonu için kullanılan etkili bir kurutma yöntemidir. Vakum kurutma geleneksel atmosferik kurutma yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek kurutma hızı, daha düşük kurutma sıcaklığı ve oksijensiz proses ortamı sağlamaktadır ve bu özellikler sayesinde kurutulan gıdaların kalitesinde ve besin değerinde daha az kayıp olmaktadır (Arevalo-Pinedo ve Murr, 2006; Arevalo-Pinedo ve Murr, 2007; Cui vd, 2004). Vakum kurutmanın atık çamurdaki suyun uzaklaştırılmasında kullanılacak olması bu çalışmanın en önemli özgün değerini oluşturmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Zhang vd. (2019)'da yaptıkları çalışmalarında vakum altında çok miktarda çamur kurutma uygulamasının mümkün olup olmayacağını araştırmak amacıyla çamur için vakumlu kurutma ekipmanı geliştirmişlerdir. Çalışmada üç farklı sıcaklık aralığında (A (85 °C -87 °C), B (82 °C -84 °C) ve C (76 °C -78 °C)) 30 kg tortunun kuruması incelenmiştir. Tüm deneyler, 6-8 kPa'a eşit mutlak basınçta 0,093-0,095 MPa'da vakum altında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde geliştirilen kurutma ekipmanı ile uygulanan çamur kurutma işleminin yavaşlama aşamasında gerçekleştiği görülmüştür. Cihazın ısı transfer veriminin yaklaşık %30 olduğu belirtilmiştir. B ve C aşamaları boyunca ortalama birim enerji tüketiminin, sıcak hava kurumasına benzer olduğu, ancak ilk kurutma aşamaları sırasında sıcak hava kurumasına göre daha üstün olduğu belirtilmiştir.

He vd. (2019), ahşapın kurutma özelliklerini değerlendirmek amacıyla 80 °C sıcaklık değerinde 0,02 MPa basınç altında ahşap malzemesinin kurutulmasını gerçekleştirmişlerdir. Kurutma işlemi sırasında çeşitli zaman aralıklarında ahşabın sıcaklığını ve iç nem içeriğini belirlemek için bir ısı ve kütle bağlantı transfer modeli oluşturmuş ve doğrulamışlardır. Bu çalışmada önerilen bu model ile, vakumlu kurutma sırasında ahşabın nem içeriği etkin bir şekilde öngörülmüştür.

Litvin vd. (1998) dondurarak kurutma, mikrodalga ile kurutma ve vakum kurutma sistemlerini bir çalışma altında birleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada havuçlara önce mikrodalga uygulaması yapılmış, ardından dondurarak ve vakum ile kurutma uygulanmıştır. Bu şekilde renk, kalite, kuruma süreleri, su alma kapasiteleri belirlenmiştir. Çalışmada havuçların 30 °C' de 2 saat dondurularak kurutulmasının ardından 1,5 saat 55 °C' de arıtma yapılmış ürünün nemi % 40-39 değerine ulaşınca 50 saniye mikrodalga uygulaması yapılmış ve en son işlem olarak % 5 nem oranına kadar kurutma sağlanmıştır.

Artnaseaw vd. (2010), tasarlamış oldukları vakumlu ısı pompalı kururucuda kırmızıbiber kurutması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, sıcaklık ve basınç değişkenlerinin kullanmış oldukları ürünün kuruma süresi, biberin kalitesi ve renk değişimine etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, kuruma sıcaklığının artırıp akabinde basınç azaltıldığında yani ürüne vakum uygulandığında ürünün yüzey yapısının daha düzgün olduğu ve kuruma süresinin ise azaldığı belirlenmiştir.

Soysal (2000), yapmış olduğu çalışmada kantaron, tıbbi nane ve Isparta gülü gibi bitkilerin kurutulması amacıyla iki tane raflı kurutucu tasarlamıştır. Çalışmasının sonucunda ısı pompalı kurutucu ile bu bitkiler için uygun kurutmanın sağlandığını tespit etmiştir.

Çiçek (2011), yaptığı çalışmada vakum tüplü güneş enerjili kurutucu ile nane, defne, maydonoz gibi bitkilerin kurutulmasını gerçekleştirmiştir. Çalışmanın sonucunda vakum tüplü güneş enerjili kurutucuda doğal kurutmaya kıyasla ürün kalitesinde ve enerji verimliliğinde artma olduğu belirtilmiştir.

Alibaş (2007), yaptığı çalışmada mikrodalga, sıcak hava ve vakum ile ısırganotu yapraklarının kurutulmasını incelemiştir. Bu kurutma sistemleri ile renk parametreleri ve enerji tüketimlerini karşılaştırmıştır. Mikrodalga ile kurutmada 500, 650, 750 ve 850 W güç kullanılmış, hava sıcaklığı 50, 75, 100 ve 125 °C olarak ayarlanmış ve vakum basıncı ise 20 ve 50 mm Hg alınmıştır. Çalışmanın sonucunda optimum metodun, 850W güç ile çalıştırılan mikrodalga kurutma sisteminin olduğu belirlenmiştir.

Aktaş vd. (2009), çalışmalarında ısı pompalı kurutucu ve güneş enerjili kurutma fırını tasarlamış ve bu sistemlerde elma kurutma deneyleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Isı pompalı kurutucuda 3,5 saat boyunca 4 mm kalınlığında kesilmiş olan elma dilimlerinin kurutulma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Erdem (2012), yaptığı çalışmada defne meyvesinden yağ eldesi için çeşitli kurutma yöntemlerini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda vakum kurutma sistemi ile 0,1 atm de kurutma süresinin 720 dakika olduğu görülürken, sıcak hava ile 80 °C'de 960 dakikada kurutma gerçekleştiği görülmüştür. Bu şekilde kurutma işlemi için gerekli olan sıcak havayı vakum altında uygulamasını gerçekleştirmenin yağ kalitesine ve süreye olumlu katkı sağladığını belirlemişlerdir.

Drouzas vd. (1999), yapmış oldukları çalışmada mikrodalga-vakum kurutma ile meyve jelinin kurutulmasını incelemişlerdir. Mikrodalga-vakum kombine sistemlerinin kullanılması ile meyve kalitesinde ve kurutma hızında artış gözlemlenmiştir. Bu sistem 30–50 mbar'lık vakumla ve 640–710 W güç ile çalıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan petlin jelinin başlangıçta %38,4 olan nem miktarı mikrodalga kurutma sistemi ile 4 dakikalık bir sürede %3'e inerken, sıcak hava ile kurutma sisteminde 8 saatlik bir sürede %10 nem miktarına ulaştığı görülmüştür.

Erbay (2008), yapmış olduğu çalışmada tepsili ve ısı pompalı kurutucu kullanıp, zeytin yaprağının kuruma özelliklerini belirlemiştir. Çalışmada son ürünün nem içeriğinin maksimum % 6 olması koşuluyla ekserji verimi maksimum, fenolik madde ve antioksidan kaybı minimum olan şartlar belirlenmiştir. Yapılan araştırmada ısı pompalı kurutucuda 53,43 °C, 0,64 m/s 288,32 dakika, tepsili kurutucuda ise 51,15 °C, 1,01 m/s, 298,92 dakika optimum koşullar olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak tepsili kurutucu sisteminin ekserietik veriminin ısı pompalı sisteme göre düşük olduğu görülmüştür.

Cui vd. (2004), yapmış oldukları çalışmada ince tabaka havuç dilimlerinin mikrodalga destekli vakum kurutma sisteminde kinetiklerini araştırmak amacıyla bir

model oluşturmuşlardır. Bu modele göre, teoriksel ve deneysel kuruma eğrilerinin uyuruştuğu grlmştr.

Cui vd. (2003), çalışmalarında mikrodalga-vakum kombinasyonu ve sıcak hava ile sarımsak kurutulmasını incelemişlerdir. rn, mikrodalga destekli vakum kurutma sistemi ile sıvı baza göre % 10 nem içeriğine kadar sonrasında sıcak hava kurutma sisemi ile 45 C’de sıvı baza göre % 5 nem içeriğinden daha az olana kadar kurutma gerçekleştirilmiştir. Ürünün yapısı, rengi, rehidrasyon oranı gibi özellikleri bu sistem ile kurutulmuş olan sarımsak dilimleri için değerlendirilip dondurarak kurutma sistemi ile karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunca bu sistemle kurutulan sarımsak dilimlerinin kalitesinin dondurarak kurutma sistemi ile kurutulanlardan daha iyi olduğunu tespit edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Endüstriyel prosesler sonucu oluşan çamur, en önemli çevresel problemlerden biridir. Bir endüstride çamur oluşmuşsa onun bir ücret karşılığında bertaraf edilmesi şarttır, özellikle de çamur tehlikeli atık grubuna dahilse bertaraf maliyeti çok daha fazla olmaktadır. Bertaraf sürecinden önce çamurun kurutulması ile, çamurun hacminde ve ağırlığında azalma olacağından bertaraf maliyetlerinde de bir düşüş yaşanacaktır. Ayrıca bertaraf aşamasında depolama işlemi yapıldığı için, çamurun hacminin azalması ile depo sahalarının da kısa sürede dolması engellenmiş olacaktır.

Çamur kurutma işlemlerinde birçok yöntem kullanılmasına rağmen literatürde yapılan çalışmalara bakılırsa vakum ile çamur kurutma yöntemi olarak yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu nedenle bu çalışmada endüstriyel atık çamurların vakum ile kurutulması ve bu kuruma sürecinde optimum şartların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmanın, vakum kurutma yöntemi ile çamur kurutulmasının literatürde az rastlanır olması nedeniylebu konudaki bilimsel çalışmalara katkı sağlaması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu projeden elde edilecek olumlu çıktılar neticesinde, ülkemizde her geçen gün artan çamur miktarlarının hacimlerinin azaltılarak daha düşük seviyelere çekilmesi, atık çamurların kontrol ve bertaraf maliyetlerini daha kabul edilebilir değerlere getirecektir.

Bu tez kapsamında ayrıca kinetik çalışmaları da yapılmış olup, bu sayede çamur kurutma mekanizmasının dört farklı tür kinetiğe (0. derece, 1. derece, 2. Derece ve 3. Derece kuruma kinetiği) uygunluğu tespit edilmiş, tartışılmış ve değerlendirilmiştir.

Projede kullanılacak çamurların sadece endüstriyel çamurlar olması çalışma sonuçlarının sadece bu alanda uygulanabileceği anlamını taşımayacaktır. Özellikle evsel atıksu arıtma tesislerinden de çıkacak çamurlara uygulanabilir seviyede olacağı düşünülmektedir. Bu da çalışmanın daha yaygın alanlarda kullanılabilecek türden olma olasılığını ortaya koymaktadır.

2 KURUTMA

Kurutma, su içermekte olan ürünlerin farklı teknikler ile içerdikleri suyun dış ortama atılması işlemi olarak tanımlanmaktadır (Güngör ve Özbalta, 2000).

Materyal içerisinden su alınması işlemi yani kurutma, bütünüyle basınç ve sıcaklık değerleri ile ilişkilidir. Enerji sarf edilerek yapılmakta olan kurutma prosesleri vakum altında veya atmosfer basıncı ile yapılmaktadır. Kurutma prosesi sırasında minimum enerji sarfiyatı ile zamandan tasarruf ederek materyalin kaliteli bir şekilde kurutulması dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur (Ayaz, 2015).

Kurutma prosesinde sarf edilmekte olan enerji, endüstride sarf edilen enerjinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu kısım oran olarak ifade edilirse; tekstil endüstrisinde % 5, kimya endüstrisinde % 6, kereste kurutmada % 11, seramik ve inşaat malzemelerinin üretimi proseslerinde % 11, gıda ve tarım ürünlerinin kurutulması proseslerinde % 12 ve kağıt endüstrisinde ise % 33'lük kısmını oluşturmaktadır (Güngör, 2010).

2.1 Suyun Üç Hali

Bilindiği gibi su; katı, sıvı ve buhar olmak üzere üç farklı halde bulunabilmektedir. Suyun o andaki hali, sıcaklık ve basınç parametrelerine bağlı olarak değişmektedir.

Herhangi bir maddenin katı, sıvı veya gaz halini ya da bir karışımın fiziksel görünümünün değişimini basınç, sıcaklık veya karışımın içeriğinin bir fonksiyonu olarak ifade eden grafiklere faz diyagramı adı verilmektedir (Tırnaksız, 2009).

Fazlar arasında oluşmakta olan denge durumu incelenirken, J.W. Gibbs'in faz eşitliği kullanılmaktadır (Eşitlik 2.1):

$$F = C - P + 2 \quad (2.1)$$

Bu denklemde C parametresi, sistemdeki bileşen çeşidini veya sayısını, P parametresi sistemdeki faz sayısını, F değeri ise serbestlik derecesini ifade etmektedir. F değeri, sistemin tamamıyla tanımlanabilmesi amacıyla ya da mevcut olan durumunu koruyabilmesi amacıyla bilinmesi gerekli olan en az değişken sayısını ifade etmektedir. Basınç, sıcaklık ya da sistemi oluşturan bileşenlerin oranları gibi değişkenler bu duruma örnektir.

Tablo 2.1’de tek bileşen içermekte olan bir sisteme faz kuralı uygulanması ile hesaplanmış serbestlik dereceleri (F) verilmektedir. Örneğin saf bir gaz göz önüne alındığında C değeri, sistemde tek çeşit bileşen olduğundan 1’dir. Bu sistem tek fazdan oluştuğu için, F değeri ise 2 olarak hesaplanmaktadır. Yani bu durum, bir gaz sistemi tanımlanması durumunda en az iki adet değişkenin bilinmesi gerektiğini göstermektedir. Bu değişkenler ise basınç ve sıcaklıktır (Tırnaksız, 2009).

Tablo 2. 1 Tek bileşen içermekte olan bir sisteme faz kuralı uygulanması ile hesaplanmış serbestlik dereceleri (F) (Tırnaksız, 2009)

Sistem	Faz sayısı	Serbestlik derecesi (F)	Yorumlama
Katı Sıvı Gaz	1	$F=C-P+2$ $F=1-1+2=2$	Sistemin tek fazlılığını korumak için basınç ve sıcaklık gibi en az iki değişken sabit tutulmalıdır.
Sıvı ve katı Sıvı ve gaz Katı ve gaz	2	$F=C-P+2$ $F=1-2+2=1$	Sistemin iki fazlılığını korumak için en basınç veya sıcaklık gibi en az bir değişken sabit tutulmalıdır.

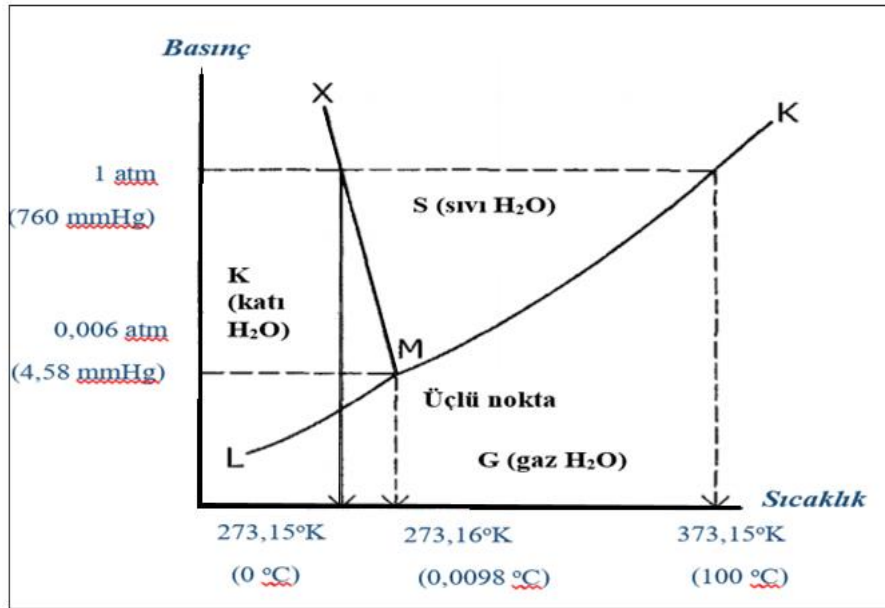
Tablo 2. 1 Tek bileşen içermekte olan bir sisteme faz kuralı uygulanması ile hesaplanmış serbestlik dereceleri (F) (Devamı)

Katı, sıvı ve gaz birlikte	3	$F=C-P+2$ $F=1-3+2=0$	Sistemde üç fazı aynı anda bulundurmak için, koşullar kesinlikle sabit olmalı, değişmemelidir. Koşullardan herhangi birisinin değişmesi durumunda sistem tek faza veya iki fazla döner.
----------------------------	---	--------------------------	---

Şekil 2.1’de suyun faz diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda K,S ve G bölgeleri suyun bir tek fazdan oluşmuş olduğu katı, sıvı ve gaz bölgelerini ifade etmektedir. Bu bölgelerin F değeri 2’dir. Yani suyun fiziksel halini belirleyebilmek için her iki değişkenin (sıcaklık ve basınç) de bilinmesi gerekmektedir.

Su, fazlar arasında kalan eğriler üzerinde daima iki fazı birlikte bulundurmaktadır ve bu fazlar arasında denge mevcuttur. MK eğrisi, buharlaşma eğrisidir yani suyu hem sıvı hem de buhar halinde bulundurur; XM eğrisi erime eğrisidir yani suyun buz ile sıvı halinin bir arada bulunduğu eğridir; ML eğrisi ise süblimasyon eğrisi olarak adlandırılmaktadır yani suyu hem buz hem de buhar halinde bulundurur (Tırnaksız, 2009).

Suyun üç fazının da birlikte denge halinde olduğu koşul (0,006 atm, 0,0098 °C), suyun üçlü noktası (M noktası) olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik 2.1 kullanılarak M noktasının F değerinin sıfır olduğu belirlenebilmektedir. Yani bu durum, sistemde üç fazın da dengede kalabilmesi için değişkenlerin sabit kalması, değiştirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Normal koşullarda suyun 0 °C’de donar fakat atmosfer basıncı 1 atm’den 0,006 atm’ye düşerse suyun donma sıcaklığı 0,0098 °C olmaktadır. M noktasının altındaki basınç değerlerinde buz halde olan su, sıcaklık artırılması ile sıvı hale geçmeden direk buhar haline geçer (süblimasyon) (Tırnaksız, 2009).



Şekil 2.1 Suyun faz diyagramı (Tırnaksız, 2009)

2.2 Buharlaşma İçin Gereken Isı

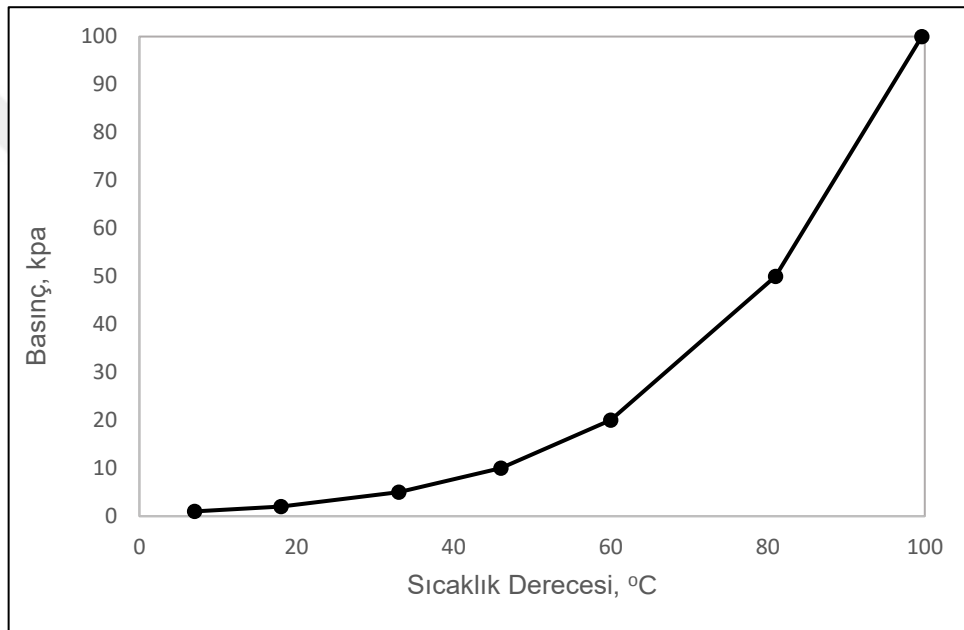
Belirli bir sıcaklıkta suyun buharlaşmasının sağlanması, sıcaklık ve enerji derecelerine bağlıdır. 1 kg suyu sıvı halden buharlaştırmak için verilmesi gereken enerji miktarı “gizli buharlaşma ısı” olarak adlandırılmaktadır. Aynı şekilde katı halden buharlaştırmak için verilmesi gereken enerji miktarına da “gizli süblimasyon ısı” denilmektedir (Gürses, 1986). Şekil 2.2’de su için buhar basıncı sıcaklık derecesi eğrisi verilmiştir.

Tablo 2.2 Suyun gizli ısı ve saturasyon dereceleri (Gürses, 1986)

Absolü Basınç (kpa)	Buharlaşma gizli ısı (U/kg)	Saturasyon sıcaklık derecesi (°C)
1	2485	7
2	2460	18
5	2424	33
10	2393	46
20	2358	60

Tablo 2.2 Suyun gizli ısı ve saturasyon dereceleri (Devamı)

50	2305	81
100	2258	99,6
101,35 (1 atm)	2257	100
110	2244	102
120	2238	105
200	2202	120



Şekil 2. 2 Su için buhar basıncı sıcaklık derecesi eğrisi (Gürses, 1986)

2.3 Kurutmada Isı İletimi

Kurutma hızı, gizli ısıları sağlamak adına ısı enerjisinin suya ya da buza iletirme hızına bağlı olarak değişmektedir. Isı iletiminde kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon olmak üzere üç mekanizma vardır. Bu mekanizmaların hangisinin daha etkili olduğu kurutma işleminin cinsine veya yapılan çeşitli işlemlere göre farklılık göstermektedir. Genellikle bu mekanizmalardan bir tanesi daha etkindir ve tüm işlemi bu etkin olan mekanizma belirlemektedir (Gürses, 1986).

Çok miktarda ısıнын radyasyonla iletilmesi ile, gıdanın yüzeyindeki sıcaklık derecesinin havanın sıcaklık derecesinden yüksek olabileceği akılda tutulmalıdır. Kombine radyasyon ve buharlaşmadan dolayı soğumanın etkisi oldukça karmaşık olmasına rağmen yüzey sıcaklık derecesi radyant ısı iletimi için geliştirilmiş bağıntılar kullanılarak hesaplanabilmektedir. Standart bazı eşitlikler kullanılarak konveksiyon katsayıları da hesaplanabilmektedir. Dondurarak kurutma işleminde, süblimasyonun olduğu yüzeye enerji iletilmelidir. Fakat bu iletilen enerji hızı çok dikkatli sağlanmalıdır ki kuruyan yüzeyin sıcaklık derecesi donma noktasının üzerine çıkmasın. Dondurarak kurutma yönteminde genellikle ısı iletimi kondüksiyon yoluyla olmaktadır (Gürses, 1986).

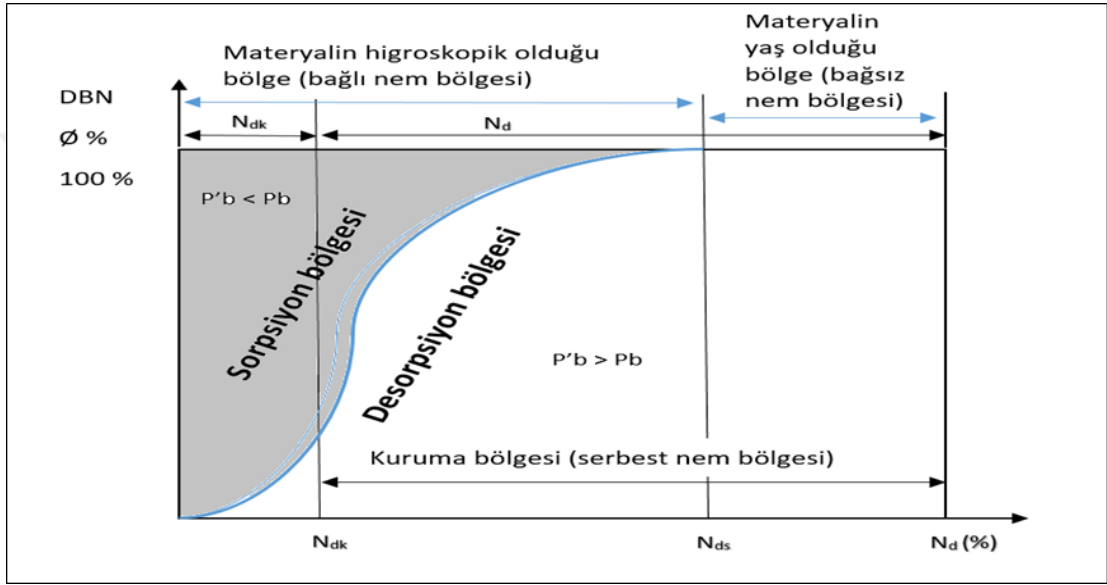
2.4 Kurutmanın Statiği

Kurutmanın statiği incelenirken, ürün ile hava arasındaki nem dengesi, zaman parametresine bakılmaksızın incelenir. Denge, desorpsiyon ve sorpsiyon işlemleri sonucunda oluşmaktadır. Ürünün dış ortama nem vermesi desorpsiyon, dış ortamdan nem alması ise sorpsiyon olarak adlandırılmaktadır. Denge anında havadaki su buharının kısmi basıncı (P_b) ve materyalin yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı (P_u) birbirine eşit olmaktadır. Çevre havası sıcaklığı ile yaş termometre havası sıcaklığı aynı olduğundan, kuruyan ürünün yüzey sıcaklığı ürünün yüzeyinde bulunmakta olan suyun buhar basıncı ile çevre havasının yaş termometre sıcaklığındaki su buharının kısmi basıncı ($P'b$) eşit alınabilir. Yani bu durumda, denge anında ürünün ulaştığı nem (N_d), havanın bağıl nemine ($\emptyset$) bağlıdır (Yağcıoğlu, 1999; Mengeş, 2005; İzli, 2012).

Sorpsiyon izotermi, materyalin içinde bulunduğu ortamın havasının nem miktarını sabit sıcaklıkta değiştirilmesi ile ürünün içerdiği nem miktarındaki değişimi gösteren eğriler olarak adlandırılmaktadır (Dadalı, 2007). Şekil 2.3'te herhangi bir ürün için sorpsiyon izoterm eğrisi kurutma açısından incelenmiştir. Görüldüğü üzere sorpsiyon bölgesinde (denge bağıl nemi (DBN) eksenini ile arasındaki bölge) her noktada materyalin yüzeyindeki suyun buhar basıncı, havadaki suyun buhar basıncından küçük olduğundan ($P'b < P_b$) materyal bünyesinde nem almaktadır. Aynı şekilde Denge nemi (N_d) eksenini ile arasında kalan bölge için yani desorpsiyon

bölgesi ($P'b > P_b$) için yorum yapılırsa bu bölgede de tam tersine ürünün çevreye nem verdiği görülmektedir (Kara, 2008; Yağcıoğlu, 1999).

Sorpsiyon izotermi eğrisinde, kuruma bölgesi materyalin ulaşabileceği en küçük denge nemi N_{dk} değerinden geçen bir eksenden başlatılarak gösterilmektedir. Kurumakta olan ürünün gerçekleştirmiş olduğu nem alışverişi sırasında ulaşabileceği maksimum neme o ürünün “Higroskopik Limiti” denilmektedir. Yani higroskopik limit, bağıl nemin %100 olduğu durumda bir ürünün ulaşabileceği maksimum nem değeridir (Yağcıoğlu, 1999).



