



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ULTRASONİK (US) ÖN İŞLEMİN ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME REAKTÖRÜNÜN VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ

Serkan ŞAHİNKAYA

DOKTORA TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos - 2011
KONYA
Her Hakkı Saklıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Serkan ŞAHİNKAYA

Tarih: 19.08.2011

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ULTRASONİK (US) ÖN İŞLEMİN ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTME REAKTÖRÜNÜN VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ

Serkan ŞAHİNKAYA

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ

2011, 198 Sayfa

Jüri
Danışman Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ
Prof. Dr. Ali BERKTAY
Doç. Dr. Ali Fuat AYDIN
Doç. Dr. Osman Atilla ARIKAN
Yrd. Doç. Dr. Esra YEL

Atık aktif çamurun arıtımı, atıksu arıtma tesislerindeki en karmaşık ve maliyetli konulardan biridir. Üretilen atık çamur miktarı, arıtma tesisilerinin işletme şartları ve maliyeti üzerinde ciddi etkiye sahiptir. Çamurun arıtımı için genellikle anaerobik çamur çürütücüler kullanılmaktadır. Ancak yavaş gerçekleşen hidroliz aşaması, çürütücülerin verimini sınırlamaktadır.

US ön arıtma ile anaerobik çamur çürütücünün veriminin arttırılması bu doktora tezinin esas amacıdır. Bu nedenle ilk olarak ön arıtmanın, çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerine, metan üretimine ve çamurun çürütülebilirliğine etkileri araştırılmıştır. Çamuru parçalamak için US ön arıtma ve onun iki farklı modifikasyonu olan US + alkali ve US + ısıl ön arıtma metotları kullanılmıştır. Alkali ve ısıl ön arıtma metotlarının da etkileri incelenmiştir. US ön arıtmanın bu iki metotla birleştirilmesindeki amaç, bu metotların farklı çamur parçalama mekanizmalarını birlikte kullanarak daha yüksek verim elde edilmesidir. Sinerjetik etki sonucunda, sadece US ön arıtma (1 W/mL'de 1 dk'lık ışınım) ile metan üretimi ham çamurun çürütüldüğü reaktöre kıyasla % 5.3 oranında arttırılırken; US + alkali ön arıtma (1 W/mL'de 1 dk'lık ışınım ve yarım saatlik 0.05 N NaOH alkali uygulamasının kombinasyonu) ile % 15.5 oranında ve US + ısıl ön arıtma (1 W/mL'de 1 dk'lık ışınım ve 1 saatlik 80 C'de ısıl işlemin kombinasyonu) sonucunda ise % 13.6 oranında arttırılmıştır. Böylece, US + alkali ön arıtma en düşük enerji sarfiyatı ile en yüksek verimin elde edildiği ön arıtma metodu olmuştur.

Son olarak, ön arıtmanın kesikli beslemeli çamur çürütücüye etkileri araştırılmıştır. Kesikli beslemeli anaerobik çürütücülere çamur beslenmeden önce, US + alkali ön arıtma ile parçalanmıştır. Çamurun ön arıtımı ile anaerobik çürütücülerde hem metan üretiminin hem de çamur stabilizasyonunun arttığı belirlenmiştir. 14 günlük HBS ve 1 kg UKM/m^3'lük OYH değerlerinde işletilen reaktörde, ön arıtma sonucunda metan üretimi % 33.3 ve UKM giderimi ise % 17.6 artmıştır. Aynı şartlarda 7 günlük HBS değerinde işletilen ön arıtmalı reaktörde elde edilen verim, 14 günlük HBS ile işletilen ön arıtmasız reaktördeki verime çok yakın olmuştur. Sonuç olarak, US + alkali ön arıtma ile anaerobik çürütücülerde metan üretimleri ve çürütme verimleri arttırılmıştır. Ayrıca, ön arıtma ile HBS'nin 14 günden 7 güne kısaltılmasının, yani çürütücü hacimlerinin yarı yarıya küçültülmesinin de mümkün olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkali ön arıtma, anaerobik çamur çürütme, atık aktif çamur, çamur ön arıtımı, ısıl ön arıtma, ultrasonik ön arıtma.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

EFFECTS OF US PRE-TREATMENT ON PRODUCTIVITY OF ANAEROBIC SLUDGE DIGESTER

Serkan ŞAHİNKAYA

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ

2011, 198 Pages

Jury
Advisor Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ
Prof. Dr. Ali BERKTAY
Assoc. Prof. Dr. Ali Fuat AYDIN
Assoc. Prof. Dr. Osman Atilla ARIKAN
Asst. Prof. Dr. Esra YEL

The treatment of waste activated sludge is one of the most complex and expensive issue in the treatment plants. The amount of sludge, produced during the wastewater treatment, has a critical influence on the economic and operational conditions of the treatment plants. Anaerobic sludge digesters are commonly used to treat the waste sludge. But the slow hydrolysis stage limits the efficiency of digesters.

The main purpose of this thesis study is to improve the efficiency of anaerobic sludge digesters by using ultrasonic (US) pre-treatment. Therefore, the effects of sludge pre-treatment on the physical and chemical properties, biodegradability of sludge and methane production were first investigated. In addition to US, US + alkali and US + thermal pre-treatment methods were utilized to disintegrate the sludge. The purpose of the combination of US pre-treatment with alkali and thermal pre-treatment methods is to improve the efficiency of sludge disintegration. Additionally, alkali and thermal pre-treatment methods were also studied. While ultrasonication alone (for 1 min at 1 W/mL) increased methane production % 5.3 in pre-treated batch anaerobic reactors; US + alkali pre-treatment (the combination of sonication for 1 min at 1 W/mL and alkalization for 0.5 h at 0.05 N) and US + thermal pre-treatment (the combination of sonication for 1 min at 1 W/mL and thermal pre-treatment for 1 h at 80℃) increased methane productions % 15.5 and 13.6, compared to the batch reactors without pre-treatment, respectively. Thus, US + alkali pre-treatment was the most effective method at the lowest energy consumption.

Finally, the effects of US + alkali pre-treatment on the semi-continuous anaerobic digesters were investigated. For this aim, the raw sludge was disintegrated by US + alkali pre-treatment. The pre-treatment of sludge was improved the bio-degradation of sludge in the digesters. As a result, the methane production and VS removal were increased to 33.3 % and 17.6 % in pre-treatment reactor operated at hydraulic retention time of 14 days and organic loading rate of 1 kg VS/m^3, compared to control reactor. Moreover, the efficiency of the pre-treatment reactor operating at hydraulic retention time of 7 days and organic loading rate of 1 kg VS/m^3 was found very close to the efficiency of control reactor operating at hydraulic retention time of 14 days and organic loading rate of 1 kg VS/m^3. As a result, the sludge pre-treatment was improved the methane production and stabilization degree of sludge. Additionally, it is determined that HRT in the pre-treated reactors can be shorten from 14 to 7 days and thus, the volume of digesters can be made smaller.

Keywords: Alkalization, anaerobic sludge digestion, sludge pre-treatment, thermal treatment, ultrasonic pre-treament, waste activated sludge.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamı gerçekleştirebilmem için bana destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ'ye çalışmanın tamamlanabilmesi için yaptığı değerli tavsiyeler ve yardımlarından dolayı şükranlarımı sunarım. Tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım Doç. Dr. Ali Fuat AYDIN'a ve Yrd. Doç. Dr. Esra YEL'e yaptıkları değerli katkılardan dolayı teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ali BERKTAY ve Doç. Dr. Celalettin ÖZDEMİR'e verdikleri desteklerden ötürü teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana sonsuz sevgileri ile sürekli destek olan ve bu eserin ortaya çıkmasında da büyük payın sahipleri olan sevgili annem Fadime ŞAHİNKAYA ve babam Salih ŞAHİNKAYA'ya şükranlarımı sunarım. Siz olmasaydınız, bu çalışma da olmazdı. Teşekkür ederim…

Sevgili eşim Havvanur ŞAHİNKAYA'ya gösterdiği sabır ve verdiği destekten dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, bu doktora tezinin gerçekleşebilmesi için verdiği maddi destekten dolayı (proje no: 08 – 10 – 1005), Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Serkan ŞAHİNKAYA

KONYA – 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

ABSTRACT v

ÖNSÖZ vi

İÇİNDEKİLER vii

SİMGELER VE KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

1.1. Problemin Tanımlanması 1

1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı 3

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4

2.1. Aktif Çamur Süreci 4

2.2. Atık Aktif Çamur (AAÇ) 4

2.3. Çamur Arıtımı 5

2.3.1. Anaerobik çamur çürütme 5

2.3.2. Anaerobik çamur çürütmenin mekanizması 6

2.3.3. Çürütücü verimini etkileyen faktörler 9

2.3.3.1. Sıcaklık 9

2.3.3.2. pH ve alkalinite 10

2.3.3.3. Nütrientler 10

2.3.3.4. Zehirlilik etkisi 11

2.3.4. Anaerobik çamur çürütücü tipleri 12

2.4. Çamur Ön Arıtımı 13

2.4.1. US ön arıtma 13

2.4.1.1. US ön arıtmanın verimine etki eden faktörler 17

2.4.1.2. US ön arıtmanın çamurun çürütülebilirliğine etkisi 23

2.4.1.3. US ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi 27

2.4.2. Alkali ön arıtma 28

2.4.3. Isıl ön arıtma 30

2.4.4. US ön arıtmanın geliştirilebilirliği ve hibrit sistemler 31

3. MATERYAL VE METOT 32

3.1. Atık Aktif Çamur (AAÇ) ve Anaerobik Aşı 32

3.2. Deneysel Kurgu 33

3.2.1. Kısa ve uzun süreli US ön arıtma 34

3.2.2. Alkali ön arıtma 35

3.2.3. Isıl ön arıtma 37

3.2.4. US + alkali ön arıtma 37

3.2.5. US + ısıl ön arıtma 39

3.3. Biyokimyasal Metan Üretim (BMP) Testi 40

3.4. Kesikli Beslemeli Anaerobik Reaktörler 41

3.5. Analitik Metotlar 43

3.6. İki Aşamalı Matematiksel Model 47

3.7. Anaerobik Çamur Çürütme için Kinetik Yaklaşımlar 48

3.7.1. Monod eşitliği 48

3.7.2. Kinetik modeller 49

3.7.3. Kinetik katsayıların belirlenmesi 50

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 51

4.1. US Ön Arıtma 51

4.1.1. Uzun süreli US ön arıtma 51

4.1.1.1. Çamurun TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi 52

4.1.1.2. US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi 53

4.1.1.3. US yoğunluğun çamurun su verme özelliğine etkisi 56

4.1.1.4. US yoğunluğun çamurun çökelebilme özelliğine etkisi 58

4.1.2. Kısa süreli US ön arıtma 59

4.1.2.1. US prob dalma derinliğinin etkisi 60

4.1.2.2. Çamurun TKM içeriğinin etkisi 64

4.1.2.3. US yoğunluğunun etkisi 69

4.1.3. Akustik kavitasyonun mekanizmalarının etkileri 76

4.1.3.1. Sıcaklık artışının etkisi 77

4.1.3.2. Oksitleyici radikallerin etkisi 80

4.1.3.3. Çamur pH'ının etkisi 81

4.2. Alkali Ön Arıtma 82

4.2.1. TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi 82

4.2.2. Alkali dozunun çamur parçalamaya etkisi 83

4.2.3. Alkali ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi 86

4.2.4. Alkali ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi 88

4.3. Isıl Ön Arıtma 88

4.3.1. Isıl ön arıtmanın çamur parçalamaya etkisi 89

4.3.2. Isıl ön arıtmanın çamurun su verme ve çökelebilme özelliklerine etkisi 90

4.4. US + Alkali Ön Arıtma 90

4.4.1. US + alkali ön arıtmanın çamur parçalamaya etkisi 93

4.4.2. US + alkali ön arıtmanın metan üretimine etkisi 99

4.4.3. US + alkali ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi 105

4.4.4. US + alkali ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi 108

4.5. US + Isıl Ön Arıtma 109

4.5.1. US + ısıl ön arıtmada sıcaklığın çamur parçalamaya etkisi 110

4.5.2. US + ısıl ön arıtmada US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi 112

4.5.3. US + ısıl ön arıtmanın metan üretimine etkisi 114

4.5.4. US + ısıl ön arıtmanın çamurun su verme ve çökelebilme özelliklerine etkisi 115

4.6. Kısa Süreli US Ön Arıtma, US + Alkali Ön Arıtma ve US + Isıl Ön Arıtma Metotlarının Çamur Parçalama Verimlerinin Karşılaştırması 118

4.7. Ön Arıtma Metotlarının Modellenmesi 120

4.7.1. Uzun süreli US ön arıtmanın modellemesi 120

4.7.2. Kısa süreli US ön arıtmanın modellemesi..... 122

4.7.3. Alkali ön arıtmanın modellemesi..... 123

4.7.4. US + alkali ön arıtmanın modellemesi 125

4.7.5. US + ısıl ön arıtmanın modellemesi..... 127

4.8. Anaerobik Çamur Çürütmenin Kinetiği 129

4.8.1. Kesikli reaktörlerde tKOİ ve UKM giderimlerinin kinetiği..... 131

4.9. Kesikli Beslemeli Anaerobik Çamur Çürütücüler 134

4.9.1. Kesikli beslemeli çamur çürütücülerde UKM giderimi 135

4.9.2. Kesikli beslemeli çamur çürütücülerde tKOİ giderimi..... 137

4.9.3. Biyogaz üretimi ve içeriği..... 139

4.9.4. UAKM konsantrasyonundaki değişim..... 141

4.9.5. pH ve alkalinitedeki değişim 143

4.9.6. Çözünmüş KOİ, karbonhidrat, protein, amonyak ve fosfat konsantrasyonları 144

4.9.7. Çürümüş çamurun su verme özelliğindeki değişim..... 145

4.10. Fayfa - Maliyet Analizi……147

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 151

5.1. Sonuçlar 151

5.2. Öneriler 154

KAYNAKLAR 156

EKLER 165

Ek - 1 165

Ek - 2 189

ÖZGEÇMİŞ 191

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A: Ultrasonik probun yüzey alanı (cm^2)

D_{NaOH}: Alkali ön arıtmada kullanılan alkali dozu (N)

E_S: Spesifik ultrasonik enerji (kW s/kg TKM)

k_0: Substrat giderimi için sıfırıncı derece reaksiyon sabiti (mg/L·sa)

k_1: Substrat giderimi için birinci derece reaksiyon sabiti (1/sa)

k_2: Substrat giderimi için ikinci derece reaksiyon sabiti (l /mg·sa)

K_S: Yarı hız konsantrasyonu (mg/L)

k_{max}: Maksimum spesifik substrat kullanım hızı (1/sa)

N_2: Azot gazı

P: Ultrasonik güç (W)

P_D: Ultrasonik doz (J/mL)

P_S: Ultrasonik şiddet (W/cm^2)

P_Y: Ultrasonik güç yoğunluğu (W/mL)

R: Substrat kullanım hızı (mg/L·sa)

R^2: Belirleme katsayısı

R_{max}: (k_{max}·X) maksimum substrat kullanım hızı (mg/L·sa)

S: Substrat konsantrasyonu (mg/L)

$S_{0:}$ Kesikli reaktörlerde başlangıçtaki substrat konsantrasyonu (mg/L)

S_t: Kesikli reaktörlerde t zamanında kalan substrat konsantrasyonu (mg/L)

t: Kesikli reaktörlerdeki hidrolik bekletme süresi (gün)

X: Biyokütle konsantrasyonu (mg/L)

V: Ultrasonik ışınıma maruz bırakılan çamur hacmi (mL)

Kısaltmalar

AAÇ: Atık aktif çamur

AKM (MLSS): Askıda katı maddeler (mg/L)

AMA: Metan üreten arkeller

BMP: Biyokimyasal metan üretim

BOİ: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (mg/L)

BSA: Bovin serum albumin

$ÇÇO_{30}$: Çökelmiş çamur oranı (%)

çKOİ: Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (mg/L)

EPS: Hücrelerarası polimerik maddeler

HBS (HRT): Hidrolik bekletme süresi (gün)

KAS: Katı alıkonma süresi (gün)

KES: Kapiler emme süresi (s)

KOİ: Kimyasal oksijen ihtiyacı (mg/L)

NH_3-N: Amonyak azotu (mg/L)

NİB: Nitrat indirgeyen bakteriler

OYH: Organik yükleme hızı (kg UKM/m^3)

ÖAÇ: Ön arıtma çamuru

$PD_{KOİ}$: Çamurun parçalanma derecesi (%)

SİB: Sülfat indirgeyen bakteriler

TKM: Toplam katı madde (mg/L)

tKOİ: Toplam kimyasal oksijen ihtiyacı (mg/L)

TUYA: Toplam uçucu yağ asitleri (mg/L)

UAKM (MLVSS): Uçucu askıda katı maddeler (mg/L)

UKM: Uçucu katı maddeler (mg/L)

US: Ultrasonik

UYA: Uçucu yağ asitleri

VS: Uçucu toplam katı madde (mg/L)

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımlanması

Kentsel ve endüstriyel atıksuların arıtımında aktif çamur süreci yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif çamur sürecinde organik maddelerin biyokimyasal oksidasyonu gerçekleştirilirken, sistemde yan ürün olarak biyokütle üretilmektedir. Biyokütlenin bir kısmı havalandırma havuzuna geri devir ettirilirken, fazla biyokütle sistemden uzaklaştırılmaktadır. Böylece, atık çamur, süreç için kaçınılmaz bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Süreçte atıksu arıtımı sırasında üretilen fazla atık biyokütle, "atık aktif çamur" (AAÇ) olarak adlandırılmaktadır. Kolayca bozunabilen ve kokuşma eğiliminde olan çamurun arıtılması, atıksu arıtma tesislerindeki en karmaşık ve maliyetli konulardan biridir. Atık çamuru arıtmanın maliyeti, atıksu arıtma tesislerinin ilk yatırım maliyetinin % 30 – 40'ı ve toplam işletme maliyetinin de % 50'si kadar olabilmektedir (Baeyens ve ark., 1997). Çamur miktarının azaltılması ve çürütülebilirliğinin geliştirilmesi, hem arıtma maliyetinin düşürülmesi ve hem de çevresel açıdan önemlidir. Ülkemizde gelişen çevre bilinci ve AB üyelik süreci ile getirilen yasal düzenlemeler sonucunda yaygınlaşan arıtma tesislerinde bir yılda üretilebilecek atık çamur miktarının, kişi başı günlük kuru madde üretiminin 60 – 90 g (Appels ve ark., 2008) olduğu kabulü ile, yaklaşık 2 milyon ton olacağı tahmin edilmiştir. Bu nedenle, çamur arıtımı için yeni teknolojilerin geliştirilmesinin ve yaygınlaştırılmasının, ekonomik ve çevresel nedenlerden ötürü büyük önemi vardır.

Çamur yönetimi için benimsenen başlıca iki önemli yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki sorunu kaynağında çözmek için geliştirilen ve daha az atık çamur üreten biyolojik arıtma süreçleridir. Bu yeni arıtma teknolojilerinde AAÇ ön arıtmaya maruz bırakıldıktan sonra havalandırma havuzuna geri devrettirilmekte ve atıksu arıtılırken, atık çamur miktarının da azaltılması sağlanmaktadır (Liu ve Tay, 2001; Liu, 2003; Yoon, 2003; Zhang ve ark., 2009a). Bu çözüm gelecekte inşa edilecek tesisler için ideal olsa bile, konvansiyonel arıtma süreçlerini kullanan mevcut tesislerde çamur arıtımı için yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde büyük arıtma tesislerinde çamur arıtımı için çoğunlukla anaerobik çamur çürütücüler kullanılmaktadır. Ardışık ve karmaşık süreçlerden oluşan ve karışık mikroorganizma kültürü tarafından gerçekleştirilen anaerobik çürütmede hız sınırlayan aşama hidrolizdir (Gavala ve ark., 2003). Bu nedenle, klasik arıtma süreçlerini kullanan tesislerde çürütücü verimini ve

kapasitesini arttırabilmek için çamur ön arıtma metotları geliştirilmektedir. Bu çözüm, çamur arıtımı için ikinci yaklaşımdır ve var olan tesislerde sorunun çözümü için önemli bir alternatiftir. Alkali ön arıtma (Li ve ark., 2008), asitlendirme (Liu ve ark., 2008), ısıl ön arıtma (Bougrier ve ark., 2006a; Bougrier ve ark., 2006b), mikrodalga radyasyonu (Eskicioglu ve ark., 2007), ozonlama (Zhang ve ark., 2009b) ve ultrasonik (US) ön arıtma (Pilli ve ark., 2011) çamuru parçalayarak hidroliz aşamasını hızlandırmak için kullanılabilecek önemli metotlardır. Bu metotlar arasında, US ön arıtmanın çok önemli üstünlükleri vardır. Bunlar; (1) kimyasal ilavesine gerek olmaması, (2) çamur iletim hattı üzerinde bile kısa sürelerde uygulanabilmesi, (3) çevreye zararsız, uygulanması basit ve etkili bir metot olmasıdır. US ön arıtma, çamuru parçalayarak çürütücülerde AAÇ'yi mikroorganizmalar için daha kolay erişilebilir hale getirmektedir (Carrere ve ark., 2010; Pilli ve ark., 2011). Sonuç olarak, hız sınırlayan hidroliz aşaması kısaltılarak çürütme süreci hızlandırılmakta ve UKM giderim verimi de geliştirilmektedir. Ayrıca anaerobik çürütücüdeki hidrolik bekletme süresi (HBS) azaltılırken metan üretimi de arttırılabilmektedir (Bougrier ve ark., 2005).

Çamurun US ön arıtımı ile ilgili yapılmış olan çalışmaların çoğunda, çamur parçalama verimine US yoğunluğunun, US ışınım süresinin ve katı madde içeriğinin etkileri yaygın olarak incelenmiştir (Akın, 2008; Zhang ve ark., 2007; Show ve ark., 2007). Ancak prob dalma derinliğinin, çamur pH'ının, uygulama sırasında gerçekleşen sıcaklık artışının ve kavitasyonun oksitleyici etkisinin ön arıtma verimine etkileri üzerine yapılmış çalışmalar daha azdır. AAÇ'nin US ön arıtımının verimine US yoğunluğunun, uygulama süresinin, katı madde içeriğinin, prob dalma derinliğinin, çamur pH'ının, süreç sırasında üretilen oksitleyici radikallerin ve artan sıcaklığın etkilerinin tam olarak belirlenmesi, bu çalışmanın hedefleri arasındadır. Bu faktörlerden US yoğunluğun ve ön arıtma süresinin metan üretimine etkisi, fiziksel ve kimyasal parametrelere ilave olarak gerçekleştirilen metan üretim testleri (BMP) ile değerlendirilmiştir. Ayrıca US ön arıtmanın farklı çamur parçalama metotları ile birlikte uygulanarak geliştirilebilirliği konusunda yapılmış çalışmalar oldukça yenidir ve bu konuda doldurulması gereken bilimsel bir boşluk bulunmaktadır. Sunulan bu tez çalışmasında, US ön arıtmanın, alkali ve ısıl ön arıtmalar ile birlikte uygulanarak geliştirilebilirliği araştırılmıştır. Bu kombinasyonların amacı, US ön arıtmanın ilk yatırım ve işletme maliyetlerini, çamur parçalama verimlerinde bir azalma olmadan düşürmektir. US ön arıtmanın alkali ön arıtma ile modifiye edildiği çalışmalar, bu kombine metot için yeterince kapsamlı olmayan ve sinerjetik etkiyi tam olarak

gösteremeyen çalışmalardır. Öte yandan, literatürde, US ön arıtma sırasında gerçekleşen sıcaklık artışını bir avantaj olarak kullanan, US + ısıl ön arıtma ile benzeri bir çalışmayla karşılaşılmamıştır. Bu iki farklı kombinasyon, bu tez çalışmasının en özgün yanını oluşturmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada, evsel atıksu arıtma tesislerindeki aktif çamur sürecinden kaynaklanan AAÇ'nin US, alkali, ısıl, US + alkali ve US + ısıl ön arıtma metotlarının kullanılarak parçalanması, bu metotların verimlerine etki eden parametrelerin belirlenmesi ve optimize edilmiş şartlarda gerçekleştirilen ön arıtmanın, anaerobik çamur çürütümenin verimine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu doktora tezinin hedefleri ise aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

- US ön arıtma ile çamurun çözünürlüğünün arttırılması,
- US çamur parçalamaya etki eden önemli parametrelerin belirlenmesi,
- US, US + alkali ve US + ısıl ön arıtmaların AAÇ'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkilerinin belirlenmesi,
- US ön arıtmada elde edilen çamur parçalama verimine, US + alkali ve US + ısıl ön arıtma metotları ile daha düşük US enerji sarfiyatlarında ulaşılması ve aynı US şartlarda verimin arttırılması,
- Anaerobik çürütme öncesinde uygulanabilecek en uygun çamur parçalama metodunun belirlenmesi,
- US, alkali, US + alkali ve US + ısıl ön arıtma metotlarının modellenmesi,
- Ham ve ön arıtılmış çamur için anaerobik çürütme kinetiklerinin belirlenmesi,
- Çamurun ön arıtımı sonucunda anaerobik çürütücüde çamurun çürütülebilirliğinin ve metan üretim potansiyelinin arttırılması,
- Ön arıtma ile mevcut tesislerdeki anaerobik çürütücülerin kapasitelerinin arttırılması ve böylece gelecekte ek reaktörlere ihtiyaç duyulmaması ve yeni kurulacak tesislerde ise reaktörlerin hacim veya sayılarının azaltılması
- Ön arıtmalı ve ön arıtmasız durum için fayda – maliyet analizinin yapılması ve kıyaslanmasıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Aktif Çamur Süreci

Arıtma tesislerinde biyokimyasal olarak organik maddelerin oksidasyonunu sağlayarak BOİ giderimini gerçekleştiren üniteler ikincil arıtma süreci olarak adlandırılmaktadır. Bu süreçlerden biri olan aktif çamur süreci, mikroorganizmaları ve biyolojik olarak bozunabilir olan ve olmayan askıda, kolloidal ve çözünmüş organik ve inorganik maddeleri içeren en az bir havalandırma havuzu ve bir çökeltme havuzundan oluşmaktadır. Bu süreçte atıksu, havalandırma ve/veya mekanik karıştırma ile askıda tutulan floklaşmış halde ve yüksek konsantrasyonda mikroorganizma içeren havalandırma havuzuna verilmektedir. Mikroorganizmalar organik maddeleri, karbon dioksit ve amonyağa indirgerken, aynı zamanda havalandırma havuzunda yeni biyokütleler üretilmektedir. Süreçteki mikroorganizma kültürü karışık olup, başlıca bakteriler olmak üzere protozoa, mantar, filamentli mikroorganizmalar ve virüslerden oluşmaktadır. Havalandırma havuzunu takip eden çökeltme havuzunda katı-sıvı faz ayrımına dayanarak atıksudan ayrılan kalıntı partikül halindeki organik maddeler ve mikroorganizma flokları arıtma çamurunu oluşturmaktadır. Bu çamurun bir kısmı, mikroorganizma konsantrasyonunu sabit tutabilmek için çökeltme havuzundan havalandırma havuzuna geri devir ettirilmektedir. Çoğunluğu ise AAÇ olarak sistemden uzaklaştırılmaktadır. Böylece AAÇ, kaçınılmaz bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.

2.2. Atık Aktif Çamur (AAÇ)

Genellikle kahverengi renkte ve floklu yapıda olan AAÇ'nin, organik madde içeriğinin yüksek olması, kolayca bozunabilen bir yapıda olması ve patojen mikroorganizmaları içermesi gibi nedenlerden dolayı, stabilize edilmesi gerekmektedir. Çamurun katı madde içeriği % 0.4 – 1.5 aralığındadır. Birincil çamura kıyasla, AAÇ daha az yağ, gres ve selüloz içermektedir. Buna karşın daha yüksek konsantrasyonlarda azot, fosfor ve protein içeriğine sahiptir. Ancak azot ve fosfor miktarı, azot ve fosfor giderimi sağlayan aktif çamur süreçlerinde daha azdır. Aktif çamurun alkalinitesi 580 – 1100 mg/L $CaCO_3$ ve pH'ı ise 6.5 – 8 aralığında değişmektedir (Izrail ve Mathai, 2006). Ön çökeltme çamuruna kıyasla, partikül ve taneciklerin daha ince olmasından dolayı AAÇ'de bağlı suyun miktarı daha fazladır. Bu nedenle çamurun su verme özelliği

kötüdür. Çamur içerisindeki su, serbest su veya partiküllere fiziksel ve kimyasal olarak bağlı sudur. Çamur içindeki bağlı su miktarının artması, çamuru şartlandırmak ve susuzlaştırmak için gereken enerji ve kimyasal miktarının da artması demektir. Yani AAÇ'yi susuzlaştırmak daha zor ve daha pahalıdır.

2.3. Çamur Arıtımı

Hem ön çökeltme çamurunun hem de AAÇ'nin çabuk bozunan yapılarından dolayı deşarjlarından önce stabilize edilmeleri gerekmektedir. Atık çamur aerobik çürütme, ısıl işlem, kireçleme ve kompostlama gibi metotlarla stabilize edilebilmesine rağmen; çoğu arıtma tesisinde anaerobik çürütücüler kullanılmaktadır.

2.3.1. Anaerobik çamur çürütme

Anaerobik çürütme, moleküler oksijenin yokluğunda organik maddelerin biyokimyasal olarak metan ve karbondioksit gazları ile kararlı son ürünlere dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Üretilen biyogazın % 65 – 70'i metan, % 30 – 35'i karbondioksit ve kalan kısmı ise azot, hidrojen, hidrojen sülfür ve su buharıdır.

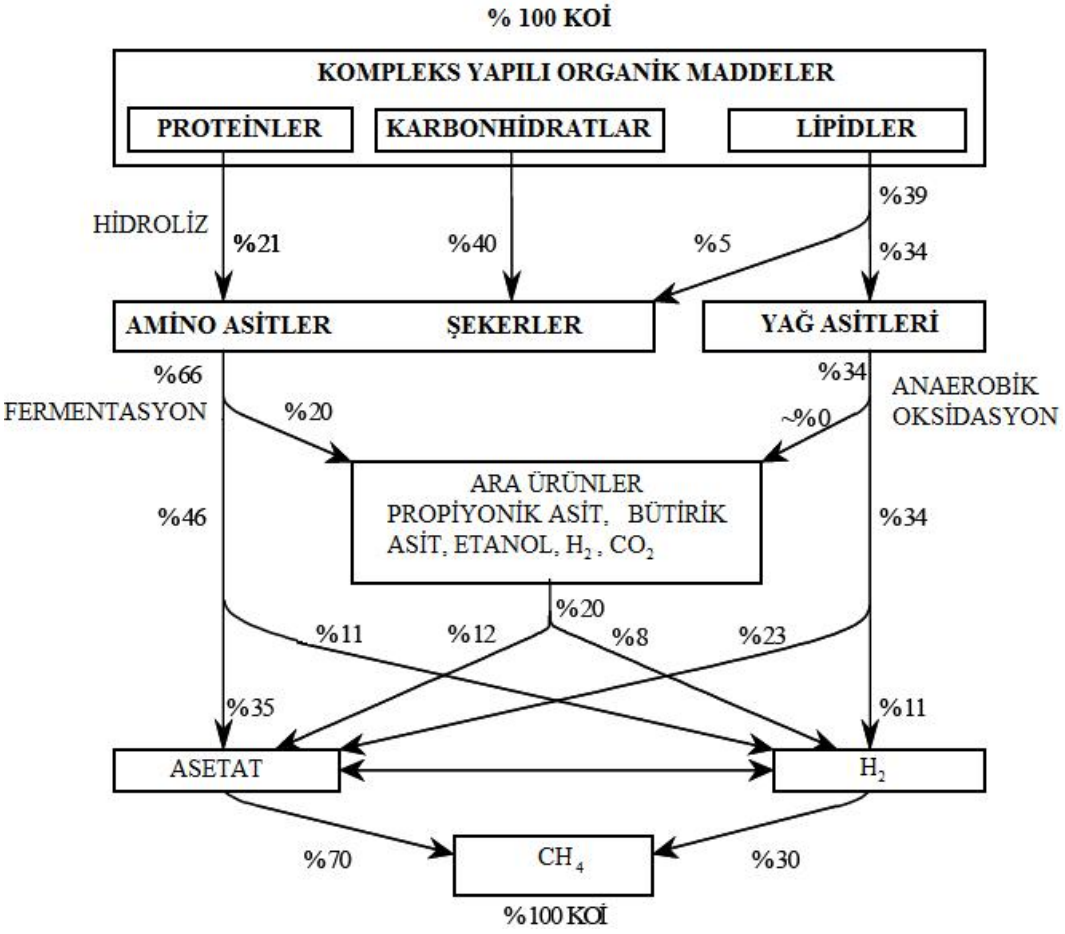
Atık çamurların nihai bertarafından önce içeriğindeki organik maddelerin stabilizasyonu için uzun zamandır kullanılan anaerobik çürütücülerin önemli avantajları vardır. Bunlar;

- Çamurun organik madde içeriğinin azaltılması,
- Çamur susuzlaştırmanın geliştirilmesi,
- Çamur hacminin ve kütlesinin azaltılması,
- Patojen mikroorganizmaların çoğunun yok edilmesi,
- Potansiyel enerji kaynağı olan metan gazının yan ürün olarak üretilmesidir.

Ayrıca sistemde serbest oksijene ihtiyaç duyulmaması, nütrient ihtiyacının olmaması ve biyokütle sentezinin çok daha az olması da aerobik sistemlere kıyasla anaerobik çürütücülerin diğer önemli üstünlükleridir.

2.3.2. Anaerobik çamur çürütmenin mekanizması

Anaerobik çürütme, birbirleriyle sürekli etkileşim halinde olan mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen karmaşık bir biyokimyasal süreçtir. Bozunma sürecinin aşamaları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Evsel arıtma çamurlarının anaerobik çürütülmesinin mekanizmaları (Öztürk, 2007).

Çözünmemiş organik maddelerin anaerobik bozunması için ilk aşama hidrolizdir. Bu aşama, hidrolitik bakteriler tarafından hücre dışı enzimler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu bakteriler, fakültatif ve zorunlu anaerobik bakterilerdir. Bu türler, çözünmüş veya çözünmemiş halde bulunan yüksek moleküler yapılı organik bileşiklerin indirgenmesini sağlayan enzimlere sahiptir. Bu nedenle enzimlerin çalışmasını etkileyen tüm şartlar, hidroliz aşamasının hızını da etkilemektedir. Eastman ve Ferguson (1981) zenginleştirilmiş kültür ile selülozik maddelerin hidrolizi üzerine yaptıkları çalışmada pH 6.7'de, pH 5.2'ye kıyasla hidrolizin daha hızlı gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Tong ve McCarty (1991) ise nötr pH'da ve 20 – 45℃ aralığındaki

sıcaklıklarda yaptıkları çalışmada, hidroliz verimin 45℃ sıcaklıkta daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Sonuç olarak, hidroliz aşamasının hızı, ortam pH'ı ve sıcaklığından etkilenmektedir. Ayrıca hidroliz verimini, çürütücüdeki HBS değeri de etkilemektedir. Hidroliz aşamasında yağlar, proteinler ve karbonhidratlar gibi yüksek yapılı ağır moleküllü organik bileşikler ile suda çözünmeyen organik maddeler, yağ asitleri, monosakkaritler, aminoasitler gibi yapı taşlarına parçalanmaktadır. Bu safhada karmaşık yapılı organik maddeler daha yavaş parçalandıkları için HBS önemlidir. Örneğin karbonhidratların, proteinlerin ve yağların hidroliz olma hızları sırasıyla 0.25, 0.2 ve 0.1 gün^{-1}'dir (Öztürk, 2007). Hidrolizin tam veya yeterli seviyede olamaması halinde ise, yeterli organik madde giderimi gerçekleşememekte ve metan üretimi de azalmaktadır. Sonuç olarak, çevresel faktörlerden etkilenen hidroliz, anaerobik çürütmenin hızını ve verimini sınırlayan aşamadır. Hidroliz aşamasında daha basit bileşenlere parçalanmış olan organik maddeler, asitleşme aşamasında uçucu yağ asitleri ve amonyak, karbondioksit, hidrojen sülfür gibi son ürünlere dönüştürülmektedir. Bu dönüşümler bakterilerin bünyelerinde gerçekleşmektedir.

Fermantasyondan sorumlu olan mikroorganizmalar "asitojenler" veya "asit üreticiler" olarak adlandırılırlar ve metanojik olmayan, fakültatif ve zorunlu anaerobik bakterilerdir. Bu bakterilere *Clostridium spp., Peptococcus anaerobus, Bifidobacterium spp., Desulphovibrio spp., Corynebacterium spp., Lactobacillus, Actinomyces, Staphylococcus* ve *Escherichia coli* örnek verilebilir (Öztürk ve ark., 2005). Fermantasyon, anaerobik çürütmedeki en hızlı aşamadır. Kararlı çalışan bir anaerobik çürütücüde fermantasyon ürünleri asetat, karbondioksit, hidrojen ve diğer indirgenmiş fermantasyon yan ürünleridir. Bu ürünler, metan üreten bakteriler tarafından doğrudan kullanılabilen substratlardır. Laktaz, etanol, bütirat, propiyanat ve uzun zincirli yağ asitleri, metanojenler tarafından doğrudan kullanılamazlar ve öncelikle "asitleşme" adı verilen aşamada zorunlu hidrojen üreten bakteriler tarafından yağ asitlerine dönüştürülmeleri gerekmektedir.

Hidroliz sonucunda üretilen bileşenler, asitleşme aşamasında kullanılmaktadır. Bu ürünler, asetik asit veya reaktörün işletme şartlarına bağlı olarak asetik asit ile propiyonik, butirik, izobutirik, valerik asit gibi yüksek yağ asitlerine dönüştürülmektedir. Böylece bu aşama, asetik asit ve uçucu asit üretim safhası olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hidroliz aşamasında daha basit bileşiklere parçalanan organik maddeler bir grup bakteri tarafından asetik asit gibi basit uçucu yağ asitlerine, diğer bir grup bakteri tarafından ise hidrojene dönüştürülmektedir. Hidroliz aşaması ve onu

takiben gerçekleşen asitleşme aşaması, çürütücü ortamının pH'ını kontrol etmektedir. Örneğin asetik asitin, karbondioksit ve metana parçalanabilmesi için ortam pH'ının dördün altına inmemesi gerekmektedir. Asetik asit ve propiyonik asit, iyi işletilemeyen anaerobik çürütücülerde sıkça karşılaşılan sorunlardır. Asit üreten bakteriler, yavaş üreyen ve yeni çevresel şartlara adapte edilmeleri zaman alan mikroorganizmalardır. Bu aşamada, ortamda sülfat veya nitrat olması durumunda bütirik ve propiyonik asitler gibi indirgenmiş bileşiklerin karbondioksit ve asetata oksidasyonu, sülfat (SİB) ve nitrat indirgeyen (NİB) bakteriler tarafından gerçekleştirilmektedir. Sistemdeki sülfat konsantrasyonunun çok yükselmesi halinde, sülfat giderimi sonucunda hidrojen sülfür konsantrasyonu metan üreten bakteriler için tehlikeli konsantrasyonlara ulaşabilmektedir. Bu durumda, SİB'ler metan arkeleri ile hidrojen için rekabet edebilmektedir. Öte yandan, bu aşamada protein ve amino asitlerin ayrışmasından amonyak da açığa çıkmaktadır. Amonyak konsantrasyonunun çok yükselmesi anaerobik arıtma sürecinde inhibisyona neden olsa da genellikle bu durum ile evsel arıtma çamurlarının çürütülmesinde karşılaşılmamaktadır. Anaerobik arıtma sürecinde asit üretimi, metan üretiminden daha hızlı olduğu için ani şok yüklemeler ile çözünmüş organik madde konsantrasyonundaki ani artış, asit üretimini arttırarak sistemde asit birikmesine ve pH'ın düşmesine neden olmaktadır. Böyle bir duruma müdahale edilmez ise, metan üreten bakteriler inhibe olabilmektedir.

Metanlaşma, metan üretebilmek için asitleşme aşamasında üretilen asetat ve hidrojenin kullanıldığı anaerobik çürütmenin nihai aşamasıdır ve iki grup bakteri tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu bakteriler, anaerobik sistemde serbest oksijene ve pH'a karşı en hassas olanlardır. Bunlardan birinci grup bakteriler, asetik asidi karbondioksit ve metan olarak parçalarken, karbon giderimi için de önemli bir görevi yerine getirmektedirler. Ayrıca asetik asit kullanarak metan ve karbondioksit ürettikleri için süreç pH'ının kontrolünde de önemli rol oynamaktadırlar. Anaerobik çürütücülerde üretilen metanın yaklaşık % 70'inin asetik asit kaynaklı olması nedeniyle, metan üretimi sistemdeki bu tür metanojenlerin miktarı ile sınırlıdır. Asetik asidi kullanarak metan üreten arkeller (AMA) olan bu bakterilerin en önemlileri *Methanothrix* ile *Methanosarcina'*dır. Her iki mikroorganizmanın da çoğalma hızları diğerlerine kıyasla daha düşüktür ve ikilenme süreleri yaklaşık 24 saattir. Metan üretiminde yer alan ikinci bakteri grubu ise, elektron alıcı olarak hidrojeni ve elektron verici olarak da karbondioksiti kullanmaktadır. Bu gruptaki metanojenler, AMA'lara kıyasla daha hızlı çoğalmaktadırlar ve ikilenme süreleri 4 – 6 saat arasındadır. Metan üreten bu bakteriler,

anaerobiktirler ve “metanojenler” veya “ metan üreticiler” olarak adlandırılmaktadırlar. Bu mikroorganizmalar arasında çubuksu olan *Methanobacterium* ve *Methanobacillus* ile küresel olan *Methanococcus* ve *Methanosarcina*, anaerobik süreçte hâkim durumdadırlar (Öztürk ve ark., 2005). Çoğalma hızları çok yavaş olan bu bakterilerin, ortam şartlarına karşı çok hassas olmalarından dolayı işletme şartlarına dikkat edilmediği takdirde; metanlaşma, çabuk hidroliz olan atıklar için anaerobik çürütmede hız sınırlayıcı aşama olmaktadır. Metan üreten bakteriler, reaktörde kısa HBS değerlerinin uygulanması halinde sistemden yıkanmaktadırlar. Bu durum, reaktördeki metan üretiminin durmasına bile neden olabilmektedir.

2.3.3. Çürütücü verimini etkileyen çevresel faktörler

Karmaşık bir biyokimyasal süreç olan anaerobik çürütme fiziksel ve kimyasal şartlardan etkilenmektedir. Bu faktörler sıcaklık, pH, alkalinite, nütrientler ve toksik maddelerin varlığıdır.

2.3.3.1. Sıcaklık

Anaerobik çürütme, iki farklı sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir; mezofilik (35 – 37℃) ve termofilik (50 – 60℃) sıcaklıklar. Sıcaklık artışının organik bileşiklerin çözünürlüğünü arttırması, biyolojik ve kimyasal reaksiyonları hızlandırması ve termofilik şartlarda patojen mikroorganizmaların ölüm oranını yükseltmesi gibi avantajları vardır. Sıcaklıktaki yükselme, hücre dışı enzimlerin aktivitesini ve kütle transferini arttırarak mikroorganizmaların üreme hızına, metabolik faaliyetlerine ve çürütücüdeki mikrobiyal populasyona etki etmektedir. Buna karşın, uzun süreli sıcaklık düşmesi, asetik asit kullanarak metan üreten bakterileri etkileyerek metan üretimini azaltmaktadır. Ayrıca, reaktörlerdeki sıcaklık aralığının mezofilik aralıktan termofilik aralığa çıkartılması, mezofilik bakterilerin ölümü ile sonuçlanmaktadır. Sıcaklık değişimine karşı özellikle metan üreten bakteriler hassastırlar ve metan bakterileri, bu değişime uyum sağlayamazlar. Sonuçta sıcaklık salınımı, sistemde asit birikmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, reaktörler, sabit sıcaklıkta işletilmelidir.

Mezofilik anaerobik çamur çürütücüler, termofilik çürütücülere kıyasla daha yaygın kullanılmaktadır (Gavala ve ark., 2003). Bunun başlıca nedenleri, çürütücüyü ısıtmak için gereken enerji ihtiyacının daha düşük olması ve sürecin daha kararlı

çalışmasıdır. Buna karşın termofilik çürütücülerde, daha kısa HBS değerlerinde daha fazla metan üretimi ve çamurun daha fazla stabilize edilmesi mümkündür (Ahring, 1994).

2.3.3.2. pH ve alkalinite

Anaerobik çürütmede optimum pH aralığının 6.6 – 7.6 olmasına rağmen, sistemde yer alan çeşitli mikroorganizma grupları için farklı optimum pH aralıkları vardır. Örneğin, fermantasyon bakterileri pH'a karşı daha az duyarlıdırlar ve pH 4 – 8.5 aralığında faaliyetlerini sürdürebilmektedirler. Ancak metan üreten bakteriler için bu aralık 6.5 – 7.2 civarıdır. Sistemde optimum şartların sürdürülememesi halinde, asit üreten bakteriler metan üreten bakterilerin tüketebileceğinden daha fazla uçucu asit üretmektedir. Sonuçta, yeterli tamponlama kapasitesinin yokluğunda, pH değerinin 6.6'nın altına inmesi ile metan üretimi kesilmektedir. Böylece üretilen organik asitler sistemde birikmekte ve pH'ın daha da düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, anaerobik sistemlerin devreye alınmasında karşılaşılan sorunlardan biridir. pH'ın 6'nın altına inmesi halinde 24 saat içinde müdahale edilmez ise, anaerobik süreç çökmektedir. Sonuçta bu, reaktörün yeniden işletmeye alınması için haftalar ve hatta aylar geçmesine neden olmaktadır.

Anaerobik reaktörde tamponlayıcı bileşiklerin varlığı, substrat konsantrasyonuna ve organik madde yüküne bağlıdır. pH değerinin kararlı olması için gerekli alkalinite, karbonat dengesi ile sağlanmaktadır. Anaerobik süreçte yer alan tamponlayıcı bileşikler, karbonik asit (bikarbonat), hidrojen sülfit, fosfat ve amonyaktır (Anderson ve Yang, 1992). Yüksek konsantrasyonda organik bağlı azot, amonyuma dönüştürülmekte ve böylece sudan bir proton alıp OH^- iyonunu serbest bırakarak alkalinite üretmektedir. Sülfitin sistemde karbonata kıyasla düşük konsantrasyonlarda bulunmasından dolayı, genellikle tamponlama kapasitesine olan katkısı ihmal edilmektedir. Ancak, fosfat konsantrasyonunun yeterince yüksek olduğu durumlarda, tamponlama kapasitesine katkısı vardır.

2.3.3.3. Nütrientler

Anaerobik bozunmada kirleticilerin giderimi, yeni mikrobiyal hücrelerin üretimi ve organik maddelerin metan ve karbondioksite dönüşümü için azot, fosfor, iz

elementler gibi nütrientlerin yeterli miktarda bulunması gereklidir. Bunlar arasında azot ve fosfor, en gerekli nütrientlerdendir ve kararlı haldeki reaktörde C/N/P oranı 700:5:1'de sabit tutulabilir (Öztürk ve ark., 2005). Evsel atıksu karışımında, anaerobik arıtma için gerekli nütrientler sistemde sınırlayıcı olamayacak kadar çok bulunmaktadır. Bu nedenle, evsel arıtma çamurlarının da anaerobik çürütme için yeterli miktarda azot, fosfor ve iz elementleri (kalsiyum, sodyum, potasyum, demir, nikel, kobalt, sülfür, vb.) içerdiği kabul edilmektedir.

2.3.3.4. Zehirlilik etkisi

Mikroorganizmalara zehirlilik etkisi gösteren amonyak, hidrojen sülfür ve uçucu yağ asitleri gibi bileşiklerin, reaktörün hem yeni işletmeye alındığı dönemlerde hem de normal işletme dönemlerinde sürekli kontrolü gerekmektedir.

Amonyak, azotlu organik maddelerin parçalanması sonucunda üretilmektedir. Amonyum ve serbest amonyak, inorganik azotun en sık karşılaşılan şekilleridir. Serbest amonyak, amonyağın en toksik halidir (Chen ve ark., 2008). Serbest amonyak konsantrasyonu ise sıcaklık, pH ve toplam amonyak konsantrasyonu tarafından belirlenmektedir (Hansen ve ark., 1998). Azot, mikroorganizmalar için önemli nütrientlerden biri olduğu için, 200 mg/L'den daha az konsantrasyonlardaki amonyak anaerobik çürütücüler için faydalıdır (Liu ve Sung, 2002; Appels ve ark., 2008).

Sülfat genellikle atıksuda bulunduğu için AAÇ'de de bulunabilmektedir. 150 mg/L hidrojen sülfür mikrobiyal populasyonda inhibisyona neden olmaktadır (Öztürk, 2007).

Uçucu yağ asitleri toksik olmasalar bile, sistemde aşırı birikmeleri pH'ın kritik seviyelere düşmesine ve metan üretiminin azalmasına neden olmaktadır. Anaerobik reaktörlerde asit birikmesi reaktör içeriğinin aşırı ısıtılmasından, organik yükleme hızının (OYH) artmasından, gaz geri devir hattından hava emilmesinden, atık bileşimindeki değişimlerden ve çok düşük veya yüksek amonyak konsantrasyonlarından kaynaklanabilmektedir. Böylece, alkalinitenin düşmesine neden olarak pH'daki kararlılığı da bozmaktadır. Sonuç olarak, inhibe edici bu faktörlerden bir veya birkaçının bir araya gelmesi ile reaktörün kararlılığı bozulmaktadır.

2.3.4. Anaerobik çamur çürütücü tipleri

Anaerobik çamur çürütme reaktörlerinin tasarımında kullanılan üç temel reaktör tipi vardır. Bu reaktör tipleri şunlardır;

- Standart hızlı çamur çürütücüler,
- Yüksek hızlı çamur çürütücüler,
- Yüksek hızlı ve iki aşamalı çamur çürütücüler.

Standart hızlı çamur çürütücüler, anaerobik çamur çürütücülerin en basit şeklidir. Çamurun ısıtılmadığı bu reaktör tipinde, HBS 30 – 60 güne kadar uzayabilmektedir. Çürütücü içeriğinin karıştırılmadığı reaktörde dört tabaka oluşmaktadır; köpük, duru faz, aktif çürüme bölgesi ve en altta çürümüş çamurun oluşturduğu tabakalar. Biyogaz ise reaktörün üstünde toplanmaktadır. Duru faz yüzeyden alınıp tekrar arıtılmak üzere arıtma tesisine geri devrettirilmektedir. Çürümüş çamur ise dipten çekilmektedir. Bu basit çürütücü tipi, genellikle küçük arıtma tesislerinde kullanılmaktadır.

Yüksek hızlı çamur çürütücüler, standart hızlı çürütücülerin geliştirilmiş halidir. Reaktör içeriğinin sürekli karıştırılması ve ısıtılması ile çürütücü verimi ve stabilitesi yükseltilmiştir. Çamurun karıştırılması biyogazın resirkülasyonu, çamurun reaktör içerisinde devir ettirilmesi veya mekanik karıştırma ile yapılmaktadır. Çamurun ısıtılması ise genellikle işletme ve bakım kolaylığı sağlayan harici ısıtıcılar ile gerçekleştirilmektedir. Düzenli aralıklarla veya sürekli olarak yoğunlaştırılmış çamurun beslenmesi, bu reaktörlerin kararlı halinin devamı için önemlidir. Böylece metanojenik bakteriler için şok yüklemeler azaltılmaktadır. Bu reaktörlerde HBS ise 15 – 20 gündür. Günümüzde anaerobik çürütmenin tüm aşamalarının bir reaktör içerisinde gerçekleştirildiği yüksek hızlı çamur çürütücüler, özellikle büyük arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

İki fazlı anaerobik çürütücülerde hidroliz ve asitleşme aşamaları birinci reaktörde, metanlaşma aşaması ise ikinci reaktörde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle ilk reaktör “asit faz çürütücüsü”, ikinci reaktör ise “metan faz çürütücüsü” olarak adlandırılmaktadır. Asit faz çürütücüsü pH 5.5 – 6.5 aralığında mezofilik veya termofilik şartlarda ve 1 – 2 günlük HBS ile işletilmektedir. Metan faz çürütücüsü ise 10 günlük HBS için tasarlanmakta ve mezofilik şartlarda işletilmektedir. İki fazlı çürütücülerin tek fazlılara kıyasla en önemli avantajları artan biyogaz üretimi, biyogazın

artan metan içeriği ve daha fazla UKM giderimidir. Bu tip çamur çürütücüler, yeni inşa edilen büyük ölçekli atıksu arıtma tesislerinde kullanılmaya başlanmıştır.

2.4. Çamur Ön Arıtımı

Anaerobik çürütücülerde, atık çamurdaki mikrobiyal hücrelerin parçalanması, hücre içi biyopolimerlerin çözünmesi ve daha basit organiklere dönüştürülmesinden oluşan hidroliz, hız sınırlayan aşamadır (Nickel, 2002). Hidroliz aşamasının uzun olması, düşük mikrobiyal dönüşüm hızından kaynaklanmaktadır. Hidroliz aşamasının uzaması, çamur çürütücülerde HBS'nin uzamasına ve çürütücü hacminin büyümesine neden olmaktadır. Çamur çürütücülerin en önemli eksikliği olan bu sorunu çözmek için çeşitli ön arıtma metotları kullanılabilmektedir. Literatürde çamur ön arıtımı için uygulanmış pek çok metot bulunmaktadır. Alkali ön arıtma (Lin ve ark., 1998; Li ve ark., 2008; Torres ve Llorens, 2008), asitlendirme (Chen ve ark., 2007; Liu ve ark., 2008), Fenton prosesi (Erden ve Filibeli, 2010), mikrodalga ışınımı (Eskicioglu ve ark., 2007; Eskicioglu ve ark., 2009), ısıl ön arıtma (Neyens ve Baeyens, 2003; Appels ve ark., 2010) ve US ön arıtma (Bougrier ve ark., 2006a; Carrère ve ark., 2010; Pilli ve ark., 2011) bu ön arıtma metotlarına örnektir. Bu metotlar arasında, kimyasal ilavesi gerektirmeyen, kısa sürelerde yüksek verimle kullanılabilen ve ayrı bir reaktöre ihtiyaç duyulmadan çamur boru hattı üzerinde bile uygulanabilen US ön arıtma, etkili ve gelecek vaat eden bir metot olarak öne çıkmaktadır.

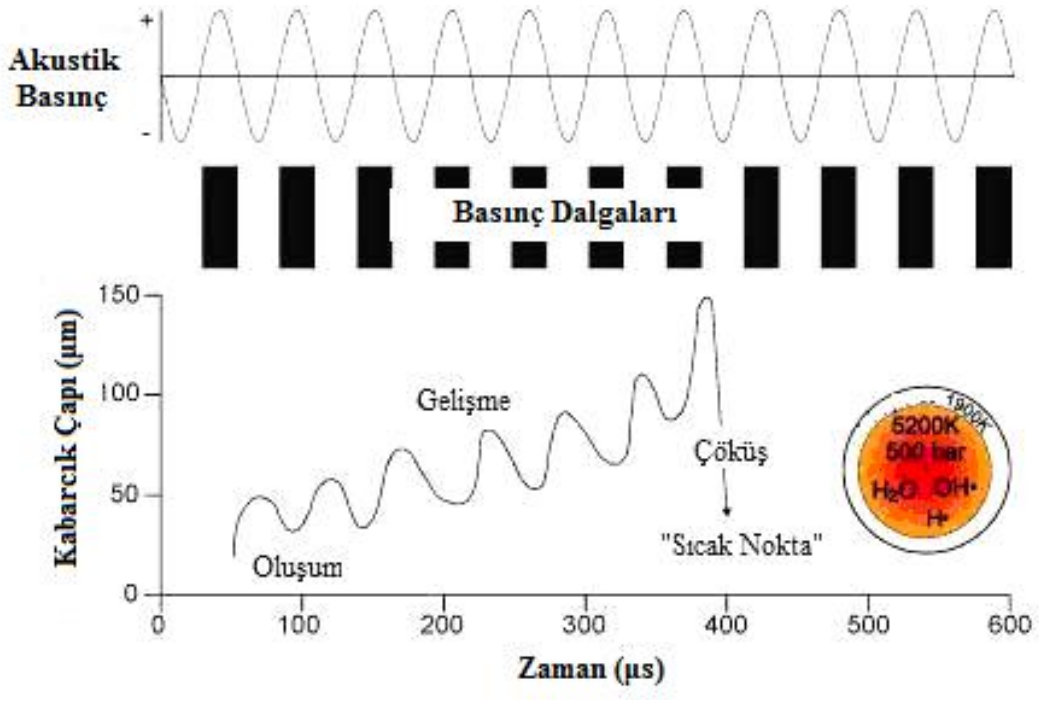
2.4.1. US ön arıtma

Ultrases, insan kulağı tarafından algılanamayan yüksek frekanslarda yayılan ses dalgaları olarak nitelendirilmektedir ve 20 kHz ile 10 MHz frekans aralığında tarif edilmektedir (Mason ve Peters, 2002).

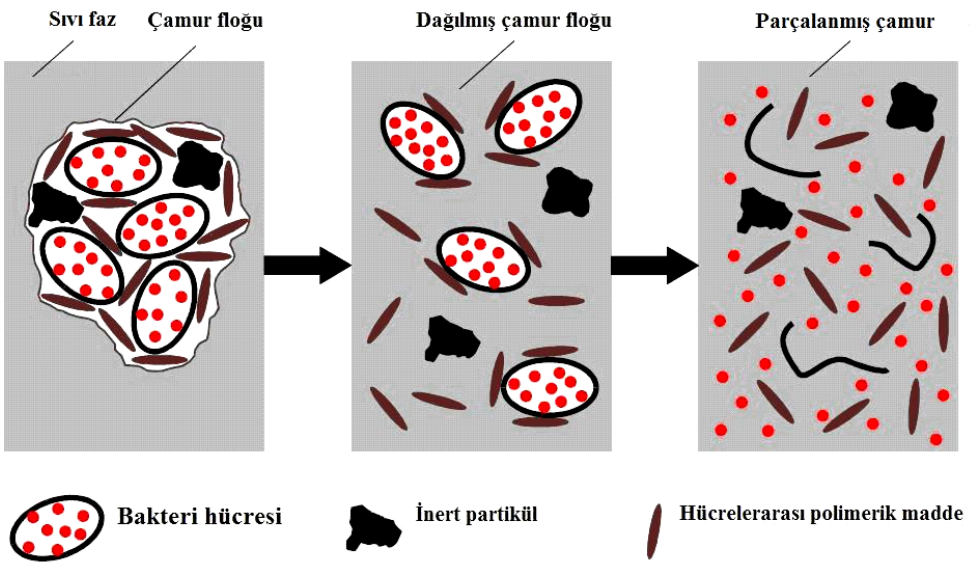
Bir sıvı ultrasese maruz bırakıldığı zaman; sıvı ortam içinden geçen yüksek yoğunluklu US ses dalgaları, kavitasyon kabarcıklarının oluşmuna neden olmaktadır. Bu olaya "akustik kavitasyon" denilmektedir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, akustik kavitasyonun mekanizması üç ayrı aşamada incelenmektedir; kabarcık çekirdeğinin oluşumu, kabarcığın gelişimi ve kabarcığın çöküşü. US ses dalgalarının pozitif yarı döngüsü sırasında sıvı molekülleri sıkışmakta, ama bunun aksine ses dalgalarının negatif yarı döngüsü sırasında ise sıvı molekülleri genleşmektedir. Sonuç olarak akustik

basıncın şiddeti, hidrostatik basınçtan daha büyük olduğu zaman, sıvı molekülleri parçalanmaktadır. Akabinde, negatif basınç döngülerinin etkisi ile genişleyen boşluklar oluşmaktadır. Şok dalgalarının yayılması sırasında üretilen enerjinin serbest bırakılması ile oluşan bu kabarcıkların çöküşleri, mikrosaniyeler içinde gerçekleşmektedir. Bu esnada, çöken kabarcıkların içinde 5000℃ sıcaklık ve 500 atm basınca sahip aşırı şartlar oluşmaktadır (Pilli ve ark., 2011). Bu aşırı şartlar, sıvı ortam içerisinde bazı fizikokimyasal sonuçlara neden olmaktadır. Bunlar aynı zamanda akustik kavitasyonun, sıvı ortamdaki kirleticilerin oksidasyonundan ve AAÇ'nin parçalanmasından sorumlu olan mekanizmalardır. Bu mekanizmalar, su moleküllerinin parçalanması sonucunda üretilen $OH^{\bullet}$, $O^{\bullet}$, $H^{\bullet}$ gibi oksitleyici radikaller ile gerçekleşen oksidasyon, mikro kabarcıkların çöküşü sırasında oluşan şiddetli jet akımları ve şok dalgalarının geliştirdiği hidromekanik kesme kuvvetleri, sıvı ortam sıcaklığının yükselmesi ve hidrofobik kirleticilerin kavitasyon kabarcıkları içerisinde pirolizidir (Wang ve ark., 2005). Ancak hangi mekanizmanın baskın olacağı US frekansa bağlı iken; bu mekanizmaların şiddetlerini uygulanan US güç belirlemektedir. Bu mekanizmalardan biri olan hidromekanik kesme kuvvetleri, çamur floklarının dağıtılmasını ve hücrelerin parçalanmasını sağlayan esas mekanizmadır (Mason ve Peters, 2002). Bu kuvvetlerin en etkili olduğu frekanslar, 20 kHz ve civarındaki düşük US frekanslardır (Tiehm ve ark., 2001).

Atık çamurda akustik kavitasyonun oluşumu sonucunda, önce çamur flokları dağılmakta ve hücrelerarası polimerik maddelerin (EPS) sıvı faza geçmesi sağlanmaktadır. US ön arıtmaya devam edilmesi, dağılan floklardan kopan hücrelerin duvarlarını ve zarlarını parçalamakta ve böylece, hücre içi bileşenlerin katı fazdan sıvı faza geçmesi sağlanmaktadır. Sonuç olarak, çamurun çözünürlüğü arttırılmakta ve anaerobik çürütücülerde biyokimyasal yollarla gerçekleştirilen hidroliz, US ön arıtma ile hidromekanik kesme kuvvetlerinin oluşumu sonucunda fiziksel yollarla gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.2. Akustik kavitasyonun oluşumu (Neis ve Nickel, 2001).



Şekil 2.3. US çamur parçalamanın şematik gösterimi (Neis ve Nickel, 2001).

Atık çamurun ön arıtımı ile ilgili çalışmalarda, ön arıtma veriminin değerlendirilmesinde kullanılan esas parametre "çamurun parçalanma derecesi ($PD_{KOİ}$)"dir. $PD_{KOİ}$, ön arıtma ile çKOİ'de sağlanan artışın, çamurun çözünürlüğünde elde edilebilecek en büyük değere oranıdır ve Eşitlik (1)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Zhang ve ark., 2007).

$$PD_{KOİ} = \frac{(çKOİ - çKOİ_0)}{(tKOİ - çKOİ_0)} \cdot 100 \quad (1)$$

Burada $PD_{KOİ}$, çamurun parçalanma derecesi (%); çKOİ, ön arıtılmış çamurun çKOİ konsantrasyonu (mg/L); $çKOİ_0$, çamurun başlangıçtaki çKOİ konsantrasyonu (mg/L) ve tKOİ, çamurun tKOİ konsantrasyonu (mg/L)'dur.

US ön arıtma ile çamur parçalamanın avantajları ise şunlardır;

- Çamurdaki filamentli bakterilerin parçalanması,
- Çamurun çökelebilme özelliğinin geliştirilmesi,
- Çamuru yoğunlaştırmak için gereken flokülant miktarının azaltılması,
- Çamur susuzlaştırmak için gereken polimer miktarının azaltılması,
- Anaerobik çürütücüde metan üretiminin arttırılması,
- Anaerobik çürütücüde UKM gideriminin geliştirilmesi,
- Anaerobik çürütücüde çamurun HBS'nin azaltılması,
- Çürümüş çamur miktarının ve nihai bertaraf maliyetinin azaltılması.

US çamur parçalama, enerjiye bağımlı bir metottur. Bu nedenle uygulanan gücün tanımlanması önemlidir. Ancak uygulanan güç için kullanılan farklı birimler bulunmaktadır. Bunlar US yoğunluk, US şiddet, US doz ve US spesifik enerjidir. Bu birimler, aşağıda kısaca özetlenmiştir.

US yoğunluk (P_Y) , birim hacimdeki sıvıya uygulanan US güçtür ve birimi W/mL veya W/L'dir. Çamurun katı madde içeriği sabit tutulduğu sürece, uygulanan gücü ifade etmek için kullanılabilecek birimdir ve Eşitlik (2)'de gösterilmiştir.

$$P_Y = \frac{P}{V} \quad (2)$$

Burada P_Y, US yoğunluk (W/mL); P, uygulanan US güç (W) ve V, US'ye maruz bırakılan çamurun hacmi (mL)'dir.

US şiddet (P_S), ultrases üretecinin probunun birim alanı tarafından çamura verilen US güçtür ve üretecin US güç üretme kapasitesinin de bir göstergesidir. Birimi W/cm^2'dir (Eşitlik 3).

$$P_S = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Burada P_S, US şiddet (W/cm^2); *P*, uygulanan US güç (W); A, US probun yüzey alanı (cm^2)'dır. P_S, çamuru parçalamak için uygulanan gücü tam olarak ifade etmediği için genellikle kullanılmamaktadır.

US doz (P_D), birim hacimdeki çamura belirli bir zamanda uygulanan US güçtür. Birimi W·s/mL'dir (Eşitlik 4).

$$P_D = \frac{P \cdot t}{V} \tag{4}$$

Burada P_D, US doz (W·s/mL) ve t, US ön arıtma süresi (s)'dir.

US spesifik enerji (E_S), yukarıda anlatılan diğer güç birimlerine kıyasla daha sık kullanılmaktadır. Çamur parçalama verimine etki eden önemli parametreler olan ön arıtma süresi, uygulanan US güç, çamurun katı madde içeriği ve çamur hacmi, "US spesifik enerji" adı verilen tek bir parametrede bir araya getirilmiştir. Birimi kW·s/kg TKM veya kJ/kg TKM'dir. E_S, Eşitlik (5)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Bougrier et al., 2005).

$$E_S = \frac{P \cdot t}{V \cdot TKM} = \frac{P_D}{TKM} \tag{5}$$

Burada TKM, US ön arıtmanın uygulandığı çamurun TKM konsantrasyonu (mg/L)'dur.

2.4.1.1. US ön arıtmanın verimine etki eden faktörler

US ön arıtmanın verimi çeşitli bağımsız değişkenlere bağlıdır. Bunlar, ön arıtmanın gerçekleştirildiği US şartlar ve çamurun özellikleridir. Bu parametrelerin verimi nasıl etkilediği aşağıda belirtilmiştir.

US frekans

Akustik kavitasyon, 20 kHz – 1 MHz frekans aralığında oluşmaktadır (Mason ve Lorimer, 2002). Frekans, uygulandığı ortamdaki ses alanının boyutuna etki ederek kavitasyonun baskın mekanizmasını belirlemektedir. İleri oksidasyon proseslerinden biri olan US oksidasyon, 100 kHz'den büyük frekansların uygulandığı proseslerdir. Sıvı ortamdaki organiklerin, US ışınım sonucunda üretilen $OH^{\bullet}$, $O^{\bullet}$, $H^{\bullet}$ gibi oksitleyici radikaller tarafından parçalaması US frekanstan başka organik maddelerin uçuculuğuna

da bağlıdır. Çünkü uçucu bileşikler, hidrofobik özellik göstererek kavitasyon kabarcıklarının içine girmekte ve kabarcık içerisindeki aşırı şartlarda pirolize uğrayarak bozunmaktadır (Fındık ve Gündüz, 2007). Uçucu olmayan bileşikler ise sıvı ortamda üretilen oksitleyici radikaller tarafından oksitlenmektedir. US çamur parçalamada ise baskın mekanizma hidromekanik kesme kuvvetleridir. Bu kuvvetlerin 100 kHz'in altındaki frekanslarda daha etkili oldukları bilinmektedir (Portenlanger, 1999). Böylece arıtma çamurlarının US ön arıtımında iki husus ön plana çıkmaktadır; (1) hidromekanik kesme kuvvetlerinin baskın olduğu 100 kHz'den küçük frekanslarda sistemin oksidant üretme potansiyeli daha düşüktür (Mason ve Lorimer, 2002) ve (2) arıtma çamurundaki organik maddelerin büyük çoğunluğu biyokütle ve inert yapılı organik maddelerdir ve bu maddeler uçucu değillerdir. Sonuç olarak kavitasyonun kolayca oluşabildiği ve hidromekanik kesme kuvvetlerinin en etkili olduğu 20 kHz ve civarındaki düşük US frekanslar (Zhang ve ark., 2007), US ön arıtma için en uygun frekanslardır (Tiehm ve ark., 2001).

Tiehm ve ark. (2001) US frekansın çamur parçalamaya etkisini araştırdıkları çalışmada, 41 kHz'den 3217 kHz'e kadar artan frekanslarda çamur parçalama veriminin azaldığını belirlemişlerdir. Bu sonuç kavitasyon ile üretilen kabarcıkların çapının, uygulanan frekanstaki artış ile küçülmesinden kaynaklanmıştır. Böylece çöken kabarcığın neden olduğu mikro türbülansların ve jet akımlarının etkinleri azalmış ve hidromekanik kesme kuvvetlerinin şiddeti de azalmıştır. Sonuç olarak, uygulanan en düşük frekans olan 41 kHz'te çamur parçalama verimi en fazla olmuştur. Bir başka çalışmada Zhang ve ark. (2008a) atıksu arıtımında aktif çamur sürecinin verimini arttırmak için havalandırma havuzuna geri devir ettirilen çamura 25, 80 ve 150 kHz frekanslarda US ışınım uygulamışlardır ve çamurun aktivitesini en fazla 25 kHz frekansta yitirdiğini belirlemişlerdir. Düşük frekansta erişilen çamur parçalama veriminin, oksidant üretiminin daha verimli olduğu yüksek frekanslara kıyasla çok daha yüksek olması, aynı zamanda US çamur parçalamada hidromekanik kesme kuvvetlerinin sonokimyasal reaksiyonlardan daha etkili olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, en düşük US frekans olan 20 kHz, mekanik kesme kuvvetlerinin en şiddetli üretilebilecek frekans olduğu için (Pilli ve ark., 2011), atık çamurun US ön arıtımında kullanılmaktadır. Bu nedenle, literatürde yer alan çamur parçalama ile ilgili çalışmalarda kullanılan frekansın 20 kHz ve civarındaki frekanslar olduğu görülmüştür (Nickel, 1999; Lehne ve Müller, 1999).

US güç ve uygulama süresi

US güç, oluşan kavitasyonun şiddetini belirleyen temel parametredir. Düşük güçteki US enerjinin uygulandığı durumda kavitasyon yeterli seviyede gerçekleşemediği için sadece floklar dağıtılabilmektedir. Ama yüksek güçte US enerjinin uygulandığı zaman, dağılan çamur floklarındaki çamur hücreleri de parçalanmaktadır. Böylece çamurun çözünmüş organik madde içeriği artmaktadır. Bu nedenle en düşük enerji sarfiyatında en yüksek parçalama verimini elde edebilmek için US güç ve uygulama süresinin optimize edilmesi, arıtma maliyeti ve verimi için hayati önem arz etmektedir.

Aktif çamur flokları, EPS, bakteriler ve bol miktarda su içermektedir (Keiding ve Nielsen, 1997). EPS ise çoğunlukla protein, karbonhidrat ve DNA'dan oluşmaktadır (Wang ve ark., 2006a). Ayrıca, iki değerlikli Ca^{+2} ve Mg^{+2} gibi iyonlar da bulunmaktadır (Keiding ve Nielsen, 1997). Hücre içi maddeler ise proteinler, karbonhidratlar, yağlar, inorganik tuzlarlar ve DNA'dır (Wang ve ark., 2006b). US enerjinin artan dozu, bu maddelerin çözünmüş faza geçmesine neden olmakta ve çözünmüş fazdaki DNA, karbonhidrat ve protein gibi hücresel bileşenlerin konsantrasyonunu arttırmaktadır (Wang ve ark., 2006b). Sonuç olarak, US ön arıtma ile çamurun katı madde fraksiyonunda ciddi bir değişim olmaktadır. Artan US enerji ile partikül haldeki organik madde içeriği azalırken, çözünmüş haldeki organik madde içeriği artmaktadır (Bougrier ve ark., 2005). Ancak toplam katı madde içeriği değişmemektedir (Bougrier ve ark., 2005; Feng ve ark., 2009).

Zhang ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada 25 kHz frekansta 0.50 W/mL yoğunlukta 15 dk'lık uygulama süresi çamuru parçalama için yeterli iken, 30 dk'lık uygulama ile çamurun inaktivasyonu tümüyle gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, çamurun parçalaması ve inaktivasyonundaki gelişmeye paralel olarak, artan süre ile AKM giderimi de artmıştır. Zhang ve ark. (2007) US çamur parçalamayı iki aşamaya ayırmışlardır: çamurun parçalanması ve çamurun inaktivasyonu. 0.50 W/mL'lik düşük US yoğunlukta ilk 10 dk'da çamur flokları parçalanmış, ancak çamurun inaktivasyonu çoğunlukla 10 – 30 dk'lık bölümde gerçekleşmiştir. Artan US yoğunluk, çamur inaktivasyonunu geliştirememesine rağmen, çKOİ'yi arttırmıştır.

