T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BÜYÜKBAŞ HAYVANSAL ATIKLARIN BİYOMETANİZASYON SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

FATİH TUFANER

DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. YAŞAR AVŞAR

İSTANBUL, 2015

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BÜYÜKBAŞ HAYVANSAL ATIKLARIN BİYOMETANİZASYON SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih TUFANER tarafından hazırlanan tez çalışması 06.11.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Yaşar AVŞAR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yaşar AVŞAR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Göksel DEMİR

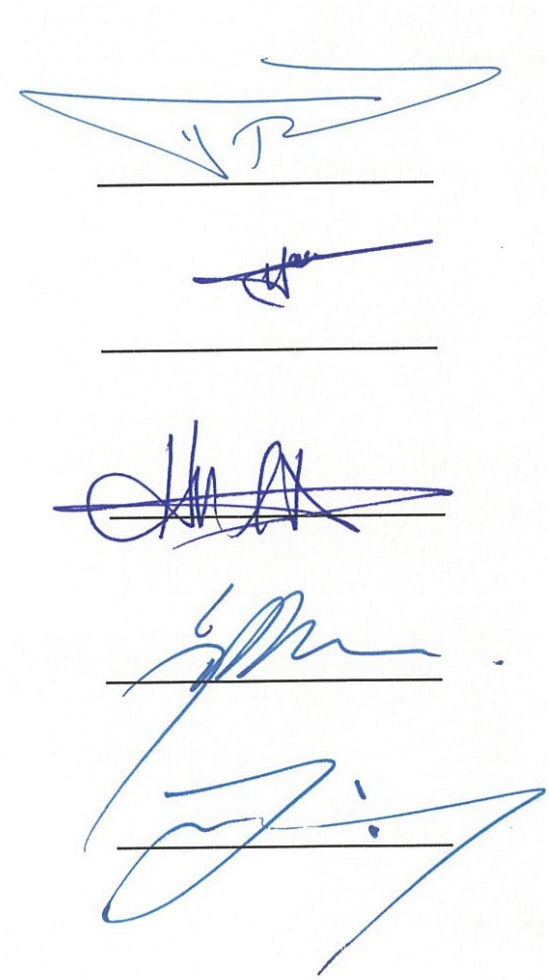
Kırklareli Üniversitesi

Prof. Dr. Güleda ENGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail TORÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi



Bu doktora tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) BİDEB Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında yürütülen 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Bursu ve Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından MÜFBAP/2013-0001 nolu Münferit Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Çevre Mühendisliği lisans eğitimimden beri emeğini ve desteğini esirgemeyen, yüksek lisans tez çalışmamda bana her konuda destek veren ve doktora eğitim sürecimin her döneminde ilgi ve desteğini esirgemeden beni her zaman sabırla dinleme zahmetini gösteren, bana bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren çok değerli danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Yaşar AVŞAR'a sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Tez izleme komitesi üyeleri olan çok kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU'na ve Sayın Prof. Dr. Göksel DEMİR'e değerli görüş ve önerileriyle sağladıkları katkılar için sonsuz teşekkürlerimi arz ederim. Ayrıca, değerli yorum ve önerileriyle büyük katkılarda bulunan tez savunma jüri Hocalarım, Sayın Prof. Dr. Güleda ENGİN'e ve Sayın Prof. Dr. İsmail TORÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Tez çalışmasının her aşamasında değerli fikir, yorum ve destekleriyle büyük katkılarda bulunan Adıyaman Üniversitesi Rektörü Sayın Hocam Prof. Dr. Mustafa Talha GÖNÜLLÜ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenimime başladığım günden bu yana bana emeği geçen tüm hocalarıma tüm içtenliğimle şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamın her döneminde maddi manevi destekleriyle her zaman yanımda olan çok kıymetli babam Mehmet TUFANER'e, annem Emine TUFANER'e, eşim Öğr. Gör. Çare TUFANER'e, oğlum Ahmet Asım TUFANER'e, kızım Hümeyra TUFANER'e, kardeşlerim Harun TUFANER ve Selçuk TUFANER'e en içten şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmamı BİDEB 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Kasım, 2015

Fatih TUFANER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ xi

KISALTMA LİSTESİ xii

ŞEKİL LİSTESİ xiii

ÇİZELGE LİSTESİ xix

ÖZET xx

ABSTRACT xxii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Hipotez 4

BÖLÜM 2

ANAEROBİK ÇÜRÜME VE ORGANİK YÜKÜ YÜKSEK ATIKLAR 5

2.1 Anaerobik Biyoteknoloji 5
2.1.1 Hidroliz 6
2.1.2 Asit Üretimi (Asitojen/Fermantasyon) 7
2.1.3 Asetat Üretimi (Asetojen) 8
2.1.4 Metan Üretimi 8
2.2 İşletme Koşulları 10
2.2.1 Alkalinite ve pH 10
2.2.2 Sıcaklık 10
2.2.3 Toksisite ve İnhibisyon 11
2.2.3.1 Amonyak 11
2.2.3.2 Ağır Metaller ve Sülfürler 11
2.2.3.3 Organikler 12
2.3 Organik Yükü Yüksek Atıklar 12
2.3.1 Büyükbaş Hayvan Gübresi (BBHG) 14
2.3.2 Bitkisel Atıklar 14
2.3.3 Gıda Atıkları 15
2.3.4 Arıtma Çamuru 16