Şekil 2. 3 Sorpsiyon izoterm eğrisinin kurutma açısından incelenmesi (Yağcıoğlu, 1999)

2.5 Kurutmanın Kinetiği

Bir materyalin kuruma kinetiği incelenirken, materyal ile çevresi arasındaki nem alışverişinde kuruma süresince geçen zaman dikkate alınmaktadır. Bir ürünün kuruması kinetik olarak incelenirken,

- Ürünün nem miktarındaki azalma (buharlaşıma ile meydana gelen kütleli kayıp) ve kuruma süresi,
- Kuruma hızı ile ürünün nem miktarındaki azalma
- Kuruma hızı ile kuruma süresi

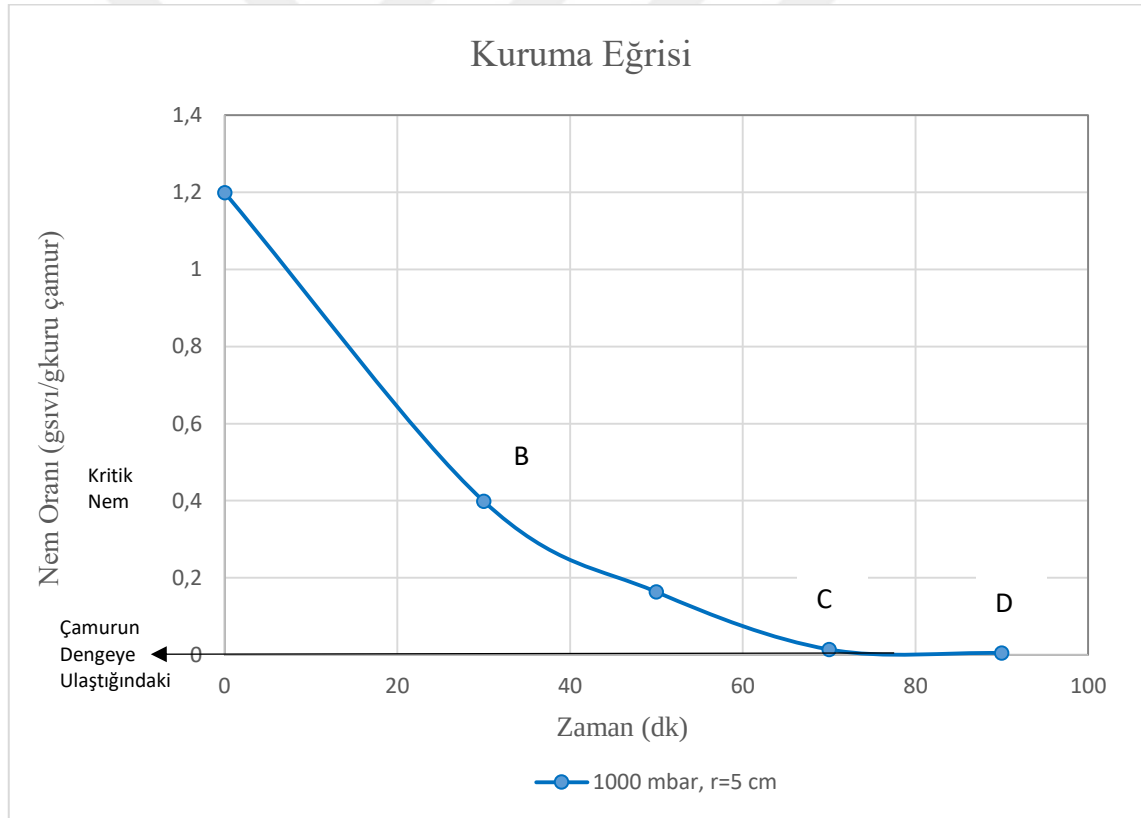
- Ürün sıcaklığı ile nem miktarındaki azalma gibi faktörler arasındaki ilişkiler dikkate alınmaktadır (Yağcıoğlu, 1999).

Normal şartlarda kurumanın kinetiği incelenirken kuruma, üç farklı evrede değerlendirilir (Yağcıoğlu, 1999).

- Isınma evresi,
- Sabit Hızla Kuruma evresi,
- Azalan Hızla Kuruma evresi

Kuruma Eğrisi, maddenin sıvı kütle miktarının kuru katıkütle miktarına oranı olan nem oranının zamanla değişimini veren diyagramdır (Deniz, 2010).

Şekil 2.4'te, $r=5$ cm çaplı endüstriyel çamurun atmosferik basınçta 200°C 'de kuruma eğrisi verilmiştir.



Şekil 2. 4 Kurumanın kinetik eğrisi, $r=5\text{cm}$ gevşek çamur kütlesi için

Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, çamurun kuruması eğrisinde ısınma evresi görülmemiştir. A-B zaman aralığında (sabit hızla kuruma evresi), yüzeydeki nem

sabit bir hızla buharlaşmaktadır. Çamurun yüzey nemi buharlaştığında artık buharlaşma hızı düşmeye başlar (B-C, Azalan hızla kuruma evresi). Bu durum, çamurun gövdesinden yüzeyine su taşınması sırasında mesafenin uzamasından veya çamur yüzeyinin su taşınımı esnasında sertleşmesinden kaynaklanır. Kuruma eğrisinin C-D kısmında ise, nem miktarının sabitlendiği görülmüştür.

2.6 Kurutma Yöntemleri

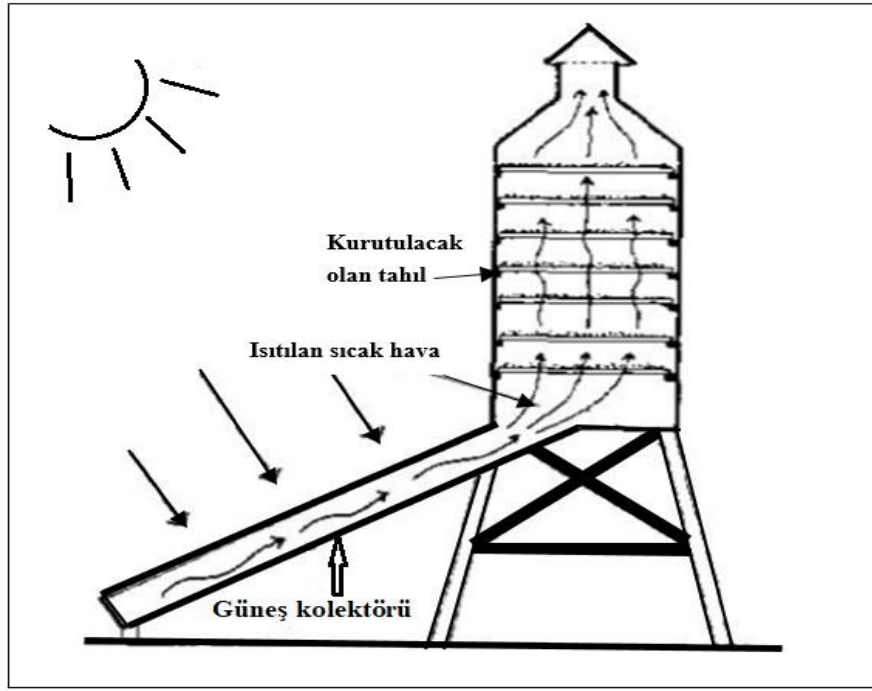
2.6.1 Güneşte Kurutma

Doğal bir kurutma yöntemidir. Meyve ve sebzelerin güneş enerjisi ile tabii bir şekilde kurutulması sağlanır. Fakat meyve ve sebzelerin açık havada güneş enerjisi ile kurutulma işlemi gerçekleştirilirken, dış ortam koşullarından (toz, yağmur, bazı böceklerin istilası) olumsuz etkilenebilmekte ve ürün kalitesi bozulabilmektedir (MEGEP, 2012).

2.6.2 Güneş Kolektörü ile Kurutma

Bu tip kurutucularda güneş enerjisi ve bazı yakıtlar ile ısı enerjisi elde edilerek kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Güneşli olan mevsimlerde güneş enerjisi kullanılarak, güneşin yeterli olmadığı mevsimlerde ise bazı yakıtlar kullanılarak ısı enerjisi elde edilmektedir. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere hava bir kolektör yardımı ile ısıtılmakta ve sonrasında bir fan ile kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Ekonomik bir kurutma sistemidir fakat kurutma hızı, diğer kurutma yöntemlerine oranla daha az gerçekleştirilmektedir (Dündar, 2010).



Şekil 2. 5 Güneş kolektörlü kurutma sistemi (Dündar, 2010)

2.6.3 Dondurarak Kurutma

Geleneksel kurutma metodları ile kurutulması oldukça zor olan soğan, çorba, kahve, bazı deniz ürünleri, bazı meyveler gibi gıda maddelerinde dondurarak kurutma işlemi kullanılmaktadır. Ayrıca bu metod ilaç sanayisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı ilaçlar, solisyon halindeyken zaman içerisinde bozulmaya uğramaktadır, bu durumu önlemek için bu ilaçların dondurulması en iyi yoldur. Bu ilaç solisyonları üretildikten hemen sonra dondurularak kurutulur ve böylece bu maddelerin biyoaktivitelerini korumaları için molekül yapıları kararlı hale getirilir (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2003).

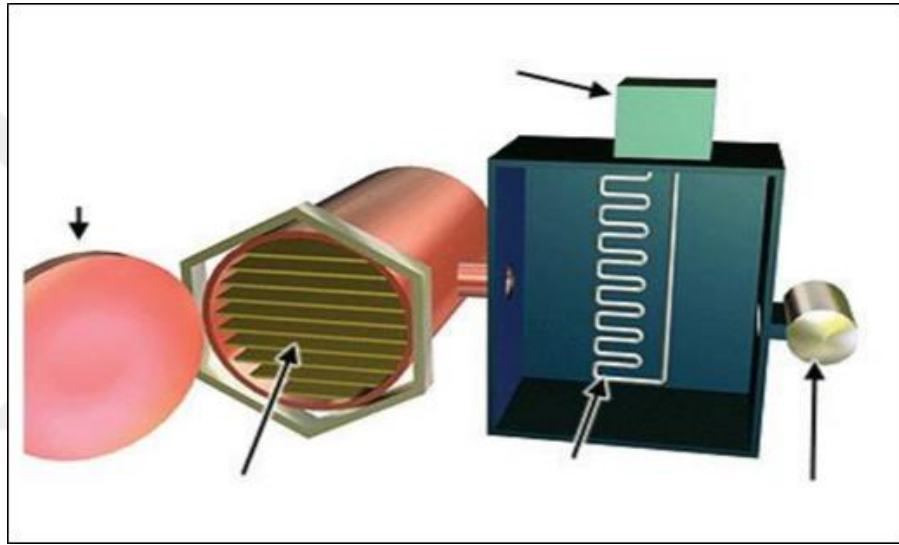
Dondurarak kurutma metodu sistematik bir şekilde aşağıdaki maddelerin kurutulması için kullanılmaktadır (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2003):

- Serum, hormon çözeltileri, kan plazması, ilaçlar (antibiyotikler), gıda maddeleri, süperiletkenler, seramikler ve arkeolojik buluntular
- Yapay deri, kemik, nakil organları
- Bakteri, virüs, maya gibi uzun süre boyunca yaşaması gerekli canlı hücreler

Dondurarak kurutma işleminde (liyofilizasyon), ürün önce dondurulmaktadır. Sonrasında bu dondurulmuş ürüne vakum altında ısı verilerek içerisindeki donmuş haldeki su süblime edilerek uzaklaştırılır.

Bu kurutma işlem, genel olarak, dondurma işlemi, süblimasyon işlemi ve desorpsiyon işlemi olmak üzere 3 ayrı kademedan oluşmaktadır (MEGEP, 2012).

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere; ürün önce dondurulmakta, sonrasında yüksek vakum odasına yerleştirilmektedir. Burada ürüne kızılötesi ısıtım ile ısı gönderilmekte ve bu şekilde ürünlerdeki su süblimleşmekte ve yoğunlaşmaktadır veya kimyasal bir kurutucu ile soğutulmaktadır.



Şekil 2. 6 Dondurarak kurutma (Dündar, 2010)

Dondurarak kurutma işlemi genelde düşük basınçta ve 40 ila -10 °C sıcaklıklar arasında uygulanmaktadır (Dündar, 2010).

Bu kurutma işlemi maliyetli ve yavaş bir işlemdir fakat ısıya karşı duyarlı ürünler için elverişli bir işlem olduğundan, diğer kurutma işlemlerine göre daha kaliteli ürün elde edildiğinden tercih edilmektedir (Dündar, 2010).

2.6.4 Mikrodalga ile Kurutma

Mikrodalga (MW) ısıtım, güç girişinin anlık ve doğru kontrolü, hedef materyal boyunca hızlı ve homojen bir ısıtma sağlama gibi özelliklere sahiptir (Karabacak vd,

2015). Hızlı ısıtmadaki benzersiz doğası ile MW teknolojisi uygulaması, hızlı arıtma seçenekleri gerektiren durumlarda çok umut verici görünmektedir.

MW teknolojisi, dalga boyu 1 mm ile 1 m arasında olan ve 300 MHz ile 300 GHz arasındaki frekansları olan iyonlaştırıcı olmayan bir elektromanyetik radyasyon olan mikrodalga enerjisini kullanır (Karabacak vd, 2015).

Mikrodalga ile kurutma proseslerinde ısı, doğrudan ürün içerisinde oluşmaktadır ve ürün içerisindeki nem kısa sürede buharlaşmaktadır. Bu iç ve dış ortamdaki buhar basıncı farkı ile nem transferi içten dışa gerçekleşmektedir (Soysal vd, 2009). Yani elektromanyetik enerji maddenin içerisinde ısıya dönüşmektedir. Bu tip kurutma proseslerinde dielektrik maddelerde oluşan iletim kayıpları ile ve su moleküllerinin uygulanan alanı takip edememesi ile ısı açığa çıkmaktadır. Maddenin üzerinde ısıya dönüşen bu enerji, madde içerisinde oluşmakta olan elektromanyetik alan kullanılarak hesaplanmaktadır. Elektromanyetik alan, maddenin de içerisinde olduğu mikrodalga cihazının içerisinde oluşmaktadır ve madde ile yüklü bu yapıya aplikatör adı verilmektedir (Çelen, 2010).

Mikrodalga ile kurutma proseslerinde kurutmanın verimliliği; maddenin dielektrik özelliklerine, kullanılmakta olan magnetron gücüne ve frekansına, aplikatör boyutlarına ve maddenin fiziksel ve termal özelliklerine göre değişmektedir (Gölcü ve Şen, 2014).

2.6.5 Vakum ile Kurutma

Vakum kurutma, nemli gıdaların negatif basınç altında dehidrasyonu için kullanılan etkili bir kurutma yöntemidir. Vakum kurutma geleneksel atmosferik kurutma yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek kurutma hızı, daha düşük kurutma sıcaklığı ve oksijensiz proses ortamı sağlamaktadır ve bu özellikler sayesinde kurutulan gıdaların kalitesinde ve besin değerinde daha az kayıp olmaktadır (Arevalo-Pinedo ve Murr, 2006; Cui vd, 2004). Basınç düştükçe gıdanın içerdiği suyun kaynama noktasının da düşmesi yüzeydeki buharlaşma hızının artmasıyla sonuçlanır ve daha düşük sıcaklıklarda kurutma sağlanır. Düşük sıcaklıklarda kurutma ile sıcaklığın verdiği zarar da azaltılmış olur.

Vakum kurutmayı, geleneksel atmosferik kurutma yöntemlerinden ayıran önemli özelliklerin başında kurutulacak numunelerin hava ile temas etmemesinden dolayı oksidasyonun önlenmesi gelmektedir (Ferenczi vd, 2014; Arevalo-Pinedo ve Murr, 2006; Wu vd, 2007). Vakum altında gerçekleşen kurutma prosesi, basıncın düşürülmesiyle kaynama noktasının düşürülmesinden dolayı daha düşük sıcaklıklarda etkili bir kurutma gerçekleştirilebildiği için ve ortamda oksijen bulunmasını engellediği için çözünebilir kahve gibi ısıya veya oksijene hassas olan gıdaların üretimi vakum altında kurutulma ile mümkündür. Aynı zamanda, vakum altında kurutulmuş gıdalarda renk, tekstür ve aroma iyi bir şekilde korunabilmektedir. Vakum altında oksijen yok denecek kadar az olduğu için yangın ve patlama tehlikesi gibi mesleki kaza riski vakum kurutma kullanımı ile azaltılır (Demiray, 2015).

Vakum kurutma yöntemi ile dehidrasyon süresi ve kurutma için gereken sıcaklık daha azdır çünkü materyalin etkin hidrolik iletkenliği düşük basınç değerlerinde arttığından kütle transferi de artmaktadır ve yüzeyde kütle transferine karşı olan direnç azalmaktadır. Bu sayede kurutma boyunca enerji verimliliği sağlanabilir ve daha az ısı kaybına neden olabilir (Arevalo-Pinedo ve Murr, 2006).

Vakum kurutma, operasyon ve kurulum masraflarından dolayı daha çok ısıya ve oksijene hassas gıdaların kurutulmasında kullanımı için önerilir (Chen ve Mujumbar, 2008).

Vakum kurutmanın bir diğer dezavantajı ise, ısı transferinin vakum altında kolay olmamasıdır (Chen ve Mujumbar, 2008). Bu da vakum kurutmanın en önemli eksikliğidir. Düşük basınç altında ürüne ısı transferi genellikle kondüksiyonla olmakta, bazen de radyasyonla olmaktadır. Konveksiyona çok ender rastlanır çünkü vakum altında yok denebilecek kadar az sıvı bulunmaktadır. Bu yüzden ısı transferi katsayıları yüksek vakum altında göz ardı edilebilir. Vakum fırının rafına kurutulacak olan gıda materyali yerleştirilir ve gerekli enerji temas ettiği raftan kondüksiyon ile sağlanırken bir üst rafından da radyasyon ile kısmen ısınmaktadır. Ürün ile temas ettiği raf arasındaki temasın iyi olup olmaması ısı transferindeki en önemli kısıtlayıcı etkidir (Chen ve Mujumbar, 2008).

Geleneksel kurutma işleminin kusurları, vakum kurutma ile azaltılabilmesine karşın, vakum kurutma numunelerin merkezindeki nemin yüzeye ulaştırılmasına imkân sağlamaz bu yüzden dehidrasyon numunenin yüzeyinde dik nem eğimiyle sonuçlanır (Demiray, 2015). Bu nedenlerden dolayı, vakum kurutma, diğer metotlarla ön işlem ya da kombinasyon olarak kullanılarak dehidrasyon verimliliği artırılır. Vakum kurutma, mikrodalga, dondurarak kurutma, ohmik ısıtma, kızgın buhar ısıtma, sıcak hava ile kurutma veya ultrason dalgalarıyla kombine olarak kullanılabilir.

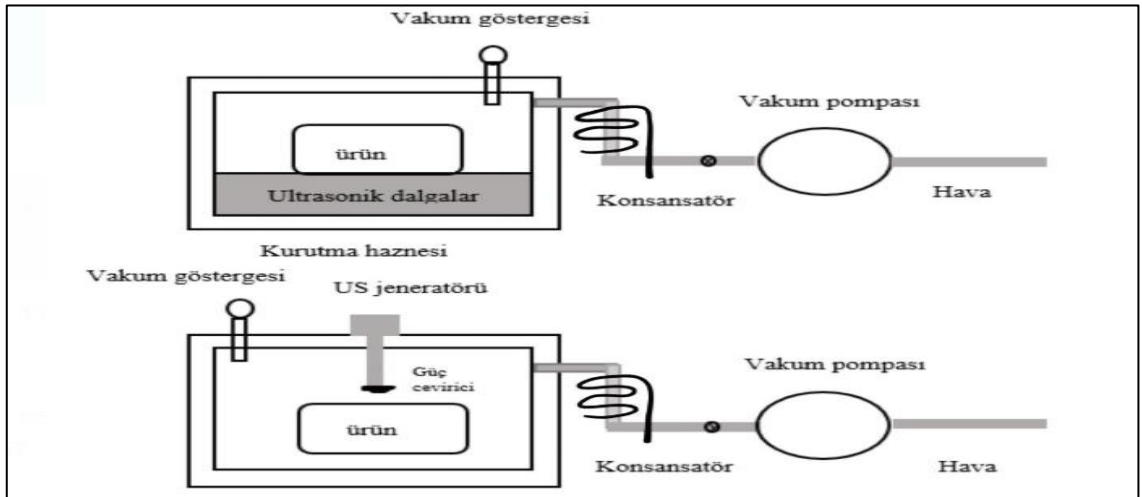
2.6.6 Ultrasound Destekli Vakum Kurutma

Ultrasound uygulamasının, gıdaların merkezindeki kütle transferini hızlandırarak ve gıda matrisinde mikro kanallar oluşturarak, vakum kurutmanın sadece yüzeydeki suyu hızlı bir şekilde uzaklaştırma özelliğinin neden olduğu eksiklerin giderilmesi ve bu özelliğin iyileştirilmesi potansiyeli bulunmaktadır. Ultrasound etkili bir ısıl olmayan uygulama olarak, sünger yapısına benzeyen mikro kanallar oluşturarak sürekli sıkışma ve gevşeme hareketlerine neden olduğu ve kavitasyon oluşumu sağladığı için hem serbest hem de vakum kurutmanın tamamen uzaklaştıramadığı sıkı sıkıya bağlı suyun kolay bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar. Materyalin sıcaklığının ciddi olarak artışına gerek duyulmadan kurutma hızı artırılır (Garcia-Noguera vd, 2010; García-Pérez vd, 2006). Bunlara ek olarak, ultrasonik dalgalar, difüzyonu iyileştiren ve konveksiyonel kütle transferini arttıran mikro-kanalların oluşumu aracılığıyla gözenekli katı materyallerin mikro deformasyonuna neden olurlar (Fuente-Blanco vd, 2006; García-Pérez vd, 2006; He vd, 2013). Bu önemli özellikler, ultrasonun vakum kurutmaya katkı sağladığını ve bu yöntemlerin birlikte ya da ultrasonun ön işlem olarak kullanımının tercih edilmesi daha fazla nem uzaklaştırmak, kütle transferini arttırmak, etkin difüzyon katsayısını arttırmak ve toplam proses zamanını azaltmak amacıyla (Garcia-Noguera vd, 2010; García-Pérez vd, 2006).

Ultrason destekli vakum kurutma (USV), hem vakum dehidrasyonu hem de ultrasound uygulamasının avantajlarına sahiptir. Vakum kurutma prosesi düşük

basınç (<101,330 kPa) ve sıcaklık altında gerçekleşir. Eğer vakum kurutma esnasında evaporasyon gerçekleşiyorsa (genellikle gerçekleşir), sıcaklık 0,01 °C'den fazla ve basınç 0,612 -101,330 kPa arasında olmalıdır. Gıdada bulunan su yüzeyden buharlaşmaya başlar ve gıdanın kuru yüzeyinden doğru çıkar. Buharlaşma esnasında, gıdanın sıcaklığını suyun kaynama noktasının üzerinde tutabilmek için sisteme verilen ısı yeterli bir şekilde sağlanmalıdır çünkü ısı transferi, vakum altındaki kurutmada kısıtlayıcı faktördür. Vakum kurutma için gerekli sıcaklık ve basınç koşulları sağlandığında, su kaynamaya başlar ve bu noktada, kurutmanın hızı arttığından kurutma süresi kısalmır. Kaynama esnasında, gıdanın içerisindeki sıvıda baloncuklar oluşmaya başlar (Chen ve Mujumbar, 2008). Ultrasound destekli vakum kurutma esnasında, akustik kavitasyon sayesinde mikrokanallar oluşur böylece kütle transferi artar. Ultrases kavitasyon oluşmasını da sağlar ve böylece sıkı sıkıya bağlı olan nem bile kolaylıkla uzaklaştırılır (Bantle ve Eikevik, 2011).

USV kurutma yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.7'de gösterilmiştir. USV kurutma yöntemi kullanılan çalışmalarda ultrasonik dalgalar farklı şekillerde uygulanmıştır: Bir çalışmada gıdalara direkt temas ile uygulanırken (Başlar vd, 2014; 2015), diğer bir çalışmada materyallere doğrudan olmayan şekilde veya önişlem olarak uygulanmıştır (He vd, 2013a; 2013b).



Şekil 2. 7 Ultrason destekli vakum kurutma sisteminin şematik gösterimi: doğrudan (a) ve doğrudan olmayan (b) (Başlar vd, 2014; 2015)

2.6.7 Diğer Kurutma Yöntemleri

Sanayide en çok kullanılan yöntemlerin dışında başka kurutma yöntemleri de mevcuttur. Bu yöntemler aşağıda sıralanmaktadır:

- Kızılötesi ışınlam ile kurutma,
- Morötesi radyasyon kurutma,
- İletimle kurutma,
- Kızgın buhar ortamında kurutma,
- Ozmotik kurutma,
- Taşınım ile kurutma

2.7 Sanayide Kullanılan Kurutma Sistemleri

2.7.1 Akışkan Yataklı Kurutma

Akışkan yataklı kurutucular genel olarak, gıda maddeleri, seramikler, bazı ilaçlar, pestisitler, deterjanlar, boyalar, gübreler, yüzey aktif maddeler, çevre koruma prosesleri, atık yönetim prosesleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Çalhan vd, 2012).

Akışkan yataklı kurutucu, vakum kurutucu veya tepsili kurutucuya oranla çok daha hızlı kurutma gerçekleştirmektedir. Bu kurutma yönteminde, tanecikli yapıdaki ürünler arasından kurutma yapılacak ortama doğru gaz akımı geçirilmektedir. Akışkan yataklı kurutucular, malzemenin tüm yüzeyini büyük hacimli bir havaakımına maruz bırakırlar. Bu şekilde ısı, taşınım yoluyla malzemeye geçer. Fakat giriş hava hızı iyi ayarlanması gereklidir aksi takdirde, sabit ve eşit bir kuruma elde edilemez (Deniz, 2010). Ayrıca bu tip kurutucularda, kurutma havası ile taneciklerin arasındaki ısı transferinin etkili bir biçimde gerçekleşmesi için ürün ile gaz arasındaki temas çok iyi olmalıdır (Toroman, 2011).

Yatay ve düşey olmak üzere iki tip akışkan yataklı kurutucu bulunmaktadır. Bu kurutucularda sürekli veya süreksiz kurutma gerçekleşebilmektedir. Akışkan yataklı kurutucularda (Şekil 2.8), ısıtılmış olan hava fan yardımıyla altından tel örgü ile desteklenmiş bir kurutma odasında bulunan ıslak ürünün arasından yukarıya

doğru hareket eder. Bu kurutma şeklinde taneler hareket etmemekte ve istenilen nem değerine ulaşıldığında hava akımı kesilmekte ve kurutucudan ürün dışarı doğru alınmaktadır. Sürekli kurutmada ise ıslak olan ürün sürekli olarak kurutucuya girmekte; istenen nem oranına gelmiş kuru madde ise sürekli olarak kurutucudan dışarıya alınmaktadır. Sürekli kurutma sisteminde akışkan yataklı kurutucu hiç durdurulmaz (Deniz, 2010).

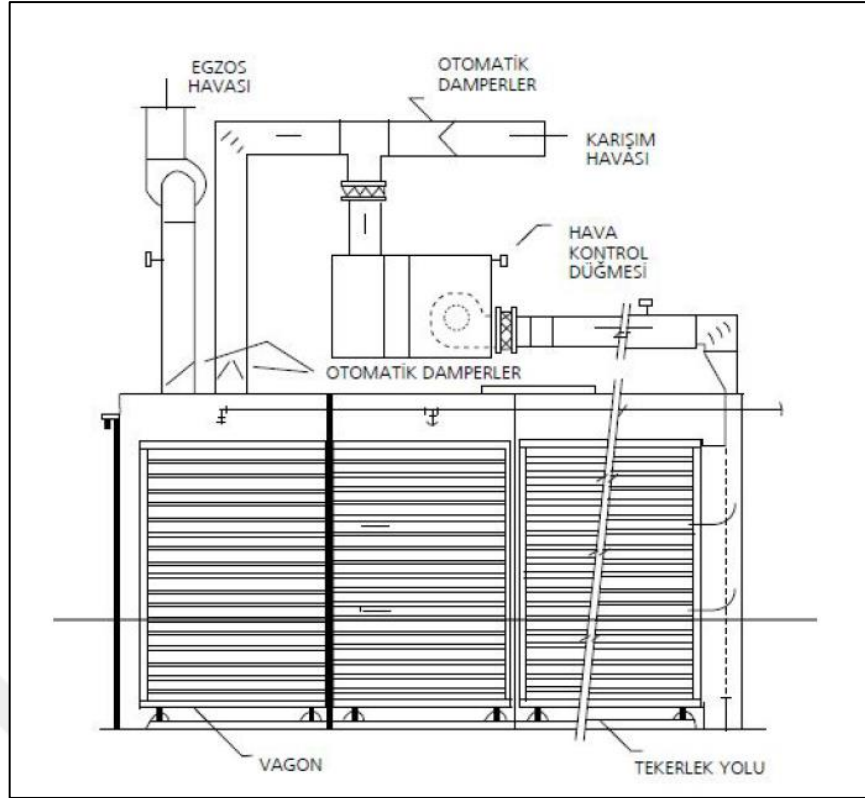


Şekil 2. 8 Akışkan yataklı kurutucu (Deniz, 2010)

Bu kurutucuların, ısı kütle transferinin hızının yüksek olması, katı karışımının iyi bir şekilde sağlanması ve ürünlerin kolay taşınması gibi avantajları bulunmaktadır (Çalhan, 2012).

2.7.2 Tünel Kurutucular

Bu tip kurutucular, sürekli veya yarı sürekli olarak çalıştırılan modifiye edilmiş kampanıman kurutuculardır. Tünel kurutucularda, kurutma ortamı olarak kullanılmakta olan sıcak hava ve yanma gazları fan yardımıyla sistemde dolaştırılır. Malzeme, kurutucuda tepsiler, arabalar veya bölmeler içerisinde periyodik veya sürekli olarak hareket ettirilir. Şekil 2.9'da tünel kurutucu ünitesinde görüldüğü üzere, hava yatak boyunca dikey yönde akmaktadır (Günerban, 2005).