Bir başka çalışmada Zhang ve ark. (2008b), US güç ve uygulama süresindeki artışın $PD_{KOİ}$'yi arttığını göstermişlerdir. 0 – 2.00 W/mL aralığında gerçekleştirilen çalışmada, yüksek US yoğunlukta 15 dk'lık ön arıtma süresinin çamuru parçalamak için

yeterli olduğunu, 0.50 W/mL'nin altındaki yoğunlukların ise etkili olmadığını belirlemişlerdir. Ayrıca artan güç yoğunluğu ile çamur parçalamanın arttığını ve 1.60 W/mL'nin üzerindeki güçlerde ise çamur parçalama veriminde ciddi bir değişimin olmadığını göstermişlerdir. Benzer olarak, artan süre ve güç yoğunluğu ile çamur parçalama veriminin geliştiğini, Wang ve ark. (2005), Akın (2008) ve Feng ve ark. (2009)'da belirlemiştir.

Chu ve ark. (2001) US ön arıtmadan geçmiş çamur üzerinde yaptıkları mikroskobik incelemede, sabit US yoğunlukta ön arıtma süresinin uzaması sonucunda floklardaki parçalanmanın arttığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuca benzer olarak, Chu ve ark. (2001), Akın (2008), El-Hadj ve ark. (2007) ve Feng ve ark. (2009) artan güç yoğunluğunun ve uzayan ön arıtma sürenin etkisi ile çamurun tanecik çapının küçüldüğünü belirlemişlerdir. Tanecik çapının ölçülemediği durumlarda, bulanıklık parametresi tanecik çapının bir göstergesi olarak kullanılabilmektedir. Na ve ark. (2007) ve Feng ve ark. (2009) tanecik çapındaki küçülme sonucunda bulanıklığın da dağılan floklardan kopan mikro parçacıkların etkisi ile arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca sabit güçte uzayan ön arıtma süresi ile artan çamur parçalama sonucunda, tanecik çapının küçüldüğü ve çKOİ'nin de arttığı, Show ve ark (2007) ve Feng ve ark (2009) tarafından yapılan çalışmalarda belirlenmiştir.

Bougrier ve ark. (2005), Grönroos ve ark. (2005), Show ve ark. (2007) ve Naddeo ve ark. (2009), uygulanan US enerjideki artış ile çamurun çKOİ değerinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, Grönroos ve ark. (2005) enerji tüketiminin aynı olduğu yüksek güçte kısa süreli US ön arıtmanın, düşük güçte uzun süreli US ön arıtmaya kıyasla daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. Ancak, Huan ve ark. (2009) düşük güçte uzun süreli uygulamanın daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Sonuçlardaki bu farklılık, farklı özelliklerdeki atık çamurların ve US cihazların kullanılmasından kaynaklanmıştır.

Wang ve ark. (2005) US çamur parçalamanın mekanizmalarının etkilerini belirlemek için yaptıkları çalışmada, radikal süpürücü olarak sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) kullanmışlar ve sodyum bikarbonatın artan konsantrasyonlarında çKOİ değerlerinde ihmal edilebilir bir düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuçla, akustik kavitasyon sonucunda oluşan oksitleyici ajanların çamur parçalamaya bir miktar katkı sağladığını, ama çamur parçalamada baskın mekanizmanın hidromekanik kesme kuvvetleri olduğunu göstermişlerdir. Wang ve ark. (2005), bu çalışmada sadece 2 farklı dozda sodyum bikarbonat kullanarak oksitleyici radikalleri süpürmeyi denemişlerdir.

Ancak kullandıkları en yüksek doz olan 50 mM sodyum bikarbonatın, üretilen radikalleri tümüyle süpürmeye yetip yetmediği belirsizdir.

pH

Literatürdeki çalışmaların neredeyse tamamı, çamurun orijinal pH değerinde gerçekleştirilmiştir. Ancak Wang ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmaya göre, artan çamur pH'ı ile çamur parçalama verimi de yükselmiştir. 30 dk'lık ön arıtma süresinde gerçekleştirilen deneylerde pH'ı 12 olan çamurun sıvı fazına geçen KOİ'nin, aynı US şartlarda pH'ı 6.2 olan çamuradakinin yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada, asidik pH değerlerini de kapsayarak, daha kısa sürelerde gerçekleştilen US ön arıtmanın parçalama verimine, çamur pH'ının etkisi araştırılmamıştır.

Sıcaklık

Kavitasyon, sıvı ortamda sıcaklık artışına neden olmaktadır. Chu ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada, sıcaklığın 0.44 W/mL sabit güçte 20, 60 ve 120 s'lik ön arıtma sürelerinde sırasıyla 19℃'den 30, 50 ve 60℃'ye yükseldiğini belirlemişlerdir. 60 s'lik uygulama süresinde ve 0.11, 0.22, 0.33 ve 0.44 W/mL'lik yoğunluklarda ise sıcaklık 19℃'den 25, 34, 44 ve 50℃'ye yükselmiştir. Sonuç olarak, US ön arıtmaya maruz bırakılan çamurun sıcaklığı, uzayan ön arıtma süresi ve artan US yoğunluk ile artmıştır. Akustik kavitasyonun sonuçlarından biri olan sıcaklık artışının etkisi üzerinde araştırmacılar ihtilaflı sonuçlara varmışlardır. Chu ve ark. (2001) ve Grönroos ve ark. (2005) sıcaklığı kontrol etmeden gerçekleştirdikleri deneylerde elde ettikleri çKOİ artışının, sıcaklığın kontrol edildiği duruma kıyasla daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bir başka çalışmada, Huan ve ark. (2009) sıcaklık kontrolünün olmadığı US ön arıtma deneylerinde, sıcaklığın 20℃'de sabit tutulduğu duruma kıyasla çamur çözünürlüğünün daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Ancak Wang ve ark. (2005) US ön arıtmada artan ortam sıcaklığının çamur parçalama üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir.

Çamur Türü

Ön arıtma çamuru ve AAÇ, atıksu arıtımı sırasında üretilen yan ürünlerdir. Bu iki çamurun özellikleri ve yapıları farklı olduğu için, çamur türünün çamur parçalamaya etkisi de farklı olmaktadır. Show ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada, ön arıtma çamuru, AAÇ ve iki çamurun değişen oranlardaki karışımlarının US çamur parçalamanın verimine etkisini incelemişlerdir. En yüksek çamur çözünürlüğü ve en düşük partikül boyutu, sadece AAÇ'nin kullanıldığı durumda elde edilirken, çamur parçalama verimi AAÇ'nin oranı azaldıkça azalmıştır. En düşük verim ise, sadece birincil çamurun kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Böylece çamur türü ve karışımının, ön arıtma verimini etkilediği belirlenmiştir. Çamur türünden kaynaklanan bu ciddi fark, ön arıtma çamurun yüksek inorganik içeriğinden ve AAÇ'deki esas KOİ kaynağının biyokütle olmasından kaynaklanmıştır.

Organik madde içeriği

Çamurun organik madde içeriği, parçalama verimini etkileyen bir başka önemli hususdur. Zhang ve ark. (2008b), çamurun UKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada biri oksidasyon hendeğinden ve diğeri anaerobik-aerobik süreçten olmak üzere iki farklı çamur kullanmışlardır. Çamurların organik madde içerikleri sırasıyla % 77 ve 85'tir. 30 dk süre ile 125.8 W/cm^2 US şiddette gerçekleştirilen deneylerde, çKOİ konsantrasyonlarının sırasıyla 1378 mg/L ve 1610 mg/L olduğu belirlenmiştir. Çamurun parçalama verimlerindeki bu fark, iki nedenden kaynaklanmıştır: (1) parçalanan çamurun organik madde içeriğideki değişim ve (2) çamurun inorganik içeriğindeki artışın daha fazla US enerjiyi adsorbe etmesi ve ses dalgalarını kırarak yansıtması.

Katı Madde içeriği

Sıvı ortamdaki askıda katı maddeler ve diğer safsızlıklar akustik kavitasyon için çekirdek görevi üstlenerek kavitasyon kabarcıklarının oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Suslick ve ark., 1999). Ancak katı madde konsantrasyonundaki artış, üç şekilde süreç verimini olumsuz etkilemektedir: (1) parçalanan çamurun viskozitesindeki artış ile daha fazla US enerjinin çamurun sıvı fazında adsorbe edilmesi, (2) askıda katılara çarpan ses

dalgalarının kırılması ve böylece US enerjinin azalması ve (3) özellikle inert katı maddelerin, parçalanması hedeflenen organik maddeler için akustik gölgeler oluşturması (Abramov, 1998; Show ve ark., 2007). Sonuçta katı maddeler, sıvı ortamda ses dalgalarının yayılmasını engellenmekte ve/veya uygulanan US gücü azaltmaktadır. Böyle bir durum, çamur parçalama veriminin düşmesine, US probun aşınmasına ve makine ömrünün azalmasına neden olmaktadır (Show ve ark., 2007). Ayrıca $PD_{KOİ}$ değerini yükseltebilmek için daha fazla US enerjinin sarf edilmesi gerekmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı ön arıtmanın işletme masrafları artmaktadır. Öte yandan, belli bir kritik konsantrasyona kadar TKM konsantrasyonundaki artış, çamur parçalama veriminde sürekli artışa neden olmaktadır (Neis ve ark., 2000). Show ve ark. (2007), Akın (2008) ve Huan ve ark. (2009) ise çamur yoğunluğundaki artışın $PD_{KOİ}$ değerini sürekli arttıramadığını göstermişlerdir. Show ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada, %1.0'den % 2.9'a artan katı madde içeriklerinde $PD_{KOİ}$ değerinin arttığını, ancak % 3.8 TKM içeriğinde parçalama veriminin azaldığını belirlemişlerdir. Akın (2008) ise % 2.0, 4.0 ve 6.0 TKM içeriklerinde yaptığı çalışmada, artan çamur yoğunluğu ile $PD_{KOİ}$'nin sürekli azaldığını saptamıştır. Benzer olarak Huan ve ark. (2009), çamuru parçalayabilmek için gerekli olan US enerjinin, düşük TKM içeriğinde partiküllere daha kolay ulaştığı ve böylece daha çok etki ettiği için düşük yoğunluktaki çamurların daha kolay parçalandığını göstermişlerdir. Ayrıca literatürde araştırmacılar ön arıtılacak çamurun TKM içeriği için farklı optimum değerler belirlemişlerdir. Sonuçlardaki bu farklılık, kullanılan çamurların farklı ve karmaşık yapıda olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu nedenle ön arıtmaya maruz bırakılacak her farklı çamur numunesi için, TKM içeriğinin etkisinin belirlenmesi gereklidir.

2.4.1.2. US ön arıtmanın çamurun çürütülebilirliğine etkisi

AAÇ'yi çürütmek, ön arıtma çamuruna kıyasla daha zordur (Lafitte – Trouque ve Foster, 2002). Bunun nedeni, AAÇ'nin çok daha yavaş hidrolize olmasıdır (Gavala ve ark., 2003). US ön arıtma ile biyokütle parçalanarak hücre içi yapısal bileşenler hücre dışına çıkartılmaktadır. Böylece, çamur, anaerobik bakterilerin daha kolay erişebileceği ve kullanabileceği forma dönüştürülmektedir (Mason ve Lorimer, 2002). Bu dönüşüm, çamur çürütme sürecinin hızını (Tomei ve ark., 2008) ve verimini (Braguglia ve ark., 2008) arttırarak, hem metan üretimini arttırabilmekte hem de çamurun HBS'sini azaltılabilmektedir (Bourgrier ve ark., 2005).

Chu ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada, 20 kHz frekansta ve 0.33 W/mL'lik düşük US yoğunlukta ön arıtılmış çamurun anaerobik çürütülmesinde metan üretiminin ham çamura kıyasla daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Ön arıtma ile metan üretimi 143 g CH_4/kg ÇKM'den 292 g CH_4/kg ÇKM'ye yükselmiştir. Böylece metan üretim verimi % 104 artmıştır.

Bougrier ve ark. (2005) kesikli anaerobik çürütücülerde US ön arıtmada uygulanan US enerjinin metan üretimine etkisini incelemişlerdir. Ön arıtmadan geçmiş bütün çamur numunelerinde biyogaz üretimi artmıştır. 1000 kJ/kg TKM'den düşük E_S değerlerinde ön arıtılmış çamurda, sadece partikül boyutu küçültülebildiği için ham çamura kıyasla biyogaz üretimi artmamıştır. Ama 7000 kJ/kg TKM'ye kadar artan enerji değerlerinde, atık çamurdaki mikrobiyal hücrelerin parçalanması sonucunda metan üretimi de yükselmiştir. Ancak 7000 – 15000 kJ/kg TKM aralığındaki E_S değerlerinde, biyogaz üretiminde kayda değer bir artış olmamıştır. Böylece optimum E_S değerinin 7000 kJ/kg TKM olduğu belirlenmiştir. 16 günlük metan üretim testinde, ön arıtmadan geçmiş çamur numunelerinde üretilen biyogaz hacmi, ham çamura kıyasla % 40 daha fazla olmuştur.

Grönroos ve ark. (2005), 27 kHz frekansta ve 0.20 W/mL US yoğunlukta 2.5 ve 10 dk ön arıtma uygulayarak çKOİ'yi 610 mg/L'den sırasıyla 2100 ve 4200 mg/L'ye yükseltmişlerdir. Bu artışa uygun olarak 19 günlük metan üretim testinde, metan üretimi 3.22 m^3/kg çKOİ'den 2.5 ve 10 dk'lık ön arıtma sonucunda 8.09 m^3/kg çKOİ'ye yükselmiştir. Sonuç olarak 2.5 dk süreli ön arıtma metan üretimini geliştirmiş, ancak ön arıtma süresinin 10 dk'ya uzatılması metan üretimini daha fazla arttıramamıştır.

Bougrier ve ark. (2006a), 20 kHz frekansta 6250 ve 9350 kJ/kg TKM'lik E_S değerlerinde uygulanan US ön arıtmanın anaerobik çürütmede üretilen biyogazın metan içeriğinde bir değişime neden olmadığını göstermişlerdir. Ancak ham çamur için 221 mL CH_4/g KOİ olan metan üretimi, 6250 ve 9350 kJ/kg TKM'lik ön arıtmanın uygulandığı çamur numunelerinde 325 ve 334 mL CH_4/g KOİ'ye yükselmiştir. Organik madde giderimi ise % 63'ten % 93 ve % 95'e yükseltilmiştir. Çamur çürütücüde sağlanan bu gelişmenin nedeni, çKOİ'deki artış ve partikül boyutundaki küçülme sonucunda organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından daha kolay ulaşılabilir hale dönüştürülmesidir. Benzer bir çalışmada, El-Hadj ve ark. (2007) 11.000 kJ/kg TKM'lik enerji uygulamasının, hem mezofilik hem de termofilik anaerobik reaktörlerde metan üretimi ve çamur stabilizasyonu için optimum olduğunu belirlemişlerdir.

Bir başka çalışmada Braguglia ve ark. (2010), US ön arıtmayı kimyasal bir ön arıtma metodu olan ozonlama ile karşılaştırmışlardır. 2500 kJ/kg TKM değerinde çamurun US ön arıtımı sonucunda, 10 günlük HBS ile işletilen anaerobik reaktörde metan üretimi % 26 arttırılmıştır. Ozonlama ile ön arıtılmış çamurun anaerobik çürütülmesi için öncelikle çamurun adapte edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Ozon kullanarak çamurun ön arıtımında 0.05 g O_3/g TKM dozunda (2000 kJ/kg TKM E_S'ye eş değer) biyogaz üretiminde artış gerçekleşmezken, 0.07 g O_3/g TS dozunda (E_S = 4500 kJ/kg TKM E_S'ye eş değer) ise metan üretiminde % 17'lik artış gerçekleşmiştir. Ozonlama ile biyogaz üretimindeki artışın daha az olması; refrakter yapılı bileşiklerin oluşumundan, anaerobik kültürün ön arıtılmış çamura adapte edilmemiş olmasından ve çamurdaki oksitlenebilir organik maddelerin çok olmasından dolayı ozon tüketiminin kontrol edilememesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Nickel ve Neis (2007), 31 kHz frekans, 10 W/cm^2'lik US şiddet ve 90 s'lik ön arıtma süresi sonucunda anaerobik çamur çürütücünün HBS değerini 16 günden 4 güne kadar azaltmışlardır. Ham çamurun çürütüldüğü 16 günlük kontrol reaktöründe metan üretim hızının 0.19 m^3/m^3·gün ve HBS'nin 4 gün olduğu ön arıtmalı reaktörde ise 0.52 m^3/m^3·gün olduğu belirlenmiştir. Böylece US ön arıtma ile anaerobik reaktörlerde hem çürütücü kapasitesinin hem de metan üretiminin arttırılmasının mümkün olduğu göstermişlerdir. US ön arıtmanın bu avantajı, arıtma tesislerinde tam ölçekli uygulamalar için gelecek vaat etmektedir. Benzer bir çalışmada Barber (2005), anaerobik çürütücüye beslenecek olan AAÇ'nin tamamını değil, bir kısmını US ön arıtmadan geçirmiştir. Ön arıtılmış çamur miktarının, çürütücüye beslenen toplam AAÇ miktarına oranının etkisini incelemiştir. Anaerobik çürütücüye beslenen çamurun % 30'a kadar artan oranlarda US ön arıtmadan geçirilmesi metan üretimini arttırmış; ancak bu oranın % 50'ye kadar artması reaktördeki metan üretimini daha fazla arttıramamıştır.

Apul ve Sanin (2010), 24 kHz frekansta 0.51 W/mL yoğunlukta 15 dk'ya kadar değişen sürelerde uyguladıkları ön arıtmanın, çamur çözünürlüğünü geliştirdiği; ancak bu sürenin uzaması ile organik parçacıkların floklar arasında tutulması sonucunda çamur çözünürlüğünün azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca 49 gün süren metan üretim (BMP) testleri ile 15 dk'lık ön arıtmanın, 10 ve 20 dk'lık ön arıtma uygulamalarından daha fazla metan üretimine neden olduğu görülmüştür. Kesikli beslenen anaerobik reaktörlerde HBS ve OYH değerlerinin çürütücü verimine etkisini araştırmışlardır. Reaktörlerde çamur çürütme verimini, UKM ve tKOİ parametreleri ile değerlendirmişlerdir. 0.50 kg UKM/m^3·gün'lük OYH'de HBS'nin 7.5 günden 15 güne

çıkması ile sırasıyla ham çamurun çürütüldüğü kontrol reaktörlerinde metan üretim verimi 239'dan 275 kg CH_4/g UKM'ye çıkmış, ama ön arıtılmış çamurun çürütüldüğü reaktörde 467'den 384 kg CH_4/g UKM'ye düşmüştür. 7.5 günlük HBS değerinde OYH'nin 0.5'den 1 kg UKM/m^3·gün'e yükselmesi ile kontrol reaktöründe metan üretim verimi 239'dan 294 kg CH_4/g UKM'ye yükselmiş, ancak ön arıtmalı reaktörlerde bu verim 467'den 340 kg CH_4/g UKM'ye düşmüştür. Bu beklenilmeyen sonucun, küçük hacimli reaktörlerde gerçekleştirilen deneylerdeki hatalardan kaynaklanması muhtemeldir.

Ultrasonik ön arıtmanın tam ölçekli uygulamalarına dönük çalışmalar da bulunmaktadır. Xie ve ark. (2007), tam ölçekli anaerobik reaktörde yoğunlaştırılmış AAÇ ile ön arıtılmış çamurun karışımını çürüttükleri US ön arıtmalı reaktörde, ham çamurun çürütüldüğü reaktöre kıyasla % 45 daha fazla metan üretmişlerdir.

Bu bahsedilen çalışmalara karşın, US ön arıtmanın çamur çürütme verimini ve biyogaz üretimini her zaman geliştiremediğini gösteren çalışmalar da bulunmaktadır (Lafitte-Trouque and Forster, 2002).

Çamur minimizasyonunun ve çamur çürütme verimlerinin geliştirilmesi için US ön arıtma, bazı atıksu arıtma tesislerinde tam ölçekli olarak kurulmuş ve işletilmiştir. Bu tam ölçekli uygulamaların bazı örnekleri Çizelge 2.1'de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelge 2.1. US ön arıtmanın uygulandığı bazı örnek atıksu arıtma tesisleri (Anonymous, 2010).

Tesis Yeri	US Ön Arıtma	US Ön Arıtma Sonuçları
Ahrensburg Atıksu Arıtma Tesisi, Almanya	Yoğunlaştırılmış AAÇ'nin % 50'si 5 kW'lık US ünite ile ön arıtılmıştır. Tesiste, 1 adet 4.000 m^3 kapasiteli mezofilik anaerobik çürütücü vardır. HBS, 40 gündür.	- Çürütücüde UKM giderimi % 40'dan % 46'ya yükselmiştir. - Biyogaz üretimi % 20 artmıştır. - Çamur susuzlaştırma için kullanılan polimer miktarı 10 kg/t'dan 9 kg/t'a düşmüştür. - Tesise Mayıs 2009'da tam ölçekli kurulumu yapılmıştır. - 3 yıl içinde sistemin kendini amorti edeceği hesaplanmıştır.
Bamberg Atıksu Arıtma Tesisi, Almanya	Yoğunlaştırılmış AAÇ'nin % 30'u 5 kW'lık US ünite ile ön arıtılmıştır. Tesiste, 2 adet 2.000 m^3 ve 1 adet 3.000 m^3 kapasiteli mezofilik anaerobik çürütücü vardır. Toplam HBS 18 gündür.	- Çürütücü çıkışında UKM konsantrasyonu % 60'dan % 54'e düşmüştür. - Biyogaz üretimi % 30 artmıştır. - Dördüncü çamur çürütücünün inşasına gerek kalmamıştır. - Ağustos 2004'te tesise kurulumu yapılmıştır. - 3 yıl içinde sistemin kendini amorti edeceği hesaplanmıştır.

Çizelge 2.1. US ön arıtmanın uygulandığı bazı örnek atıksu arıtma tesisleri (Anonymous, 2010) (Devam).

Centrum Atıksu Arıtma Tesisi, Polonya	Çamur çürütücüde günlük 56 m^3 çürütülmüş çamur 5 kW'lık 2 ünite ile US ön arıtmadan geçerek tekrar çürütücüye geri devir ettirilmiştir. Tesiste, 2 adet 1.680 m^3 kapasiteli mezofilik anaerobik çürütücü vardır. HBS 19 gündür.	- Çürütülmüş çamurda UKM konsantrasyonu % 70'den % 65'e düşmüştür. - UKM giderimi yaklaşık % 25 yükselmiştir. - Biyogaz üretimi % 28 artmıştır. - Ek reaktörün inşasına gerek kalmamıştır. - 2 yıl içinde sistemin kendini amorti edeceği hesaplanmıştır.
Meldorf Atıksu Arıtma Tesisi, Almanya	Yoğunlaştırılmış AAÇ'nin tamamı 5 kW'lık US ünitesi ile ön arıtılmıştır. Tesiste, 1 adet 2.000 m^3 kapasiteli mezofilik anaerobik çürütücü ve genellikle depolama tankı olarak kullanılan 2 adet 2.000 m^3 kapasiteli tank vardır. HBS 19 gündür.	- Çamur çürütücülerde köpürme problemi son bulmuştur. - UKM konsantrasyonu % 61'den % 45'e düşmüştür. - Biyogazın sorunsuz kullanımı mümkün olmuştur. - Mayıs 2005'te tesise kurulumu yapılmıştır, - 3 yıl içinde sistemin kendini amorti edeceği hesaplanmıştır.

2.4.1.3. US ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi

Arıtma süreci sonunda ortaya çıkan çamur miktarı, arıtılan atıksu hacminin % 5 – 25'i kadardır (Nellenschulte ve Kayser, 1997). Çamurun su içeriği ise % 95'den fazla olabilmekte ve ıslak ağırlığın % 90'ından fazlası sudan kaynaklanmaktadır (Schmitt ve Flemming, 1999). Bu nedenle çamurun susuzlaştırılması hem çamur hacminin ve kütlesinin, hem de çamurun nihai bertaraf maliyetinin azaltılması için önemlidir.

Aktif çamur, bakteriler, EPS ve büyük miktarda sudan oluşmaktadır (Keiding ve Nielsen, 1997). Bakteriler, EPS içerisinde tutulmaktadır. EPS, çamur floklarının yapısal bütünlüğü için önemlidir ve esas olarak protein, karbonhidrat ve az miktarda DNA'dan oluşmaktadır (Wang ve ark., 2006a). EPS, jelimsi bir yapı oluşturarak flokları dağılmadan bir arada tutmaktadır (Wingender, 1999). Bu özelliği ile EPS'nin çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlediği düşünülmektedir (Fleming ve Wingender, 2001). Protein ve karbonhidrat gibi hücresel bileşenlerin suya olan eğilimi dikkate alınacak olursa, EPS'nin sıvı fazda konsantrasyonunun artması çamurun su verme özelliğinin kötüleşmesine, sıvı fazdaki EPS'nin parçalanması ise çamurun su verme özelliğinin iyileşmesine neden olmaktadır (Wang ve ark., 2006a).

Na ve ark.'nın (2007) yaptıkları çalışmada 0 – 800 kJ/L aralığındaki US enerji düzeylerinde çamurun su verme özelliği, çamur floklarının dağılması ve artan viskozite sonucunda kötüleşmiş; artan enerji seviyelerinde ise floklardan dağılan parçacıkların tümüyle parçalanması sonucunda çamurun su verme özelliği iyileşmiştir. Kapiler emme süresi (KES) ham çamurda 50 s iken, 2000 – 3000 kJ/L'lik enerji seviyesindeki US ön arıtma ile 10 s'ye kadar düşmüştür. Benzer olarak başka çalışmalarda da, US ön

arıtmanın artan enerji düzeylerinde çamurun su verme özelliğinin geliştiğini belirlenmiştir (Erdincler ve Vesilind, 2000; Apul ve Sanin, 2010; Yin ve ark., 2006).

Öte yandan bazı çalışmalarda US ön arıtmanın artan enerji düzeylerinde de ön arıtılmış çamurun su verme özelliklerinin kötüleştiği belirlenmiştir (Chu ve ark., 2001; Dewil ve ark., 2006; Wang ve ark., 2006a). Çamurun su verme özelliğinin kötüleşmesi, çamurdaki serbest suyun azalması demektir ve bu, öncelikle EPS konsantrasyonu ile ilgilidir. Artan US güç ile çözünmüş faza geçen biyolojik polimerlerin konsantrasyonlarının artması sonucunda çamurun su verme özelliği kötüleşmiştir (Bruss ve Christensen, 1993; Wang ve ark. 2006a). Bu durumun temel nedeni, protein ve karbonhidratların çok su bağlarayarak çamurun viskozitesini arttırmasıdır (Wang ve ark., 2006a). Ayrıca, parçalanan çamurda taneciklerin küçülmesi serbest suyun adsorplanabileceği yüzey alanlarını da arttırmaktadır. Böylece, serbest su tanecikler üzerine bağlanmakta ve sonuçta çamurun su verme özelliği kötüleşmektedir (Wang ve ark., 2006a).

US ön arıtmadan geçmiş çamurun su verme özellikleri kötüleşse bile, bu özelliğin geliştirilebilmesi için şartlandırıcı olarak $FeCl_3$ gibi kimyasallar kullanılabilmektedir. Koagülant uygulaması ile çamurun çökelme ve su verme özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Huan ve ark. (2009) $FeCl_3$ ve katyonik polimer kullanarak ön arıtılmış çamurdaki dağılan flokları bir araya getirmiş, sonuç olarak US ön arıtmadan geçmiş çamurun su verme ve çökebilme özelliklerini geliştirebilmişlerdir.

2.4.2. Alkali ön arıtma

Alkali ön arıtma, çamurun çözünürlüğünü arttırmak için kullanılan etkili bir kimyasal metottur ve diğer çamur parçalama metotlarına karşı en önemli üstünlükleri şunlardır;

- ileri teknoloji gerektirmez,
- ilk yatırım maliyeti düşüktür,
- çamur parçalama verimi yüksektir.

Mikrobiyal kaynaklı protein, polisakkarit, yağ ve nükleik asit gibi maddeleri içeren EPS, hücreleri bir arada tutarak floklaşmayı sağlayan temel unsurdur (Carrere ve

ark., 2010). Yüksek pH'ta hidroksil iyonlarının (OH^-) biyokütle ile teması, flokların parçalanmasına ve böylece EPS'nin sıvı faza geçmesine neden olmaktadır. Hidrofilik özellikteki EPS'nin sıvı faza geçmesi viskoziteyi arttırmakta ve jelimsi bir yapı oluşturmaktadır. Ayrıca yüksek pH'ta proteinler doğal şekillerini kaybetmekte, yağlar sabunlaşmakta ve RNA ise hidroliz olmaktadır (Zhang, 2002). Böylece artan pH veya uzayan ön arıtma süresi, jel yapıyı çözmekte ve OH^- iyonlarının doğrudan hücrelerle temasına neden olmaktadır (Neyens ve ark., 2004). Ayrıca çamur pH'ının artması, bakteri hücrelerinin negatif yüklenerek hücreler arasında bulunan polimerik maddelerin desorpsiyonuna neden olan kuvvetli elektriksel itme kuvvetlerinin oluşmasına yol açmaktadır (Katsiris ve Kouzeli-Katsiri, 1987). Sonuçta, jel yapının çözünmesi ile bakteri hücreleri, bulundukları ortamda yüksek pH'a maruz kalmakta ve turgor basınçlarını koruyamayarak parçalanmaktadır. Böylece, hücre içi bileşenler sıvı faza geçmektedir. Sonuç olarak ön arıtma ile çamurun hidrolizi hızlandırılmakta ve anaerobik çürütücünün verimini de arttırılmaktadır (Kim ve ark., 2003; Lin ve ark., 1997). Ayrıca çamur flokları arasında tutulan ve klasik susuzlaştırma metotları ile giderilemeyen bağlı suyun serbest bırakılması da sağlanmaktadır (Erdincler ve Vesilind, 2000). Böylece, alkali ön arıtma ile çamurun su verme özelliği de geliştirilebilmektedir.

Lin ve ark. (1997) % 1.0 ve 2.0 TKM içeriğine sahip çamurun 20 ve 40 meq/L dozlarında NaOH ile ön arıtılmasının, anaerobik çürütücünün verimine etkisini araştırmışlardır. 10 günlük HBS değerinde çürütücüde ham çamur için KOİ giderimi % 38 olmuştur. Ama 20 meq/L NaOH ile ön arıtılmış % 1.0 TKM içeriğindeki çamurda % 46 ve 40 meq/L konsantrasyonunda ön arıtılmış çamurda ise % 51 UKM giderimi gerçekleşmiştir. Ayrıca gaz üretimleri, ham çamurun çürütüldüğü kontrol reaktörüne kıyasla, sırasıyla % 33 ve 30 oranında artmıştır. Alkali ön arıtmadan geçmiş çamurun anaerobik çürütme sonrasında su verme özelliklerinin, çürümüş ham çamura kıyasla daha iyi olduğu da belirlenmiştir.

Li ve ark. (2008), alkali kaynağı olarak NaOH ve $Ca(OH)_2$ kullandıkları çalışmada AAÇ'nin alkali ön arıtımını çalışmışlardır. Artan NaOH dozlarında ve uzayan ön arıtma sürelerinde, çamur çözünürlüğünün sürekli yükseldiğini ve alkali dozunun süreden daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca 0.1 N'ye kadar artan NaOH dozlarında çamurun su verme özelliği önce kötüleşmiş, artan dozlarda ise iyileşmiştir. Buna karşın, $Ca(OH)_2$ ile ön arıtmada, Ca^{+2} iyonunun dağılan hücrelerin ve organik polimerlerin yeniden flokülasyonunu sağlamasından dolayı çamur parçalama

verimi azalmıştır. Sonuç olarak, çamur parçalama için 0.05 N NaOH dozu ve 30 dk'lık ön arıtma süresini optimum olarak belirlemişlerdir.

2.4.3. Isıl ön arıtma

Isıl ön arıtma protein, polisakkarit, yağ ve diğer hücrelerarası makro moleküllerin salınmasına ve çamurun jel yapısının bozulmasına neden olmaktadır (Erdincler ve Vesilind, 2000). Böylece hücreler arasındaki bağlı suyu salarak, çamurun serbest su muhtevasını da arttırmaktadır (Weemas ve Verstraete, 1998). Isıl ön arıtmada esas parametre sıcaklıktır ve ön arıtma süresinden daha etkili bir parametredir (Haug ve ark., 1978). Çamurun ısıl ön arıtımı, 60℃'den 270℃'ye kadar geniş bir sıcaklık aralığında çalışılmıştır. 190℃'ye kadar artan sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıl ön arıtmanın, biyogaz üretimini sürekli arttırdığı belirlenmiştir (Bougrier ve ark., 2008). Ancak 200℃'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan ön arıtma, çamurun biyolojik parçalanabilirliğini geliştirememekte, aksine azaltmaktadır (Stuckey ve Mc Carty, 1978). Bu, Maillard reaksiyonu sonucunda biyolojik olarak çok zor parçalanabilen refrakter yapılı bileşiklerin oluşumundan kaynaklanmaktadır (Haug ve ark., 1978). Bu bileşikler, aminoasitler ile indirgenen şekerin reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Böylece, protein ve şekerin çözünürlüğü azalmakta ve polimerizasyona neden olmaktadır (Müller, 2001). Bu nedenle, ısıl ön arıtma 60 – 180℃ aralığında daha sık çalışılmıştır. Valo ve ark. (2004), çamurun ısıl ön arıtımı üzerine yaptıkları çalışmada 130 ve 170℃ sıcaklıklarda sırasıyla çamur parçalama verimlerinin % 25 ve % 60 olduğu ve metan üretimlerinde ise sırasıyla % 25 ve % 45 artış sağlandığını göstermişlerdir. Öte yandan, Climent ve ark. (2007) 1.5 saat süreyle 134℃'de yüksek sıcaklıktaki ısıl ön arıtmanın, termofilik reaktörün metan üretimine katkı sağlamadığını, ancak 9 saat süren 70℃ sıcaklıktaki ısıl ön arıtmanın metan üretimini arttırdığını belirlemişlerdir.

100℃'nin altındaki sıcaklıklarda uygulanan ısıl ön arıtma, düşük sıcaklıklı ısıl ön arıtma olarak değerlendirilmektedir. Düşük sıcaklıklı ısıl ön arıtma, hem ön çökeltme çamurunun hem de AAÇ'nin anaerobik çürütülmesinde elde edilen metan gazının ve çürütme veriminin arttırılmasında etkili bir metot olduğu belirlenmiştir (Skiadas ve ark., 2004). Ayrıca ısıl ön arıtma ile çamur özellikleri geliştirilmekte ve patojen mikroorganizmaların giderimi de sağlanmaktadır (Valo ve ark., 2004). Ancak düşük

sıcaklıklı ön arıtmada daha uzun uygulama süreleri gerekmektedir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklı ön arıtmada süre, uygulanan sıcaklık kadar önemli bir parametredir.

2.4.4. US ön arıtmanın geliştirilebilirliği ve hibrit sistemler

Çamur parçalama konusunda iki farklı ön arıtma metodunun birlikte uygulandığı hibrit metotlar son zamanlarda araştırmacıların ilgisini çeken, yeni ve gelecek vaat eden metotlardır. Çamurun ön arıtılmasında iki metodun birleştirilmesindeki amaç, sadece bir metodun uygulandığı duruma kıyasla, iki farklı metodun kendilerine özgü çamur parçalama mekanizmalarını birlikte çalıştırarak çamur parçalama veriminin arttırılması ve daha düşük enerji ve kimyasal sarfiyatı ile daha yüksek verim elde edilmesidir.

Kim ve ark. (2010), US + alkali ön arıtma ile çamur parçalamanın anaerobik çamur çürütmeye etkisini incelemişlerdir. pH 8 – 13 aralığında ve 3.750 – 45.000 kj/kg TKM güçlerinde yaptıkları çalışmada, iki metodun birlikte uygulanması ile çamur çözünürlüğünün ve anaerobik çürütücüdeki metan üretiminin daha fazla arttığını belirlemişlerdir. Örneğin, alkali ön arıtmada pH 12'de % 21.4 $PD_{KOİ}$ ve 7500 kj/kg TKM gücündeki US ön arıtma ile % 19.5 $PD_{KOİ}$ değeri elde edilmişken; aynı şartlarda iki sistemin birlikte uygulanması ile $PD_{KOİ}$ değeri % 59.8'e yükselmiştir. Kontrol reaktöründe metan üretim verimi 81.9 mL CH_4/g KOİ iken, kombine sistemde (pH 9 ve 7000 kj/kg TKM E_S'te) metan üretimi 127.4 mL CH_4/g KOİ'ye yükselmiştir. Yine bir başka çalışmada Li ve ark. (2010) iki sistemin birlikte uygulandığı durumda verimin daha fazla arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca ortam pH'ının, US yoğunluktan daha etkili olduğunu göstermişlerdir.

US ön arıtmanın, alkali ön arıtma ile birlikte uygulandığı çalışmalar oldukça yenidir. Ancak bu hibrit metot için US ve alkali şartların etkinliklerinin incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır (Jin ve ark., 2009; Kim ve ark., 2010). Bu çalışmalarda, US ön arıtmanın alkali ön arıtma ile birlikte uygulanması sonucunda işletme maliyetinin azaltılarak süreç veriminin arttırılması amaçlanmamıştır. Öte yandan, US ön arıtma sırasında gerçekleşen sıcaklık artışını, kendisinden sonra uygulanacak ısıl ön arıtma için avantaj olarak kullanan US + ısıl ön arıtma ile ilgili literatürde herhangi bir örneğe de rastlanmamıştır. Sonuç olarak her iki kombinasyonun da detaylıca çalışılması, bilimsel bir gereklilik olarak ortaya çıkmıştır. Böylece bu doktora tezi kapsamında, US ön arıtmanın iki farklı modifikasyonun da çamur parçalamaya, çamur özelliklerine, çamurun çürütülebilirliğine ve metan üretimine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Atık Aktif Çamur (AAÇ) ve Anaerobik Aşı

AAÇ, Konya Altınapa baraj havzasında bulunan Başarakavak köyünün atıksularının arıtımı için kullanılan Başarakavak Evsel Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilmiştir. Tesis, 3000 kişilik eş değer nüfusa hizmet edecek şekilde tasarlanmıştır. Tesiste, ön çökeltme havuzu bulunmamaktadır. Atıksu arıtımı, karbonlu organik maddelerin yanı sıra azotlu ve fosforlu organik maddelerin de giderimini sağlayan oksidasyon hendeği ve onu izleyen çökeltme havuzundan oluşan biyolojik süreç ile gerçekleştirilmektedir. Ancak tesiste, uzun havalandırmalı aktif çamur süreci verimli işletilemediği için atık çamurun stabilize edilmesi gerekmektedir. AAÇ numuneleri, çökeltme havuzundan havalandırma havuzuna gelen çamur geri devir hattından alınmıştır. Deneylerden önce çamurun TKM içeriği, çamuru gravite ile yoğunlaştırıp üstten sıvı fazı alarak ve/veya ultra saf su ilave edip seyrelterek istenen değere ayarlanmıştır. AAÇ'nin bazı önemli özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Ham AAÇ'nin bazı önemli özellikleri ve mevsimsel değişimi.

Parametre	Değer (Yaz Mevsimi)	Değer (Kış Mevsimi)
pH	7.58	7.60
çKOİ, mg/L	55	270
tKOİ, mg/L	3735	8180
TKM, mg/L	3935	9850
UKM, mg/L	2450	6795
TKM içeriği, %	0.40	1.00
UKM/TKM oranı, %	0.63	0.68
AKM, mg/L	3350	8080
UAKM, mg/L	2230	6010
Çözünmüş protein, mg/L	19	80
Çözünmüş karbonhidrat, mg/L	8	20
KES, s	18	45
$ÇÇO_{30}$, %	98	98

Havalandırma havuzunda kış aylarında yaz aylarına kıyasla, katı alıkonma süresinin (KAS) daha uzun olması nedeniyle, atık çamurun TKM içeriği artmıştır. Ayrıca Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi, hem yaz hem de kış mevsiminde çamurun çKOİ değeri, tKOİ'den çok daha düşükdür. Çamurun UKM bileşenleri ise, TKM'nin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Böylece çamurdaki esas KOİ kaynağının, biyokütle olduğu belirlenmiştir.

Anaerobik aşı çamuru, Konya Şeker Fabrikasının 35℃ sıcaklıkta ve 20 günlük HBS değerinde işletilen anaerobik çamur çürütücü reaktörlerinden alınmıştır. Çürütücülerin üst duru fazından, ortadaki aktif çürüme bölgesinden ve dipteki çürümüş çamur bölgesinden alınan çamur numuneleri karıştırılarak deneylerde kullanılmıştır. Aşı çamuru, BMP testlerinde ve kesikli beslemeli anaerobik reaktörlerde kullanılmıştır. Kullanılan aşı çamurlarının özellikleri Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

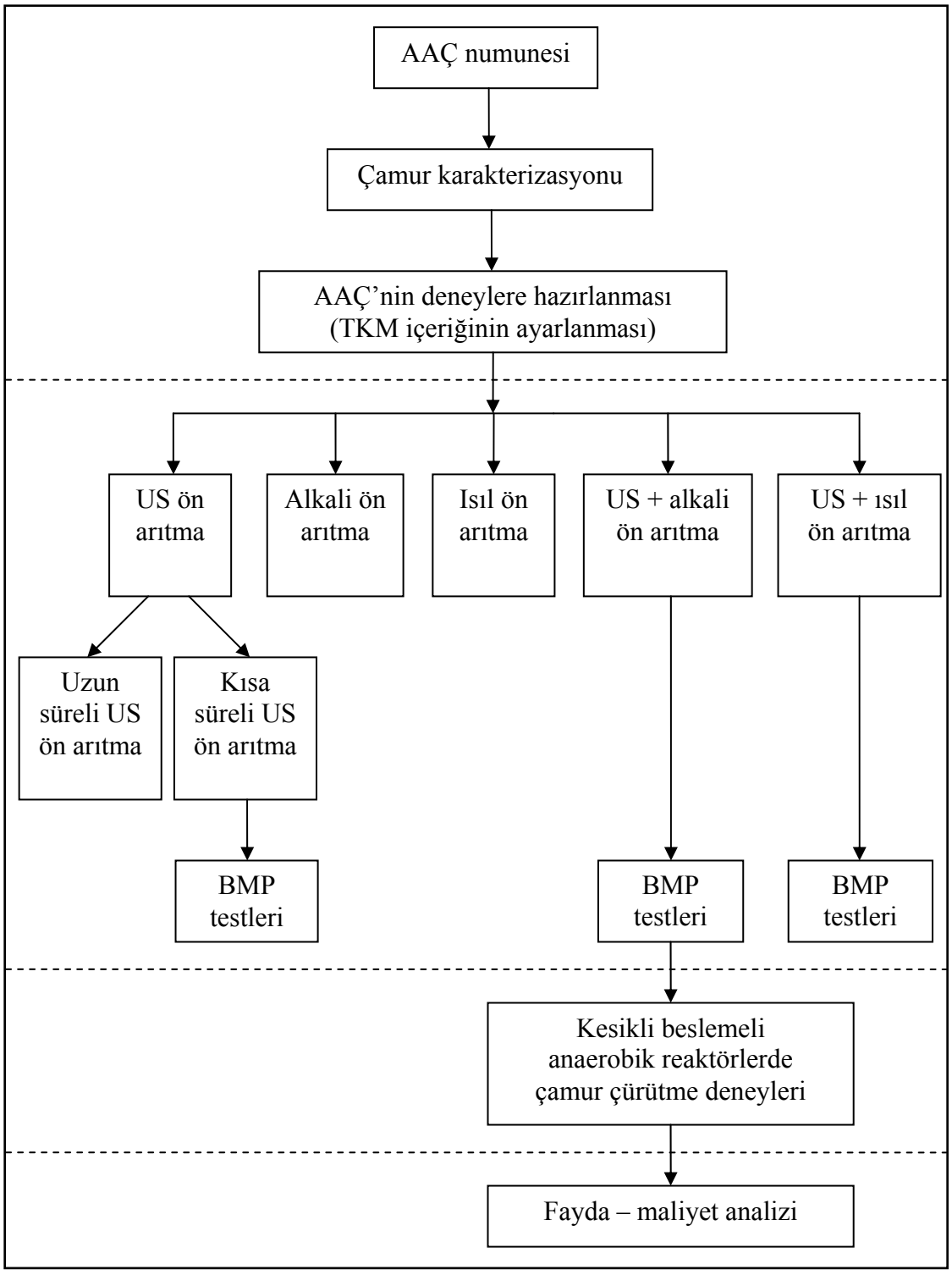
Çizelge 3.2. Kullanılan anaerobik aşı çamurunun özellikleri.

Parametre	Değer (BMP Deneyleri)	Değer (Kesikli Beslemeli Deneyler)
pH	7.55	7.60
tKOİ, mg/L	12475	48050
TKM, mg/L	23700	76590
UKM, mg/L	3230	12210
AKM, mg/L	20410	65185
UAKM, mg/L	2805	10675

AAÇ ve anaerobik aşı çamuru, çamurun mikrobiyal aktivitelerini koruyabilmek için + 4℃ sıcaklıkta ve karanlıkta saklanmıştır. AAÇ, anoksik şartların oluşmasını engellemek için günde 10 dk süreyle havalandırılmıştır. Hem AAÇ hem de anaerobik aşı çamuru, en fazla 5 gün içinde kullanılmıştır.

3.2. Deneysel Kurgu

Deneysel çalışmalarda, Şekil 3.1'de verilen iş akım planı izlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında ilk aşamada daha düşük maliyette ve daha yüksek verimde çamur parçalamanın gerçekleştirilebilmesi amacıyla ön arıtma metodununun seçilmesi ve süreç optimizasyonlarının gerçekleştirilmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. US, alkali ve ısıl ön arıtmalar ile bunların ikili kombinasyonları olan US + alkali ön arıtma ve US + ısıl ön arıtma olmak üzere 5 farklı metot ile çalışılmıştır. US, US + alkali ve US + ısıl ön arıtma uygulamalarının, fiziksel ve kimyasal parametrelere ilave olarak çamurun biyolojik parçalanabilirliğine ve metan üretimine etkilerini görebilmek için BMP testleri de yapılmıştır. İkinci aşamada ön arıtmanın çamur çürütücüye olan etkilerini görebilmek için, optimize edilmiş şartlarda US + alkali ön arıtma ile parçalanmış çamur, kesikli beslemeli anaerobik reaktörlerde farklı HBS ve OYH değerlerinde çürütülmüştür.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda izlenen iş akım planı.

3.2.1. Kısa ve uzun süreli US ön arıtma

Çamurun US ışınımı, Bandelin marka HD 3200 model ultrasonik homojenizatör ile TT 13 model titanyum US prob kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, 20 kHz sabit frekansta çalışmaktadır ve en yüksek US çıkış gücü 200 W'tır.

US ön arıtma deneyleri üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada US ön arıtma 30 dk'ya kadar uzun sürelerde gerçekleştirilmiş ve US ön arıtma veriminin değişen şartlarda çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu deneylerde, 30 dk'da elde edilen çamur parçalama verimin büyük çoğunluğuna ilk 10 dk'da ulaşıldığı belirlenmiştir. İkinci aşamada öncelikle çamur parçalama verimine US prob dalma derinliğinin etkisi incelenmiştir. Prob dalma derinliğinin etkisi 1, 2 ve 3 cm'lik dalma derinliklerinde 1.00 W/mL US yoğunlukta 10 dk'ya kadar değişen sürelerde % 0.50 TKM içeren AAÇ kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra kısa süreli US ön arıtmada US yoğunluk ve ön arıtma süresinin çamur parçalamaya, çamur özelliklerine ve anaerobik çürütmede metan üretimine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Uzun ve kısa süreli US ön arıtma için deneysel şartlar Çizelge 3.3 ve 3.4'de sunulmuştur. Ön arıtmadan geçmiş çamur, oda sıcaklığına geldikten sonra analizlerde kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Uzun süreli US ön arıtmanın gerçekleştirildiği deneysel şartlar.

Parametre	Değer
US frekans, kHz	20
US yoğunluk, W/mL	0.50, 0.75, 1.00
US ön arıtma süresi, dk	1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30
Çamurun TKM içeriği, %	0.50, 1.00 ve 2.00
Sıcaklık kontrolü	Yapılmadı
Ortam pH'ı	Orijinal pH (7.50 – 7.65)
Prob dalma derinliği, cm	2

Çizelge 3.4. Kısa süreli US ön arıtmanın gerçekleştirildiği deneysel şartlar.

Parametre	Değer
US frekans, kHz	20
US yoğunluk, W/mL	0.35, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50
US ön arıtma süresi, dk	0.5, 1, 2.5, 5, 7.5, 10
Çamurun TKM içeriği, %	0.50, 0.75, 1.00 ve 2.00
Sıcaklık kontrolü	Yapılmadı
Ortam pH'ı	Orijinal pH (7.50 – 7.65)
Prob dalma derinliği, cm	2

Son aşamada ise, çamur pH'ının, US ışınım sırasında gerçekleşen sıcaklık artışının ve üretilen oksitleyici radikallerin çamur parçalama verimine etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Çamur pH'ının etkisi, 2 cm'lik prob dalma derinliğinde pH 2.0 – 12.0 aralığında % 1.00 TKM içeren çamurun 1.00 W/mL yoğunlukta 10 dk US ışınıma maruz

bırakılması ile araştırılmıştır. Çamur pH'ı 0.1 ve 6 N'lik NaOH ve H_2SO_4 çözeltileri kullanılarak istenen değere ayarlanmıştır.

Artan sıcaklığın etkisinin incelendiği deneyler, % 1.00 TKM içeren orijinal pH değerindeki çamura probun 2 cm daldırıldığı şartlarda 1.00 W/mL US yoğunlukta 10 dk'ya kadar değişen sürelerde US ışınım uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık artışını engelleyebilmek için çamur, su ceketinin içinde su ve buz karışımı bulunan bir behere koyulmuş ve US ışınıma maruz bırakılmıştır. Deneyler, hem sıcaklığın kontrol edildiği hem de kontrol edilmediği şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Süreç süresince üretilen oksitleyici radikallerin etkisi ise çamurun orijinal pH'ında, 2 cm'lik prob dalma derinliğinde, sıcaklık kontrolü yapılmadan, 1.00 W/mL US yoğunlukta 10 dk'lık ön arıtma süresince üretilen radikalleri süpürmek için 100 mM'a kadar değişen dozlarda sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) kullanılarak incelenmiştir.

US ön arıtmanın enerjiye bağımlı bir metot olmasından dolayı, çamuru parçalamak için harcanan enerji arttıkça metodun işletme maliyeti de artmaktadır. Ayrıca bu cihazların uygulayabildiği US gücün artması, daha yüksek kapasiteli cihazları gerektirdiği için ilk yatırım maliyetleri de yükselmektedir. Bu nedenlerden dolayı, US ön arıtmanın hem ilk yatırım hem de işletme maliyetini azaltabilmek için US ön arıtma, alkali ve ısıl ön arıtma metotları ile birleştirilmiştir.

3.2.2. Alkali ön arıtma

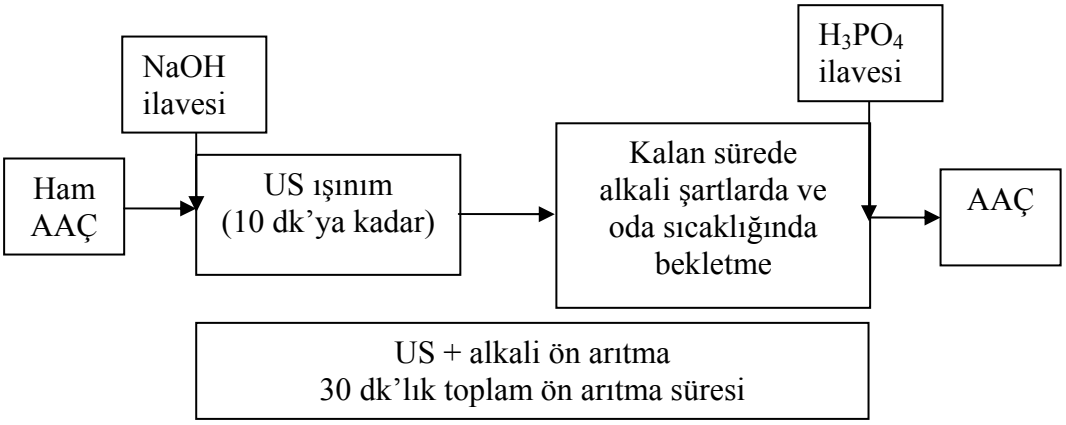
Alkali ön arıtma deneylerinde, çamuru parçalamak için en etkili alkali kaynağı olan NaOH kullanılmıştır (Kim ve ark., 2003; Neyens ve ark., 2003). Düşük dozlarda 5 N'lik NaOH çözeltisi ve yüksek dozlarda ise seyrelmeyi önlemek için pelet haldeki NaOH kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çamura uygulanan NaOH dozları 0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.10, 0.30 ve 0.50 N ve ön arıtma süreleri ise 0.5, 1.5 ve 24 saat olarak seçilmiştir. Deneyler, ortamın sürekli homojenliğini sağlayabilmek için jar testi cihazında yürütülmüştür. Deneylerde, 250 mL hacminde AAÇ kullanılmıştır. Ön arıtma süresinin sonunda, çamur 0.1, 6 N ve derişik H_2SO_4 kullanılarak nötralize edilmiş ve ön arıtma süreci sonlandırılmıştır. Nötralizasyon sırasında ısınan çamur, analizlerden önce oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır.

3.2.3. Isıl ön arıtma

Isıl ön arıtma deneyleri, 1 saat süreyle 60, 80 ve 100℃'lik sıcaklıklarda ve önceden ısıtılmış etüvde gerçekleştirilmiştir. 250 mL hacmindeki AAÇ, çamurun sıvı fazının buharlaşmasını engellemek için 250 mL'lik cam kapaklı balon jojelere koyularak deneylerde kullanılmıştır. Süreç sonunda etüvden çıkartılan ısıtılmış çamur, analizlerden önce oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır.

3.2.4. US + alkali ön arıtma

US + alkali ön arıtmanın şematik gösterimi Şekil 3.2'de sunulmuştur. Bu kombine metot için ön çalışma Çizelge 3.5'te verilen şartlarda gerçekleştirilmiştir. Ön çalışmada, bu kombinasyonda uygulanacak US ışınım için en uygun zaman aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Alkali kaynağı olarak 5 N'lik NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Deneyler % 1.00 TKM içeriğine sahip 100 mL hacminde AAÇ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kombinasyonda, önce çamura NaOH dozlanmış ve karıştırıldıktan sonra Çizelge 3.5'te verilen şartlarda US ışınıma maruz bırakılmıştır. Değişen sürelerde gerçekleştirilen US ışınımdan sonra, çamur oda sıcaklığında ve alkali şartlarda, NaOH ilavesinden itibaren toplam ön arıtma süresi 30 dk oluncaya kadar bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda çamur pH'ı, 0.1 ve 6 N'lik H_3PO_4 çözeltileri kullanılarak yaklaşık 7.5'a ayarlanmıştır. Nötralizasyon sonrasında, analizlerde kullanılacak olan çamur oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.2. US + alkali ön arıtmanın şematik gösterimi.

Çizelge 3.5. Uzun süreli US ışınım ile US + alkali ön arıtmanın gerçekleştirildiği deneysel şartlar.

Parametre	Değer
AAÇ'nin TKM içeriği, %	1.00
US frekans, kHz	20
US yoğunluk, W/mL	0.50, 1.00, 1.50
US ışınım süresi, dk	0.5, 1, 2.5, 5, 7.5, 10
Sıcaklık kontrolü	Yapılmadı
US prob dalma derinliği, cm	2
Alkali uygulama süresi, dk	30
Uygulanan alkali dozu, N	0.05

US + alkali ön arıtma için gerçekleştirilen ön çalışmada 10 dk'lık US ışınım ile elde edilen verimin büyük çoğunluğuna 2.5 dk'lık US ışınımın uygulandığı kombinasyonda ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle, Çizelge 3.6'da özetlendiği gibi 2.5 dk'ya kadar olan kısa sürelerde değişen US şartlarda ve farklı NaOH dozlarında US + alkali ön arıtmanın, çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerine, çamurun çürütülmesine ve metan üretimine etkileri araştırılmıştır. Ön çalışmada olduğu gibi bu deneylerde de çamura istenen dozda NaOH'nin ilavesinden sonra, çamur kısa süre karıştırılmış ve vakit geçirmeden Çizelge 3.6'da belirtilen şartlarda US ışınıma maruz bırakılmıştır. Çamur, US ışınımdan sonra, 30 dk'lık ön arıtma süresinin sonuna kadar oda sıcaklığında alkali şartlarda bekletilmiştir. Sürecin sonunda çamur pH'ı, 0.1 ve 6 N'lik H_3PO_4 çözeltileri kullanılarak yaklaşık 7.5'a ayarlanmıştır. Nötralizasyon sonrasında, analizlerde kullanılacak olan çamur oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır.

US + alkali ön arıtmanın, US ön arıtmayla kıyaslanabilmesi için Bölüm 3.2.1'de tarif edildiği gibi, kısa süreli US ön arıtma deneyleri aynı çamur numunesi için tekrarlanmıştır. Aynı çamur numunesinde gerçekleştirilen US ve US + alkali ön arıtma deneylerinin sonuçları kıyaslanmıştır.

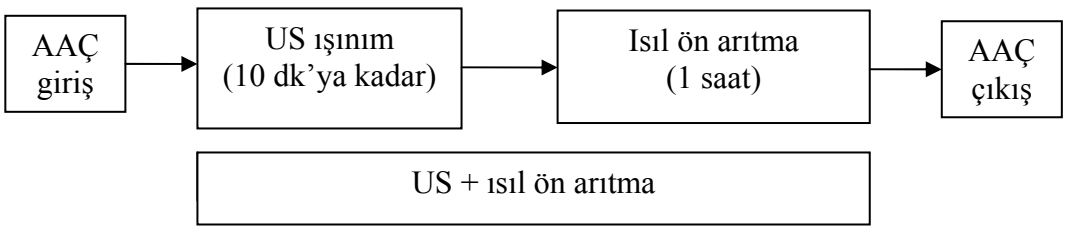
Çizelge 3.6. Kısa süreli US ışınım ile US + alkali ön arıtmanın gerçekleştirildiği deneysel şartlar.

Parametre	Değer
AAÇ'nin TKM içeriği, %	1.00
US frekans, kHz	20
US yoğunluk, W/mL	0.50, 1.00, 1.50
US ışınım süresi, dk	0.5, 1, 2.5
Sıcaklık kontrolü	Yapılmadı
US prob dalma derinliği, cm	2
Alkali uygulama süresi, dk	30
Uygulanan alkali dozu, N	0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.10

3.2.5. US + ısıl ön arıtma

US + ısıl ön arıtmanın şematik gösterimi Şekil 3.3'de verilmiştir. US ön arıtmadan sonra çamurun sıcaklığı, uygulanan US yoğunluk ve süreye bağlı olarak, düşük sıcaklıklı ısıl ön arıtma için yeterli sıcaklık olan 60 – 80℃'ye kadar yükselebilmiştir. Bu nedenle, US + ısıl ön arıtmada, US ön arıtmada gerçekleşen sıcaklık artışı, US ön arıtmadan sonra uygulanan düşük sıcaklıklı ısıl ön arıtma için bir avantaj olarak değerlendirilmiştir. US ön arıtma ile zaten ısınmış olan çamurun ısıl ön arıtımı için daha az enerjinin sarf edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, bu kombinasyonda US ön arıtmadan geçmiş çamur, düşük sıcaklıklı ısıl ön arıtmaya maruz bırakılarak çözünürlüğü arttırılmaya çalışılmıştır. Deneylerde, % 1.00 TKM içeriğine sahip 100 mL AAÇ kullanılmıştır. Bu kombinasyonda önce çamurun parçalanmasına sıcaklığın etkisi (60, 80 ve 100℃'de) araştırılmıştır. Optimum sıcaklığın belirlenmesinden sonra, US + ısıl ön arıtmanın verimine değişen US şartların etkisi araştırılmıştır. Deneysel şartlar, Çizelge 3.7'de özetlenmiştir. US ön arıtma süresince, çamurun sıcaklığı kontrol edilmemiş ve sıcaklığın artmasına müsaade edilmiştir. Değişen şartlarda US ön arıtmadan geçen AAÇ, buharlaşma nedeniyle sıvı hacminin eksilmemesi için kapaklı cam balon jojelere alınarak önceden 60, 80 ve 100℃'ye ısıtılmış etüvde 1 saat tutulmuştur. Bu sürenin sonunda etüvden çıkartılan çamur numuneleri, analizlerden önce oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir.

US + ısıl ön arıtmanın, US ön arıtmayla kıyaslanabilmesi için Bölüm 3.2.1'de tarif edildiği gibi, kısa süreli US ön arıtma deneyleri aynı çamur numunesi için tekrarlanmıştır. Aynı çamur numunesinde gerçekleştirilen US ve US + ısıl ön arıtma deneylerinin sonuçları kıyaslanmıştır.



Şekil 3.3. US + ısıl ön arıtmanın şematik gösterimi.

Çizelge 3.7. US + ısıl ön arıtma ön arıtmanın gerçekleştirildiği deneysel şartlar.

Parametre	Değer
AAÇ'nin TKM içeriği, %	1.00
US frekans, kHz	20
US yoğunluk, W/mL	0.50, 1.00, 1.50
US ön arıtma süresi, dk	0.5, 1, 2.5, 5, 7.5, 10
Sıcaklık kontrolü	Yapılmadı
US prob dalma derinliği, cm	2
Isıl ön arıtma süresi, dk	60
Uygulanan sıcaklık, ℃	60, 80, 100
Çamur pH'ı	Orijinal pH (7.50 – 7.65)

3.3. Biyokimyasal Metan Üretim (BMP) Testi

BMP testleri kısa süreli US, US + alkali ve US + ısıl ön arıtmaların anaerobik çamur çürütmede çamur stabilizasyonuna ve metan üretimine etkilerinin belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. BMP testleri, kısa süreli US ön arıtmanın uygulandığı şartlarının çoğunda ve US + alkali ön arıtmada ise tüm şartlarda yapılmıştır. US + ısıl ön arıtmada ise çözünmüş KOİ, protein ve karbonhidrata bağlı olarak belirlenen optimum şartta gerçekleştirilmiştir. BMP deneyleri üçer kez tekrarlanmıştır.

Testler, Eskicioğlu ve ark. (2007 ve 2009) çalışmalarında uyguladıkları prosedüre uygun olarak gerçekleştirilmiştir. BMP testleri aşı çamuru, ham AAÇ ve farklı şartlarda ön arıtmadan geçmiş AAÇ için toplam hacmi 120 mL olan alüminyum folyoya sarılı şişelerde yapılmıştır. Şişelere 20 mL anaerobik aşı çamuru ve 80 mL atık çamur ilave edilmiştir. Toplam alkalinite, eşit miktarda alkalinite oluşturacak kadar sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) ve potasyum bikarbonat ($KHCO_3$) ilavesiyle 4000 mg/L $CaCO_3$'a ayarlanmıştır. Şişeler kauçuk tıpa ve delikli vidalı kapaklar ile kapatılmışlardır (Şekil 3.4). Şişelerde kalan serbest oksijeni süpürmek için ortam 2 dk boyunca azot (N_2) gazı ile yıkanmıştır. Bu nedenle, başlangıçtaki gazın tamamının azot (N_2) olduğu kabul edilmiştir. Kesikli reaktörler, biyogaz üretimi duruncaya kadar 37±1℃'de inkübatörde tutulmuş ve günde iki kez çalkalanmıştır. BMP testi kesikli bir deney olduğu için, reaktörlere besleme veya reaktörlerden numune çekimi yapılmamıştır. Toplam biyogaz ve metan ölçümleri iki günde bir gerçekleştirilmiştir. Gaz üretimi bittikten sonra BMP testleri sonlandırılmış ve reaktörler açılarak tKOİ, TKM, UKM, KES ve $ÇÇO_{30}$ analizleri yapılmıştır. Anaerobik çamur çürütme verimleri, tKOİ ve UKM parametrelerine dayanarak belirlenmiştir. BMP testlerinde kullanılan birkaç kesikli reaktör Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kesikli anaerobik reaktörler.

3.4. Kesikli Beslemeli Anaerobik Reaktörler

Kesikli beslemeli şartlarda çamurun çürütülmesi 1 L aktif hacmi olan 1.2 L toplam hacimli alüminyum folyoya sarılı cam reaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Reaktör içeriği, manyetik karıştırıcılar ile karıştırılmıştır. Reaktörlerin ısıtılması, kauçuk tıpalardan reaktöre giren ve reaktörlerin içerisinde helezon şeklinde yerleştirilmiş olan 1 m uzunluğundaki hortumdan sürekli sabit sıcaklıkta su geçirilmesi ile sağlanmıştır. Hortum bağlantılarında yaklaşık 1℃'lik ısı kaybı olduğu için, su banyosunun sıcaklığı 38±1℃'ye ayarlanmıştır. Su banyosunda 38±1℃ sıcaklıktaki su, peristaltik pompalar ile hortumlardan geçirilerek reaktör içeriğinin sıcaklığı 37±1℃'de sabit tutulmuştur. Kesikli beslemeli anaerobik reaktörler Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

Reaktörlerin kurulumunda ilave edilen aşı ve atık çamurun hacimleri, substrat/aşı oranı [UKM/UAKM (w/w)] 2 olacak şekilde ayarlanmıştır. Reaktörlerde kalan hava 5 dk süre ile N_2 gazı kullanarak süpürülmüştür. Böylece reaktördeki gazın başlangıçta % 100 N_2 olduğu kabul edilmiştir.

Ham çamurun çürütüldüğü 2 kontrol reaktörü (K1 ve K2) ve ön arıtılmış çamurun çürütüldüğü 3 reaktör (R1, R2 ve R3) kurulmuştur. Reaktörler, 37±1℃ sıcaklıkta mezofilik şartlarda işletilmiştir. Kontrol reaktörleri % 1.00 TKM içeriğine sahip ham AAÇ ile beslenmiş; ön arıtmalı reaktörler ise 1 dk için 1.00 W/mL yoğunlukta US ışınım ve 30 dk süreyle 0.05 N NaOH ile ön arıtılmış atık çamurla beslenmiştir. Ön arıtma süreci Bölüm 3.2.4'de açıklanmıştır. Kurulan 5 farklı reaktör

(K1, K2, R1, R2 ve R3) için belirlenen bazı işletme şartları HBS, KAS ve OYH'dir ve Çizelge 3.8'de sunulmuştur.



Şekil 3.5. Kesikli beslemeli anaerobik reaktörler.

Çizelge 3.8. Anaerobik reaktörlerin işletme parametrelerinin özeti.

Reaktörler	HBS/KAS*, gün	OYH, kg UKM/m^3	Substrat/Aşı Oranı
Reaktör 1 (R1)	15	1.0	2
Reaktör 2 (R2)	7	1.0	2
Reaktör 3 (R3)	7	0.5	2
Kontrol 1 (K1)	15	1.0	2
Kontrol 2 (K2)	7	1.0	2

* Yarı kesikli anaerobik çürütücülerde HAS değeri, KAS değerine eşittir.

Reaktörler kurulduktan sonra, yedi gün aklime edilmiş ve sonra işletmeye alınmıştır. Bu süre içerisinde reaktörlerden numune çekimi veya besleme yapılmamıştır. Yedi günlük aklimasyon dönemi, mikroorganizmaların adaptasyon dönemi (lag fazı) olarak değerlendirilmiştir. Bu başlangıç dönemi anaerobik çamur çürütme için tam bir örnekleme sayılamayacağından dolayı, bu döneme ait veriler bu doktora tezinde sunulmamıştır.

Günlük numune çekimleri ve beslemeler, 50 mL hacimli plastik şırıngalar kullanılarak reaktörlerin tepesinde yer alan vanalardan yapılmıştır. Biyogaz ölçümleri, reaktörlerin üstünde yer alan başka bir çıkışa, içinde % 2 (v/v) H_2SO_4 ve % 10 (w/v) NaCI içeren çözeltinin bulunduğu gaz ölçüm düzeneğinin bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir (Beydilli ve ark., 1998). Üretilen metan gazının hacmi ise, toplam

biyogazın, % 3 (w/v) NaOH çözeltisinden geçirilmesi ile belirlenmiştir (Razo-Flores ve ark., 1997).

İşletme süresince reaktörler kararlı hale ulaşıncaya kadar Çizelge 3.9'daki parametreler belirlenen zaman aralıklarında ölçülmüştür. tKOİ ve UKM parametrelerinin giderim yüzdelerinde gerçekleşen salınımın % 5'den küçük olduğu zaman, reaktörlerin kararlı hale ulaştıkları kabul edilmiştir. Kararlı hale gelen reaktörlerde ise Çizelge 3.10'daki parametreler incelenmiştir. Reaktörlerin kararlı hale gelmelerinden sonra, yeterli verinin elde edilmesi ile reaktörlerin işletilmesi durdurulmuştur. R1'in 21. ve 52.; R 2'nin 35. ve 63.; R 3'ün 21. ve 38.; K1'in 35. ve 52. ve K 2'nin de 45. ve 63. günler arasında kararlı oldukları kabul edilmiştir.

Çizelge 3.9. Reaktörler kararlı hale gelinceye kadar izlenen parametreler.

Parametre	Analiz Sıklığı
pH	Günlük
Toplam biyogaz üretimi	Günlük
Metan gazı	Haftada 2 kez
tKOİ	Haftada 2 kez
TKM ve TUKM	Haftada 2 kez
Sülfat	Haftada 1 kez

Çizelge 3.10. Reaktörlerin kararlı hale gelmesinden sonra izlenen parametreler.

Parametre	Analiz Sıklığı
KES	Haftada 1 kez
$ÇÇO_{30}$	Haftada 1 kez
Amonyak	Haftada 1 kez
Çözünmüş protein	Haftada 1 kez
Çözünmüş karbonhidrat	Haftada 1 kez
Orto fosfat	Haftada 1 kez
Sülfat	Haftada 1 kez

3.5. Analitik Metotlar

Laboratuar çalışmaları süresince gerçekleştirilen ölçümler, AAÇ ve anaerobik aşı çamurunda yapılmıştır. Bu ölçümler TKM, UKM, AKM, UAKM, % TKM içeriği, pH, sıcaklık, çKOİ, tKOİ, çözünmüş protein, çözünmüş karbonhidrat, bulanıklık, KES ve $ÇÇO_{30}$'u kapsamaktadır.

Ön arıtma uygulandıktan sonra, süreç verimini belirlemek için yapılan ölçümler ise şunlardır: çKOİ, çözünmüş protein, çözünmüş karbonhidrat, bulanıklık, pH, sıcaklık, KES ve $ÇÇO_{30}$'dur. Çözünmüş KOİ, protein ve karbonhidrattaki artış, flokların parçalanmasından ve mikrobiyal hücrelerin çözünürlüğündeki artıştan

kaynaklanmaktadır. Ayrıca, uygulanan ön arıtma metotlarının toplam biyogaz ve metan üretimlerine etkilerinin belirlenebilmesi için BMP testleri de yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar süresince gerçekleştirilen bu analizlerin standart prosedürleri aşağıda sunulmuştur.

- **pH:** Numunelerin pH değerleri, Standart Metotların 4500 - H^+ - B nolu prosedürüne uygun olarak WTW 340i model multi-parametre ölçer ile belirlenmiştir (APHA, AWWA ve WEF, 2005).

- **Sıcaklık:** WTW 340i model multi-parametre ölçer kullanılarak ölçülmüştür.

- **TKM ve UKM:** Tiehm ve ark.'ın (2001) çalışmalarındaki deneysel prosedüre uygun olarak, çamur numunesinin 1 gün süreyle 105℃'de kurutulup sabit tartıma getirilmesi ile TKM, bu kurutulmuş numunelerin 2.5 saat süre ile 550℃'de yakılıp sabit tartıma getirilmesi ile UKM analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler üçer kez tekrarlanmıştır.

- **AKM (MLSS) ve UAKM (MLVSS):** Sırasıyla, Standart Metotların 2540 D ve 2540 E nolu prosedürlerine uygun olarak belirlenmişlerdir (APHA, AWWA ve WEF, 2005). Analizler üçer kez tekrarlanmıştır.

- **KES:** Standart Metotların 2710 G nolu prosedürüne uygun olarak ölçülmüştür. KES analizleri, Venture marka KES ölçerde Whatman marka (No 17) kromatografi kâğıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir (APHA, AWWA ve WEF, 2005). KES analizleri her bir numune için üçer kez tekrarlanarak yapılmıştır.

- **$ÇÇO_{30}$:** Basit ve kullanışlı bir parametre olan $ÇÇO_{30}$, biyolojik arıtma süreçlerinin işletilmesinde çamurun çökelebilirliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu ölçüm, standart bir metot olmamasına karşın, çamur ön arıtımının çamurun çökelebilirliğine etkisini görebilmek için gerçekleştirilmiştir. 50 mL çamur numunesinin, 50 mL'lik dereceli silindirde 30 dk boyunca bekletilmesi sonucunda, çökelmiş çamur hacminin okunması ile ölçülmüştür. $ÇÇO_{30}$, çökelmiş çamur hacminin, toplam karışık sıvı hacmine oranıdır ve Eşitlik (6)'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Spellman, 2009).

$$ÇÇH_{30}\ (\%) = \left[\frac{Çökelmis\ Çamur\ Hacmi\ (mL)}{Karisik\ Sivi\ Hacmi\ (mL)}\right]\cdot 100 \qquad (6)$$

- **Mikroskobik Analiz:** Olympus marka BX51T model ışık mikroskobu kullanılarak ön arıtma metotlarının çamura etkilerinin belirlenmesi için mikroskobik analizler gerçekleştirilmiştir.