BÖLÜM 3

BÜYÜKBAŞ HAYVANSAL ATIKLARIN BİYOMETANİZASYON SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ KONUSUNDA YAPILAN ÇALIŞMALAR 17

3.1 Anaerobik Proses için Ham Madde 18
3.2 Yalnızca BBHG Kullanılarak Yapılan Anaerobik Çalışmalar 20
3.3 Meyve ve Sebze Atıklarının BBHG ile Birlikte Arıtımı 22
3.4 Evsel Kaynaklı Organik Atıkların BBHG ile Birlikte Arıtımı 24
3.5 Endüstriyel Organik Atıkların BBHG ile Birlikte Arıtımı 25
3.6 Arıtma Çamurunun BBHG ile Birlikte Arıtımı 26
3.7 Anaerobik Proseste Önemli İşletme ve Performans Parametreleri 28
3.8 Birlikte Arıtma Üzerine Literatürden Elde Edilen Öneriler ve Çıkarımlar . 29

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT 32

4.1 Deneysel Çalışmalar 32
4.1.1 Biyogaz Üretimi ve Atık Arıtımı için Kullanılan Yukarı Akışlı Havasız Çamur Yataklı Deneysel Düzenek 32
4.1.2 Deneysel Çalışma Planı 39
4.1.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Ham Atıkların ve Besleme Sıvılarının Genel Özellikleri 41
4.1.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan Floküler Aşı Çamurunun Genel Özellikleri 42
4.1.5 Reaktörlerin Devreye Alınması ve İşletilmesi 44
4.1.6 Deneysel Yöntemler 46
4.1.7 Reaktörlerdeki Anaerobik Floküler Çamurun ve Oluşan Granüllerin SEM (Scanning Electron Microscop) ile İncelenmesi ve Analizi 48
4.1.7.1 Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi (EDX) 49
4.2 Modelleme Çalışmaları 50
4.3 Maliyet Analizi Çalışmaları 52

BÖLÜM 5

DENEYSEL BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 54

5.1 Aşı Çamuru Biyogaz Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi 54
5.2 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktörü 55
5.2.1 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 55
5.2.1.1 R1 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 55
5.2.1.2 R1 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 59
5.2.2 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri 61
5.2.2.1 R1 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri 61
5.2.3 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri 63
5.2.3.1 R1 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri 63
5.2.3.2 R1 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri 65
5.2.4 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 67

5.2.4.1 R1 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 67
5.2.4.2 R1 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 72
5.2.5 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri 75
5.2.5.1 R1 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri 75
5.2.6 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri 77
5.2.6.1 R1 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri 77
5.2.7 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe Klorür Değişimleri 80
5.2.7.1 R1 Reaktörü Giriş Çıkışında Klorür Değişimleri 80
5.3 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktörü 81
5.3.1 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 81
5.3.1.1 R2 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 81
5.3.1.2 R2 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 85
5.3.2 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri 87
5.3.2.1 R2 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri 87
5.3.3 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri 88
5.3.3.1 R2 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri 88
5.3.3.2 R2 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri 90
5.3.4 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 92
5.3.4.1 R2 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 92
5.3.4.2 R2 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 96
5.3.5 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri 99
5.3.5.1 R2 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri 99
5.3.6 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri 101
5.3.6.1 R2 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri 101
5.3.7 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe Klorür Değişimleri 103
5.3.7.1 R2 Reaktörü Klorür Değişimleri 103
5.4 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktörü 104
5.4.1 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 104
5.4.1.1 R3 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 104
5.4.1.2 R3 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 108
5.4.2 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri 109
5.4.2.1 R3 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri 109
5.4.3 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri 110
5.4.3.1 R3 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri 110