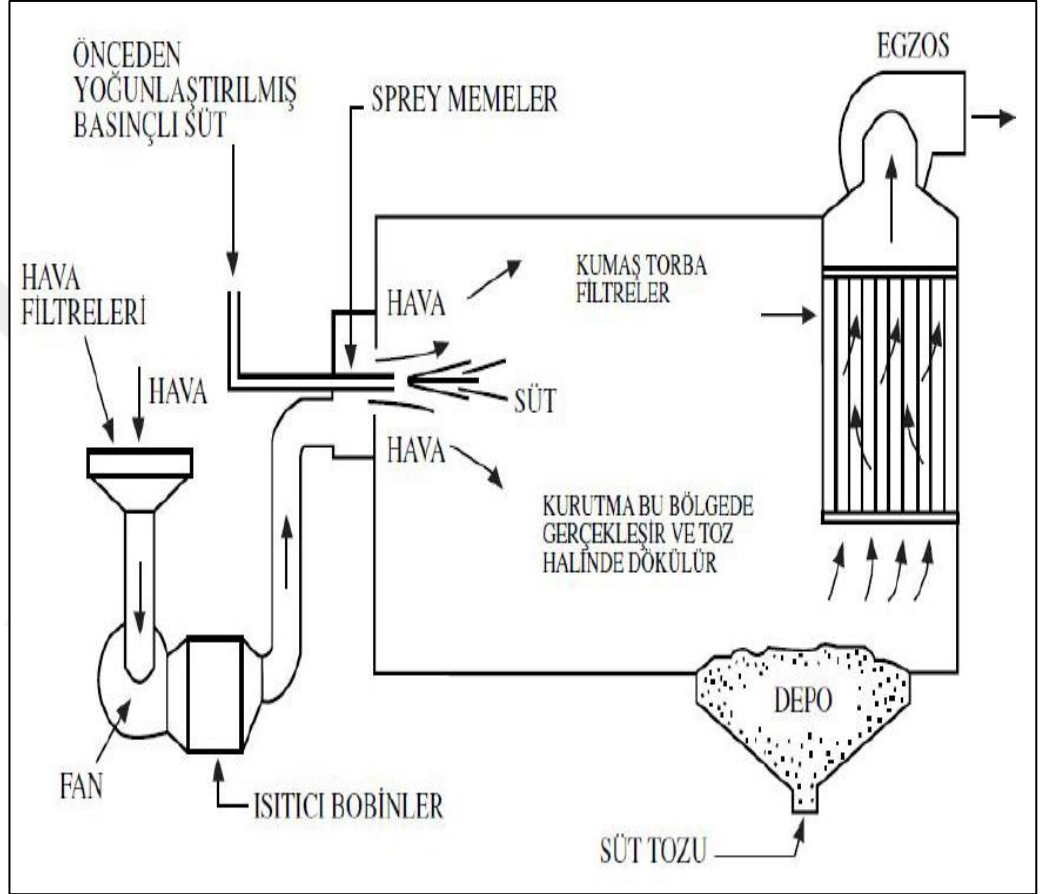
Şekil 2. 9 Tünel kurutucu (Dündar, 2010)

Tünel kurutucuda hava akımı zıt, paralel veya vagonların takip ettikleri yola dik yönde olabilmektedir. Tünel kurutucular genel olarak miktarları fazla olan, fakat yavaş yavaş kurumaları gereken seramik malzemeler, tuğla, kiremit, kereste ve diğer bazı malzemeler için de kullanılabilmektedir (Güngör, 2013).

2.7.3 Sprey Püskürtmeli Kurutucular

Bu tip kurutucular (Şekil 2.10) genel olarak, kahve, sabun, süt tozu, deterjan gibi ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Sprey püskürtmeli kurutucularda, püskürtme ile kurutulacak ortama sıcak hava gönderilmektedir. Ürünlerin kuruma süreleri 5-15 sn arasında değişmektedir ve kurutulan malzemeler üniform özellik taşımaktadır. Kullanılan gazın giriş sıcaklığı 93°C ile 760°C arasında değişmektedir. Giriş sıcaklığı ne kadar yüksek ise kurutma verimliliği o kadar artacağı için yüksek sıcaklıklar ile çalışma tercih edilmektedir. Ayrıca malzemelerin kuruma süreleri oldukça kısadır bu yüzden ısıya karşı duyarlı maddelerin kurutulması için uygun bir seçim olmaktadır (Günerban, 2005).

Ürün kalitesi açısından sprey kurutma, vakumlu tamburlu kurutma ve yüksek vakumlu, düşük sıcaklıkta kurutma ile karşılaştırıldığında; püskürterek kurutma ekonomisi, genellikle bu diğer kurutma yöntemlerine göre daha iyidir ve yüksek sıcaklık farkının mümkün olduğu büyük kapasiteli tesisler için, verimi, bir döner kurutucular ve tünel kurutucular gibi diğer doğrudan kurutucu tiplerinin çoğundan daha iyidir (Marahall ve Seltzer, 1948).



Şekil 2. 10 Sprey püskürtmeli kurutucu (Dündar, 2010)

2.7.4 Diğer Kurutucular

- Kabin kurutucular,
- Flaş kurutma,
- Konveyör kurutucular,
- Döner kurutucular gibi değişik sistemler sayılabilir.

Atıksulara veya içme sularına fiziksel, kimyasal veya biyolojik işlemlerin uygulanması sonucunda çökebilir veya askıda yüzebilir hale gelen sıvı veya yarı katı durumdaki, kokulu yan ürünler arıtma çamuru olarak tarif edilmektedir. Su ve atıksuların arıtımı sonucu meydana gelen çamur, yüksek oranda organik madde, patojen mikroorganizma, besin maddeleri ve oldukça fazla su içermesinden dolayı çevreye zarar vermemesi açısından arıtımı oldukça önem taşımaktadır (Yıldız vd, 2009). Şekil 3.1’de arıtma çamur örneği verilmektedir.



Şekil 3. 1. Arıtma çamuru örneği (Yıldız vd, 2009)

3.1 Arıtma Çamuru Kaynakları

Arıtma çamurları,

- İçme suyu arıtımı sonucu oluşan arıtma çamurları,
- Atıksu arıtımı sonucu oluşan arıtma çamurları,
- Endüstriyel atıksu arıtması sonucu oluşan arıtma çamurları gibi kategorilere ayrılmaktadır.

Yapılan arıtmaya göre farklı cinslerde (ön çökeltim çamurları, kimyasal çamurlar, biyolojik çamur, ileri arıtma çamuru vs.) çamurlar meydana gelmektedir (Yıldız vd, 2009).

3.2 Arıtma Çamurunun Özellikleri

Arıtma çamurunun yapısı incelendiğinde çok az bir miktarının katı madde, oldukça önemli bir kısmının ise su olduğu görülmektedir. Bu sebeple çamur, büyük hacim kaplamaktadır. Çamurun yapısındaki su, serbest veya partiküllere yapışık halde bulunabilmektedir (Özön, 2014). Bu nedende çamurun yapısındaki suyu gruplara ayırarak incelemek gerekmektedir. Tablo 3.1’de aktif çamurun yapısındaki su dağılımları görülmektedir.

Tablo 3. 1 Aktif çamurun yapısındaki su dağılımları (Filibeli, 1996)

Çamurun Yapısındaki Su Sağılımı	Kapladığı Hacim (%)	Açıklama
Serbest Su	%75	Çamur partiküllerine yapışık halde değildir bu yüzden graviteli çökeltme ile ayrılabilir.
Flok Suyu	%20	Flokların içindeki hapsedilen sudur, yumaklarla beraber hareket eder. Mekanik su alma işlemleri ile ayrılabilir.
Kapiler Su	%2	Çamur partiküllerine yapışık halde bulunmaktadır. Partiküllerin sıkıştırılması ile deformasyonları sonucu ayrılabilir.
Kimyasal Bağlı Su	%2,5	Çamur partiküllerine kimyasal olarak bağlanmış sudur.
Katı Maddeler	%0,5	

Aritma çamurları, yapısındaki su miktarına ve uygulanan bazı işlemlere göre çeşitli yapılarda olabilmektedir. Tablo 3.2’de arıtma çamurlarının, içermiş olduğu suya göre yapıları görülmektedir.

Tablo 3. 2 Arıtma çamurlarının içermiş oldukları suya göre yapıları (Filibeli, 1996)

Aritma çamurunun yapısı	Yüzde (%)
Sıvı ve pompalanabilir yapıda	%85
Yapışkan, macunsu, plastik yapıda	%75-65
Ufalanabilir, kırıntılı yapıda	%65-60
Kalıcı sertlikte, dağılabilir ve saçılabilir yapıda	%40-35
Toz halinde	%15-10

Evsel nitelikli atıksuların arıtılması ile oluşan çamurların özellikleri birbirleriyle benzerlik göstermektedir, ancak aynı ifade endüstriyel tesisler için geçerli değildir. Her endüstriden çıkan çamurların özellikleri ayrı ayrı belirlenmelidir (Özön, 2014).

3.3 Arıtma Çamuru Karakterizasyonunda Önemli Parametreler

Arıtma çamurları karakterize edilerek, çamurun işlenmesi ve bertarafı aşamalarında çevreye olan etkilerini tayin edilebilmektedir. Bunun için de fiziksel, kimyasal, biyolojik parametreler ve testler kullanılmaktadır (Özön, 2014). Bu parametreler ile çamurun organik madde içeriği, su verme özelliği, çökebilme özelliği, ısı değeri hakkında bilgi edinilmektedir (Filibeli, 1996).

3.3.1 Özgül Ağırlık

Özgül ağırlık, birim hacimdeki çamur ağırlığının aynı hacimdeki su ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Çamurun ağırlığı suyun ağırlığıyla hemen hemen aynıdır, yani çoğu çamur numunesi için özgül ağırlık 1,0 olarak kabul edilmektedir (Filibeli, 1996).

3.3.2 Çamur Katı Madde İçeriği

Çamurun katı ve sıvı kısmı arasındaki ilişki “katı madde derişimi” olarak tanımlanmaktadır. Çamurun katı madde içeriği, mg/l veya %KM olarak ifade edilir. Çamurdaki askıda ve çözünmüş katı maddelerin toplamı, toplam katı madde içeriğini vermektedir. Çamurdaki toplam katı madde içeriğini belirlemek için buharlaştırma yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart metotlara uygun bir şekilde, belli hacimdeki bir numunenin 103 °C’de etüvde buharlaştırılması ile meydana gelen ağırlık kaybı çamurun su mahtevası içeriğini vermektedir (İşçi, 2006).

Çamurdaki katı madde içeriği, hangi arıtma kademesinde olduğuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Tablo 3.3’te çeşitli arıtma kademelerinde oluşmuş çamurların katı madde konsantrasyonları verilmiştir.

Tablo 3. 3 Çeşitli arıtma kademelerinde oluşan çamurların katı madde konsantrasyonları (Tchobanoglous ve Burton, 1991)

Çamur tipi	Katı madde konsantrasyonu (%)	
	Aralık	Tipik
Ön çökeltme çamuru	4,0 -10,0	5,0
Aktif çamur	0,8 – 2,5	1,3
Damlatmalı filtre humusu	1,0 – 3,0	1,5
Ön çökeltme çamuru + aktif çamur	0,5 – 1,5	0,8
Anaerobik çürütölmüş çamur	5,0 – 10,0	8,0

3.3.3 Uçucu Katı Madde

Çamurun ihtiva ettiği organik madde, koku problemine neden olmakta, çamurun su verme özelliğini etkilemekte ve böylece çamurun faydalı kullanımını ve bertarafını etkilemektedir (Spinosa, 2011; Filibeli, 1996).

3.3.4 Çamur Partikül Boyutu

Çamur bertarafı için kullanılacak proses seçiminde, çamurun partikül boyut dağılımının bilinmesi önem arz etmektedir çünkü partikül boyutu, çamurun su verme özelliğini etkilemektedir (Filibeli, 1996).

Literatürde yer alan farklı çamur numuneleri kullanılarak yapılan bir çalışmada, (Karr, 1976) 1-100µm aralığındaki partiküllerin, su vermesine olumsuz etkisinin olduğunu görmüş ve bu aralıkta yer alan partikül boyutuna sahip çamurların partikül boyutlarının değiştirilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir.

3.3.5 Zeta Potansiyeli

Zeta potansiyeli, tanecikler üzerindeki net elektriksel yüküdür ve ölçümü mV olarak yapılmaktadır. Taneciklerin üzerindeki elektriksel yük büyükse yumaklaşma olumsuz etkilenmekte ve çamurda su verme verimi düşmektedir. Endüstriyel arıtma çamurlarında zeta potansiyeli, -80 mV ve üzeri, evsel arıtma çamurlarında ise -10 ile 20 mV arasında değişmektedir. Fakat katyonik polielektrolit kullanımları ile zeta potansiyeli sıfıra doğru değişebilmektedir (Filibeli, 1996; Coşkun, 2017). Şekil 3.2 (a) ve Şekil 3.2 (b)'de yüklü ve yüksüz taneciklerin hareketleri görülmektedir. Ayrıca zeta potansiyelinin kullanım alanlarından bir tanesi de, çamur şartlandırmada kullanılmakta olan ilave kimyasal şartlandırıcı dozunun belirlenmesidir (Spinosa, 2011; Filibeli, 1996).



Şekil 3. 2 (a) Yüklü tanecikler birbirini itmektedir ve (b) Yüksüz tanecikler yumaklı Bir yapı oluşturmaktadır (Filibeli, 1996)

3.3.6 Çamurun Isıl Değeri

Çamurun ısı değeri, çamurun içerisindeki uçucu katı madde miktarına ve çamurun tipine bağlıdır. Bilhassa çok miktarda yağ- gres içeren arıtılmamış ön çökeltim çamurlarının ısı değeri oldukça yüksektir. Ham çamurun ısı değeri, çürümüş çamura göre daha yüksektir. Çamur, ortalama 6100 cal/g kuru madde ısı değere sahiptir ve bu değer düşük kaliteli bazı kömürlerin ısı değerleri ile eşdeğerdir. Tablo 3.4'te çamur türlerinin ortalama ısı değerleri görülmektedir (Filibeli, 1996).

Tablo 3. 4 Çamur türlerine göre ortalama ısı değerler (Filibeli, 1996)

Çamur türü	Isıl değer (cal/g)
Ham ön çökeltim çamuru	6100 cal/g
Aktif çamur	5000 cal/g
Anaerobik çürümüş çamur	2700 cal/g

3.3.7 Çamurun Akışkanlık Özelliği

Akışkanlar, reolojilerine ya da akım özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. Akışkanlık, yaygın olarak, viskozite parametresiyle belirlenmektedir. Viskozite, herhangi bir akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir (İşçi, 2006). Newtonian bir akışkan, akışından kaynaklanan viskoz streslerin her noktada lineer olarak lokal gerilim oranı ile zaman içerisindeki deformasyonun değişim oranının orantılı olduğu bir akışkandır (Panton, 2013; Kirby, 2010). Bu akışkanların viskozitesi hemen hemen sabit bir şekilde kalmaktadır. Fazla su içeren ve katı madde içeriği düşük çamurlar newtonian akışkan özelliği göstermektedir.

Arıtma çamurları genellikle, Pseudoplastik özellik göstermektedirler yani bu akışkanlarda kayma gerilmesi uygulandığı anda, akışkanın viskozitesi azalır, akışkanda incelme olur (Filibeli, 1996).

Arıtma çamurları ayrıca Thixotropic akışkan özelliği de gösterebilmektedir yani kayma gerilmesi devam ettiği sürece, flock yapısı bozulduğundan çamurun viskozitesi azalmaktadır. Kayma gerilmesi ortadan kalktığında, floklu yapı yeniden

oluşmakta ve viskozite artmaktadır. Bilhassa inorganik katı madde içeriğine sahip çamurlar bu özelliği göstermektedir (Filibeli, 1996).

Çamurun akışkanlık özellikleri (Filibeli, 1996):

- Katı madde konsantrasyonu,
- Katı maddenin partikül boyut dağılımı,
- Sıvı yoğunluğu vs. gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmektedir.

3.4 Arıtma Çamuru Bertarafı

Atıksu arıtımı sonrasında evsel ve endüstriyel tesislerden çıkan atık çamurun nihai bertafa verilmeden önce arıtılması önem arz etmektedir. Arıtma tesisleri tasarım aşamasındayken, çamur problemi ve çamurun tehlikeli atık olup olmadığı dikkate alınmalıdır ve en uygun arıtma metodu seçilmelidir (MEGEP, 2011).

Atık çamurun depolanması ve arıtılması için uygulanması gereken yöntemler (MEGEP, 2011):

- Ham atıksuyun karakterizasyonuna,
- Arıtma proseslerine
- Kullanılan kimyasallara,
- Yönetmeliklere vs. koşullara bağlıdır.

Arıtma çamuru bertaraf proseslerinin maliyeti ve işletme giderleri, bazen atıksu arıtma tesisinin maliyetinden bile fazla olabilmektedir. Maliyetler, işletme tesisinin büyüklüğüne ve bölgenin şartlarına göre değişiklik göstermektedir (Özön, 2014).

Arıtma prosesleri, çamurun kaynağına, prosesin tipine ve işletme tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Tablo 3.5'te çamurun arıtma metotları görülmektedir.

Tablo 3. 5 Çamur bertaraf metotları (Öztürk vd, 2005)

İşletme, proses ve arıtma metotları		Fonksiyonları
1. Birincil işlemler	Çamur öğütme	Boyut küçültme
	Kum ayırma	Kum ayırma
	Çamur karıştırma	Karıştırma
	Çamur saklama	Depolama-saklama
2. Yoğunlaştırıcı	Graviteli yoğunlaştırıcı	Hacim azaltma
	Flotasyonlu yoğunlaştırıcı	Hacim azaltma
	Santrifüjlü yoğunlaştırıcı	Hacim azaltma
	Bantlı yoğunlaştırıcı	Hacim azaltma
	Döner elekli yoğunlaştırıcı	Hacim azaltma
3. Stabilizasyon	Kireç stabilizasyonu	Stabilizasyon
	Isıl işlem	Stabilizasyon
	Havasız çürütme	Stabilizasyon, kütle azaltma
	Havalı çürütme	Stabilizasyon, kütle azaltma
	kompostlaştırma	Stabilizasyon, ürün giderimi
4. Şartlandırma	Kimyasal şartlandırma	Çamur şartlandırma
	Termal (ısı) şartlandırma	Çamur şartlandırma
5. Dezenfeksiyon	Pastörizasyon	Dezenfeksiyon
	Uzun süreli saklama	Dezenfeksiyon
6. Susuzlaştırma	Vakum filtre	Hacim azaltma
	Santrifüj	Hacim azaltma
	Pres filtre	Hacim azaltma
	Çamur kurutma yatakları	Hacim azaltma
	Çamur lagünleri	Saklama ve hacim azaltma

Tablo 3. 5 Çamur bertaraf metotları (Devamı)

7. Isıl kurutma	Banthı kurutucu	Kütle ve hacim azaltma
	Döner tamburlu kurutucu	Kütle ve hacim azaltma
	Çok hücreli kurutucu	Kütle ve hacim azaltma
	Çoklu etkili buharlaştırıcı	Kütle ve hacim azaltma
8. Termal azaltma	Çok hücreli yakıcı	Kaynak geri kazanımı, hacim azaltma
	Akışkan yataklı yakıcı	Hacim azaltma
	Katı atıklarla birlikte yakma	Hacim azaltma
	Islak-hava oksidasyonu	Stabilizasyon ve hacim azaltma
	Derin şaft reaktörü	Stabilizasyon ve hacim azaltma
9. Nihai bertaraf	Arazide arıtma	Son uzaklaştırma
	Dağıtım ve pazarlama	Faydalı kullanım
	Kimyasal sabitleme	Faydalı kullanım, son uzaklaştırma
	Düzenli depolama	Son uzaklaştırma
	Lagünlerde biriktirme	Hacim azaltma, son uzaklaştırma

3.5 Çamur Kurutma

Bu kısımda, sanayide kullanılan farklı arıtma çamuru kurutma tekniklerine yer verilmiştir.

3.5.1 Çamur Kurutma Teknikleri

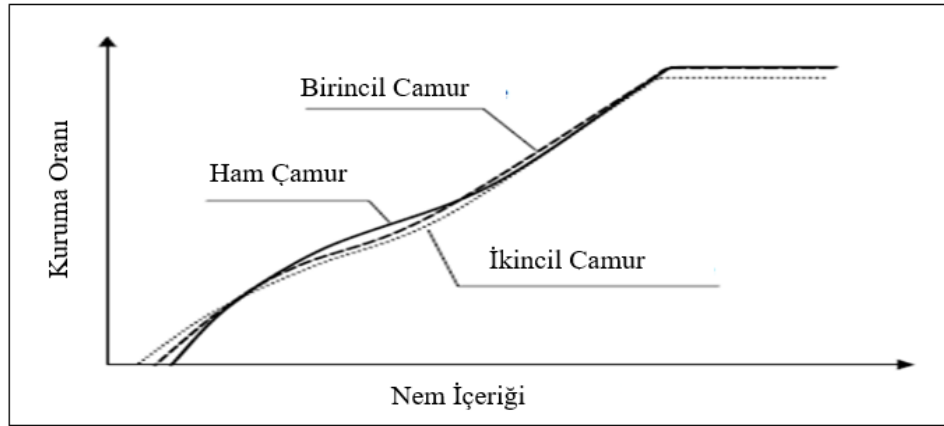
3.5.1.1 Termal Kurutma

Güneş enerjisi kullanılarak çamurun kurutulması işlemi, önemli miktarlarda arazi gerektirdiğinden ve çözümü zor koku problemlerine neden olduğundan termal

kurutma son yıllarda çok dikkat çekmiştir ve büyük bir çamur işleme teknolojisi haline gelmiştir (Grüter vd, 1990).

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, termal kurutma ile kurutulan çamur birinci bir düşme oranının ardından ikinci bir düşme oranı periyodu sonrasında sabit bir değerde kalmaktadır (Chen vd, 2006).

Sabit kurutma hızı süresince, çamurdan serbest su alınmaktadır. Çamur içinde tutulan son nem içeriği ise, çoğunlukla çamurun türüne ve kurutma koşullarına bağlı miktarlarda kimyasal olarak bağlı sudur. Nem içeriğindeki ve kurutma oranlarındaki değişimlerin yanı sıra, katı içeriğe bağlı olarak granülasyondan önce çamurun fiziksel durumu ıslak zondan yapışkan zona geçişecektir (Chen vd, 2006; Grüter vd, 1990).



Şekil 3. 3 Tipik kuruma oranı eğrisi (Chen vd, 2006)

Çok sayıda çamur kurutma sistemi mevcuttur. Isı ve kütle transferi açısından mevcut kurutucular:

- Doğrudan kurutma sistemleri,
- Dolaylı kurutma sistemleri,
- Akışkan yataklı kurutucularda bulunan kombine sistemler olarak sınıflandırılabilir.

Güneş Enerjili Kurutma: Sulu çamurun termal olarak kurutulması, gerekli nihai ürün su içeriğinin gübre üretiminde olduğu kadar düşük olduğu zaman, çamurun ısıtma değerinin verimli yakma için iyileştirilmesi gerektiğinde ya da depolama gibi

bertaraf edilmesinde nakliye giderlerinin azaltılması durumunda gereklidir (Chen vd, 2006). Termal kurutma ayrıca virüslerin inaktive edilmesine yardımcı olabilir (Chen vd, 2006). Bu işlem oldukça fazla enerji gerektirmektedir bu yüzden güneş enerjisinden yararlanılmaktadır. Bir güneş enerjisi kollektörünün, bazı çalışmalarda kuruma süresini kısaltmak için kurutma hızını artırmaya yardımcı olduğu (Hossam vd, 1990), diğer bir çalışmada ise sadece bir sistem gibi sınırlı yardım sunabileceği bulunmuştur (Turner vd, 1989). Literatürde yer alan bir çalışmada; açık kurutma yataklarında, çamurun periyodik olarak dönmesinin, kurutma oranını arttırdığı, böcek popülasyonlarını azalttığı ve artan havalandırma ve böceklerin rahatsız edici inkübasyonu ile koku problemini azalttığı belirtilmektedir (Staff, 1987).

Konvektif Kurutma: Konvektif kurutma tekniği, baca gazı atık ısısı gibi düşük kaliteli enerjiden yararlanmak için yaygın olarak kullanılabilen, enerji santrali sistemi için uygun bir yöntemdir. Isı, çamur yüzeyine doğrudan temas eden sıcak bir gazlı ortam (genellikle hava veya baca gazı) vasıtasıyla konvektif bir kurutucudaki çamura aktarılır (Tuncal ve Uslu, 2014). Kanalizasyon çamurunun konvektif kurutulması, çalışma koşulları, hidrasyon derecesi ve gözenek yapısı ve kanalizasyon çamurunun fizikokimyasal özellikleri gibi birçok faktörden etkilenen eş zamanlı ısı ve kütle transferini içeren karmaşık bir işlemdir (Huang vd, 2016). Huang vd. (2016) yapılan çalışmada, konvektif bir kurutucuda evsel atık çamurun kuruma üzerindeki termal davranışı, 100-160 °C sıcak hava aralığında ve üç sıcak hava hızında (0,6, 1,4 ve 2,0 ms⁻¹) araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan model, deneysel verilere $\pm\%$ 25 sapma dahilinde uygulanabilir. Aditya Putranto vd. (2014) yapmış oldukları çalışmada, REA (reaksiyon mühendisliği yaklaşımı), ilk kez yüksek oranda daralan bir malzeme olan atık su çamurunun konvektif kurutulmasını modellemek için uygulanmıştır. REA'nın, çamur kurutucunun tasarımı ve değerlendirilmesi de dahil olmak üzere başka uygulamalar için uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır. Celma vd. (2012) yaptıkları çalışmada, ağırlıklı olarak, konvektif bir kurutucu kullanarak, domates işleme endüstrisindeki su arıtma tesislerinden gelen çamurun ince tabaka kuruma davranışını incelemişlerdir.

Kurutma hızının sıcaklık ve hız ile arttığı ve dolayısıyla toplam kuruma süresini azalttığı bulunmuştur.

3.5.1.2 Biyo Kurutma

Kanalizasyon çamuru (SS) biyo-kurutma yığınlarından kaynaklanan su kaybı esas olarak serbest suyun buharlaşması yoluyla elde edilir ve temel olarak hava taşınımı ile giderilir (Zhao vd, 2010; Navaee-Ardeh, 2010). SS biyo-kurutma sırasında, suyun giderilmesinin ana mekanizması konvektif buharlaşmadır ve asıl su kaybı kümeden buharlaşan sudur (Velis vd, 2009; Cai vd, 2012).

Yakmayı hedefleyen alternatif bir ön arıtma yöntemi olan biyo-kurutma, son yıllarda yüksek su içeriğine sahip biyolojik atıklardan suyu uzaklaştırmayı amaçlamaktadır (Zhang, 2009). Kompostlamadan türetilen, biyo-kurutmanın ana mekanizması, organik maddelerin aerobik parçalanması sırasında üretilen ısı ile suyu buharlaştırmak için kullanılmasıdır (Velis, 2009).

Biyo kurutma çoğunlukla belediye katı atıkları (MSW) için çalışılmıştır (Zhang vd, 2008; Zhao vd, 2010).

En uygun operasyonlar altında daha az zamanda daha fazla suyu almak için biyo-üretilen enerjinin etkin ve ekonomik olarak nasıl kullanılması gerektiği, biyo-kurutma için çok önemli bir sorundur (Choi vd, 2001; Velis, 2009; Zhao, 2010).

Q. Li vd. (2018) yaptıkları çalışmada kanalizasyon çamuru biyo kurutması için konvansiyonel hacimlendirici maddelerin uygulanması yerine ön işleme işlemi olarak basınçlı elektro-ozmotik susuzlaştırma (PEOD) önermişlerdir.

Junya Zhang vd. (2016), yaptıkları çalışmada antibiyotiğe dirençli genlerin (ARG) tam ölçekli çamur biyo-kurutma sırasındaki kaderini, ARG'leri etkili bir şekilde azaltıp azaltmadığını ve bakteri topluluğunun, yatay gen transferi (HGT) 'nin mobil genetik elemanlar (MGE'ler) ve ortak metallerden birlikte seçilmesinin katkısı olup olmadığını belirlemek için araştırmışlardır.

Lu Cai vd. (2013) yapılan çalışmada, basınçlı hava hacminin bir atık çamur biyo-kurutma kümesinden su buharlaşması üzerindeki etkilerini araştırılmıştır.

Susuzlaştırılan atık su çamuru, kontrol teknolojisi kullanılarak biyo-kurutulmuş, bu sırada sıcaklık, yüzeysel hava hızı ve su buharlaşması ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Sonuçlar, en yüksek hava hızının ve suyun buharlaşmasının, termofilik faz ve ikinci sıcaklık arttırma fazında meydana geldiğini, sırasıyla en yüksek $0,063 \pm 0,027 \text{ ms}^{-1}$ ve $28,9 \text{ kg ton}^{-1}$ matris d^1 değerinin gözlemlendiğini göstermiştir.

Rong Han vd. (2012) yapılan çalışmada, yeni bir iki aşamalı teknoloji, hızlı pirolizle (FP) birleştirilen hızlı biyofiziksel kurutma (BPD), atık su çamurundan nemin giderilmesi ve enerji geri kazanımı için incelenmiştir. BPD için aşırı termofilik değişikliklerin birleştirilmesi ile (substrat sıcaklığının artırılması ve kontrol edilebilir bir şekilde sürdürülmesiyle) daha da etkin bir şekilde konvektif buharlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir; bunların hem nemin giderilmesi (hem de 7 gün boyunca % 23,1'e ulaşan nem içeriği) ve organik koruma için faydalı olduğu belirtilmiştir.