- **Bulanıklık:** EPA'nın 180.1 nolu metoduna uygun olarak nefelometrik ölçüm yapan Hach Lange marka 2100P model türbidimetre ile ölçülmüştür (EPA, 1983). Ham ve ön işlemden geçmiş çamurlar için bulanıklık analizleri, numunelerin 3000 rpm devirde 10 dk santrifüjlenmesinden sonra yapılmıştır.

- **Alkalinite:** Standart Metotların 2320 B metoduna uygun olarak titrimetrik olarak ölçülmüştür (APHA, AWWA ve WEF, 2005). Alkalinite ölçümleri, pH parametresine bağlı olarak WTW 340i model pH metre kullanarak son pH 4.5 oluncaya kadar numunelerin 0.1 N H_2SO_4 ile titrasyonu sonucunda belirlenmiştir.

- **Toplam Uçucu Yağ Asitleri (TUYA) :** Anderson ve Yang'ın (1992) belirlediği metoda uygun olarak, üç noktalı titrasyon metodu ile ölçülmüştür. Numunenin başlangıç pH'ının ölçümünden sonra, numune 0.1 N H_2SO_4 çözeltisi ile sırasıyla pH 5.1, 4.5 ve 3.5'a kadar titre edilmiştir. TUYA konsantrasyonu, Eşitlik (7) ve (8)'i kullanarak bilgisayar ortamında hesaplanmıştır.

$$A_1 = \frac{[HCO_3^-]\cdot([H]_2 - [H]_1)}{[H]_1 + K_C} + \frac{[UYA]\cdot([H]_2 - [H]_1)}{[H]_2 + K_{VA}} \qquad (7)$$

$$A_2 = \frac{[HCO_3^-]\cdot([H]_3 - [H]_1)}{[H]_3 + K_C} + \frac{[UYA]\cdot([H]_3 - [H]_1)}{[H]_3 + K_{VA}} \qquad (8)$$

Burada A1 ve A2 sırasıyla, 1. ve 2. dönüm noktalarındaki standart asit tüketimi; $[HCO_3^-]$, bikarbonat konsantrasyonu; [UYA], TUYA konsantrasyonu; $[H]_{1,2,3}$ orijinal numunede 1., 2. ve 3. dönüm noktalarındaki hidrojen iyonu konsantrasyonları; K_C,

ayrışma şartlarına bağlı karbonik asit sabiti ve K_{VA}, UYA'ların birleşme sabitidir. K_{VA}, bikarbonat için $6.6.10^{-7}$ ve UYA için $2.4.10^{-5}$'dir.

- **tKOİ ve çKOİ:** Standart Metotların 5220 D nolu prosedürüne uygun olarak titrimetrik metotla ölçülmüştür (APHA, AWWA ve WEF, 2005).

Çözünmüş KOİ, karbonhidrat ve protein analizleri, ham ve ön arıtılmış çamur numunelerinin 3000 rpm'de 10 dk santrifüjlenmesi ve 0.45 μm (Sartorius) membram filtre kâğıdından süzülmesi ile elde edilen filtrat kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

- **Çözünmüş karbonhidrat:** Dubois ve ark. (1956) tarafından belirlenmiş spektrofotometrik bir metot olan fenol-sülfürik asit metodu ile karbonhidrat analizleri yapılmıştır. Kalibrasyon eğrisinin hazırlanmasında kullanılan standart çözeltilerde karbonhidrat kaynağı olarak glikoz kullanılmıştır. Shimadzu marka UV 1700 model UV-spektrofotometre kullanılarak 490 nm dalga boyunda analizler gerçekleştirilmiştir.

- **Çözünmüş protein:** Lowry ve ark. (1951) tarafından protein konsantrasyonunun tayini için belirlenmiş olan metodun modifiye hali olan modifiye Lowry metodu kullanılmıştır. Bu analiz için kullanılan çözeltiler Pierce markasından hazır alınmıştır. Kalibrasyon eğrisinin çıkartılmasında kullanılan standart çözeltilerin hazırlanması için bovin serum albumin (BSA) kullanılmıştır. Protein analizleri, Shimadzu marka UV 1700 model UV – spektrofotometre kullanılarak 750 nm dalga boyunda yapılmıştır.

BMP testleri ve kesikli beslemeli anaerobik reaktörlerde çamurun çürütülmesi için gerçekleştirilen deneylerde, üretilen biyogaz ve metan gazının hacimleri volumetrik metotla belirlenmiştir.

- **Toplam Biyogaz Hacmi:** % 2 (v/v) H_2SO_4 ve % 10 (w/v) NaCI içeren çözelti kullanılarak sıvıların yer değiştirmesi metodu ile ölçülmüştür (Beydilli ve ark., 1998).

- **Metan Gazı Hacmi:** Biyogazın % 3 (w/v) NaOH içeren çözeltiden geçirilmesi ile belirlenmiştir (Razo-Flores ve ark., 1997).

Toplam biyogaz ve metan gazı ölçümü, kesikli deneylerde 50 mL'lik dereceli silindirlerden oluşan sistem ile okunurken; kesikli beslemeli reaktörlerde ise 500 mL'lik mezürler ile oluşturulan düzenekte ölçülmüştür.

Kesikli beslemeli anaerobik reaktörlerin kararlı hale gelmesi ile protein vb azotlu maddelerin hidroliz seviyesini değerlendirebilmek için amonyak ölçümü yapılmıştır.

- **Amonyak:** Hach Lange marka LCK 303 test kiti ile ölçülmüştür.

Ayrıca reaktör içeriğindeki fostat ve sülfat konsantrasyonları da ölçülmüştür.

- **Orto – fosfat:** Ölçümler, Hach Lange marka LCK 350 test kiti kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

- **Sülfat:** Standart Metotların 4500 D nolu proserüdüne uygun olarak gravimetrik metotla ölçülmüştür (APHA, AWWA ve WEF, 2005).

3.6. İki Aşamalı Matematiksel Model

Çalışma kapsamında etkinlikleri incelenen kısa ve uzun süreli US, US + alkali ve US + ısıl ön arıtma metotları ile elde edilen çamur parçalama verimlerinin (PD_{KOI}) tahmin edilmesi için Wu ve ark. (2011) tarafından önerilen kinetik model kullanılmıştır. Bu model, hızlı ve yavaş reaksiyon aşamaları olmak üzere, reaksiyonun veya parçalamanın iki aşamalı gerçekleştiği durumda uygulanabilen iki aşamalı bir kinetik model olduğu için tercih edilmiştir. Model, Eşitlik (9)'da tanımlanmıştır;

$$x = \frac{t}{a + b \cdot t} \tag{9}$$

burada t, ön arıtma süresi (dk) ve x de t zamanında elde edilen PD_{KOI} (%)'dir. *1/a* ve *1/b* ise sırasıyla çamurun çözünme hızını ve maksimum çözünme kapasitesini gösteren model sabitleridir. Bu eşitliği çözebilmek ve model sabitlerini belirleyebilmek için modelin doğrusallaştırılmış hali Eşitlik (10)'da verilmiştir.

$$\frac{t}{x} = a + b \cdot t \tag{10}$$

Eşitlik (10)'da t/x, "birim parçalamanın elde edildiği zaman"dır. *a* ve *b* sabitlerini belirleyebilmek için, t/x'e karşı t grafiğinden yararlanılmıştır.

Matematiksel model, alkali işlem için zamana bağlı olarak değil, uygulanan alkali dozu esas alınarak uygulanmıştır. Alkali işlem için modelin düzenlenmiş hali Eşitlik (11)'de gösterilmiştir.

$$\frac{D_{NaOH}}{x} = a + b \cdot D_{NaOH} \qquad (11)$$

Eşitlik (11)'de D_{NaOH}/x, "spesifik NaOH dozu"dur. *a* ve *b* sabitlerini belirleyebilmek için D_{NaOH}/x'e karşı D_{NaOH} grafiğinden yararlanılmıştır.

3.7. Anaerobik Çamur Çürütme için Kinetik Yaklaşımlar

Kinetik çalışma, ham ve US + alkali ön arıtma için belirlenen optimum şartlarda ön arıtmadan geçmiş çamur numunelerinin kesikli şartlarda çürütülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kesikli kinetik çalışma için, BMP testlerinde olduğu gibi, ham ve ön arıtmadan geçmiş AAÇ için sekizer toplam onaltı kesikli reaktör hazırlanmıştır. Biyogaz üretimi bitinceye kadar 80 gün süren inkübasyon süresince, her 10 günde bir reaktör açılmış ve 10 günlük periyodlarda toplam biyogaz ve metan üretimleri ile reaktörlerde kalan tKOİ ve UKM konsantrasyonları belirlenmiştir. Elde edilen bu verilere göre, Monod eşitliği ile sıfırıncı, birinci ve ikinci derece kinetikler uygulanmıştır.

3.7.1. Monod eşitliği

Monod eşitliği, anaerobik çürütücülerin kinetik modellerinin türetilebilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Monod eşitliği, AAÇ'nin kesikli anaerobik şartlarda çürütülmesi ve biyolojik olarak bozundurulabilmesi için Eşitlik (12)'deki gibi ifade edilmektedir (Grady ve ark., 1972):

$$\frac{dS}{dt} = R = \frac{R_{\max} \cdot S}{K_S + S} \qquad (12)$$

Eşitlik (12)'nin dönüştürülmüş hali Eşitlik (13)'de verilmiştir. Bu eşitlikte, X'in sabit olduğu, R_{max}'ın ($k_{max} \cdot X$)'e eşit olduğu ve $t_0 = 0$ anında $S = S_0$ olduğu kabul edilmiştir.

$$\ln \frac{S_0}{S_t} \cdot \frac{1}{t} = -\frac{1}{K_S} \cdot \frac{S_0 - S_t}{t} + \frac{R_{max}}{K_S} \quad (13)$$

Burada R, substrat kullanım hızı (mg/L·sa); R_{max}, ($k_{max} \cdot X$) maksimum substrat kullanım hızı (mg/L·sa); k_{max}, maksimum spesifik substrat kullanım hızı (1/sa); X, biyokütle konsantrasyonu (mg/L); S, substrat konsantrasyonu (mg/L) ve K_S, yarı hız konsantrasyonudur (mg/L).

3.7.2. Kinetik modeller

Monod eşitliği kesikli sistemlerde başarı ile uygulanabilen bir kinetik yaklaşım olmasına rağmen; sıfırıncı, birinci ve ikinci derece reaksiyon kinetikleri de çalışma kapsamında incelenmiştir. Sıfırıncı, birinci ve ikinci derece reaksiyon kinetikleri sırasıyla Eşitlik (14), (15) ve (16)'da ifade edilmiştir.

$$S_t = S_0 - k_0 \cdot t \quad (14)$$

$$S_t = S_0 \cdot e^{-k_1 \cdot t} \quad (15)$$

$$\frac{1}{S_t} = \frac{1}{S_0} + k_2 \cdot t \quad (16)$$

Burada S_0, kesikli reaktörlerde başlangıçtaki substrat konsantrasyonu (mg/L); S_t, kesikli reaktörlerde t zamanında kalan substrat konsantrasyonu (mg/L); k_0, substrat giderimi için sıfırıncı derece reaksiyon sabiti (mg/L·sa); k_1, substrat giderimi için birinci derece reaksiyon sabiti (1/sa); k_2, substrat giderimi için ikinci derece reaksiyon sabiti (l/mg·sa) ve t de kesikli reaktörlerdeki HBS'dir (gün).

3.7.3. Kinetik katsayıların belirlenmesi

Monod eşitliği ve sıfırıncı, birinci ve ikinci derece reaksiyon kinetikleri, inkübasyon süresi boyunca kesikli reaktörlerde kalan tKOİ ve UKM konsantrasyonlarına uygulanmıştır. Kesikli deneylerde elde edilen zamana bağlı veriler, sırasıyla (13), (14), (15) ve (16) nolu eşitlikler kullanılarak, Monod eşitliği için ln $(S_0/S_t)/t$'ye karşı $(S_0-S_t)/t$, sıfırıncı dereceden reaksiyon kinetiği için S_t'ye karşı t, birinci dereceden reaksiyon kinetiği için ln S_t'ye karşı t, ve ikinci dereceden reaksiyon kinetiği için $1/S_t$'ye karşı t grafiklerinden yararlanarak kinetik analiz yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

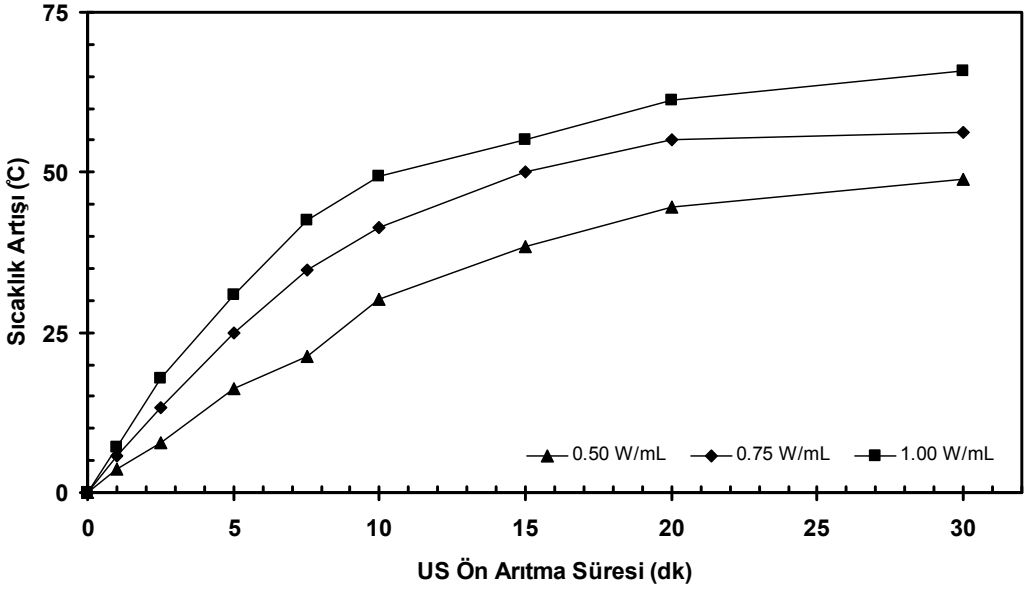
Çalışmanın bu bölümünde AAÇ'nin ön arıtımı ve anaerobik çürütülmesi ile ilgili deney sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

4.1. US Ön Arıtma

Bu bölümde uzun ve kısa süreli US ön arıtmanın çamur çözünürlüğüne ve özelliklerine etkileri ile akustik kavitasyonun mekanizmalarının çamur parçalama verimine etkileri sunulmuştur.

4.1.1. Uzun süreli US ön arıtma

0.50, 0.75 ve 1.00 W/mL US yoğunluklarda 30 dk'ya kadar değişen sürelerde gerçekleştirilen ön çalışmada, çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Artan US yoğunluk ve uzayan ön arıtma süresi ile çamura uygulanan E_S değeri de artmıştır. Chu ve ark. (2001), Grönroos ve ark. (2005) ve Dewil ve ark. (2006)'nın yaptıkları çalışmalarda gösterdikleri gibi, ön arıtma süresince çamura uygulanan E_S'deki artış ile çamurun sıcaklığı sürekli yükselmiştir. Sıcaklıktaki bu artış, akustik kavitasyonun daha etkili gerçekleştiğinin bir işaretidir. AAÇ'nin uzun süreli US ön arıtımı sonucunda gerçekleşen sıcaklık artışı (ΔT) Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Deneysel veriler, ayrıca Ek-1'de sunulan Çizelge E1.2'de de verilmiştir.

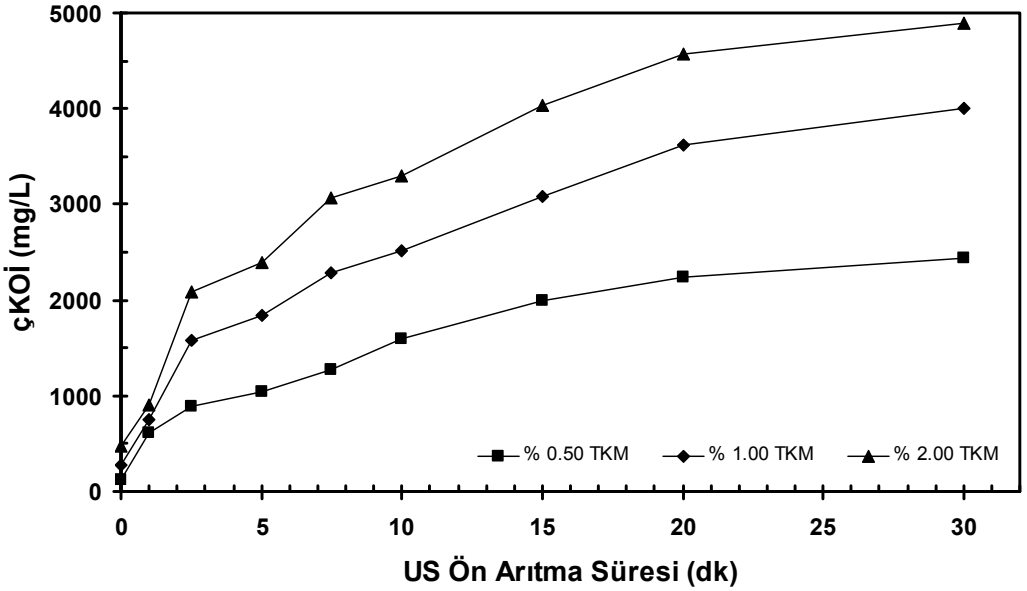


Şekil 4.1. Uzun süreli US ön arıtmanın çamur sıcaklığına etkisi.

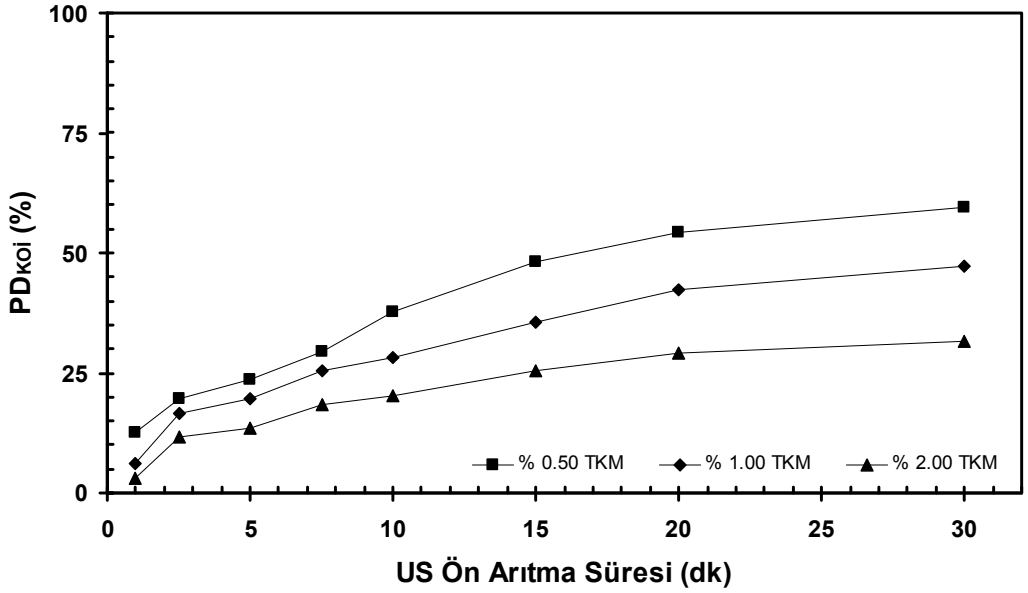
US ön arıtmada uygulanan US enerjideki artış, çamur pH'ının düşmesine neden olmuştur. pH'da gerçekleşen bu değişim, ön arıtmanın uygulandığı tüm numunelerde 0.50 birimden küçük olmuştur. Çamur numunelerinin pH değerlerindeki bu değişim, EPS ve hücre içi bileşenlerin sıvı faza geçişinden kaynaklanmış olabileceği söylenebilir.

4.1.1.1. Çamurun TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi

Çamurdaki katı maddelerin çoğunluğu, biyokütle ve refrakter yapılı organik maddelerden oluşmaktadır. Bu nedenle yoğunlaştırılmış çamurun ön arıtımı, protein, karbonhidrat, DNA gibi hücrelerarası ve hücre içi materyallerin çözünmüş fazdaki konsantrasyonlarının artmasına neden olmuştur. Böylece çamurun sıvı fazındaki KOİ konsantrasyonu da yükselmiştir (Şekil 4.2). Ancak TKM içeriğindeki artış ile $PD_{KOİ}$ değeri azalmıştır. Çamur parçalamada temel parametre olan $PD_{KOİ}$'yi dikkate alarak uzun süreli US ön arıtma için en uygun içeriği belirlenmiştir. TKM içeriğinin etkisi, çamurun % 0.50, 1.00 ve 2.00 TKM içeriklerinde 0.50 W/mL US yoğunlukta ve değişen sürelerde incelenmiştir. TKM içeriğinin etkileri, çKOİ ve $PD_{KOİ}$ parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmiş ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Deneysel veriler, ayrıca Ek-1'de sunulan Çizelge E1.1'de de verilmiştir.



Şekil 4.2. Uzun süreli US ön arıtmada çamurun TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi.



Şekil 4.2. Uzun süreli US ön arıtmada çamurun TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi (Devam).

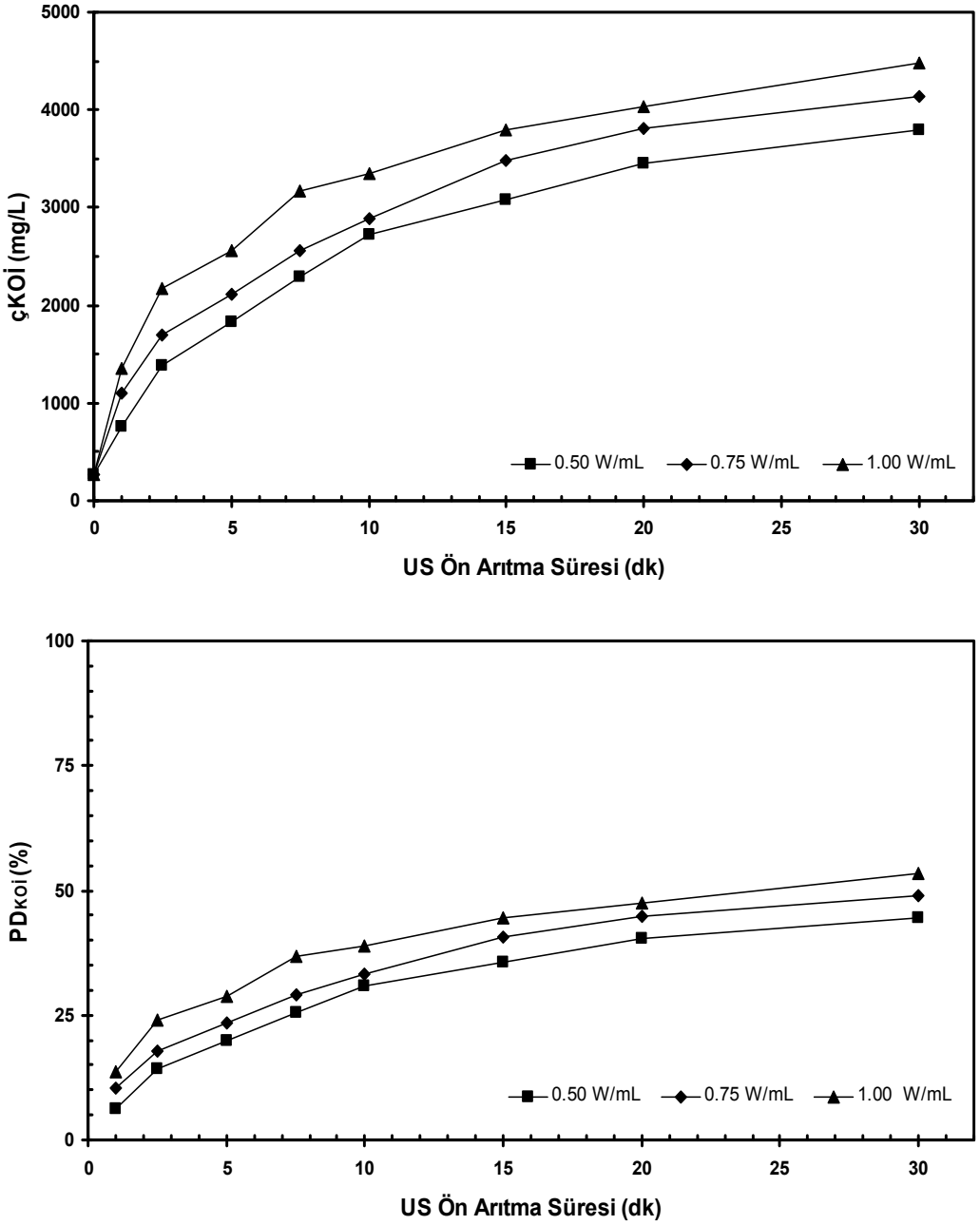
US ön arıtma süresinin uzatılması ile çamura uygulanan E_S yükselmiştir (Eşitlik 5). E_S'deki artış, katı fazdan sıvı faza KOİ geçişinin artmasına neden olmuştur (Şekil 4.2). Çamurun TKM içeriğinin % 0.50'den % 2.00'ye yükselmesi, birim hacimdeki katı maddeye uygulanan E_S'yi azalttığı için $PD_{KOİ}$ değerinin azalması ile sonuçlanmıştır. Ayrıca çamurun TKM içeriğinin % 0.50'ten 1.00'e yükselmesi, TKM içeriğinin % 1.00'den 2.00'ye çıkmasına kıyasla, daha fazla çKOİ artışına neden olmuştur. Benzer çalışmalarda, çamurun TKM içeriğindeki artışın belirli bir değerden sonra çamur parçalamayı olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Huan ve ark., 2009; Show ve ark., 2007; Akın, 2008; Zhang ve ark., 2008b). Bu durum, düşük konsantrasyonlardaki çamuru parçalamanın daha kolay olmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca çamur içindeki katı maddelerin US enerjiyi adsorplaması, US ses dalgalarının katı maddelere çarparak kırılması ve yansıması, katı maddelerin akustik gölgeler oluşturması ve viskozitesi artan çamurda ses dalgalarının yayılırken daha fazla enerji yitirmesi de bu sonucun diğer nedenleridir (Abramov, 1998; Show ve ark., 2007). Öte yandan, literatürde üzerinde anlaşılan bir optimum TKM değeri bulunmamaktadır. Sonuç olarak en yüksek $PD_{KOİ}$ değeri % 0.50 TKM içeriğinde elde edilmiş olmasına rağmen; arıtılacak çamurun hacmini azaltabilmek için **optimum TKM içeriği % 1.00 seçilmiştir**.

4.1.1.2. US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi

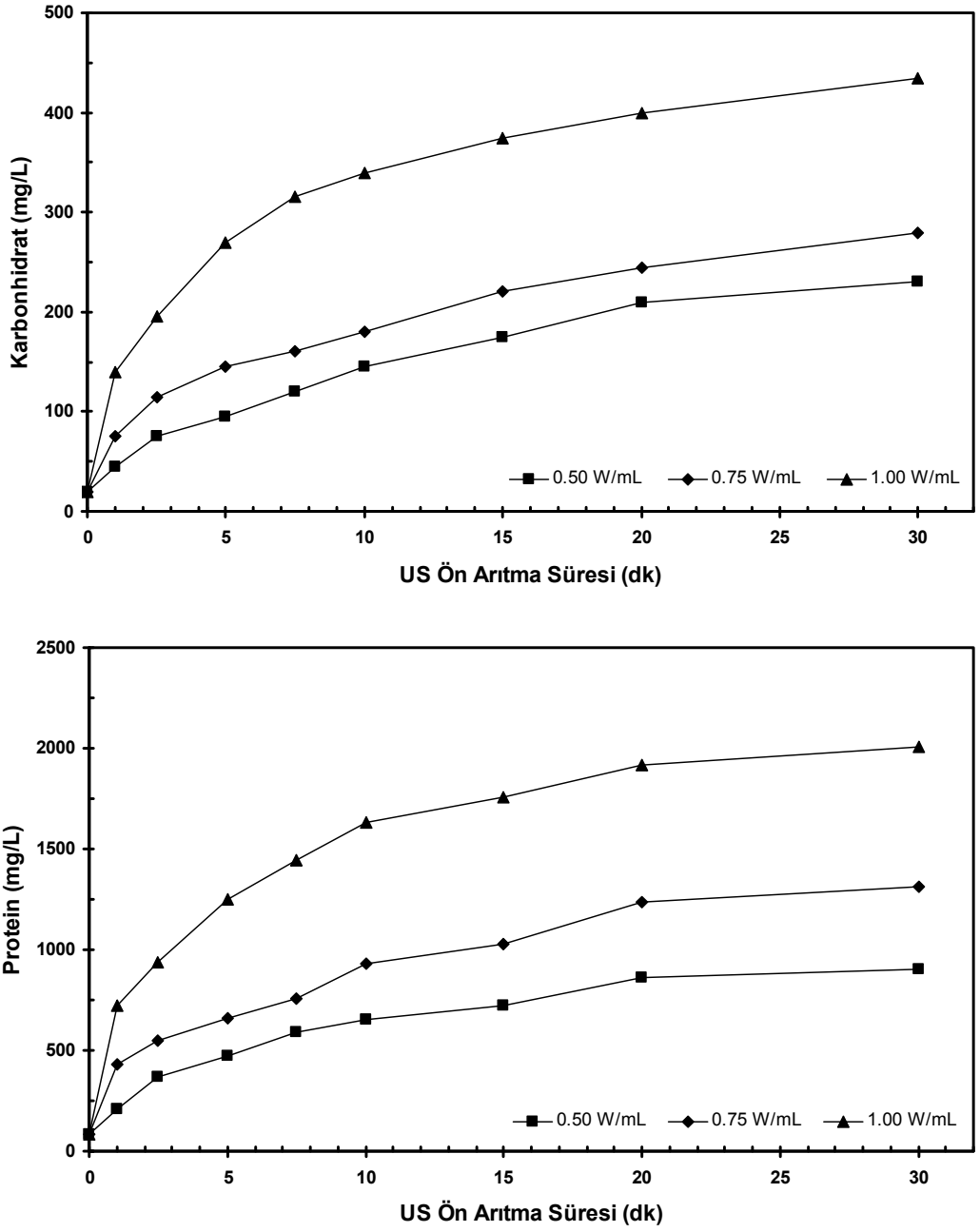
Çözünmüş karbonhidrat ve protein, canlı hücreyi oluşturan temel yapısal bileşenlerdendir. Bu nedenle, US yoğunluğun etkisini belirleyebilmek için çKOİ ve

$PD_{KOİ}$'ye ilave olarak, çözünmüş karbonhidrat ve protein de ölçülmüştür. Artan US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca deneysel veriler, Ek-1'de sunulan Çizelge E1.2'de de verilmiştir. US yoğunlukta ve ön arıtma süresindeki artış ile çamurun çözünürlüğü sürekli artmıştır. Çamur parçalamanın ilk 2.5 dk'da hızla gerçekleştiği, ancak parçalanma hızının zamanla azaldığı görülmüştür. 0.50, 0.75 ve 1.00 W/mL yoğunluklarda ilk 2.5 dk'lık sürede ulaşılan çKOİ değerleri sırasıyla 1385, 1690 ve 2180 mg/L; 30 dk'da erişilen çKOİ konsantrasyonları ise 3800, 4135 ve 4485 mg/L olmuştur. Benzer bir çalışmada, Show ve ark. (2007), US ışınımın mikrosaniyeler içerisinde oluşturduğu hızlı kavitasyon etkisi nedeniyle özellikle başlangıç aşamasında çok etkili olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, bu güç seviyelerinde çözünmüş protein ve karbonhidrat konsantrasyonları ilk 2.5 dk'da 365, 550 ve 935 mg/L ve 75, 115 ve 195 mg/L'ye; 30 dk'lık ön arıtmada sırasıyla 905, 1310 ve 2010 mg/L ve 230, 280 ve 435 mg/L'ye yükselmiştir. Çamur parçalama konusunda temel parametre olan $PD_{KOİ}$ verileri kıyaslandığı zaman, 0.50, 0.75 ve 1.00 W/mL US yoğunluklarda ilk 2.5 dk'da elde edilen çamur parçalama verimleri, 30 dk'da elde edilen verimlerin % 40, 42 ve 47'si kadar olmuştur. Bu yoğunluklarda ilk 10 dk'da ulaşılan $PD_{KOİ}$ değerlerinin, 30 dk'da elde edilenlere oranları ise % 72, 70 ve 75'dir. Benzer olarak, 30 dk'da elde edilen karbonhidrat ve proteinin salınımlarının büyük çoğunluğuna, ilk 10 dk ulaşıldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, ön arıtma süresinin 10 dk'dan 30 dk'ya uzamasının çamur çözünürlüğünde ciddi bir artışa neden olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, **ön arıtma süresinin en fazla 10 dk'ya kadar uzatılması, çamuru parçalamak için daha uygundur**.

Uzun sürelerde elde edilen $PD_{KOİ}$ değelerine, daha yüksek US yoğunluklarda ve daha kısa sürelerde de ulaşılabildiği belirlenmiştir. Örneğin, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, yaklaşık % 25'lik $PD_{KOİ}$ değerine ulaşabilmek için 0.50 W/mL'de 7.5 dk, 0.75 W/mL'de 5 dk ve 1.00 W/mL'de ise 2.5 dk yeterli olmuştur. % 49'lık parçalama verimine ulaşabilmek için 1.00 W/mL'de 20 dk ve 0.75 W/mL'de 30 dk gerekli olmuştur. 0.50 W/mL'de 30 dk'lık ön arıtmada ise ancak % 46'lık $PD_{KOİ}$ değeri elde edilebilmiştir. Benzer sonuçlar, Grönroos ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada da belirlenmiştir. Böylece, uygulanan US yoğunluğun uygulama süresinden daha etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sürecin işletme maliyetini belirleyen temel parametrenin, birim hacimdeki çamura belirli zaman aralığında uygulanan güç olduğu düşünülürse; aynı verime ulaşmak için ön arıtmanın daha yüksek US yoğunlukta daha kısa sürelerde uygulanmasının işletme maliyetini de azaltabileceği tahmin edilmiştir.



Şekil 4.3. Uzun süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi.

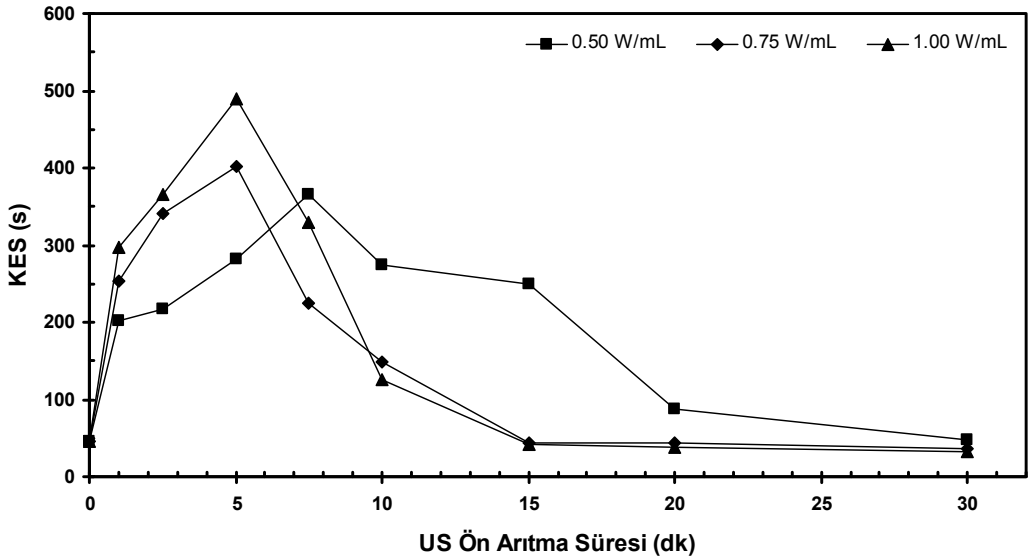


Şekil 4.3. Uzun süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi (Devam).

4.1.1.3. US yoğunluğun çamurun su verme özelliğine etkisi

Artan US yoğunluk ve uzayan süre ile ön arıtmadan geçmiş çamurun KES değeri artmış ve çamurun su verme özelliği kötüleşmiştir (Şekil 4.4 ve Çizelge E1.2). 0.50 W/mL US yoğunlukta ilk 7.5 dk'da, 0.75 ve 1.00 W/mL US yoğunluklarda ise ilk 5 dk'da en yüksek KES değerleri (365, 401 ve 489 s) ölçülmüştür. Böylece bu US yoğunluklarda parçalanmış çamur numuneleri için en kötü su verme özellikleri elde edilmiştir. Bu kritik artış iki nedenden ötürü gerçekleşmiştir. Bunlardan ilki, US ön arıtma sonucunda dağılan floklardan ve parçalanan hücrelerden salınan EPS'nin

çözünmüş fazda artan konsantrasyonudur (Bruss ve Christensen, 1993; Wang ve ark., 2006a). EPS, su ve çok ince partiküllerle bir araya gelerek jelimsi bir yapı oluşturmakta ve çamurun viskozitesini arttırmaktadır. Ayrıca, protein ve karbonhidratlar gibi biyopolimerler, hidrofilik yapıda çok su tutan maddelerdir. Bu özelliklerinden dolayı EPS'nin artan konsantasyonu, çamurun su verme özelliğinin kötüleşmesine sebep olmuştur (Wang ve ark., 2006a). KES değerlerindeki artışın ikinci nedeni ise, uygulanan US gücün şiddetiyle parçalanan çamurun tanecik boyutunun küçülmesi ve böylece taneciklerin, daha fazla serbest suyu adsorbe edebilecek daha geniş yüzey alanlarına sahip olmasıdır. Çamur içeriğindeki serbest su, bu yüzeylere tutunarak bağlı suya dönüşmektedir (Wang ve ark., 2006a). Bu nedenle çamuru susuzlaştırmak zorlaşmıştır. Ancak çamura uygulanan E_S'nin artması, çamurun su verme özelliğinin gelişmesine neden olmuştur. Bu iyileşme, küçülen partiküllerin kohezyon ve yoğunluklarındaki artışın (Gonze ve ark., 2003) ve dağılan floklar ile parçalanan hücrelerden salınan hücrelerarası ve hücre içi materyallerin bağlayıcı özelliklerinin (Feng ve ark., 2009) etkisi ile parçalanmış çamur taneciklerinin tekrar floküle olması ve çamurdaki ince taneciklerin bu floklar içerisinde tutulmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, çamur flokları arasında bağlı tutulan su, artan sıcaklığın etkisi ile flokların matriks yapısının içinden çıkıp serbest hale geçmektedir. Böylece, artan sıcaklık ile gerçekleşen ısıl şartlandırma, çamurun su verme özelliğini geliştirmiştir (Apul ve Sanin, 2010). Bu nedenlerden dolayı, çamurun su verme özelliği önce kötüleşmiş, uygulanan E_S'deki artışa bağlı olarak da iyileşmiştir. Başlangıçta 45 s olan KES değeri, 30 dk'lık ön arıtma süresinin sonunda 0.50, 0.75 ve 1.00 W/mL'lik US yoğunluklarda sırasıyla 48, 35 ve 32 s olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak Şekil 4.4'de gösterildiği gibi, ancak 0.75 ve 1.00 W/mL yoğunluklarda 30 dk'lık uygulama ile ham çamurunkine kıyasla daha iyi su verme özelliği elde edilebilmiştir. Çamurun su verme özelliğindeki bu değişim, Apul ve Sanin'in (2010) yaptıkları çalışmanın sonucuna benzerdir. Ancak çamura uygulanan E_S'deki artış ile çamurun su verme özelliği her zaman iyileşememektedir. Wang ve ark. (2006a) yaptıkları çalışmada US ön arıtma sonucunda çamurun su verme özelliğinin, ön arıtma süresinin uzaması ile sürekli kötüleştiğini belirlemişlerdir. Bu farklı sonuçlara dayanarak, ön arıtma sonucunda çamurun su verme özelliğinde gerçekleşen değişimde, çamur özelliklerinin daha etkili olduğu söylenebilir.

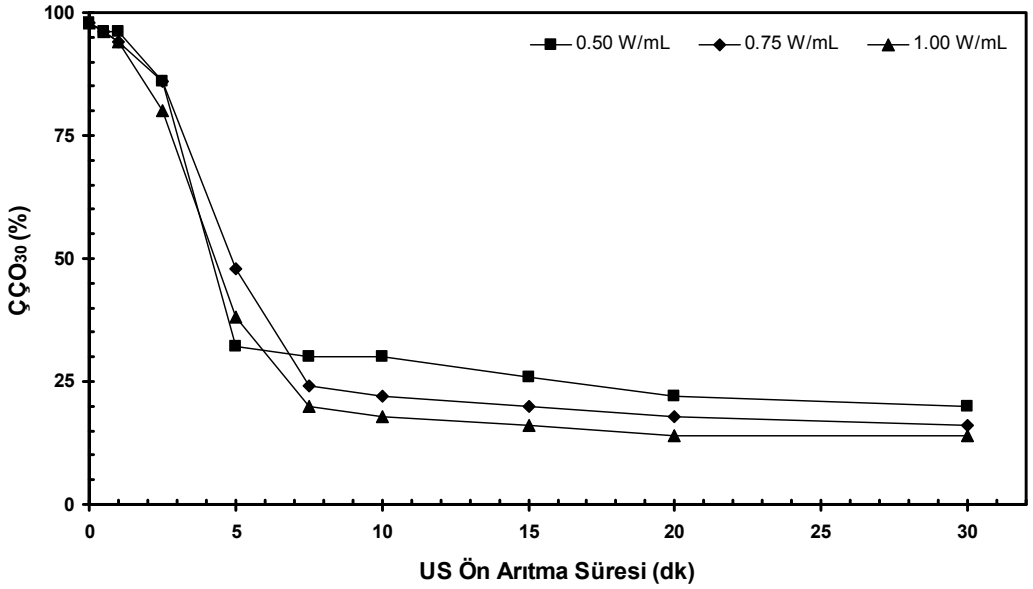


Şekil 4.4. Uzun süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamurun su verme özelliğine etkisi.

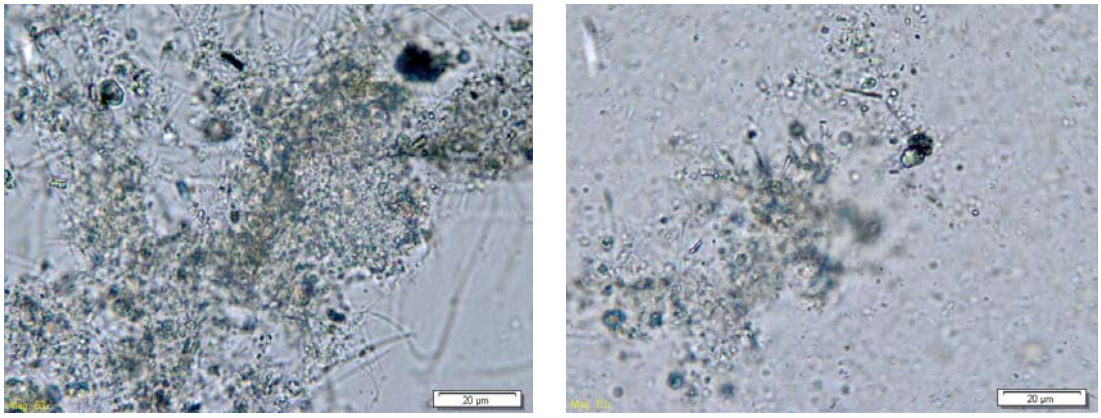
4.1.1.4. US yoğunluğun çamurun çökelebilme özelliğine etkisi

Ham çamurun çökelebilme özelliğinin filamentli mikroorganizmalardan dolayı kötü olduğu tespit edilmiştir. Uzun süreli US ön arıtma sonucunda, çamurun çökelebilme özelliği iyileşmiştir (Şekil 4.5 ve Çizelge E1.2). Çökelebilme özelliğinde sağlanan bu gelişme, 4 nedenden dolayı gerçekleşmiştir: (1) dağılan floklardan salınan hücrelerarası ve parçalanan hücrelerden sıvı faza geçen hücre içi materyallerin bağlayıcı özellikleri ile taneciklerin tekrar floküle olması (Feng ve ark., 2009), (2) flokların parçalanması sonucunda küçülen taneciklerin kohezyon ve yoğunluklarının artması (Gonze ve ark., 2003) (3) filamentli mikroorganizmaların parçalanması ve (4) ısıl şartlandırma (Apul ve Sanin, 2010). $PD_{KOİ}$'de sağlanan artışa paralel olarak çamurun çökelebilirliği gelişmiştir (Şekil 4.5). Çamurun parçalanmasındaki gelişmenin sonucu olarak hem hücrelerarası ve hücre içi materyaller sıvı faza daha fazla geçmiş hem de parçalama sonucunda taneciklerin yoğunluğunu ve kohezyonu artmıştır. Böylece taneciklerin floklaşma eğilimi artarak çamurun çökelebilme özelliğini iyileştirmiştir. Filamentli mikroorganizmaların çoğunluğu US ön arıtmanın ilk 5 dk'sında parçalanmış; 7.5 dk'da ise uygulanan her üç US yoğunlukta da bu mikroorganizmaların tümüyle parçalanması gerçekleşmiştir. Bu sonuca uygun olarak, özellikle ilk 7.5 dk'da çamurun çökelebilme özelliği hızla iyileşmiş; artan sürelerde ise bu iyileşme ihmal edilebilir seviyelerde olmuştur. Şekil 4.6'da hem ham AAÇ hem de 0.50 W/mL yoğunlukta 7.5 dk süreyle ön arıtılmış çamurun mikroskobik fotoğrafları sunulmuştur. Son olarak, artan sıcaklık da flok yapısının içinde tutulan suyu serbest bırakarak çamurun çökelebilirliğini

geliştirmiştir. $ÇÇO_{30}$ ham çamur için % 98 iken, 0.50, 0.75 ve 1.00 W/mL yoğunluklarda 30 dk süren US ön arıtma sonucunda sırasıyla % 20, 16 ve 14 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.5). Sonuç olarak, US ön arıtma, çamurun çökelebilme özelliğini ciddi oranda iyileştirmiştir.



Şekil 4.5. Uzun süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamurun çökelebilme özelliğine etkisi.



(a) (b)

Şekil 4.6. US ön arıtmanın filamentli mikroorganizmalara etkisi: (a) ham AAÇ ve (b) 0.50 W/mL'de 7.5 dk US ön arıtmadan geçmiş AAÇ.

4.1.2. Kısa süreli US ön arıtma

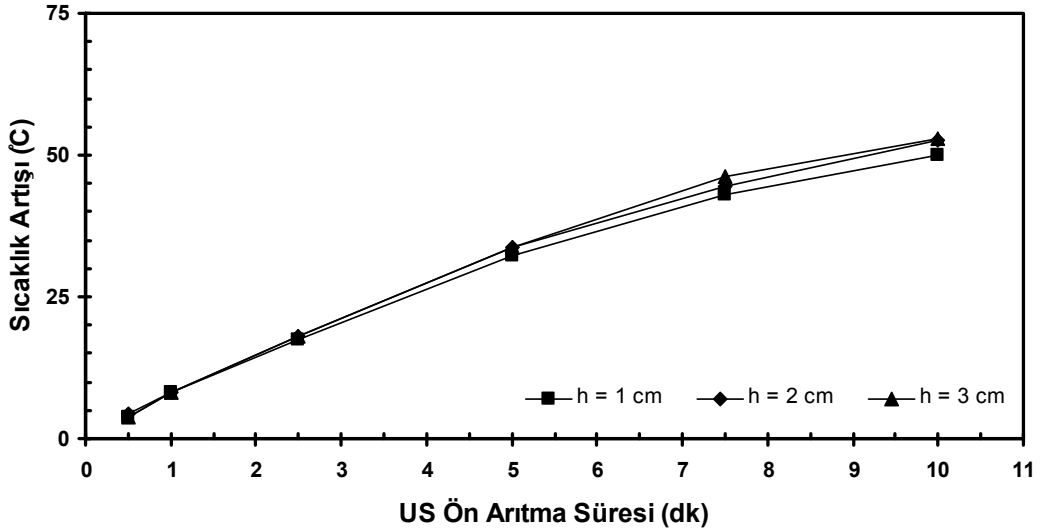
Bölüm 4.1.1'de uzun süreli US ön arıtmada, 30 dk'lık sürede elde edilen çamur parçalama veriminin çoğunluğuna ilk 10 dk'da ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu sonuca uygun olarak, bu bölümde 10 dk'ya kadar olan kısa sürelerde ve değişen şartlarda gerçekleştirilen US ön arıtmanın, çamur parçalamaya, çamur özelliklerine, kesikli

anaerobik reaktörlerde çamurun çürütülmesine ve metan üretimine etkileri incelenmiştir.

4.1.2.1. US prob dalma derinliğinin etkisi

US enerji, çamura US prob vasıtasıyla uygulanmaktadır. Probun dalma derinliği, US enerjinin çamura aktarılmasına ve çamur içindeki akustik enerjinin akışına etki edebilmektedir. Bu nedenle mümkün olan en yüksek verimin elde edilebilmesi için prob dalma derinliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde, prob dalma derinliğinin hem çamur parçalamaya hem de çamur özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

Şekil 4.7'de prob dalma derinliğinin sıcaklık artışında neden olduğu farkın, sabit US yoğunlukta uzayan süre ile arttığı gösterilmiştir. Sonuçlar ayrıca Ek-1'de Çizelge E1.3'de gösterilmiştir. Dalma derinliği 1 cm iken en az sıcaklık artışı gerçekleşmiştir. 2 ve 3 cm'lik prob dalma derinliklerinde ise sıcaklığın biraz daha fazla arttığı, ancak farkın ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Prob dalma derinliği reaktörde gerçekleşen akustik akışın yönünü ve boyutunu etkileyebildiği için, bu durumun 2 ve 3 cm'lik dalma derinliklerinde kavitasyonun daha etkili gerçekleşmesinden kaynaklanmış olduğu söylenebilir.

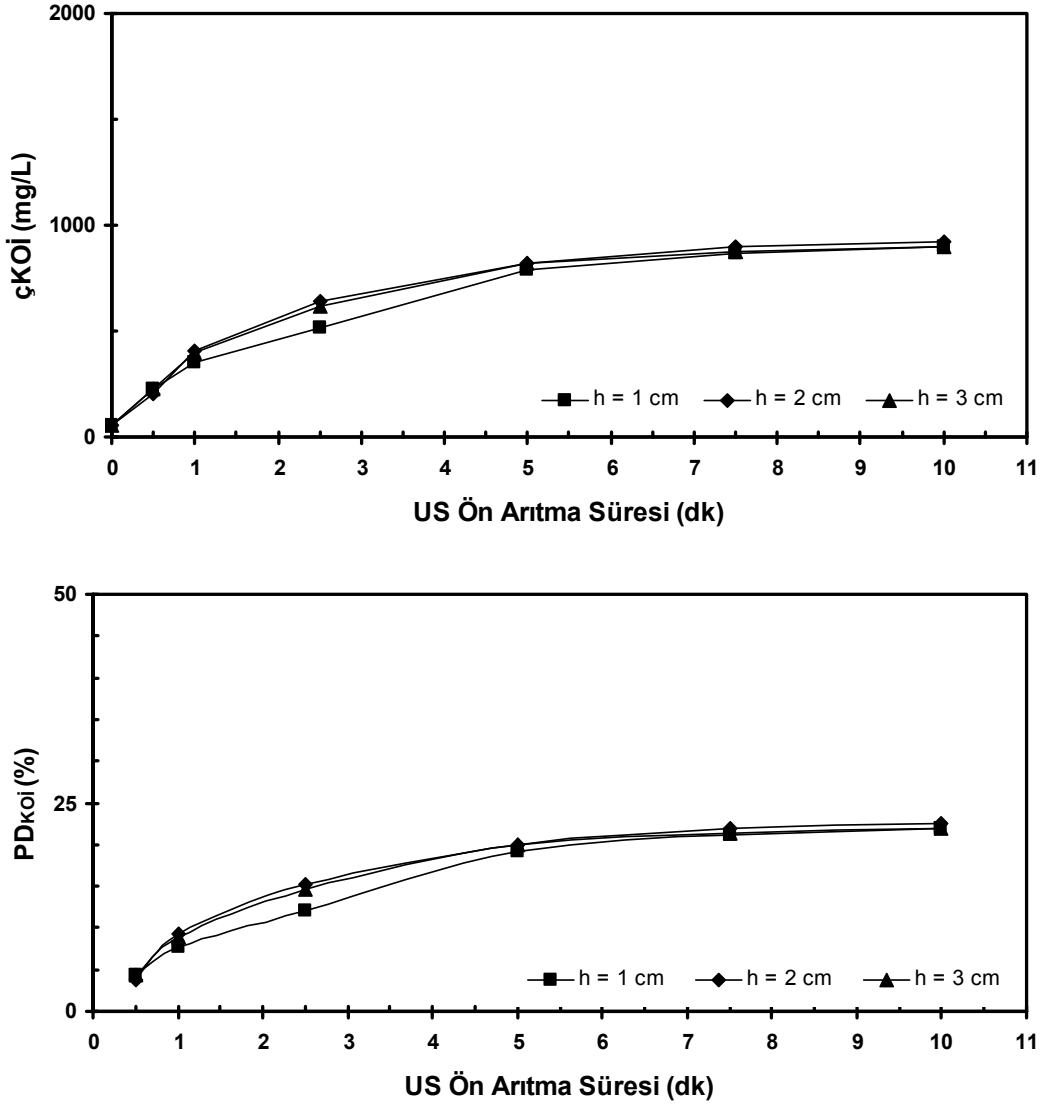


Şekil 4.7. Kısa süreli US ön arıtmada prob dalma derinliğinin sıcaklık artışına etkisi.

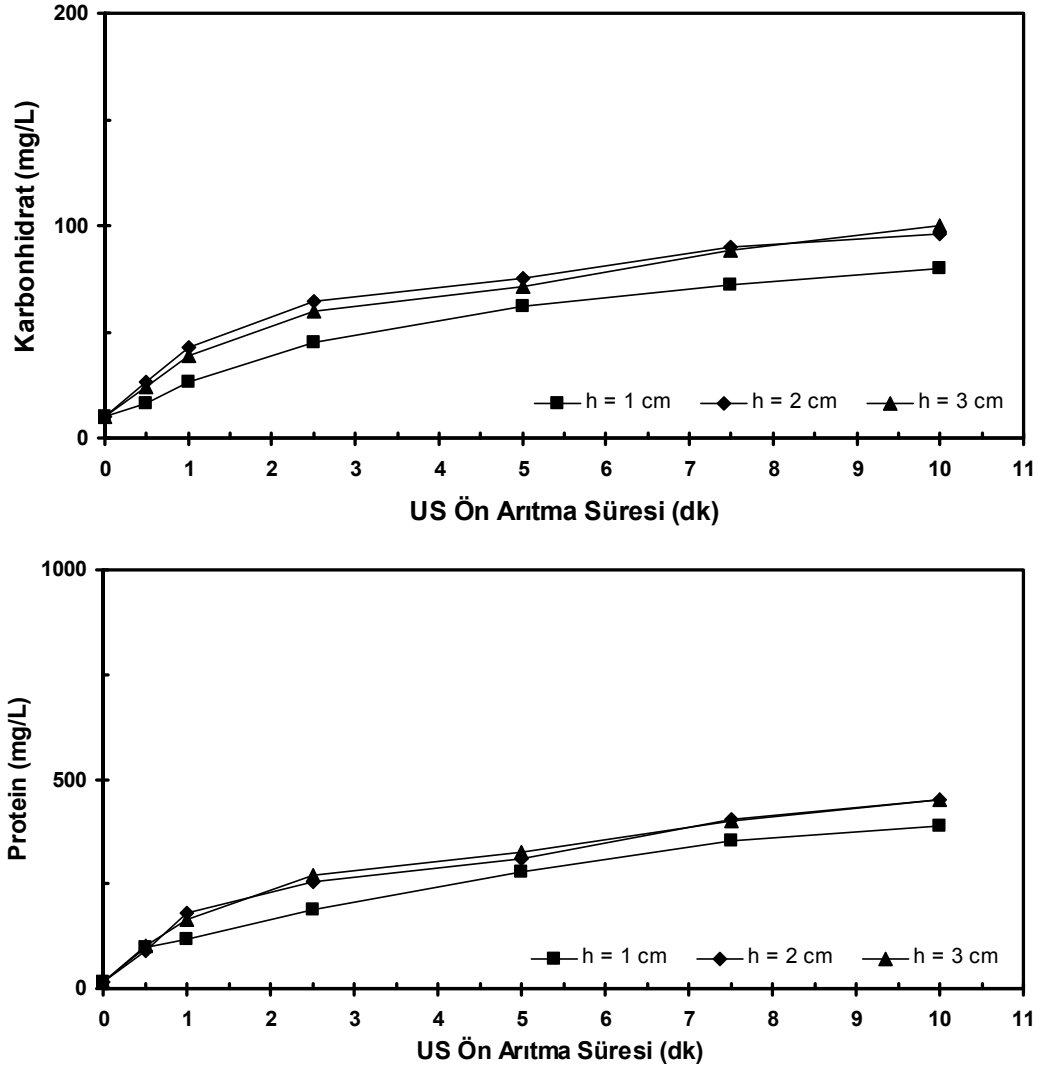
US prob dalma derinliğinin çamur parçalamaya etkisi

Prob dalma derinliğinin, PD_{KOI} üzerinde ciddi bir farka neden olmadığı belirlenmiştir. Ancak Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, dalma derinliğinin 1 cm olması, 2 ve

3 cm'lik dalma derinliklerine kıyasla çamurun daha az parçalanması ile sonuçlanmıştır. Ancak 2 ve 3 cm'lik derinliklerde elde edilen verimler kıyaslandığında aradaki fark ihmal edilebilecek kadar az olmuştur. Sonuç olarak, **prob dalma derinliği 2 cm seçilmiştir**. Sonuçlar, Ek-1'de Çizelge E1.3'de sunulmuştur.



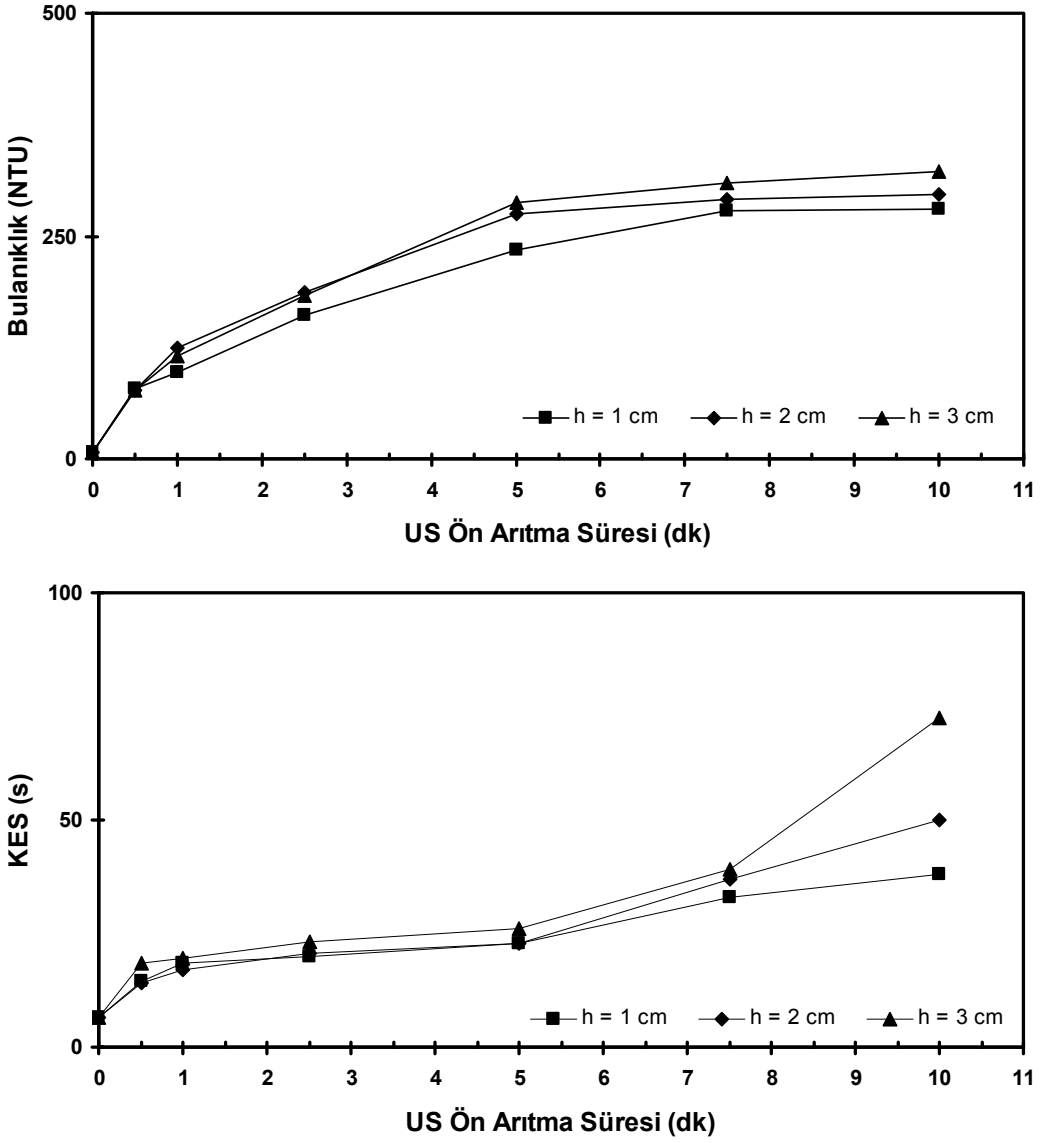
Şekil 4.8. Kısa süreli US ön arıtmada prob dalma derinliğinin çamur parçalamaya etkisi.



Şekil 4.8. Kısa süreli US ön arıtmada prob dalma derinliğinin çamur parçalamaya etkisi (Devam).

US prob dalma derinliğinin çamurun su verme özelliğine etkisi

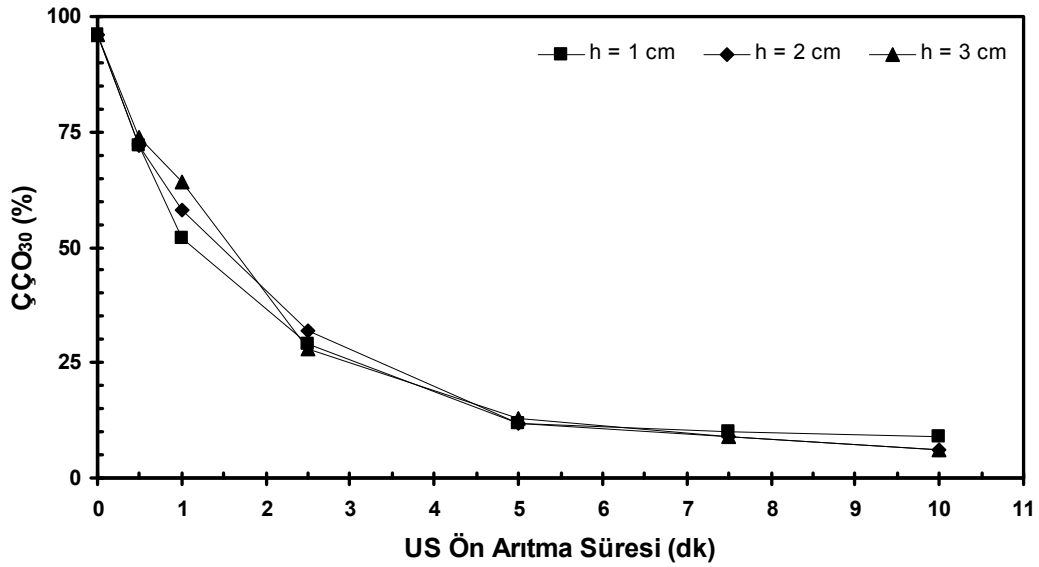
Çamurun su verme özelliği bulanıklık parametresi ile birlikte değerlendirilmiştir. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi, her üç dalma derinliğinde de bulanıklık, uygulanan ön arıtma süresi uzadıkça artmıştır. Ancak bu artış, $PD_{KOİ}$'de gerçekleşen değişime benzer olarak, 2 ve 3 cm'lik dalma derinliklerinde daha fazla olmuştur. Çamurun su verme özelliği ilk 5 dk'da her üç derinliğinde de benzer şekilde değişmiştir. Ancak, ön arıtma süresinin uzatılması ile KES değerindeki fark da artmıştır (Şekil 4.9). Çamurun su verme özelliği, Bölüm 4.1.1.3'de anlatıldığı gibi tanecik boyutundaki küçülme ve artan EPS konsantrasyonundan dolayı kötüleşmiştir (Wang ve ark., 2006a). Sonuçlar, Ek-1'de Çizelge E1.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kısa süreli US ön arıtmada prob dalma derinliğinin çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi.

US probun dalma derinliğinin çamurun çökelebilme özelliğine etkisi

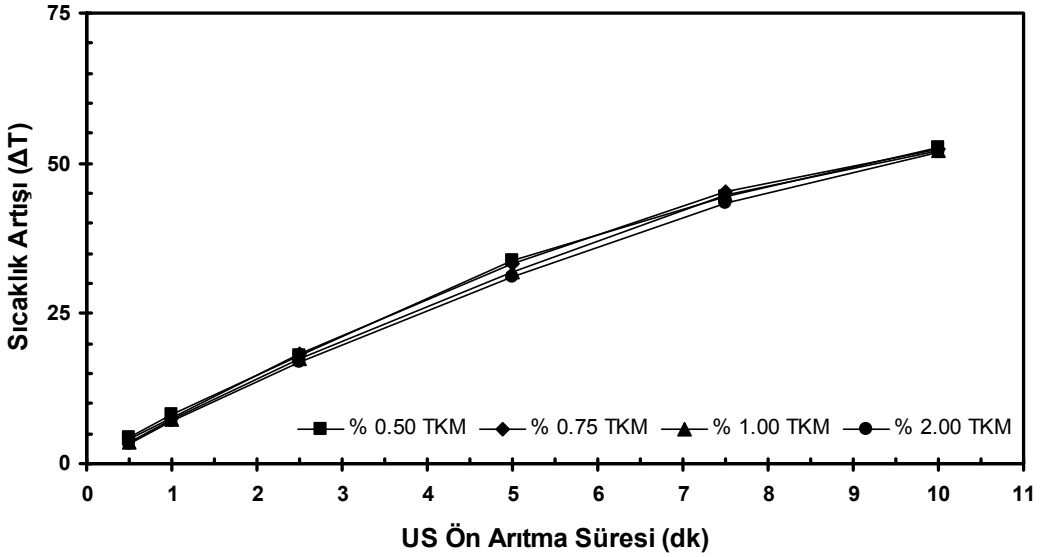
US ön arıtma süresince çamurun çökelebilme özelliği sürekli gelişmiştir (Şekil 4.10). Bu gelişme, Bölüm 4.1.1.4'de açıklanan nedenlerden kaynaklanmıştır. Ancak prob dalma derinliğindeki değişim, çamurun çökelebilirliğinde kayda değer bir değişime neden olmamıştır. Sonuçlar, Ek-1'de Çizelge E1.3'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Kısa süreli US ön arıtmada prob dalma derinliğin çamurun çökelebilme özelliğine etkisi.

4.1.2.2. Çamurun TKM içeriğinin etkisi

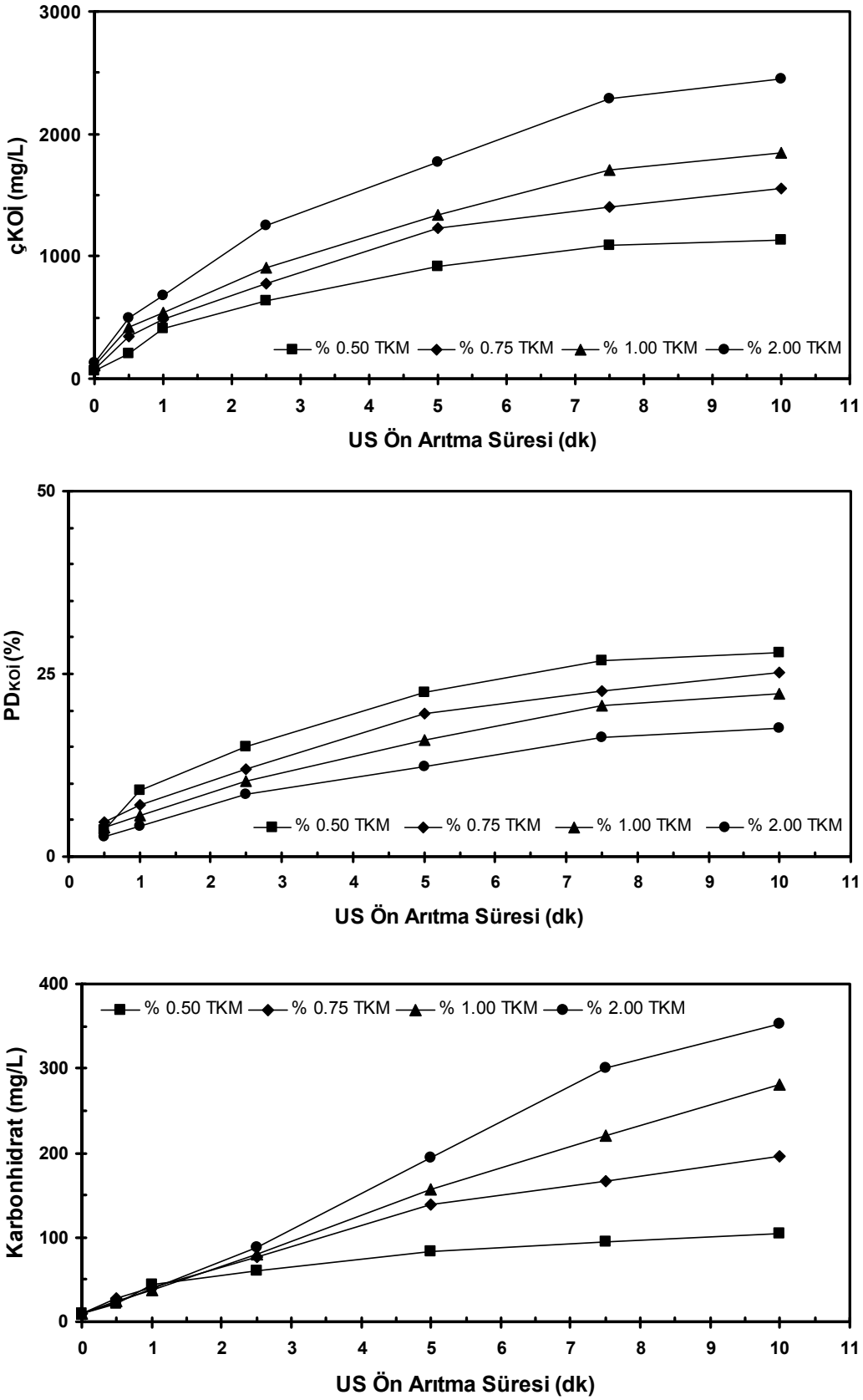
Kısa süreli US ön arıtmada çamurun TKM içeriğinin çamur parçalamaya ve çamur özelliklerine etkileri, % 0.50, 0.75, 1.00 ve 2.00 TKM içeriklerinde incelenmiştir ve deneysel sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.4'de sunulmuştur. Şekil 4.11'de gösterildiği gibi çamur yoğunluğundaki artış, kavitasyon sonucunda gerçekleşen sıcaklık artışında ihmal edilebilir bir farka neden olmuştur. Artan TKM içeriği ile sıcaklık artışının azalması, uygulanan US enerjinin tanecikler tarafından daha fazla adsorbe edilmesinden, taneciklere çarpan ses dalgaların daha fazla kırılıp yansımasından, katı maddelerin artan konsantrasyonunun daha fazla akustik gölge oluşturmasından ve çamurun artan viskozitesi ile ortamda yayılan ses dalgalarının enerjilerini daha fazla yitirmesinden kaynaklanmıştır (Abramov, 1998; Show ve ark., 2007).



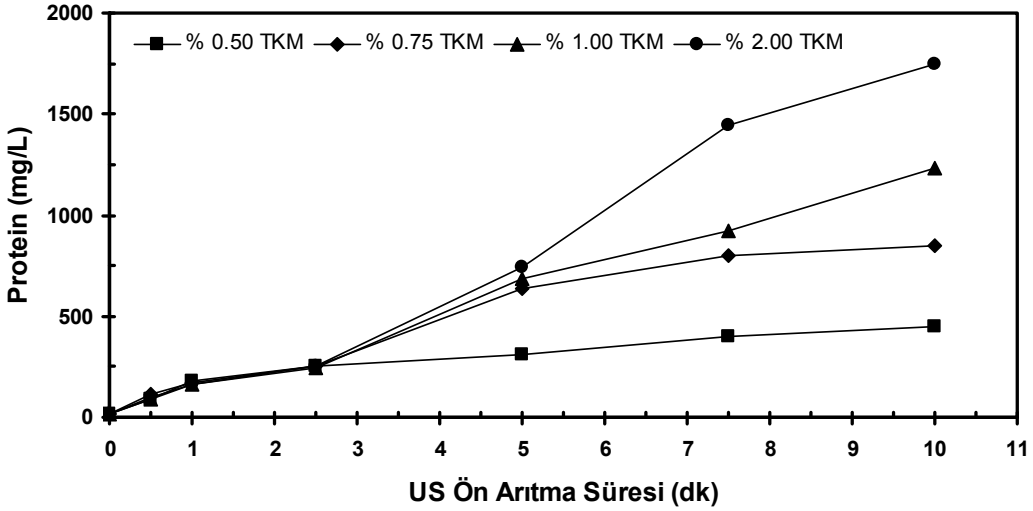
Şekil 4.11. Kısa süreli US ön arıtmada TKM içeriğinin sıcaklık artışına etkisi.

TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi

TKM içeriğinin etkisi çKOİ, $PD_{KOİ}$, karbonhidrat ve proteine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.12'de gösterilmiş ve Ek – 1'de Çizelge E1.4'de verilmiştir. Ayrıca Çamur yoğunluğundaki artışla, US ön arıtıma maruz bırakılan biyokütle miktarı da arttığı için çözünmüş fazdaki KOİ, karbonhidrat ve protein konsantrasyonları yükselmiştir. Ancak $PD_{KOİ}$ değerleri artmamış, aksine azalmıştır. Şekil 4.12'de de gösterildiği gibi, % 0.50, 0.75, 1.00 ve 2.00 TKM içeriklerinde ilk 2.5 dk'da elde edilen çKOİ konsantrasyonları sırasıyla 640, 775, 910 ve 1250 mg/L'ye ve 10 dk'lık US ön arıtma ile 1130, 1555, 1840 ve 2450 mg/L'ye yükselmiştir. $PD_{KOİ}$ değerleri ilk 2.5 dk'da % 15.1, 11.9, 10.4 ve 8.5, 10 dk'lık ön arıtmanın sonunda ise % 27.9, 25.2, 22.3 ve 17.5 olmuştur. Çamurun yoğunlaşması ile $PD_{KOİ}$'nin azalmasının esas nedeni, uygulanan US gücün artan konsantrasyonlardaki katı maddeleri parçalamak için yetersiz olması ve daha yüksek seviyede US enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır (Akın, 2008; Huan ve ark., 2009). Ayrıca çamurun viskozitesindeki artış ile US ses dalgalarının yayıldığı ortamda enerjilerinin daha fazla azalması, katı maddelerin US enerjiyi adsorplaması, katı maddelerin ses dalgalarını kırarak yansıtması ve taneciklerin akustik gölgeler oluşturması da $PD_{KOİ}$'deki azalışın diğer nedenlerdir (Abramov, 1998; Show ve ark., 2007). Sonuç olarak en yüksek $PD_{KOİ}$ değeri % 0.50 TKM içeriğinde elde edilmiş olmasına rağmen, arıtılacak çamur hacmini azaltmak için en uygun **TKM içeriği % 1.00 seçilmiş ve çalışmanın ileriki bölümleri % 1.00 TKM içeriğinde gerçekleştirilmiştir**.



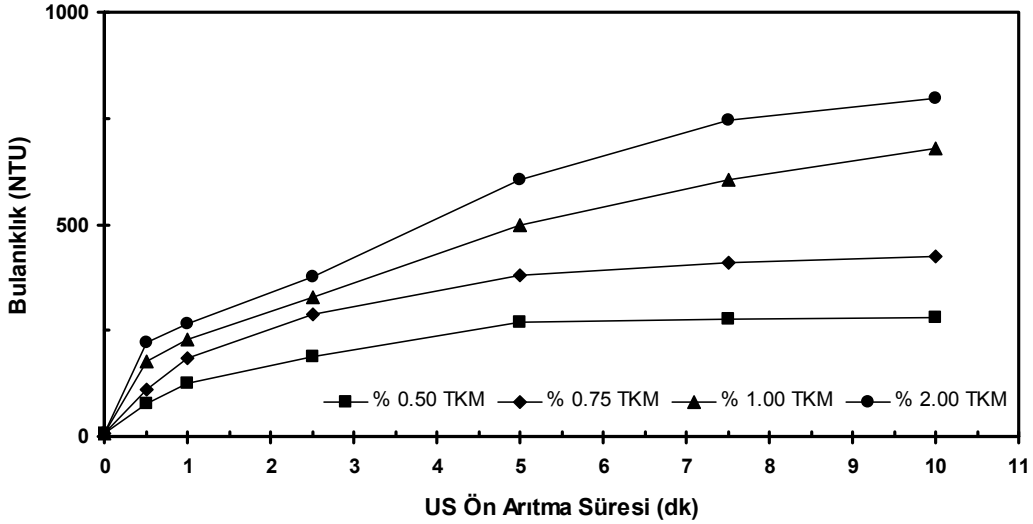
Şekil 4.12. Kısa süreli US ön arıtmada TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi.



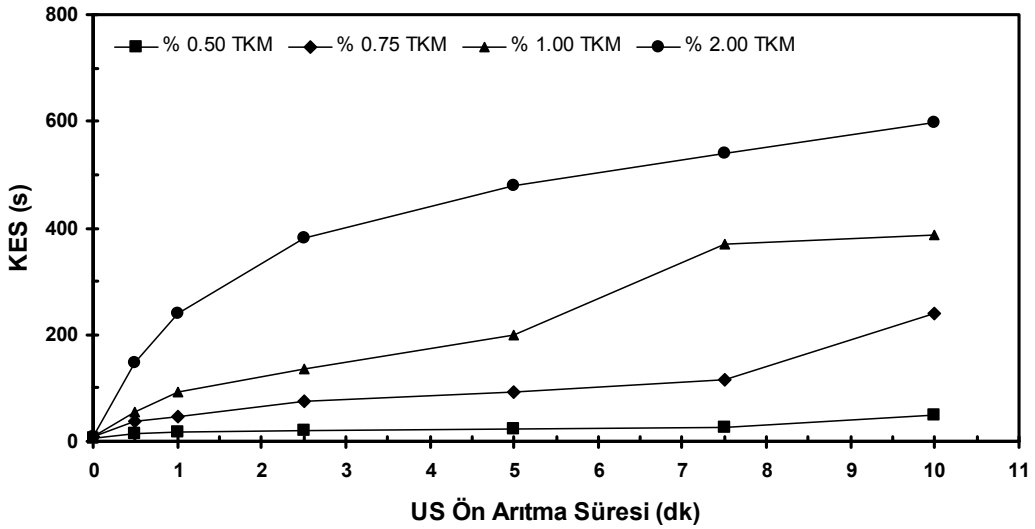
Şekil 4.12. Kısa süreli US ön arıtmada TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi (Devam).

TKM içeriğinin çamurun su verme özelliğine etkisi

Tanecik boyutundaki küçülme, çamurun su verme özelliğini kötüleştirdiği için bulanıklık parametresi çamurun su verme özelliği ile birlikte değerlendirilmiştir. Çamur yoğunluğuntaki artışa bağlı olarak, parçalanmış tanecik miktarı da artmış ve böylece bulanıklık değeri yükselmiştir. Ön arıtılmış çamurun KES değeri, bulanıklık parametresine benzer şekilde değişmiştir. Ön arıtılmış çamurun TKM içeriğindeki artış ile su verme özelliği, Bölüm 4.1.1.3'de değinilen nedenlerden dolayı kötüleşmiştir (Şekil 4.13). Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.4'de gösterilmiştir.



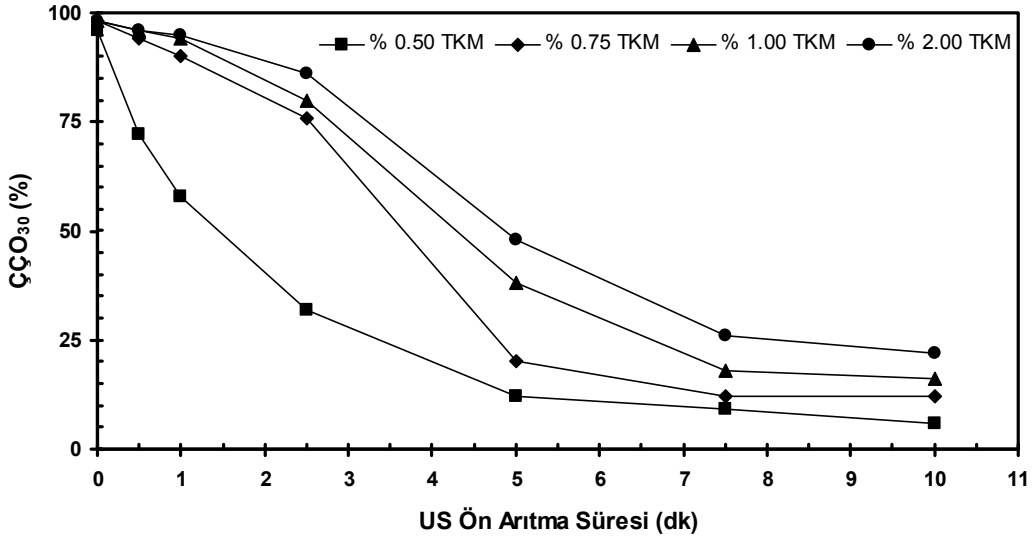
Şekil 4.13. Kısa süreli US ön arıtmada TKM içeriğinin çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi.



Şekil 4.13. Kısa süreli US ön arıtmada TKM içeriğinin çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi (Devam).

TKM içeriğinin çamurun çökelebilme özelliğine etkisi

Artan TKM içeriği ile çökelmiş çamur hacminin de arttığı belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.14'te gösterilmiş ve ayrıca Ek – 1'de Çizelge E1.4'de verilmiştir. Çamurun çökelebilme özelliği Bölüm 4.1.1.4'te değinilen nedenlerden dolayı iyileşmiştir.



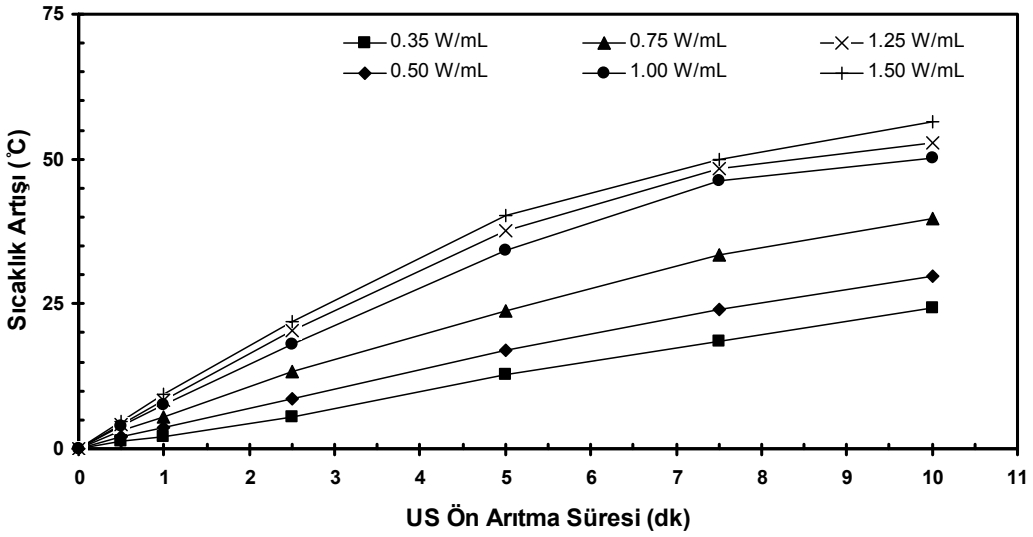
Şekil 4.14. Kısa süreli US ön arıtmada TKM içeriğinin çamurun çökelebilme özelliğine etkisi.

4.1.2.3. US yoğunluğun etkisi

Kısa süreli US ön arıtmada güç yoğunluğunun çamur parçalamaya ve özelliklerine etkilerini belirleyebilmek için deneyler, 10 dk'ya kadar değişen sürelerde ve 0.35, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 W/mL US yoğunluklarda gerçekleştirilmiştir.

US yoğunluğun sıcaklık artışına etkisi

US yoğunluktaki artış, akustik kavitasyonun daha etkili bir şekilde gerçekleşmesine ve böylece çamur sıcaklığının da daha fazla yükselmesine neden olmuştur (Şekil 4.15). Sıcaklık artışlarında görülen fark, artan US yoğunluklarda akustik kavitasyonun daha etkili gerçekleştiğini göstermektedir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.5'te verilmiştir.

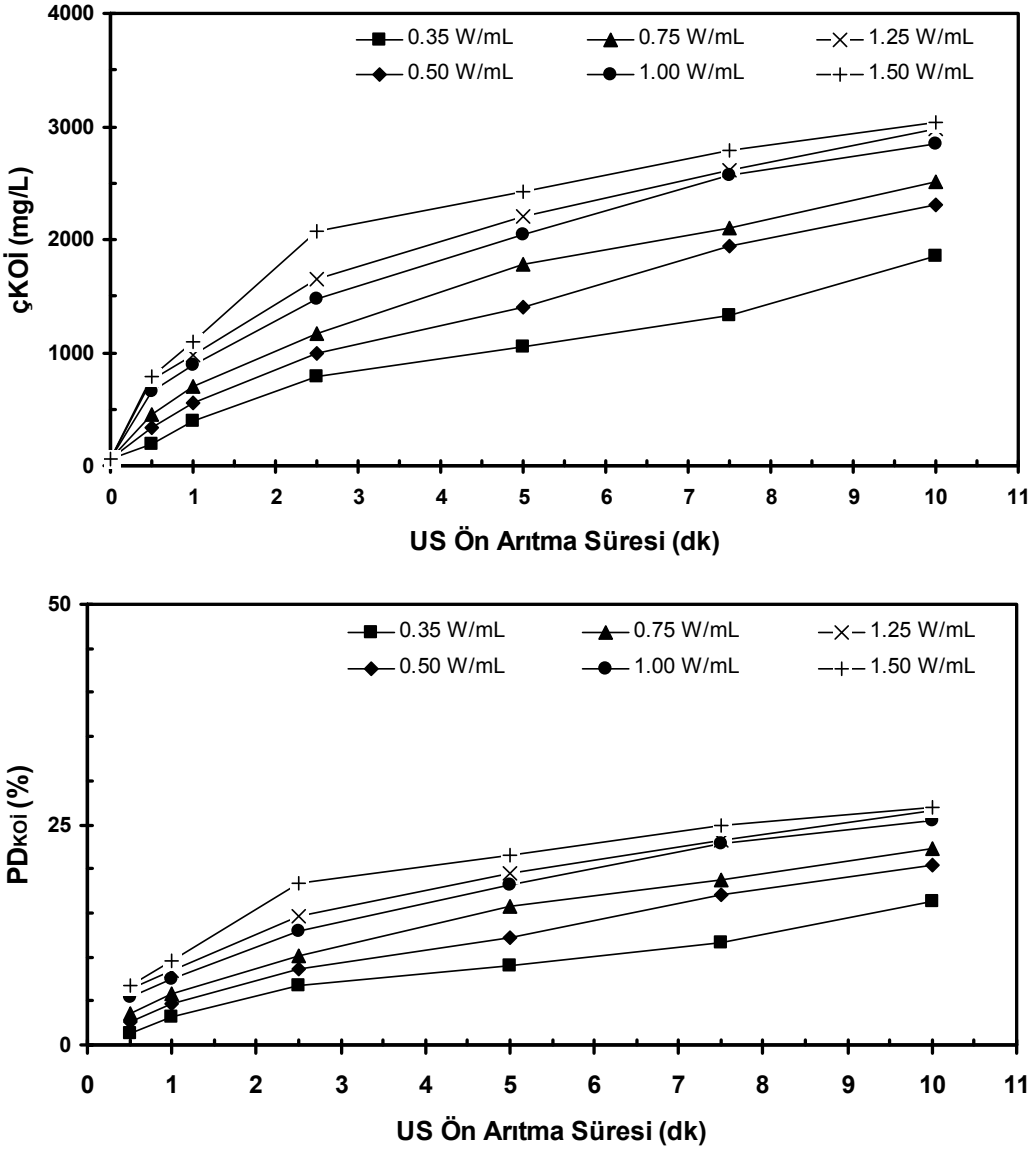


Şekil 4.15. Kısa süreli US ön arıtmada US yoğunluğun sıcaklık artışına etkisi.

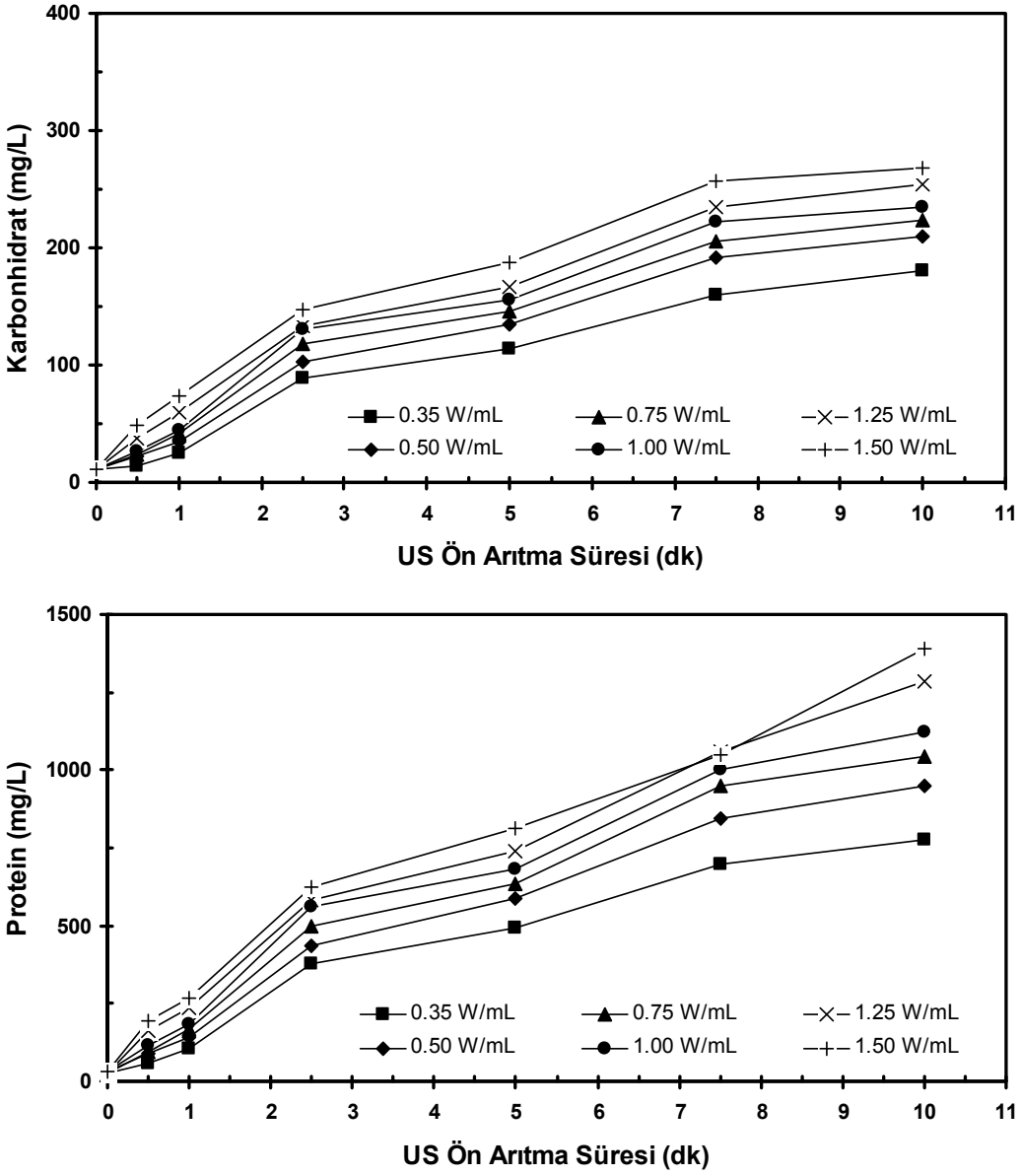
US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi

Uygulanan US yoğunluk, kavitasyon sonucunda üretilen kavitasyon kabarcıklarının miktarını ve kabarcıkların çöküşü sonucunda oluşan hidromekanik kesme kuvvetlerinin şiddetini belirleyen temel parametredir. Bu nedenle, US yoğunluğuktaki artış, çamurun parçalanmasını sürekli geliştirmiştir (Şekil 4.16). 0.35, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 W/mL US yoğunluklarda ilk 2.5 dk'da elde edilen $PD_{KOİ}$ değerleri, 10 dk'da ulaşılan değerlerin % 41.2, 42, 45.4, 50.8, 54.8 ve 67.9'u kadar olmuştur. $PD_{KOİ}$ değerlerinde gerçekleşen bu ani artış, US ışınım sonucunda

kavitasyonun hızla oluşmasından dolayı gerçekleşmiştir (Show ve ark., 2007). Çamurun parçalanma hızı, ön arıtma süresinin uzaması ile azalmıştır. Ayrıca düşük yoğunluklarda uzun sürelerde elde edilen parçalama verimlerine, US yoğunluğu arttırarak daha kısa sürelerde ulaşmanın mümkün olduğu da belirlenmiştir. Örneğin % 10'luk $PD_{KOİ}$'yi elde edebilmek için 0.35 W/mL'de yaklaşık 7 dk, 0.75 W/mL'de 2.5 dk ve 1.50 W/mL'de ise yaklaşık 1 dk'lık US ön arıtma yeterli olmuştur. Kısa sürelerde yüksek US yoğunluklarda ön arıtmanın gerçekleştirilmesi, çamur parçalama için daha düşük enerji sarfiyatını da mümkün kılmıştır. Deneysel sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.5'de sunulmuştur.



Şekil 4.16. Kısa süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi.



Şekil 4.16. Kısa süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi (Devam).

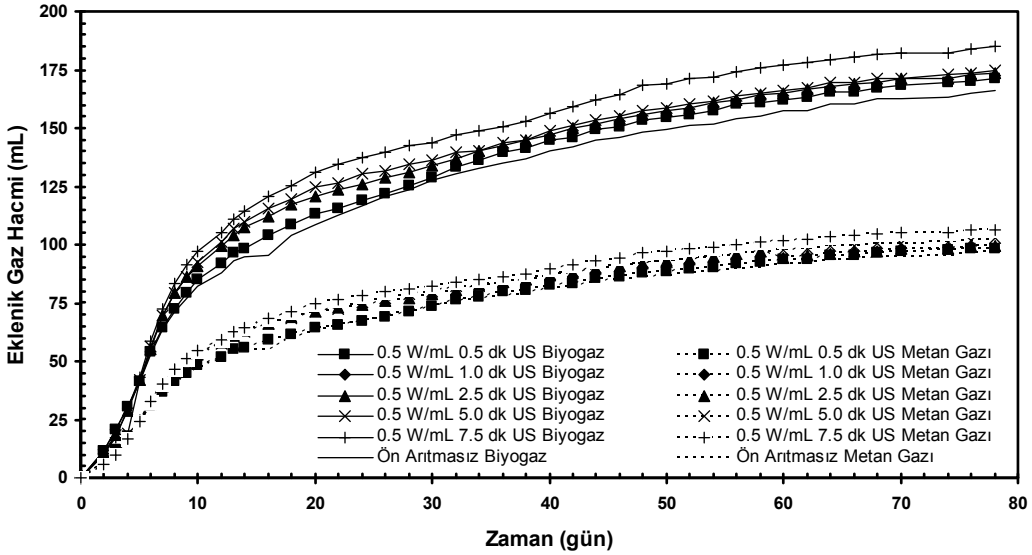
Çamurun kısa süreli US ön arıtımında, uygulanan US yoğunluk ve sürenin optimize edilebilmesi için Şekil 4.16'da gösterilen kimyasal parametrelere ilave olarak BMP testleri de yapılmıştır. Böylece çamuru parçalamak için sarf edilen enerji, metan üretiminde sağlanan artış ile kıyaslanarak süreç optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

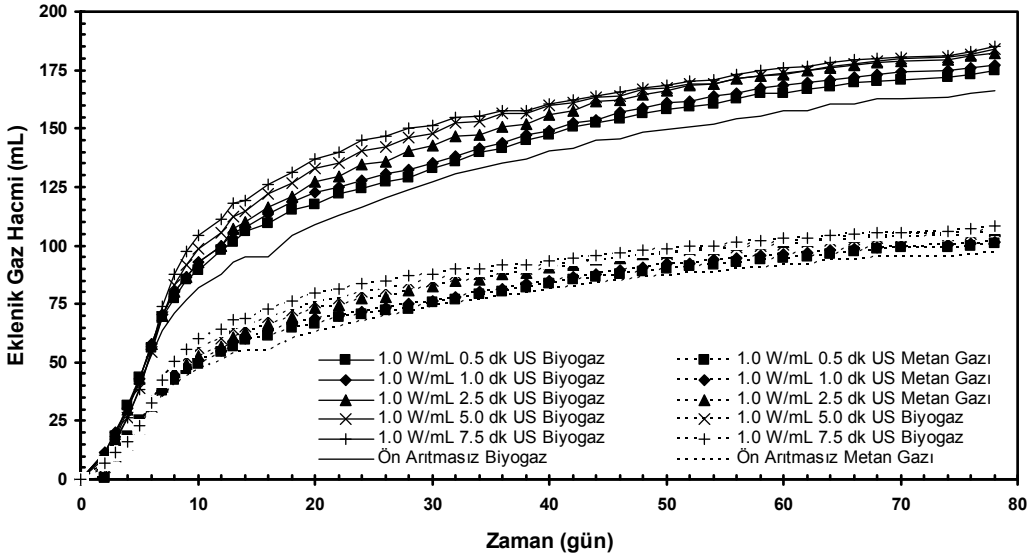
Kısa Süreli US ön arıtmanın biyogaz ve metan üretimine etkisi

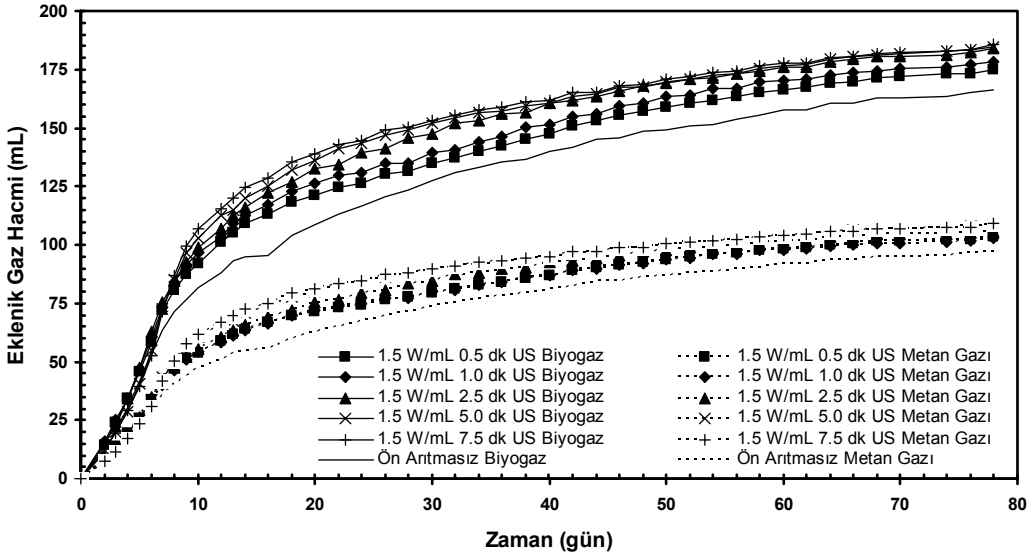
BMP testleri 0.50, 1.00 ve 1.50 W/mL US yoğunluklarda 7.5 dk'ya kadar değişen sürelerde US ön arıtmadan geçmiş AAÇ numuneleri için yapılmıştır. Bu şartlarda gerçekleştirilen US ön arıtmanın, biyogaz ve metan üretimine etkisi Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.6'da ve E1.7'de

sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, US ön arıtmada çamura uygulanan E_S değerinin artması, çamurun çözünürlüğünü geliştirmiş ve anaerobik çürütmenin ilk aşaması olan hidroliz, US ön arıtma ile fiziksel olarak gerçekleştirilmiştir. Böylece çamur, anaerobik çürütmede bakterilerin daha kolay ulaşabileceği forma dönüştürülmüştür (Pilli ve ark., 2011). Sonuç olarak Şekil 4.17'de gösterildiği gibi, Tiehm ve ark.'ın (2001) çalışmalarında buldukları sonuca benzer olarak, US yoğunluk ve uygulama süresindeki artış ile kesikli reaktörlerde üretilen biyogaz ve metan miktarı artmıştır. Çamur parçalamada sağlanan gelişme, Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, özellikle 1.00 W/mL US yoğunlukta biyogaz ve metan üretimini geliştirmiştir. US yoğunluğun 1.50 W/mL'ye yükselmesinin metan üretimindeki artışa etkisi 1.00 W/mL'ye kıyasla kayda değer olmamıştır. 0.50, 1.00 ve 1.50 W/mL güç yoğunluklarında 7.5 dk'da gerçekleştirilen ön arıtma sürecinde, 1 mL hacmindeki çamur için enerji sarfiyatları 3.75, 7.50 ve 11.25 W·dk olmuştur. Bu şartlarda metan üretimlerinde sağlanan artışlar ise sırasıyla % 10.01, 11.76 ve 12.49'dur (Çizelge 4.1). Böylece metan üretimindeki artışın, çamur çözünürlüğünde sağlanan artışla orantılı olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle enerji sarfiyatları dikkate alınarak süreç parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

US ön arıtma ile kesikli reaktörlerde çamurun çürütülmesi de geliştirilmiş ve tKOİ ve UKM giderimleri artmıştır (Çizelge 4.2). Sonuç olarak, en yüksek çamur parçalama verimi 1.00 W/mL US yoğunlukta ve 2.5 dk'lık sürede elde edilmemiş olmasına rağmen; Çizelge 4.2'de verilen enerji sarfiyatları ile metan üretimleri kıyaslandığı zaman **optimum şartların 1.00 W/mL US yoğunluk ve 2.5 dk'lık ön arıtma süresi olduğu belirlenmiştir.** Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.8'de gösterilmiştir.







Şekil 4.17. Kısa süreli US ön arıtmanın eklenik biyogaz ve metan üretimine etkisi.

Çizelge 4. 1. Birim hacimdeki çamura uygulanan US enerjinin toplam biyogaz ve metan üretimine etkisi.

US Yoğunluk (W/mL)	Ön Arıtma Süresi (dk)	Enerji Tüketimi (W·dk/mL)	Biyogaz Artışı (%)	Metan Artışı (%)
0.50	0.5	0.25	1.78	1.44
	1.0	0.50	3.07	1.65
	2.5	1.25	4.15	2.68
	5.0	2.50	5.35	5.98
	7.5	3.75	11.38	10.01
1.00	0.5	0.50	5.18	3.92
	1.0	1.00	6.74	4.85
	2.5	**2.50**	**9.81**	**10.22**
	5.0	5.00	10.60	9.49
	7.5	7.50	11.44	11.76
1.50	0.5	0.75	5.18	6.50
	1.0	1.50	7.47	5.99
	2.5	3.75	10.66	9.29
	5.0	7.50	11.20	12.18
	7.5	11.25	11.92	12.49

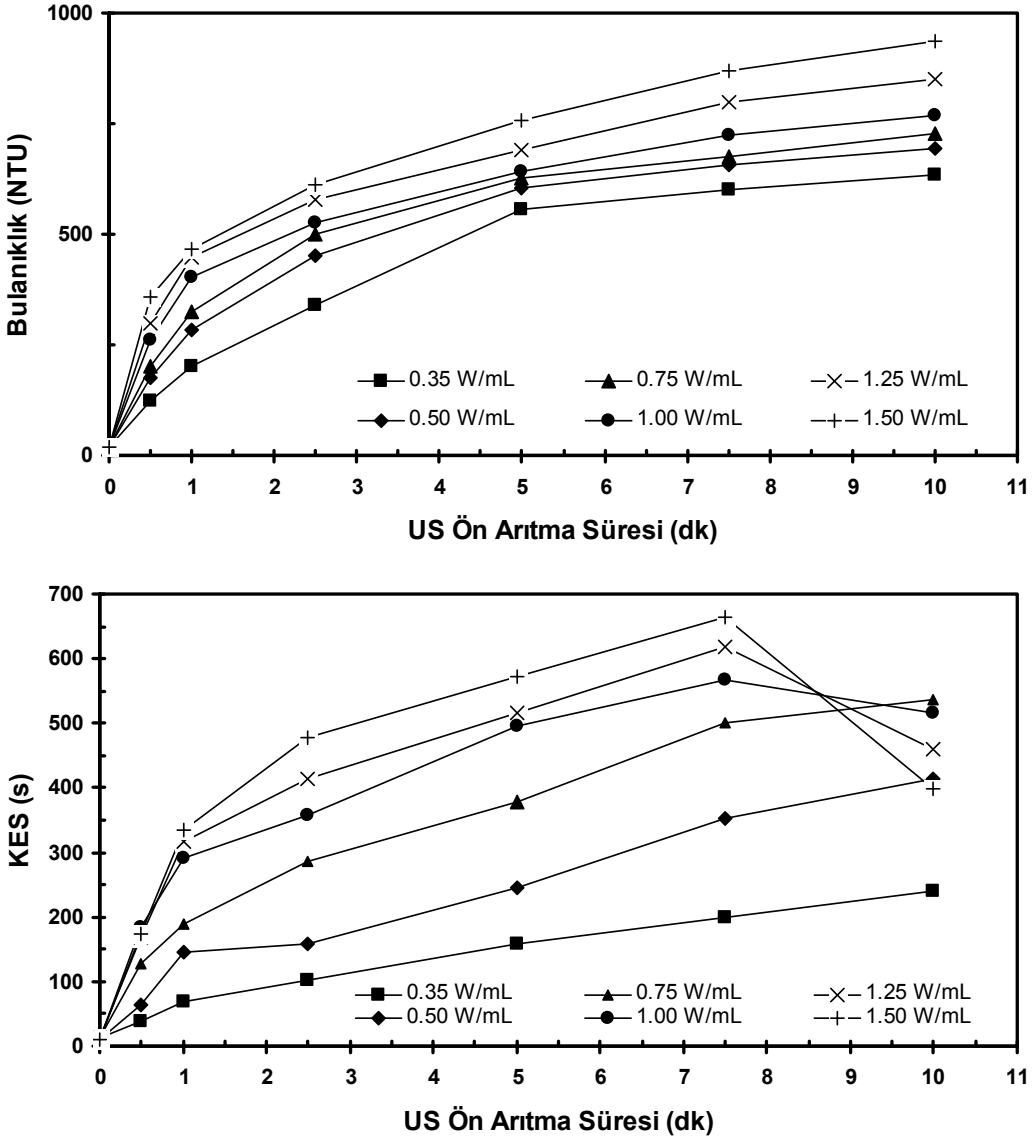
Çizelge 4.2. Kısa süreli US ön arıtmanın kesikli anerobik reaktörlerde tKOİ ve UKM giderimine etkisi.

	tKOİ (mg/L)	tKOİ Giderimi (%)	UKM (mg/L)	UKM Giderim (%)
Ham çamur	5275	34.6	5077	27.5
0.50 W/mL'de 0.5 dk US ön arıtma	5137	36.3	4893	30.1
0.50 W/mL'de 1.0 dk US ön arıtma	5035	37.6	4822	31.1
0.50 W/mL'de 2.5 dk US ön arıtma	4952	38.6	4692	33.0
0.50 W/mL'de 5.0 dk US ön arıtma	4887	39.4	4603	34.2
0.50 W/mL'de 7.5 dk US ön arıtma	4852	39.9	4532	35.3
1.00 W/mL'de 0.5 dk US ön arıtma	5097	36.8	4745	32.2
1.00 W/mL'de 1.0 dk US ön arıtma	4950	38.7	4693	33.0
1.00 W/mL'de 2.5 dk US ön arıtma	**4867**	**39.7**	**4645**	**33.6**
1.00 W/mL'de 5.0 dk US ön arıtma	4910	39.2	4468	36.2
1.00 W/mL'de 7.5 dk US ön arıtma	4870	39.7	4412	37.0
1.50 W/mL'de 0.5 dk US ön arıtma	4920	39.0	4625	33.9
1.50 W/mL'de 1.0 dk US ön arıtma	4890	39.4	4545	35.1
1.50 W/mL'de 2.5 dk US ön arıtma	4870	39.7	4487	35.9
1.50 W/mL'de 5.0 dk US ön arıtma	4820	40.3	4388	37.3
1.50 W/mL'de 7.5 dk US ön arıtma	4665	42.2	4338	38.0

Kısa Süreli US ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi

Çamurun su verme özelliği, bulanıklık verisi ile birlikte değerlendirilmiştir. Uygulanan US yoğunluğuktaki artışa bağlı olarak bulanıklıkta gerçekleşen artış (Şekil 4.18), çamur parçalamada sağlanan artışa benzerdir. Bulanıklık verisindeki artış, çamura uygulanan US enerjideki artış ile çamur parçalama veriminin arttığını ve tanecik boyutunun küçüldüğünü göstermektedir. Çamurun su verme özelliği, Bölüm 4.1.1.3'de

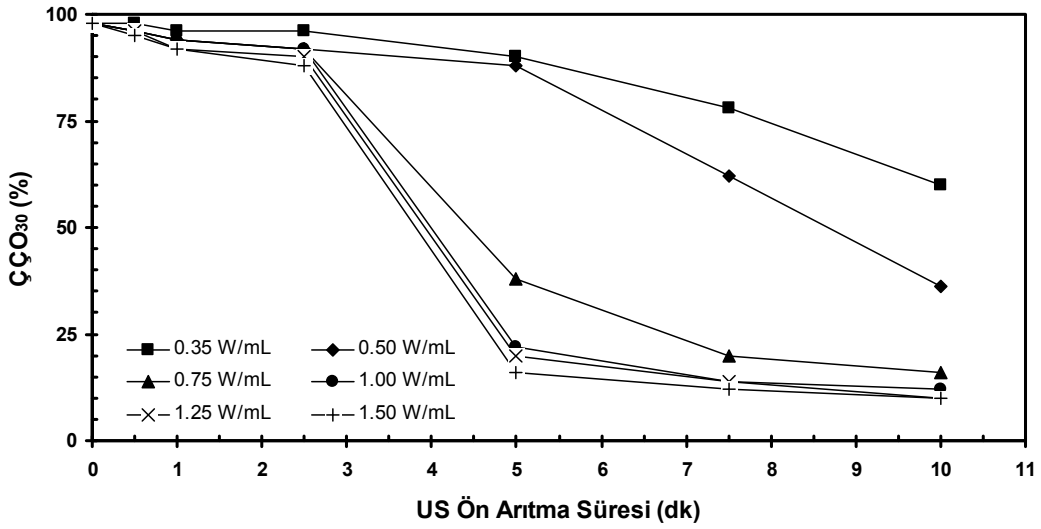
açıklanan nedenlerden dolayı kötüleşmiştir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.5'de sunulmuştur.



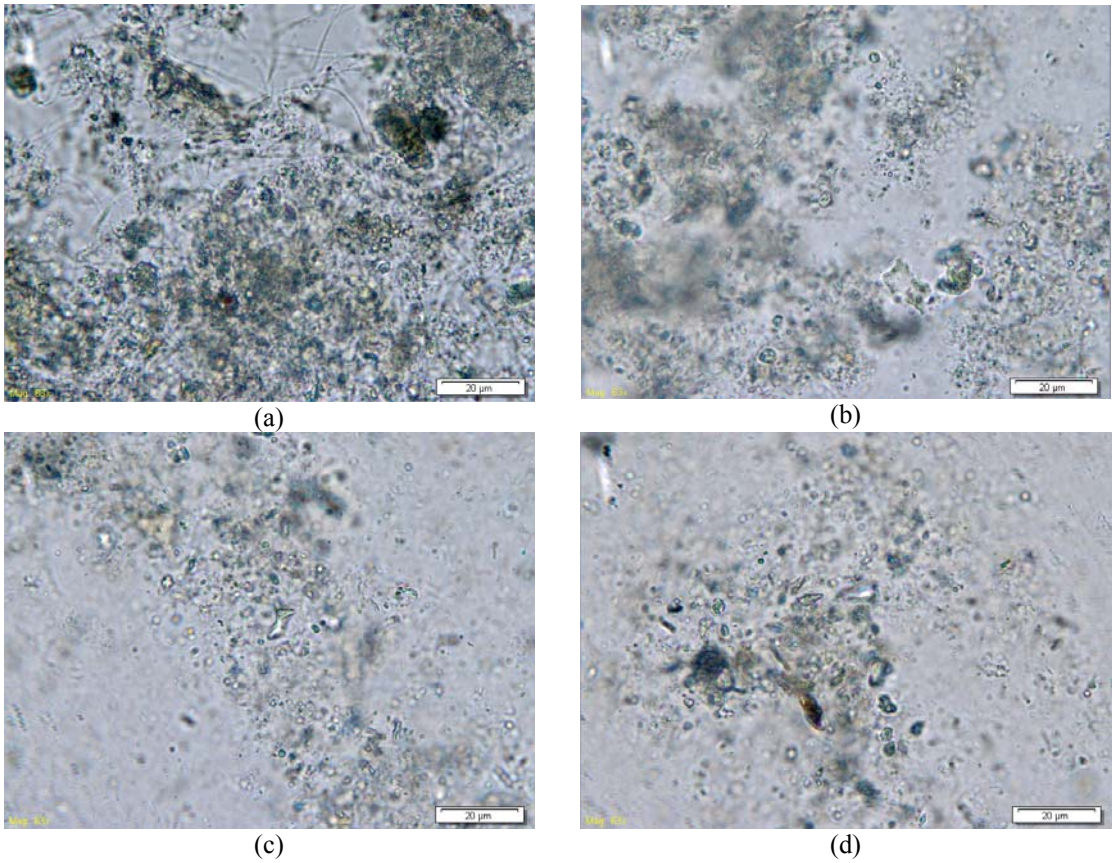
Şekil 4.18. Kısa süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi.

Kısa süreli US ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi

US yoğunluktaki artış çamurun çökelebilme özelliğinde sürekli bir iyileşmeye neden olmuştur (Şekil 4.19). Çamurun çökelebilme özelliğinde sağlanan bu gelişme Bölüm 4.1.1.4'de değinilen nedenlerden dolayı gerçekleşmiştir. Şekil 4.20'de ham ve ön arıtılmış çamur numunelerinin mikroskobik fotoğrafları sunulmuştur. Deneysel sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.5'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Kısa süreli US ön arıtmada US yoğunluğun çamurun çökelebilme özelliğine etkisi.



Şekil 4.20. US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi: (a) ham çamur, (b) 0.50, (c) 1.00 ve (d) 1.50 W/mL US yoğunluklarda 5.0 dk ön arıtılmış çamur numuneleri.

4.1.3. Akustik kavitasyonun mekanizmalarının etkileri

Çalışmanın bu bölümünde, ortam pH'ının ve US ışınım sonucunda sıvı ortamda gerçekleşen ve aynı zamanda akustik kavitasyonun mekanizmaları olan sıcaklık

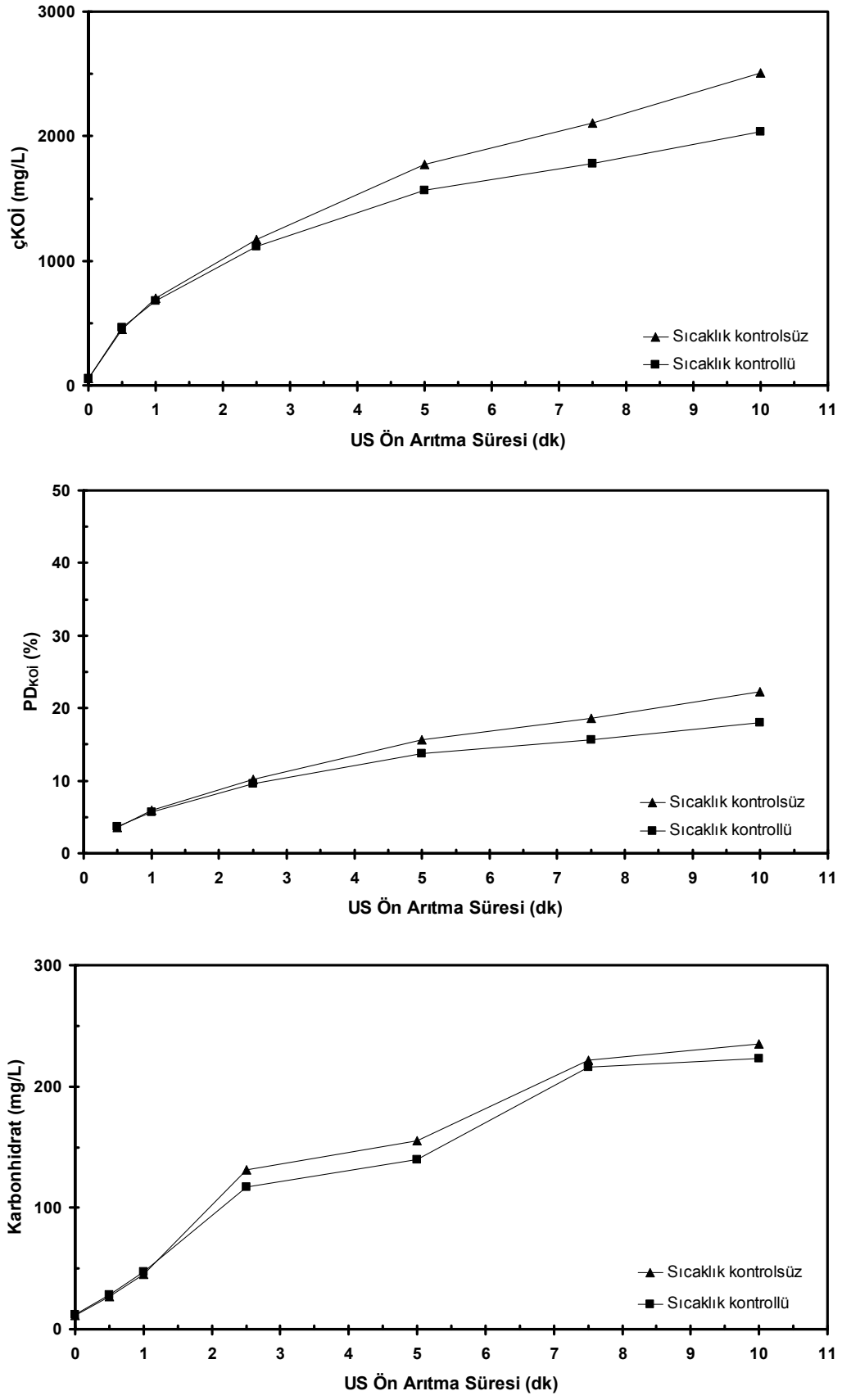
artışının ve oksitleyici radikallerin üretilmesinin çamur parçalamaya etkileri araştırılmıştır.

4.1.3.1. Sıcaklık artışının etkisi

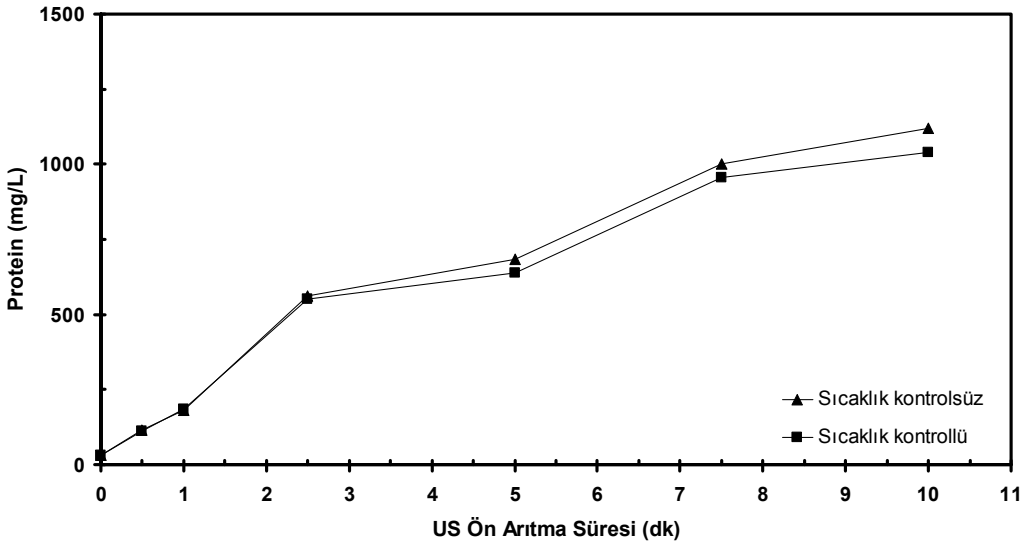
Uygulanan US ön arıtmanın gerçekleştirildiği şartlara bağlı olarak sıcaklık en fazla oda sıcaklığından yaklaşık 70 – 75℃'ye kadar artarak yaklaşık 50℃ yükselmiştir (Şekil 4.15). Sıcaklığın kontrol edilmediği durumda, 1 W/mL US yoğunlukta 0.5, 1, 2.5, 5, 7.5 ve 10 dk'lık ışınım sürelerinde sıcaklıktaki artış sırasıyla 4, 8, 18, 34, 46 ve 50℃ olmuştur. Aynı ön arıtma şartlarında sıcaklık kontrolünün yapıldığı durumda ise sıcaklık 0 – 10℃ aralığında sabit tutulmuştur. Bu bölümde kavitasyon sonucu gerçekleşen sıcaklık artışının, US ön arıtmadan geçmiş çamurun kimyasal ve fiziksel özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Sıcaklık artışının çamur parçalamaya etkisi

Şekil 4.21'de US ışınım uygulaması sonucunda gerçekleşen sıcaklık artışının çamur çözünürlüğüne katkısı gösterilmiştir. Artan sıcaklık, hücrelerin jel yapısını kırmış ve hücrelerin çözünürlüğünü arttırmıştır. Böylece, US ışınım süresince gerçekleşen sıcaklık artışı ile çamurun çözünürlüğü de gelişmiştir (Chu ve ark., 2001; Grönroos ve ark., 2005; Huan ve ark., 2009). Şekil 4.21'de görüldüğü gibi 0.5, 1.0 ve 2.5 dk'lık kısa sürelerde gerçekleşen sıcaklık artışının az olmasından dolayı, sıcaklık kontrollü ve kontrolsüz şartlarda çamur parçalama verimindeki farkın ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir. Ancak uzayan ön arıtma sürelerinde sıcaklığın daha fazla yükselmiş olması, sıcaklığın kontrol edilmediği şartlarda çamur çözünürlüğünün de daha fazla olmasına neden olmuştur. Uygulama süresinin uzaması sonucunda, $PD_{KOİ}$ değerleri arasındaki fark en fazla % 4.3 olmuştur. Bu artış, ön arıtma süresine ve US yoğunluğa bağlı olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, ön arıtma süresinde sıcaklık artışının çamurun çözünürlüğünü geliştirdiği, ancak bu etkinin sınırlı olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.9'da sunulmuştur.



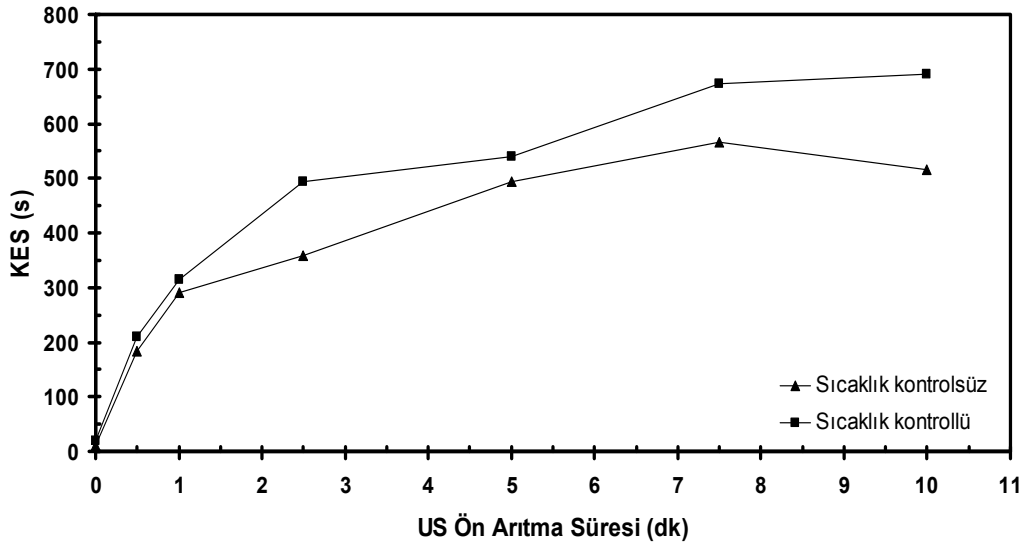
Şekil 4.21. Sıcaklık artışının US çamur parçalamaya etkisi.



Şekil 4.21. Sıcaklık artışının US çamur parçalamaya etkisi (Devam).

Sıcaklık artışının çamurun su verme özelliğine etkisi

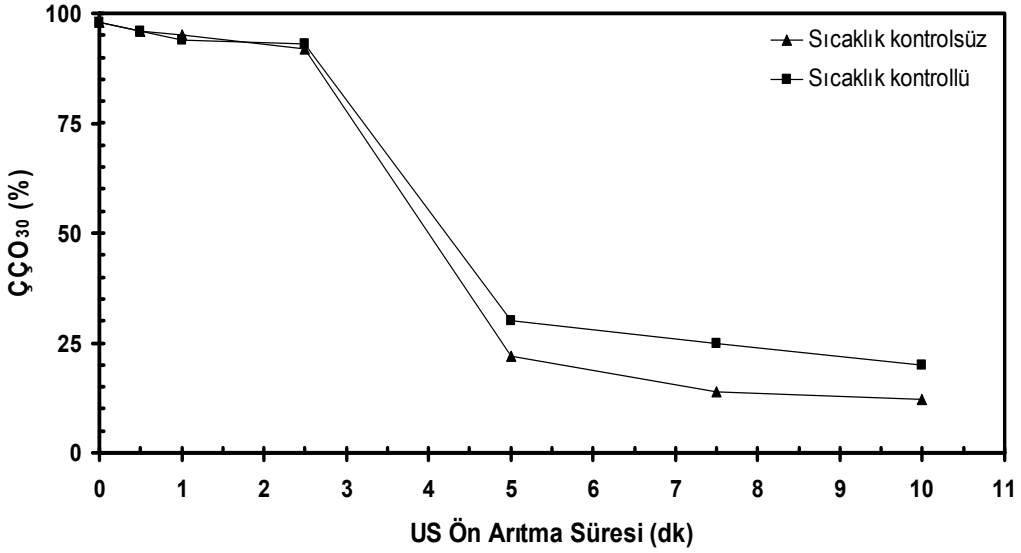
Artan sıcaklıkla, çamur floklarının matriks yapısı içinde tutulan suyun serbest bırakılmasından dolayı (Neyens ve Baeyens, 2003), çamurun su verme özelliği iyileşmiştir. Bu nedenle, Şekil 4.22'de gösterildiği gibi, sıcaklık kontrolünün yapılmadığı şartlarda, daha küçük KES değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.9'da verilmiştir.



Şekil 4.22. Sıcaklık artışının çamurun su verme özelliğine etkisi.

Sıcaklık artışının çamurun çökelebilme özelliğine etkisi

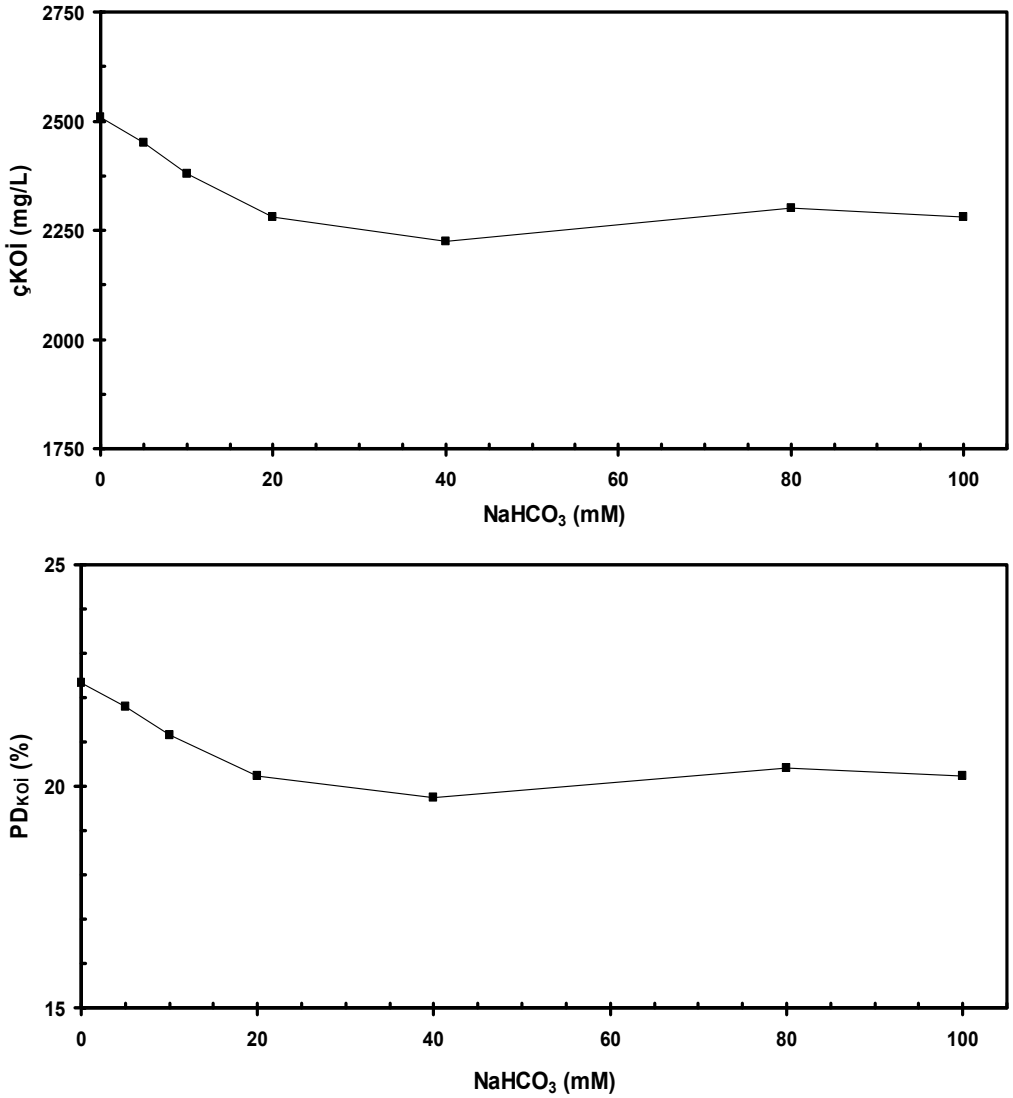
Şekil 4.23'de gösterildiği gibi, sıcaklığın kontrol edilmediği durumda daha düşük $ÇÇO_{30}$ değerleri okunmuş ve çamurun çökelebilirliği sıcaklık artışı ile sürekli gelişmiştir. Termal şartlandırmaya neden olan sıcaklık artışının, çamurun çökelebilme özelliğinde sınırlı etkisinin olduğu belirlenmiştir. Ek – 1'de Çizelge E1.9'da sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 4.23. Sıcaklık artışının çamurun çökelebilme özelliğine etkisi.

4.1.3.2. Oksitleyici radikallerin etkisi

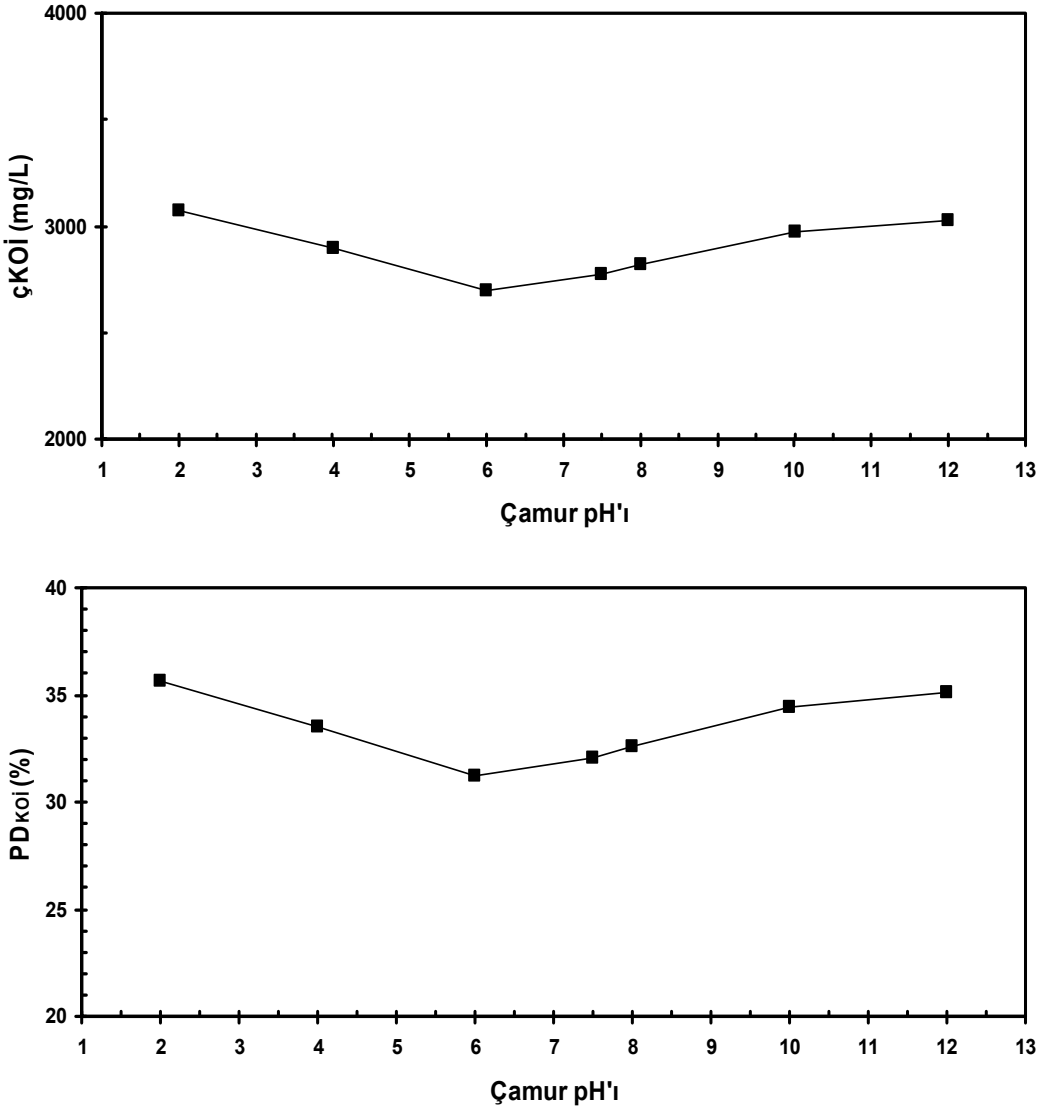
Akustik kavitasyon ile başta $OH^{\bullet}$ olmak üzere $H^{\bullet}$, $N^{\bullet}$ ve $O^{\bullet}$ gibi çeşitli oksitleyici radikaller üretilmektedir (Mason ve Lorimer, 2002). Oksitleyici radikalleri süpürerek, çamur parçalamaya oksitleyici radikallerin etkisini belirleyebilmek için 100 mM'a kadar değişen dozlarda $NaHCO_3$ kullanılmıştır. Şekil 4.24'te gösterildiği gibi, 40 mM'a kadar artan $NaHCO_3$ dozlarında çamur çözünürlüğü azalmıştır. Dozun daha fazla artmasının çKOİ ve $PD_{KOİ}$ üzerinde fazlaca etkisi olmamıştır. $PD_{KOİ}$, $NaHCO_3$'ün kullanılmadığı durumda % 22.3 iken, 40 mM $NaHCO_3$ kullanıldığında % 20.2 olmuştur. Sonuç olarak akustik kavitasyon ile üretilen oksitleyici radikallerin, çamurun parçalanmasında sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, Wang ve ark.'ın (2005) çalışmalarında buldukları sonuçla uyumludur. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.10'da verilmiştir.



Şekil 4.24. US ışınımın ürettiği oksitleyici radikallerin çamur parçalamaya etkisi.

4.1.3.3. Çamur pH'ının etkisi

Ortam pH'ının US çamur parçalamaya etkisi, pH 2, 4, 6, 8, 10, 12 ve çamurun orijinal pH'ında (7.50 - 7.60 aralığında) incelenmiştir. Şekil 4.25'de gösterildiği gibi, pH'daki aşırı düşüş ve yükselme çamurun çözünürlüğünde artışa neden olmuştur. Çamurun orijinal pH değerinde % 31.1 olan $PD_{KOİ}$ değeri, pH 2 ve 12'de % 35.6 ve 35.1 olmuştur. Böylece çamur pH'ının kısa süreli US ön arıtmanın çamur parçalama verimi üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.11'de sunulmuştur.



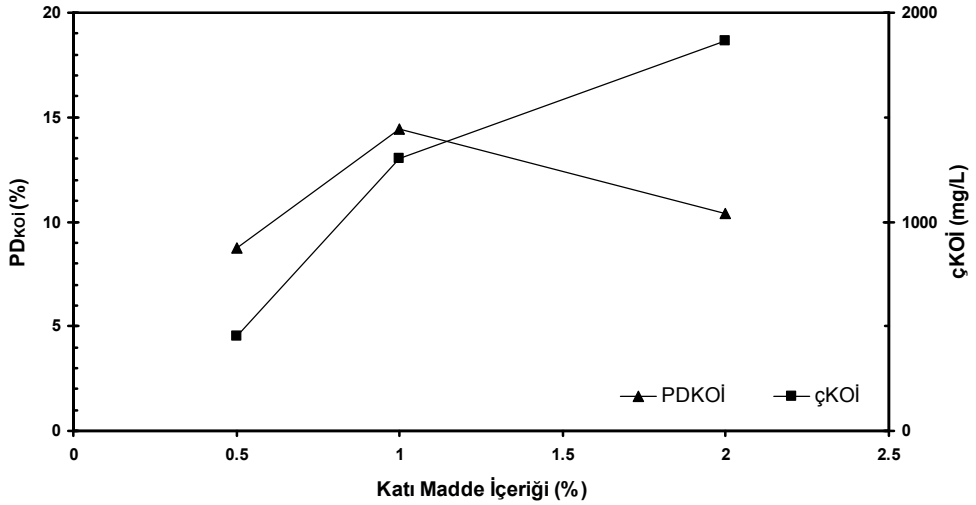
Şekil 4.25. Çamur pH'ının çamur parçalamaya etkisi.

4.2. Alkali Ön Arıtma

4.2.1. TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi

Çamurun TKM içeriğinin alkali ön arıtmada çamur parçalamaya etkisi, çKOİ ve $PD_{KOİ}$ parametreleri dikkate alınarak 0.05 N NaOH dozunda ve 0.5 saatlik ön arıtma süresinde % 0.50, 1.00 ve 2.00 TKM içeriklerinde incelenmiştir. Şekil 4.26'dan anlaşılacağı gibi, çamurun katı madde içeriği arttıkça katı fazdan sıvı faza geçen KOİ konsantrasyonu da artmıştır. Çamurun % 0.50'den % 1.00 TKM içeriğine yoğunlaştırılması ile çKOİ 450 mg/L'den 1300 mg/L'ye yükselmiştir. TKM içeriğinin % 2.00'ye yükselmesi ile çKOİ konsantrasyonu 1865 mg/L olmuştur. çKOİ'de gerçekleşen bu artışa rağmen; $PD_{KOİ}$, çKOİ'nin aksine, sürekli artmamıştır. Çamurun %

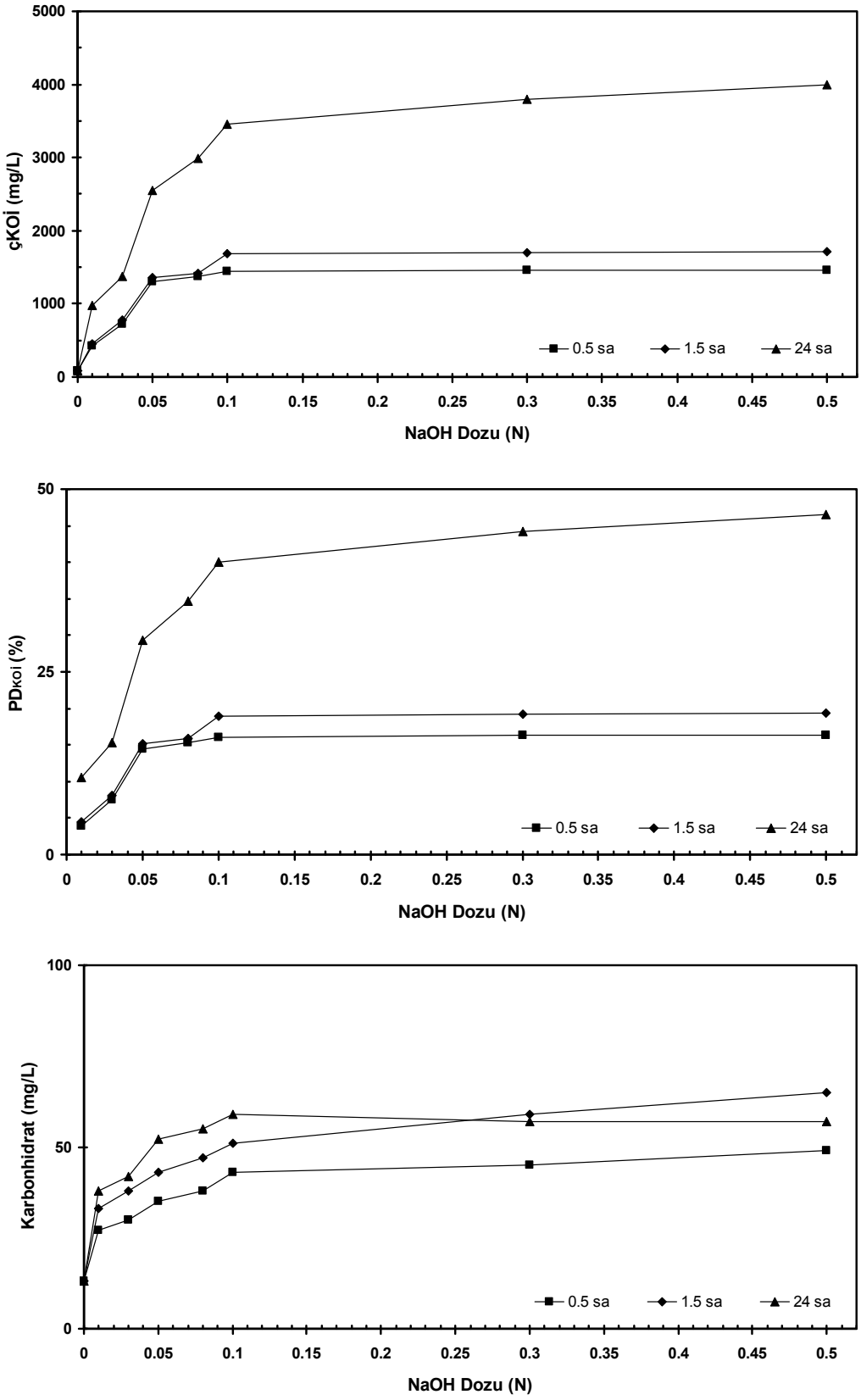
0.50'den % 1.00 TKM içeriğine yoğunlaştırılması ile $PD_{KOİ}$ % 8.8'den % 14.2'ye yükselmiştir. Ama çamurun % 2.00 TKM içeriğine yoğunlaştırılması sonucunda ise $PD_{KOİ}$ % 10.4'e düşmüştür. Bu sonuç, yoğunlaşan çamuru parçalayabilmek için uygulanan NaOH dozunun yetersiz olmasından ve sisteme ilave NaOH gerekmesinden kaynaklanmıştır. Ayrıca çamurun TKM içeriği ile çKOİ ve $PD_{KOİ}$ değerlerinin artışı arasında bir ilişki bulunmadığı da belirlenmiştir. Bu sonuç, Lin ve ark. (1998) çalışmalarında elde ettikleri sonuca benzerdir. Sonuç olarak, TKM içeriğinin çamur çözünürlüğünü etkileyen önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. **Alkali ön arıtma için % 1.00 TKM içeriğinin uygun olduğu belirlenmiştir.** Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.12'de verilmiştir.



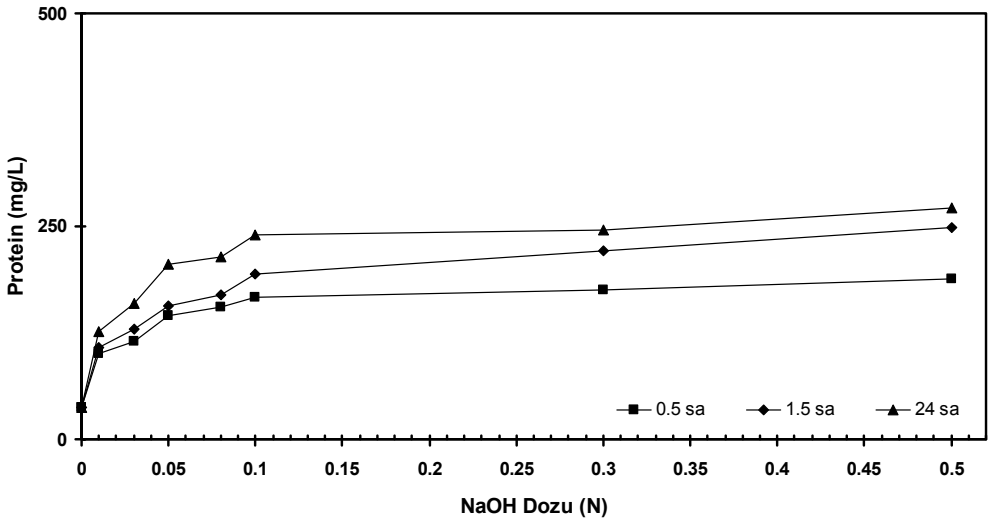
Şekil 4.26. Alkali ön arıtmada çamurun TKM içeriğinin çamur parçalamaya etkisi.