5.4.3.2 R3 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri 112
5.4.4 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 113
5.4.4.1 R3 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 113
5.4.4.2 R3 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 118
5.4.5 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri 121
5.4.5.1 R3 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri 121
5.4.6 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri .. 123
5.4.6.1 R3 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri 123
5.4.7 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe Klorür Değişimleri 125
5.4.7.1 R3 Reaktörü Klorür Değişimleri 125
5.5 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktörü 126
5.5.1 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 126
5.5.1.1 R4 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 126
5.5.1.2 R4 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 130
5.5.2 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri 131
5.5.2.1 R4 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri 131
5.5.3 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri 132
5.5.3.1 R4 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri 132
5.5.3.2 R4 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri 134
5.5.4 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 136
5.5.4.1 R4 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 136
5.5.4.2 R4 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 140
5.5.5 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri 143
5.5.5.1 R4 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri 143
5.5.6 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri 145
5.5.6.1 R4 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri 145
5.5.7 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe Klorür Değişimleri 147
5.5.7.1 R4 Reaktörü Klorür Değişimleri 147
5.6 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktörü 148
5.6.1 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 148
5.6.1.1 R5 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 148
5.6.1.2 R4 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri 152

5.6.2 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri 154
5.6.2.1 R5 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri 154
5.6.3 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri 155
5.6.3.1 R5 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri 155
5.6.3.2 R5 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri 157
5.6.4 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 158
5.6.4.1 R5 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 158
5.6.4.2 R5 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri 163
5.6.5 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri 167
5.6.5.1 R5 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri 167
5.6.6 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri 169
5.6.6.1 R5 Reaktörü Giriş Çıkışında TP ve PO_4-P Değişimleri 169
5.6.7 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe Klorür Değişimleri 171
5.6.7.1 R5 Reaktörü Klorür Değişimleri 171
5.7 Deneysel Çalışmalar Boyunca R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Analiz Edilen Parametrelerin Kıyaslanması 172
5.7.1 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Günlük Biyogaz Üretimlerinin Karşılaştırılması 172
5.7.1.1 R1-R2 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması 172
5.7.1.2 R1 ve R3 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması 174
5.7.1.3 R1 ve R4 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması 176
5.7.1.4 R1 ve R5 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması 177
5.7.1.5 Tüm Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması 178
5.7.2 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Kümülatif Biyogaz Üretimlerinin Karşılaştırılması 179
5.7.3 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Giderilen TKOİ Başına Üretilen CH_4 Miktarlarının Karşılaştırılması 181
5.7.4 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde TKOİ Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması 182
5.7.5 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde TKN Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması 183
5.7.6 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde TP Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması 184
5.7.7 Reaktörlerde TKOİ Giderim Verimi ile Biyogaz Üretimi Arasındaki Korelasyonun İncelenmesi 185

5.7.8 Çalışmada Kullanılan R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörleri İçerisindeki Çamurun SEM Görüntüleri ve EDX Analizleri 189
5.7.8.1 Reaktörlerin Floküler Çamur Numunesi Görüntüleri ve EDX Analizleri 189
5.7.8.2 Reaktörlerin Granül Çamur Görüntüleri ve EDX Analizleri 195

BÖLÜM 6

BİRLİKTE ARITIM PROSESİNDE MODELLEME ÇALIŞMALARI 202

6.1 Anaerobik Şartlarda Farklı Organik Atıklar ile BBHG'nden Biyogaz Üretiminin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi 202
6.2 Biyogaz Üretiminin YSA ile Modellenmesi 203
6.2.1 Geri Besleme Eğitim Algoritmasının Seçimi 204
6.2.2 Deneysel Veriler ile Model Tahmin Sonuçlarının Karşılaştırılması 205
6.2.3 BBHG'ne İlave Atık Karışım Oranının Değişimi Durumunda Biyogaz Üretiminin Model Simülasyonu (HBS 10 gün için) 208

BÖLÜM 7

BİYOGAZ TESİSİ İÇİN MALİYET ANALİZİ 212

7.1 BBHG Biyogaz Üretim Tesisi Maliyet Analizi 212
7.2 Planlanan BBHG Biyogaz Tesisi için Model Seçimi 215
7.3 BBHG Biyogaz Üretim Tesisi Boyutlandırılması 216
7.3.1 Gerekli Atık Hesabı 217
7.3.2 Reaktör Hacim Hesapları 219
7.4 İlk Yatırım Maliyeti (Sabit Maliyet) 220
7.5 Yıllık İşletme Maliyeti 222
7.6 Biyogaz Tesisi Fayda Maliyet Analizi 223

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER 226

KAYNAKLAR 234

ÖZGEÇMİŞ 251

SİMGE LİSTESİ

c	Suyun ısınma ısısı
FA2	İkinin faktörü
Fk	Kolektör yüzeyi
HAc	Asetik asit
m	Isıtılacak su miktarı
p	Girdi parametreleri
pn	Normalize edilmiş girdi parametreleri
IA	Uyum indeksi
R^2	Determinasyon katsayısı
R	Korelasyon katsayısı
R1	Birinci reaktör
R2	İkinci reaktör
R3	Üçüncü reaktör
R4	Dördüncü reaktör
R5	Beşinci reaktör
t	Çıktı parametresi
tn	Normalize edilmiş çıktı parametresi
TRA	Kollektör yüzeyine gelen güneş enerjisi miktarı
$Q_{sı}$	Sıcak su enerji ihtiyacı
Δt	Sıcaklık farkı
η	Kollektör verimi