L. Cai vd. (2012) yaptıkları çalışmada kanalizasyon çamurunun biyo-kurutma sırasındaki nem değişimini araştırmışlardır. Çalışmada kütle nemini ve su buharını izlemek için yerinde ölçümler yapılırken, biyolojik kurutma kütlelerinin nem içeriği, su oluşumu, su buharlaşması ve havalandırma suyu girişi su kütle dengesine göre hesaplanmıştır. Atık su çamur biyo-kurutma malzemesindeki nem, biyo-kurutma kontrol teknolojisine cevaben % 66'dan % 54'e düşmüştür. Artan çamurun biyo-kurutma sıcaklık artışı ve termofilik fazları sırasında, başlangıçta kütlenin nem içeriği, su oluşumu ve suyun buharlaşması artmış, sonrasında ise azalmıştır. En yüksek su üretimi ve buharlaşmanın, termofilik faz sırasında meydana geldiği görülmüştür. Biyo kurutma sırasında, su buharlaşması su oluşumundan çok daha büyük olmuş ve havalandırmanın su buharlaşmasını kolaylaştırdığı söylenmiştir.

Zhao vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada, hava debisinin ve dönüş sıklığının suyun giderilmesi ve biyokütle enerji kullanımı üzerindeki etkileşimli etkisini araştırmışlardır.

3.5.1.3 İnce Tabaka Kurutma

İnce tabaka kuruması, ıslak gözenekli ortamlardaki termal davranışı araştırmak için önemli ve popüler bir yaklaşımdır. İnce tabaka kurutma işleminde nem içeriği ve kanalizasyon çamurunun ortalama sıcaklığı, kanalizasyon çamurundaki ısı ve kütle transfer karakteristiklerini domine eden ısı iletkenliğini, özgül ısı kapasitesini, yoğunluklarını ve yayılma katsayısını etkiler (Deng vd, 2013). Tek deneysel araştırmada, kanalizasyon çamuru ince tabakasının nem içeriğini ve ortalama sıcaklığını tanımlamak için çeşitli çalışma koşulları altında çok sayıda deneye ihtiyaç vardır. Çamur bileşiminin karmaşıklığı, doğrusal olmayan ve zamanla değişen kurutma işleminden dolayı, geleneksel ısı ve kütle transferi modelleri için uygulanabilirlik, atık su çamurunda ısı ve kütle transferinin yakınsama ve tahmin doğruluğu gibi bazı sınırlamalar vardır (Huang ve Chen, 2015).

Sun vd. (2017) yapılan çalışmada laboratuvar ölçeğinde, konvektif kurutucuda bulunan belediye lağım çamurunun ince tabakalı kuruma davranışı, hava kaynaklı ultrasonla desteklenmiş 70 ila 130 °C hava sıcaklıklarında incelenmiştir. Sadece konvektif prosesdeki kurutma kinetiği, üç ultrason gücünde (30, 90, 150 W) ultrasonistimal işlemiyle karşılaştırılmıştır. Bütün kurutma sıcaklık aralığı içindeki 30, 90 ve 150 W'lık ultrason güçlerinde ortalama kuruma oranları, yalnızca konvektif kurutmaya kıyasla (ultrason olmadan) yaklaşık %22,6, %27,8 ve %32,2 artmıştır.

Huang vd (2015) yapmış oldukları çalışmada konveksiyon ile kurutma işlemi sırasında belediye kanalizasyon çamurundaki ince tabaka kuruma davranışını tahmin etmek için geri yayılım (BP) ve genelleştirilmiş regresyon sinir ağı modellerini (GRNN) araştırmışlardır. BP modelinin, sıcak hava basınçlı konvektif kurutma sırasında kanalizasyon çamuru ince tabakasının nem içeriğini tahmin etme doğruluğunun, GRNN modelininkinden çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

Celma vd. (2007) yaptıkları çalışmada, çamurun kuruma özellikleri, 20-40-80 °C arasında sıcak hava kullanılarak ve bir hava güneş ısıtıcısı tarafından sağlanabilecek aralığın simüle edilmesiyle 2 ila yaklaşık 0,7-0,08 kg su / kg kuru madde ortalama

nem içeriği açısından laboratuvar ölçeğindeki kurutucuda 1 m/s'lik hava hızlarıyla incelenmiştir. Lewis, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Wang and Singh, Logarithmic, Two term, Two Term exponential, Modified Henderson and Pabis, Midilli, difüzyon yaklaşımı gibi çamur kurutma eğrilerinin simülasyonu için farklı matematiksel modeller kullanılmıştır.

3.5.1.4 Mikrodalga İle Kurutma

MW teknolojisi, dalga boyu 1 mm ile 1 m arasında olan ve 300 MHz ile 300 GHz arasındaki frekansları olan iyonlaştırıcı olmayan bir elektromanyetik radyasyon olan mikrodalga enerjisini kullanır (Karabacak vd, 2015).

Chen vd. (2014) yılında mikrodalga (MW) güç seviyelerinin (480 ila 1080 W) ve numune kütlesinin (90 ila 150 g) kanalizasyon lağımının kurutma özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla çalışma yapmışlardır. Kurutma testleri, işlem kontrol sistemine sahip modifiye edilmiş bir ev tipi mikrodalga ünitesi kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, kurutma hızının doğrudan MW gücüyle orantılı olduğunu, ancak örnek kütlesi ile ters orantılı olduğunu göstermiştir. Çalışmada, istenen sıcaklığın kısa sürede daha yüksek güç seviyesinde elde edilebilir olduğu belirtilmiştir. MW kurutma, kanalizasyon çamuru kalorifik değerinde (5,65 MJ/kg'dan 18,75 MJ/kg'a) önemli bir artış göstermiştir.

Mawioo vd. (2016) yapılan çalışmada, Nairobi, Kenya'daki gecekondu yerleşim yerlerine yerleştirilen idrar yönlendirici kuru tuvaletlerden elde edilen taze dışkı çamurunun (FS) arıtımı için bir mikrodalga (MW) teknolojisinin uygulanabilirliğini araştırılmıştır. 100 g ve 200 g FS içeren iki numune fraksiyonu, 0,5 ila 14 dakika arasında değişen farklı maruz kalma sürelerinde üç farklı (465, 1085 ve 1550 W) güç seviyesinde MW ışımasına maruz bırakılmıştır. Bu çalışmada, MW teknolojisinin E. coli ve Ascaris lumbricoides yumurtalarında tam bir azalma ve taze FS'de % 70 hacim / ağırlık azalması sağlayabildiği gösterilmiştir. Ayrıca, MW teknolojisinin gerçek saha koşullarında başarılı bir şekilde değerlendirilmesi, kentsel gecekondu ve acil durumlar gibi durumlarda taze FS'nin hızlı bir şekilde arıtılması için MW ışınlamasının uygulanabileceğini göstermiştir.

Mawioo vd. (2016) yapılan çalışmada, yoğun olarak kullanılan tuvalet tesislerinde üretilen dışkı çamurunu (FS) temsil eden taze karasu çamurunu arıtmak için laboratuvar ölçekli bir mikrodalga (MW) ünitesi uygulanmıştır. Çamur, farklı güç seviyelerinde ve çeşitli sürelerde MW ısımasına maruz bırakıldı. Çamur hacmi ve patojen azalması gibi değişkenler gözlenmiştir. Sonuçlar, MW'nin bu deneysel koşullarda çamur hacmini % 70'in üzerinde azaltabilecek hızlı ve verimli bir teknoloji olduğunu göstermiştir. Bakteriyel patojenik indikatör *E. coli*'nin konsantrasyonu da analitik tespit seviyelerinin altına düşmüştür. Ayrıca, sonuçlar radyasyon gücü ve temas süresi dahil olmak üzere MW işletme koşullarının istenen çamur hacmini ve patojen azaltımını sağlamak için değiştirilebileceğini göstermiştir.

Mawioo vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, hızlı çamur arıtması için olası bir alternatif olarak pilot ölçekli bir mikrodalga (MW) bazlı reaktörü araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, MW reaktörünün, gecekondü ve acil durum yerleşimleri gibi alanlarda çamurun hızlı arıtılması için uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Idris vd. (2004) yaptıkları çalışmada, 1kW, 2,45 GHz mikrodalga kaynaklı çok modlu bir mikrodalga aplikatöründe ıslak silika çamurunun mikrodalga ısıtma ve kurutma özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler, farklı çamur kütleleri (10-1000 g) kullanılarak, farklı güç koşullarında (400-1000 W) gerçekleştirilmiştir. Teorik kurutma eğrileri oluşturmak için basitleştirilmiş bir teorik yaklaşım uygulanmıştır. Isınma ve sabit kurutma süresi boyunca teori ve deney arasında iyi bir anlaşma sağlanmıştır. Daha kısa kuruma süresi ve daha yüksek kuruma hızı ile sonuçlanabilecek en büyük malzeme ve en düşük güç girişi değerleri sırasıyla 1000 g ve 800 W olarak belirlenmiştir.

Lee vd. (2017) yaptıkları çalışmada, Li_2CO_3 - Fe_2O_3 - ZnO malzemelerini bir lignin bağlayıcı ile mekanik karıştırarak ve ısıtma işlemiyle hazırlamışlardır. Bu çalışmada, farklı işlem sıcaklıkları için Li_2CO_3 " Fe_2O_3 " ZnO malzemelerinin yüzey yapısı ve ekzotermik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma, Li_2CO_3 " Fe_2O_3 " ZnO bazlı malzemelerin mikrodalga ısıtma sırasında çamur kurutma etkinliğini arttırdığını göstermiştir.

3.5.2 Sanayide Uygulanan Çamur Kurutma Sistemleri

3.5.2.1 Doğrudan Kurutma Sistemleri

Doğrudan kurutma sistemlerinde, kurutmak için kullanılan gazın ısısı, arıtma çamuruna direkt olarak aktarılmaktadır. Bu işlem arıtma çamuru ve gaz arasında yoğun bir temas olmasını gerektirmektedir (Özön, 2014).

Doğrudan kurutma sistemlerine, döner tamburlu kurutucular, flaş kurutma sistemleri, bant kurutucular, kızılötesi ısıtma kullanılan çamur kurutma sistemleri, hareketli kayışlı çamur kurutucular sprey kurutucular örnek verilebilir (Chen vd, 2006).

Döner tamburlu kurutucularda, malzemenin nemini azaltmak amacıyla kurutucu içine sıcak hava gönderilmektedir. Döner kurutucular genel olarak, geniş çaplı, uzun silindirik bir boru ve bunun beton ayaklar üzerine mesnetlenmesiyle oluşturulur. Döner kurutucu içerisinde malzemenin akışını sağlayabilmek için fırın belirli bir açılarda çalışmaktadır. Kurutulması istenen ürün, fırın içerisinde bulunan kanatlarda harmanlanmaktadır ve bu şekilde iyi bir kuruma elde edilir. Gövde iç çeperinde bulunan bu kanatlar, ürünün dönüş etkisiyle kayarak ilerlemesini sağlamaktadır. Döner kurutucular; kömür, asfalt, kum, betonit, ve benzeri ürünlerin kurutulmasında kullanılmaktadır. Bu kurutma sistemleri 1000 °C'ye kadar olan giriş sıcaklıkları, en az 800 kg / saat ile 50.000 kg / saat arasında değişen su buharlaşma oranıyla ateşleme riski olmaksızın kullanılabilir. Japonya'da endüstriyel çamur kurutmada, bir parçalama cihazı ile donatılmış döner tamburlu kurutucular yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen vd, 2006).

Flaş kurutmada, sıcak hava jeneratöründen alınan baca gazı, bir fan yardımı ile boruya basılmaktadır. Malzeme bu boru içerisine helezon konveyör ile aktarılmaktadır. Boru içindeki sıcak hava ile pnömatik taşıma yapılırken ürün yüzeyinde bulunan suyun ısı şoklaması ile kısa zamanda evaporasyonu sağlanmaktadır. Seperatör ile nemi düşürülmüş ürün, sistemden alınmaktadır. Yeterli nem düşümü sağlanamayan uygulamalarda çıkmakta olan malzeme yeniden kurutucuya beslenerek, nihai istenen nem değerine ulaşılması sağlanır. Flaş

kurutma sistemiyle yoğunluğu 7 gr/cm³'e kadar olan "toz ve granül" madenlerin kurutulması mümkün olmaktadır. Madencilik dışında kimya ve gıda sanayisinde de kullanılmaktadır. Kurutulabilecek malzemeler toz, pul, kek, granül, jel, macun ve çamur şeklinde olabilmektedir (Toroman, 2011).

Çamurun parçalanmasına yardımcı malzemeler kullanılan en temel flaş kurutma sistemi kafes değirmen sistemidir. Besleme, sıcak gaz akışında kafes değirmeni tarafından çalkalanır, böylece türbülans ve tutma süresi artar. Rotorun dairesel hareketi, ilave kurutma meydana geldiğinde kurutucuyu hareket ettirmek için kısmen kurutulmuş çamura yardımcı olur (Chen, 2006).

3.5.2.2 Dolaylı Kurutma Sistemleri

Dolaylı kurutma sistemlerinde, kurutulacak ürüne, dolaylı olarak, bir ısı transfer yüzeyi ile ısı iletilmektedir. Bu sistemlerde ısı aracı arıtma çamuru ile direkt olarak temasta değildir. Genel olarak dolaylı kurutucularda hiç hava kullanılmamakla beraber, bazı durumlarda oluşan su buharının taşınması için küçük bir hava akımı kullanılabilir. Bu yöntem, koku giderme maliyetlerini en aza indirirken ısı yalıtımını en yüksek seviyede tutmaktadır (Özön, 2014).

Dolaylı kurutucular daha az gaz ürettiğinden, tasarımlarının çoğu, ısı geri kazanımı ve / veya koku giderme üniteleriyle kapalı devre şeklindedir. Dolaylı kurutucular, ısıtılmış bir yüzeyden taşınan ısıya ve susuzlaştırılmış çamura bağlı olduğundan hala nispeten ıslaktır (aktif çamur için yaklaşık % 25 katı içerik) ve bu hususta çamurun arayüzey davranışının ve ısıtılmış yüzeylerin ele alınması oldukça önemlidir (Chen, 2006).

Çevre ve enerji tasarrufu ile ilgili endişeler sonucunda, Avrupa'da son zamanlarda eş zamanlı çamur kurutma ve peletleme ile dolaylı kurutma meydana gelmiştir. Böyle bir uygulamada kullanılan kurutucular dikey çok kademeli tepsi kurutucularıdır. Tepsili kurutucular, fan, motor ve tepsilerden oluşmaktadır. Bu kurutucularda, kurutulacak olan ürün, tepsi üzerine düzgün bir şekilde serilmekte ve kurumaya bırakılmaktadır. Bu kurutucular genellikle laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanılmaktadır (Cemeruğlu ve Soyer, 2004). Çamur, üst giriş yoluyla

beslenir ve döner kollar tarafından ısıtılmış bir tepsiden diğerine, % 95'e kadar toplam katı muhtevaya sahip, kurutulmuş ve pelet haline getirilmiş bir ürün olarak altta çıkana kadar bir zikzak yolunda hareket ettirilir. Kurutucu tepsilerinin içi boştur ve buhar veya termal yağ ile ısıtılır. Çamur, tabaka kalınlığı düzgün bir şekilde kontrol edilerek ısıtılmış yüzey üzerinde homojen bir şekilde yayılabilir. Bu nedenle, böyle bir kurutucuda daha düzgün bir kurutma elde edilir (Chen, 2006).

3.5.2.3 Akışkan Yataklı Kurutucularda Bulunan Kombine Sistemler

Yukarıda incelenen doğrudan ve dolaylı kurutuculara ek olarak, kombine iletim ve konveksiyonlu ısı transferini kullanan veya farklı bir kurutma ortamı kullanan sistemler mevcuttur. Bu sistemlere akışkan yataklı kurutucular örnek olarak verilebilir. Bu kurutucularda, ıslak çamur sürekli olarak beslenebilir ve birkaç hareketli parça ile akışkan yataklı sistemden çekilebilir. Su buharlaşması için ısı çoğunlukla termal yağ tüplerinin sıcak yüzeylerinden sağlanır. Yaklaşık 85 °C ısıtılmış hava, bir miktar ısı sağlar ve esas olarak çamur granüllerinin, çamur ve sıcak tüp yüzeyi arasındaki ısı transferini arttırmak için akışkan bir halde kalmasını sağlar. Çamur böyle bir kurutucuda %5 nem içeriğine kadar kurutulabilir (Fouhy ve Moore, 1994).

4.1 Materyaller

4.1.1 Arıtma Çamuru

Deneyssel çalışmalarda incelenmek üzere, metal kaplama sanayi atıksu arıtma tesisinden oluşan endüstriyel arıtma çamuru kullanılmıştır. Kullanılan arıtma çamurunun karakteristik tablosu Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4. 1 Arıtma çamuru karakteristik tablosu

	Fe	Cu	Ni	Cr	Zn	CN
Çamur içerisindeki elementlerin yüzdeleri	%6,48	%0,84	%0,88	%0,98	%0,46	%0,78
Çamurun nem muhtevası (%)	%55					

4.1.2 Kullanılan Ekipmanlar

Deneylerde kullanılmış olan ekipmanların bazı teknik özellikleri aşağıda verilmektedir.

- **Vakum Pompası**

Markası: KNF

Tipi: N920KT

Gücü: max 135 W

Nihai vakum: 2 mbar abs.

Debi: 1,26 m³/sa

Nominal voltaj: 100-240 V

Frekans: 50-60 Hz

İşletme akımı: max 1,7 A

Şekil 4.1’de deneylerde kullanılan KNFN920KT tipi vakum pompası görülmektedir.



Şekil 4. 1 KNFN920KT tipi vakum pompası

- **Vakum Etüvü**

Markası: Nuve

Tipi: EV018

Sıcaklık aralığı: 70-200 °C

Kullanılabilir hacim: 15 lt

Vakum manometresi: -1/+1 bar

Vakum ölçer okuma hassasiyeti: 0,05 bar

Güç: 950 W

Güç kaynağı: 230 V, 50/60 Hz

Şekil 4.2’de Nuve EV018 tipi vakum etüvü görülmektedir.



Şekil 4. 2 Nuve EV018 tipi vakum etüvü

- **Soğutucu**

Markası: S&A

Tipi: CW-5000

Elektrik: 220 V/ 50Hz

Akım: 1,4~2,1A

Soğutucu kompresör gücü: 0,295KW – 0,40HP

Soğutma kapasitesi: 2361Btu/h – 0,692KW -595Kcal/h

Soğutucu gaz: R-134a

Soğutucu gaz kapasitesi: 300g

Hassasiyet: $\pm 0,3$ °C

Pompa gücü: 0,03Kw

Şekil 4.3’de S&A CW-5000 tipi soğutucu (yoğuşturucu) görülmektedir.



Şekil 4. 3 S&A CW-5000 tipi soğutucu (yoğuşturucu)

- **Kül fırını**

Marka : Protherm

Model: PLF 115M

Kategori: PLF Serisi Kamara Fırını

Maksimum sıcaklık : 1150°C

Maksimum Çalışma sıcaklığı: 1100°C

Maksimum sıcaklığa ulaşma süresi: 110 dk

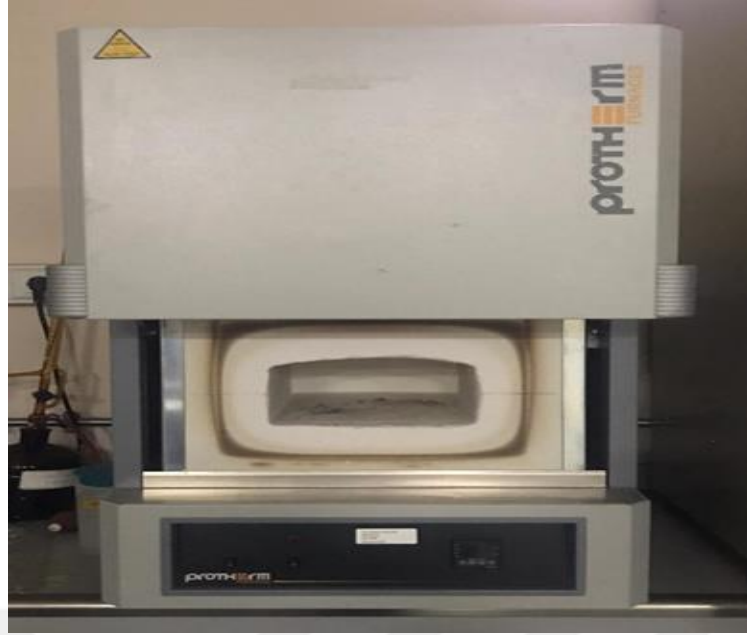
İç boyutları (YxGxD): 11x21x28 cm

İç hacim (Lt): 6,5

Dış boyutları (YxGxD): 65x55x58 cm

Maksimum güç (KW) / Faz: 2,7/1

Şekil 4.4’de Protherm Marka PLF 115M Model kül fırını görülmektedir.



Şekil 4. 4 Protherm marka PLF 115M model kül fırını

- **Hassas Tartı**

Marka : AND

Model: GR- 202

Kapasite (g): 210 x 0,0001 / 42 x 0,00001

Yüzde minimum aralık: % 0,00, % 0,1, %1 Otomatik

Sayma minimum ağırlık (mg): 0,1

Doğrusallık (g): $\pm 0,0002$ / $\pm 0,00003$

Tekrarlanabilirlik (g): 0,0001 / 0,00002

Stabilite süresi (sn): 3,5 / 8

Drift hassasiyeti: ± 2 ppm / °C (10 °C -30 °C / 50 °F - 86 °F)

Gösterge yenilemesi: Saniyede 5 kez (stabil iken) / saniyede 10 kez
(stabil değil iken)

Fiziksel ebadlar (mm): 249 x 330 x 327 (G x D x Y)

Koruma kabini (mm): 178 x 160 x 233 (G x D x Y)

Çalışma sıcaklığı (°C): 5 / 40 (41 °F - 104 °F RH % 85'ten az)

Ağırlık (yaklaşık): 6,0 kg / 13,2 lbs

Güç: 220, 240 VAC (AC adaptör) 50Hz

Şekil 4.5'te AND Marka GR- 202 Model hassas tartı gösterilmektedir.



Şekil 4. 5 AND marka GR- 202 model hassas tartı

- **Kızılötesi Termometre**

Marka : Extech

Model: VIR 50

IR Ölçüm Aralığı: -50 ... + 2200 °C

Çözünürlük: 0,1° < 1000°, 1° ≥ 1000°

Hassasiyet: -50°C ... -20°C: Belirtilmemiş -19,9°C ... -1°C: ±(2% +3,3°C) -0,9°C ... 100°C: ±(1% +2,2°C) 100,1°C ... 454°C: ±(2,5% +2,2°C) 454,1°C ... 1000°C: ±(2,5% +3,3°C) 1001°C ... 2200°C: ±(3% +5°C)

Emisyon: 0,10 ... 1,00

Görüş Alanı: 50:1 (uzaklık: hedef nokta)

IR Dalga Boyu: 8 ... 14 μm

Tekrarlanabilirlik: -50°C ... 20°C: $\pm 1,5^\circ\text{C}$ 20°C ... 1000°C: $\pm 0,5\%$ veya
 $\pm 0,5^\circ\text{C}$ 1000°C ... 2200°C: $\pm 1,0\%$

Tepkime Süresi: 150 ms

Şekil 4.6'da Extech Marka VIR 50 Model kızılötesi termometre gösterilmiştir.



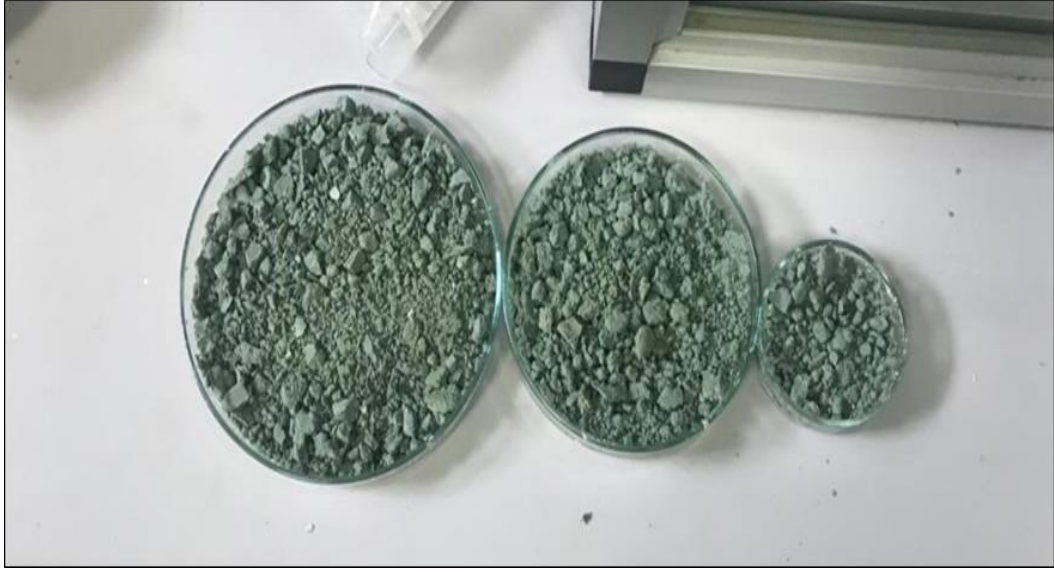
Şekil 4. 6 Extech marka VIR 50 model kızılötesi termometre

4.2 Metot

4.2.1 Çamurların Hazırlanması

Çamur, rastgele gevşek yığın (Şekil 4.7) ve sıkıştırılmış yığın şeklinde (Şekil 4.8) 5 cm, 9 cm ve 11 cm çaplı cam petri kaplarına konulmuştur.

Gevşek yığın şeklinde hazırlanan çamur örnekleri ufalanabildiği kadar ufalanarak rastgele dağınık bir şekilde; sıkıştırılmış yığın şeklinde hazırlanan çamurlar ise olabildiğince sıkıştırılarak petri kaplarına konulmuştur.



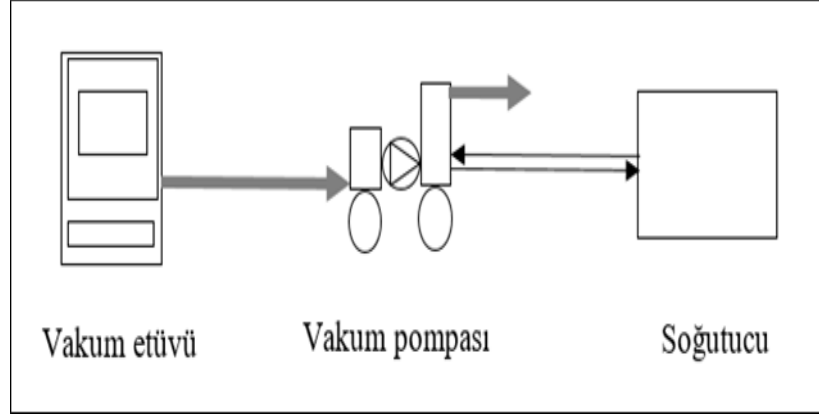
Şekil 4. 7 Rastgele gevşek yığın şeklindeki çamurlar



Şekil 4. 8 Sıkıştırılmış yığın şeklindeki çamurlar

4.2.2 Deney Düzeneği

Vakum etüvü, borular yardımıyla vakum pompasına; vakum pompası da aynı şekilde borular ile soğutucuya (yoğuşturucu) bağlanmıştır. Her ölçüm için cam petri kabı içerisindeki çamur, vakum etüvü içerisine konulmuş, etüv gereken sıcaklık ayarına getirilmiştir. Aynı anda vakum pompasında çalışılacak basınç değeri ayarlanmış ve yoğuşturucu da 5 °C’de çalıştırılmıştır. Yoğuşturucu, çamurun kuruması sırasında buharlaşan suyun, yoğuşarak vakum pompasındaki balonlarda birikmesini sağlamıştır.



Şekil 4. 9 Deney düzeneği şeması

Deneylerde, 30 mbar vakum değerinde ve karşılaştırma yapabilmek amacıyla da 1000 mbar atmosfer basıncında çalışma yapılmıştır.

- 30 mbar vakum değerinde sırasıyla; 50 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklıklarda çalışılmıştır. Ayrıca çalışılan her bir sıcaklık değerinde de üç farklı yüzey alanına sahip (5 cm, 9 cm ve 11 cm çaplı cam petri kaplarında) petri kaplarına konulmuş çamurlar ile kurutma deneyleri yapılmıştır.
- 1000 mbar atmosfer basıncında ise; 100 °C ve 200 °C sıcaklıklarda çalışılmıştır. Bu basınç değerinde 50 °C sıcaklıkta çalışılmamasının nedeni; yapılan ön çalışmalar neticesinde bu sıcaklık ve basınç değerinde verimin oldukça düşük olması ve kayda değer bir kuruma oranı elde edilememesidir. Bu deneyde de 30 mbar vakum değerinde olduğu gibi çalışılan her bir sıcaklık değerinde de üç farklı yüzey alanına sahip (5 cm, 9 cm ve 11 cm çaplı cam petri kaplarında) petri kaplarına konulmuş çamurlar ile kurutma deneyleri yapılmıştır.
- Çalışmada ayrıca, 10 mbar, 30 mbar ve 1000 mbar basınç altında 50 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık ve 120 dakikada çamurun kuruma verimleri tek tek incelenmiştir. 1000 mbar basınç değeri bir vakum değeri olmayıp, yaklaşık atmosferik basıncı temsil etmektedir. Bu değerın uygulanmasının sebebi ise, vakum etkisinin tamamen devre dışı bırakılıp sıcaklığın etkisini ortaya koymaktır. Seçilen sıcaklık ve vakum değerlerinde çalışılmasının nedeni, yapılan ön çalışma sonuçlarında elde edilmiş uygun değerler olmasındandır.