4.2.2. Alkali dozunun çamur parçalamaya etkisi

Uygulanan NaOH dozunun çamur parçalamaya etkisi çKOİ, karbonhidrat, protein ve $PD_{KOİ}$'deki artışa bağlı olarak değerlendirilmiştir. Değişen NaOH dozlarında, çözünmüş KOİ, karbonhidrat ve protein konsantrasyonlarındaki değişim Şekil 4.27'de gösterilmiştir. NaOH dozu ve ön arıtma süresindeki artış, dağılan floklardan EPS ve parçalanan hücrelerden hücre içi bileşenlerin daha fazla sıvı faza geçmesine neden olmuştur. Ek – 1'de Çizelge E1.13'de sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 4.27. Alkali ön arıtmada alkali dozunun çamur parçalamaya etkisi.



Şekil 4.27. Alkali ön arıtmada alkali dozunun çamur parçalamaya etkisi (Devam).

0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.10, 0.30 ve 0.50 N NaOH ile ön arıtılmış çamur numunelerinin son pH değerleri, çamurun orijinal pH değeri olan 7.5'den 8.7, 9.7, 12.1, 12.4, 12.6, 12.7 ve 12.9'a yükselmiştir. 0.10 N'lik NaOH dozu, çamur pH'nın aşırı yükselmesine sebep olmuş ve artan dozlarda pH'da önemli bir değişim gerçekleşmemiştir. Alkali ön arıtmanın verimi ortam pH'ına bağlı olduğu için, uygulanan NaOH dozundaki artış ile ortam pH'ı da yükselmiş ve sonuçta çamur parçalama verimi Şekil 4.27'de gösterildiği gibi artmıştır. 0.1 N'in üzerindeki dozlarda ise, çözünmüş KOİ, karbonhidrat ve proteindeki artış uygulanan dozdaki artış ile kıyaslandığında, çamurun parçalama veriminde kayda değer bir yükselmeye neden olmamıştır. Öte yandan, ön arıtılmış çamurda çözünmüş karbonhidrat konsantrasyonu 0.30 ve 0.50 N NaOH dozlarında azalmıştır. Bu azalma, yüksek alkali dozlarında ve uzun ön arıtma sürelerinde karbonhidratın bir kısmının hirolize olmasından kaynaklanmıştır. Böylece artan NaOH dozunun parçalama verimini arttırmamasına ilave olarak organik maddeleri hidrolize etmesi de yüksek dozda alkali uygulamasının dezajantajı olarak ortaya çıkmıştır.

NaOH dozu ve uygulama süresindeki artış ile $PD_{KOİ}$ değerleri yükselmiştir (Şekil 4.27). 0.01 ve 0.03 N'lik NaOH dozlarında $PD_{KOİ}$ 0.5 saatte % 3.9 ve 7.5; 1.5 saatte % 4.4 ve 8.2 olmuştur. NaOH dozu 0.10N'ye yükseldiğinde ise 0.5 ve 1.5 saatlik sürelerde $PD_{KOİ}$ % 16.1 ve 18.9'a yükselmiştir. 0.50 N NaOH dozunda 0.5 ve 1.5 saatte $PD_{KOİ}$ ihmal edilebilir derecede artarak % 16.3 ve 19.4 olmuştur. Ön arıtma süresinin 24 saate uzatılması ile $PD_{KOİ}$ 0.10 N NaOH dozunda % 40.0, 0.50 N dozunda ise % 46.6 olmuştur. Böylece alkali ön arıtmanın ilk 0.5 saatinde çözünmüş fazdaki KOİ, karbonhidrat ve protein konsantrasyonlarındaki artışın hızla gerçekleştiği belirlenmiştir.

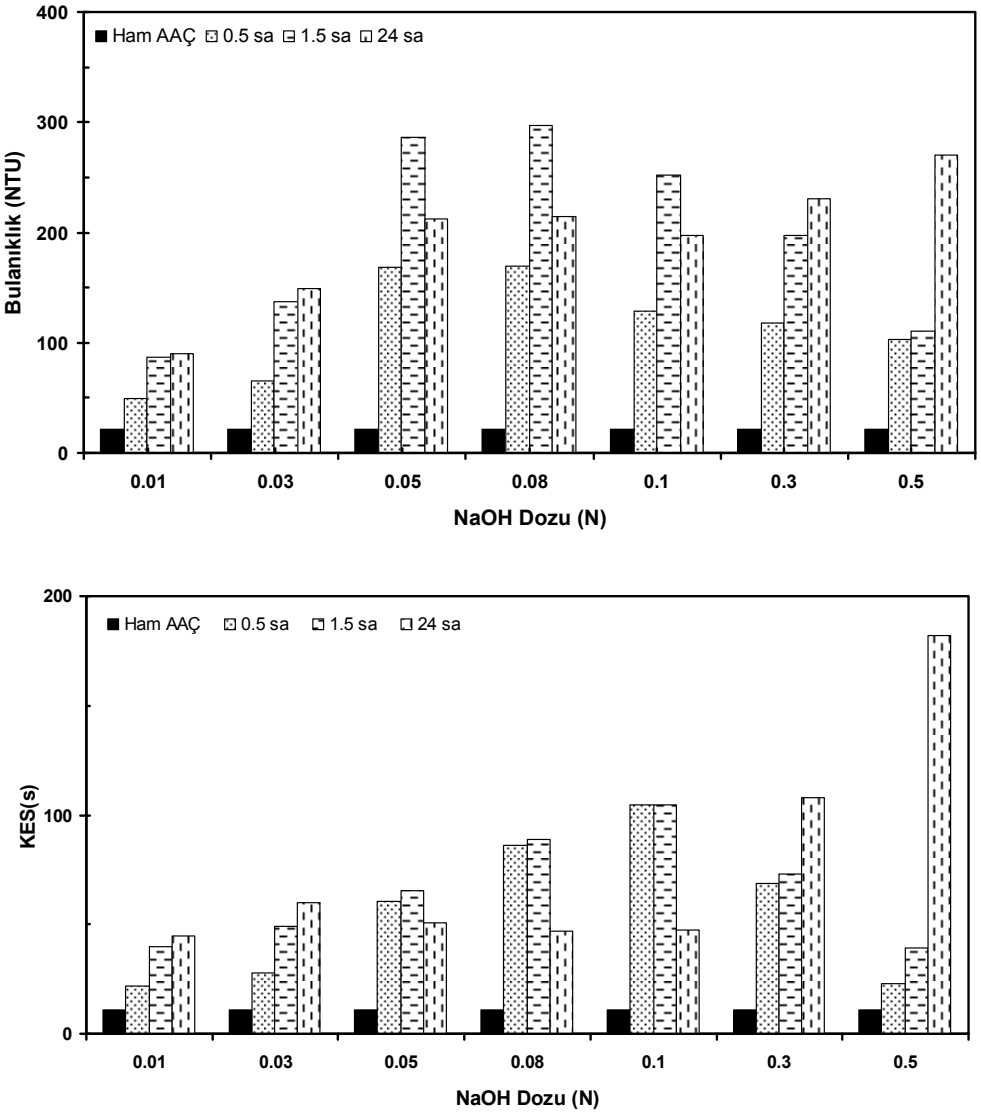
Benzer olarak, Li ve ark. (2008) alkali ön arıtmada çamur parçalamanın ilk yarım saatte hızla gerçekleştiğini, ancak çamur parçalama hızının zamanla azaldığını ifade etmişlerdir. Farklı dozlarda ilk 0.5 saatte ulaşılan çamur parçalama verimleri, 24 saatte elde edilen $PD_{KOİ}$ değerlerinin % 36.4 – 52.0'si kadar olmuştur. Böylece **alkali ön arıtma için 0.5 saat, en uygun süre seçilmiştir**. Benzer bir çalışmada, Li ve ark. (2008)'nın NaOH ile çamur parçalama üzerine yaptıkları çalışmada sadece çKOİ'deki artışı dikkate alarak optimum ön arıtma süresini 0.5 saat ve alkali dozunu ise 0.05 N olarak belirlemişlerdir. Ancak bu çalışmada, çKOİ ve $PD_{KOİ}$'ye ilave olarak, çözünmüş karbonhidrat ve protein konsantrasyonundaki artış da dikkate alınmıştır. Bu sonuçlara göre, **optimum NaOH dozunun 0.10 N olduğu belirlenmiştir.**

4.2.3. Alkali ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi

Bu bölümde tanecik büyüklüğündeki değişimin bir göstergesi olan bulanıklık, çamurun su verme özelliği ile birlikte değerlendirilmiştir. 0.5 ve 1.5 saatlik ön arıtma sürelerinde 0.01 – 0.10 N aralığında artan NaOH dozlarında çamurun tanecik boyutunun küçülmesi sonucunda bulanıklık artmıştır (Şekil 4.28). 0.08 ve 0.10 N NaOH dozlarında ise 24 saatlik ön arıtmada, küçülen taneciklerin tekrar floküle olması sonucunda bulanıklık azaltmıştır (Erdincler ve Vesilind, 2000). 0.10 N ve artan dozlarda 0.5 ve 1.5 saatlik ön arıtma sonucunda, bulanıklık dağılan floklardan kopan taneciklerin tekrar yumaklaşması neticesinde azalmıştır. Taneciklerin tekrar floküle olmasında, çözünmüş organik maddelerin jelimsi bir yapı üretmesi etkilidir. Bu jelimsi yapı, su ve ince tanecikleri bir araya getirerek floklaştırmakta ve bir arada tutmaktadır (Li ve ark., 2008). Böylece oluşan jel yapısı ile partikül büyüklüğü artmış ve bulanıklık azalmıştır. Ancak, 0.30 ve 0.50 N alkali dozlarında 24 saatlik ön arıtmada, jel yapısı bozulduğu için oluşan floklar dağılmış ve bulanıklık yine yükselmiştir. Böylece seçilen 0.05 N NaOH dozunda ön arıtma süresinin uzaması, küçülen taneciklerin tekrar floküle olmasına neden olarak çamurun parçalanmasına olumsuz etki etmiştir.

Alkali ön arıtmanın bir sonucu olarak KES değerleri de bulanıklığa benzer şekilde değişmiş ve çamurun su verme özelliği ham çamura kıyasla kötüleşmiştir. Şekil 4.28'de gösterildiği gibi, ön arıtılmış çamurun su verme özelliği 0.01 – 0.10 N NaOH aralığındaki dozlarda 0.5 ve 1.5 saatlik sürelerde kötüleşmiştir. Çamurun su verme özelliğindeki kötüleşme, çamurun parçalanması sonucunda tanecik boyutundaki küçülmeden kaynaklanmıştır. 0.05 – 0.10 N NaOH dozlarında ve 24 saatlik sürede ise

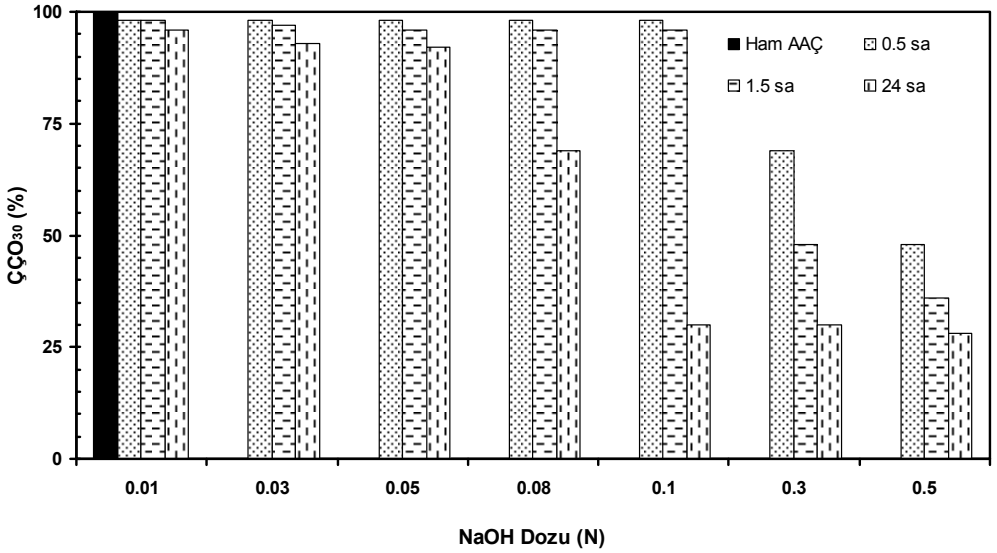
parçalanmış organik maddelerin tekrar floküle olmasından dolayı çamurun su verme özelliği biraz iyileşmiştir (Li ve ark., 2008). Daha düşük dozlarda ulaşılan değerlere kıyasla, 0.10 ve 0.50 N NaOH dozlarında 0.5 ve 1.5 saat ön arıtılmış çamurun su verme özelliğindeki iyileşme, parçalanmış çamur taneciklerinin jel yapı içinde bir araya gelmelerinden kaynaklanmıştır. Ancak, Şekil 4.28'de gösterildiği gibi, aşırı yüksek pH'da 24 saatlik alkali ön arıtma jel yapısını çözdüğü için hem tanecik boyutunu küçülttüğü hem de EPS salınımı arttırdığı için çamurun su verme özelliğini olumsuz etkilemiştir (Li ve ark., 2008). Ayrıca tanecik boyutundaki küçülme ile floklar üzerinde suyun adsorplanabileceği alan da genişlemiş (Wang ve ark., 2006a), böylece suyun bir kısmı tanecik yüzeyine absorplanarak çamurun su verme özelliğini kötüleştirmiştir. Deneysel sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.13'de verilmiştir.



Şekil 4.28. Alkali ön arıtmanın çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi.

4.2.4. Alkali ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi

Alkali ön arıtma, Şekil 4.29'da gösterildiği gibi çamurun çökelebilirliğinde iyileşmeye neden olmuştur. Çamurun çökelebilirlik özelliğindeki bu iyileşme, 2 nedenden kaynaklanmıştır: (1) hücreleri fiziksel olarak bağlayan ve yüzey yüklerini indirgeyen EPS'nin salınımı ve (2) filamentli mikroorganizmaların parçalanması. Neyens ve Baeyens (2003), biyoflokülasyonda hücrelerin yüzey yükünü azaltmak ve hücreleri fiziksel olarak bağlayabilmek için biyopolimerlerin etkili olduklarını belirtmişlerdir. Buna benzer şekilde alkali ön arıtma sonucunda çamurun çökelebilme özelliği, EPS salınımı ile birlikte gelişmiştir. Ayrıca, alkali ön arıtma süresi uzadıkça ve alkali dozu arttıkça, ön arıtmadan geçmiş çamurdaki filamentli mikroorganizmaların parçalandığı belirlenmiştir. Bu iki nedene ilave olarak, özellikle yüksek dozlardaki alkali ön arıtmada, AAÇ'nin süreç sonunda nötralizasyonu sırasında termal reaksiyon sonucunda gerçekleşen sıcaklık artışı da ısıl şartlandırma ile çamurun çökelebilirliğinin gelişmesine neden olmuş olabilir. Bu nedenlerle, çamurun çökelebilirliği kullanılan NaOH dozunun artması ve ön arıtma süresinin uzaması ile sürekli gelişmiştir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.13'de verilmiştir.



Şekil 4.29. Alkali ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi.

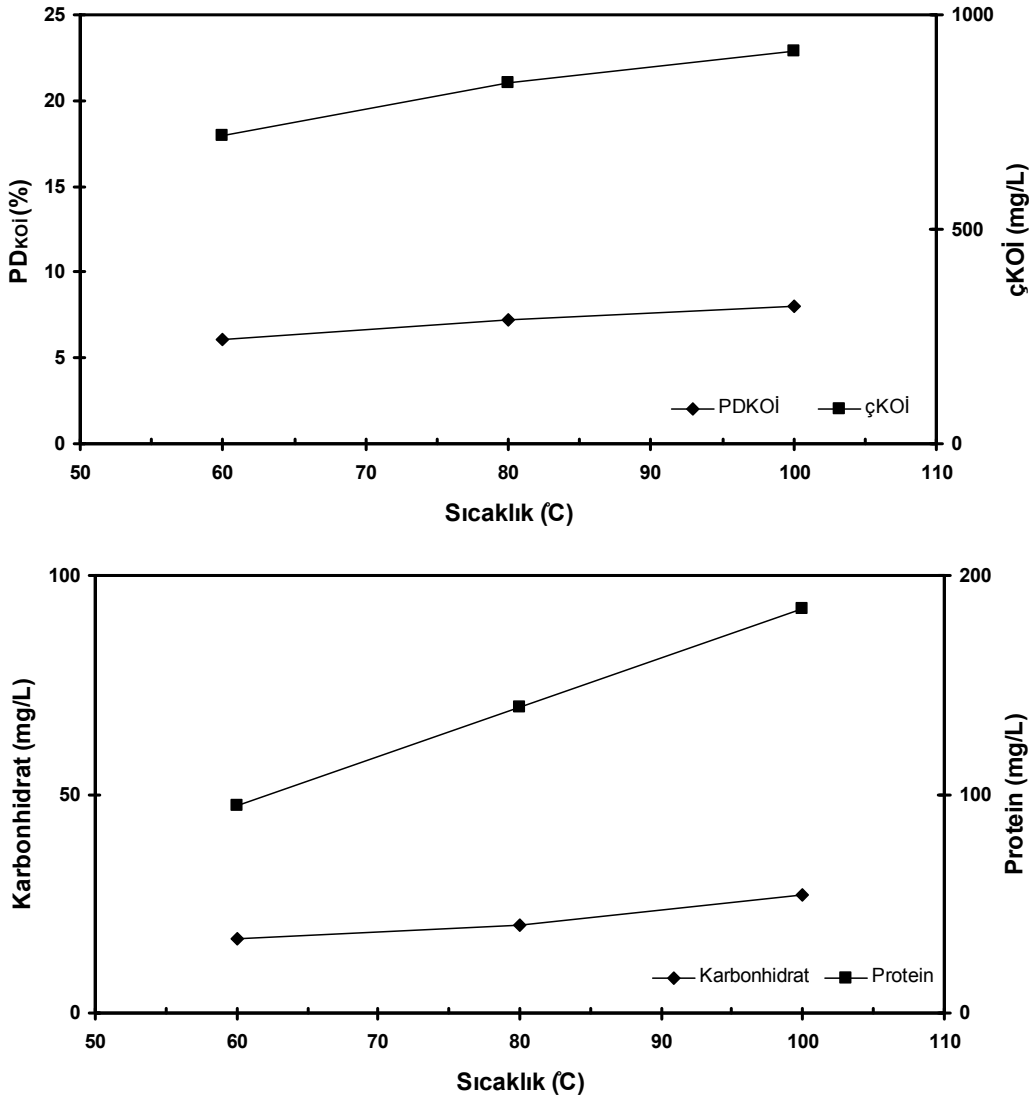
4.3. Isıl Ön Arıtma

Isıl ön arıtma, 40 – 180℃ sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, ısıl ön arıtma için düşük sıcaklıklar olan 60, 80 ve 100℃'de çamur ön

arıtmaya maruz bırakılmıştır. 1 saat süreyle gerçekleştirilen ısıl ön arıtmanın, çamurun kimyasal ve fiziksel özelliklerine etkileri incelenmiş ve sonuçları aşağıda sunulmuştur.

4.3.1. Isıl ön arıtmanın çamur parçalamaya etkisi

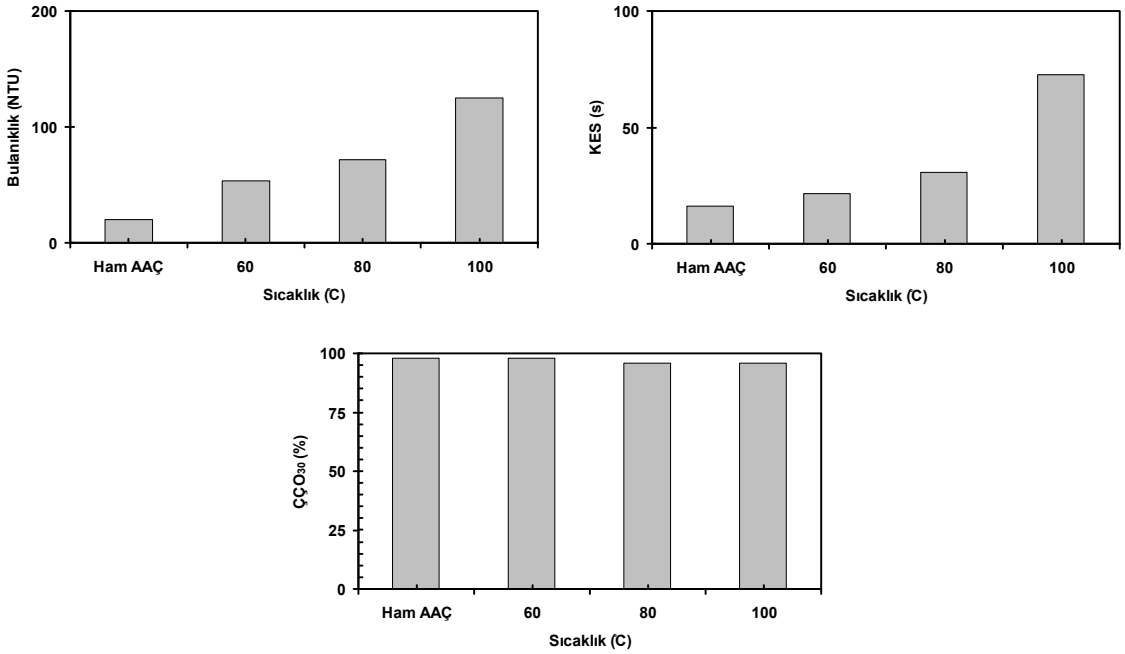
Isıl ön arıtmada, artan sıcaklıkla çamurun çözünürlüğü artmıştır (Şekil 4.30). Sıcaklıktaki artış, hücrelerarası ve hücre içi bileşenlerin sıvı faza daha fazla geçmesine neden olmuştur. 60, 80 ve 100℃ sıcaklıklarda, $PD_{KOİ}$ değerleri % 6.9, 8.2 ve 8.9 olmuştur. Ancak bu artış, US ve alkali ön arıtmalar ile kıyaslandığında çok daha az olmuştur. Sonuç olarak, bu metodun düşük sıcaklıklarda tek başına uygulanması halinde çamur parçalama veriminin sınırlı olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Isıl ön arıtmanın çamurun çözünürlüğüne etkisi.

4.3.2. Isıl ön arıtmanın çamurun su verme ve çökelebilme özelliklerine etkisi

Isıl ön arıtmada artan sıcaklık ile floklar dağıtılmış ve sonuçta bulanıklık da artmıştır (Şekil 4.31). Ön arıtmanın düşük sıcaklıklarda uygulanması, çamurun su verme özelliği üzerinde ısıl şartlandırmanın etkisini azaltmıştır. Sonuçta, dağılan floklar ve küçülen tanecik boyutunun etkisi ile KES değeri yükselmiş ve çamurun su verme özelliği kötüleşmiştir. Öte yandan, ısıl ön arıtmadan geçmiş çamurun çökelebilirliğindeki gelişme sınırlı olmuştur. Bu sonuçta, flokları bağlayıcı yapıdaki EPS'in sıvı faza salınımının fazla olmaması ve çamurdaki filamentli mikroorganizmaların çoğunluğunun parçalanamaması etkili olmuştur. Böylece düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıl ön arıtmanın çamur parçalama üzerinde sınırlı etkiye sahip olması, çamurun çökelebilirliğini de geliştirememiştir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.14'de verilmiştir.



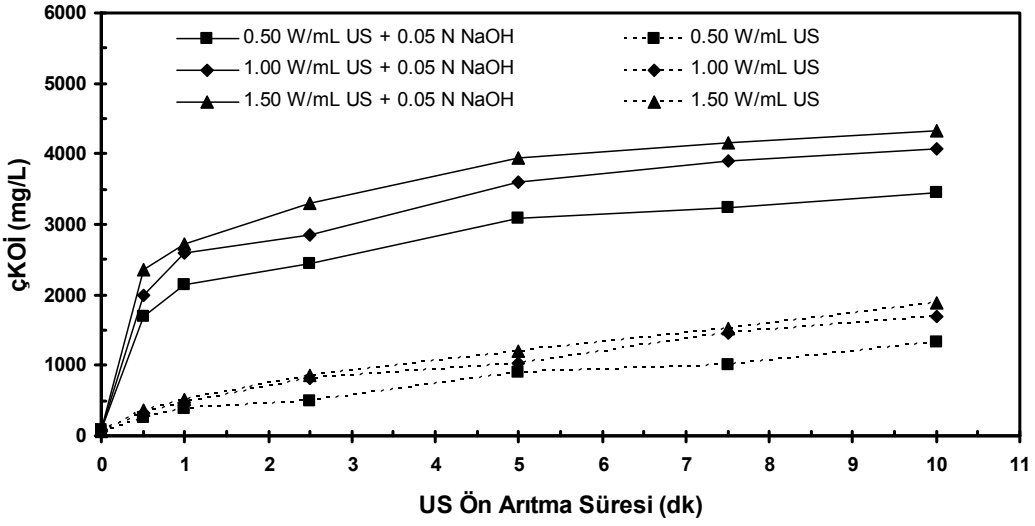
Şekil 4.31. Isıl ön arıtmanın çamur özelliklerine etkisi.

4.4. US + Alkali Ön Arıtma

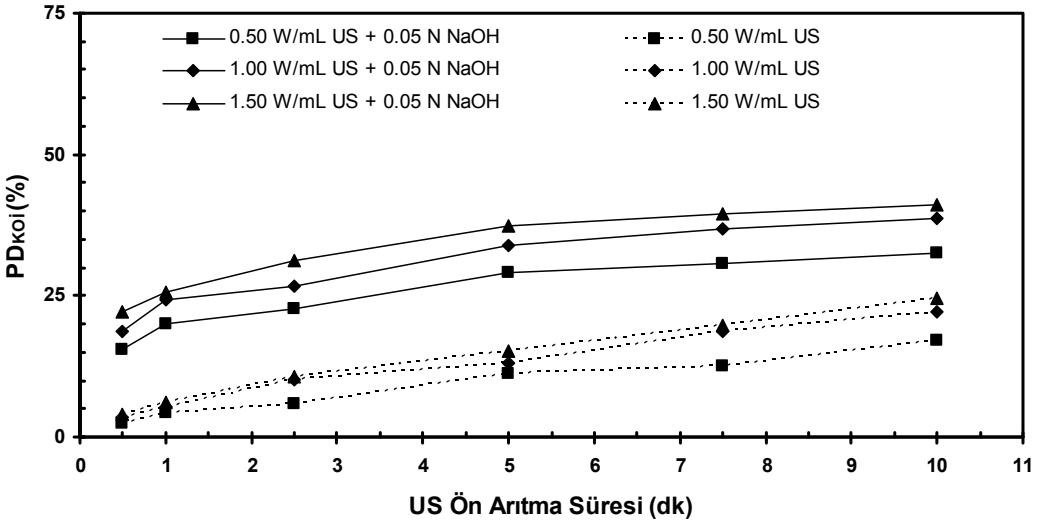
US + alkali ön arıtma için yapılan ön çalışmada, Bölüm 3.2.5'te anlatıldığı gibi uygulanan US ışınım süresinin alkali şartlarda çamur parçalamaya etkisi incelenmiştir. Kısa süreli US ön arıtma deneylerinin sonuçları Bölüm 4.1.2'de tartışılmıştır. Ancak US + alkali ön arıtma deneyleri farklı zamanlarda alınmış AAÇ numunelerinde

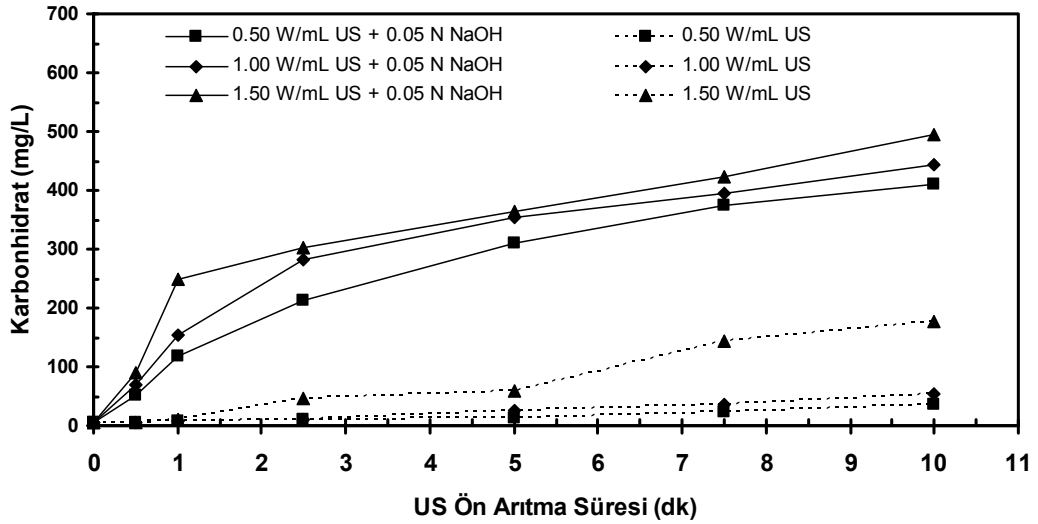
gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, US ve US + alkali ön arıtma metotlarının kıyaslanmasında çamur numunesinin neden olabileceği hataları gidermek için, kısa süreli US ön arıtma deneyleri aynı çamur numunesinde tekrarlanmış ve Bölüm 4.1.2'de tartışılan sonuçlardan farklı olarak, bu sonuçlar kıyaslama için kullanılmıştır.

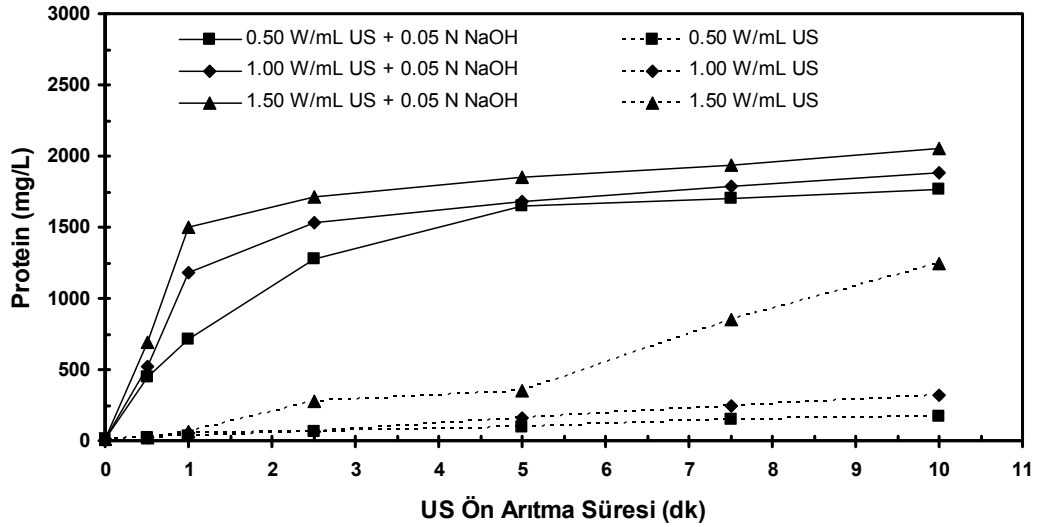
Şekil 4.32'de gösterildiği gibi US + alkali ön arıtmada daha kısa süreli US ışınım uygulaması ile daha yüksek $PD_{KOİ}$ değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar ayrıca Ek – 1'de Çizelge E1.15'de sunulmuştur. 0.5 dk'lık US ışınımın uygulandığı US + alkali ön arıtmada, 10 dk süren US ön arıtmada ulaşılandan daha yüksek verim elde edilmiştir. US ön arıtmada verimin daha az olması, kısa süreli US ışınım ile ancak çamur floklarının dağıtılıp, mikrobiyal hücrelerin parçalanamamasından kaynaklanmıştır. Ancak US ışınım alkali ön arıtma ile birlikte uygulandığı zaman, OH^- iyonları ile US ışınımın dağıttığı floklardaki hücrelerin teması kolaylaşmıştır. Böylece dağıtılmış floklardaki hücrelerin daha etkili parçalanması sağlanmıştır. Sonuç olarak iki metodun farklı çamur parçalama mekanizmalarının birlikte çok daha etkili olmasından dolayı US + alkali ön arıtmada daha yüksek verim elde edilmiştir. Şekil 4.32'de gösterildiği gibi, US + alkali ön arıtma deneylerinde 2.5 dk'ya kadar olan US ışınım uygulamalarında çamur çözünürlüğü hızla artmıştır. Ancak artan ışınım sürelerinde çamur parçalama hızının zamanla azaldığı belirlenmiştir. Bu nedenle, **daha düşük enerji sarfiyatında daha yüksek verimin elde edilmesinin amaçlandığı bu metotta, değişen US yoğunluklarda 2.5 dk'ya kadar kısa US ışınım sürelerinde farklı NaOH dozlarının etkilerinin araştırılması uygun görülmüştür.**



Şekil 4.32. US + alkali ön arıtmanın çamur parçalamaya etkisi.







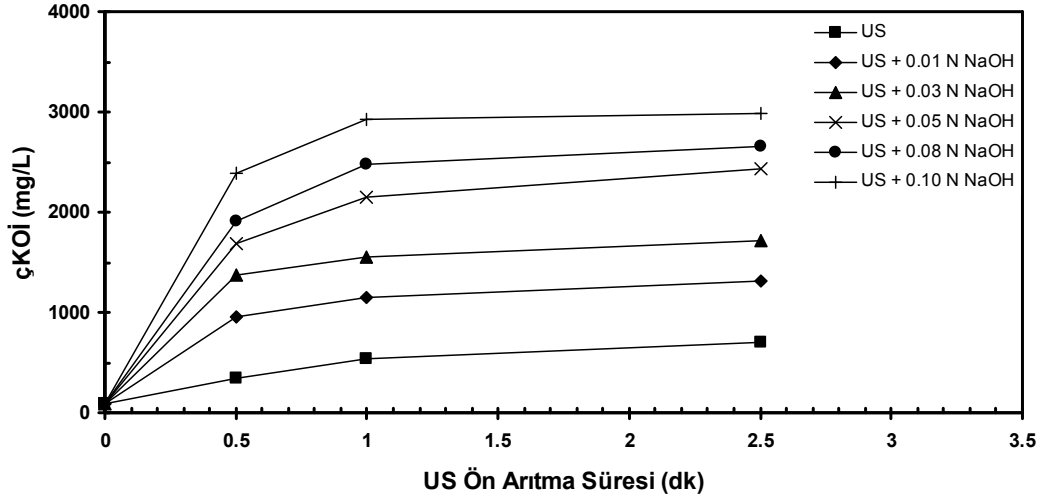
Şekil 4.32. US + alkali ön arıtmanın çamur parçalamaya etkisi (Devam).

4.4.1. US + alkali ön arıtmanın çamur parçalamaya etkisi

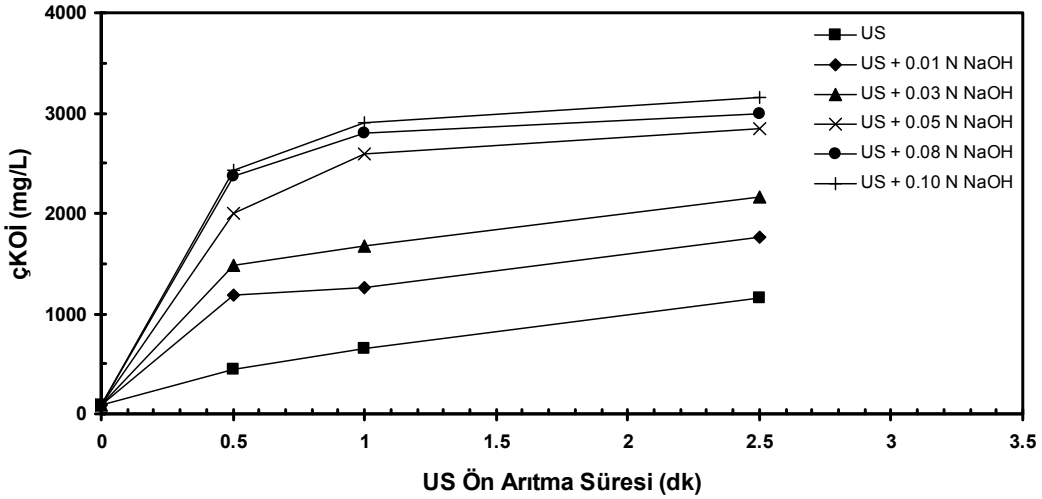
US ön arıtmanın alkali ön arıtma ile modifiye edilmesi sonucunda, çok daha az enerji sarfiyatı ile daha yüksek çamur parçalama verimleri elde edilmiştir (Şekil 4.33 ve 4.34). Örneğin, 1.00 W/mL yoğunlukta 0.5, 1 ve 2.5 dk'lık US ön arıtma ile çKOİ, 90 mg/L'den sırasıyla 450, 650 ve 1150 mg/L'ye arttırılabilmiştir. Aynı şartlardaki US ön arıtmanın 30 dk'lık 0.05 N NaOH dozunda alkali ön arıtma ile birlikte uygulanması sonucunda çKOİ değerleri 90 mg/L'den 2000, 2600 ve 2840 mg/L'ye yükselmiştir. US ön arıtma ile elde edilen $PD_{KOİ}$ değerleri % 3.5, 5.4 ve 10.3 iken; US + alkali ön arıtmada verim % 18.6, 24.4 ve 26.7'ye yükselmiştir. AAÇ'nin 1.00 W/mL yoğunlukta 10 dk süreyle sadece US ön arıtmaya maruz bırakılması sonucunda ise çözünmüş fazdaki KOİ konsantrasyonu 2185 mg/L (% 20.4 $PD_{KOİ}$) olmuştur. Sonuçlar kıyaslanacak olursa, 0.5 dk süreyle US ışınımın uygulandığı US + alkali ön arıtmada, 10 dk'lık US ön arıtma ile elde edilenden daha yüksek verime ulaşılmıştır. Bu nedenle US + alkali ön arıtmada sağlanan bu gelişme sonucunda, çamurun ön arıtımı için harcanacak enerjinin ve işletme maliyetlerinin azaltılabileceği belirlenmiştir.

Alkali ön arıtmanın 0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.10 N NaOH dozlarında yalnız uygulandığı durumda ise çKOİ değerleri 420, 720, 1300, 1375 ve 1440 mg/L'ye yükselmiştir. Bu şartlardaki $PD_{KOİ}$ değerleri ise sırasıyla % 3.9, 7.5, 14.4, 15.3 ve 16.1 olarak hesaplanmıştır. 1 dk'lık 1.00 W/mL güç yoğunluğunda US ışınım ile 30 dk süren 0.01, 0.03, 0.05, 0.08 ve 0.10 N NaOH uygulamasının birlikte uygulanması sonucunda çamurun çKOİ konsantrasyonları 1260, 1670, 2600, 2795 ve 2900 mg/L'ye ve $PD_{KOİ}$ değerleri de % 11.4, 15.4, 24.4, 26.3 ve 27.3'e yükselmiştir. Sonuç olarak bu kombine çamur ön arıtma metodunda, her iki ön arıtma metodunun yalnız kullanıldığı duruma kıyasla daha fazla çamur parçalama verimi elde edilmiştir. Bu sonuç, iki metodun kendilerine has çamur parçalama mekanizmalarının birlikte çok daha etkili olmasından kaynaklanmıştır. Kısa süreli US ön arıtma ile çamur flokları etkili bir şekilde dağıtılmış, ancak dağılan floklardan kopan taneciklerin parçalanması sağlanamamıştır. US + alkali ön arıtmada ise, NaOH, akustik kavitasyonun dağıttığı floklardan kopan taneciklere daha kolay etki ederek çamur parçalama veriminin ciddi oranda artmasına sebep olmuştur. Bu nedenle, kombine sistemde alkali uygulamasının, US ışınımdan daha etkili olduğu belirlenmiştir. Çamur parçalama veriminin 0.05 N NaOH dozuna kadar hızla yükseldiği belirlenmiştir (Şekil 4.33 ve 4.34). Ancak NaOH dozunun 0.05 N'den 0.10

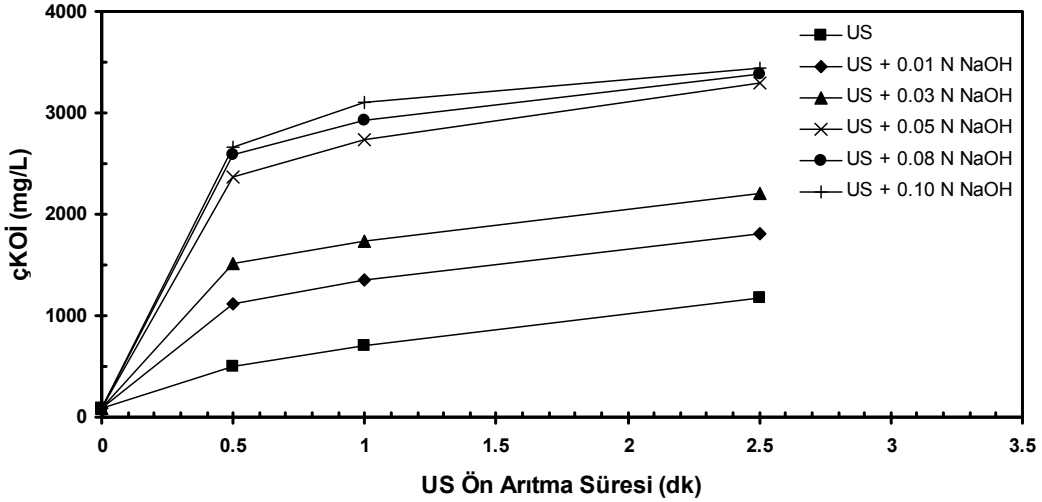
N'ye kadar yükselmesi, çamur çözünürlüğünde ciddi bir artışa neden olmamıştır. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.16'da verilmiştir.



(a)

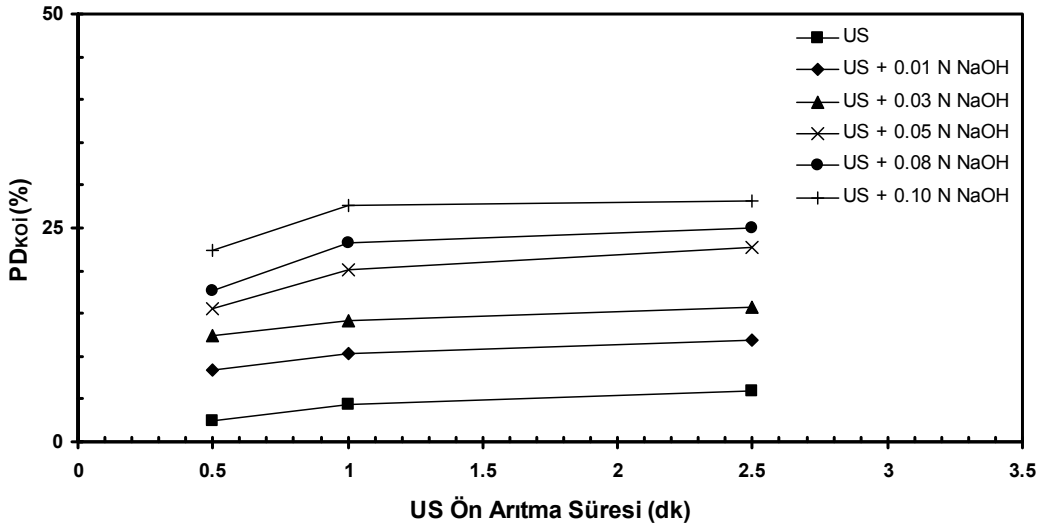


(b)

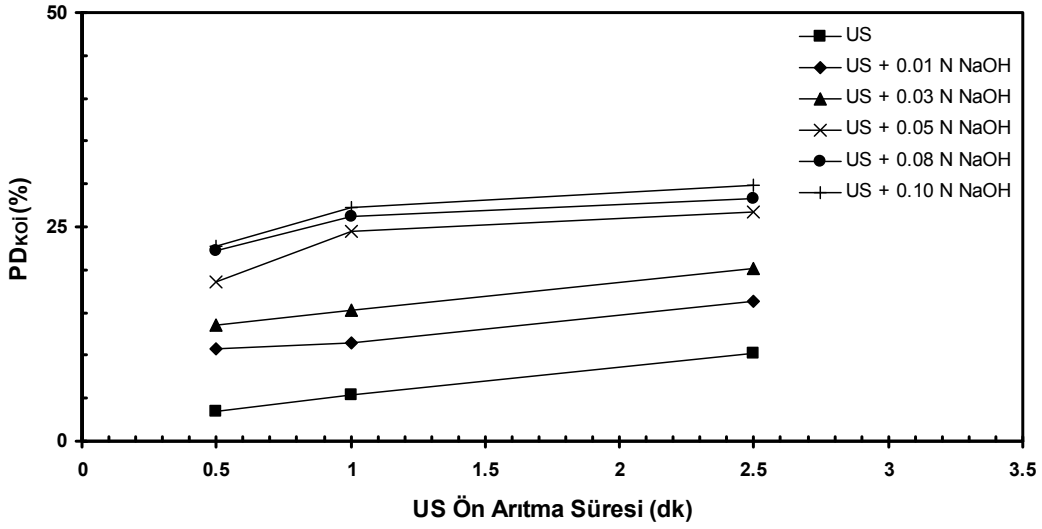


(c)

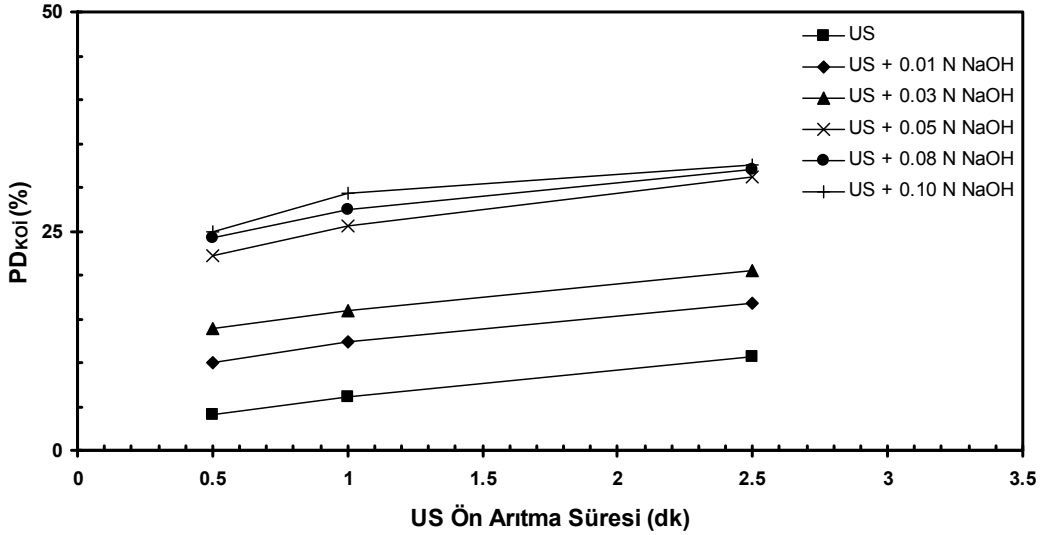
Şekil 4.33. US + alkali ön arıtmada alkali dozunun çKOİ salınımına etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL yoğunlukta US ışınım ve 30 dk NaOH uygulaması.



(a)



(b)

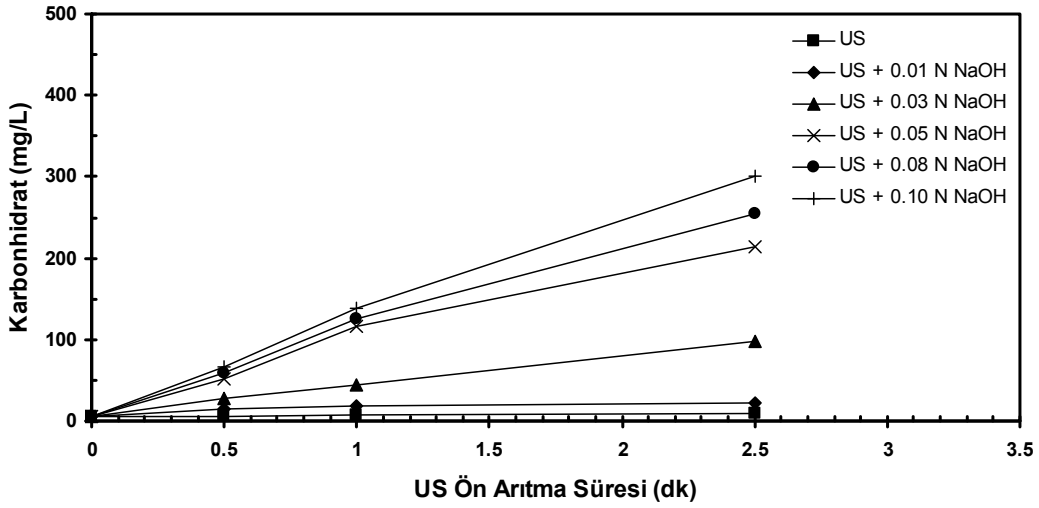


(c)

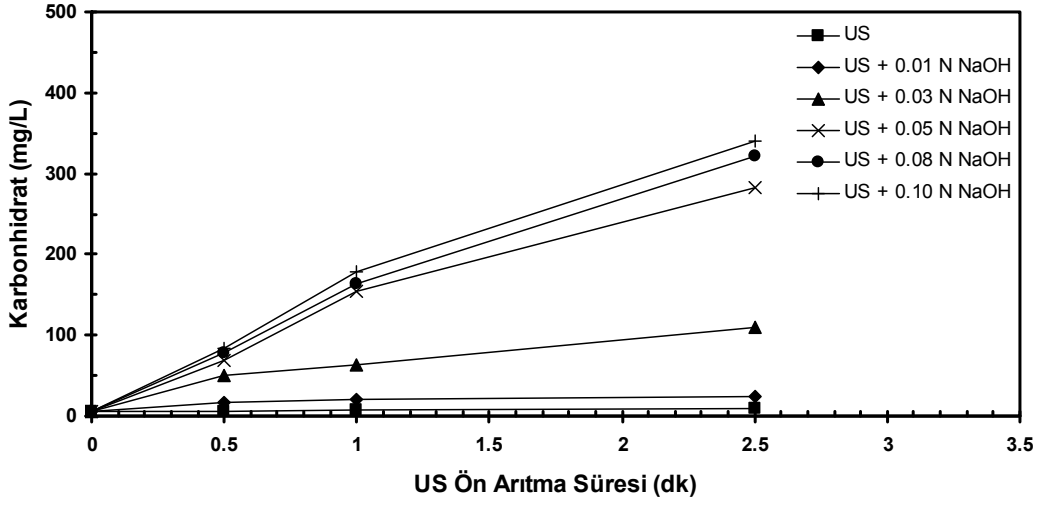
Şekil 4.34. US + alkali ön arıtmada alkali dozunun çamur parçalamaya etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL yoğunlukta US ışınım ve 30 dk NaOH uygulaması.

Katı fazdan sıvı faza karbonhidrat ve protein salınımı, US + alkali ön arıtmanın PD_{KOI}'ye etkisine benzer olmuştur ve Şekil 4.35 ve 4.36'da gösterilmiştir. Artan US yoğunluk ve alkali dozu ile çözünmüş fazdaki karbonhidrat ve protein konsantrasyonları da yükselmiştir. Sabit alkali dozunda US yoğunluktaki artış; sabit US güçte artan NaOH dozunun etkisine kıyasla daha az karbonhidrat ve protein salınımına neden olmuştur. Bu kısa süreli US ışınımın, alkali uygulamasında çamuru parçalayan OH^- iyonları için daha uygun şartları oluşturmasından kaynaklanmıştır. Böylece NaOH dozunun çamurun parçalanması üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.33, 4.34, 4.35 ve 4.36 incelenecek olursa, US yoğunluğun 1.00'den 1.50 W/mL'ye ve alkali dozunun da 0.05 N NaOH'ın üstüne çıkmasının, çamurun parçalanması üzerinde dikkate değer bir değişime neden olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak bu iki sistemin sinerjetik etkisi, her iki sistemin ayrı ayrı kullanıldığı duruma kıyasla mikrobiyal hücrelerin daha fazla parçalanmasına ve böylece daha fazla hücresel bileşenin sıvı faza geçmesine neden olmuştur.

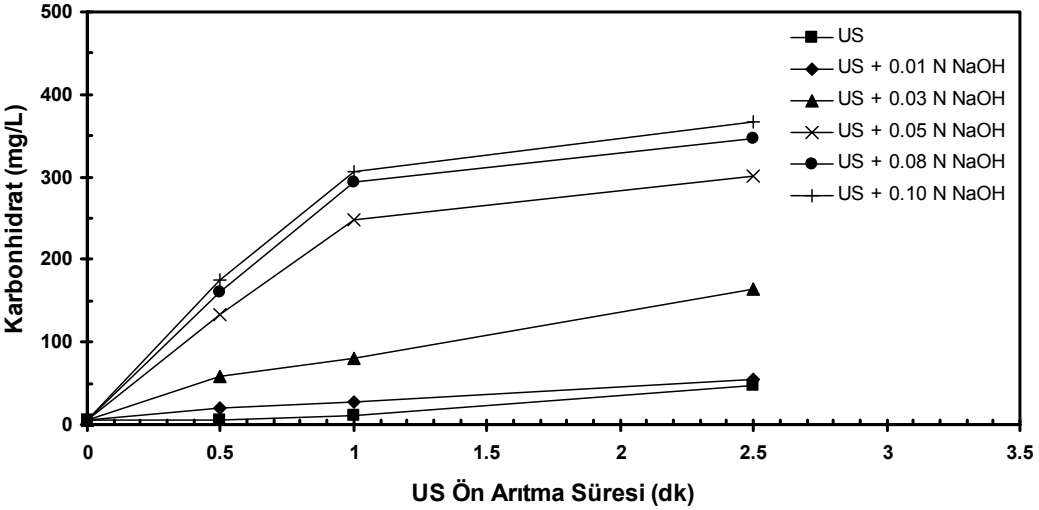
Kesikli beslemeli anaerobik reaktörlerde uygulanacak ön arıtma şartlarının belirlenebilmesi için BMP testleri de yapılmış ve sonuçları Bölüm 4.4.2'de sunulmuştur.



(a)

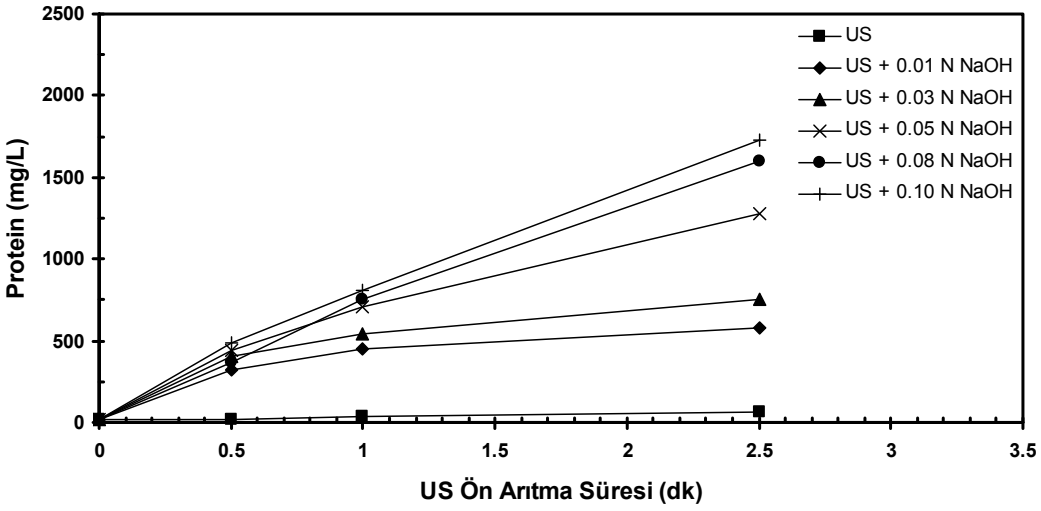


(b)

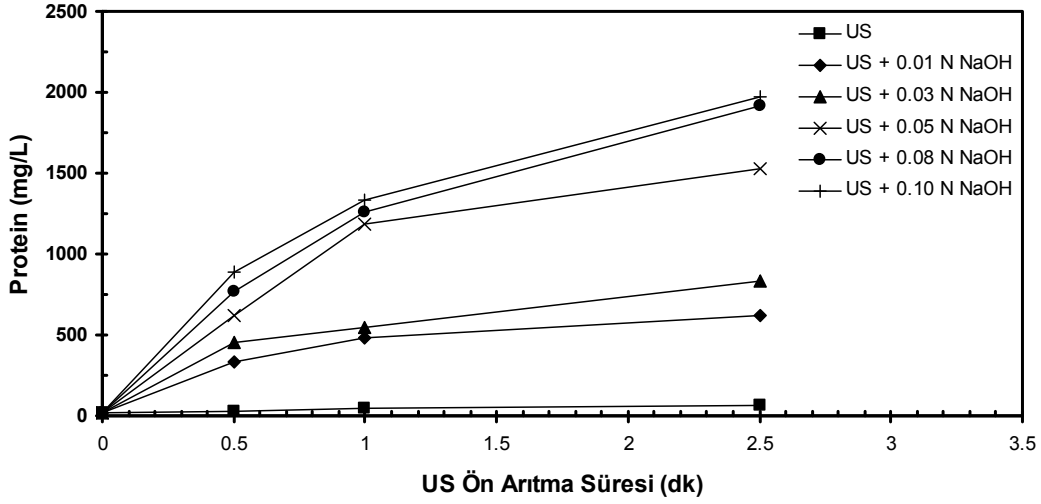


(c)

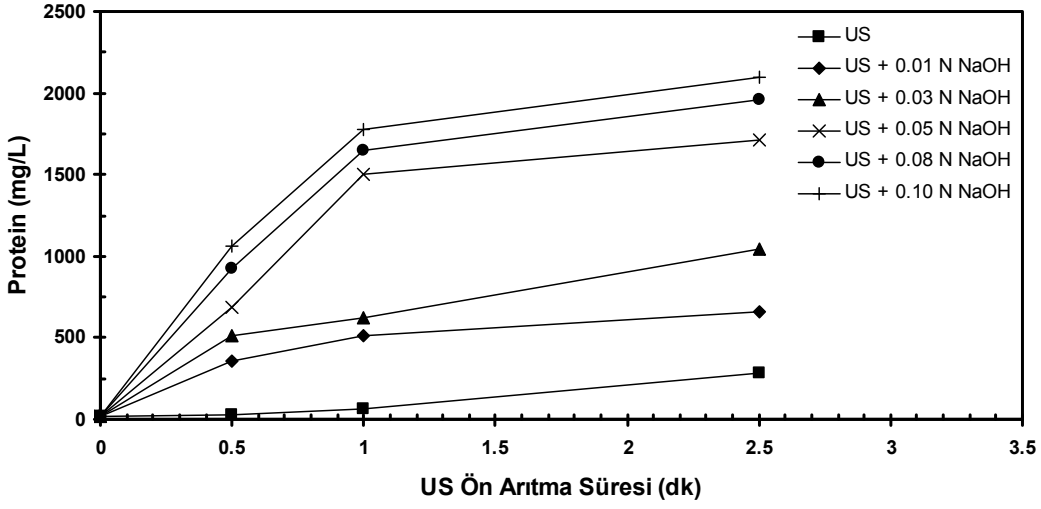
Şekil 4.35. US + alkali ön arıtmanın karbonhidrat salınımına etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL yoğunlukta US ışınım ve 30 dk NaOH uygulaması.



(a)



(b)

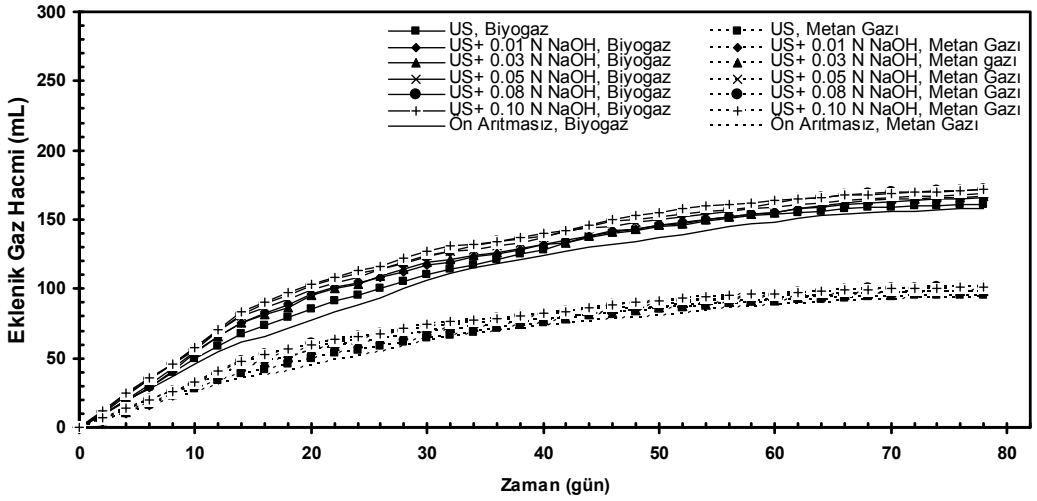


(c)

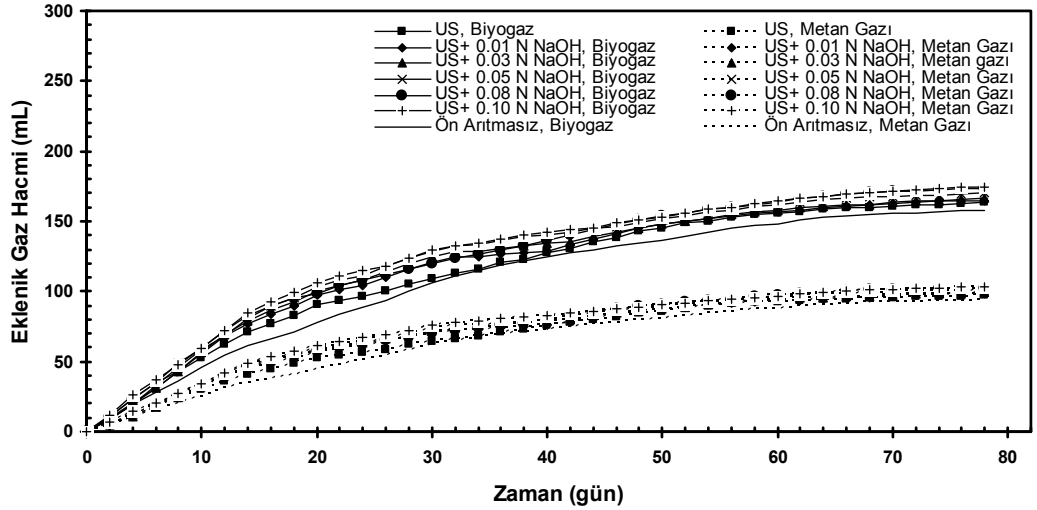
Şekil 4.36. US + alkali ön arıtmanın protein salınımına etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL yoğunlukta US ışınım ve 30 dk NaOH uygulaması.

4.4.2. US + alkali ön arıtmanın metan üretimine etkisi

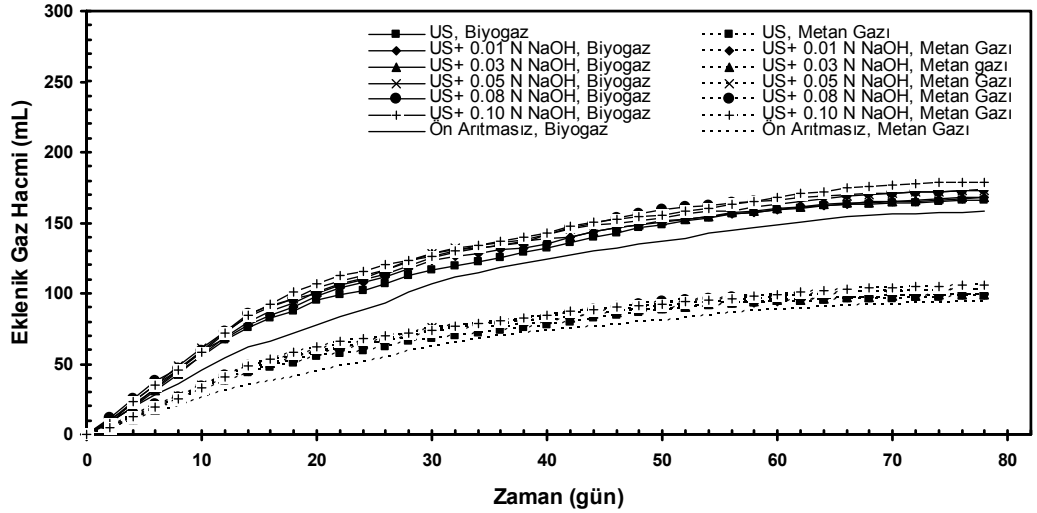
US + alkali ön arıtmanın biyogaz ve metan üretimine etkisi kesikli anaerobik reaktörlerde ölçülmüş ve Şekil 4.37, 4.38, ve 4.39'da gösterilmiştir. Uygulanan US yoğunluk, US ışınım süresi ve alkali dozundaki artışın sonucu olarak çamur daha fazla parçalanmış ve böylece, BMP testlerinde biyogaz ve metan üretimleri de artmıştır. Ancak uygulanan her şartta çamur çözünürlüğünde sağlanan gelişmenin biyogaz ve metan üretimlerinde ciddi bir artışa neden olmadığı görülmüştür. Buna göre kesikli beslemeli anerobik reaktölerde uygulanacak optimum şartların belirlenebilmesi için sonuçlar kıyaslanmış ve en düşük güç sarfiyatında metan üretiminde elde edilen en yüksek artış (% 15.5) dikkate alınmıştır (Çizelge 4.3). Bu artış, 1.00 W/mL güç yoğunluğunda 1 dk'lık US ışınım süresinde ve 30 dk'lık 0.05 N NaOH dozunda alkali uygulaması ile elde edilmiştir. Böylece, US ön arıtmanın alkali uygulaması ile birleştirilmesi sonucunda, US ön arıtmaya kıyasla, daha düşük enerji sarfiyatlarında daha fazla metan üretildiği belirlenmiştir. Ayrıca US + alkali ön arıtma ile çamurun çözünürlüğünün arttırılması sonucunda kesikli deneylerde elde edilen çamur çürütme verimi de yükselmiştir. 1.00 W/mL yoğunlukta 1 dk US ön arıtıma maruz bırakılmış çamurda tKOİ ve UKM giderimleri % 42.6 ve 34.4 iken, aynı şartlarda ön arıtmanın 0.05 NaOH ile modifiye edilmesi sonucunda bu değerler sırasıyla % 47.7'ye ve 37.1'e yükselmiştir (Çizelge 4.4). Buna göre, US ön arıtmaya kıyasla, kombine bir metot olan US + alkali ön arıtma ile daha düşük enerji sarfiyatlarında daha fazla metan üretimini olacağı için ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin daha düşük olacağı söylenebilir. Sonuç olarak, **1.00 W/mL US yoğunlukta 1 dk'lık US ışınım ve yarım saatlik 0.05 N NaOH uygulamasından oluşan US + alkali ön arıtmanın kesikli beslemeli anaerobik reaktörlerden önce kullanılmasının uygun olduğuna karar verilmiştir.** Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.17, E1.18, E1.19, E1.20, E1.21 ve E1.22'de ve Çizelge E1.23'de sunulmuştur.



(a)

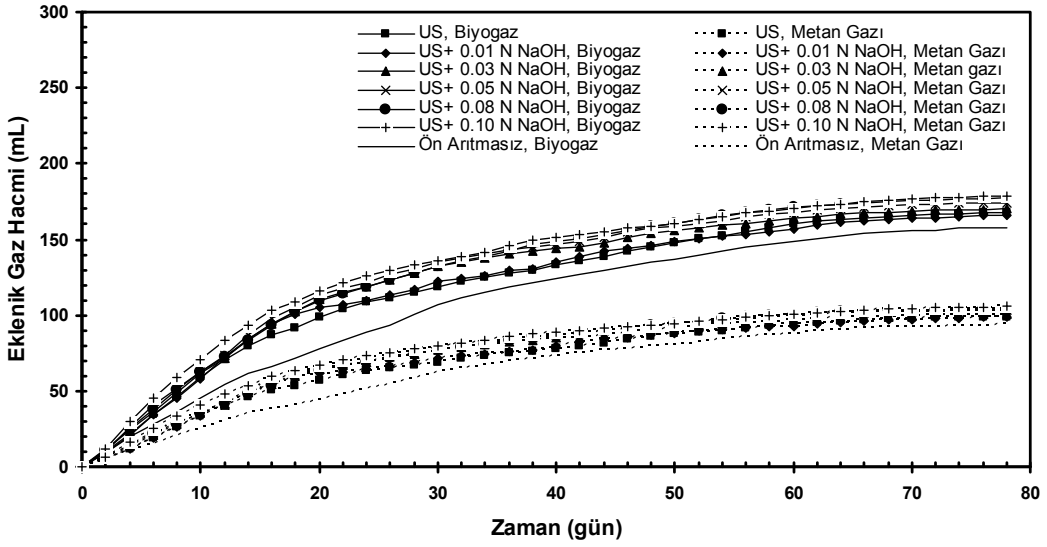


(b)

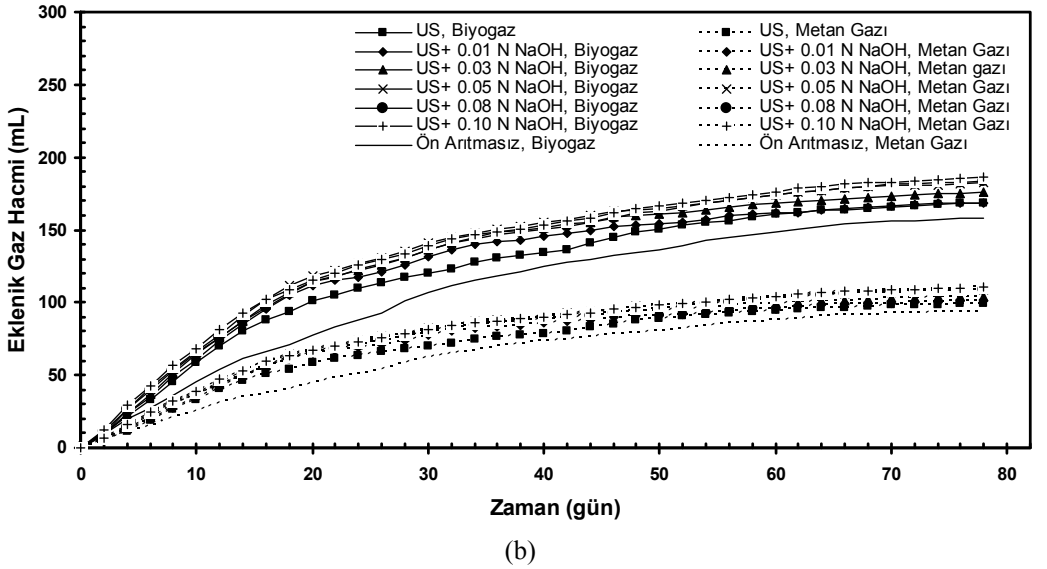


(c)

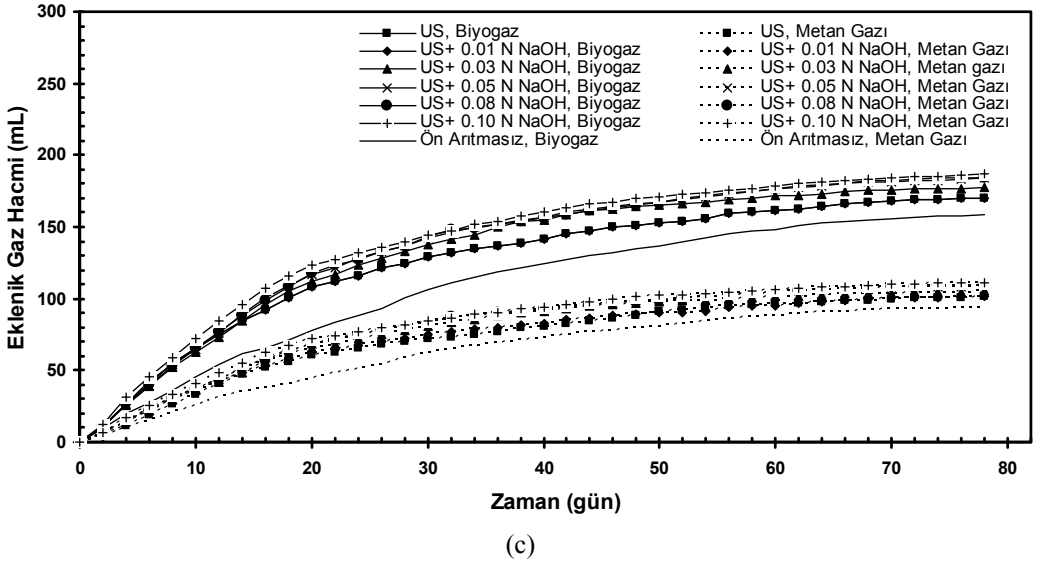
Şekil 4.37. 0.50 W/mL yoğunluğundaki US + alkali ön arıtmanın biyogaz ve metan üretimine etkisi: (a) 0.5 dk US ışınım, (b) 1 dk US ışınım ve (c) 2.5 dk US ışınım.