Ayrıca deney süresince kurutulan çamurlar için, toplam organik madde analizleri ve vakum pompasının balonlarında biriken sular için ise toplam organik karbon analizleri yapılmıştır.

4.2.3 Çamur Sıcaklıklarının Ölçülmesi

Çamurlar deney süresince Nuve marka EV018 tipli vakum etüvünde belirli sıcaklıklara (50 °C, 100 °C, 200 °C) maruz bırakılmıştır. Fakat etüv içerisinde vakum etkisi olduğundan, çamur örnekleri tam olarak ayarlanmış olan sıcaklık değerlerine gelememiştir. Bu yüzden çamur örneklerinin sıcaklık değerlerini tam olarak belirlemek amacıyla Extech marka VIR 50 model kızılötesi termometre kullanılmıştır. Çamur örnekleri, ağırlık azalmalarını belirlemek için her etüvden çıkarıldığında kızılötesi termometre ile çamur sıcaklıkları ölçümü yapılmıştır.

4.2.4 Çamurun Nem Muhtevasının (Başlangıç Nemi) Hesaplanması

Çamurun nem muhtevasının (ilk neminin) belirlenmesi için; çamur örneğinin ağırlığı belirlendikten sonra kurutma fırınında 103°C'de 1 saat boyunca kurutulmuş ve bu işlemten sonra tekrar ağırlık ölçümü yapılmıştır.

Bu işlem sonucunda nem muhtevasını belirlemek amacıyla Eşitlik 4.1 kullanılmıştır.

$$\text{Nem muhtevası} = \frac{\text{Başlangıç (g)} - \text{Kurutma sonrası (g)}}{\text{Başlangıç (g)}} * 100 \quad (4.1)$$

Yapılan işlemler sonucunda kullanılan çamurun nem muhtevasının yaklaşık %55 olduğu belirlenmiştir.

4.2.5 Çamurun Nem İçeriğinin Hesaplanması

Deneyler sırasında, nem değişimini belirlemek için ise, deneyin başından itibaren kurutulmakta olan çamur örnekleri, belli zaman aralıkları ile alınıp, hassas terazide tartılmıştır. Tartma işlemi, çamur örneklerinin ağırlıklarındaki azalma durana kadar devam etmiştir. Fakat, çamurun tamamen kurummasının günler mertebesinde olacağı şartlar için (50 °C sıcaklık gibi) diğer şartlarda gerçekleşen kuruma süreleri baz

alınmıştır ve böylece farklı şartlarda gerçekleşen kuruma işlemlerinin birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır.

Kurutma deneyleri sonucunda, kuruma eğrilerinin çizilmesi için deneylerde alınan ağırlık azalması verilerinin nem içeriği ve boyutsuz nem içeriği değerlerine dönüştürülmesi gereklidir (Dadalı, 2007).

Eşitlik 4.2’de deneysel verilerin herhangi bir t anındaki nem içeriği hesabı verilmektedir.

$$M_t = \frac{m - KM}{KM} \quad (4.2)$$

M_t: Herhangi bir t anındaki nem içeriği (g su. g kuru madde⁻¹)

m: Numunenin ağırlığı (g)

KM: Numunenin içerdiği kuru madde miktarı (g) olarak tanımlanmıştır.

4.2.6 Çamurun Nem Oranının Hesaplanması

Kuruma hızının belirlenmesi için Alınabilir Nem Oranı (ANO) kavramı kullanılmıştır (Mengeş, 2005). Boyutsuz bir terim olan ANO Eşitlik 4.3’te verilmektedir.

$$ANO = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4.3)$$

ANO: Alınabilir Nem Oranı (birimsiz)

M_e: Denge anındaki nem içeriği (gsu. gkuru madde⁻¹)

M₀: Başlangıçtaki nem içeriği (gsu. gkuru madde⁻¹)

M_t: t anındaki nem içeriği (gsu. gkuru madde⁻¹)

4.2.7 Kuruma Sabitlerinin (k) Belirlenmesi

Çamurdan, kurutma şartlarına bağlı olarak meydana gelen % nem kaybı ya da kuruma süresine bağlı olarak Alınabilir Nem Oranı (ANO)’nın göstermiş olduğu eğilimin belirlenmesi, deney şartlarına benzer ortamlarda aynı çamurun belli sürelerde ulaşabileceği nem miktarını veya istenilen nem değerine ulaşması için gereken zamanı belirlemek için yardımcı olacaktır. Fakat bunun belirlenmesi için,

çamurun nem değişim eğrilerinin eğimlerinin bilinmesi şarttır. Bu eğimler, birim zamanda ANO değerindeki değişim eğimini belirlemekte ve bu sebeple de kuruma sabiti olarak tanımlanmaktadır (Yağcıoğlu, 1981; Mengeş, 2005).

Kuruma sabitleri belirlenirken sıfırıncı, birinci, ikinci ve üçüncü dereceden kinetik denklemleri kullanılarak her sıcaklık, basınç ve yüzey alanı parametreleri için ayrı ayrı grafikler çizilerek k ve r (korelasyon katsayısı) değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre en yüksek r değerine sahip kinetik denklem kuruma denklemi olarak seçilmiştir.

Sıfırıncı derece kinetik denklemi;

$$[A] - [A_0] = -akt \quad (4.4)$$

Birinci derece kinetik denklemi;

$$\ln \frac{[A]}{[A_0]} = -akt \quad (4.5)$$

İkinci derece kinetik denklemi;

$$\frac{[1]}{[A]} - \frac{[1]}{[A_0]} = akt \quad (4.6)$$

Üçüncü derece kinetik denklemi;

$$\frac{1}{[A]^2} - \frac{1}{[A_0]^2} = 2akt \quad (4.7)$$

4.2.7.1 Kinetik Denkleminin Lineerize Edilmiş Formları

Sıfırıncı derece kinetik denklemi;

$$ANO = -kt \quad (4.8)$$

Birinci dereceden kinetik denklemi;

$$ANO = \exp (-kt) \quad (4.9)$$

İkinci dereceden kinetik denklemi;

$$\frac{1}{ANO} = kt \quad (4.10)$$

Üçüncü derece kinetik denklemi;

$$\frac{1}{ANO} = 2kt \quad (4.11)$$

4.2.8 Toplam Organik Madde Tayini (TOM)

Deneyler sonrasında, kurumuş olan çamurlara Toplam Organik Madde Tayini yapılmıştır. Bunun için Extech marka kül fırını kullanılmıştır. Yaklaşık 2 gram ağırlıktaki çamur örneği, ufalanmış bir şekilde porselen kaplara konup kül fırınında 550 °C sıcaklıkta 30 dakika yakılmıştır. Bu yakma işleminden sonra soğuyan çamur örneklerinin son tartımları alınmıştır.

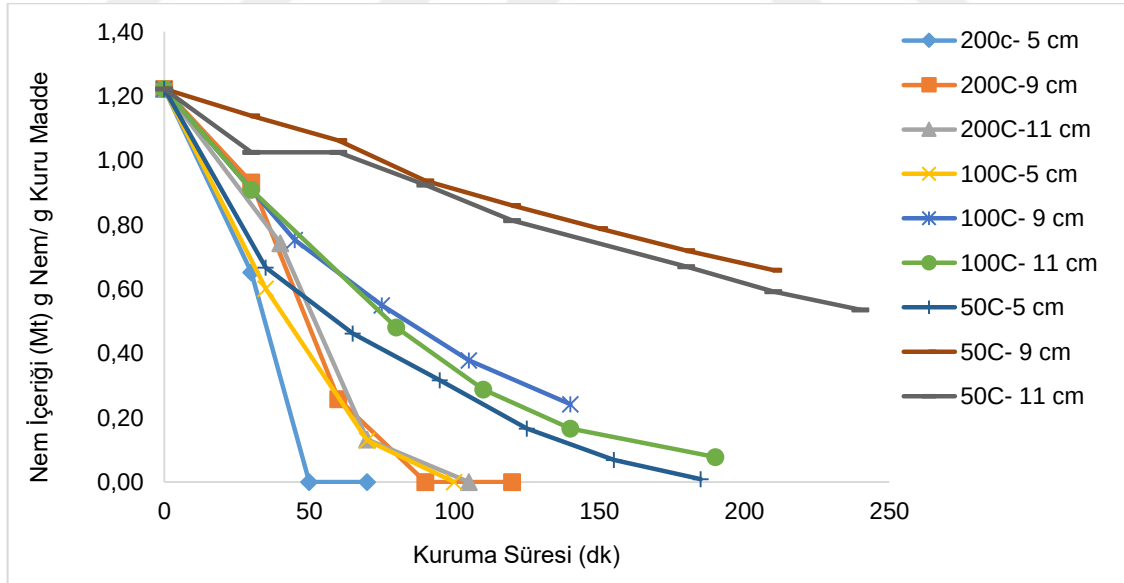


Bu bölümde; sıcaklık, vakum, yığın şekli ve yüzey alanı parametrelerinin kuruma üzerindeki etkilerine yer verilmiştir.

5.1 Sıcaklık, Yığın Şekli ve Yüzey Alanının Çamur Kurumasına Etkileri

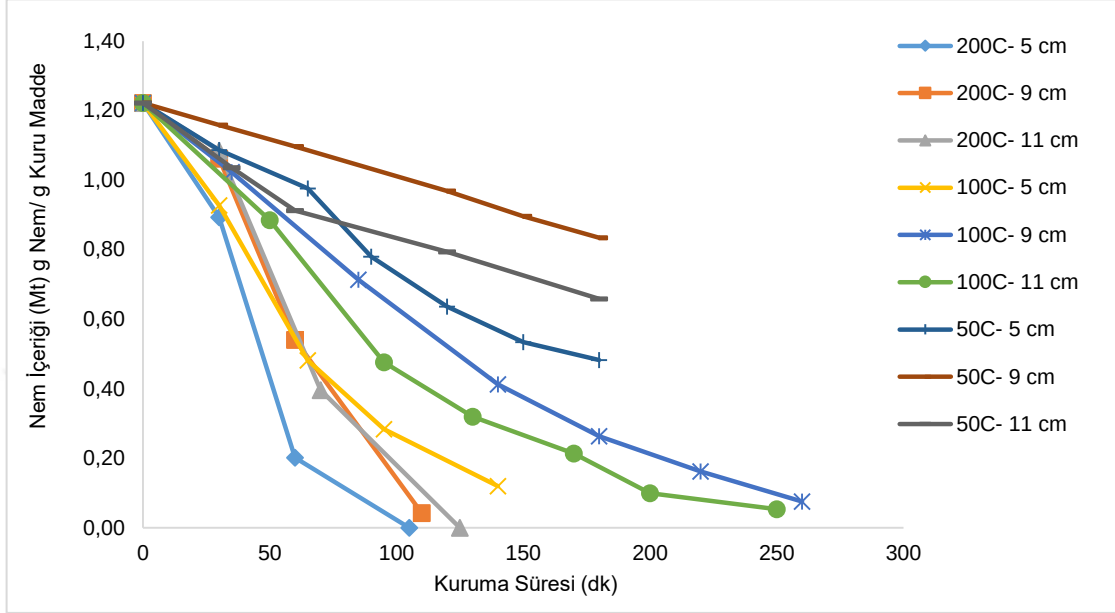
5.1.1 30 mbar Vakumlu Ortamda Kurutma Sonuçları

Çamur numuneleri 5 cm, 9 cm ve 11cm çaplı cam kaplara (farklı yüzey alanlarında) gevşek yığın şekilde yüklenerek 30 mbar vakum altında ve 50 °C, 100 °C ve 200 °C etüv sıcaklıklarında kurumaya bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre, çamurun nem içeriğinin (M_t) (Eşitlik 4.2); zamana, sıcaklığa ve yüzey alanına bağlı gösterdiği değişim Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5. 1 30 mbar vakum altında, gevşek çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri

Çamur, 100 °C ve 200 °C etüv sıcaklığında 5 cm, 9 cm ve 11 cm çaplı kaplarda (farklı yüzey alanlarında) kurumaya bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre, çamurun nem içeriğinin (Eşitlik 4.2); zamana, etüv sıcaklığına ve yüzey alanına bağlı gösterdiği değişim Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5. 2 30 mbar vakum altında, sıkıştırılmış çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri

Görüldüğü üzere (Şekil 5.1, Şekil 5.2), etüv sıcaklığı arttıkça çamurun nem içeriğindeki azalma (kuruma) daha hızlı gerçekleşmektedir. Çamurun kurumasında sıcaklığın etkisi kıyaslandığında; 200°C > 100°C > 50°C olduğu görülmektedir.

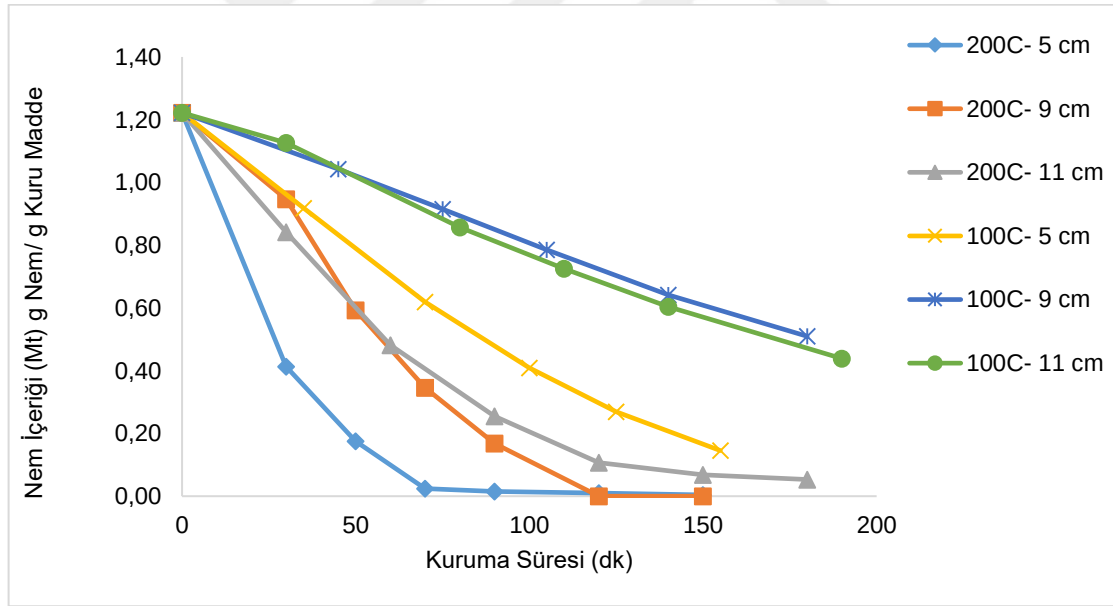
Çamurun yüzey alanının kurumaya etkisine bakıldığında ise, kütlesi en az olan 5 cm çaplı çamur örneği en hızlı kuruma hızına sahiptir. 9 cm ve 11 cm çaplı çamur örneklerinin ise kütleleri ve çapları nispeten birbirlerine yakındır. Bu nedenle yaklaşık olarak aynı kuruma hızlarına sahip olduğu görülmüştür. Fakat, 30 mbar 50 °C’de kuruma hızlarının 5 > 11 cm > 9 cm olduğu görülmüştür. Burada 9 cm ve 11 cm çamur örneklerinin ağırlıkları (Tablo 5.1) neredeyse birbiriyle aynı olduğundan yüzey alanı büyük olan 11 cm çaplı çamur örneği daha hızlı kurumıştır.

Tablo 5. 1 30 mbar vakum ortamında kurumaya bırakılan çamurların başlangıç kütleleri

200 °C		100 °C		50 °C	
Gevşek yığın (5 cm)	13,49 g	Gevşek yığın (5 cm)	13,38 g	Gevşek yığın (5 cm)	13,01 g
Gevşek yığın (9 cm)	59,34 g	Gevşek yığın (9 cm)	62,68 g	Gevşek yığın (9 cm)	72,77 g
Gevşek yığın (11 cm)	80,49 g	Gevşek yığın (11 cm)	80,88 g	Gevşek yığın (11cm)	74,42 g
Sıkıştırılmış yığın (5 cm)	26,58 g	Sıkıştırılmış yığın (5 cm)	27,61 g	Sıkıştırılmış yığın (5 cm)	26,16 g
Sıkıştırılmış yığın (9 cm)	102,51 g	Sıkıştırılmış yığın (9 cm)	106,22 g	Sıkıştırılmış yığın (9 cm)	97,34 g
Sıkıştırılmış yığın (11 cm)	137,41 g	Sıkıştırılmış yığın (11 cm)	144,01 g	Sıkıştırılmış yığın (11 cm)	115,23 g

5.1.2 1000 mbar Basıncı Ortamda Kurutma Sonuçları

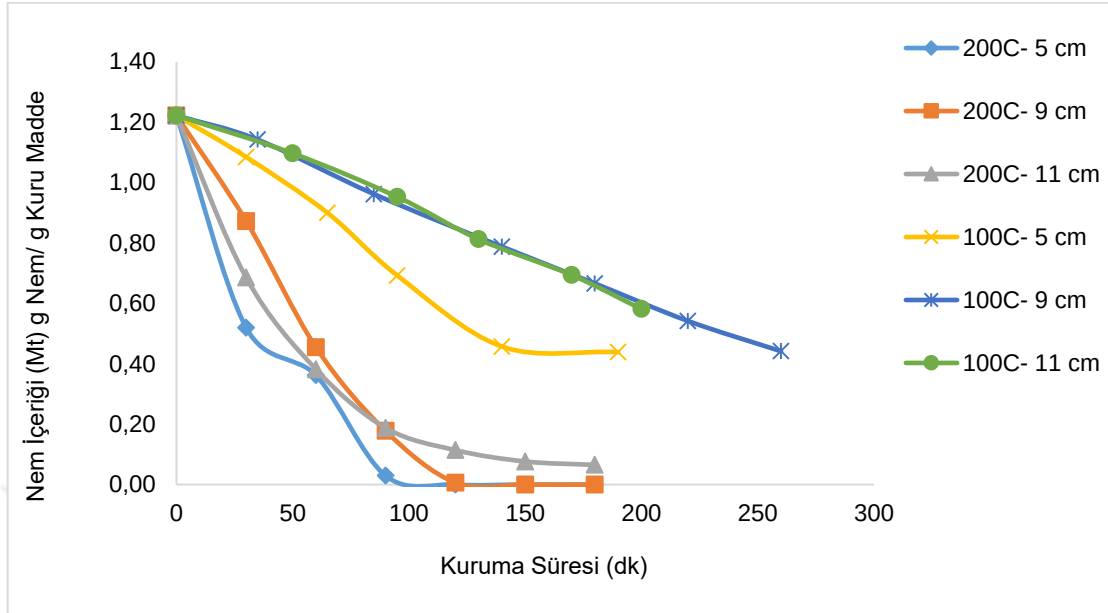
Gevşek yığın halindeki çamur, 100 °C ve 200 °C etüv sıcaklığında 5 cm, 9 cm ve 11 cm çaplı kaplarda (farklı yüzey alanlarında) kurumaya bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre, çamurun nem içeriğinin (Eşitlik 4.2); zamana, etüv sıcaklığına ve yüzey alanına bağlı gösterdiği değişim Şekil 5.3’de görülmektedir.



Şekil 5. 3 1000 mbar basınç altında, gevşek çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri

1000 mbar basınç altındaki sıkıştırılmış yığın şeklindeki çamur, 100 °C ve 200 °C etüv sıcaklığında 5cm, 9 cm ve 11 cm çaplı kaplarda (farklı yüzey alanlarında) kurumaya bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre, çamurun nem içeriğinin (Eşitlik

4.2); zamana, etüv sıcaklığına ve yüzey alanına bağlı gösterdiği değişim Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5. 4 1000 mbar basınç altında, sıkıştırılmış çamur yığın şekillerine ait farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri

Görüldüğü üzere (Şekil 5.3, Şekil 5.4), etüv sıcaklığı arttıkça çamurun nemindeki azalma (kuruma) daha hızlı gerçekleşmektedir. Çamurun kurumasında sıcaklığın etkisi kıyaslandığında; 200 °C > 100 °C olduğu görülmektedir.

Çamurun yüzey alanının kurumaya etkisine bakıldığında ise, kütlesi en az olan 5 cm çaplı çamurun en hızlı kuruma hızına; 9 cm ve 11 cm çaplı çamur örneklerinin ise kütleleri (Tablo 5.2) ve çapları nispeten birbirlerine yakın olduğundan yaklaşık olarak aynı kuruma hızlarına sahip olduğu görülmüştür.

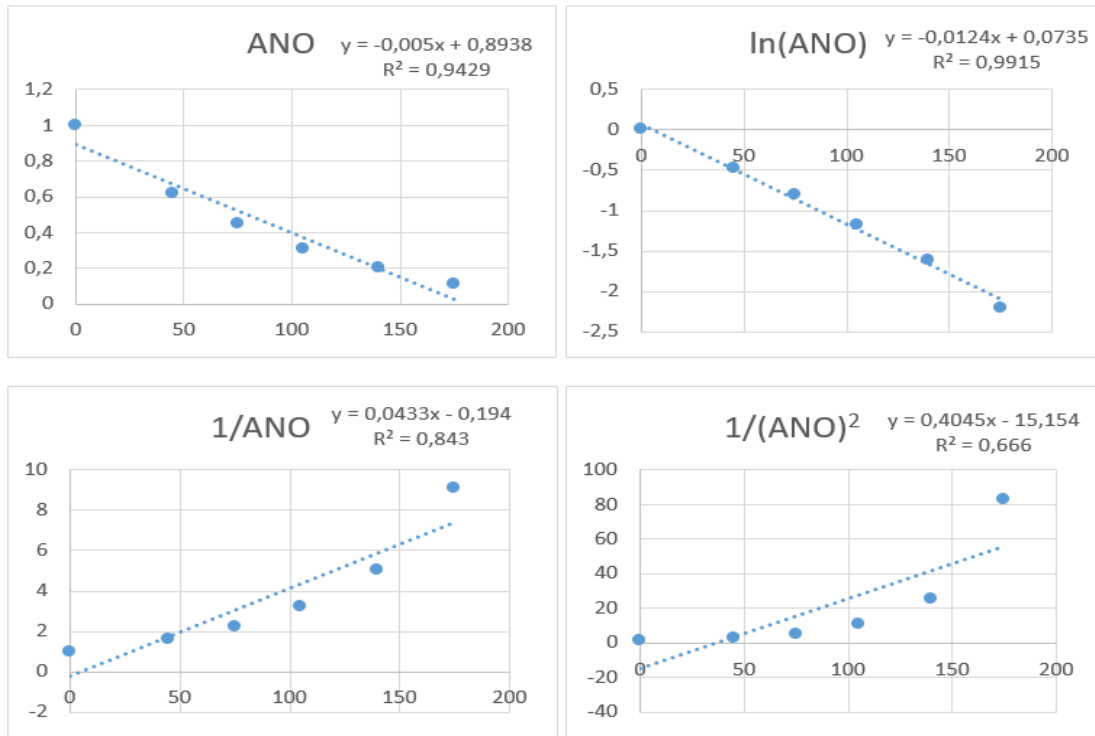
Tablo 5. 2 1000 mbar basınç ortamında kurumaya bırakılan çamurların başlangıç kütleleri

200 °C		100 °C	
Gevşek yığın (5cm)	14,01 g	Gevşek yığın (5cm)	14,92 g
Gevşek yığın (9cm)	65,04 g	Gevşek yığın (9cm)	64,74 g
Gevşek yığın (11cm)	100,42 g	Gevşek yığın (11cm)	89,28 g
Sıkıştırılmış yığın (5 cm)	25,39 g	Sıkıştırılmış yığın (5 cm)	26,63 g
Sıkıştırılmış yığın (9 cm)	101,7 g	Sıkıştırılmış yığın (9 cm)	80,76 g
Sıkıştırılmış yığın (11 cm)	136,16 g	Sıkıştırılmış yığın (11 cm)	91,51 g

5.2 Farklı Şartlarda Kurutulan Çamurlara Ait Kuruma Sabiti Değerleri

Tablo 5.3'te 30 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti (k) ve regresyon katsayısı (R^2) değerleri yer almaktadır. Kuruma kinetiğini hesaplamak amacıyla her deney şartı için 0. derece, 1. derece, 2.derece ve 3. derece için k ve R^2 değerleri hesaplanmıştır ve optimum değerler seçilmiştir.

Örneğin; 30 mbar, 100 °C sıcaklıkta kurutulan 9 cm çaplı gevşek çamur yığını için; 0. derece, 1. derece, 2.derece ve 3. derece kinetik grafikleri çizilmiş (Şekil 5.5) bu grafiklerde R^2 değeri en yüksek olan $\ln(ANO)$ grafiği (1.derece kinetik) uygun görülmüş ve bu kinetik denklemine göre k değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5. 5 30 mbar, 100 °C sıcaklıkta kurutulan 9 cm çaplı gevşek çamur yığını için dört farklı kinetik denklemleri eğrisi

Tablo 5.3'te 30 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri verilmiştir. Buna göre;

- 30 mbar vakum altında 200 °C sıcaklıkta kurutulan gevşek çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri $k=-0,0661 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,8946$ 'dır.
- 30mbar vakum altında 200 °C sıcaklıkta kurutulan sıkıştırılmış çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri $k=-0,0381 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,9032$ 'dir.

Tablo 5. 3 30 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri

		200°C							
		0. derece		1. derece		2. derece		3. derece	
		k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²
Gevşek çamur yığını	r=5 cm	-0,0155	0,9246	-0,1112	0,8381	14,4670	0,8169	6659,0000	0,7062
	r=9 cm	-0,0091	0,9000	-0,0428	0,9378	0,8223	0,8015	37,4940	0,6759
	r=11 cm	-0,0100	0,9427	-0,0444	0,9080	0,8709	0,6502	86,0780	0,5931
	ort	-0,0115	0,9224	-0,0661	0,8946	5,3867	0,7562	2260,8573	0,6584
Sıkıştırılmış çamur yığını	r=5 cm	-0,0100	0,9167	-0,0454	0,9365	0,9335	0,7386	46,7560	0,7036
	r=9 cm	-0,0092	0,9746	-0,0313	0,8872	0,2507	0,7603	3,6684	0,7310
	r=11 cm	-0,0085	0,9579	-0,0375	0,8858	0,7791	0,7347	39,2040	0,7193
	ort	-0,0092	0,9497	-0,0381	0,9032	0,6544	0,7445	29,8761	0,7180

R²: Korelasyon Katsayısı

k: hız sabiti

Tablo 5.4'te 30 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti (k) ve regresyon katsayısı (R²) değerleri yer almaktadır. Buna göre:

- 30mbar vakum altında 100 °C sıcaklıkta kurutulan gevşek çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri, $k=-0,0198 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,9801$ 'dir.
- 30 mbar vakum altında 100 °C sıcaklıkta kurutulan sıkıştırılmış çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna

göre, kuruma sabiti değeri $k=-0,0286 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,9210$ 'dir.

Tablo 5. 4 30 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri

		100 °C							
		0. derece		1. derece		2. derece		3. derece	
		k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²
Gevşek çamur yığını	r=5 cm	-0,0128	0,9940	-0,0321	0,9566	0,1204	0,8401	0,6280	0,7766
	r=9 cm	-0,0050	0,9429	-0,0124	0,9915	0,0433	0,8430	0,2023	0,6660
	r=11 cm	-0,0051	0,9265	-0,0148	0,9923	0,0716	0,8200	0,5425	0,6351
	ort	-0,0076	0,9545	-0,0198	0,9801	0,0784	0,8344	0,4576	0,6926
Sıkıştırılmış çamur yığını	r=5 cm	-0,0067	0,9456	-0,0170	0,9900	0,0634	0,8592	46,3950	0,5899
	r=9 cm	-0,0092	0,9746	-0,0313	0,8872	0,2507	0,7603	3,6684	0,7310
	r=11 cm	-0,0085	0,9579	-0,0375	0,8858	0,7791	0,7347	39,2040	0,7193
	ort	-0,0081	0,9594	-0,0286	0,9210	0,3644	0,7847	29,7558	0,6801

R²: Korelasyon Katsayısı

k: hız sabiti

Tablo 5.5'te 30 mbar vakum değerinde, 50 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti (k) ve regresyon katsayısı (R²) değerleri yer almaktadır. Buna göre:

- 30mbar vakum altında 50 °C sıcaklıkta kurutulan gevşek çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri, $k=-0,0099 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,9595$ 'tir.
- 30mbar vakum altında 50 °C sıcaklıkta kurutulan sıkıştırılmış çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri $k=0,00003 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,9858$ 'dir.

Tablo 5. 5 30 mbar vakum değerinde, 50 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri

		50 °C							
		0. derece		1. derece		2. derece		3. derece	
		k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²
Gevşek çamur yığını	r=5 cm	-0,0049	0,8906	-0,0235	0,8932	0,0929	0,7334	29,1410	0,3802
	r=9 cm	-0,0022	0,9919	-0,0030	0,9969	0,0041	0,9883	0,0058	0,9665
	r=11 cm	-0,0022	0,9797	-0,0033	0,9884	0,0052	0,9731	0,0085	0,9394
	ort	-0,0031	0,9541	-0,0099	0,9595	0,0341	0,8983	9,7184	0,7620
Sıkıştırılmış çamur yığını	r=5 cm	-0,0036	0,9787	0,0055	0,9825	0,0090	0,9641	0,0156	0,9276
	r=9 cm	-0,0018	0,9996	-0,0021	0,9962	0,0026	0,9880	0,0032	0,9754
	r=11 cm	-0,0024	0,9461	-0,0033	0,9788	0,0046	0,9925	0,0132	0,9875
	ort	-0,0026	0,9748	0,00003	0,9858	0,0054	0,9815	0,0107	0,9635

R²: Korelasyon Katsayısı

k: hız sabiti

Tablo 5.6'da 1000 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti (k) ve regresyon katsayısı (R²) değerleri yer almaktadır. Buna göre:

- 1000 mbar vakum altında 200 °C sıcaklıkta kurutulan gevşek çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri, $k=-0,0307 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,9535$ 'dir.
- 1000 mbar vakum altında 200 °C sıcaklıkta kurutulan sıkıştırılmış çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri $k=-0,0267 \text{ dk}^{-1}$, regresyon katsayısı ise $R^2=0,9119$ 'dir.

Tablo 5. 6 1000 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri

		200 °C							
		0. derece		1. derece		2. derece		3. derece	
		k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²
Gevşek çamur yığını	r=5 cm	-0,0077	0,7211	-0,0396	0,9383	1,8389	0,7915	240,6950	0,5611
	r=9 cm	-0,0071	0,9071	-0,0336	0,9385	0,6201	0,7156	27,5635	0,5863
	r=11 cm	-0,0053	0,8715	-0,0190	0,9836	0,1283	0,8991	1,3946	0,7748
	ort	-0,0067	0,8332	- 0,0307	0,9535	0,8624	0,8021	89,8844	0,6407
Sıkıştırılmış çamur yığını	r=5 cm	-0,0061	0,7954	-0,0331	0,9321	0,6441	0,8491	28,1920	0,6641
	r=9 cm	-0,0056	0,8517	-0,0300	0,8274	0,6914	0,3917	42,1470	0,1697
	r=11 cm	-0,0048	0,7970	-0,0171	0,9761	0,1060	0,9496	0,9866	0,8393
	ort	-0,0055	0,8147	- 0,0267	0,9119	0,4805	0,7301	23,7752	0,5577

R²: Korelasyon Katsayısı

k: hız sabiti

Tablo 5.7’de 1000 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti (k) ve regresyon katsayısı (R²) değerleri yer almaktadır. Buna göre:

- 1000 mbar vakum altında 100 °C sıcaklıkta kurutulan gevşek çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri, k=-0,0080 dk⁻¹, regresyon katsayısı ise R²=0,9847’dir.
- 1000 mbar vakum altında 100 °C sıcaklıkta kurutulan sıkıştırılmış çamur yığınının, 1. derece kuruma kinetiğine uygun olduğu görülmektedir. Buna göre, kuruma sabiti değeri k=-0,0046 dk⁻¹, regresyon katsayısı ise R²=0,9754’dir.

Tablo 5. 7 1000 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta deneysel çalışmalar sonucunda bulunan kuruma sabiti değerleri

		100 °C							
		0. derece		1. derece		2. derece		3. derece	
		k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²	k (dk ⁻¹)	R ²
Gevşek çamur yığını	r=5 cm	-0,0058	0,9832	-0,0136	0,9737	0,0433	0,8062	0,1841	0,6253
	r=9 cm	-0,0033	0,9983	-0,0049	0,9894	0,0077	0,9493	0,0091	0,9139
	r=11 cm	-0,0035	0,9923	-0,0055	0,9909	0,0092	0,9436	0,0167	0,8619
	ort	-0,0042	0,9913	-0,0080	0,9847	0,0201	0,8997	0,0699	0,8004
Sıkıştırılmış çamur yığını	r=5 cm	-0,0037	0,9467	-0,0060	0,9554	0,0107	0,9389	0,0200	0,9084
	r=9 cm	-0,0025	0,9982	-0,0039	0,9859	0,0066	0,9355	0,0117	0,8566
	r=11 cm	-0,0025	0,9927	-0,0038	0,9849	0,0061	0,9483	0,0103	0,8896
	ort	-0,0029	0,9792	-0,0046	0,9754	0,0078	0,9409	0,0140	0,8849

R²: Korelasyon Katsayısı

k: hız sabiti

Değişim azalan bir karakterde olduğundan kuruma sabiti (k) değerleri negatif bulunmuştur. Kuruma sabiti değerlerine bakıldığında (Tablo 5.8) sıcaklık artışıyla k değerlerinin de arttığı görülmektedir.

Tablo 5. 8 Kuruma kinetiği hesabı sonucunda hesaplanan kuruma sabiti değerlerinin özet tablosu

	30 mbar			1000 mbar	
	200 °C sıcaklıktaki k değeri (dk ⁻¹)	100 °C sıcaklıktaki k değeri (dk ⁻¹)	50 °C sıcaklıktaki k değeri (dk ⁻¹)	200 °C sıcaklıktaki k değeri (dk ⁻¹)	100 °C sıcaklıktaki k değeri (dk ⁻¹)
Gevşek Çamur Yığını	k=-0,0661	k=-0,0198	k=-0,0099	k=-0,0307	k=-0,0080
Sıkıştırılmış Çamur Yığını	k=-0,0381	k=-0,0286	k=-0,00003	k=-0,0267	k=-0,0046

30 mbar vakum altındaki çalışma için (Tablo 5.8);

- Maksimum R² değerini takiben, en yüksek kuruma sabiti değeri (k), 200 °C'de gevşek çamur yığnında görülmüştür (k=-0,0661 dk⁻¹).

- Maksimum R^2 değerini takiben, en düşük kuruma sabiti değeri (k), 50 °C’de sıkıştırılmış çamur yığnında görölmüştür ($k= -0,00003 \text{ dk}^{-1}$).

1000 basınç altındaki çalışma için (Tablo 5.8);

- Maksimum R^2 değerini takiben, en yüksek kuruma sabiti değeri (k), 200 °C’de gevşek çamur yığnında görölmüştür ($k= -0,0307 \text{ dk}^{-1}$).
- Maksimum R^2 değerini takiben, en düşük kuruma sabiti değeri (k), 100 °C’de sıkıştırılmış çamur yığnında görölmüştür ($k=-0,0046 \text{ dk}^{-1}$).

Kinetik çalışması sonucunda, kuruma kinetiğinin 1. Derece kinetiğe uygun olduğı görölmüştür ve 1. Derece kinetiğın lineerize edilmiş formu: $\ln (ANO)= - kt$ förmölüdür. Buna göre k değerlerini fömölde yerine koyarak zamana bağı kuruma değerleri aşğıdaki denklemler ile elde edilebilir:

- 30 mbar vakumda ve 200 °C sıcaklıkta gevşek yığn şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO)= -0,0661* t \quad (5.1)$$

t (dk): kuruma süresi

- 30 mbar vakumda ve 200 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış yığn şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO)= -0,0381* t \quad (5.2)$$

t (dk): kuruma süresi

- 30 mbar vakumda ve 100 °C sıcaklıkta gevşek yığn şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO)= -0,0198* t \quad (5.3)$$

t (dk): kuruma süresi

- 30 mbar vakumda ve 100 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış yığn şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO)= -0,0286* t \quad (5.4)$$

t (dk): kuruma süresi

- 30 mbar vakumda ve 50 °C sıcaklıkta gevşek yığın şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO) = -0,0099 * t \quad (5.5)$$

t (dk): kuruma süresi

- 30 mbar vakumda ve 50 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış yığın şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO) = -0,00003 * t \quad (5.6)$$

t (dk): kuruma süresi

- 1000 mbar basınç değerinde ve 200 °C sıcaklıkta gevşek yığın şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO) = -0,0307 * t \quad (5.7)$$

t (dk): kuruma süresi

- 1000 mbar basınç değerinde ve 200 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış yığın şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO) = -0,0267 * t \quad (5.8)$$

t (dk): kuruma süresi

- 1000 mbar basınç değerinde ve 100 °C sıcaklıkta gevşek yığın şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO) = -0,0080 * t \quad (5.9)$$

t (dk): kuruma süresi

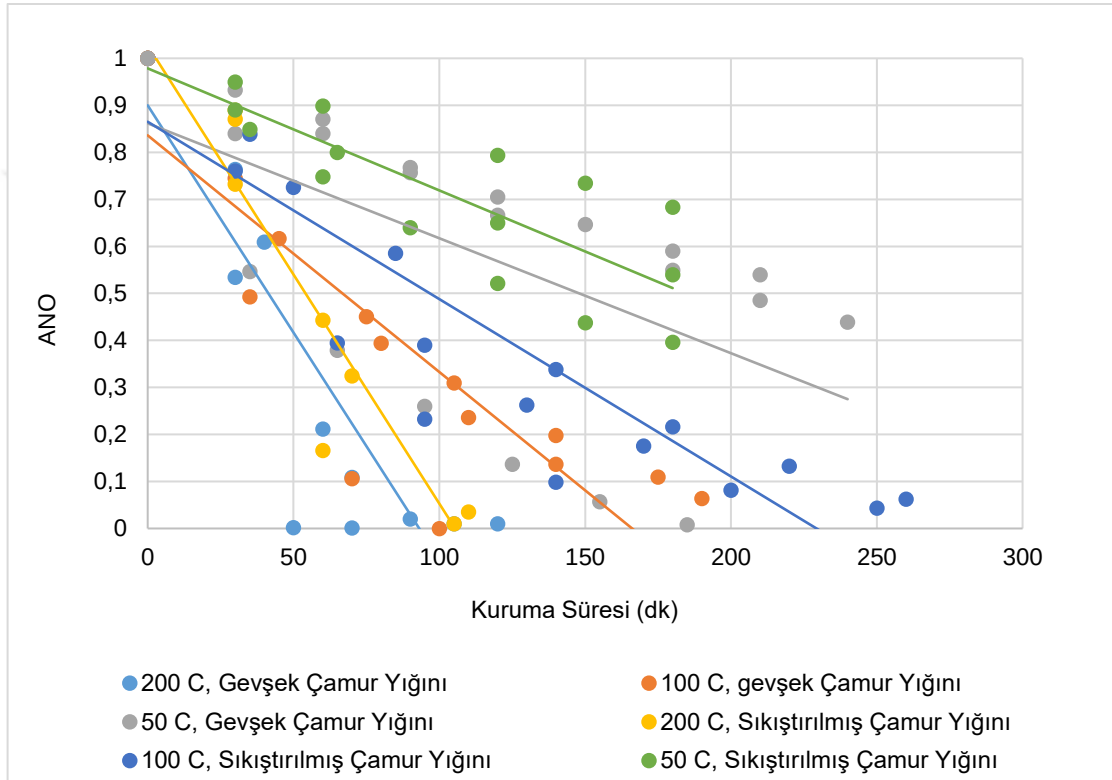
- 1000 mbar basınç değerinde ve 100 °C sıcaklıkta sıkıştırılmış yığın şeklindeki çamur kütlesi için;

$$\ln (ANO) = -0,0046 * t \quad (5.10)$$

t (dk): kuruma süresi

5.3 Farklı Sıcaklıklarda Kurutulan Çamur Kütleleri İçin ANO-Kuruma Süresi Karşılaştırması

Şekil 5.6'da 30 mbar vakum altında, farklı sıcaklıklardaki çamur yığınları için ANO-kuruma süresi grafiği verilmektedir. Buradan, sıcaklık arttıkça kuruma süresinin kısaldığı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca çamur yığın şekline bakarak yorum yapmak gerekirse, gevşek yığın şeklindeki çamur örneklerinin sıkıştırılmış yığın şeklindeki çamur örneklerine göre daha kısa sürede kuruduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 5. 6 30 mbar vakum altında, farklı sıcaklıklardaki çamur örnekleri için ANO-kuruma süresi grafiği

Çamurlar deney süresince vakum etüvünde belirli sıcaklıklara (50 °C, 100 °C, 200 °C) maruz bırakılmıştır. Fakat, etüv içerisinde vakum etkisi olduğundan, çamur örnekleri tam olarak ayarlanmış olan sıcaklık değerlerine gelememiştir. Bu yüzden çamur örneklerinin sıcaklık değerlerini tam olarak belirlemek amacıyla kızılötesi termometre kullanılmıştır. Çamur örnekleri, ağırlık azalmalarını belirlemek için her etüvden çıkarıldığında kızılötesi termometre ile çamur sıcaklıkları ölçümü

yapılmıştır. Ölçülen bu sıcaklık değerleri Tablo 5.9, Tablo 5.10, Tablo 5.11, Tablo 5.12 ve Tablo 5.13'te verilmektedir.

Tablo 5. 9 30 mbar vakum altında, 200 °C'de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Gevşek çamur yığını			Sıkıştırılmış çamur yığını		
	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=11 cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=11 cm
0	25	25	25	25	25	25
30	52	40		38	38	40
40			55			
50	100					
60		85		75	75	
70	160		95			65
80						
90		120				
100			155	145		
110					105	
120		170				
130						110

Tablo 5. 10 30 mbar vakum altında, 100 °C'de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Gevşek çamur yığını			Sıkıştırılmış çamur yığını		
	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Zaman (dk)	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Zaman (dk)
0	25	25	25	25	25	25
30			40	32		
35	48				35	
45		42				
50						34
65				31		
70	51					
75		40				
80			38			
85					31	
95				42		28
100	70					
105		54				
110			52			

Tablo 5. 10 30 mbar vakum altında, 100 °C’de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri (devamı)

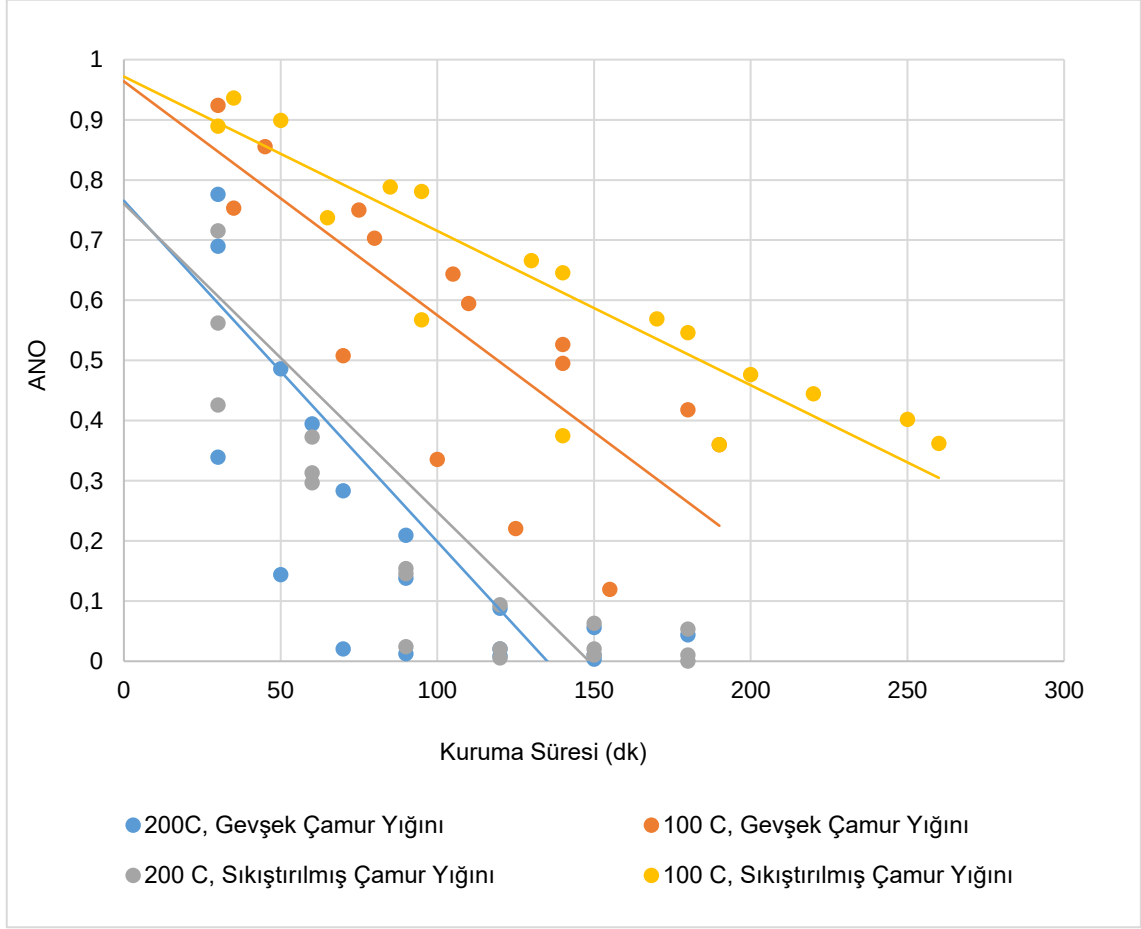
140		50	60	60	38	
170						85,56
175		55				
180					40	
190			84			
200						37,5
220					40	
250						45
260					60	
280						47

Tablo 5. 11 30 mbar vakum altında, 50 °C’de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Gevşek çamur yığını			Sıkıştırılmış çamur yığını		
	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Zaman (dk)	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Zaman (dk)
0	25	25	25	25	25	25
30		27	29	29	28	
35	31					32
60		27	30	29	30	29
65	31					
90		28	29	28		
95	27					
120		29	32	31	29	29
125	32					
150		28		28	28	
155	31					
180		31	33	30	29	27
185	32					
210		30	32			
240			32			

Şekil 5.7’de ise 1000 mbar basınç altında, farklı sıcaklıklardaki çamur örnekleri için ANO- kuruma süresi grafiği verilmektedir. Buradan, sıcaklık arttıkça kuruma süresinin kısaldığı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca çamur şekline bakarak yorum yapmak gerekirse, gevşek yığın şeklindeki çamur örneklerinin sıkıştırılmış

yığın şeklindeki çamur örneklerine göre daha kısa sürede kuruduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 5. 7 1000 mbar vakum altında, farklı sıcaklıklardaki çamur kütleleri için ANO- kuruma süresi grafiği

Tablo 5. 12 1000 mbar vakum altında, 200 °C’de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Gevşek çamur yığını			Sıkıştırılmış çamur yığını		
	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Zaman (dk)	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Zaman (dk)
0						
10						
20						
30	89	79	96	73	75	80
40						
50	107	90				
60			95	110	76	97

Tablo 5. 12 1000 mbar vakum altında, 200 °C’de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri (devamı)

70	131	110				
80						
90	134	110	95	128	95	112
100						
110						
120	135	115	132	139	111	127
130						
140						
150		133	136	141	125	135
160						
170						
180			132	148	138	142

Tablo 5. 13 1000 mbar basınç altında, 100 °C’de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri

Gevşek çamur yığını			Sıkıştırılmış çamur yığını		
Zaman (dk)	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm	Zaman (dk)	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=5cm	Ölçülen sıcaklıklar (°C) r=9 cm
30			60	57	
35	62				61
45		61			
50					65
65				57	
70	62				
75		62			
80			59		
85					64
95				59	65
100	57				
105		65			
110			66		
125	57				
130					65
140		66	65	58	65
155	66				
160				58	
170					65
180		69			65
190			68		
210					65
220					66

Tablo 5. 13 1000 mbar basınç altında, 100 °C’de etüv sıcaklığında kurutulan çamur örneklerinin belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri (Devamı)

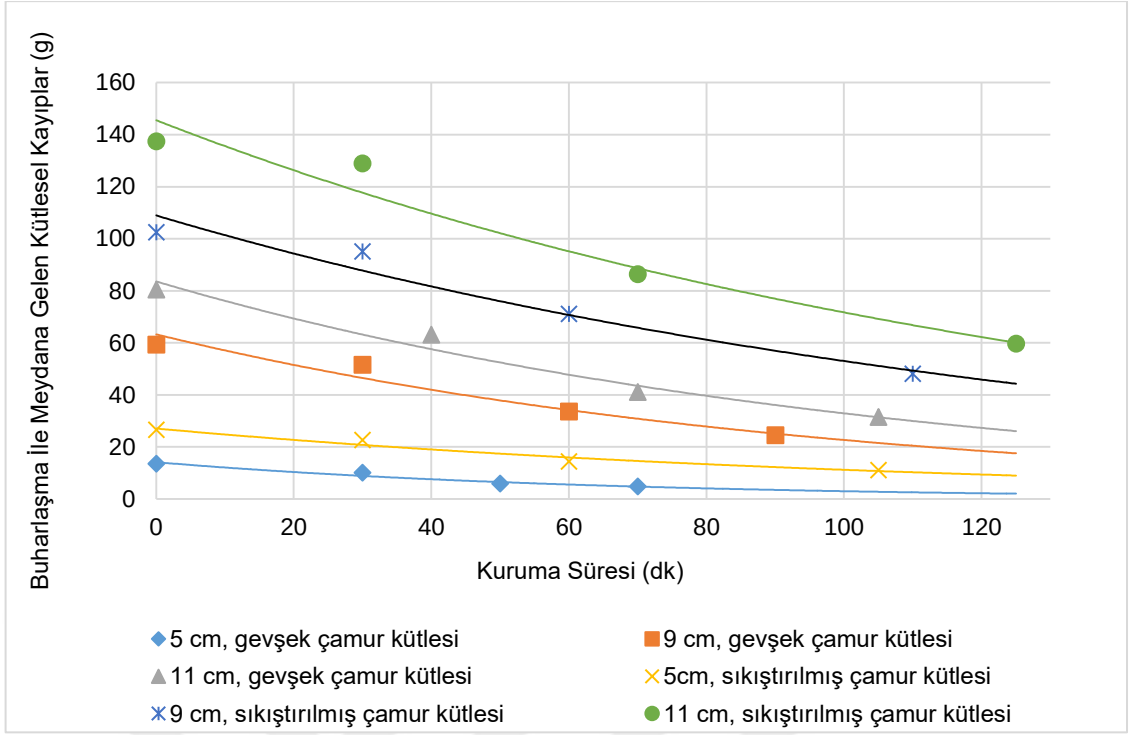
250						69
260					68	

5.4 Farklı Sıcaklık ve Çamur Şekillerinde Buharlaşma ile Meydana Gelen Kütlesel Kayıpların Karşılaştırması

5.4.1 30 mbar Vakumlu Ortamda Buharlaşma ile Meydana Gelen Kütlesel Kayıplar

Şekil 5.8’de 30 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütlesel kayıpları görülmektedir. Bu grafiğe göre:

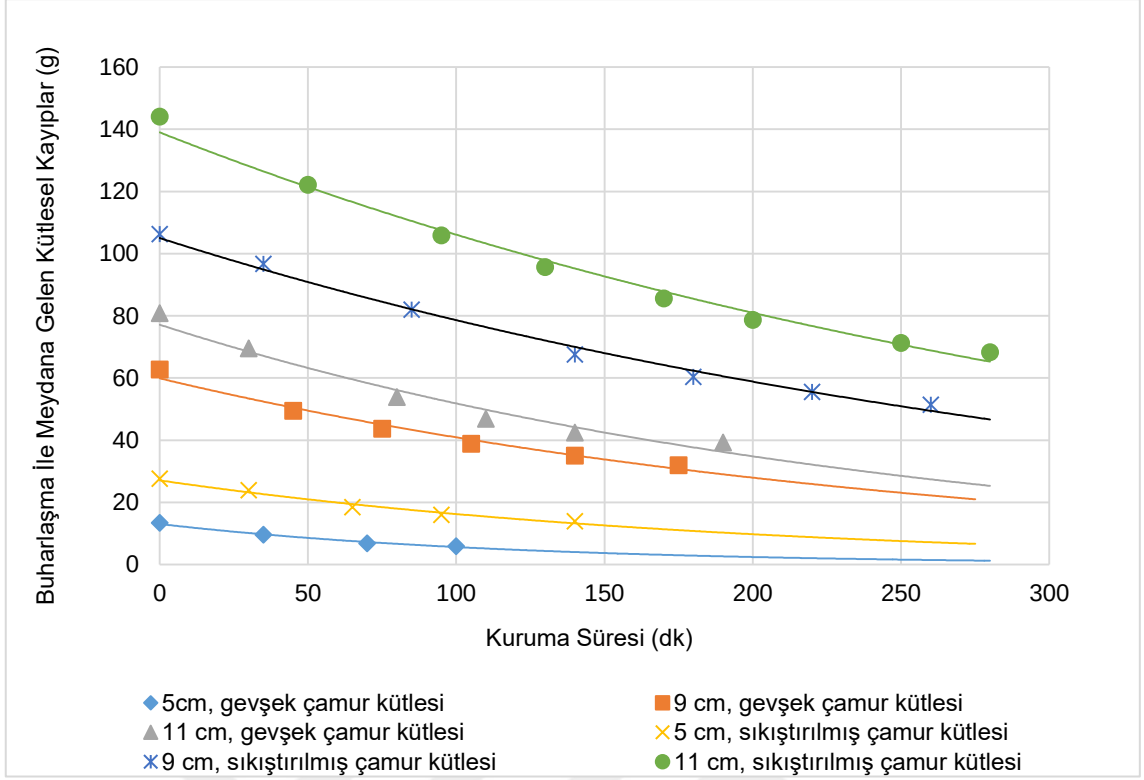
- 5 cm çaplı gevşek çamur yığınının 70 dakikada yaklaşık %64’ünün kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığınının 90 dakikada yaklaşık %59’unun kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı gevşek çamur yığınının 105 dakikada yaklaşık %61’inin kuruduğu görülmektedir.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 105 dakikada yaklaşık %58’inin kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 110 dakikada yaklaşık %53’ünün kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 125 dakikada yaklaşık %57’sinin kuruduğu görülmektedir.



Şekil 5. 8 30 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütleli kayıpları

Şekil 5.9’da 30 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütleli kayıpları görülmektedir. Bu grafiğe göre;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığınının 100 dakikada yaklaşık %56’sının kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığınının 175 dakikada yaklaşık %49’unun kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı gevşek çamur yığınının 190 dakikada yaklaşık %51’inin kuruduğu görülmektedir.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 140 dakikada yaklaşık %50’sinin kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 260 dakikada yaklaşık %52’sinin kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 280 dakikada yaklaşık %53’ünün kuruduğu görülmektedir.

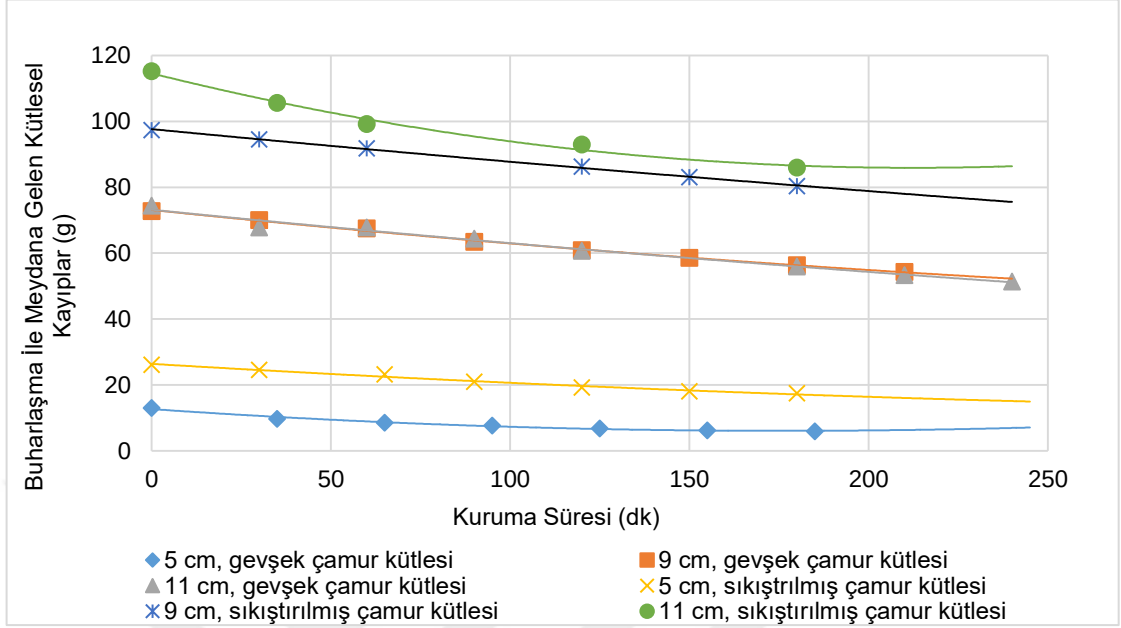


Şekil 5. 9 30 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı

Şekil 5.10'da 30 mbar vakum değerinde, 50 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı görülmektedir. Bu grafiğe göre;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %55'inin kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığınının 210 dakikada yaklaşık %25'inin kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı gevşek çamur yığınının 210 dakikada yaklaşık %28'inin kuruduğu görülmektedir.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 170 dakikada yaklaşık %33'ünün kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %17'sinin kuruduğu görülmektedir.

- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %25'inin kuruduğu görülmektedir.



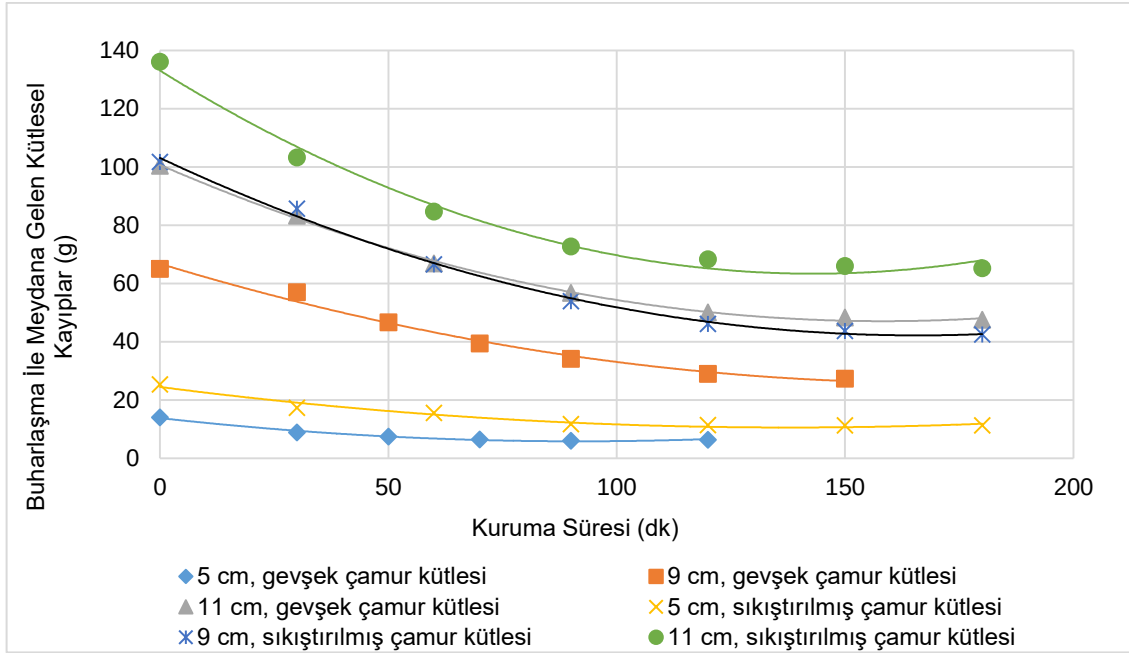
Şekil 5.10 30 mbar vakum değerinde, 50 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı

5.4.2 1000 mbar Basıncı Ortamda Buharlaşma İle Meydana Gelen Kütle Kayıpları

Şekil 5.11'de 1000 mbar basınç değerinde, 200 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütle kaybı görülmektedir. Bu grafiğe göre:

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığınının 120 dakikada yaklaşık %55'inin kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığınının 150 dakikada yaklaşık %58'inin kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı gevşek çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %53'ünün kuruduğu görülmektedir.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %56'sının kuruduğu görülmektedir.

- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %58'inin kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %52'sinin kuruduğu görülmektedir.

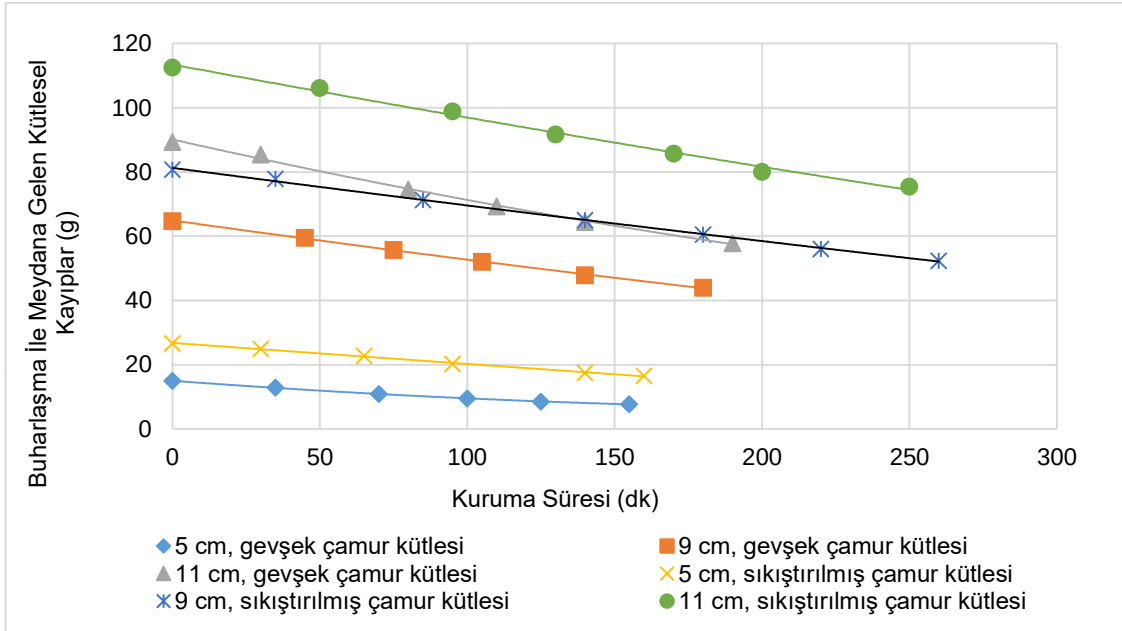


Şekil 5. 11 1000 mbar vakum değerinde, 200 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaştırma ile meydana gelen kütle kaybı

Şekil 5.12'de 1000 mbar basınç değerinde, 100 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaştırma ile meydana gelen kütle kaybı görülmektedir. Bu grafiğe göre;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığınının 150 dakikada yaklaşık %48'inin kuruduğu görülmektedir.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığınının 180 dakikada yaklaşık %32'sinin kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı gevşek çamur yığınının 260 dakikada yaklaşık %35'inin kuruduğu görülmektedir.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 160 dakikada yaklaşık %39'unun kuruduğu görülmektedir.

- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 260 dakikada yaklaşık %35'inin kuruduğu görülmektedir.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığınının 250 dakikada yaklaşık %33'ünün kuruduğu görülmektedir.



Şekil 5.12 1000 mbar vakum değerinde, 100 °C sıcaklıkta kurutulan çamur örneklerinin buharlaşma ile meydana gelen kütesel kayıpları

5.5 Çamur Örneklerinin Kurumasına Vakum Faktörünün Etkisi

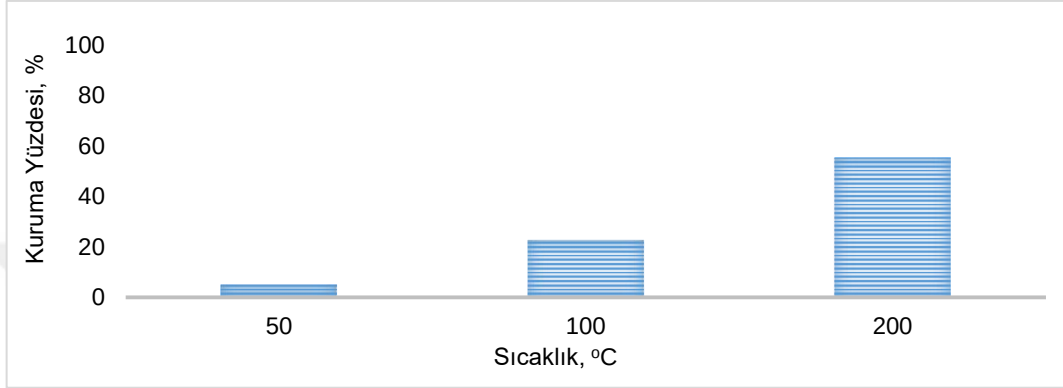
Çamurun kurumasında vakum faktörünün etkisinin değerlendirilmesi amacıyla, r=9 cm çaplı gevşek çamur yığınının; 10 mbar, 30 mbar vakum ortamında ve 1000 mbar atmosfer basıncı altında 50 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık ve 120 dakikada çamurun kuruma verimleri tek tek incelenmiştir.

5.5.1 Sabit Vakum ve Farklı Sıcaklıklarda Kurutma

1000 mbar'da, yani yaklaşık atmosfer basıncında, yapılan çalışmanın temel amacı vakumun etkisini net bir şekilde ortaya koyabilmektir. Bu çalışmada, sıcaklıklar 50 °C, 100 °C ve 200 °C şeklinde seçilmiştir. Kuruma yüzdelerini karşılaştırmak adına 120 dk süre esas alınmıştır. Çamurların 120. dakikadaki kuruma yüzdeleri incelendiğinde; 50 °C < 100 °C < 200 °C olduğu görülmüştür (Şekil 5.13).

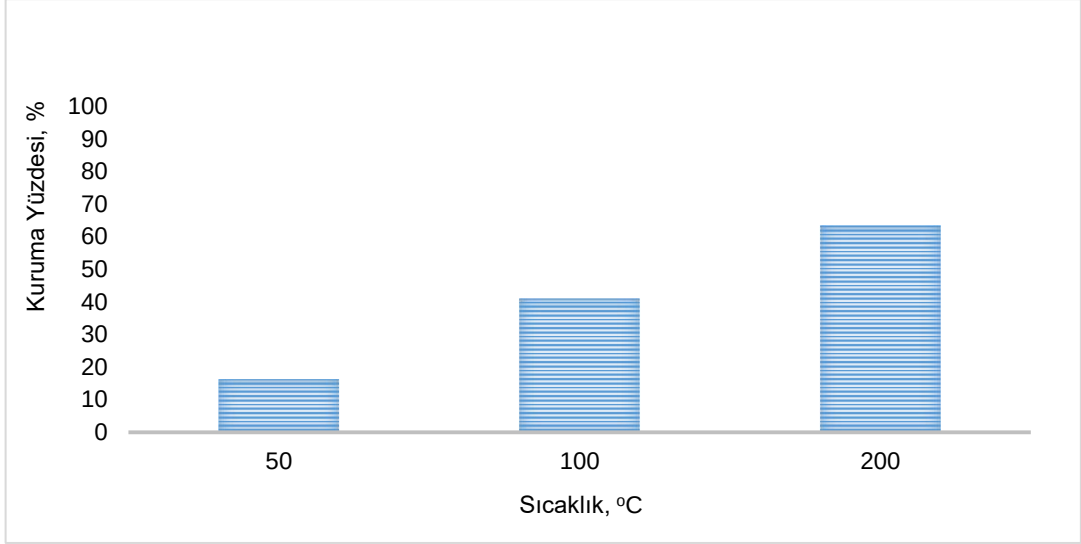
Kurutma sıcaklığı 50 °C'den 100 °C'ye yükseltildiğinde kuruma değerinde % 78 oranında bir artış görülürken, 50 °C'den 200 °C'ye yükseltildiğinde % 91 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

1000 mbar atmosfer basıncında kurumada yalnızca sıcaklık etkili olduğundan, sıcaklık artırıldığında kuruma yüzdesindeki artış da bu kadar yüksek oranda oluşmuştur.



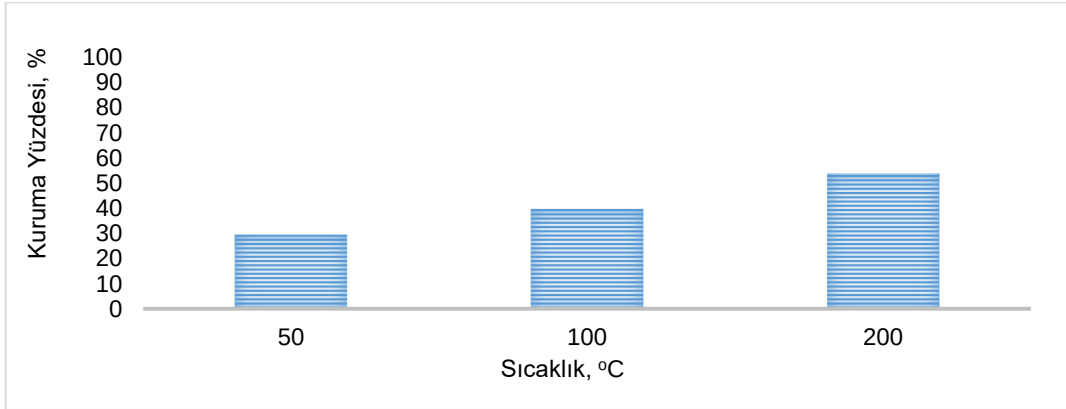
Şekil 5. 13 1000 mbar basınç altında ve farklı sıcaklıklardaki çamurların kuruma yüzdelерinin kıyaslanması

30 mbar vakum altında yapılan çalışmalarda, 50 °C, 100 °C ve 200 °C'de kurutma yapılmıştır. Kuruma yüzdelерini karşılaştırmak adına 120 dk esas alınmıştır. Çamurların 120. dakikadaki kuruma yüzdeleri incelendiğinde, bu deney süresince de yine yüksek sıcaklıklardaki kuruma oranlarının en yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir. Buna göre; kuruma değerleri 50 °C < 100 °C < 200 °C olduğu görülmüştür (Şekil 5.14). Kurutma sıcaklığı 50 °C'den 100 °C'ye yükseltildiğinde kuruma değerinde % 61 oranında bir artış görülürken, 50 °C'den 200 °C'ye yükseltildiğinde % 75 oranında bir artış olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 14 30 mbar basınç altında ve farklı sıcaklıklardaki çamurların kuruma yüzdelerinin kıyaslanması

10 mbar vakum altında çamur, 50 °C, 100 °C ve 200 °C'de kurutulmuştur. Kuruma yüzdelerini karşılaştırmak adına 120 dakikalık deney süresi esas alınmıştır. Çamurların 120. dakikadaki kuruma yüzdeleri incelendiğinde; 50 °C < 100 °C < 200 °C olduğu görülmüştür (Şekil 5.15). Kurutma sıcaklığı 50 °C'den 100 °C'ye yükseltildiğinde kuruma değerinde %25 oranında bir artış görülürken, 50 °C'den 200 °C'ye yükseltildiğinde %44 oranında bir artış olduğu görülmüştür.



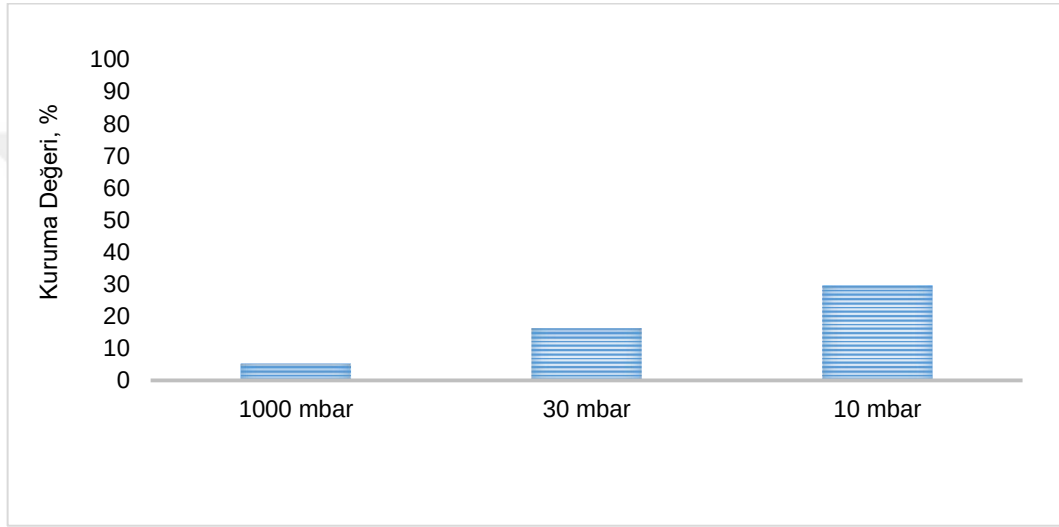
Şekil 5. 15 10 mbar basınç altında ve farklı sıcaklıklardaki çamurların kuruma yüzdelerinin kıyaslanması

5.5.2 Sabit Sıcaklık ve Farklı Vakum Değerlerinde Kurutma

Çamurların, 50 °C sıcaklıkta; 1000 mbar, 30 mbar ve 10 mbar basınç değerlerinde kuruma yüzdeleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.16). Uygulanan basınç değerlerine göre

kuruma yüzdelerinin, 1000 mbar < 30 mbar < 10 mbar olduğu görülmüştür. Basınç 1000 mbar'dan 30 mbar'a düşürüldüğünde kuruma değerinde % 69 oranında bir artış görülürken, 1000 mbar'dan 10 mbar'a düşürüldüğünde ise kuruma değerinde % 83 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

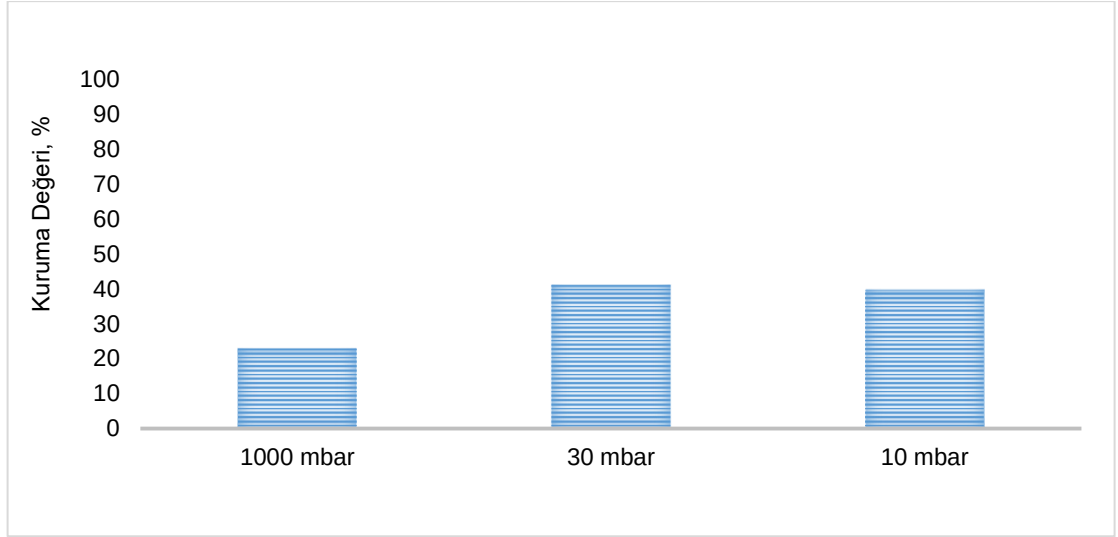
50 °C sıcaklıkta da Şekil 5.16'de görüldüğü üzere; 10 mbar vakum değerindeki kuruma oranının, 30 mbar ve 1000 mbar değerlerindeki kuruma oranının üzerine çıktığı görülmüştür. Sıcaklık azaldıkça, kuruma üzerinde vakum etkisinin daha da arttığı görülmektedir.



Şekil 5. 16 50 °C sıcaklıkta farklı vakum değerlerinde kuruma yüzdelerinin karşılaştırması

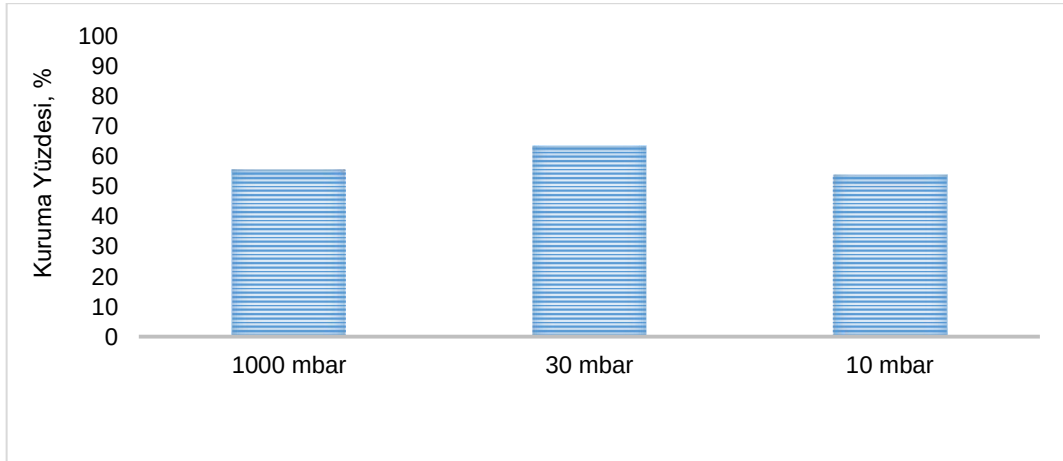
Çamurların, 100°C sıcaklıkta; 1000 mbar, 30 mbar ve 10 mbar basınç değerlerinde kuruma yüzdeleri karşılaştırması Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Uygulanan basınç değerlerine göre kuruma yüzdelerinin, 1000 mbar < 10 mbar < 30 mbar olduğu görülmüştür. Basınç 1000 mbar'dan 30 mbar'a düşürüldüğünde kuruma değerinde % 44 oranında bir artış görülürken, 1000 mbar'dan 10 mbar'a düşürüldüğünde ise kuruma değerinde % 42 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

100 °C sıcaklıkta, 30 mbar vakum değeri kuruma üzerinde daha etkilidir. Fakat 200 °C sıcaklıkta 10 mbar ile 30 mbar vakum değerlerinde kuruma oranları arasındaki fark % 14 iken, 100 °C'de bu oran % 2'dir. Burada, sıcaklık azaldıkça vakum koşullarının etkisinin arttığı söylenebilir.



Şekil 5. 17 100 °C sıcaklıkta farklı vakum değerlerinde kuruma yüzdelerinin karşılaştırması

Sabit sıcaklık olarak 200 °C değeri dikkate alındığında farklı vakum değerleri için elde edilmiş olan kuruma oranları Şekil 5.18’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Uygulanan basınç değerlerine göre kuruma yüzdelerinin, 10 mbar < 1000 mbar < 30 mbar olduğu görülmüştür. Basınç 1000 mbar’dan 30mbar’a düşürüldüğünde kuruma değerinde % 11 oranında bir artış görülürken, 1000 mbar’dan 10 mbar’a düşürüldüğünde ise kuruma değerinde % 4 oranında bir azalış olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 18 200 °C sıcaklıkta farklı vakum değerlerinde kuruma yüzdelerinin karşılaştırması

Deney düzeneğinde kullanılan vakum pompasının (KNF SC920-G) emme debisi basınç düştükçe azalmaktadır. Pompanın atmosferik basınçtaki debisi 21 L/dk’dır.

Emme hattında vakum oluştukça doğal olarak bu debi değeri de düşmektedir. 10 mbar vakum değerinde minimum debi ile emme yapılmaktadır. Bu vakum şartını oluşturmak bile, basınç düştükçe debi de azaldığı için, kullanılan vakum pompası ile oldukça uzun bir süreyi gerektirmektedir. 10 mbar değerlerindeki emme debisi, bu vakum seviyelerinde ve yüksek sıcaklıklarda (>100 °C) çok düşük kalmakta; hatta buharlaşma hızından da düşük kaldığı için bu deney şartlarında ayarlanan 10 mbar vakum seviyesi sabit kalmamakta ve artmaktadır. Tablo 5.14’de vakum değerleri için ayarlanan ve gerçekleşen değerler görülmektedir.

Tablo 5. 14 Deney düzeneğinin ayarlanan ve gerçekleşen basınç değerleri

Ayarlanan basınç değeri	Farklı sıcaklıklar için gerçekleşen basınç değeri, mbar		
	50°C	100 °C	200 °C
10 mbar	10-20	10-20	10-20
30 mbar	30	30-40	30-40
1000 mbar	1000	1000	1000

5.6 Kuruma Sürecinde Çamurun Organik Madde Muhtevsındaki Değişim

Çalışmada, vakum ile kurutma işlemi sonucunda su ile beraber çıkan organik madde miktarını belirlemek amacıyla, her deney şartı için ayrı ayrı olmak üzere; kuruyan çamur örnekleri için TOM tayini yapılmıştır. TOM tayini neticesinde, ham çamurun organik madde içeriğinin % 62 olduğu görülmüştür.

5.6.1 30 mbar Vakum Ortamında Kurutulan Örnekler İçin Hesaplanan Organik Madde Kayıpları

30 mbar- 200 °C’de kurutma işleminden sonra azalan organik madde yüzdeleri;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 70 dakikada %33 azalma olduğu görülmüştür.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 90 dakikada %34 azalma olduğu görülmüştür.

- 11 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 105 dakikada %41 azalma olduğu görölmüştür.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 105 dakikada %42 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 110 dakikada %33 azalma olduğu görölmüştür.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 125 dakikada %32 azalma olduğu görölmüştür.

30 mbar- 100 °C'de vakum ile kurutma işleminden sonra azalan organik madde yüzdeleri;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığnında organik madde içeriğinde 100 dakikada %26 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 175 dakikada %29 azalma olduğu görölmüştür.
- 11 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 190 dakikada %29 azalma olduğu görölmüştür.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 140 dakikada %29 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 260 dakikada %24 azalma olduğu görölmüştür.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 280 dakikada %29 azalma olduğu görölmüştür.

30 mbar- 50 °C'de vakum ile kurutma işleminden sonra azalan organik madde yüzdeleri;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %24 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 210 dakikada %27 azalma olduğu görölmüştür.

- 11 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 210 dakikada %18 azalma olduğu görölmüştür.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 170 dakikada %21 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %15 azalma olduğu görölmüştür.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %17 azalma olduğu görölmüştür.

5.6.2 1000 mbar Basınç Ortamında Kurutulan Örnekler için Hesaplanan Organik Madde Kayıpları

1000 mbar- 200 °C'de kurutma işleminden sonra azalan organik madde yüzdeleri;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 120 dakikada %39 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 150 dakikada %40 azalma olduğu görölmüştür.
- 11 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %38 azalma olduğu görölmüştür.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %42 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %37 azalma olduğu görölmüştür.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %43 azalma olduğu görölmüştür.

1000 mbar- 100 °C'de vakum ile kurutma işleminden sonra azalan organik madde yüzdeleri;

- 5 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 150 dakikada %24 azalma olduğu görölmüştür.
- 9 cm çaplı gevşek çamur yığnında, organik madde içeriğinde 180 dakikada %12 azalma olduğu görölmüştür.

- 11cm çaplı gevşek çamur yığmında, organik madde içeriğinde 260 dakikada %22 azalma olduğu grlmştr.
- 5 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığmında, organik madde içeriğinde 160 dakikada %18 azalma olduğu grlmştr.
- 9 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığmında, organik madde içeriğinde 260 dakikada %20 azalma olduğu grlmştr.
- 11 cm çaplı sıkıştırılmış çamur yığmında, organik madde içeriğinde 250 dakikada %17 azalma olduğu grlmştr.



6

TARTIŞMA

Bu çalışma ile endüstriyel atıksu arıtma çamurların, vakum kurutma yöntemi ile kurutma karakteristikleri incelenmiş; sıcaklık, yüzey alanı, çamur yığın şekli ve vakum parametrelerinin çamurun kuruma verimine etkileri araştırılmıştır.

Sıcaklığın etkisi incelendiğinde;

- Çamurun kurumasında sıcaklığın etkisi kıyaslandığında; $200\text{ }^{\circ}\text{C} > 100\text{ }^{\circ}\text{C} > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir.
- 30 mbar vakum altındaki çalışma için; en yüksek kuruma sabiti değeri, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de (1. derece kuruma kinetiği, $k=-0,0661\text{ dk}^{-1}$), en düşük kuruma sabiti değeri ise, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de (1. derece kuruma kinetiği, $k=-0,00003\text{ dk}^{-1}$) görülmüştür.
- 1000 mbar basınç altındaki çalışma için; en yüksek kuruma sabiti değeri, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de (1. derece kuruma kinetiği, $k=-0,0307\text{ dk}^{-1}$), en düşük kuruma sabiti değeri ise, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de (1. derece kuruma kinetiği, $k=-0,0046\text{ dk}^{-1}$) görülmüştür.
- Kuruma kinetiğinin logaritmik bir şekilde çamurun kütlesine bağlı olduğu görülmüştür.

Yüzey alanının etkisi incelendiğinde;

Çamurun yüzey alanının kurumaya etkisine bakıldığında, yüzey alanı arttıkça kuruma hızının atması beklenmektedir. Fakat bu çalışmada (Şekil 5.1, Şekil 5.2) kuruma hızında, 5 cm ve 9 cm çaplı örnekler arasında bariz fark olduğu görülürken (kuruma hızı: $5\text{ cm} > 9\text{ cm}$), 9cm ve 11cm çaplı çamurların neredeyse aynı kuruma hızına sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun, kurumaya etki eden diğer önemli faktor olan çamur yığını miktarlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Temel ısı transferi denklemi dikkate alındığında ($Q = m \cdot c \cdot \Delta T$); eşit miktarda ısı ($Q_1 = Q_2$) alan

farklı ağırlıktaki çamur örneklerinden ($m_1 < m_2$), kütlesi az olan daha yüksek sıcaklığa çıkacak ($\Delta T_1 > \Delta T_2$), dolayısıyla bu çamur örneğinde daha fazla buharlaşma oluşacaktır (Tablo 5.1). Bu sebeple, ağırlığı az olan çamur daha hızlı kuruma eğiliminde olacaktır.