(a)

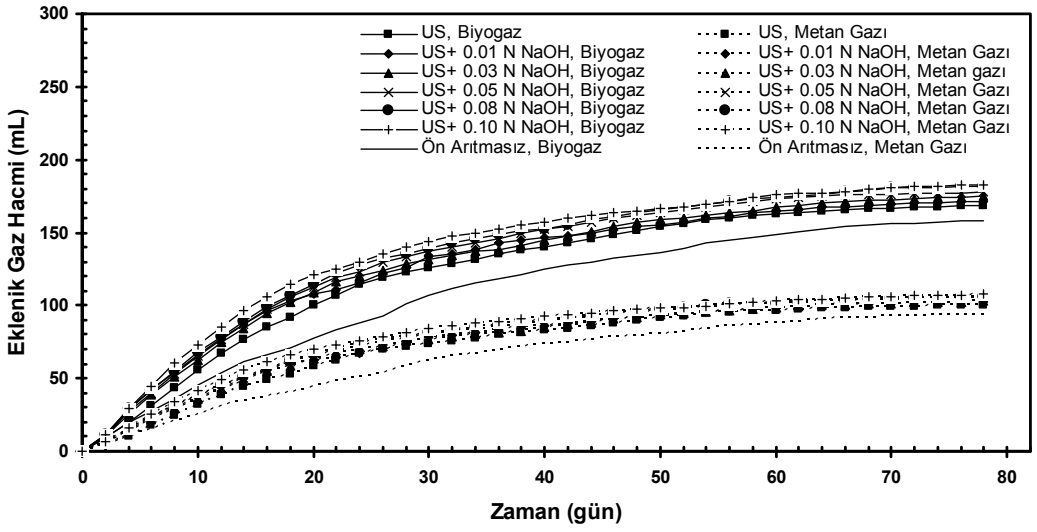


(b)

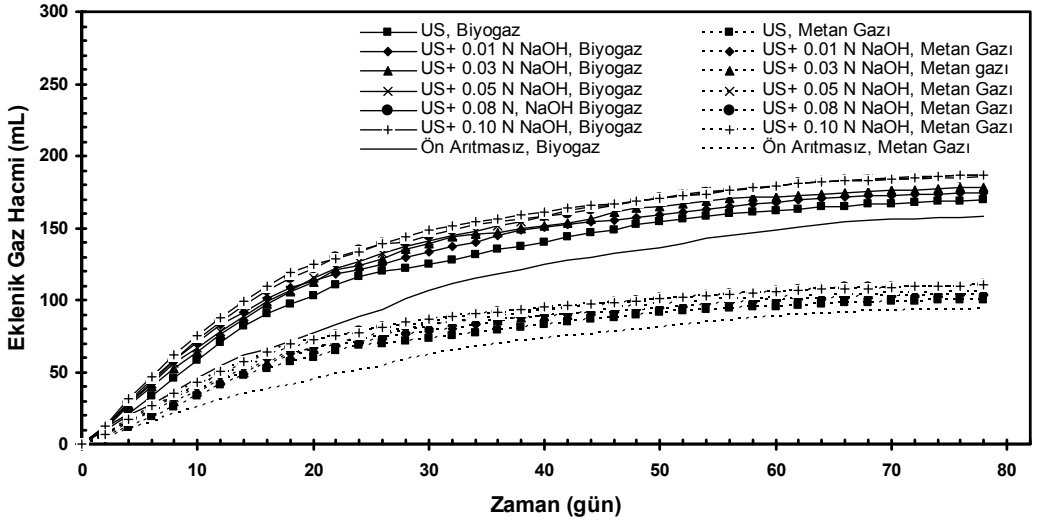


(c)

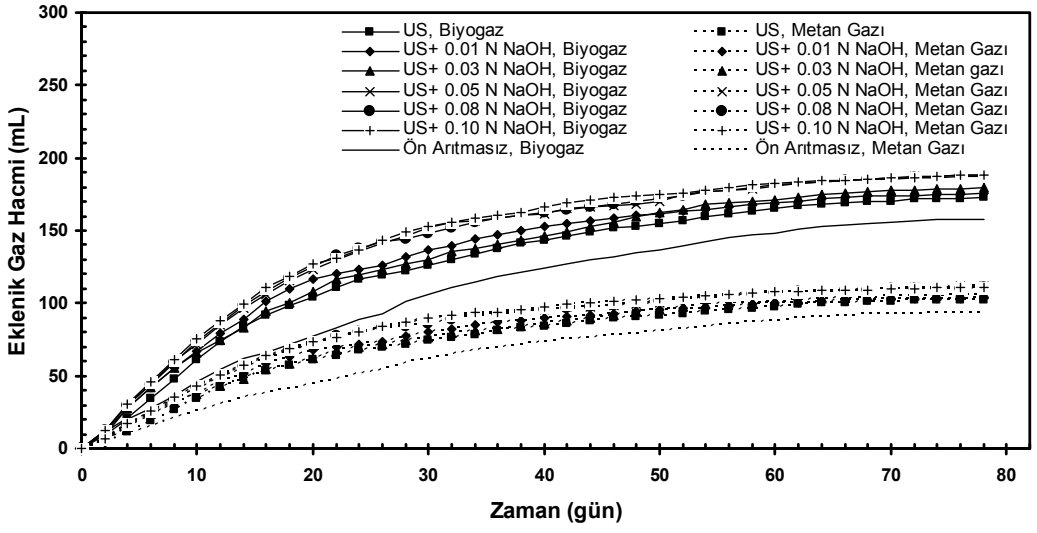
Şekil 4.38. 1.00 W/mL yoğunluğundaki US + alkali ön arıtmanın biyogaz ve metan üretimine etkisi: (a) 0.5 dk US ışınım, (b) 1 dk US ışınım ve (c) 2.5 dk US ışınım.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.39. 1.50 W/mL yoğunluğundaki yoğunluğundaki US + alkali ön arıtmanın biyogaz ve metan üretimine etkisi: (a) 0.5 dk US ışınım, (b) 1 dk US ışınım ve (c) 2.5 dk US ışınım.

Çizelge 4.3. US + alkali ön arıtmada, ön arıtma şartlarının toplam biyogaz ve metan üretimine etkisi.

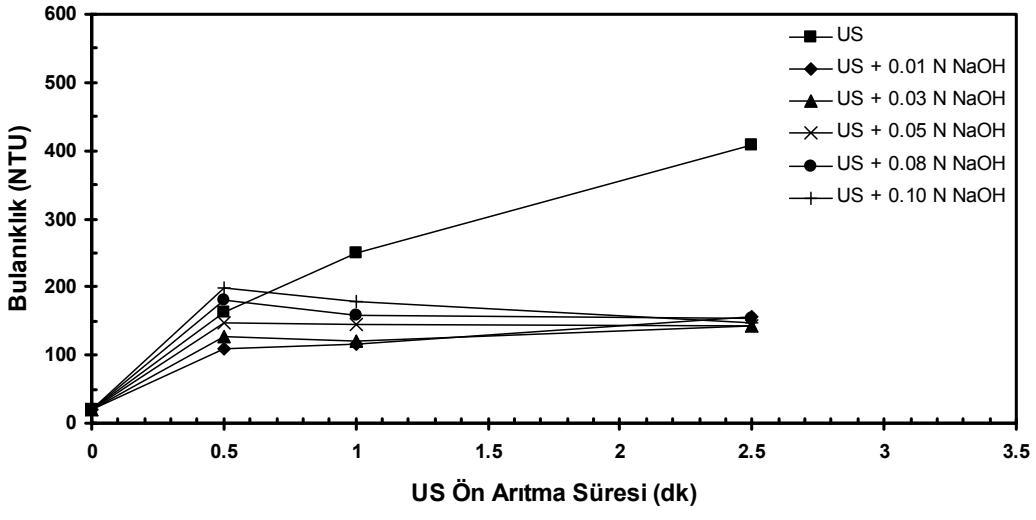
US Yoğunluk (W/mL)	US Işınım Süresi (dk)	US Enerji Tüketimi (W·dk/mL)	NaOH Dozu (N)	Biyogaz Artışı (%)	Metan Artışı (%)
0.50	0.5	0.25	0	1.90	1.91
			0.01	5.1	5.6
			0.03	5.6	5.0
			0.05	6.6	5.0
			0.08	8.4	8.0
			0.10	8.5	7.9
	1.0	0.50	0	3.4	3.4
			0.01	4.2	4.3
			0.03	5.1	5.3
			0.05	7.6	7.4
			0.08	9.6	9.3
			0.10	10.3	9.7
	2.5	1.25	0	5.1	4.0
			0.01	6.1	5.5
			0.03	6.1	5.7
			0.05	9.6	9.7
			0.08	9.9	9.5
			0.10	13.2	12.4
1.00	0.5	0.50	0	6.0	5.3
			0.01	5.1	4.9
			0.03	7.8	7.2
			0.05	10.2	9.8
			0.08	12.3	11.2
			0.1	13.2	12.3
	1.0	**1.00**	0	6.6	6.0
			0.01	6.7	7.6
			0.03	11.1	10.9
			0.05	**15.3**	**15.5**
			0.08	16.2	16.0
			0.10	17.6	17.4
	2.5	2.50	0	7.6	7.8
			0.01	7.8	8.2
			0.03	12.3	11.8
			0.05	16.3	15.9
			0.08	16.7	16.3
			0.10	18.2	18.5
1.50	0.5	0.75	0	6.6	6.9
			0.01	8.4	9.4
			0.03	10.7	9.4
			0.05	12.3	11.8
			0.08	14.9	12.7
			0.10	15.7	14.5
	1.0	1.50	0	7.3	6.8
			0.01	10.4	10.5
			0.03	12.6	12.5
			0.05	18.1	17.1
			0.08	17.5	17.2
			0.10	18.2	17.2
	2.5	3.75	0	9.2	9.3
			0.01	11.2	10.4
			0.03	13.7	13.2
			0.05	19.3	18.8
			0.08	18.6	17.5
			0.10	19.0	18.2

Çizelge 4.4. US + alkali ön arıtmanın kesikli anaerobik reaktörlerde tKOİ ve UKM giderimine etkisi.

	tKOİ (mg/L)	**tKOİ Giderimi (%)**	**UKM (mg/L)**	**UKM Giderimi (%)**
Ham çamur	5250	37.5	5490	25.8
0.50 W/mL'de 0.5 dk US	4945	40.8	4910	33.6
0.50 W/mL'de 1 dk US	4900	41.4	4860	34.3
0.50 W/mL'de 2.5 dk US	4765	43.0	4785	35.3
0.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.01 N NaOH	4900	41.4	4845	34.5
0.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.01 N NaOH	4820	42.3	4790	35.3
0.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.01 N NaOH	4650	44.4	4700	36.5
0.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.03 N NaOH	4800	42.6	4820	34.9
0.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.03 N NaOH	4680	44.0	4750	35.8
0.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.03 N NaOH	4600	45.0	4690	36.6
0.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.05 N NaOH	4650	44.4	4780	35.4
0.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.05 N NaOH	4590	45.1	4755	35.7
0.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.05 N NaOH	4500	46.2	4710	36.4
0.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.08 N NaOH	4600	45.0	4765	35.6
0.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.08 N NaOH	4500	46.2	4745	35.9
0.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.08 N NaOH	4420	47.1	4690	36.6
0.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.10 N NaOH	4500	46.2	4755	35.7
0.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.10 N NaOH	4485	46.4	4700	36.5
0.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.10 N NaOH	4380	47.6	4635	37.4
1.00 W/mL'de 0.5 dk US	4870	41.7	4870	34.2
1.00 W/mL'de 1 dk US	4800	42.6	4855	34.4
1.00 W/mL'de 2.5 dk US	4700	43.8	4760	35.7
1.00 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.01 N NaOH	4805	42.5	4830	29.0
1.00 W/mL'de 1 dk US ve 0.01 N NaOH	4730	43.4	4775	34.7
1.00 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.01 N NaOH	4590	45.1	4680	35.5
1.00 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.03 N NaOH	4780	42.8	4790	35.3
1.00 W/mL'de 1 dk US ve 0.03 N NaOH	4700	43.8	4720	36.2
1.00 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.03 N NaOH	4555	45.5	4635	37.4
1.00 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.05 N NaOH	4530	45.8	4700	36.5
1.00 W/mL'de 1 dk US ve 0.05 N NaOH	**4370**	**47.7**	**4655**	**37.1**
1.00 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.05 N NaOH	4250	49.2	4600	37.8
1.00 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.08 N NaOH	4380	47.6	4675	36.8
1.00 W/mL'de 1 dk US ve 0.08 N NaOH	4260	49.0	4640	37.3
1.00 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.08 N NaOH	4180	50.0	4610	37.7
1.00 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.10 N NaOH	4265	49.0	4600	37.8
1.00 W/mL'de 1 dk US ve 0.10 N NaOH	4160	50.2	4590	38.0
1.00 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.10 N NaOH	4130	50.6	4565	38.3
1.50 W/mL'de 0.5 dk US	4820	42.3	4830	34.7
1.50 W/mL'de 1 dk US	4770	42.9	4785	35.3
1.50 W/mL'de 2.5 dk US	4700	43.8	4740	35.9
1.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.01 N NaOH	4765	43.0	4795	35.2
1.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.01 N NaOH	4700	43.8	4735	36.0
1.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.01 N NaOH	4540	45.7	4680	36.8
1.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.03 N NaOH	4690	43.9	4740	35.9
1.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.03 N NaOH	4610	44.9	4690	36.6
1.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.03 N NaOH	4480	46.4	4610	37.7
1.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.05 N NaOH	4455	46.7	4700	36.5
1.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.05 N NaOH	4280	48.8	4600	37.8
1.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.05 N NaOH	4205	49.7	4580	38.1
1.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.08 N NaOH	4350	48.0	4650	37.2
1.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.08 N NaOH	4135	50.5	4625	37.5
1.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.08 N NaOH	4110	50.8	4595	37.9
1.50 W/mL'de 0.5 dk US ve 0.10 N NaOH	4200	49.8	4585	38.0
1.50 W/mL'de 1 dk US ve 0.10 N NaOH	4100	51.0	4555	38.4
1.50 W/mL'de 2.5 dk US ve 0.10 N NaOH	4075	51.3	4535	38.7

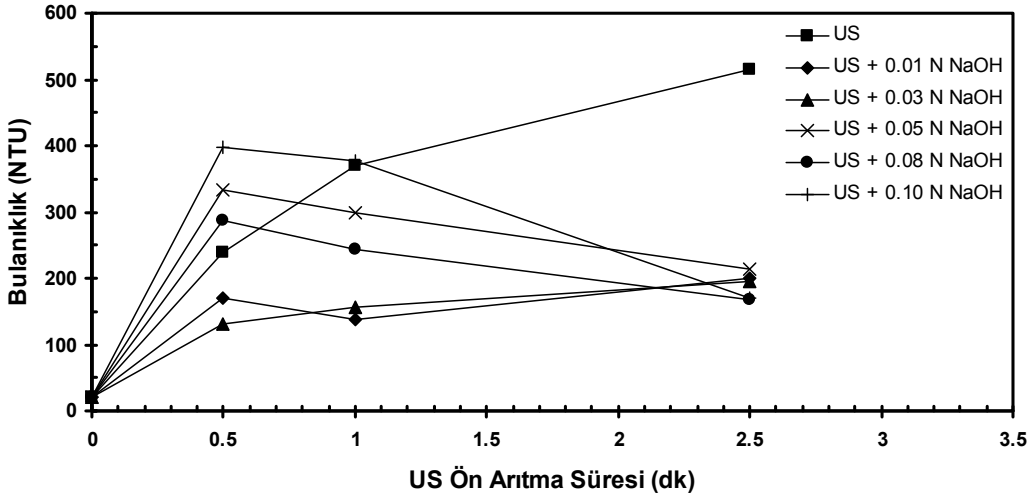
4.4.3. US + alkali ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi

US + alkali ön arıtmanın çamurun su verme özelliğine etkisi, bulanıklık parametresi ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu birleşik metotta uygulanan tüm US yoğunluklarda 0.5 dk'lık US ışınım sonucunda hızla gerçekleşen kavitasyon ile bulanıklık da hızla artmıştır (Şekil 4.40). Bulanıklıktaki artış, flokların dağıtılması sonucunda tanecik boyutundaki küçülmeden kaynaklanmıştır. Tanecik boyutunun küçülmesi, Şekil 4.41'de gösterildiği gibi çamurun su verme özelliğinin de kötüleşmesine neden olmuştur. Artan US ışınım sürelerinde ise bulanıklık ve KES değerleri, küçülen taneciklerin yeniden floküle olmasından dolayı azalmıştır. Taneciklerin yeniden floküle olması üzerinde, çamurun çözünürlüğündeki gelişme ile sıvı fazda hücrelerarası ve hücre içi maddelerin artan konsantrasyonu (Feng ve ark., 2009) ve partikül büyüklüğünün küçülmesi ile taneciklerin kohezyon ve yoğunluğundaki artış (Gonze ve ark., 2003) etkili olmuştur. Ayrıca 30 dk'lık ön arıtma süresinin sonunda, çamurun nötralizasyonu sırasında termal reaksiyon sonucunda gerçekleşen sıcaklık artışı da ısıl şartlandırma ile çamurun su verme özelliğini iyileştirmiş olabilir. Sonuç olarak, ham çamura kıyasla, arıtılmış çamurun su verme özelliği çok daha kötü olmuştur. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.16'da sunulmuştur.

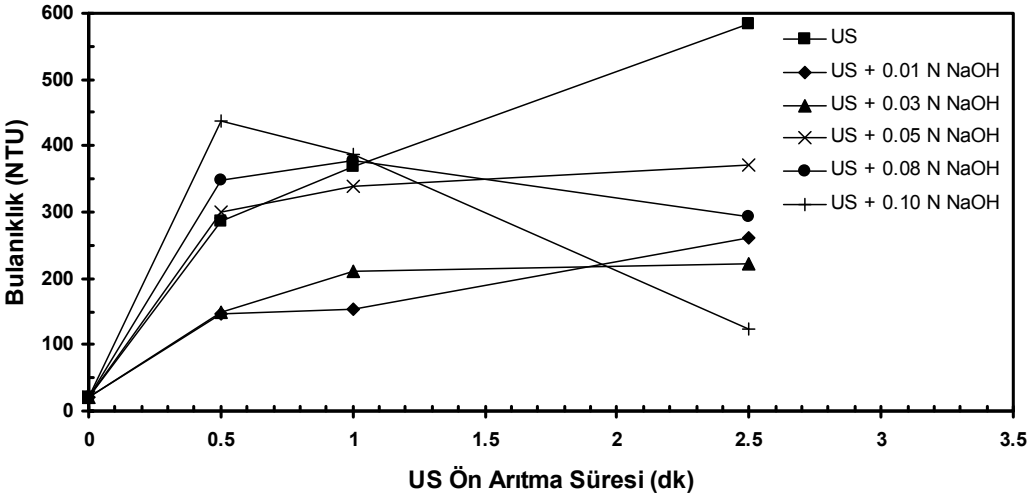


(a)

Şekil 4.40. US + alkali ön arıtmanın çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL US yoğunlukta.

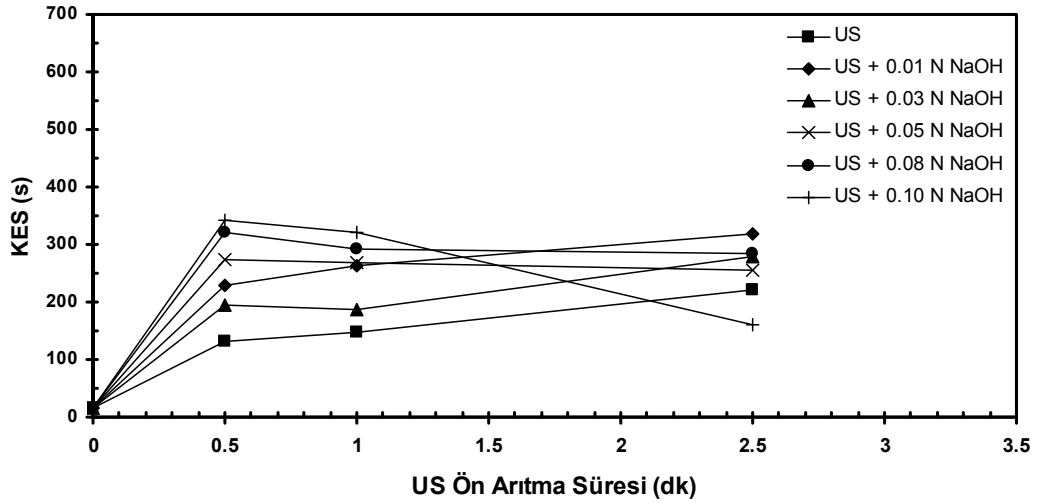


(b)

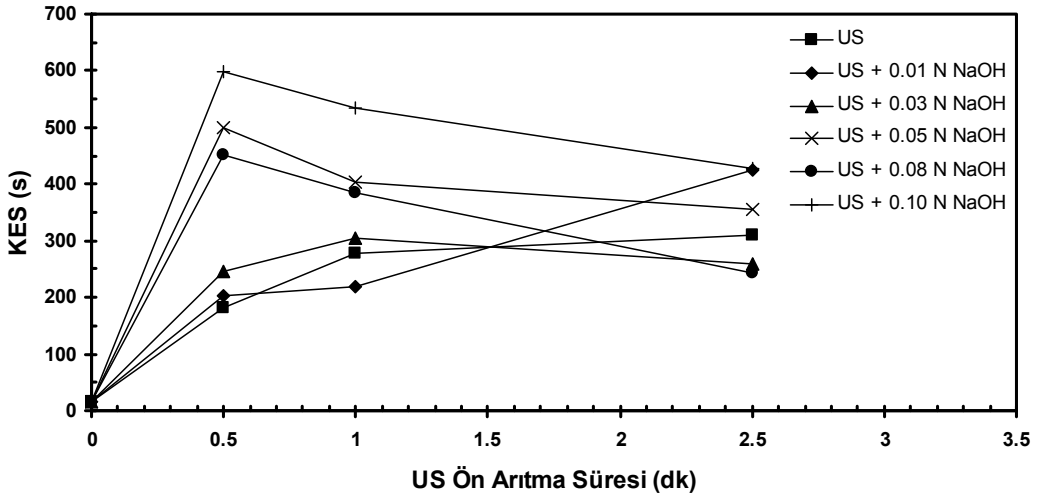


(c)

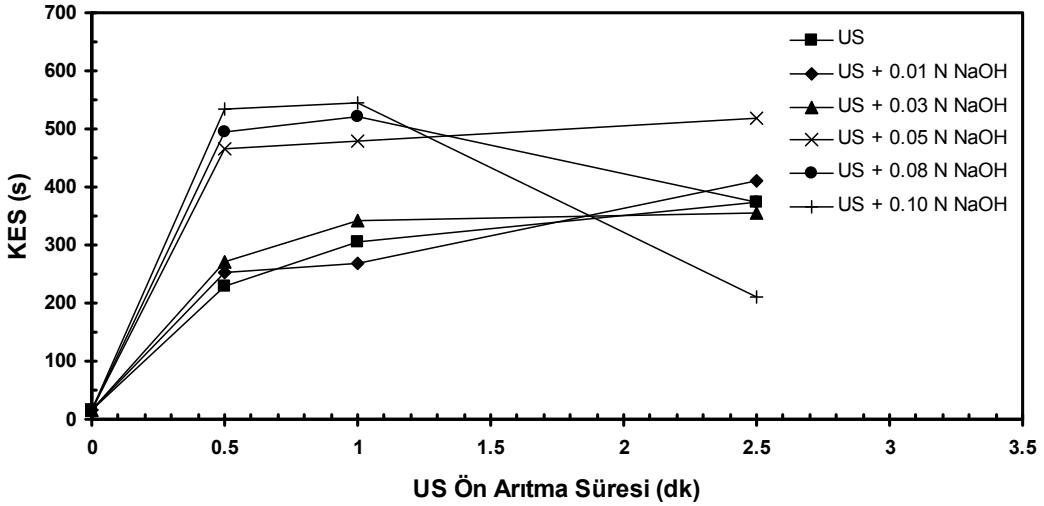
Şekil 4.40. US + alkali ön arıtmanın çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL US yoğunlukta (Devam).



(a)



(b)

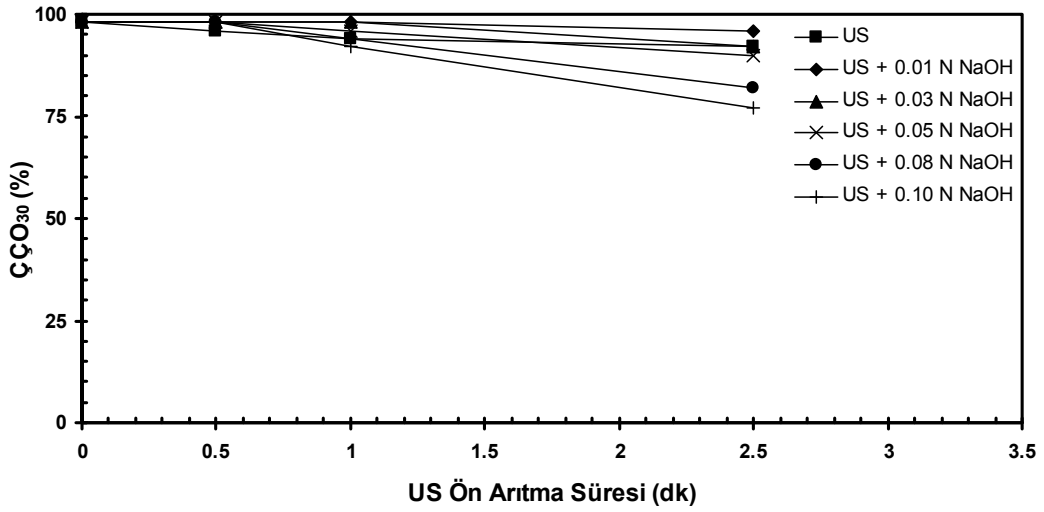


(c)

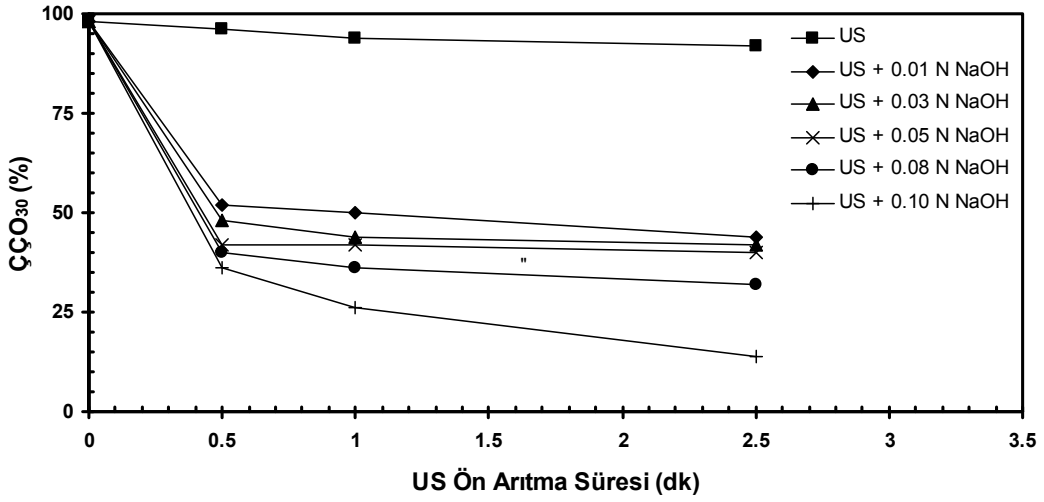
Şekil 4.41. US + alkali ön arıtmanın çamurun bulanıklığına ve su verme özelliğine etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL US yoğunlukta.

4.4.4. US + alkali ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi

US + alkali ön arıtma sonucunda çamurun çökelebilirliği, US yoğunlukta, US ışınım süresinde ve NaOH dozundaki artışa bağlı olarak sürekli gelişmiştir (Şekil 4.42). Çamurun çökelebilirliğindeki bu iyileşme Bölüm 4.1.1.4'de açıklanan nedenlerden dolayı gerçekleşmiştir. Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.16'da verilmiştir.

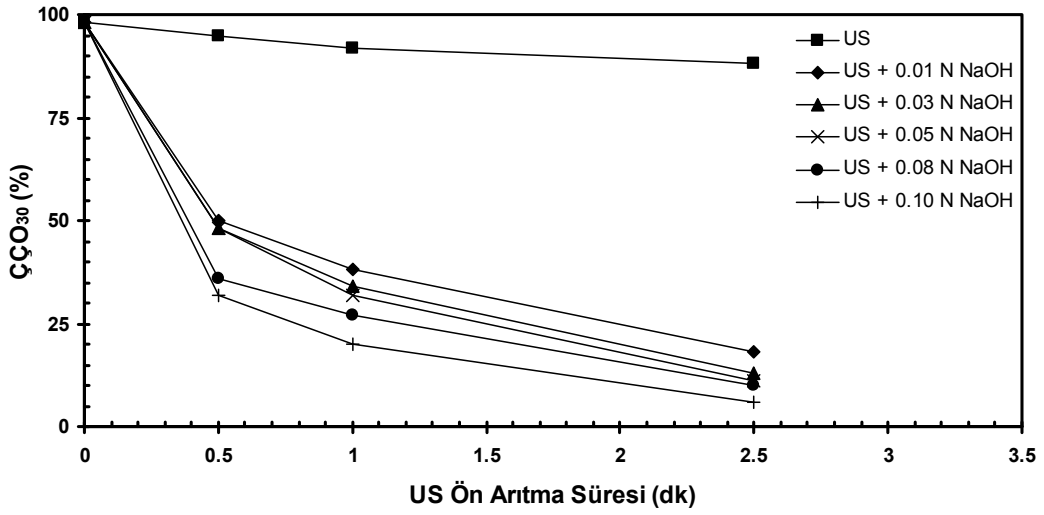


(a)



(b)

Şekil 4.42. US + alkali ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL US yoğunlukta.



(c)

Şekil 4.42. US + alkali ön arıtmanın çamurun çökelebilme özelliğine etkisi: (a) 0.50 W/mL, (b) 1.00 W/mL ve (c) 1.50 W/mL US yoğunlukta (Devam).

4.5. US + Isıl Ön Arıtma

Bölüm 4.1 ve 4.2'de anlatıldığı gibi, US ön arıtma süresince uygulanan US yoğunluğa ve ön arıtma süresine bağlı olarak çamurun sıcaklığı sürekli yükselmiştir. Bu bölümde, US ön arıtma sonucunda ısınmış çamurun, 1 saat 60, 80 ve 100℃ sıcaklıkta ısıl işleme maruz bırakılmasının çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Böylece US ön arıtma ile süreç gereği kendiliğinden gerçekleşen sıcaklık artışı, bir avantaj olarak kullanılmıştır.

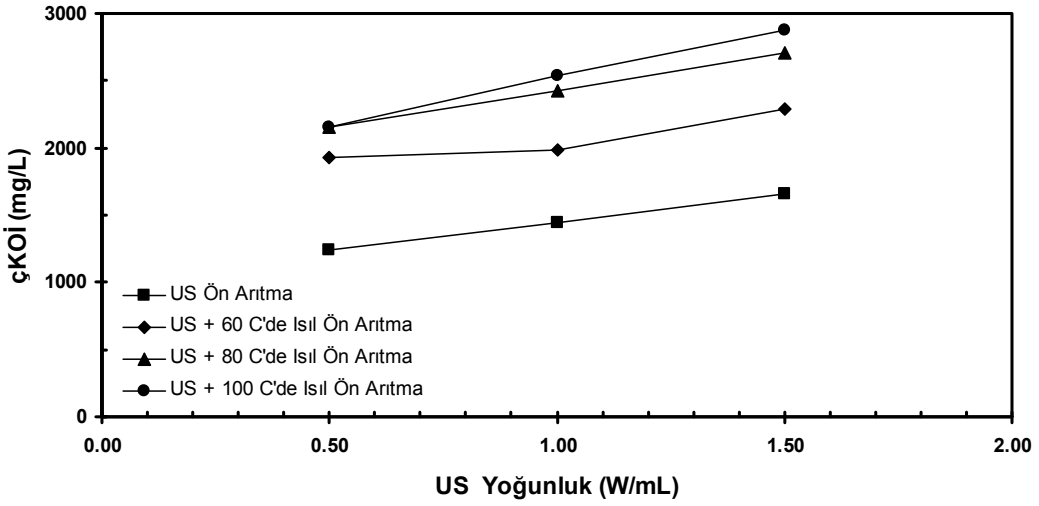
Sadece kısa süreli US ön arıtmanın uygulandığı durumda elde edilen sonuçlar Bölüm 4.1.2'de tartışılmıştır. Ancak US + ısıl ön arıtma deneyleri farklı zamanlarda alınmış AAÇ numunelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, US ve US + ısıl ön arıtma metotlarının kıyaslanmasında çamur numunesinin neden olabileceği hataları gidermek için, kısa süreli US ön arıtma deneyleri aynı çamur numunesinde tekrarlanmış ve Bölüm 4.1.2'de tartışılan sonuçlardan farklı olarak, bu sonuçlar kıyaslama için kullanılmıştır.

Bu bölümde sonuçları tartışılan US + ısıl ön arıtma deneyleri iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, US + ısıl ön arıtmada, düşük sıcaklıklı işlemde uygulanacak sıcaklığın çamur parçalamaya etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 5 dk boyunca 0.50, 1.00 ve 1.50 W/mL US yoğunlukta US ön arıtmadan geçmiş çamur, 60, 80 ve 100℃ sıcaklıkta ısıl işleme maruz bırakılmıştır. Optimum sıcaklığın belirlenmesinden sonra, US + ısıl ön arıtmanın çamur parçalama verimine US şartların etkileri incelenmiştir. Bu deneylerde 10 dk'ya kadar olan sürelerde 0.50, 1.00 ve 1.50

W/mL US yoğunluklarda gerçekleştirilen US ön arıtmadan sonra, çamur numuneleri 1 saat süre ile belirlenen optimum sıcaklıkta ısıl işleme maruz bırakılmıştır.

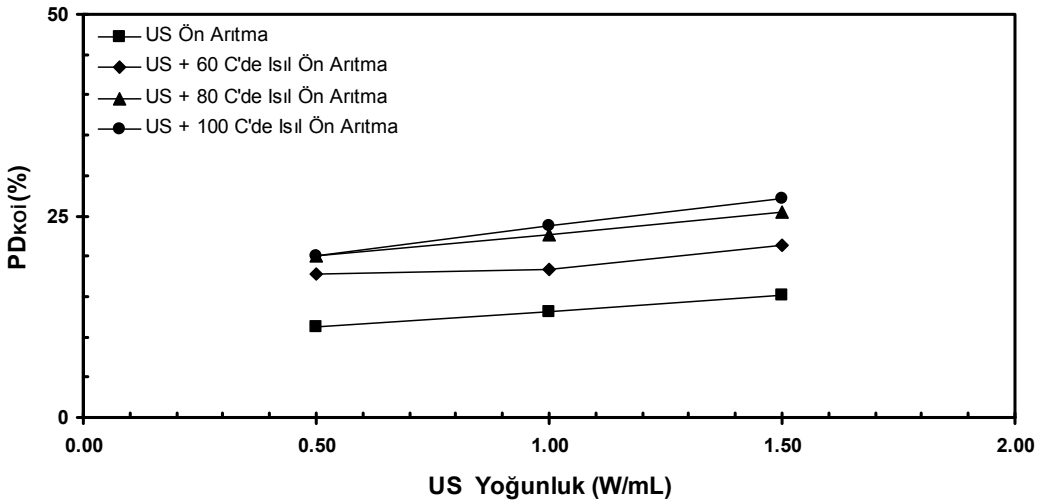
4.5.1. US + ısıl ön arıtmada sıcaklığın çamur parçalamaya etkisi

US + ısıl ön arıtmada, uygulanan sıcaklık yükseldikçe çamur parçalama verimi de artmıştır (Şekil 4.43). 5 dk süre ile 0.50, 1.00 ve 1.50 W/mL yoğunluklardaki US ön arıtma sonucunda $PD_{KOİ}$ değerleri % 11.1, 13.1 ve 15.2 olmuştur. $PD_{KOİ}$ değerleri US + 60℃'lik ısıl ön arıtma ile % 17.9, 18.3 ve 21.4, US + 80℃'lik ısıl ön arıtma ile % 19.2, 22.1 ve 24.5 ve US + 100℃'lik ısıl ön arıtma ile % 20, 23.7 ve 27.1'e yükselmiştir. US + ısıl ön arıtmada sağlanan bu gelişme, akustik kavitasyonun dağıttığı flokların artan sıcaklıklarda daha da fazla dağılmasından ve mikrobiyal hücrelerin parçalanmasından kaynaklanmıştır. Sonuç olarak Şekil 4.43'de gösterildiği gibi, US + ısıl ön arıtmada uygulanan sıcaklığın artması çamurun katı fazından sıvı fazına daha fazla KOİ, protein ve karbonhidrat geçişine neden olmuştur. Ancak sıcaklığın 80℃'den 100℃'ye yükselmesi ile çamurun çözünürlüğündeki artış ihmal edilebilir seviyede olmuştur. Sonuç olarak, çamur parçalama verimi ve süreç maliyeti dikkate alınarak **US + ısıl ön arıtma için optimum sıcaklığın 80℃ olduğu belirlenmiştir.** Ayrıca sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.24'de gösterilmiştir.

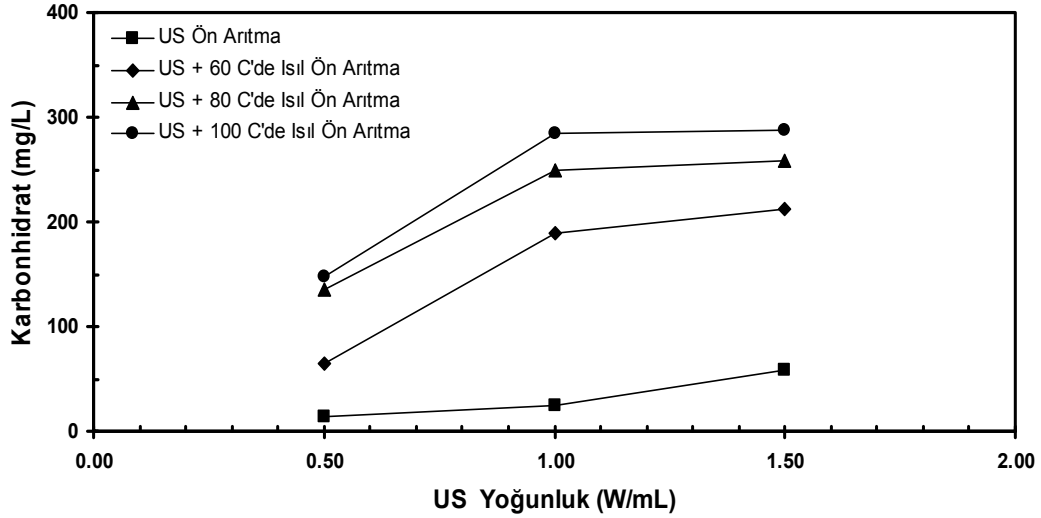


(a)

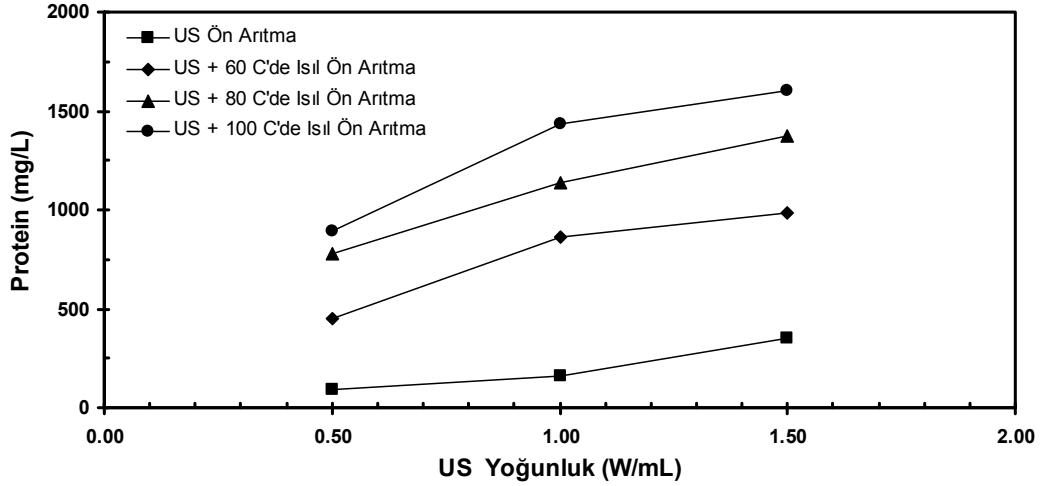
Şekil 4.43. US + ısıl ön arıtmada uygulanan sıcaklığın çamur parçalamaya etkisi.



(b)



(c)

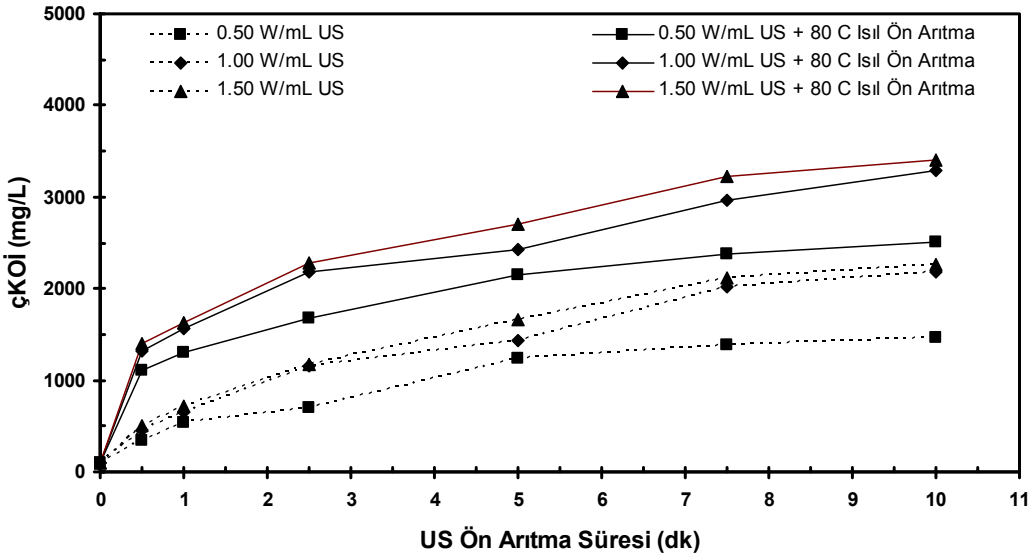


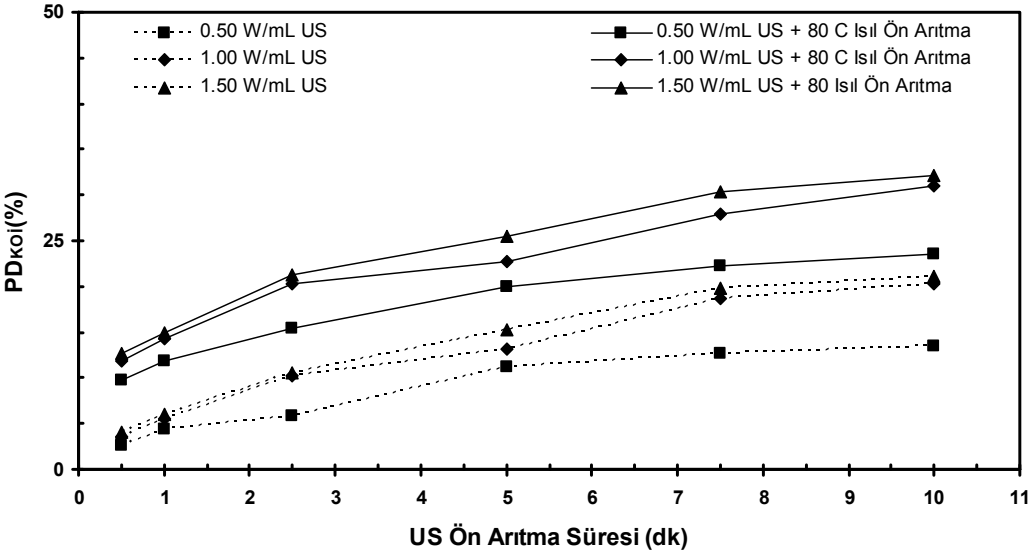
(d)

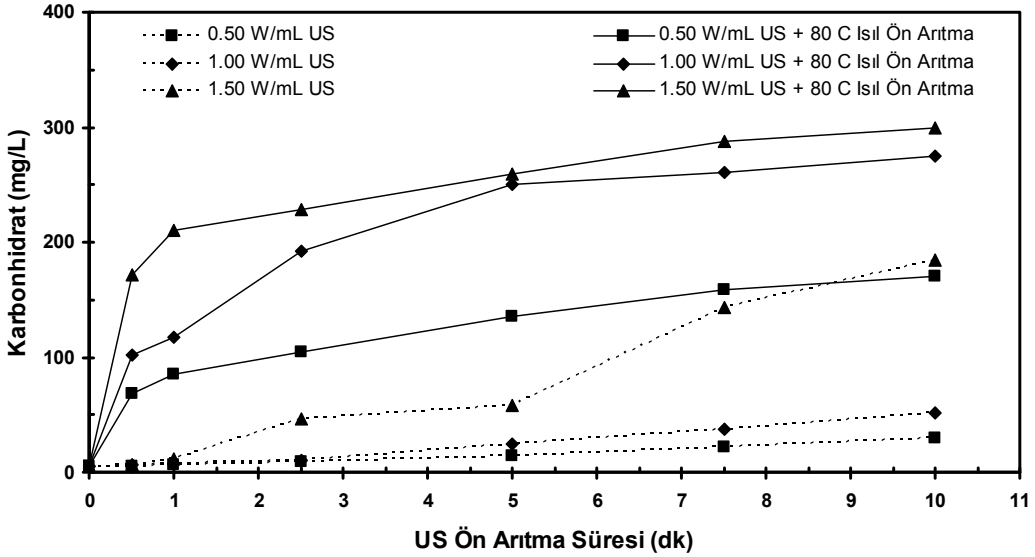
Şekil 4.43. US + ısıl ön arıtmada uygulanan sıcaklığın çamur parçalamaya etkisi (Devam).

4.5.2. US + ısıl ön arıtmada US yoğunluğun çamur parçalamaya etkisi

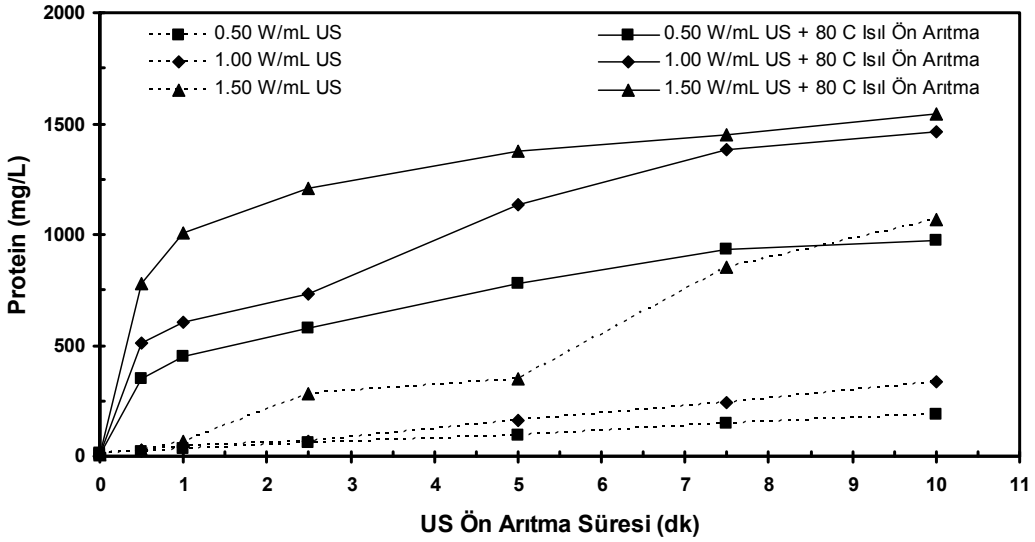
Değişen US şartlarda parçalanan çamur, 80℃ sıcaklıkta ısıl ön arıtma maruz bırakılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.44'te sunulmuştur. US ışınımın, ısıl ön arıtma ile modifiye edilmesi sonucunda çamur parçalama verimi uygulanan tüm şartlarda artmıştır. Özellikle US ışınımın 0.5 ve 1 dk'lık sürelerde uygulandığı durumlarda, bu kombinasyonun US ön arıtmadan çok daha etkili olduğu belirlenmiştir. US ön arıtma kısa süreli uygulamalarda sadece çamur floklarını dağıtabilmiş, ancak çamur parçalamayı tam olarak gerçekleştirememiştir. US ön arıtmanın ısıl ön arıtma ile birlikte uygulanması, dağılan floklardan kopan mikroorganizmaların artan sıcaklıkla parçalanması sonucunda katı fazdan sıvı faza geçen hücrelerarası ve hücre içi polimerik maddelerin salınımını arttırarak çamurun çözünürlüğünü geliştirmiştir. 1.00 W/mL US yoğunlukta ve 0.5, 1, 2.5, 5, 7.5 ve 10 dk'lık sürelerde gerçekleştirilen US ön arıtmanın çamur parçalama verimi, 80℃'de gerçekleştirilen US + ısıl ön arıtma ile elde edilen çamur parçalama verimilerinin sırasıyla % 33, 41, 56, 59, 68 ve 68'i kadardır. Sonuç olarak, US ön arıtma süresinin uzatılması, iki metodun verimleri arasındaki farkının azalmasına neden olmuştur. Bu sonuç, US ön arıtmada çamura uygulanan US enerjinin artışı ile US ön arıtmanın çamur parçalama veriminin artmasından kaynaklanmıştır. Şekil 4.44'te gösterildiği gibi, 1.00 W/mL güç yoğunluğundaki US + ısıl ön arıtmada 0.5 dk'lık US ışınım ile $PD_{KOİ}$ değeri % 10 olmuştur. Aynı güç yoğunluğunda US ön arıtma ile bu verime ulaşabilmek için, 2.5 dk'lık US ön arıtmaya gerek olduğu belirlenmiştir. Çamur çözünürlüğünde elde edilen bu artış, iki farklı metodun ardışık kullanımı sonucunda farklı çamur parçalama mekanizmalarının müşterek çalışmasından kaynaklanmıştır. Sonuç olarak, **kimyasal parametrelere dayanarak US + ısıl ön arıtma için 1.00 W/mL yoğunlukta 1 dk'lık US ışınım ve 80℃'de 1 saatlik ısıl ön arıtma optimum şartlar olarak belirlenmiştir.** Sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.25'de verilmiştir.







Şekil 4.44. US + ısıl ön arıtmada US ışınımın çamur parçalamaya etkisi.



Şekil 4.44. US + ısıl ön arıtmada US ışınımın çamur parçalamaya etkisi (Devam).

4.5.3. US + ısıl ön arıtmanın metan üretimine etkisi

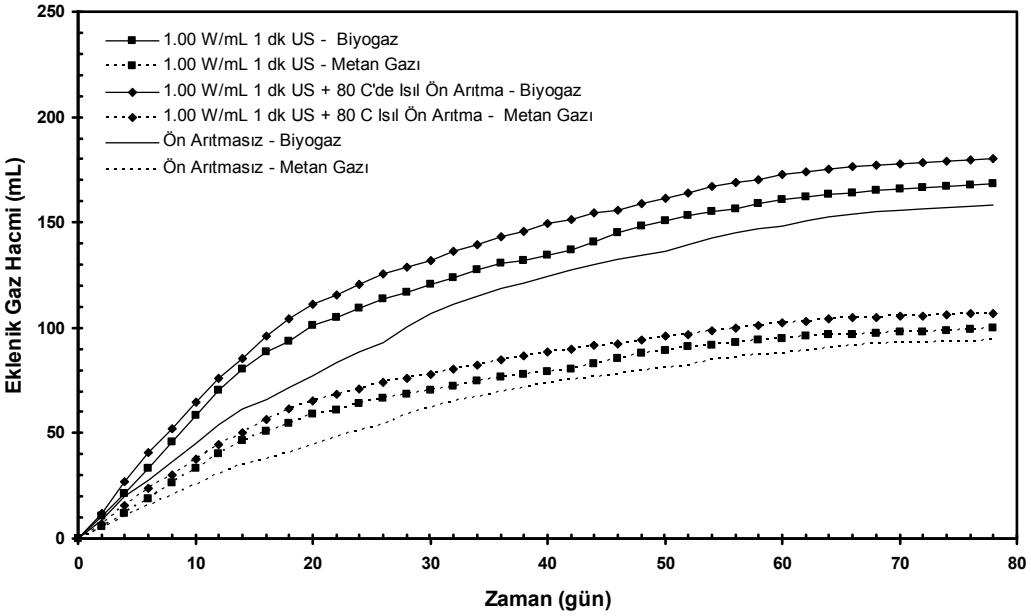
US + ısıl ön arıtma için BMP testi, kimyasal parametrelere dayanarak Bölüm 4.5.2'de belirlenen optimum şartlarda gerçekleştirilmiştir. Biyogaz ve metan üretimleri Şekil 4.45'te gösterilmiştir ve ayrıca Ek – 1'de Çizelge E1.26 ve E1.27'de sunulmuştur. Çamur parçalamada sağlanan artış ile kesikli anaerobik reaktörlerde üretilen biyogaz ve metan üretimleri de artmıştır. 1 dk süre ile 1.00 W/mL'de gerçekleştirilen US ön arıtma ile metan üretimi ham çamur çürütüldüğü reaktöre kıyasla % 5.6 kadar artarken, US + ısıl ön arıtmadan geçmiş çamurda metan üretimi % 13.6 artmıştır (Çizelge 4.5). Ayrıca bu modifikasyonda, çamur çözünürlüğünde sağlanan gelişmenin sonucu olarak tKOİ ve UKM giderimleri arttırılmış ve çamurun çürütülebilirliği de geliştirilmiştir (Çizelge 4.6). Böylece, 1 dk süre ve 1.00 W/mL'de yapılan US ön arıtmanın düşük sıcaklıklı ısıl ön arıtma ile modifiye edilmesi sonucunda çamur çürütme veriminin arttığı da belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, Ek – 1'de Çizelge E1.28'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. US + ısıl ön arıtmanın kesikli anaerobik süreçte toplam biyogaz ve metan üretimine etkisi.

	Biyogaz Artışı (%)	**Metan Artışı (%)**
1.00 W/mL'de 1 dk'lık US ön arıtma	6.3	5.6
1.00 W/mL'de 1 dk'lık US ve 80℃'de ısıl ön arıtma	14.0	13.6

Çizelge 4.6. US + ısıl ön arıtmanın kesikli anaerobik süreçte tKOİ ve UKM giderimine etkisi.

	tKOİ (mg/L)	tKOİ Giderimi (%)	UKM (mg/L)	UKM Giderim (%)
Ham çamur	5250	37.5	5490	25,8
1.00 W/mL'de 1 dk'lık US ön arıtma	4800	42.9	4855	34.4
1.00 W/mL'de 1 dk'lık US ve 80℃'de ısıl ön arıtma	4365	48.0	4605	37.8

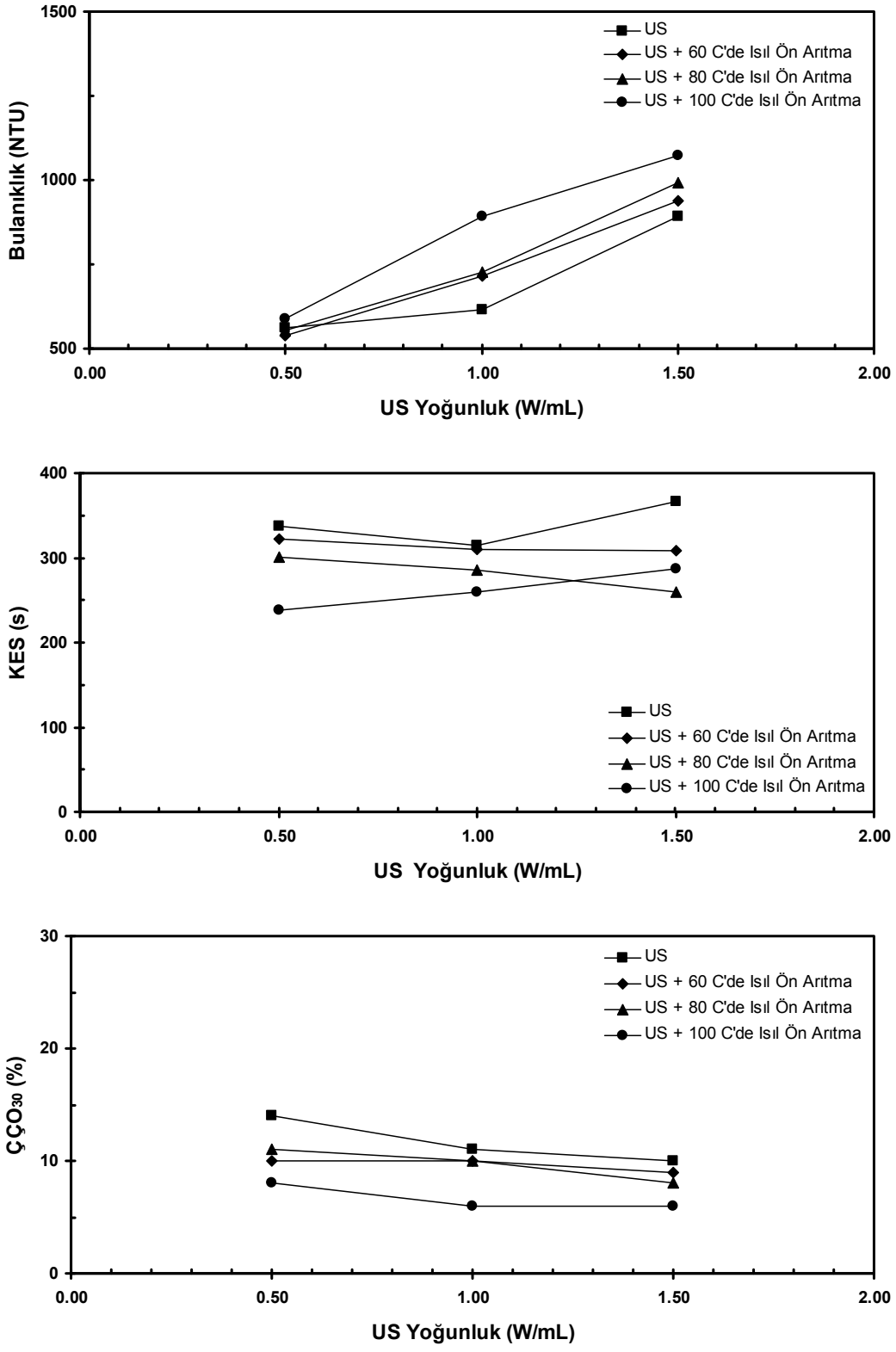


Şekil 4.45. US + ısıl ön arıtmanın biyogaz ve metan üretimine etkisi.

4.5.4. US + ısıl ön arıtmanın çamurun su verme ve çökelebilme özelliklerine etkisi

Bu bölümde öncelikle 0.50, 1.00 ve 1.50 W/mL yoğunluklarda 5 dk süren US ön arıtmadan geçmiş çamurun 60, 80 ve 100 ℃'de ısıl ön arıtmaya maruz kalmasının çamur özeliklerine etkileri incelenmiştir. Artan sıcaklık ile çamurun parçalanması artmış ve bulanıklık da Şekil 4.46'da gösterildiği gibi yükselmiştir. Ancak bulanıklık artarken, KES değeri azalmış ve çamurun su verme özelliği gelişmiştir. Bu zıt değişim, US ve ısıl ön arıtma metotlarının farklı mekanizmanın çamur parçalamayı ve çamurun su verme özelliğini farklı etkilemesinden kaynaklanmıştır. US ışınımdan sonra uygulanan ısıl ön arıtma ile çamur flokları arasında kalan su, serbest bırakılmış ve böylece çamurun su verme özelliği iyileşmiştir. Artan sıcaklığın etkisi ile gerçekleşen ısıl şartlandırma, çamurun çökelebilme özelliğini gelişmiştir. Ancak çamurun çökelebilme özelliğindeki bu gelişme, sınırlı olmuştur. Sonuç olarak, hücresel bileşenlerin salınımı ve parçalanmış taneciklerin kohezyon ve yoğunluğundaki artış ile gerçekleşen flokülasyonun ve

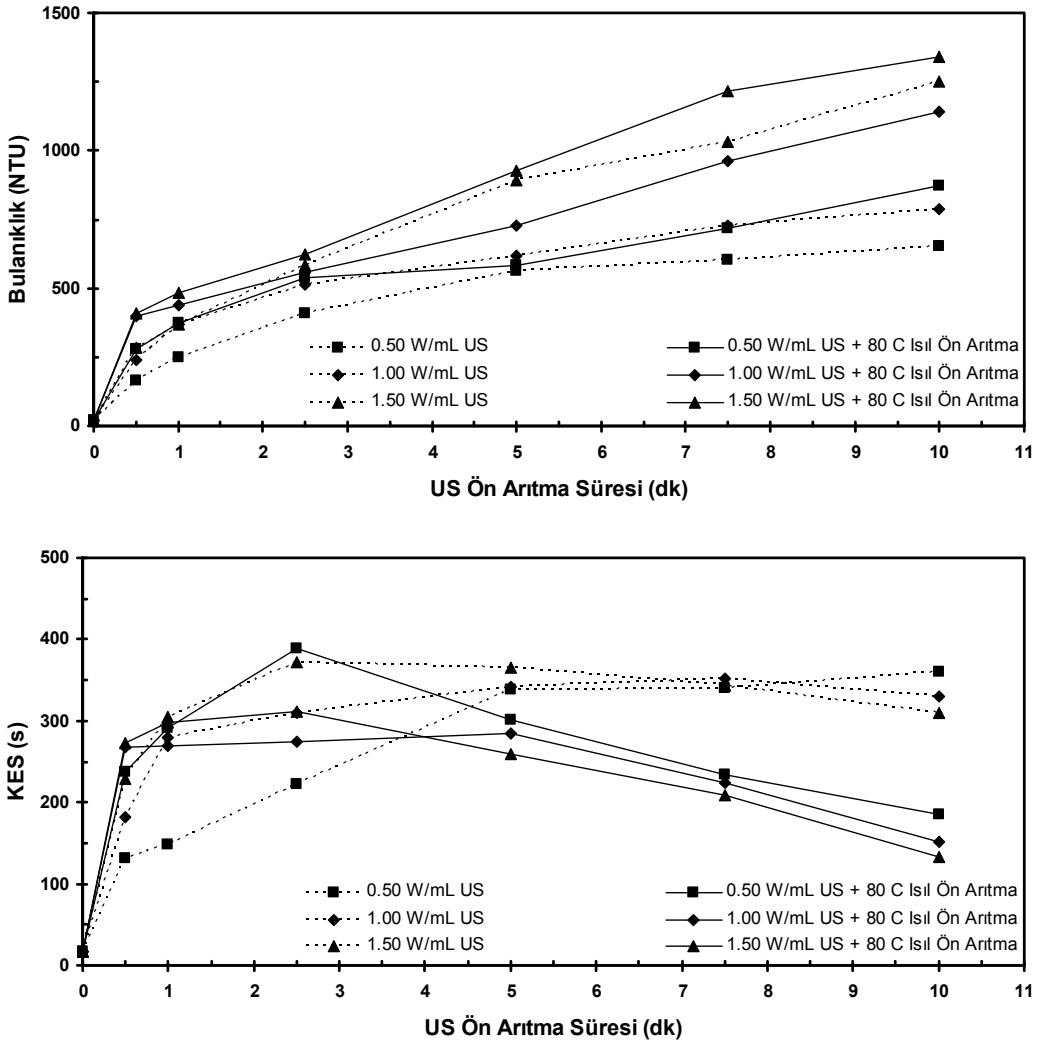
filamentli mikroorganizmaların parçalanmasının çamurun çökelebilme özelliğinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.24'te gösterilmiştir.



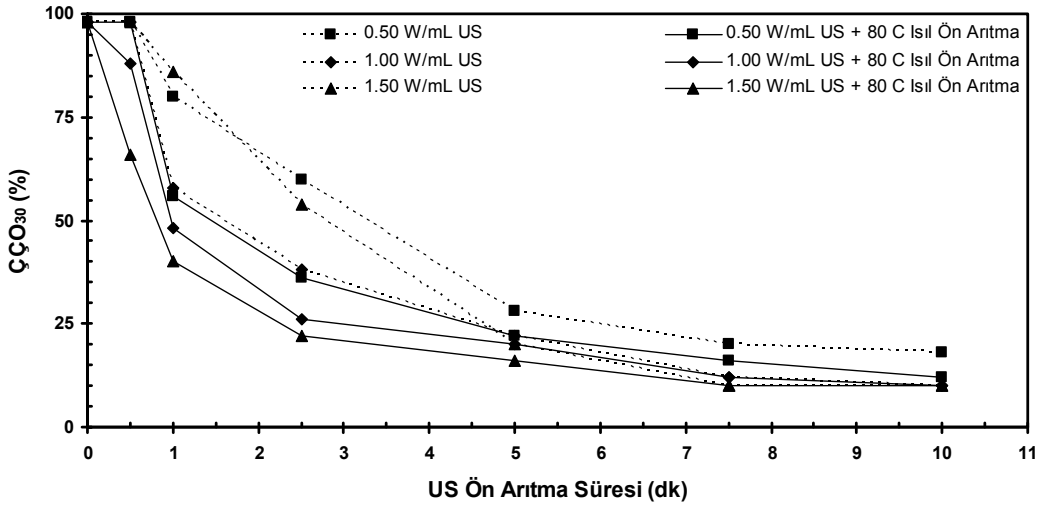
Şekil 4.46. US + ısıl ön arıtmada sıcaklık artışının çamur özelliklerine etkisi.

Değişen US şartların, US + ısıl ön arıtmadan geçmiş çamurun özelliklerine etkisi Şekil 4.47'de gösterilmiştir. Bu metotta US ışınımdan sonra uygulanan ısıl ön arıtma,

çamurun parçalanmasını geliştirdiği için çamurun bulanıklığını da arttırmıştır. Çamurun su verme özelliği ise 2.5 dk'ya kadar US ışınımın uygulandığı US + ısıl ön arıtma kombinasyonunda kötüleşmiştir. Bu sonuç kısa süreli US ışınımın çamuru parçalamak için yeterli olamamasından ve çamur parçalamanın ısıl ön arıtma ile sağlanmasından kaynaklanmıştır. Artan US ışınım sürelerinde ise, US + ısıl ön arıtma kombinasyonunun çamur susuzlaştırılmasında daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Şekil 4.47). KES değerlerindeki bu azalma, US ışınım ile parçalanmış çamur tanecikleri arasında tutulan suyun artan sıcaklık ile serbest bırakılmasından kaynaklanmıştır. Çamur parçalama verimindeki artışa bağlı olarak Şekil 4.47'de gösterildiği gibi çamurun çökelebilirliği de gelişmiştir. Çökelebilme özelliğindeki bu gelişme Bölüm 4.1.1.4'de açıklanan nedenlerden dolayı gerçekleşmiştir. Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.47. US + ısıl ön arıtmada farklı şartlardaki US ışınımın çamur özelliklerine etkisi.



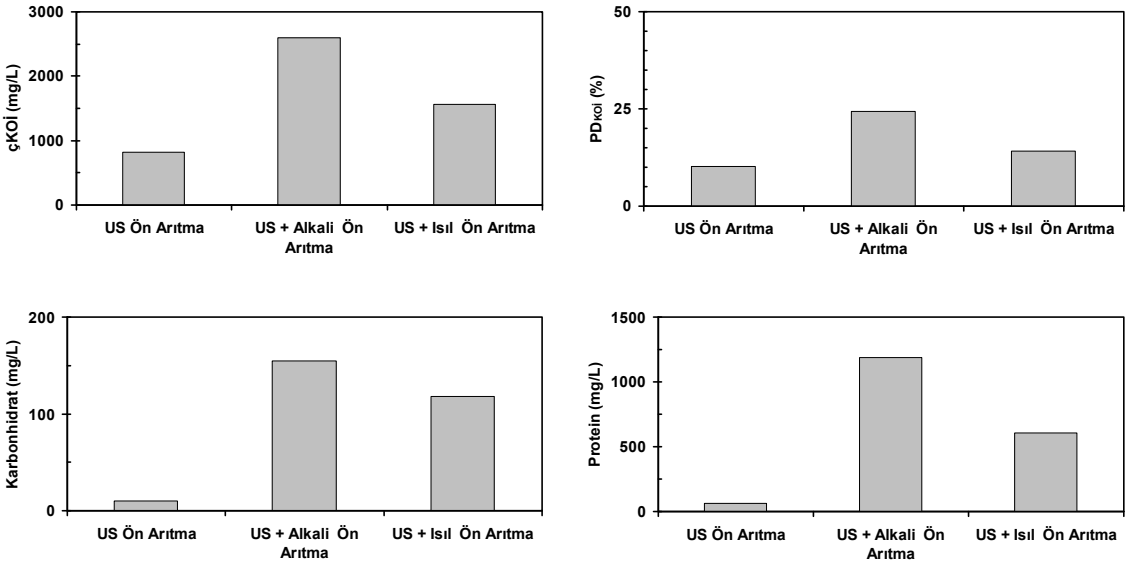
Şekil 4.47. US + ısıl ön arıtmada farklı şartlardaki US ışınımın çamur özelliklerine etkisi (Devam).

4.6. Kısa Süreli US Ön Arıtma, US + Alkali Ön Arıtma ve US + Isıl Ön Arıtma Metotlarının Çamur Parçalama Verimlerinin Karşılaştırması

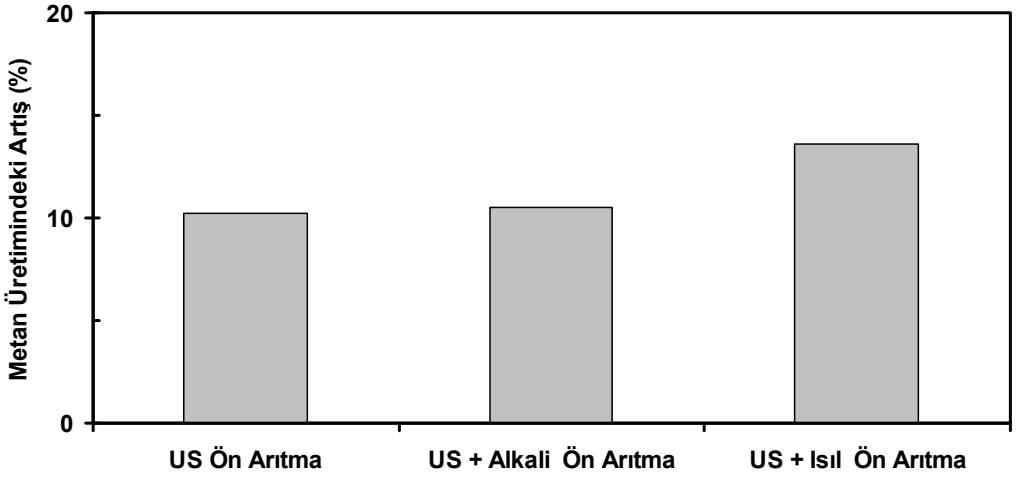
Bu bölümde US ışınımın kısa sürelerde uygulandığı US ön arıtma, US + alkali ön arıtma ve US + ısıl ön arıtmanın çamur parçalama verimleri kimyasal ve biyolojik parametrelere dayanarak belirlenen optimum şartlardaki verimleri kıyaslanmıştır. Optimum şartlar US ön arıtma için 1.00 W/mL'de 1 dk'lık US ışınım, US + alkali ön arıtma için 1.00 W/mL'de 1 dk'lık US ışınım ve 0.05 N NaOH uygulaması ve US + ısıl ön arıtma için ise 1.00 W/mL'de 1 dk'lık US ışınım ve 80℃'de ısıl uygulama olarak belirlenmiştir. Şekil 4.48'de gösterildiği gibi, US ön arıtmanın alkali ve ısıl ön arıtma metotları ile modifiye edilmesi, farklı çamur parçalama mekanizmalarını birlikte çalıştırarak süreç verimini arttırmıştır. Çamur parçalamada en yüksek verim ise US + alkali ön arıtmada elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında kimyasal parametrelere ilave olarak metan üretim potansiyelleri de incelenmiştir. En yüksek çamur parçalama verimi US + alkali ön arıtmada elde edilmiş olmasına rağmen, metan üretimi (ön arıtılmamış ham çamura kıyasla) en fazla US + ısıl ön arıtmada artmıştır (Şekil 4.49). Bu beklenmedik sonuç, reaktörlerdeki kesikli şartlardaki işletmeden kaynaklanmış olabilir. Öte yandan, 1 L çamurun US ön arıtımı için 2.5 kW, US + alkali ve US + ısıl ön arıtımı için ise 1.0 kW enerjiye ihtiyaç vardır. Ancak US + ısıl ön arıtmada, US ön arıtmadan sonra, çamurun yaklaşık 40℃'den 80℃'ye ısıtılması da gerekmektedir. Bu, hem sürecin ilk yatırım ve işletme maliyetlerini arttıracak hem de tesisteki işletme şartlarını zorlayabilecek bir durumdur. US ışınımdan sonra çamuru ısıtmak için harcanacak enerji düşünülecek

olursa, metan üretimindeki artış da ihmal edilebilir seviyede kalmıştır. Bu nedenle, **US ışınım süresini 2.5 dk'dan 1 dk'ya kısaltarak enerji sarfiyatında ciddi bir azalma (% 60) sağlayan US + alkali ön arıtmanın, çalışılan diğer metotlara kıyasla çok daha ekonomik ve etkili bir metot olduğu belirlenmiştir.** Ayrıca birim zamanda parçalanacak çamur miktarı US ünitelerinin ilk yatırım maliyetlerini önemli derecede etkilediği için, US + alkali ön arıtmanın uygulanması bu ünitelerin kurulum maliyetini yarı yarıya azaltabileceği de belirlenmiştir.