Çamur yığın şeklinin etkisi incelendiğinde;

Çamur yığın şeklinin kuruma hızına etkisi incelendiğinde, gevşek çamur yığınlarının sıkıştırılmış çamur yığınlarından daha hızlı kuruduğu görülmektedir. Buna göre;

30 mbar vakum altındaki çalışma için;

- Maksimum R^2 değerini takiben, en yüksek kuruma sabiti değeri, 200 °C'de gevşek çamur yığnında görülmüştür (1. derece kuruma kinetiği, $k = -0,0661 \text{ dk}^{-1}$).
- Maksimum R^2 değerini takiben, en düşük kuruma sabiti değeri, 50 °C'de sıkıştırılmış çamur yığnında görülmüştür (1. derece kuruma kinetiği, $k = -0,00003 \text{ dk}^{-1}$).

1000 basınç altındaki çalışma için;

- Maksimum R^2 değerini takiben, en yüksek kuruma sabiti değeri (k), 200 °C'de gevşek çamur yığnında görülmüştür (1. derece kuruma kinetiği, $k = -0,0307 \text{ dk}^{-1}$).
- Maksimum R^2 değerini takiben, en düşük kuruma sabiti değeri (k), 100 °C'de sıkıştırılmış çamur yığnında görülmüştür (1. derece kuruma kinetiği, $k = -0,0046 \text{ dk}^{-1}$).

Sıkıştırılmış çamur yığınlarının ağırlıkları, gevşek çamur yığınlarının ağırlıklarından fazla olduğundan ağırlığı az olan gevşek çamur yığını daha hızlı kurumuştur (Tablo 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11). Bu durum yüzey alanlarının etkisi incelenirken belirtildiği gibi ısı transferi denklemiyle açıklanabilir ($Q = m \cdot c \cdot \Delta T$). Yani eşit miktarda ısı alan farklı ağırlıktaki çamur örneklerinden, kütlesi az olan daha yüksek sıcaklığa çıkacak dolayısıyla bu çamur örneğinde daha fazla buharlaşma oluşacaktır.

Vakum ve sıcaklık etkileri kıyaslandığında;

Bilindiği üzere, vakum değeri yükseldikçe (basınç düşürüldükçe) çamurdaki suyun buharlaşma hızının artması ve daha yüksek kuruma oranının elde edilmesi gerekir. Şekil 5.16'da bu durum net olarak oluşmuştur. Ancak, Şekil 5.17'de ve 5.18'de 10 mbar vakum değerindeki kuruma oranlarının 30 mbar'a göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.17 ve 5.18'de nispeten yüksek sıcaklıklar ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) uygulanmış olup, kuruma prosesinde sıcaklığın baskın etkisinin ortaya çıktığı görülmektedir. Bununla beraber, sıcaklığın baskın etkisi ile buharlaşan ve gaz fazına geçen su moleküllerinin gaz fazı kısmi basıncını da oldukça yükselttiği, hatta ortam yüksek vakum değerinde olduğu için gaz fazı basıncının neredeyse tamamının su buharı basıncı olarak oluştuğu, diğer bir gerçektir. Özellikle daha düşük basınç değeri olan 10 mbar çalışmaları için, bu durum, gaz-sıvı dengesi sebebiyle buharlaşma üzerinde azaltıcı etki meydana getirmektedir.

Diğer bir durum ise, deney düzeneğinde kullanılan vakum pompasının (KNF SC920-G) emme debisi basınç düştükçe azalmaktadır. Pompanın atmosferik basınçtaki debisi 21 L/dk'dır. Emme hattında vakum oluştukça doğal olarak bu debi değeri de düşmektedir. 10 mbar vakum değerinde minimum debi ile emme yapılmaktadır. Bu vakum şartını oluşturmak bile, basınç düştükçe debi de azaldığı için, kullanılan vakum pompası ile oldukça uzun bir süreyi gerektirmektedir. 10 mbar değerlerindeki emme debisi, bu vakum seviyelerinde ve yüksek sıcaklıklarda ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) çok düşük kalmakta; hatta buharlaşma hızından da düşük kaldığı için bu deney şartlarında ayarlanan 10mbar vakum seviyesi sabit kalmamakta ve artmaktadır. Çizelge 5.14'de vakum değerleri için ayarlanan ve gerçekleşen değerler görülmektedir. Buna göre, düşük basınç ve yüksek sıcaklık değerlerinde, ayarlanan basınç değeri sabit kalmamakta, pompanın emme debisi buharlaşma debisinden düşük kaldığı için basınç yükselmektedir. Oluşan bu basıncın neredeyse tamamı su buharı kaynaklı basınç olduğu için de, gaz-sıvı dengesi sebebiyle buharlaşma hızını, yani kurumayı baskılamaktadır.

Vakum pompasının emme debisindeki bu yetersizlik ve oluşturduğu durum bir kenara bırakılırsa; 10-30 mbar gibi düşük basınç değerlerinde yüksek vakum

etkisiyle buharlaşma hızı artmakta ve kuruma oranı yükselmekle beraber, bu vakum değerlerinde uygulanan yüksek sıcaklıklar ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) vakum etkisinin de önüne geçerek kurumada en etken parametre olmaktadır.

Kurutma işlemi sırasında, çamurdan buharlaşan su ile beraber organik madde çıkışının da olduğu görülmüştür. Çalışılan sıcaklık değeri arttıkça, çamurdan buharlaşan organik madde miktarının da arttığı görülmektedir. Fakat buharlaşan organik madde miktarına vakum faktörünün etkisi sıcaklık kadar güçlü olmamıştır. $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, 30 mbar ve 1000 mbar basınç değerlerinde yaklaşık olarak aynı organik madde çıkışı olmuştur. 100°C sıcaklıkta ise, 30 mbar vakum değerinde buharlaşan organik maddenin, 1000 mbar basınçta buharlaşan organik maddeden yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık değerlerinde çalışıldığında, sıcaklığın vakum değerinden daha baskın olduğu görülmüştür. Fakat düşük sıcaklık değerlerinde ise vakum etkisinin, organik madde buharlaşması üzerinde etkinliğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Literatürde çamur kurutma ile ilgili olarak birçok farklı proses mevcuttur fakat vakum kurutma yöntemiyle arıtma çamurlarının kurutulması konusu ile ilgili pek fazla çalışma bulunmamaktadır. Vakum kurutma ile yapılan çalışmalar genelde gıda kurutulması ve ilaç sanayii gibi kısıtlı sektörlerde kullanılmaktadır. Vakum kurutmanın arıtma çamurundaki suyun uzaklaştırılmasında kullanılacak olması bu çalışmanın en önemli özgün değerini oluşturmaktadır. Bu çalışma ile endüstriyel atık çamurların, vakum kurutma yöntemi ile kurutma karakteristikleri incelenmiş, basınç, sıcaklık ve yüzey alanı parametrelerinin çamurun kuruma verimine etkisi araştırılmıştır. Bu konunun uygulamaya yönelik yapılabilirliği araştırılmış ve bu konudaki literatür eksikliğinin giderilmesine katkıda bulunulmuştur.

Kurutma çalışmaları sonucunda, kuruma hızına;

- Uygulanan tüm deney şartlarında, sıcaklığın etkisi incelendiğinde; $200\text{ }^{\circ}\text{C} > 100\text{ }^{\circ}\text{C} > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmüştür.
- Yüzey alanının etkisi incelendiğinde, tüm deney koşulları için, 5 cm çaplı çamur yığını 9 cm ve 11 cm çaplı çamur yığınının daha hızlı kurumıştır. 9 cm ve 11 cm çaplı çamur yığınları ise yaklaşık olarak aynı değerlerde kuruma eğilimi göstermiştir.
- Çamur yığın şeklinin etkisi incelendiğinde; tüm basınç ve yüzey alanı parametrelerinde, gevşek çamur yığınının sıkıştırılmış çamur yığınının daha hızlı kurduğu görülmüştür.

Sabit basınç değerlerinde sıcaklığın etkisi incelendiğinde;

- 1000 mbar atmosfer basıncında, çamur sıcaklığı $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde kuruma değerinde % 78 oranında bir artış görülürken, 50

$^{\circ}\text{C}$ 'den 200 $^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde % 91 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

- 30 mbar vakum altında, çamur sıcaklığı 50 $^{\circ}\text{C}$ 'den 100 $^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde kuruma değerinde % 61 oranında bir artış görülürken, 50 $^{\circ}\text{C}$ 'den 200 $^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde % 75 oranında bir artış olduğu görülmüştür.
- 10mbar vakum altında, çamur sıcaklığı 50 $^{\circ}\text{C}$ 'den 100 $^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde kuruma değerinde % 25 oranında bir artış görülürken, 50 $^{\circ}\text{C}$ 'den 200 $^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde % 44 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Sabit sıcaklık değerlerinde, basıncın etkisi incelendiğinde ise;

- 200 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, basınç 1000 mbar'dan 30 mbar'a düşürüldüğünde kuruma değerinde % 11 oranında bir artış görülürken, 1000 mbar'dan 10 mbar'a düşürüldüğünde ise kuruma değerinde % 4 oranında bir azalış olduğu görülmüştür.
- 10 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, basınç 1000 mbar'dan 30 mbar'a düşürüldüğünde kuruma değerinde % 44 oranında bir artış görülürken, 1000 mbar'dan 10 mbar'a düşürüldüğünde ise kuruma değerinde % 42 oranında bir artış olduğu görülmüştür.
- 50 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, basınç 1000 mbar'dan 30 mbar'a düşürüldüğünde kuruma değerinde % 69 oranında bir artış görülürken, 1000 mbar'dan 10 mbar'a düşürüldüğünde ise kuruma değerinde % 83 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Su ile beraber buharlaşan organik madde de sıcaklığın ve vakumun etkisi düşünüldüğünde;

- Sıcaklık arttıkça, buharlaşan organik madde miktarı artmıştır.
- 30mbar'da; buharlaşan organik madde miktarı; sıcaklık 50 $^{\circ}\text{C}$ 'den 100 $^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarıldığında yaklaşık % 36, 100 $^{\circ}\text{C}$ 'den 200 $^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarıldığında ise yaklaşık % 30 artış göstermiştir.
- 1000 mbar'da buharlaşan organik madde miktarı; sıcaklık 100 $^{\circ}\text{C}$ 'den 200 $^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarıldığında yaklaşık % 52 artış göstermiştir.

- Vakum parametresinin çamurdaki organik madde çıkışına etkisinin, 100 °C sıcaklıkta, 200 °C sıcaklığa göre daha baskın olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, yüksek sıcaklık ve vakum değerlerinde çalışıldığında, sıcaklığın vakum değerinden daha baskın olduğu görülmüştür. Fakat düşük sıcaklık değerlerinde ise vakum parametresinin kuruma üzerinde etkinliğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak, yalnızca basınç düşürülüp vakum etkisi arttırılarak çamurun etkin bir şekilde kurutulmasının da, süre çok uzadığı için uygulanabilir olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak, vakum ile kurutmanın tek başına bir proses olarak değil de, termal kurutma sistemleri için kurutmaya yardımcı bir faktör olarak düşünülmesi gerektiği ortaya çıkarılmıştır.

Kinetik çalışmalar sonucunda, kuruma kinetiğinin 1. derece kinetiğe uygun olduğu görülmüştür. Kuruma kinetiğinin, kuruma süresine ve çamur kütlesine bağlı olarak logaritmik bir kuruma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen kinetik değerleri, bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutabilir niteliktedir.

Bu konuda yapılacak olan çalışmalar için aşağıdaki öneriler yapılabilir:

- Kuruma hızının etkisini incelemek için, daha düşük ve çeşitli vakum değerinde çalışılabilir.
- Optimum kuruma süresinin belirlenebilmesi için farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde daha geniş çaplı çalışmalar yapılabilir.
- Basınç, sıcaklık, yüzey alanı ve çamur yığın şekli parametrelerinin dışında ağırlık parametresi de ayrıntılı olarak çalışılabilir.

- Aktaş, M., Ceylan, İ., & Yılmaz, S. (2009). Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer. *Desalination*, 239, 266-275.
- Alibas, I. (2007). Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering*, 96(4), 495-502.
- Arevalo-Pinedo, A., & Murr, F.E.M. (2007). Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 152-156.
- Arevalo-Pinedo, A., & Murr, F.E.M., (2006). Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 76(4), 562-567.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., & Benjapiyaporn, C. (2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems Engineering*, 105(1), 130-138.
- Ayaz M. (2015). Isı pompalı vakumlu kurutma fırınında tıbbi bitkilerin kurutulması ve kurutma parametrelerinin araştırılması (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bantle, M., & Eikevik, T.M. (2011). Parametric study of high-intensity ultrasound in the atmospheric freeze drying of peas. *Drying Technology*, 29, 1230-1239.
- Başlar, M., Kılıçlı, M., & Yalınkılıç, B. (2015). Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 495-502.
- Başlar, M., Kılıçlı, M., Toker, O., Sağdıç, O., & Arici, M., (2014). Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 26, 182.
- Bennamoun L. (2012). Solar drying of wastewater sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1061- 1073.
- Bux M., Baumann R., Quadts S., Pinnekamp J., & Mühlbauer W. (2002). Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying. *Drying Technology*, 20, 829-837.
- Cai L., Chen T.B., Gao D., Zheng G. D., Liu H. T., & Pan T.H. (2013). Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying. *Water Research*, 47, 4767-4773.

- Cai L., Gao . T. B., Liu H. T., Zheng G. D., & Yang Q. W. (2012). Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying. *Bioresource Technology*, 117, 13–19.
- Cebeci, N. Z. (2012). Endüstriyel Aritma Çamurlarının Ozonla Minimizasyonu Ve Bertaraf Maliyetinin Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Celma, A. R., Cuadros, F., & López-Rodríguez, F. (2012). Convective drying characteristics of sludge from treatment plants in tomato processing industries. *Food and Bioproducts Processing*, 90(2), 224-234.
- Celma, A. R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I., & Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1261-1271.
- Cemeroğlu, B., & Soyer A. (2004). *Kurutma, gıda mühendisliğinde temel işlemler* (B. Ed. B. Cemeroğlu). Ankara: Bizim Grup Yayınevi.
- Chen G., Yue L.P., & Mujumdar A. (2006). *Dewatering and drying of wastewater treatment*. Sludge
- Chen, X. D., & Mujumdar, A. S. (Eds.). (2008). *Drying technologies in food processing*. John Wiley & Sons.
- Chen, Z., Afzal, M. T., & Salema, A. A. (2014). Microwave drying of wastewater sewage sludge. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(3), 282-286.
- Choi, H. L., Richard, T. L., & Ahn, H. K. (2001). Composting high moisture materials: Biodrying poultry manure in a sequentially fed reactor. *Compost Science & Utilization*, 9(4), 303-311.
- Coşkun A. (2017). Aritma çamurlarının elektro-susuzlaştırma prosesi ile incelenmesi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Cui, Z. W., Xu, S. Y., & Sun, D. W. (2003). Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. *Drying Technology*, 21(7), 1173-1184.
- Cui, Z. W., Xu, S. Y., & Sun, D. W. (2004). Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 65(2), 157-164.
- Çalhan, R., Kaya, D., Tulger, G., & Eyidoğan, M. (2012). Organik gübre kurutma teknolojileri: akışkan yataklı kurutucular. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(634), 22-33.
- Çelen, S. (2010). Mikrodalga ve vakum kurutucuda bazı gıda ürünlerinin kurutulması ve modellenmesi (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Çiçek, A. (2011). Yassı yapraklı ürünlerin vakum tüplü güneş enerjili kurutucuda kurutulması (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- Dadalı, G. (2007). Bamyacı ve ısıpanağın mkrodalga tekniği kullanılarak kurutulması, doku ve renk özelliklerinin icelenmesi ve modellenmesi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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.
- Demiray, E. (2015). Havuç Ve Kırmızıbiberin Farklı Kurutma Yöntemleri İle Kurutulması, Kuruma Karakteristiklerinin Ve Bazı Kalite Özelliklerindeki Değişimin Modellemesi (Doktora Tezi). Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Deniz, Z. (2010). Akışkan yataklı kurutucu modellemesi ve analizi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Drouzas, A. E., Tsami, E., & Saravacos, G. D. (1999). Microwave/vacuum drying of model fruit gels. *Journal of Food Engineering*, 39(2), 117-122.
- Dündar, H. (2010). Bir vakumlu gıda kurutma sisteminin tasarımı ve imalatı (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Erbay, B., Küçüköner, E. (2008). *Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri*, Türkiye 10. Gıda Kongresi 21-23 Mayıs, Erzurum.
- Erdem, T. (2012). Defne (*Laurus nobilis* L.) meyvesinden yağ elde etmek amacıyla uygulanan farklı kurutma yöntemlerinin araştırılması (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ferenczi, S., Czukor, B., & Cserhalmi, Z. (2014). Evaluation of microwave vacuum drying combined with hot-air drying and compared with freeze-and hot-air drying by the quality of the dried apple product. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 58(2), 111-116.
- Filibeli A. (1996). *Aritma çamurlarının işlenmesi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 255.
- Flaga, A. (2007). Sludge drying. Institute of Heat Engineering and Air Protection. Cracow University of Technology, Poland.
- Fouhy, K., & Moore, S. (1994). Miniaturization reaches the CPI. *Chemical Engineering*, 33-35.
- Fuente-Blanco, S.D.L., Sarabia, E.R.D., Acosta-Aparicio, V.M., BlancoBlanco, A. & Gallego-Juarez, J.A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44(1), e523-e527.
- Garcia-Noguera, J., Oliveira, F. I., Galláo, M. I., Weller, C. L., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. (2010). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), 294-303.

- García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., De la Fuente-Blanco, S., & De Sarabia, E. R. F. (2006). Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: parametric study. *Ultrasonics*, 44, e539-e543.
- Gölcü, M., & Şen, F. (2014). Mikrodalga ile ıslak viyolün kurutulabilirliğinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(20), 111-115
- Grüter, H., Matter, M., Oehlmann, K. H., & Hicks, M. D. (1990). Drying of sewage sludge—An important step in waste disposal. *Water Science and Technology*, 22(12), 57-63.
- Günerban, H. (2005). Endüstriyel kurutma sistemleri. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 36(13), 1-10.
- Güngör, A. & Özbalta, N. (2000). *Kurutma sistemlerinde ısı pompası kullanım potansiyeli*, 3.GAP Mühendislik Kongresi, Urfa.
- Güngör, A. (2010). Gaz motoru tahrikli ısı pompalı bantlı bir kurutma sisteminin performansının ekserjetik olarak değerlendirilmesi (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Güngör, A. (2013). *Sebze ve meyve kurutmada kullanılan kurutucular ve kurutma teknolojileri*. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan 2013, İzmir.
- Gürses, Ö.L. (1986). *Gıda işleme mühendisliği- II*. Ankara: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Han, R., Liu, J., Zhang, Y., Fan, X., Lu, W., & Wang, H. (2012). Dewatering and granulation of sewage sludge by biophysical drying and thermo-degradation performance of prepared sludge particles during succedent fast pyrolysis. *Bioresource Technology*, 107, 429-436.
- He, Z., Qian, J., Qu, L., Wang, Z., & Yi, S. (2019). Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying. *Results in Physics*, 12, 1299-1303.
- He, Z., Yang, F., Peng, Y., & Yi, S. (2013a). Ultrasound assisted vacuum drying of wood: Effects on drying time and product quality. *BioResources*, 8(1), 855-863.
- He, Z., Yang, F., Peng, Y., & Yi, S. (2013b). Effects of ultrasound on wood vacuum drying characteristics. *Pro Ligno: Scientific Journal in the Field of Wood Engineering*, 9(4), 693-699.
- Hossam, A. A., Saad, S. G., Mitwally, H. H., Saad, L. M., & Noufal, L. (1990). Solar energy for sludge drying in Alexandria metropolitan area: Case study in Egypt. *Water Science and Technology*, 22(12), 193-204.
- Huang, Y. W., & Chen, M. Q. (2015). Artificial neural network modeling of thin layer drying behavior of municipal sewage sludge. *Measurement*, 73, 640-648.
- Huang, Y. W., Chen, M. Q., & Jia, L. (2016). Assessment on thermal behavior of municipal sewage sludge thin-layer during hot air forced convective drying. *Applied Thermal Engineering*, 96, 209-216.

- Idris, A., Khalid, K., & Omar, W. (2004). Drying of silica sludge using microwave heating. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6), 905-918.
- İşçi, S. (2006). Arıtma çamurlarının özellikleri ve arazide değerlendirme imkanlarının araştırılması (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- İzli, N. (2012). Bazı tarımsal ürünlerin mikrodalga konvektif kurutma yöntemiyle ince tabaka kurutma kuramına göre kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kara, T. (2008). Muzun farklı kurutma şartlarındaki kuruma karakteristiklerinin belirlenmesi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Karabacak, A. Ö., Sinir, G.Ö., Suna, S. (2015). Mikrodalga ve Mikrodalga Destekli Kurutmanın Çeşitli Meyve ve Sebzelerin Kalite Parametreleri Üzerine Etkisi, U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt 29, Sayı 2, 125-135
- Karr, P. (1976). Factors influencing the dewatering characteristics of sludge (Unpublished PhD Thesis).Clemson University.
- Kirby, B.J. (2010). *Micro- and nanoscale fluid mechanics: Transport in microfluidic devices*. Cambridge University Press.
- Lee, S. M., Choi, S. Y., Nguyen, D. D., Chang, S. W., & Kim, S. S. (2018). Sludge drying using microwave heating with Li₂CO₃-Fe₂O₃-ZnO materials. *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, 61, 28-31.
- Leonard, A., Meneses, E., Trong, E.L., Salmon, T., Marchot, P., Toye, D., & Crine, M. (2008). Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in a fixed bed. *Water Res.*, 42 (10-11), 2671-2677.
- Li, Q., Lu, X., Guo, H., Yang, Z., Li, Y., Zhi, S., & Zhang, K. (2018). Sewage sludge drying method combining pressurized electro-osmotic dewatering with subsequent bio-drying. *Bioresource Technology*, 263, 94-102.
- Litvin, S., Mannheim, C.H., & Miltz, J. (1998). Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *Journal Of Food Engineering*, 36, 103-111.
- Marahall, W.R.J.R., Seltzer, E. (1948). *Principles of spray drying*. New York: Presented at meeting of The American Institute of Chemical Engineers.
- Mawioo P.M., Garcia H.A., Hooijmans C.M., Velkushanova, K., Simonič, M., Mijatović, I., Brdjanovic, D. (2017). Plot-scale microwave technology for sludge sanitization and drying. *Science of the Total Environment*, 601/602, 1437-1448.
- Mawioo, P. M., Hooijmans, C. M., Garcia, H. A., & Brdjanovic, D. (2016a). Microwave treatment of faecal sludge from intensively used toilets in the slums of Nairobi, Kenya. *Journal Of Environmental Management*, 184, 575-584.

- Mawioo, P.M., Rweyemamu, A., Garcia, H.A., Hooijmans, C.M., Brdjanovic, D. (2016b). Evaluation of amicrowave based reactor for the treatment of blackwater sludge. *Sciences Total Environment*, 548/549, 72–81.
- MEGEP (2011). Arıtma çamurları. Ankara: T.C. Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Ar%C4%B1tma%20%C3%87amurlar%C4%B1.pdf, Erişim Tarihi: 31.01.2020.
- MEGEP (2012). *Sebzeleri kurutma*. Ankara: T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Sebzeleri%20Kurutma.pdf, Erişim Tarihi: 28.03.2020.
- Mengeş, G. (2005). Patatesin farklı kurutma şartlarındaki kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Navaee-Ardeh, S., Bertrand, F., & Stuart, P.R. (2010). Key variables analysis of a novel continuous biodrying process for drying mixed sludge. *Bioresource Technology*, 101, 3379-3387.
- Özbek, B., Dadalı, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83, 541-549.
- Özön, N. (2014). Yeni bir atık çamur kurutma sisteminin tasarlanması ve arıtma çamurlarına uygulanması (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Öztürk İ., Timur H., & Koşkan U. (2005). *Atıksu arıtımının esasları, evsel, endüstriyel atıksu arıtımı ve arıtma çamurlarının kontrolü- 1*. Ankara: Çevre BakanlığıYayını.
- Panton, R. L. (2013). *Incompressible flow* (4th Edition.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Putranto A., Chen X.D. (2014). Simple and effective model for modeling of convective drying of sewage sludge: The reaction engineering approach (REA). *Procedia Chemistry*, 9, 77 – 87.
- Sadıkoğlu H., & Özdemir M. (2003). Dondurarak kurutma teknolojisi ve evreleri, TÜBİTAK-MAM-Gıda Bilimi ve Teknolojisi Araştırma Enstitüsü Gebze-Kocaeli. *GIDA*, 28 (6), 643-649.
- Soysal, Y. (2000). İşletme ölçeğinde çeşitli tıbbi ve aromatik bitkilerin kurutulmasına yönelik bir araştırma (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Soysal, Y., Ayhan, Z., & Eştürk, O. (2009). *Mikrodalga ile meyve ve sebze kurutmada enerji kullanım verimliliği ve ürün kalitesinin arttırılmasında ileri kurutma tekniklerinin uygulanması üzerine araştırmalar*. Antakya: TÜBİTAK Proje No:105.
- Spinosa L. (2011). *Wastewater sludge* (2. Edition). IWA Publishing.

- Sun G.Y., Chen M.Q., & Huang Y.W. (2017). Evaluation on the air-borne ultrasound-assisted hot air convection thin-layer drying performance of municipal sewage sludge. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 588–599
- Tchobanoglous, G., & Burton, F., L. (1991). *Wastewater engineering treatment, disposal, reuse* (3. Edition). Metcalf and Eddy Inc.
- Tırnaksız, F. (2009). *Fazlararası denge ve faz kuralı, modern farmasotik teknoloji*. Ankara: Türk Eczacılar Birliği Eczacılık Akademisi Yayını, http://e-kutuphane.teb.org.tr/pdf/tebakademi/modern_farmasotik/9.pdf, Erişim Tarihi: 05.01.2020.
- Toraman, S. (2011). İplik bobinlerinin kuruma davranışının deneysel olarak belirlenmesi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Tuncal, T. & Uslu, O. (2014). A review of dehydration of various industrial sludges. *Drying Technology*, 32, 1642–1654.
- Turner, R.H., Kleiser, J.D., & Ross, P.D. (1989). Solar sludge drying, in: *Solar Engineering 1989—Proceedings of the 11th Annual ASME Solar Energy Conference*, San Diego, CA.
- Velis, C., Longhurst, P.J., Drew, G.H., Smith, R., & Pollard, S.J.T. (2009). Biodrying for mechanicalbiological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresource Technology*, 100 (11), 2747-2761.
- Wu, L., Orikasa, T., Ogawa, Y., & Tagawa, A. (2007). Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal of Food Engineering*, 83(3), 422-429.
- Yağcıoğlu, A. (1981). Tavuk gübresinin değişik hava koşullarında kuruma özelliklerinin saptanması üzerinde bir araştırma (Yayımlanmamış Doçentlik Tezi). Ege Üniversitesi, İzmir.
- Yağcıoğlu, A. (1999). *Tarım ürünleri kurutma tekniği*. İzmir: Ege Üniveristesi Ziraat Fakültesi Yayınları No:536.
- Yıldız Ş., Yılmaz E., & Ölmez E. (2009). Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri: İstanbul Örneği, TÜRKAY 2009 Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, YTÜ, 15-17 Haziran 2009, İstanbul.
- Zhang, D. Q., He, P. J., Jin, T. F., & Shao, L. M. (2008). Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation. *Bioresource Technology*, 99(18), 8796-8802.
- Zhang, D. Q., He, P. J., Yu, L. Z., & Shao, L. M. (2009). Effect of inoculation time on the bio-drying performance of combined hydrolytic-aerobic process. *Bioresource Technology*, 100(3), 1087-1093.
- Zhang, H., Su, L., Lv, T., & Dong, K. (2019). Coupling Heat Pump and Vacuum Drying Technology for Urban Sludge Processing. *Energy Procedia*, 158, 1804-1810.

- Zhang, J., Sui, Q., Tong, J., Buhe, C., Wang, R., Chen, M., & Wei, Y. (2016). Sludge bio-drying: Effective to reduce both antibiotic resistance genes and mobile genetic elements. *Water Research*, 106, 62-70.
- Zhao, L., Gu, W. M., He, P. J., & Shao, L. M. (2010). Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. *Water Research*, 44(20), 6144-6152.



İletişim Bilgisi: baharakyuz91@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Akyüz B., Saral A., & Avşar Y. (2020). Metal Kaplama Atıksuyu Arıtma Çamurunun Kurutulmasında Sıcaklık ve Vakum Etkilerinin Kıyaslamalı İncelenmesi, International Sempisium on Environmental and Morals, İstanbul.