Şekil 4.48. Süreç verimlerinin karşılaştırılması.



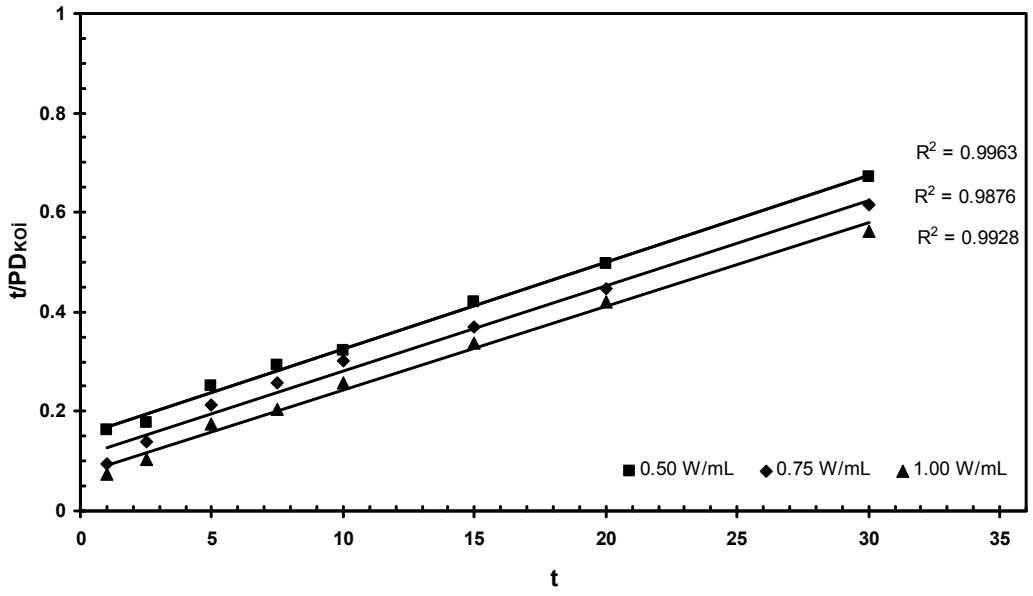
Şekil 4.49. Metan üretim verimlerinin karşılaştırması.

4.7. Ön Arıtma Metotlarının Modellenmesi

Bu bölümde, uzun ve kısa süreli US ön arıtma, alkali ön arıtma, US + alkali ön arıtma ve US + ısıl ön arıtma ile çamur parçalamanın matematiksel modelleme sonuçları sunulmuştur.

4.7.1. Uzun süreli US ön arıtmanın modellemesi

Uzun süreli US ön arıtmada US yoğunluk (P_Y) ve ön arıtma süresinin (t), $PD_{KOİ}$'ye etkisinin tahmin edilebilmesi için Eşitlik (10)'da verilen doğrusallaştırılmış model, modifiye edilerek kullanılmıştır. Uygulanan matematiksel model için öncelikle t'ye karşı birim parçalanmanın elde edildiği zamanın ($t/PD_{KOİ}$) grafiği çizilmiştir (Şekil 4.50).



Şekil 4.50. Uzun süreli US ön arıtmada $PD_{KOİ}$ verilerinin model ile doğrusallaştırılması.

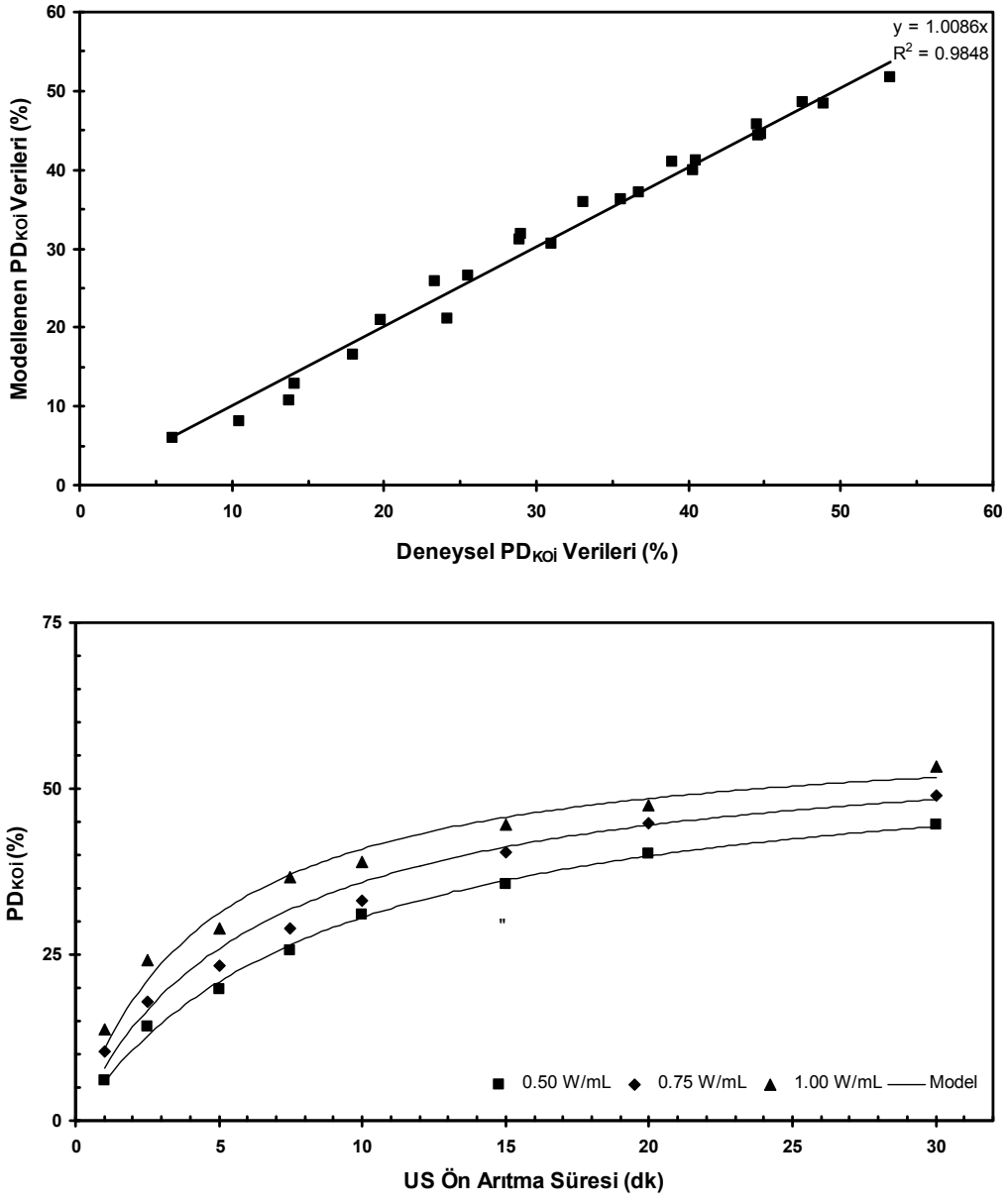
Şekil 4.50'de gösterildiği gibi, deneysel verilerin iki aşamalı matematiksel model ile doğrusallaştırılması sonucunda yüksek belirleme katsayısı (R^2) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, modelin tutarlı sonuçlar verebileceğini göstermiştir.

Güç yoğunluğundaki artış, hem çamurun çözünme hızının (*1/a*) hem de maksimum çözünme kapasitesinin (*1/b*) artmasına neden olmuştur (Şekil 4.51). Yani uygulanan üç farklı US yoğunluk için üç farklı *a* ve *b* sabiti vardır. *a* ve *b* sabitleri Şekil 4.50'de elde edilen doğrulardan belirlenmiştir. Hesaplanan farklı *a* ve *b* sabitlerini ifade edebilen sadece bir tane *a* ve *b* sabitinin bulunabilmesi için, uygulanan üç farklı güç

yoğunluğuna karşı elde edilen *a* ve *b* değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerde elde edilen doğruların R^2 değerlerinin, *a* ve *b* değerleri için sırasıyla 0.9971 ve 0.9998 olduğu belirlenmiştir. Bu iki doğrunun denklemlerinin Eşitlik (10)'a yerleştirilmesi ile uzun süreli US ön arıtma için model denklemi türetilmiştir ve Eşitlik (16)'da verilmiştir. Model katsayılarının (*a* ve *b*) belirlenmesi için çizilen grafikler Ek – 2'de Şekil E2.1'de gösterilmiştir.

$$PD_{KOİ} = \frac{t}{[0.0763 - 0.1091 \cdot \ln P_Y + (0.0168 - 0.0010 \cdot P_Y) \cdot t)]} \qquad (16)$$

Bu matematiksel modelden elde edilen veriler ile deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 4.51'de verilmiştir.

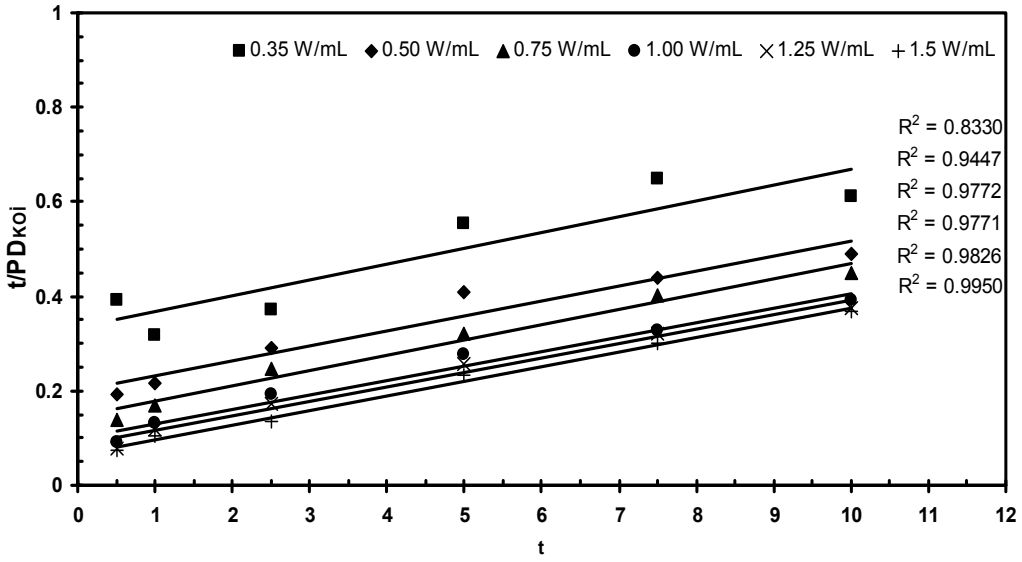


Şekil 4.51. Uzun süreli US ön arıtmanın deneysel verilerinin model verileri ile ilişkisi.

Geliştirilen deneysel matematiksel modeli kullanarak türetilen verilerin, deneysel çalışmada elde edilen veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.51). Böylece modelin, sabit TKM içeriğindeki çamurların uzun süreli US ön arıtımında başarı ile kullanılabileceği belirlenmiştir.

4.7.2. Kısa süreli US ön arıtmanın modellemesi

Kısa süreli US ön arıtmada US yoğunluk (P_Y) ve ön arıtma süresinin (t), $PD_{KOİ}$'ye etkisinin tahmin edilebilmesi için Eşitlik (10)'da verilen doğrusallaştırılmış model modifiye edilmiştir. Uygulanan matematiksel model için öncelikle t'ye karşı birim parçalanmanın elde edildiği zamanın ($t/PD_{KOİ}$) grafiği çizilmiştir (Şekil 4.52).

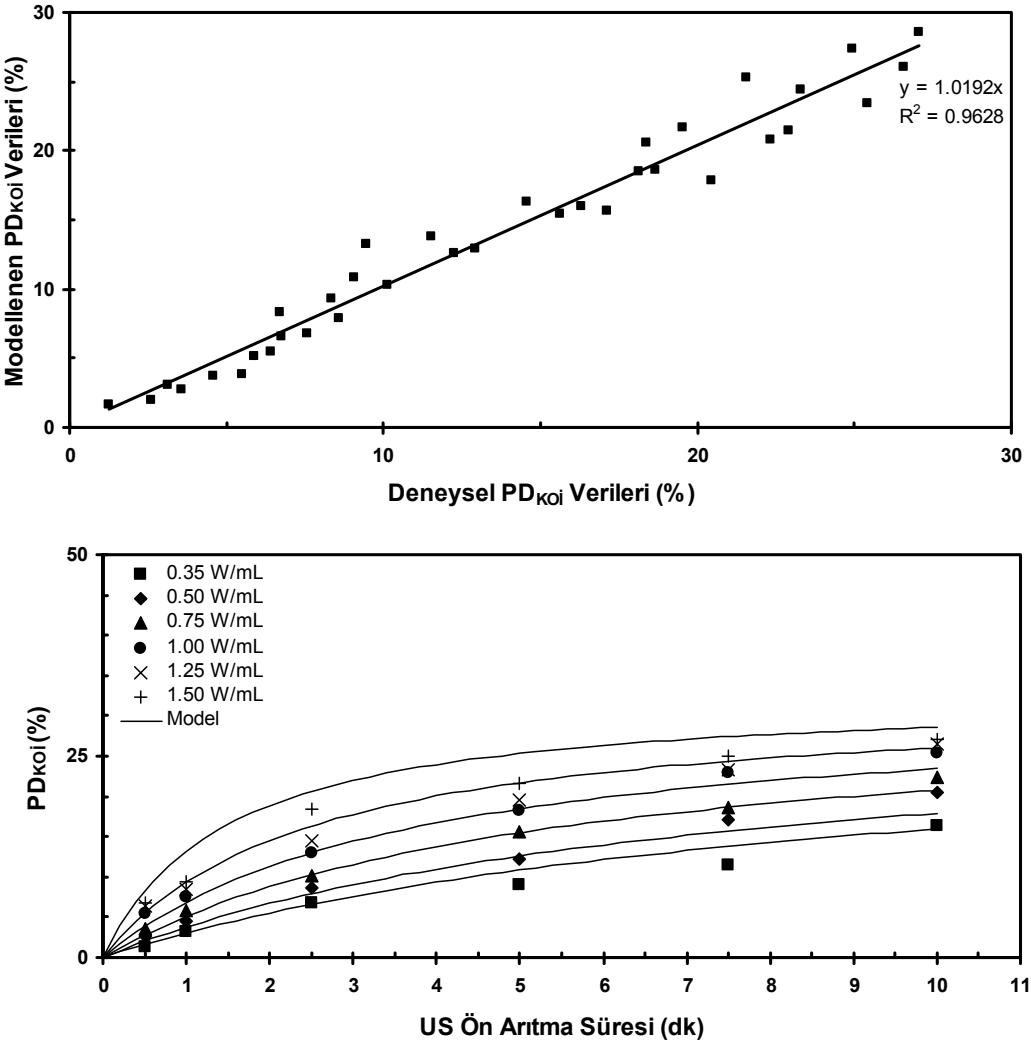


Şekil 4.52. Kısa süreli US ön arıtmada $PD_{KOİ}$ verilerinin model ile doğrusallaştırılması.

Uygulanan her bir US yoğunlukta elde edilen $PD_{KOİ}$ verileri kullanılarak model sabitleri belirlenmiştir. Şekil 4.53'de gösterildiği gibi, uygulanan US güçteki artış ile *1/a* ve *1/b* değerleri de büyüyeceği için, elde edilen 6 farklı *a* ve *b* değerinden modelde kullanılabilecek tek bir değerin türetilebilmesi için US yoğunluklara karşı *a* ve *b* değerlerinin grafikleri çizilmiştir. *a* ve *b* değerileri için R^2 değerlerinin sırasıyla 0.9232 ve 0.6789 olduğu belirlenmiştir. Model katsayılarının belirlenmesi için çizilen grafikler Ek – 2'de Şekil E2.2'de gösterilmiştir. Elde edilen iki doğrunun denklemlerinin Eşitlik (10)'a yerleştirilmesi ile kısa süreli US ön arıtma için model denklemi türetilmiştir (Eşitlik 17).

$$PD_{KOİ} = \frac{t}{[0.1150 - 0.1725 \cdot \ln P_Y + (0.0312 - 0.0018 \cdot P_Y) \cdot t)]} \quad (17)$$

Geliştirilen modelin tutarlılığı Şekil 4.53'de gösterilmiştir.



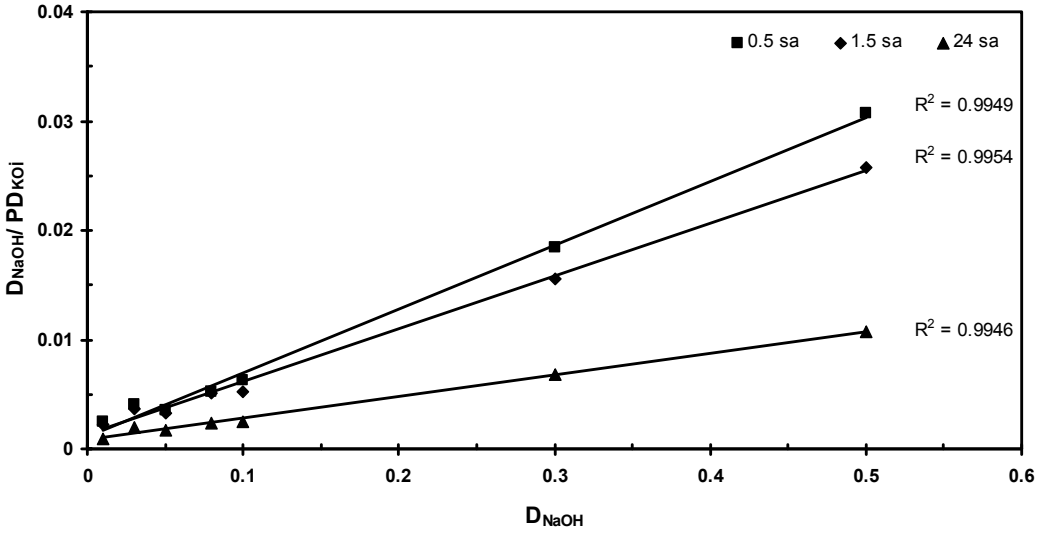
Şekil 4.53. Kısa süreli US ön arıtmanın deneysel verilerinin model verileri ile ilişkisi.

Geliştirilen bu model ile türetilen verilerin, deneysel çalışmada elde edilen veriler ile büyük oranda uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.53). Böylece kısa süreli US ön arıtma için bu modelin uygulanabileceği belirlenmiştir.

4.7.3. Alkali ön arıtmanın modellemesi

Alkali ön arıtmanın modellemesi uzun ve kısa süreli US ön arıtmalarda olduğu gibi zamana bağlı olarak değil; Bölüm 3.6'da anlatıldığı gibi 0.5, 1.5 ve 24 saatlik ön

arıtma sürelerinde uygulanan NaOH dozuna (D_{NaOH}) bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Alkali ön arıtmanın veriminin tahmin edilebilmesi için Eşitlik (11) modifiye edilerek kullanılmıştır. Modelin uygulanmasının ilk adımı olarak D_{NaOH}'e karşı spesifik alkali dozunun ($D_{NaOH}/PD_{KOİ}$) grafiği çizilmiştir (Şekil 4.54).

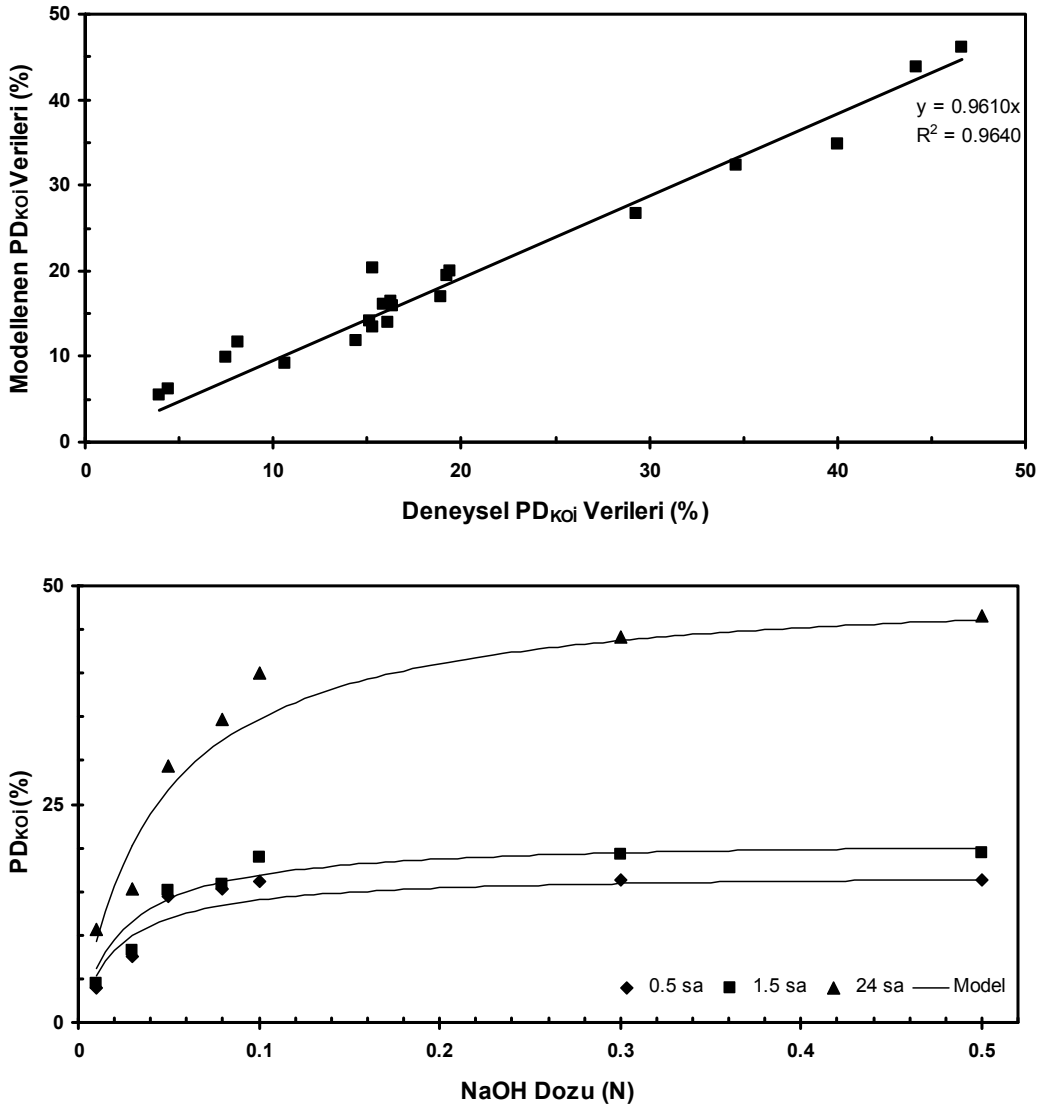


Şekil 4.54. Alkali ön arıtmada $PD_{KOİ}$ verilerinin model ile doğrusallaştırılması.

Şekil 4.55'den de anlaşılacağı gibi, alkali ön arıtma süresinin uzaması ile çamurun çözünme hızı (*1/a*) ve maksimum çözünme kapasitesi (*1/b*) artacağı için, model sabitleri belirlenmiştir. Üç farklı ön arıtma süresi için elde edilen üç farklı *a* ve *b* değerini kullanılabilecek tek bir değere indirilebilmesi için, ön arıtma süresine karşı *a* ve *b* değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Model katsayılarının belirlenmesi için çizilen grafikler Ek – 2'de Şekil E2.3'te gösterilmiştir. Elde edilen doğruların R^2 değerleri, *a* ve *b* değerileri için sırasıyla 0.7956 ve 0.9994 olmuştur. Elde edilen iki doğrunun denklemlerinin, Eşitlik (11)'e yerleştirilmesi ile alkali ön arıtma için model denklemi türetilmiştir (Eşitlik 18).

$$PD_{KOİ} = \frac{D_{NaOH}}{[0.0012 - 0.0001 \cdot \ln t + (0.0517 - 0.0100 \cdot \ln t) \cdot D_{NaOH})]} \qquad (18)$$

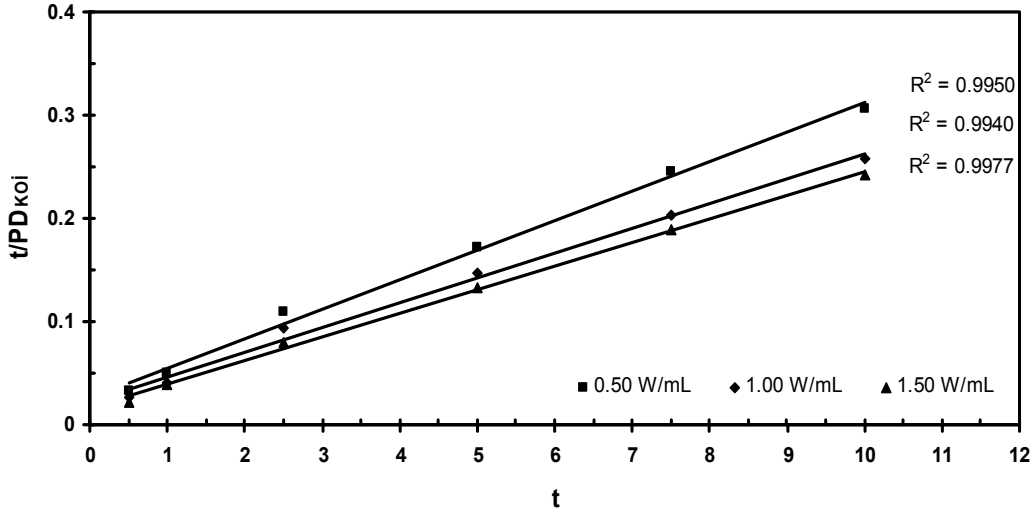
Modelin tutarlılığı Şekil 4.55'de gösterilmiştir. Modeli kullanarak türetilen verilerin, deneysel çalışmada elde edilen veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.55). Böylece alkali ön arıtımında, bu modelin uygulanabileceği tespit edilmiştir.



Şekil 4.55. Alkali ön arıtmanın deneysel verilerinin model verileri ile ilişkisi.

4.7.4. US + alkali ön arıtmanın modellemesi

US + alkali ön arıtmanın modellemesi, Bölüm 4.4'te sunulan US + alkali ön arıtma için sabit (0.05 N) NaOH dozunda ve değişen US şartlarda gerçekleştirilen ön çalışma sonuçları dikkate alınarak yapılmıştır. Bu kombine metodun veriminin tahmin edilebilmesi için Eşitlik (10) modifiye edilerek kullanılmıştır. Alkali dozu sabit olduğu için modeldeki bağımsız değişkenler US yoğunluk (P_Y) ve ön arıtma süresi (t)'dir. Uygulanan üç farklı güç yoğunluğu için t'ye karşı $t/PD_{KOİ}$ grafiği çizilmiştir (Şekil 4.56).



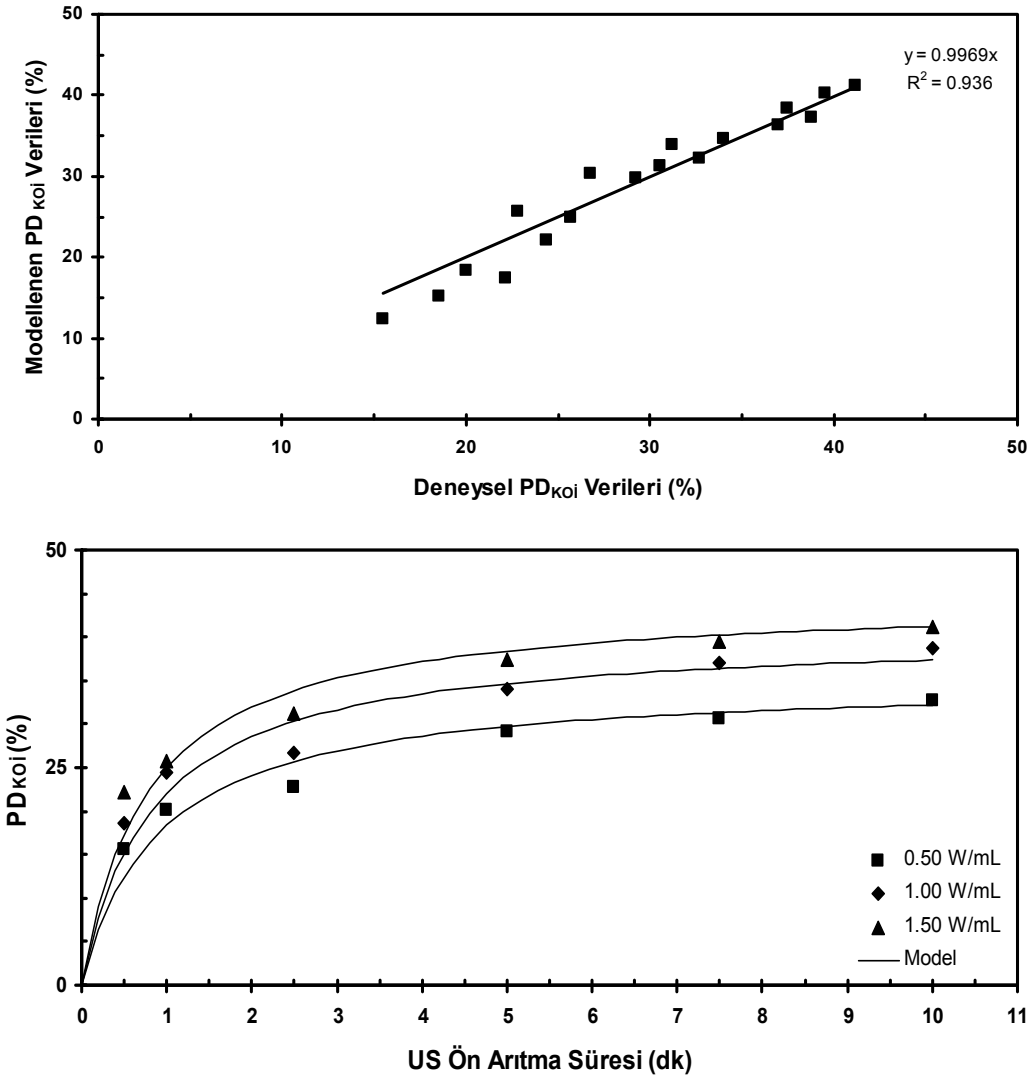
Şekil 4.56. US + alkali ön arıtmada $PD_{KOİ}$ verilerinin model ile doğrusallaştırılması.

Deneysel veriler, model kullanılarak doğrusallaştırılmış ve R^2 değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Uygulanan US yoğunluktaki artış ile hem çamurun çözünme hızı (*1/a*) hem de maksimum çözünme kapasitesi (*1/b*) artacağı için (Şekil 4.57), önce Şekil 4.56'dan uygulanan her bir US yoğunluk için ayrı ayrı model sabitleri belirlenmiştir. Uygulanan üç farklı güç yoğunluğuna karşı *a* ve *b* değerlerinin grafikleri çizilmiştir. *a* ve *b* değerileri için elde edilen doğruların R^2 değerlerinin sırasıyla 0.9232 ve 0.6789 olduğu belirlenmiştir. Model katsayılarının belirlenmesi için çizilen grafikler Ek – 2'de Şekil E2.4'te gösterilmiştir. *a* ve *b* değerlerini hesaplayabilmek için türetilen denklemlerin Eşitlik (10)'a yerleştirilmesi ile US + alkali ön arıtma için model denklemi geliştirilmiştir (Eşitlik 19).

$$PD_{KOİ} = \frac{t}{[0.1150 - 0.1725 \cdot \ln P_Y + (0.0312 - 0.0018 \cdot P_Y) \cdot t)]} \qquad (19)$$

Geliştirilen model ile deneysel veriler, Şekil 4.57'de gösterilmiştir.

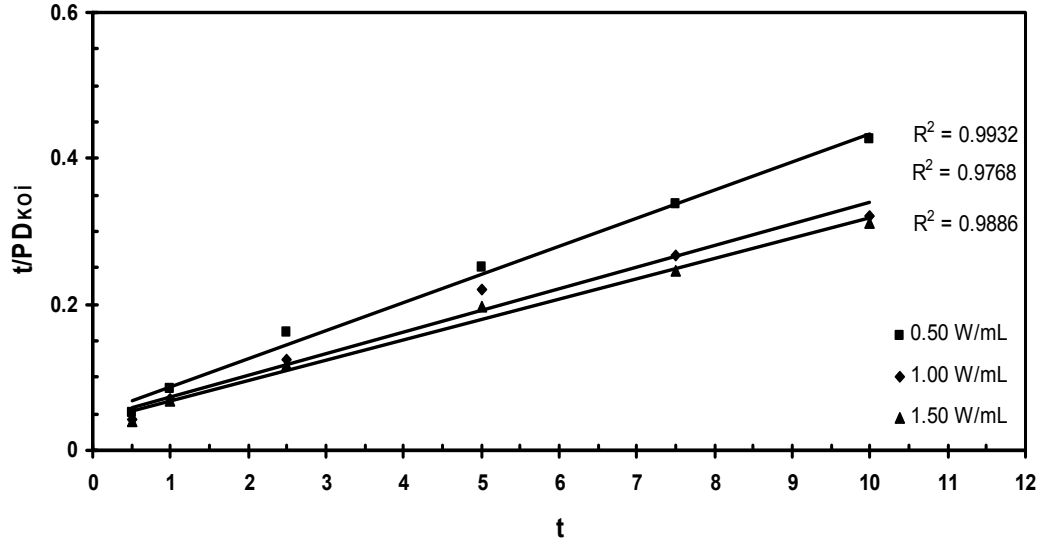


Şekil 4.57. US + alkali ön arıtmanın deneysel verilerinin model verileri ile ilişkisi.

Böylece, model verilerinin, deneysel çalışmada elde edilen veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.57). Sonuç olarak, US + alkali ön arıtma için bu modelin başarı ile uygulanabileceği belirlenmiştir.

4.7.5. US + ısıl ön arıtmanın modellemesi

US + ısıl ön arıtmanın modellemesi, Bölüm 4.5.2'de sunulan US + ısıl ön arıtmanın 80℃ sabit sıcaklıkta ve değişen US şartlarda gerçekleştirildiği deney sonuçları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu ön arıtma metodunda uygulanan sıcaklık sabit olduğu için modelde US yoğunluk (P_Y) ve ön arıtma süresi (t) dikkate alınmıştır. Eşitlik (10) modifiye edilerek bu kombinasyonun modellenmesinde kullanılmıştır. 3 farklı güç yoğunluğu için de t'ye karşı $t/PD_{KOİ}$ grafiği çizilmiştir ve Şekil 4.58'de gösterilmiştir.



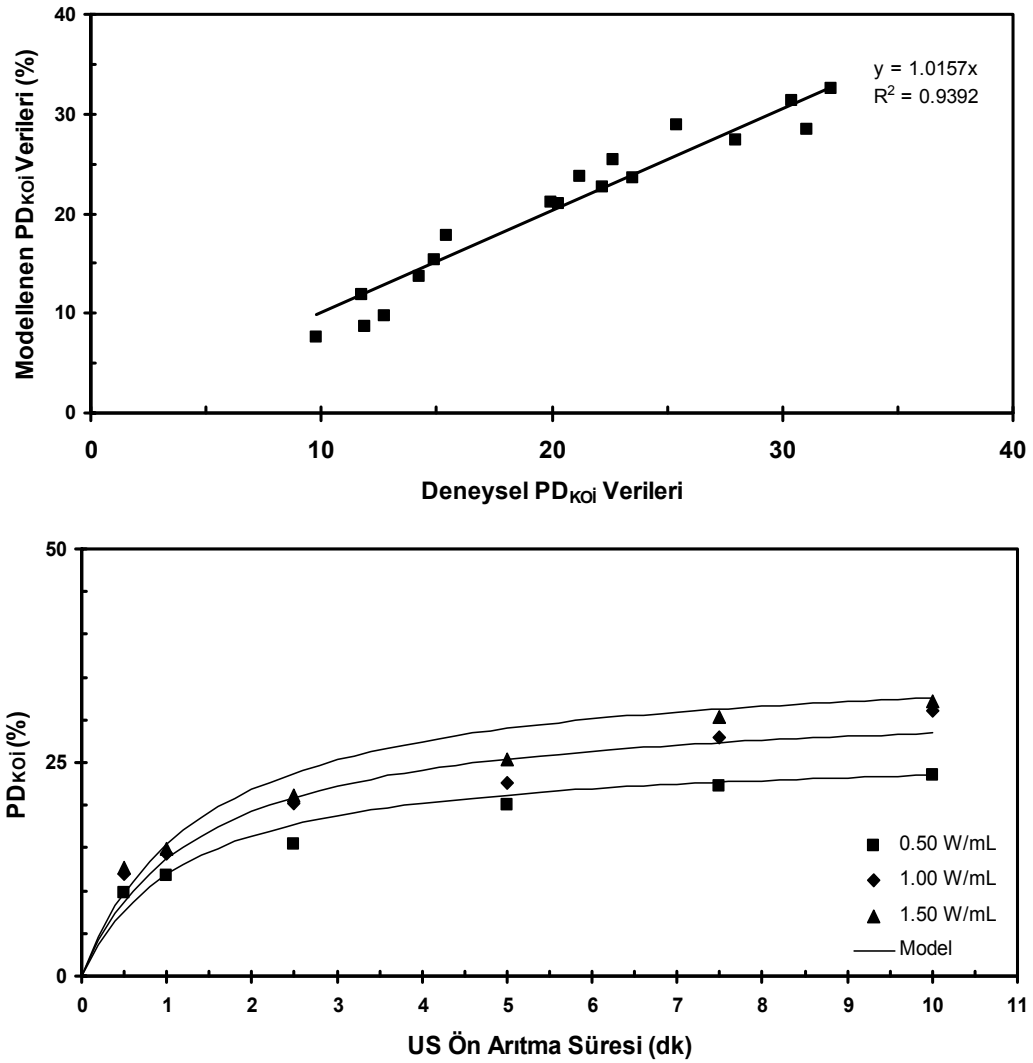
Şekil 4.58. US + ısıl ön arıtmada $PD_{KOİ}$ verilerinin model ile doğrusallaştırılması.

Model kullanılarak deneysel veriler doğrusallaştırılmış ve R^2 değerlerinin 1.0'e oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Şekil 4.59'da gösterildiği gibi, uygulanan US yoğunluktaki artış ile hem çamurun çözünme hızının (*1/a*) hem de maksimum çözünme kapasitesinin (*1/b*) artışı ile sonuçlanacağı için, model sabitleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Uygulanan üç farklı güç yoğunluğu için güç yoğunluklarına karşı *a* ve *b* değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Model katsayılarının belirlenmesi için çizilen grafikler Ek – 2'de Şekil E2.5'te gösterilmiştir. *a* ve *b* değerileri için elde edilen doğruların R^2 değerlerinin sırasıyla 0.9993 ve 0.9424 olduğu belirlenmiştir. Katsayıları hesaplayabilmek için elde edilen denklemler, Eşitlik (10)'a yerleştirilmiş ve böylece model denklemi türetilmiştir (Eşitlik 20).

$$PD_{KOİ} = \frac{t}{[0.0503 - 0.0083 \cdot P_Y + (0.0310 - 0.0100 \cdot P_Y) \cdot t)]} \qquad (20)$$

Geliştirilen modelin tutarlılığı Şekil 4.59'da gösterilmiştir.



Şekil 4.59. US + ısıl ön arıtmanın deneysel verilerinin model verileri ile ilişkisi.

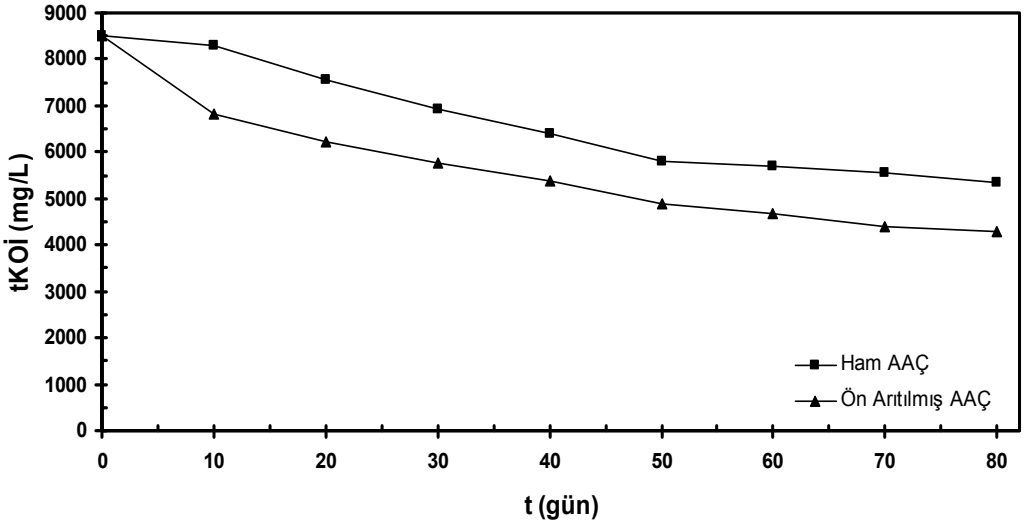
Model verilerinin, deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.59). Böylece US + ısıl ön arıtma için bu modelin uygulanabileceği belirlenmiştir.

4.8. Anaerobik Çamur Çürütmenin Kinetiği

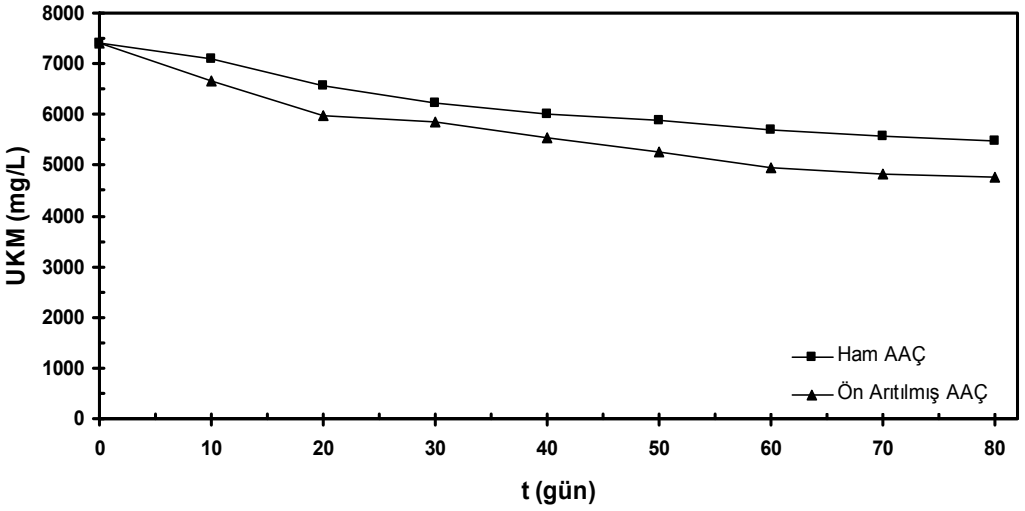
Kinetik çalışmalar, ham çamur ve Bölüm 4.4.2'de belirlenen şartlarda US + alkali ön arıtmadan geçmiş AAÇ için kesikli çürütücülerde gerçekleştirilmiştir. 8 reaktörden oluşan birinci seri reaktörlerde ön arıtmanın uygulanmadığı ham çamur ve ikinci seri reaktörlerde ise US + alkali ön arıtma için belirlenen optimum şartlarda ön arıtmadan geçmiş çamur çürütülmüştür. Kinetik deneyler, US + alkali ön arıtma için gerçekleştirilen BMP testleri ile aynı şartlarda yürütülmüştür. Reaktörlerde biyogaz ve metan gazı ölçümleri iki günde bir yapılmıştır. Çürütme sonunda kalan tKOİ ve UKM konsantrasyonları reaktörler açıldıktan sonra ölçülmüştür. Reaktörlerin kinetik açıdan

incelenmesi, ön arıtmanın çamur çürütme sürecinin hızına etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Sonuçlar ayrıca Ek – 1'de Çizelge E1.29'da sunulmuştur.

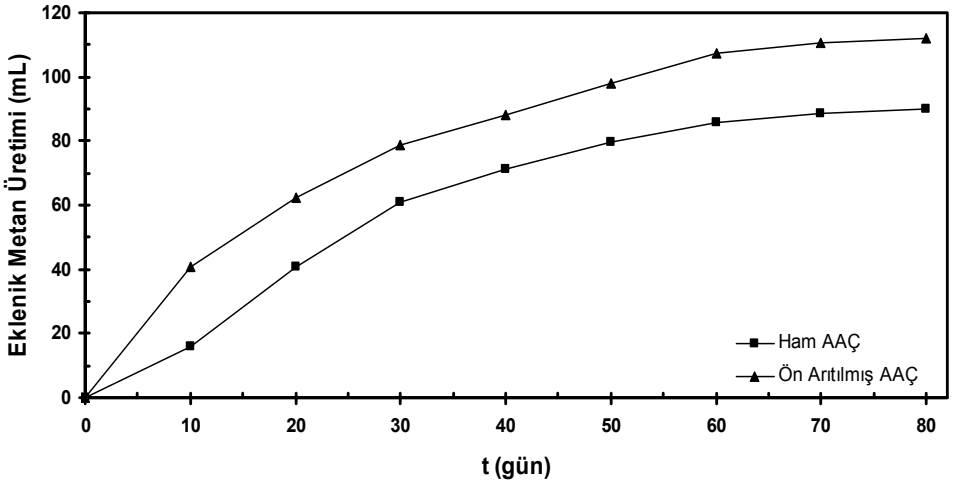
Ham ve ön arıtılmış çamurların çürütülmesi sırasında tKOİ ve UKM konsantrasyonlarında zamana bağlı olarak gerçekleşen azalma Şekil 4.60 ve 4.61'de gösterilmiştir. Uygulanan ön arıtma, çamurun çözünürlüğünü arttırmış ve anaerobik süreçte hız sınırlayan ve biyokimyasal bir aşama olan hidrolizi fizikokimyasal şartlarda gerçekleştirmiştir. Böylece, ön arıtmalı kesikli reaktörlerde tKOİ ve UKM giderimleri daha hızlı ve daha çok olmuştur. Ön arıtmasız reaktörlerde ise çamur çürütme veriminin daha az olduğu belirlenmiştir. Bu reaktörlerde, öncelikle atık çamurun hidrolize olması gerektiği için özellikle ilk 10 günde tKOİ ve UKM giderimlerinin daha az gerçekleştiği ve bir lag faz döneminin olduğu görülmüştür. Başlangıçta 8500 mg/L olan tKOİ konsantrasyonu ilk 10 günde ön arıtmalı reaktörde 6825 mg/L'ye, ön arıtmasız reaktörde ise 8300 mg/L'ye düşmüştür. Benzer şekilde, başlangıçta 7400 mg/L olan UKM konsantrasyonu ilk 10 günde ön arıtmalı reaktörde 6660 mg/L, ön arıtmasız reaktörde ise 7100 mg/L olmuştur. İlk 10 günden sonra ön arıtmalı reaktörlerde Şekil 4.60 ve 4.61'de gösterildiği gibi tKOİ ve UKM giderim hızları biraz azalmış; ön arıtmasız reaktörlerde ise artmıştır. Bu sonuç, ön arıtmasız reaktörlerde uzayan süre ile çamurun hidrolize olmasından kaynaklanmıştır. Kesikli reaktörlerde elde edilen tKOİ ve UKM giderimlerinin, Şekil 4.62'deki eklenik metan üretimleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.60. Kesikli anaerobik çamur çürütücülerde tKOİ giderimi.



Şekil 4.61. Kesikli anaerobik çamur çürütücülerde UKM giderimi.

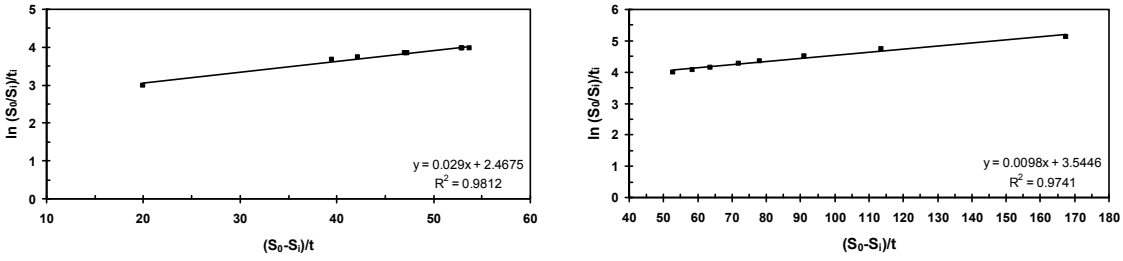


Şekil 4.62. Kesikli çamur çürütücülerde üretilen eklenik metan miktarı.

4.8.1. Kesikli reaktörlerde tKOİ ve UKM giderimlerinin kinetiği

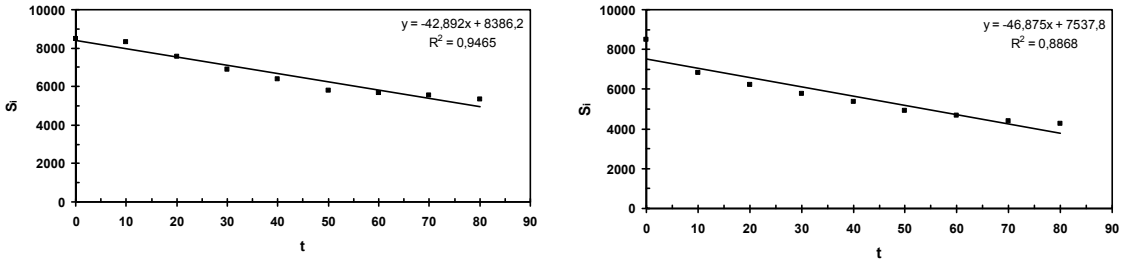
Kinetik çalışmasının sonuçlarına Bölüm 3.7.3'te anlatıldığı gibi Monod eşitliği ve sıfırıncı, birinci ve ikinci derece kinetikler uygulanmıştır. Ham ve ön arıtılmış çamurlar için tKOİ giderimlerinin kinetikleri Şekil 4.63'te ve UKM giderimlerinin kinetikleri ise Şekil 4.64'te sunulmuştur. Sonuç olarak, tKOİ giderimi ön arıtmasız reaktörde Monod kinetiğe, ön arıtmalı reaktörde ise ikinci derece kinetiğe uygun olduğu belirlenmiştir. UKM giderimleri ise ham çamur ve ön arıtmadan geçmiş çamurlarda Monod kinetiğine uygun olmuştur. Uygulanan 4 kinetik yaklaşım için de hız sabitleri ve R^2 değerleri Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Çizelge 4.7'de sunulan değerlere göre ön arıtmalı kesikli anaerobik reaktörlerde çamur çürütmenin hızı daha yüksek olmuştur.

Monod Eşitliği



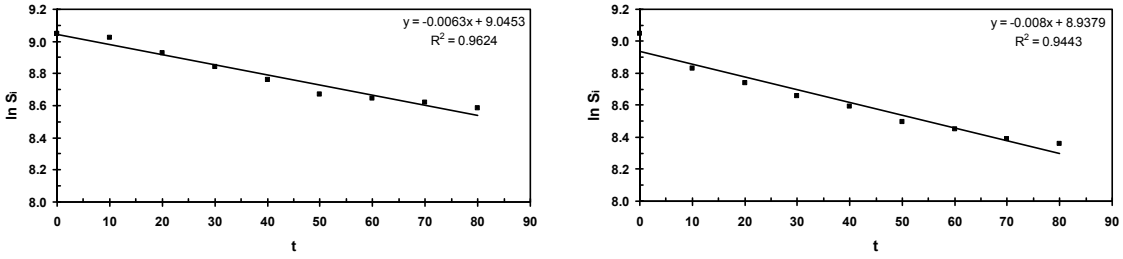
(a) (b)

0. Derece Kinetik



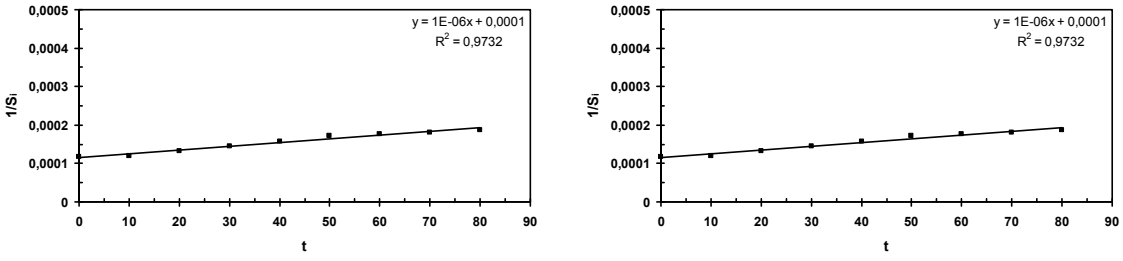
(a) (b)

1. Derece Kinetik



(a) (b)

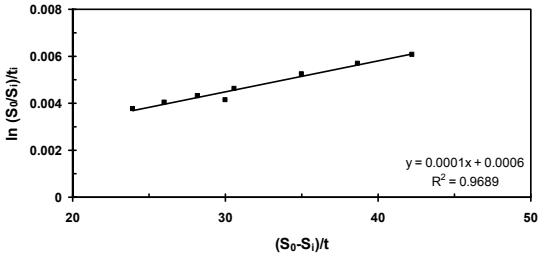
2. Derece Kinetik



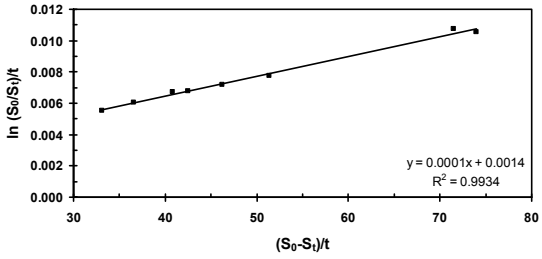
(a) (a)

Şekil 4.63. Kesikli reaktörlerde tKOİ giderimlerinin kinetiği: (a) ham çamur ve (b) ön arıtılmış çamur.

Monod Eşitliği

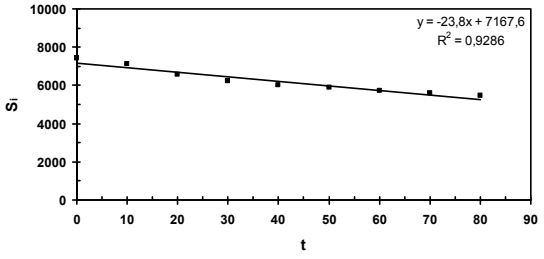


(a)

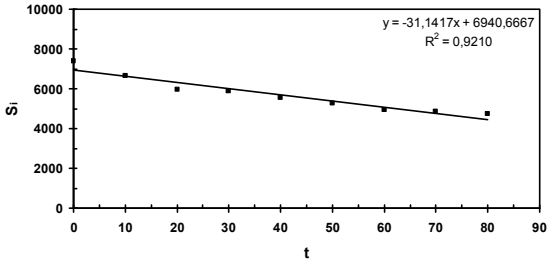


(b)

0. Derece Kinetik

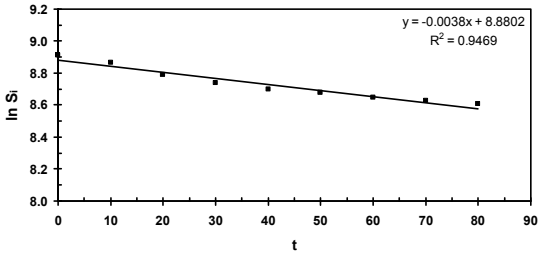


(a)

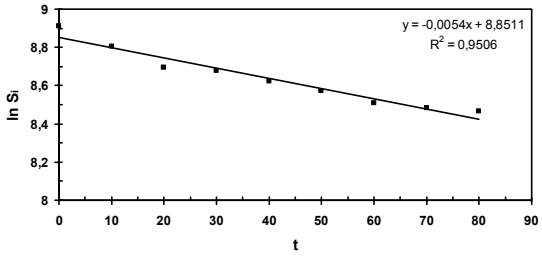


(b)

1. Derece Kinetik

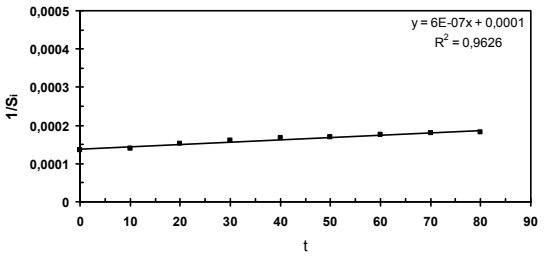


(a)

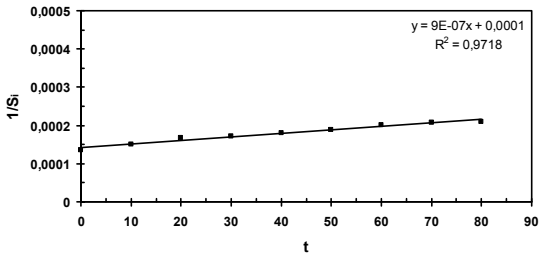


(b)

2. Derece Kinetik



(a)



(b)

Şekil 4.64. Kesikli reaktörlerde UKM giderimlerinin kinetiği: (a) ham çamur ve (b) ön arıtılmış çamur.

Çizelge 4.7. Monod eşitliği ve sıfırıncı, birinci ve ikinci derece kinetikler için belirlenen kinetik katsayılar.

Kinetikler		Kinetik Sabitler	Ham AAÇ	Ön Arıtılmış AAÇ
tKOİ	Monod	R_{max}	-85.0800	-361.6900
		K_S	-34.4800	-102.0400
		R^2	0.9812	0.9741
	0.	k_0	42.8920	46.8750
		R^2	0.9465	0.8868
	1.	k_1	0.0063	0.0080
		R^2	0.9624	0.9443
	2.	k_2	9.5×10^{-7}	1.4×10^{-6}
		R^2	0.9732	0.9805
UKM	Monod	R_{max}	-6.0000	-14.0000
		K_S	-10000.0000	-10000.0000
		R^2	0.9689	0.9934
	0.	k_0	23.8000	31.1420
		R^2	0.9286	0.9210
	1.	k_1	0.0038	0.0054
		R^2	0.9469	0.9506
	2.	k_2	5.9×10^{-7}	9.3×10^{-7}
		R^2	0.9626	0.9718

4.9. Kesikli Beslemeli Anaerobik Çamur Çürütücüler

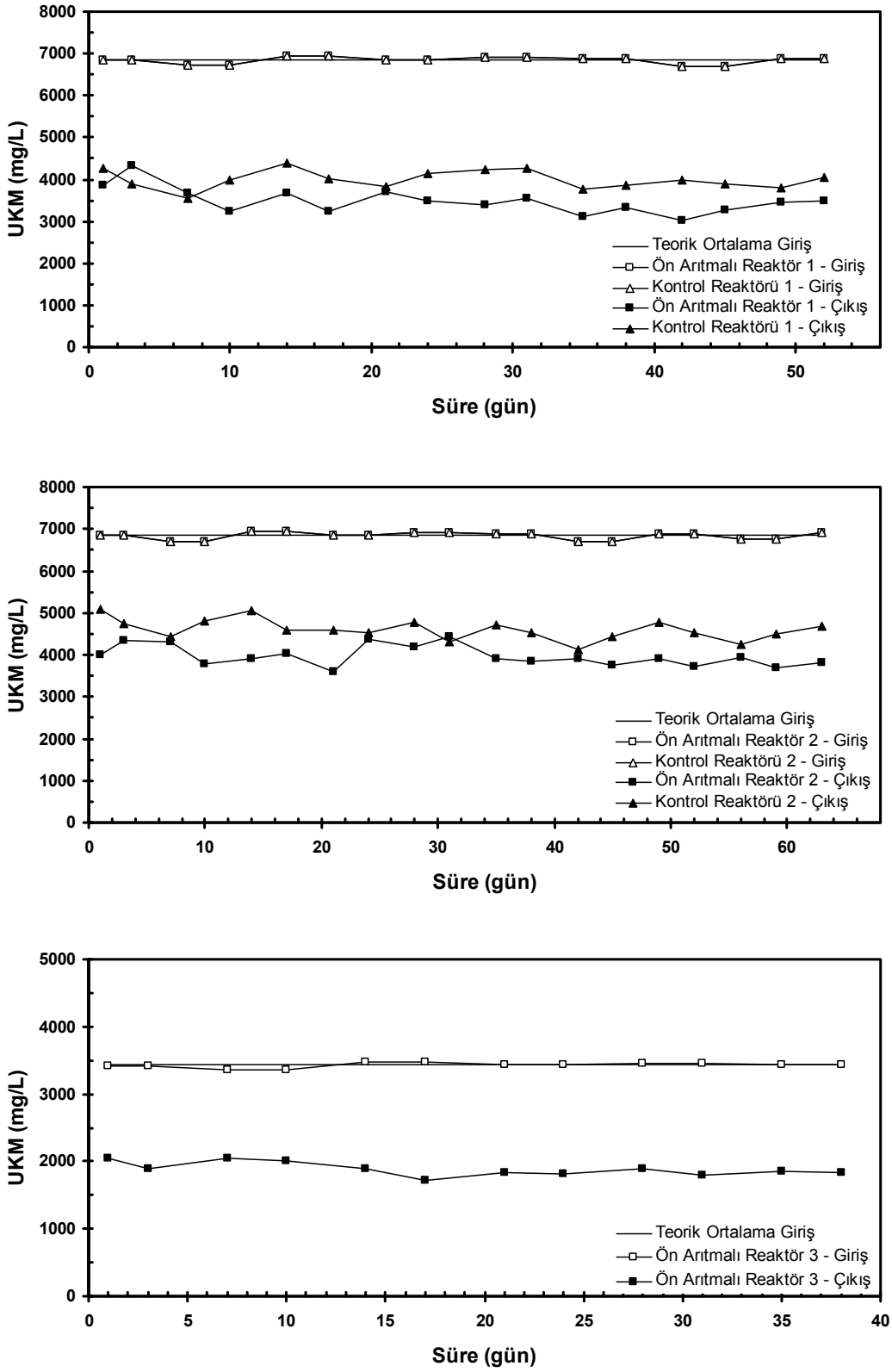
Bu çalışma kapsamında, US ön arıtma ve onun geliştirilebilirliği araştırılmıştır. Bu nedenle, çalışma sadece US ön arıtma ile sınırlı tutulmamış, US + alkali ve US + ısıl ön arıtmalar da incelenmiştir. Sonuç olarak, US + alkali ön arıtmanın çok daha düşük enerji sarfiyatı ile çamur parçalama verimini ve çamurun biyolojik parçalanabilirliğini daha fazla geliştireceği belirlenmiştir. Bu nedenle anaerobik çürütücülerden önce çamur 1.00 W/mL yoğunlukta 1 dk US ışınım ve 0.05 N NaOH uygulamasından oluşan US + alkali ön arıtmaya maruz bırakılmıştır.

Deneyler farklı işletme şartlarında 5 farklı reaktörde yapılmıştır. Reaktörlerde tKOİ ve UKM giderimleri, biyogaz ve metan gazı üretimleri, UAKM konsantrasyonu, pH değerlerindeki değişimler izlenmiştir. Ayrıca reaktörlerin işletilmesi süresince alkalinite ve TUYA konsantrasyonları da ölçülmüştür. Çürütücü verimleri, reaktörlerin kararlı hale ulaşmaları ile UKM ve tKOİ giderimleri ve biyogaz ve metan üretimleri ile değerlendirilmiş ve bu veriler kıyaslama imkânı verecek şekilde sunulmuştur.

4.9.1. Kesikli beslemeli çamur çürütücülerde UKM giderimi

Beş farklı reaktör için ham ve çürütülmüş çamurun UKM içerikleri Şekil 4.65'te sunulmuştur. Reaktörlerin işletilmesi süresince reaktörlere beslenen çamurun UKM içeriği sabit tutulmuş ve Şekil 4.65'te düz bir çizgi halinde teorik ortalama UKM konsantrasyonu olarak gösterilmiştir.

R1 ve K1, 0.5 kg UKM/m^3 OYH ve 14 günlük HBS değerlerinde işletilmiştir. R1 21. günde K1 ise 35. günde kararlı hale gelmiştir ve reaktör verimlerinin kıyaslanabilmesi için reaktörler 52 gün boyunca işletilmiştir. R1 ve K1'de UKM giderimlerinin % 50.6 ve 43.0 olduğu belirlenmiştir. R2 ve K2'de ise deneyler, 1.0 kg UKM/m^3 OYH ve 7 günlük HBS ile gerçekleştirilmiştir. R2 işletmeye almanın 35. gününde ve K2 ise 45. gününde kararlı hale ulaşmıştır. Kesikli beslenen her iki çamur çürütücü de 63 gün süre ile işletilmiştir. R2 ve K2'de elde edilen UKM giderimileri ise sırasıyla % 43.7 ve 33.5'tir. Böylece farklı şartlarda işletilen 2 seri reaktörde de US + alkali ön arıtmanın anaerobik çürütmeyi geliştirdiği belirlenmiştir. R3 ise 0.5 kg UKM/m^3 OYH ve 14 günlük HBS değerlerinde işletilmiştir ve % 46.7 UKM giderimi elde edilmiştir. Aynı OYH değerinde, HBS değerinin 14'ten 7'ye düşürülmesi ile çamur çürütme verimi % 50.6'dan (R1) % 46.7'ye (R3) gerilemiştir. Ancak R3'ün UKM giderim veriminin (% 46.7), 14 günlük HBS ile işletilen K1 reaktöründe ulaşılan verimden (% 43.7) daha yüksek olduğu görülmüştür. Böylece US + alkali ön arıtma ile HBS değeri yarı yarıya azaltıldığında bile ön arıtmasız reaktöre kıyasla daha yüksek verim elde edildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak kararlı haldeki reaktörlerde Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi, çamur çürütme verimi US + alkali ön arıtma ile artmıştır. Ayrıca ön arıtma sonucunda TKM giderimi de yükselmiştir (Çizelge 4.9). Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.30, E1.31, E1.32, E1.33 ve E1.34'te sunulmuştur.



Şekil 4.65. Anaerobik çamur çürütücülerde UKM giderimi.

Çizelge 4.8. Anaerobik çürütücülerde ortalama $UKM_{GİRİŞ}$ ve $UKM_{ÇIKIŞ}$ konsantrasyonları ile yüzde giderim verimleri.

	R1	R2	R3	K1	K2
$UKM_{GİRİŞ}$, mg/L	6845	6840	3430	6845	6840
$UKM_{ÇIKIŞ}$, mg/L	3385	3835	1835	3890	4530
UKM giderimi, %	50.6	43.7	46.7	43.0	33.5

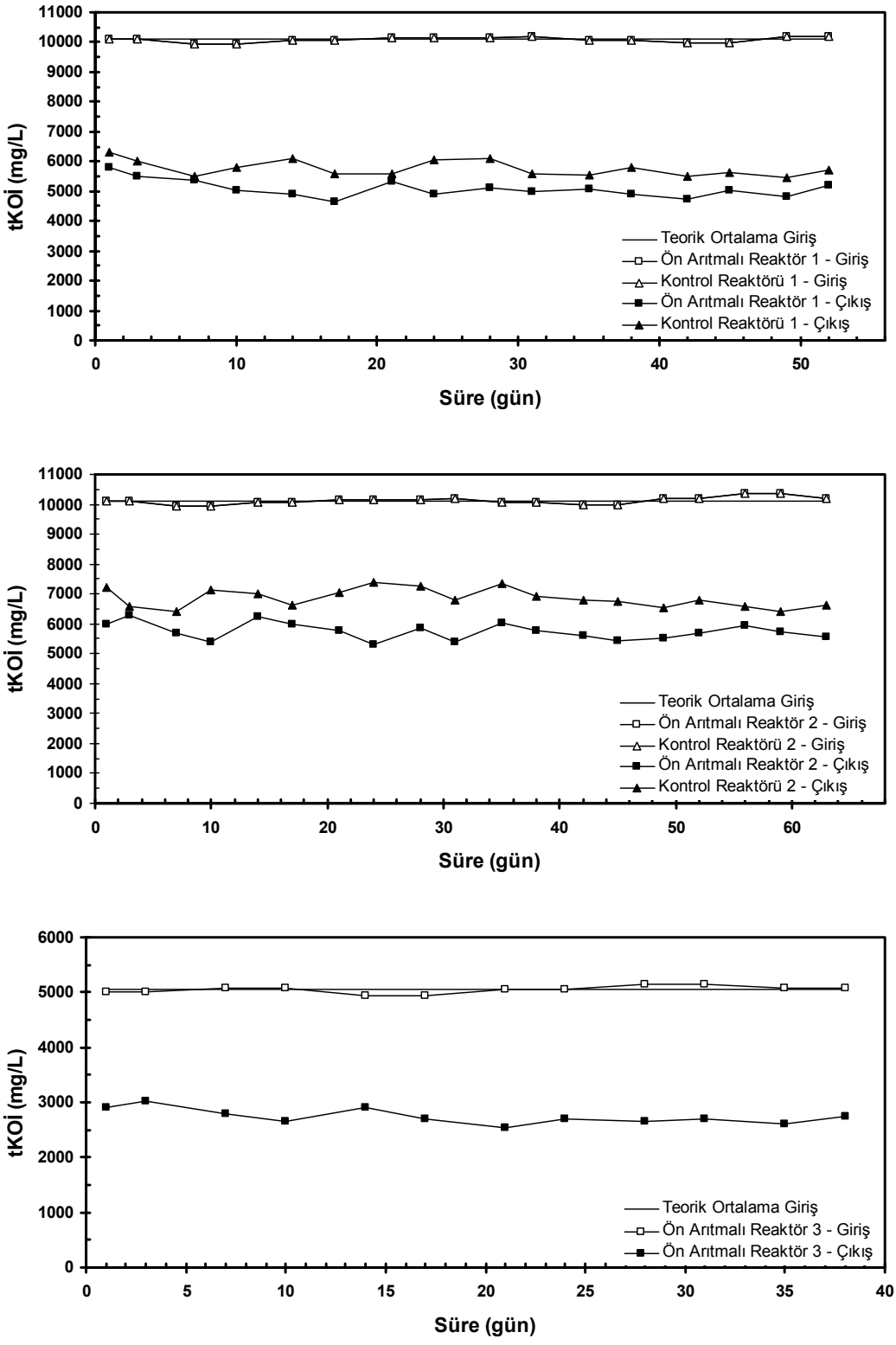
Çizelge 4.9. Anaerobik çürütücülerde ortalama $TKM_{GİRİŞ}$ ve $TKM_{ÇIKIŞ}$ konsantrasyonları ile yüzde giderim verimleri.

	R1	R2	R3	K1	K2
$TKM_{GİRİŞ}$, mg/L	10030	10020	5140	10030	10020
$TKM_{ÇIKIŞ}$, mg/L	4965	5420	2850	5915	6690
TKM giderimi, %	50.5	45.7	44.9	40.8	34.8

4.9.2. Kesikli beslemeli çamur çürütücülerde tKOİ giderimi

Kararlı haldeki reaktörlerde UKM ve TKM gideriminde olduğu gibi, ön arıtma sonucunda tKOİ giderimi de geliştirilmiştir. Bu durum sonuçların tutarlılığının bir göstergesidir. Kesikli beslemeli reaktörlere beslenen ham ve ön arıtılmış çamurun tKOİ konsantrasyonları ile çıkış çamurunun tKOİ konsantrasyonları Şekil 4.66'da gösterilmiştir. Ayrıca tüm reaktörler için tKOİ giderim verimleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

US + alkali ön arıtmadan geçmiş çamurun beslendiği reaktörlerdeki (R1, R2 ve R3) tKOİ giderimlerinin, ham çamurun beslendiği kontrol reaktörlerine (K1 ve K2) kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 7 günlük HBS ile işletilen ön arıtmalı R2 reaktöründe elde edilen verimin, 15 günlük HBS ile işletilen K1 reaktöründe ulaşılan verime çok yakın olduğu görülmüştür. Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.30, E1.31, E1.32, E1.33 ve E1.34'te sunulmuştur.



Şekil 4.66. Anaerobik çamur çürütücülerde tKOİ giderimi.

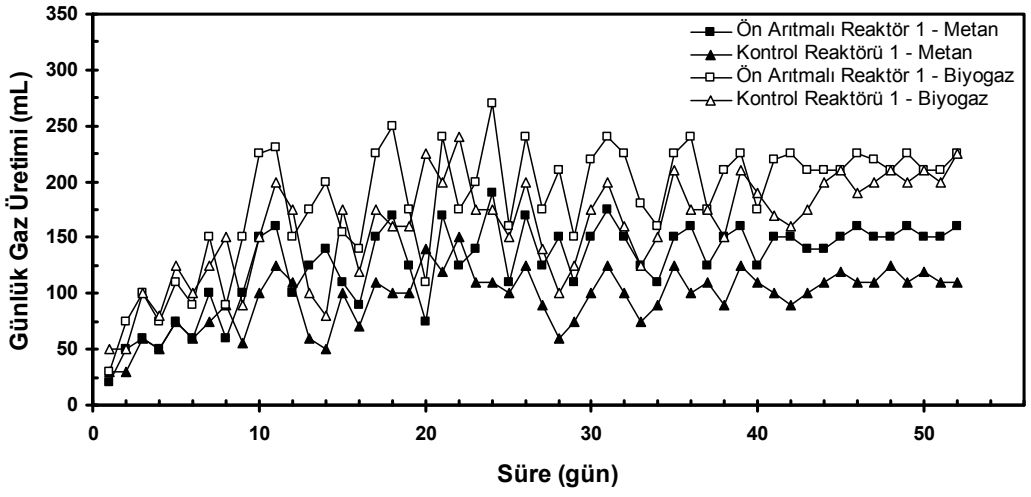
Çizelge 4.10. Anaerobik çürütücülerde ortalama $tKOİ_{GİRİŞ}$ ve $tKOİ_{ÇIKIŞ}$ konsantrasyonları ile yüzde giderim verimleri.

	R1	R2	R3	K1	K2
$tKOİ_{GİRİŞ}$, mg/L	10090	10120	5045	10090	10120
$tKOİ_{ÇIKIŞ}$, mg/L	5015	5695	2660	5610	6620
tKOİ giderimi, %	50.4	43.9	47.8	44.4	35.2

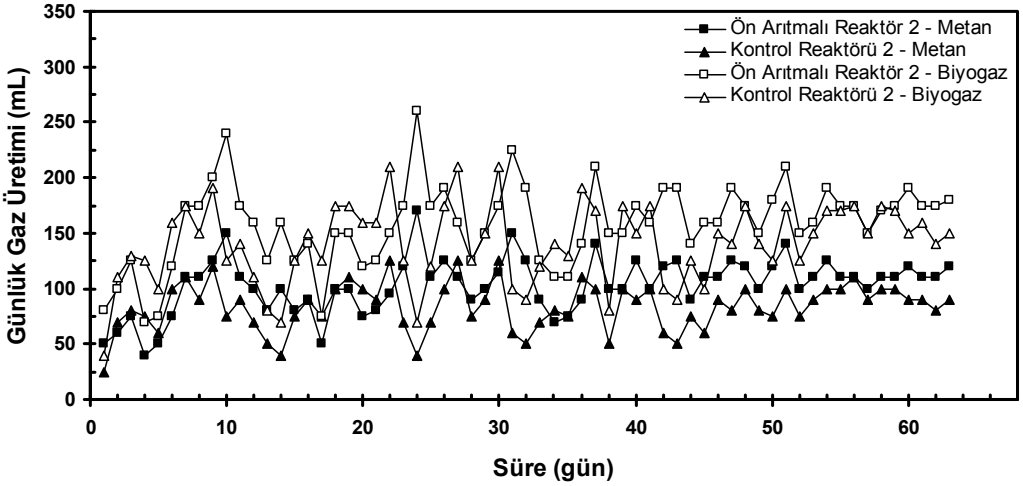
4.9.3. Biyogaz üretimi ve içeriği

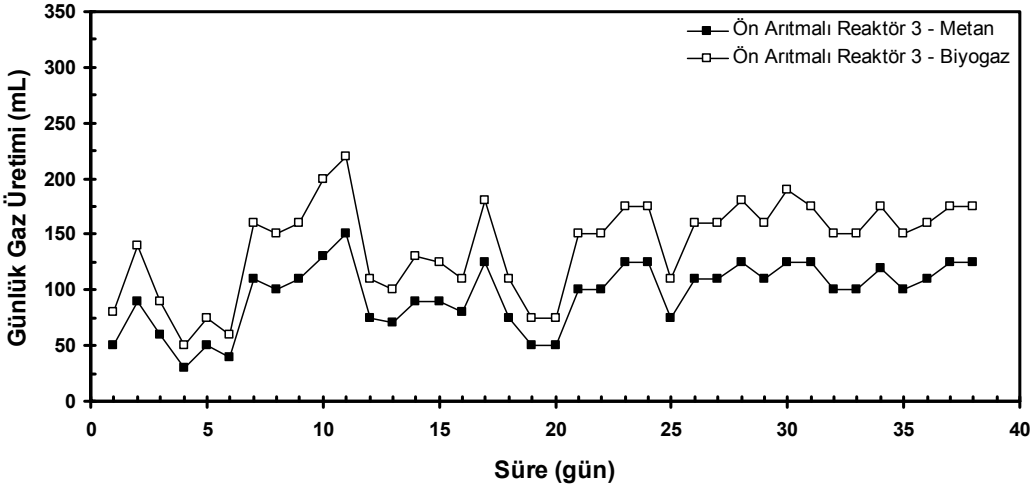
Beş reaktörde de günlük üretilen biyogaz ve metan gazı miktarları Şekil 4.67'de gösterilmiştir. Reaktörler kararlı hale ulaşıncaya kadar, UKM ve tKOİ giderimlerinde olduğu gibi metan üretiminde de salınımlar gerçekleşmiştir. Reaktörlerin kararlı hale ulaşmaları ile üretilen biyogaz ve metan gazı hacimlerinin de yakın değerlerde kaldığı ve ciddi salınımların gerçekleşmediği görülmüştür.

Ön arıtmalı reaktörlerde daha fazla biyogaz ve metan gazı üretildiği belirlenmiştir. Günlük biyogaz ve metan gazı üretiminde gerçekleşen bu artış, Şekil 4.68'te eklenik olarak verilmiştir. Metan gazı üretimdeki bu artış, çamurun ön arıtımı sonucunda çamurun çözünürlüğünün artması, mikroorganizmalar için daha kolay ulaşılabilir bir hale dönüştürülmesinden ve böylece hız sınırlayan hidroliz aşamasının kısaltılmasından kaynaklanmıştır. Sonuç olarak, ön arıtma ile çamurun biyolojik bozundurulabilirliği artmış ve böylece hem metan üretiminin hem de üretilen biyogazın metan içeriğinin arttığı belirlenmiştir (Çizelge 4.11). Reaktörlerin işletmeleri süresince, eklenik biyogaz ve metan üretimleri Ek – 1'de Çizelge E1.36'da sunulmuştur.

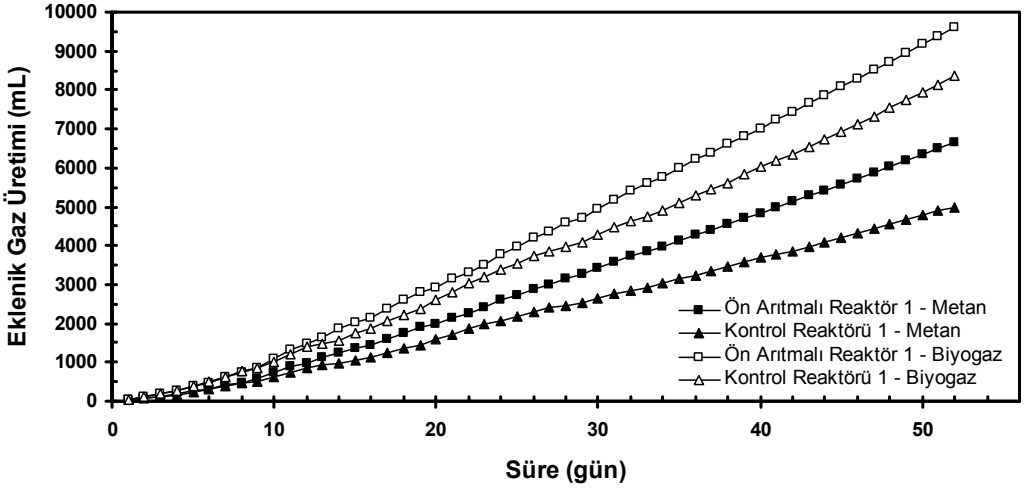


Şekil 4.67. Anaerobik çamur çürütücülerde günlük biyogaz ve metan gazı üretimleri.

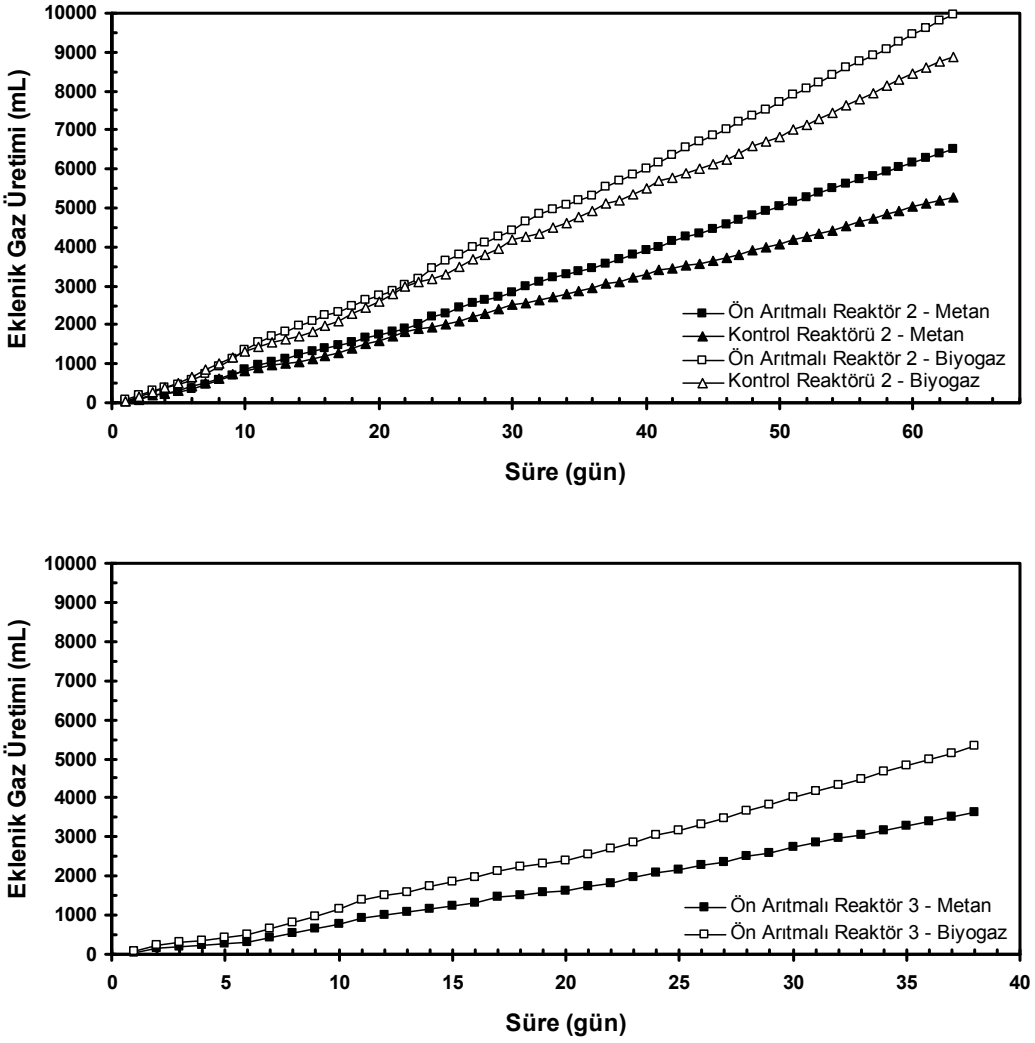




Şekil 4.67. Anaerobik çamur çürütücülerde günlük biyogaz ve metan gazı üretimleri (Devam).



Şekil 4.68. Anaerobik çamur çürütücülerde eklenik biyogaz ve metan gazı üretimleri.



Şekil 4.68. Anaerobik çamur çürütücülerde eklenik biyogaz ve metan gazı üretimleri (Devam).

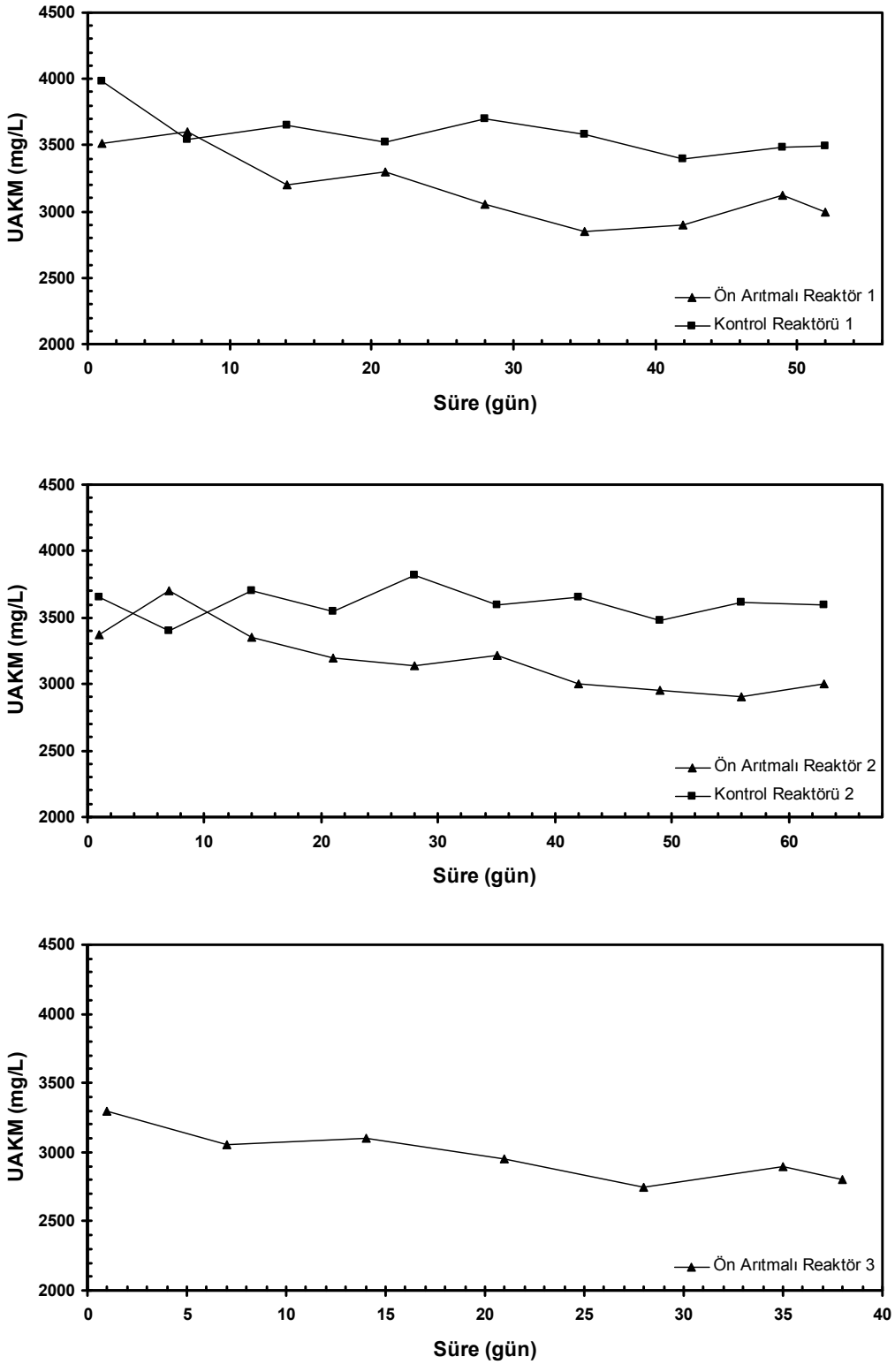
Çizelge 4.11. Anaerobik çürütücüler için ortalama biyogaz ve metan gazı üretim verimleri.

	R1	R2	R3	K1	K2
Günlük metan üretimi, mL	146.2	111.2	111.7	109.7	89.5
Günlük biyogaz üretimi, mL	209.2	169.2	162.2	192.2	152.1
Metan içeriği, %	69.9	65.8	68.7	57.2	58.9
mL CH_4/g $UKM_{Giderilen}$	761.0	435.7	349.8	583.8	318.4
mL CH_4/g $tKO\dot{I}_{Giderilen}$	409.3	276.1	182.2	337.4	214.0

4.9.4. UAKM konsantrasyonundaki değişim

Reaktörlerde UKM içeriğinin büyük bir çoğunluğu, UAKM'den kaynaklanmaktadır. Ancak UAKM, reaktördeki mikrobiyal akvitenin de önemli bir göstergesidir. Reaktörlerin kararlı haldeki UAKM konsantrasyonları sırasıyla R1, R2,

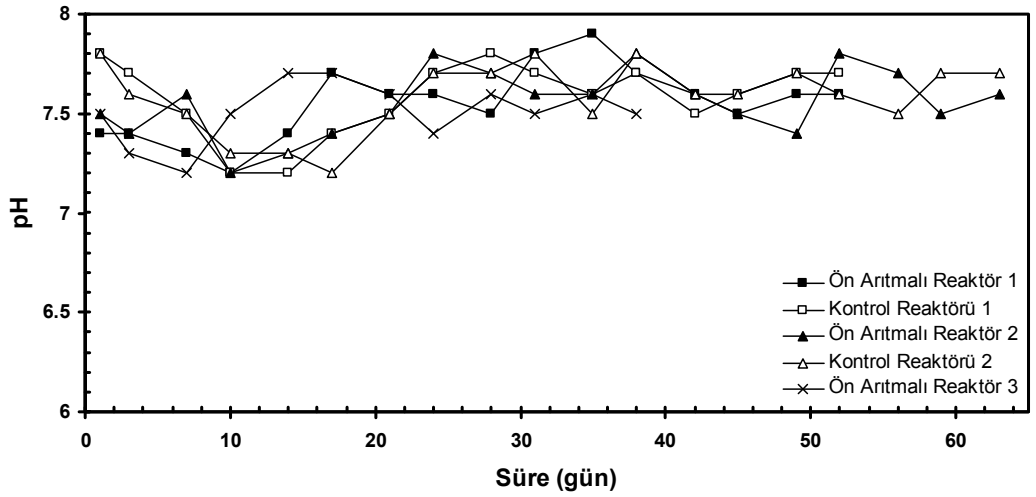
ve R3 için 3035, 3016, 2850 ve K1 ve K2 için 3489 ve 3562 mg/L olarak belirlenmiş ve Şekil 4.69'da UAKM konsantrasyonlarındaki değişim gösterilmiştir. Sonuç olarak, US + alkali ön arıtma sonucunda çamur çözünürlüğünde sağlanan gelişme ile reaktörlerdeki UAKM konsantrasyonlarının azaldığı belirlenmiştir. Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.30, E1.31, E1.32, E1.33 ve E1.34'te sunulmuştur.



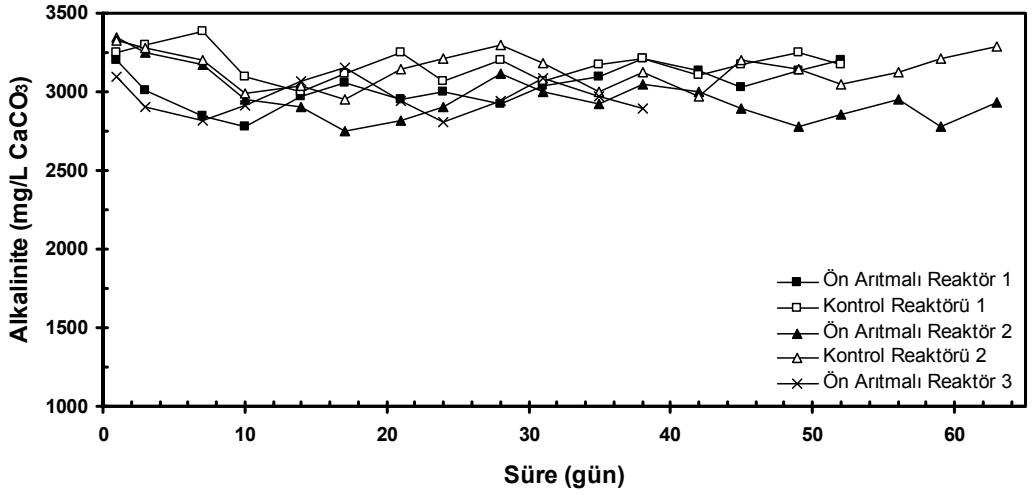
Şekil 4.69. Anaerobik çürütücülerde UAKM konsantrasyonları.

4.9.5. pH ve alkalinitedeki değişim

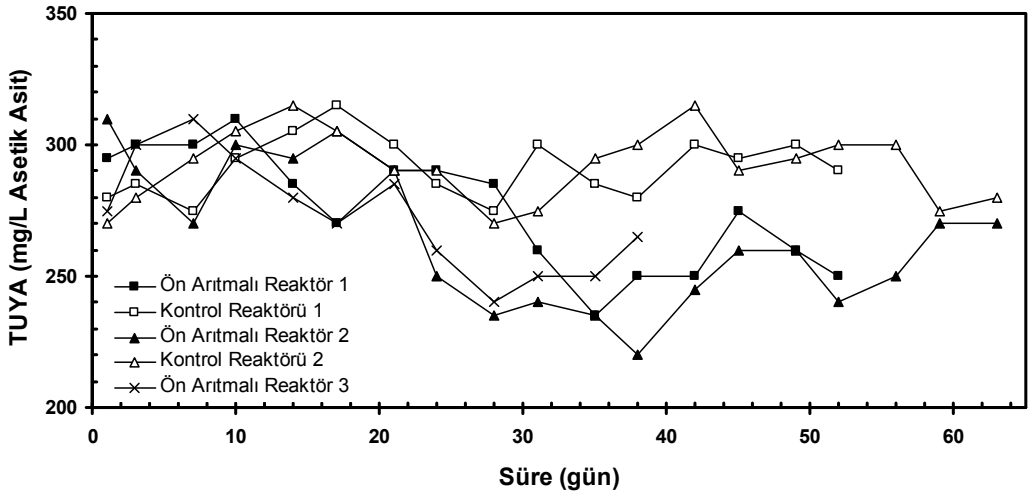
pH ve alkalinite, anaerobik çürütücülerin işletilmesinde kullanılan en önemli parametrelerdir ve reaktörlerdeki işletmenin ideale ne kadar yakın olduğunun göstergeleridir. Şekil 4.70, 4.71 ve 4.72'de reaktörlerin pH, alkalinite ve TUYA konsantrasyonlarında gerçekleşen değişimler gösterilmiştir. Reaktörlerde pH'ın 7.2 – 7.8 aralığında olduğu ve genel olarak anaerobik çürütme için ideal şartlara yakın olduğu görülmüştür. Tüm reaktörlerin alkalinite ve pH değerlerinde özellikle ilk 20 gün ciddi salınımlar olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.70 ve 4.71). Ön arıtmalı reaktörlerde pH ve alkalinite değerlerinde meydana gelen değişimler, kontrol reaktörlerine kıyasla daha önce gerçekleşmiştir. Bunun nedeni, ön arıtmalı reaktörlere beslenen çamurun hidrolizinin fizikokimyasal olarak ön arıtma ile önceden gerçekleşmiş olmasıdır. Böylece mikroorganizmaların substrata daha kolay ulaşabilmesinin sonucunda, reaktörlerde UYA'ların daha hızlı oluşumu ve kısmi birikiminden dolayı (Şekil 4.72) pH düşmüştür. Ancak reaktörlerin kararlı hale gelmesiyle pH, alkalinite ve TUYA değerlerindeki salınım azalmıştır. Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.30, E1.31, E1.32, E1.33 ve E1.34'te verilmiştir.



Şekil 4.70. Reaktörlerde pH'ın değişimi.



Şekil 4.71. Reaktörlerde alkalinitenin değişimi.



Şekil 4.72. Reaktörlerde TUYA konsantrasyonunun değişimi.

4.9.6. Çözünmüş KOİ, karbonhidrat, protein, amonyak ve fosfat konsantrasyonları

Reaktörlerde çamur çürütme sürecinin sonuna gelindiğinde, çözünmüş KOİ, protein, karbonhidrat ve amonyak konsantrasyonları da ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 4.12'de özetlenmiştir. Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.35'te sunulmuştur.

Çizelge 4.12. Kararlı haldeki reaktörlerde çözünmüş KOİ, karbonhidrat, protein, amonyak ve orto-fosfat konsantrasyonları.

Parametreler	Reaktörler				
	R1	R2	R3	K1	K2
çKOİ, mg/L	225	260	270	325	380
Karbonhidrat, mg/L	40	55	45	20	25
Protein, mg/L	75	90	95	55	70
Amonyak, mg/L	470	480	435	310	260
Orto-fosfat, mg/L	85	100	90	55	65

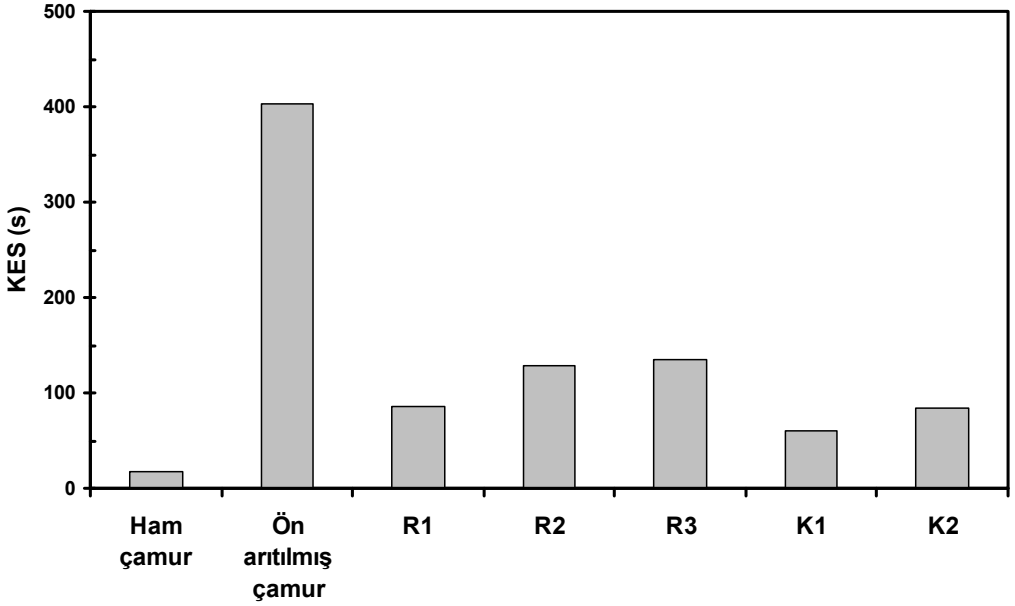
Karbonhidrat ve protein, hücrelerin temel yapı taşları oldukları için hücrelerin parçalanması sonucunda hücresel bileşenlerin sıvı faza geçişi ile çKOİ de yükselmiştir. Böylece, hidroliz aşaması kısaltılmış ve R1, R2 ve R3 reaktörlerinde çamur çürütme verimleri yükselmiştir. Bu nedenle, ön arıtmalı reaktörlerde daha düşük çKOİ değerleri elde edilmiştir. Buna uygun olarak, ön arıtma sonrasında çamurun çözünmüş fazında artan karbonhidrat ve protein konsantrasyonunun büyük çoğunluğu da giderilmiştir. Amonyak konsantrasyonu ise, ön arıtma sonucunda sıvı fazda azotlu organik maddelerin artan konsantrasyonu ve bunların amonyak şeklinde hidrolize olması sonucunda artmıştır (Khanal ve ark., 2006). Benzer şekilde, fosfat konsantrasyonu da hem US + alkali ön arıtmada nötralizasyon için H_3PO_4 kullanılması hem de ön arıtma sonucunda sıvı faza geçen hücresel bileşenlerin anaerobik süreçte parçalanması sonucunda artmıştır. Ayrıca reaktörlerin SO_4 konsantrasyonlarının, toksik etki yapabilecek 150 mg/L konsantasyonuna kadar yükselmediği de belirlenmiştir.

4.9.7. Çürümüş çamurun su verme özelliğindeki değişim etkisi

Çamurun su verme özelliği, KES parametresi ile ölçülmüş ve reaktörler kararlı hale geldikten sonra bu parametre izlenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.73'te sunulmuştur. Ön arıtma ile KES değerleri 17.8 s'den 403.7 s'ye yaklaşık 22 kat artmıştır. Ancak çamurun anaerobik şartlarda çürütülmesi ile su verme özelliklerinde ciddi bir gelişme sağlanmıştır. R1, R2 ve R3 reaktörlerinde elde edilen KES değerleri sırasıyla 85.7, 127.9 ve 135.0 s olarak ölçülmüştür. Kontrol reaktörleri olan K1 ve K2'de ise ölçülen KES değerleri sırasıyla 60.0 ve 84.7 s olmuştur. Böylece çamurun su verme özelliğinin kontrol reaktörlerinde daha iyi olduğu belirlenmiştir. Çamurun parçalanması ile küçülen taneciklerde suyu adsorplayabilecek yüzey alanının daha geniş olması nedeniyle, ön arıtmalı reaktörlerde daha yüksek KES değerleri ölçülmüştür. Öte yandan, 14 günlük

HBS ile işletilen anaerobik reaktörlerde çamurun su verme özelliğinin en iyi olduğu ve HBS değerindeki azalma ile su verme özelliğinin kötüleştiği belirlenmiştir.

Kesikli beslemeli anaerobik çamur çürütücülerde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.13'de özetlenmiştir. Aynı zamanda ön arıtmalı reaktörlerde elde edilen % gelişmeler de gösterilmiştir. Sonuçlar Ek – 1'de Çizelge E1.35'te sunulmuştur.



Şekil 4.73. Anaerobik çürütmenin çamurun su verme özelliğine etkisi.

Çizelge 4.13. Kararlı haldeki çamur çürütücüler için işletme verilerinin özeti.

	R1	K1	% Artış	R2	K2	% Artış	R3
Günlük ortalama metan üretimi, mL	146.2	109.7	33.3	111.2	89.5	24.2	111.7
Günlük ortalama biyogaz üretimi, mL	209.2	192.2	8.8	169.2	152.1	11.2	162.2
Metan içeriği, %	69.9	57.2	22.2	65.8	58.9	11.7	68.7
UKM giderimi, %	50.6	43	17.6	43.7	33.5	30.4	46.7
mL CH_4/ g $UKM_{Giderilen}$	761.0	583.8	30.4	435.7	318.4	36.8	349.8
tKOİ giderimi, %	50.4	44.4	13.5	43.9	35.2	24.7	47.8
mL CH_4/ g $tKOİ_{Giderilen}$	409.3	337.4	21.3	276.1	214.0	29.0	182.2

5 reaktör kıyaslanacak olursa, 14 günlük HBS ile işletilen ön arıtmalı reaktör (R1) hem çamurun stabilizasyon derecesinin hem de metan üretiminin en yüksek olduğu reaktördür. Ayrıca biyogazdaki % metan içeriği de en fazladır. Böylece ön arıtmalı reaktörlerde (R1 ve R3) HBS değerinin 14 günden 7 güne düşürülmesi ile çamur

stabilizasyonu ve metan üretimi azalmıştır. Ancak 7 günlük HBS ile işletilen ön arıtmalı reaktörün (R3) veriminin, 14 günlük HBS değerinde işletilen kontrol reaktöründe (K1) elde edilen verime çok yakın olduğu belirlenmiştir. US + alkali ön arıtmanın uygulanması sonucunda çürütücü hacimlerinin yarı yarıya azaltılmasının mümkün olduğu kanıtlanmıştır. Ön arıtma uygulaması ile daha büyük hacimli çürütücülerin inşasından ve işletilmesinden kaynaklanacak arıtma maliyetinin yarı yarıya azaltılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca ön arıtmanın uygulandığı her üç reaktörde de verim ve kapasitelerin kontrol reaktörlerine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Neis ve ark. (2000) ve Nickel ve Neis (2007)'in US ön arıtmanın anaerobik çamur çürütücüler üzerine etkileri konusunda yaptıkları çalışmalarda buldukları sonuçlar ile uyumludur.

4.10. Fayfa - Maliyet Analizi

Tesisten uzaklaştırılacak AAÇ'nin miktarı, çamur yönetimi için kullanılan tüm süreçlerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri üzerinde belirleyici olmaktadır. Vlyssides ve Karlis'e (2004) göre, atıksu arıtma tesisinin toplam ilk yatırım maliyetinin % 30 – 40'ı ve toplam işletme maliyetinin ise % 50'si çamur bertarafı için harcanmaktadır. Hem bu maliyetin azaltılması hem de çamur çürütücülerin verimlerinin arttırılabilmesi için çamur ön arıtımı uygulanabilmektedir (Appels ve ark., 2008).

Çalışmanın bu bölümünde, Çizelge 4.13'de verilen ön arıtmasız kontrol reaktöründe (K1) ve ön arıtmalı reaktörde (R1) elde edilen metan gazı (CH_4) üretimleri ve çamur çürütme verimleri kullanılarak uygulanan ön arıtma metodunun, çamur yönetiminin maliyetine etkisi araştırılmıştır. Maliyet analizi, 50000 kişilik eş değer nüfusa hizmet ettiği varsayılan bir atıksu arıtma tesisine, US + alkali ön arıtmanın sonradan kurulması ve Bölüm 4.4'de belirlenen optimum şartlarda ön arıtmanın uygulanması halinde ön arıtmalı ve ön arıtmasız çamur yönetiminin maliyetleri kıyaslanmıştır. Hesaplar, kişi başı su tüketiminin 125 L/gün olduğu ve kullanılan suyun % 80'inin atıksu olduğu kabulü ile yapılmıştır. Bu kabullere göre ön çökeltme havuzunda günlük 885 kg ve son çökeltme havuzunda ise günlük 1000 kg kuru madde tutulacağı hesaplanmıştır. Günlük üretilen çamur hacimleri ise, ön arıtma çamurunun % 4 ve AAÇ'nin % 1 katı madde içerdiği kabulü ile sırasıyla 21.7 m^3 ve 99.5 m^3 olarak tahmin edilmiştir. Ön arıtma çamurunun (ÖAÇ) kütlesinin % 60'ının (Öztürk, 2007) ve

atık aktif çamur kütlesinin de % 75'inin (Nickel, 2002) biyolojik olarak bozunabilir organik maddeden oluştuğu kabul edilmiştir.

Fayda maliyet analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle harcamaların ve girdilerin sınıflandırılması gerekmektedir. Ön arıtmasız tesisteki başlıca harcamalar, çamurun bertarafı ve uzaklaştırılmasıdır. Ön arıtmanın kurulduğu durumda ise, ön arıtma ünitesinin kurulumu, ön arıtma için harcanan enerji ve kimyasallardan oluşan işletme maliyetleri ile çamurun bertarafı ve uzaklaştırılmasının maliyetleridir. Senaryo gereği, her iki durumunda aynı çamur çürütücünün aynı şartlarda kullanılacağı kabul edilmiştir. Bu nedenle, çürütücülerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri hesaplara dâhil edilmemiştir. Fayda maliyet analizindeki temel girdi ise, anaerobik çürütme sonucunda üretilen CH_4 gazıdır. Ön arıtmanın uygulanması durumunda ise, çürütücülerde daha fazla UKM giderimi ve bunun sonucunda çürütücüden çıkan atık çamurdaki katı madde kütlesinin azaltılması, ön arıtmalı reaktör için diğer önemli kazançlardır.

Hesaplamalarda para birimi olarak, Türk lirası (TL) kullanılmıştır. Döviz kurlarındaki dönüşümde, 1 €'nin 2.23 TL'ye eşit olduğu döviz kuru dikkate alınmıştır (Anonim, 2011a).

25 L kapasiteye sahip 30 kW güçte ve 20 kHz frekansta çalışabilen bir US reaktörün AAÇ'yi ileten boru hattının üzerine yerleştirileceği ve bu sistemin 30000 €'ya yani 66900 TL'ye mal olacağı kabul edilmiştir (Nickel, 2002). Bu US reaktörün ömrü 10 yıldır ve bu sürenin sonunda yenilenmesi gerekmektedir. Öte yandan çamur hattı üzerinde (US işlemden hemen önce) bir pompanın alkali dozlaması yapacağı, US reaktörden çıkan çamurun bir tankta bekletileceği ve 30 dk'lık alkali uygulamasının sonunda da bir başka tankta da nötralize edileceği dikkate alınacak olursa, NaOH ve H_3PO_4 için birer dozaj pompası olmak üzere toplam 2 dozaj pompası ve tam karışımlı 1.5 m^3 hacimli 2 tank ve çamurun anaerobik çürütücülere iletilebilmesi için bir adet de çamur pompası gerekmektedir. Dozaj pompalarının birim maliyetinin 1500 TL, tankların birim maliyetinin 2500 TL ve çamur pompasının maliyetinin de 5000 TL olduğu kabul edilirse, US reaktörün destek ünitelerinin de toplam kurulum maliyetinin 13000 TL olacağı belirlenmiştir. Bu ek maliyetle birlikte ön arıtmanın toplam ilk kurulum maliyeti, 79900 TL olarak hesaplanmıştır.

US ön arıtma, akustik kavitasyonu oluşturmak ve sonuçta çamuru parçalayabilmek için yoğun enerjiye ihtiyaç duyan bir metottur. Herhangi bir kimyasal ilavesi gerektirmeden kavitasyon oluşturabilmesine rağmen; sistemde kullanacağı enerjinin maliyetinin dikkate alınması gerekmektedir. Nickel (2002) çamur debisi 120

m^3/gün olan bir atıksu arıtma tesisinde US reaktörün işletme maliyetinin yıllık 43953 TL (19710 €) olacağını belirtmiştir. Buna göre 105.2 m^3/günlük çamur debisine sahip olduğu varsayılan tesiste, US reaktörü işletme maliyetinin yıllık 38532 TL olacağı kabul edilmiştir. US + alkali ön arıtmada bir başka önemli maliyet arttırıcı konu ise, kullanılan asit ve bazlardır. Yıllık kullanılacak olan NaOH ve H_3PO_4'ün toplam yıllık maliyetinin 18000 TL olacağı hesaplanmıştır.

Bu analiz 14 günlük HBS ile işletilmiş olan R1 ve K1 reaktörleri için yapılmıştır. R1 ve K1 için UKM giderim verimlerinin sırasıyla % 50.6 ve 43.7 ve metan üretim verimlerinin de 459.6 ve 331.94 ml CH_4/g $UKM_{giderilen}$ olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.13). Ayrıca, ÖAÇ'de giderilen bir gram UKM için elde edilen metan gazının, AAÇ'den üretilen metandan % 20 daha fazla olduğu kabul edilmiştir (Apul ve Sanin, 2010). Bu fark, ön çökeltme çamurunu çürütmenin AAÇ'yi çürütmekten daha kolay olmasından kaynaklanmaktadır.

Çürütülmüş çamurun tesisten 10 km uzaktaki bir yere taşınacağı ve orada araziye serileceği varsayılmıştır. Çamurun taşınması ve araziye serilmesinin maliyeti 111.5 TL/ton çamur olarak kabul edilmiştir (Apul ve Sanin, 2010).

Anaerobik çürütücülerde üretilen metan gazının enerji potansiyeli ise 6.5 kWh/m^3 olduğu kabul edilmiştir (Apples ve ark., 2008). Enerji maliyetinin hesaplanabilmesi için elektrik birim fiyatı, 2011 yılı Ocak ayı birim fiyatı olan 15.306 kr/kWh kabul edilmiş (Anonim, 2011b) ve fayda maliyet analizinde kullanılmıştır.

Ön arıtmasız reaktör (K1) ve ön arıtmalı reaktör (R1) için fayda maliyet analizinin sonuçları Çizelge 4.14'de sunulmuştur. Çizelge 4.14'de gösterildiği gibi, yapılan kabullere ve laboratuar ölçekli yarı kesikli reaktörlerde elde edilen sonuçlara uygun olarak, gerçekleştirilen fayda maliyet analizi ile US + alkali ön arıtmanın kurulması sonucunda toplam işletme maliyetinin 67774 TL'den 109295 TL'ye artacağı ve ön arıtmanın kurulmasından sonra, metan üretiminde gerçekleşen artış ile bunun telafi edilemeyeceği belirlenmiştir. Bu beklenmedik sonuç, deneysel çalışmanın oldukça küçük hacimlerdeki laboratuar ölçekli reaktörlerde gerçekleştirilmesinden ve yapılan kabullerden kaynaklanmış olabilir.

Çizelge 4.14. Ön arıtmalı durum için fayda-maliyet analizi.

	Ön arıtmasız süreç			**Ön arıtmalı süreç**		
	ÖAÇ	AAÇ	**Toplam**	ÖAÇ	AAÇ	**Toplam**
İlk yatırım maliyeti, TL (a)	0	0	**0**	0	79900	**79900**
US ışınımın maliyeti, TL (b)	0	0	**0**	0	38532	**38532**
Alkali işlemin maliyeti, TL (c)	0	0	**0**	0	18000	**18000**
Çamuru taşımanın maliyeti, TL (d)	36108	28932	**65040**	36108	26706	**62814**
Araziye sermenin maliyeti, TL (e)	36108	28932	**65040**	36108	26706	**62814**
Toplam işletme maliyeti, TL ($\Sigma M = a + b + c + d + e$)	65040	65040	**130080**	65040	109944	**182160**
Biyogaz geliri, TL (f)	31244	30062	**62306**	31244	41621	**72865**
Çamur yönetiminin toplam maliyeti, TL ($\Sigma M_{arıtma} = \Sigma M - f$)			**67774**			**109295**

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında uzun ve kısa süreli US ön arıtma, alkali ön arıtma, ısıl ön arıtma ile bu metotların ikili kombinasyonları olan US + alkali ön arıtma ve US + ısıl ön arıtma metotlarını kullanarak AAÇ'nin anaerobik çürütme öncesinde parçalanması ve böylece çamur çürütme veriminin geliştirilmesi üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca ön arıtmanın çamurun su verme ve çökelebilme özelliklerine etkileri de çalışma süresince izlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Uzun süreli US ön arıtma ile çamurun ön arıtımı için yapılan deneylerde çamurun TKM içeriğindeki artış, çamurun parçalanma derecesinin azalmasına neden olmuştur. Sabit TKM içeriğinde artan güç yoğunluğu ise parçalanma derecesini arttırmıştır. Uygulanan US güce bağlı olarak 30 dk'lık ön arıtma süresince elde edilen parçalama veriminin % 70 – 75'ine ilk 10 dk'da ulaşıldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, enerjiye bağımlı bir metot olan US ön arıtmanın çamur parçalamak için kısa sürelerde uygulanmasının daha uygun olduğu belirlenmiştir.
- Uzun süreli US ön arıtmada çamurun su verme özelliği kısa sürelerde kötüleşirken, uzayan ön arıtma süresi ile iyileşmiştir. Çamurun çökelebilme özelliği ise sürekli gelişmiştir.
- Kısa süreli US ön arıtma deneylerinde prob dalma derinliğinin, çamurun parçalanması üzerinde ihmal edilebilecek kadar sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. TKM içeriğindeki artış, çamur parçalama derecesinin azalmasına neden olmuştur. Sabit TKM içeriğindeki çamura uygulanan US yoğunluk ve ön arıtma süresindeki artış ile parçalanma verimi sürekli gelişmiştir. Ancak 1.00 W/mL'nin üzerindeki güç yoğunluklarında, çamurun parçalanmasında ciddi bir artış gerçekleşmemiştir. Bu sonuca uygun olarak, BMP testlerinde metan üretimleri uygulanan gücün 1.00 W/mL'ye çıkması ile artmış, ancak artan güç yoğunluklarında ise kayda değer bir değişim olmamıştır. Kesikli anaerobik reaktörlerde tKOİ ve UKM giderimleri de uygulanan US güç arttıkça gelişmiştir. BMP testleri ile 1.00 W/mL US yoğunlukta 2.5 dk'lık US ön arıtmanın metan

üretiminde % 10.22'lik artış ile çamur parçalama için optimum olduğu belirlenmiştir.

- Kısa süreli US ön arıtma, çamurun su verme özelliğinin kötüleşmesine neden olmuş; ama çökelebilirlik özelliğini gelişmiştir.
- US ön arıtma sırasında gerçekleşen sıcaklık artışının çamurun parçalanmasını geliştirdiği ve çamurun su verme ve çökelebilme özelliklerini olumlu etkilediği belirlenmiştir. Ancak çamurun parçalanmasına etkisi sınırlı olmuştur.
- Kavitasyon sonucunda üretilen oksitleyici radikallerin ise çamur parçalama üzerinde sınırlı etkisinin olduğu belirlenmiştir.
- US ön arıtma sırasında ortam pH'ının asidik veya alkali olması halinde, çamur parçalama veriminin ihmal edilebilir derecede arttığı belirlenmiştir.
- Çamur parçalamada baskın mekanizmanın kavitasyon sonucunda üretilen hidromekanik kesme kuvvetlerinin olduğu tespit edilmiştir.
- Alkali ön arıtmada artan TKM içeriği ile çamurun parçalama verimi azalmıştır. 0.10 N'e kadar artan dozlarda çamurun parçalanması hızla artmıştır. Dozun daha fazla artması ise çamur çözünürlüğünde kayda değer bir gelişmeye neden olmamıştır.
- Alkali ön arıtma sonucunda, ham çamura kıyasla, çamurun su verme özelliği kötüleşmiştir. Ama çamurun çökelebilme özelliği iyileşmiştir.
- Isıl ön arıtmada uygulanan sıcaklığın artışı, çamur çözünürlüğünün artmasına sebep olmuştur. Ancak ısıl ön arıtmanın çamur parçalama verimi, diğer metotlara kıyasla çok daha düşük olmuştur.
- Isıl ön arıtmanın çamurun su verme özelliğini - beklenenin aksine - olumsuz etkilediği belirlemiştir. Çamurun çökelebilme özelliği ise ihmal edilebilir derecede gelişmiştir.
- US + alkali ön arıtma ile çamur parçalama verimi, US ve alkali ön arıtma metotlarının ayrı ayrı uygulandığı durumda elde edilen verimlerin toplamından daha fazla olmuştur. US + alkali ön arıtma için optimum şartlar 1.00 W/mL US yoğunlukta 1 dk US ışınım ve 30 dk'lık süreyle 0.05 N'lik NaOH uygulaması olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda ön arıtılmış çamurun çürütüldüğü kesikli reaktörlerde üretilen metan miktarı, ham çamurdakine kıyasla % 15.5 artmıştır. Aynı şartlarda US ön arıtmanın yalnız uygulanması sonucunda ise, metan üretiminde ancak % 6'lık artış sağlanmıştır. Böylece, US ön arıtmanın sodyum hidroksit ile birlikte uygulanması sonucunda çok daha düşük maliyetle hem

- US + alkali ön arıtmaya maruz kalmış çamurun su verme özelliğini kötüleşirken, çökelebilirliği gelişmiştir.
- US + ısıl ön arıtma ile bu metotların ayrı ayrı kullanıldığı duruma kıyasla çamur parçalama veriminde artış sağlanmıştır. Bu birleşik metotta, kimyasal parametrelere dayanarak optimum şartlar 1.00 W/mL US yoğunluk 1 dk US ışınım ve 80℃'de 1 saat ısıl ön arıtma olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda metan üretimi, ham çamura kıyasla % 13.6 artmıştır. Aynı şartlarda US ön arıtmanın yalnız kullanılması durumunda ise metan üretimi % 5.6 kadar artmıştır.
- US + ısıl ön arıtmadan geçmiş çamurun su verme ve çökelebilme özellikleri, US ışınımdan sonra uygulanan sıcaklıktaki artış ile gelişmiştir.
- US + alkali ön arıtmada kimyasal ve biyolojik parametrelere dayanarak belirlenen optimum şartlarda kesikli anaerobik reaktörlerde kinetik deneyler gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ön arıtmanın uygulanması ile çamurun çürütülme hızında ve veriminde ciddi bir artış sağlanmıştır. Ham çamurun anaerobik çürütülmesinde tKOİ ve UKM giderimleri Monod kinetiğine uygun olmuştur. Ön arıtılmış çamurda ise tKOİ giderimi ikinci derece kinetik, UKM giderimi ise Monod kinetiğine uygun olduğu belirlenmiştir.
- Ön arıtma deneylerinde elde edilen veriler, matematiksel bir modele uygulanmıştır. Önerilen deneysel matematiksel model ile farklı ön arıtma şartlarında süreç veriminin çamurun parçalanma derecesine bağlı olarak başarıyla tahmin edilebileceği belirlenmiştir.
- US + alkali ön arıtmalı yüksek hızlı anaerobik çamur çürütücülerde, çamur çürütme ve metan üretim verimlerinde ciddi bir gelişme sağlanmıştır. 14 günlük hidrolik bekletme süresi ve 0.5 $kg/m^3 \cdot$gün organik yükleme hızında işletilen reaktörlerde, ön arıtma ile TKM giderimi % 40.8'den % 50.5'e; UKM giderimi % 43.7'den % 50.6'ye ve tKOİ giderimi ise % 44.4'ten % 50.4'e yükselmiştir. Bu reaktörlerde ön arıtma uygulanması sonucunda günlük metan üretiminde % 33.2'lik bir artış elde edilmiştir. Kararlı halde işletilen reaktörlerde giderilen 1.0 g UKM ve tKOİ için üretilen metan miktarları kontrol reaktöründe (K1) 583.8 ve 337.4 mL iken, reaktörde ön arıtmanın uygulanması ile (R1) 761.0 ve 409.3 mL'ye yükselmiştir. Ön arıtmalı reaktörlerde metan miktarındaki artışa ilave olarak, üretilen biyogazın metan içeriğinde de artış olduğu belirlenmiştir. Aynı

organik yükleme hızında ve 7 günlük hidrolik bekletme süresinde işletilen ön arıtmalı reaktörde (R3), ön arıtmasız ve 14 günlük hidrolik bekletme süresi ile işletilen reaktördekine (K1) yakın verim elde edilmiştir. Böylece US + alkali ön arıtma ile arıtma tesislerindeki çamur çürütücülerin hacimlerinin yarı yarıya azaltılabileceği ve bundan dolayı çürütücülerden kaynaklanan ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin yarı yarıya azaltılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, ön arıtma ile kötüleşen çamurun su verme özelliğini, anaerobik çürütme sonucunda iyileşmiştir.

- Fayda maliyet analizi ile US + alkali ön arıtmanın kurulması sonucunda sağlanacak faydanın, sistemin işletme masraflarını karşılamaya yetmiyeceği belirlenmiştir.

Bu doktora tezinin sonucu olarak, US + alkali ön arıtmanın US, alkali, ısıl ve US + ısıl ön arıtmalara kıyasla çok daha verimli bir çamur parçalama metodu olmasından dolayı, anaerobik çamur çürütücülerin öncesinde kullanılması önerilmektedir.

5.2. Öneriler

US ön arıtma ve onun geliştirilmiş kombine teknolojileri, arıtma tesisleri için kronikleşmiş bir sorun olan atık çamurun arıtımı için oldukça yeni alternatiflerdir. Bu metotların hem etkinliklerinin arttırılabilmesi ve hem de ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşürülebilmesi için, bu yeni teknolojilerin geliştirilmesi hayati öneme sahiptir.

Bu tez çalışması, laboratuar şartlarında ve küçük hacimlerde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, çalışmada belirlenen optimum şartların pilot ölçekli bir tesiste denenerek fayda maliyet analizinin daha gerçekçi şartlarda yapılması, sürecin ekonomikliğini belirlemek için faydalı olacaktır. Ayrıca fizibilite çalışması çürütücüye beslenecek AAÇ'nin tümü için yapılabileceği gibi, çürütücüye beslenecek olan AAÇ'nin değişen oranlarda ön arıtmaya maruz bırakılmasının da çürütücü verimine etkileri araştırılabilir.

Çalışmada US ön arıtmanın alkali ve ısıl ön arıtma ile birlikte uygulandığı zaman $PD_{KOİ}$ değerinde ciddi bir artış sağlandığı belirlenmiştir. Bu sonuca uygun olarak, US ön arıtmada verimi düşürmeden işletme maliyetini azaltabilmek için çok daha kısa sürelerde uygulanan US ışınımın farklı çamur parçalama metotları ile birlikte

uygulanabilirliği araştırılmalıdır. Örneğin, US ve asidik ön arıtma, US ve ozon, US ve hidrojen peroksit, US ve yüksek sıcaklıklı ısıl ön arıtma gibi.

Çamur parçalamada verimine etki eden tüm parametreler dikkate alınarak, US ön arıtma ve onun diğer modifikasyonlarının modellemeleri yapılabilir. Böylece, ön arıtmanın gerçekleştirildiği tüm şartlar modele veri olarak girildiğinde, çamur parçalama verimini kolayca hesaplamak mümkün olacaktır. Ayrıca ön arıtılmış çamurun çürütüldüğü reaktörün anaerobik çürütme modeli (ADM) ile modellenmesi de incelenebilir.

US + alkali ve US + ısıl ön arıtmaya maruz kalmış çamurun, termofilik çamur çürütücülerde çürütülebilirliği araştırılabilir. Böylece, ön arıtılmış çamurun termofilik şartlarda çürütülmesinin UKM giderimine, metan üretimine ve çamur özelliklerine etkisi belirlenebilir.

US ön arıtma ve onun farklı hibrit metotlarına maruz bırakılmış çamurun mezofilik ve termofilik şartlarda çürütülmesinin, çürütücüdeki mikroorganizma gruplarının popülasyonuna etkisinin araştırılması ön arıtmanın anaerobik çürütmeye olan etkilerinin tam olarak belirlenmesi için faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

Abramov, O.V., 1998, High-Intensity Ultrasonics: Theory and industrial applications, Golden and Breach Science Publishers, Amesterdam, Netherlands, 80 – 82.

Ahring, B.K., 1994, Status on science and application of thermophilic anaerobic digestion. Water Science and Technology, 30, 12, 241 – 249.

Akın, B., 2008, Waste activated sludge disintegration in an ultrasonic batch reactor, Clean - Soil, Air, Water, 36, 360 – 365.

Anderson, G. H. and Yang, G., 1992, Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration, Water Environment Research, 64 (1), 53 – 59.

Anonim, 2011a, T.C. Merkez Bankası döviz kurları [online], http://www.tcmb.gov.tr [Ziyaret Tarihi: 04 Mart 2011].

Anonim, 2011b, Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. [online], http://www.tedas.gov.tr/268,2011_Yili_Tarifeler.html, [Ziyaret Tarihi: 04 Mart 2011].

Anonymous, 2010, Case studies [online], Ultrawaves wasser and umwelttechnologien GmbH, http://www.ultrawaves.de/en/press_&_downloads.htm [Ziyaret Tarihi: 30 Ağustos 2010].

APHA, AWWA ve WEF, 2005, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, USA.

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J. and Dewil R., 2008, Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, Progress in Energy and Combustion Science, 34, 755 – 781.

Appels, L., Degrève, J., Bruggen, B.V., Impe, J.V. and Dewil, R., 2010, Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilization, heavy metal release and anaerobic digestion, Bioresource Technology, 101 (15), 5743 – 5748.

Apul, O.G. and Sanin, F.D., 2010, Ultrasonic pretreatment and subsequent anaerobic digestion under different operational conditions, Bioresource Technology, 101, 23, 8984 – 8992.

Baeyens, J., Hosten, L. and Van Vaerenbergh, E., 1997, Afvalwaterzuivering (Water Treatment), 2.nd Edition, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Barber, W.P., 2005, The effects of ultrasound on sludge digestion, Water and Environment Journal, 19 (1), 2 – 7.

Beydilli, M.I., Pavlosathis, S.G. and Tincher, W.C., 1998, Decolorization and toxicity screening of Selected reactive azo dyes under methanogenic conditions, Water Science and Technology, 38 (4 – 5), 225 – 232.

Bougrier, C., Carrere, H. and Delgenes, J.P., 2005, Solubilisation of waste activated sludge by ultrasonic treatment, Chemical Engineering Journal, 106 (2), 163 – 169.

Bougrier, C., Albasi, C., Delgenes, J.P. and Carrere, H., 2006a, Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability, Chemical Engineering and Processing, 45, 711 – 718.

Bougrier, C., Delgenès, J.P. and Carrère, H., 2006b, Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield, Process Safety and Environmental Protection, 84 (4), 280–284.

Bougrier, C., Delgenes, J.P. and Carrere, H., 2008, Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion, Chemical Engineering Journal, 139, 236 – 244.

Braguglia, C. M., Mininni, G. and Gianico, A., 2008, Is sonication effective to improve biogas production and solids reduction in excess sludge digestion?, Water Science and Technology, 57 (4), 479 – 483.

Braguglia, C.M., Gianico, A. and Minini, G., 2010, Comparison between ozone and ultrasound disintegration on sludge anaerobic digestion, Journal of Environmental Management, doi:10.1016/j.jenvman.2010.07.030.

Bruss, J.H. and Christensen, J.R., 1993, Anaerobic storage of activated sludge: effects on conditioning and dewatering performance, Water Science and Technology, 28, 350 – 357.

Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenès, J.P., Steyer, J.P. and Ferrer, I., 2010, Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review, Journal of Hazardous Materials, 183 (1 – 3), 1 – 15.

Chen, Y., Jiang, S., Yuan, H., Zhou, Q. and Gu, G., 2007, Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs, Water Research, 41 (3), 683 – 689.

Chen, Y., Cheng, J.J. and Creamer, K.S., 2008, Inhibition of anaerobic digestion process: a review, Bioresource Technology, 99, 4044 – 4064

Chu, C. P., Chang, B.V., Liao, G. S., Jean, D. S. and Lee, D. J., 2001, Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge, Water Research, 35 (4), 1038 – 1046.

Chu, C. P., Lee, D. J., Chang, B.V., You, C. S. and Tay, J. H., 2002, Weak Ultrasonic pre-treatment on anaerobic digestion of flocculated activated biosolids Water Research, 36 (11), 2681 – 2688.

Climent, M., Ferrer, I., Baeza, M.M., Artola, A., Vázquez, F. and Font, X., 2007, Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions, Chemical Engineering Journal, 133 (1 – 3), 335 – 342.

Dewil, R., Baeyens, J. and Goutvrind, R., 2006, The use of ultrasonics in the treatment of waste activated sludge, Chinese Journal of Chemical Engineering, 14 (1), 105 – 113.

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F., 1956, Colorimetric method for determination of sugars and related substances, Analytical Chemistry, 28, 350 – 356.

Eastman, J.A. and Ferguson, J.F., 1981, Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion, Journal of Water Pollution Control Federation, 53, 352 – 366.

El-Hadj, T.B., Dosta, J., Marquez-Serrano, R. and Mata-Alvarez, J., 2007, Effect of ultrasound pretreatment in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion with emphasis on naphthalene and pyrene removal, Water Research, 41, 87 – 94.

EPA (Environmental Protection Agency), 1983, *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*, EPA/600/4-79/020, Cincınnati, Ohio, U.S.A.

Erden, G. and Filibeli, A., 2010, Improving anaerobic biodegradability of biological sludges by Fenton pre-treatment: effects on single stage and two-stage anaerobic digestion, Desalination, 251 (1 – 3), 58 – 63

Erdincler, A. and Vesilind, P.A., 2000, Effect of sludge cell disruption on compactibility of biological sludges, Water Science and Technology 42 (9), 119 – 126.

Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K.J., Droste, R.L. and Hamoda, M., 2007, Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge, Water Research, 41 (11), 2457 – 2466.

Eskicioglu, C., Kennedy, K.J. and Droste, R.L., 2009, Enhanced disinfection and methane production from sewage sludge by microwave irradiation, Desalination, 248 (1 – 3), 279 – 285.

Feng, X., Lei, H., Deng, J., Yu, Q. and Li, H., 2009, Physical and chemical characteristics of waste activated sludge treated ultrasonically, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 48 (1), 187–194.

Fındık, S. and Gündüz, G., 2007, Sonolytic Degradation of acetic acid in aqueous solutions, Ultrasonics Sonochemistry, 14, 157–162.

Fleming, H.C., and Wingender, J., 2001, Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPS). Part I: structural and ecological aspects, Water Science and Technology, 43, 1 – 8.

Gavala, H.N., Yenal, U., Skiadas, I.V., Westermann, P. and Ahring, B.K., 2003, Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge: effect of pre-treatment at elevated temperature, Water Research, 37, 4561 – 4572.

Gonze, E., Pillot, S., Valette, E., Gonthier, Y. and Bernis, A., 2003, Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor, Chemical Engineering and Processing, 42, 965 – 975.

Grady, C.P.L., Harlow L.J. and Riesing, R.R., 1972, Effects of growth rate and influent substrate concentration on effluent quality from chemostats containing bacteria in pure and mixed culture, Biotechnology and Bioengineering, 14, 391 – 410.

Grönroos, A., Kyllönen, H., Korpijarvi, K., Pirkonen, P., Paavola, T., Jokela, J. and Rintala, J., 2005, Assisted method to increase soluble chemical oxygen demand (sCOD) of sewage sludge for digestion, Ultrasonics Sonochemistry, 12 (1 – 2), 115 – 120.

Hansen, K.H., Angelidaki, I. and Ahring, B.K., 1998, Anaerobic digestion of swine manure: inhibition of ammonia, Water Research, 32 (1) 5 – 12.

Haug, R.T., Stuckey, D.C., Gossett, J.M. and Mac Carty, P.L., 1978, Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges, Journal Water Pollution Control Federation, 50, 73 – 85.

Huan, L., Yiying, J., Mahar, R.B., Zhiyu, W. and Yongfeng, N., 2009, Effects of ultrasonic disintegration on sludge microbial activity and dewaterability, Journal of Hazardous Materials, 161 (2 – 3),1421 – 1426.

Izrail S. T. and Mathai, P. K., 2006, Wastewater Sludge Processing, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.

Jin, Y., Li, H., Mahar, R.B., Wang, Z. and Nie, Y., 2009, Combined alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before aerobic digestion, Journal of Environmental Sciences, 21, 279–284.

Katsiris, N. and Kouzeli-Katsiri, A., 1987, Bound water content of biological sludges in relation to filtration and dewatering, Water Research, 21 (11), 1319 – 1327.

Keiding, K. and Nielsen, P.H., 1997, Desorption of organic macromolecules from activated sludge: effect of ionic composition, Water Research, 31, 1665 – 1672.

Khanal, S.K., Isik, H., Sung, S., and Van Leeuwen, 2006, J. Ultrasound pretreatment of waste activated sludge: evaluation of sludge disintegration and aerobic digestibility. In *Proceedings of IWA World Water Congress and Exhibition*, 2006, Beijing, China.

Kim, J.S., Park, C.H., Kim, T.H., Lee, M., Kim, S., Kim, S.W. and Lee, J., 2003, Effects of various pretreatment for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge, Journal of Bioscience and Bioengineering, 95, 271 – 275.

Kim, D.H., Jeong, E., Oh, S.E. and Shin, H.S., 2010, Combined (alkaline + ultrasonic) pretreatment effect on sewage sludge disintegration, Water Research, 44 (10), 3093 – 3100.

Lafitte – Trouque, S. and Foster, C.F., 2002, The use of ultrasound and γ-irradiation as pre-treatments for the anaerobic digestion of waste activated sludge at mesophilic and thermophilic temperatures, Bioresource Technology, 84, 113 – 118.

Lehne, G. and Müller, J., 1999, in: A.Tiehm, U.Neis (Eds.), Ultrasound in Environmental Engineering, TUHH Reports on Sanitary Engineering, Vol. 25, 205 – 216.

Li, H., Jin, Y., Mahar, R.B., Wang, Z. and Nie, Y., 2008, Effects and model of alkaline waste activated sludge treatment, Bioresource Technology, 99, 11, 5140 – 5144.

Li, C., Liu, G., Jin, R., Zhou, J. and Wang, J., 2010, Kinetics model for combined (alkaline + ultrasonic) sludge disintegration, Bioresource technology, 101 (22), 8555 – 8557.

Lin, J.G., Chang, C.N. and Chang, S.C., 1997, Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization, Bioresource Technology, 62 (3), 85 – 90.

Lin, J.G., Ma, Y.S. and Huang, C.C., 1998, Alkaline hydrolysis of the sludge generated from a high-strenght, nitrogenous wastewater biological treatment process, Bioresource Technology, 65, 35 – 42.

Liu, Y. and Tay, J.H., 2001, Strategy forminimization of excess sludge production from the activated sludge process, Biotechnology Advances, 19 (2), 97 – 107.

Liu, T. and Sung, S., 2002, Ammonia inhibition on thermophilic aceticlastic methanogens. Water Science and Technology, 45 (10), 113 – 120.

Liu, Y., 2003, Chemically reduced excess sludge production in the activated sludge process, Chemosphere, 50 (1), 1 – 7.

Liu, X., Liu, H., Chen, J., Du, G. and Chen, J., 2008, Enhancement of solubilization and acidification of waste activated sludge by pretreatment, Waste Management, 28 (12), 2614 – 2622.

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. and Randall, J.R., 1951, Protein measurement with the Folin phenol reagent, The Journal of Biological Chemistry, 193 (1), 265 – 275.

Mason, T.J. and Lorimer, J.P., 2002, Applied sonochemistry: The uses of power ultrasound in chemistry and processing, Wiley – VCH Verlag, Weinheim, Germany.

Mason, T.J. and Peters, D., 2002, Practical sonochemistry: Power ultrasound and applications, 2nd edition, Horwood Publishing, Chichester, U.K.

Müller, J.A., 2001, Prospects and problems of sludge pre-treatment processes, Water Science and Technology, 44 (10), 121 – 128.

Na, S., Kim, Y.U. and Khim, J., 2007, Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment, Ultrasonics Sonochemistry, 14 (3), 281 – 285.

Naddeo, V., Belgiorno, V., Landi, M., Zara, T. and Napoli, R.M.A., 2009, Effect of sonolysis on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability, Desalination, 249, 762 – 767.

Nellenschulte, T. and Kayser, R., 1997, Change of particle structure of sewage sludges during mechanical and biological processes with regard to the dewatering results, Water Science and Technology, 36 (4), 293 – 306.

Neis, U., Nickel, K. and Tiehm, A., 2000, Enhancement of anaerobic sludge digestion by ultrasonic disintegration, Water Science and Technology, 42 (9), 73 – 80.

Neis, U. and Nickel, K., 2001, Schlammbehandlung mit Ultraschall - ein aktuelles Leistungsbild. In: 2. ATV-DVWK-Klärschlammtage, Würzburg-Hennef.

Neyens, E. and Baeyens, J.A., 2003, A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability, Journal of Hazardous Materials, 98, 51 – 67.

Neyens, E., Baeyens, J. and Creemers, C., 2003, Alkaline thermal sludge hydrolysis, Journal of Hazardous Materials, 97 (1–3), 295 – 314.

Neyens, E., Baeyens, J., Dewil, R. and De Heyder, B., 2004, Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering, Journal of Hazardous Materials, 106, 83 – 92.

Nickel, K., Improving anaerobic degradation by ultrasonic disintegration of sewage sludge, 1999, in: A.Tiehm, U.Neis (Eds.), Ultrasound in Environmental Engineering, TUHH Reports on Sanitary Engineering, Vol. 25, 217 – 232.

Nickel, K., 2002., Ultrasonic disintegration of biosolids- benefits, consequences and new strategies. In Tiehm, A., Neis, U., (Eds.), Ultrasound in Environmental Engineering. Reports on Sanitary Engineering. Technical University Hamburg-Harburg, GFEU-Verlag, Germany, Vol., 25, 189 – 199.

Nickel, K. and Neis, U., 2007, Ultrasonic disintegration of biosolids for improved biodegradation, Ultrasonic Sonochemistry, 14 (4), 450 – 455.

Öztürk, İ., Timur, H. ve Koşkan, U., 2005, Atıksu arıtımının esasları, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, İstanbul.

Öztürk, İ., 2007, Anaerobik arıtma ve uygulamaları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R.J., Tyagi, R.D. and Surampalli, R.Y., 2011, Ultrasonic pretreatment of sludge: A review, Ultrasonics Sonochemistry, 18 (1), 1 – 18.

Portenlanger, G., 1999, Mechanical and radical effects of ultrasound. In: Tiehm, A., Neis, U., (Eds.), Ultrasound in Enviromental Engineering. Technical University Hamburg-Harburg, GFEU-Verlag, Germany, Vol. 25, 11 – 23.

Razo-Flores, E., Luijten, M., Donlon, B.A., Lettinga, G. and Field, J.A., 1997, Complete biodegradation azo dye azodisalicylate under anaerobic conditions, Environmental Science and Technology, 31 (7), 2098 – 2103.

Schmitt, J. and Flemming, H.C., 1999, Water binding in biofilms, Water Science and Technology, 39 (7), 77 – 82.

Show, K.Y., Mao, T. and Lee, D.J., 2007, Optimisation of sludge disruption by sonication, Water Research, 41, 4741 – 4747.

Skiadas, I.V., Gavala, H.N., Lu, J. and Ahring, B.K., 2004, Thermal pretreatment of primary and secondary sludge at 70℃ prior to anaerobic digestion, in: Proceedings of the 10th world congress, vol. 2, Anaerobic Digestion: Anaerobic Bioconversion. Answer for sustainability, Montreal, Canada.

Spellman, F. S., 2009, Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations, Second Edt., *CRC Press*, USA.

Stuckey, D.C. and Mc Carty, P.L., 1978, Thermochemical pretreatment of nitrogenous materials to increase methane yield, Biotechnology and Bioengineering Symposium, 8, 219 – 233.

Suslick, K.S., Didenko, Y., Fang, M.M., Hyeon, T., Kolbeck, K.J., Mc Namara, W.B., Mdleleni, M.M. and Wong, M., 1999, Acoustic cavitation and its chemical consequences, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 357, 335 – 353.

Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M. and Neis, U., 2001, Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization, Water Research, 35, 8, 2003 – 2009.

Tomei, M.C., Braguglia, C.M. and Mininni, G. 2008, Anaerobic degradation kinetics of particulate organic matter in untreated and sonicated sewage sludge: Role of the inoculum, Bioresource Technology, 99 (14), 5997 – 6708.

Tong X. and McCarty, P.L., 1991, Microbial hydrolysis of lignocellulosic materials. In: R. Isaacson, Editor, Methane from Community Wastes, Elsevier Applied Science, London and New York, 61 – 100 (Chapter 6).

Torres, M.L. and Llorens, M.C.E., 2008, Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes, Waste Management, 28, 2229 – 2234.

Valo A., Carrere H. and Delgenes J.P., 2004, Thermal, chemical and thermo-chemical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion, Journal of Chemical Technology and Biyotechnology, 79, 1197 – 1203.

Vlyssides, A.G. and Karlis, P.K., 2004, Thermal – alkaline solubilisation of waste activated sludge as a pretreatment stage for anaerobic digestion, Bioresource Technology, 91 (2), 201 – 206.

Wang, F., Wang, Y. and Ji, M., 2005, Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration, Journal of Hazardous Materials 123 (1 – 3), 145 – 150.

Wang, F., Ji, M. and Lu, S. 2006a, Influence of ultrasonic disintegration on the dewaterability of waste activated sludge, Environmental Progress, 25, 3, 257 – 260.

Wang, F., Lu, S. and Ji, M., 2006b, Components of released liquid from ultrasonic waste activated sludge disintegration, Ultrasonic Sonochemistry, 13 (4), 334 – 338.

Weemas, M.P.J. and Verstraete, W., 1998, Evaluation of current wet sludge disintegration techniques, journal of Chemical Technology and Biotechnology, 73 (8), 83 – 92.

Wingender J., 1999, Interaction between extracellular polysaccharides and enzymes, In Wingender, J. and Neu, T.R. (Eds.) Microbial Extracellular Polymeric Substances (in Germany), Springer, Heidelberg, 1 – 19.

Wu, Y., Zhou, S., Zheng, K., Ye, X. and Qin, F., 2011, Mathematical model analysis of Fenton oxidation of landfill leachate**,** Waste Management, 31, 468 – 474.

Xie, R., Xing, Y., Ghani, Y.A., Ooi, K. and Ng, S., 2007, Full-scale demonstration of an ultrasonic disintegration technology in enhancing anaerobic digestion of mixed primary and thickened secondary sewage sludge, Journal of Environmental Engineering and Science, 6 (5), 533 – 541.

Yin, X., Lu, X., Pingfang Han and Wang, Y., 2006, Ultrasonic treatment on activated sewage sludge from petro-plant for reduction, Ultrasonics, 44, 1, 397 – 399.

Yoon, S.H., 2003, Important operational parameters of membrane bioreactor-sludge disintegration (MBR-SD) system for zero excess sludge production, Water Research, 37 (8), 1921 – 1931.

Zhang, H., 2002, Biochemistry tutorial, third edition. Sichuan University Publishing, Chengdu, China.

Zhang, P., Zhang, G. and Wang, W., 2007, Ultrasonic treatment of biological sludge: Floc disintegration, cell lysis and inactivation, Bioresource Technology, 98 (1), 207 – 210.

Zhang, G., Zhang, P., Gao, J. and Chen, Y., 2008a, Using acoustic cavitation to improve the bio-activity of activated sludge, Bioresource Technology, 9 (5), 1497 – 1502.

Zhang, G., Zhang, P., Yang, J. and Liu, H., 2008b, Energy-efficient sludge sonication: Power and sludge characteristics, Bioresource Technology, 99 (18), 9029 – 9031.

Zhang, G., He, J., Zhang, P. and Zhang, J., 2009a, Ultrasonic reduction of excess sludge from activated sludge system II: Urban sewage treatment, Journal of Hazardous Materials, 164 (2 – 3), 1105 – 1109.

Zhang, G., Yang, J., Liu, H. and Zhang, J., 2009b, Sludge ozonation: Disintegration, supernatant changes and mechanisms, Bioresource Technology, 100, 3, 1505 – 1509.