KISALTMA LİSTESİ

AÇ	Arıtma çamuru
AKM	Askıda katı madde
AUS	Aşı uyum süreci
BBHG	Büyükbaş hayvan gübresi
BOİ	Biyolojik oksijen ihtiyacı
C/N	Karbon/azot oranı
CSTR	Sürekli karıştırmalı tank reaktör
ÇKOİ	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı
EEOA	Evsel endüstriyel organik atık
HBS	Hidrolik besleme süresi
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
LCFA	Uzun zincirli yağ asitleri
NEER	Karıştırmasız enerji tasarruflu reaktör
NH_3-N	Amonyak azotu
OKH	Ortalama karesel hata
OYO	Organik yükleme oranı
PO_4^{-3}-P	Fosfat fosforu (çözünmüş fosfor)
TBA	Temel bileşen analizi
TP	Toplam fosfor
TKN	Toplam Kjeldahl azotu
TKM	Toplam katı madde
TKOİ	Toplam kimyasal oksijen
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UAKM	Uçucu askıda katı madde
UKM	Uçucu katı madde
UYA	Uçucu yağ asitleri
YAHÇYR	Yukarı akışlı havasız çamur yataklı reaktör
YSA	Yapay sinir ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kompleks substratın anaerobik şartlarda bozunması esnasında izlediği dört temel yol 6
Şekil 3.1 İşletme ya da performans parametrelerinin metan-biyogaz üretimi ile karşılaştırılması 29
Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan deney düzeneği 33
Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü 34
Şekil 4.3 Silindirik YAHÇYR'ün kullanıldığı çalışma düzeneği 37
Şekil 4.4 Çıkış yapısı şematik görünümü 38
Şekil 4.5 Floküler aşı biyogaz üretimi 44
Şekil 4.6 Elektron taramalı mikroskop (SEM) 49
Şekil 4.7 Modellemede kullanılan YSA'nın genel yapısı 52
Şekil 5.1 Aşı çamuru (900 ml) biyogaz üretim aktivitesinin takibi 55
Şekil 5.2 R1 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 56
Şekil 5.3 R1 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi 56
Şekil 5.4 R1 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 58
Şekil 5.5 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R1 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi 61
Şekil 5.6 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R1 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi 61
Şekil 5.7 R1 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 63
Şekil 5.8 R1 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 64
Şekil 5.9 R1 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 65
Şekil 5.10 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi .. 66
Şekil 5.11 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi 67
Şekil 5.12 R1 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 68
Şekil 5.13 R1 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 69
Şekil 5.14 R1 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 70
Şekil 5.15 R1 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 71
Şekil 5.16 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi 72
Şekil 5.17 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi 73
Şekil 5.18 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi 74

Şekil 5.19 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi 75
Şekil 5.20 R1 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 76
Şekil 5.21 R1 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 77
Şekil 5.22 R1 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 79
Şekil 5.23 R1 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 80
Şekil 5.24 R1 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 81
Şekil 5.25 R2 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 82
Şekil 5.26 R2 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi 82
Şekil 5.27 R2 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 85
Şekil 5.28 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R2 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi 86
Şekil 5.29 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R2 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi 87
Şekil 5.30 R2 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 88
Şekil 5.31 R2 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 89
Şekil 5.32 R2 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 90
Şekil 5.33 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi .. 91
Şekil 5.34 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi 92
Şekil 5.35 R2 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 93
Şekil 5.36 R2 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 94
Şekil 5.37 R2 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 95
Şekil 5.38 R2 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 96
Şekil 5.39 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi 97
Şekil 5.40 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi 97
Şekil 5.41 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi 98
Şekil 5.42 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi 99
Şekil 5.43 R2 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi 100
Şekil 5.44 R2 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 101
Şekil 5.45 R2 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 102
Şekil 5.46 R2 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 103
Şekil 5.47 R2 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 104

Şekil 5.48 R3 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 105
Şekil 5.49 R3 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi 105
Şekil 5.50 R3 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 107
Şekil 5.51 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R3 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi 108
Şekil 5.52 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R3 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi 109
Şekil 5.53 R3 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 110
Şekil 5.54 R3 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 111
Şekil 5.55 R3 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 112
Şekil 5.56 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi 112
Şekil 5.57 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi 113
Şekil 5.58 R3 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 114
Şekil 5.59 R3 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 115
Şekil 5.60 R3 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 116
Şekil 5.61 R3 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 117
Şekil 5.62 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi 118
Şekil 5.63 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi 119
Şekil 5.64 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi 120
Şekil 5.65 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi 120
Şekil 5.66 R3 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 122
Şekil 5.67 R3 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 123
Şekil 5.68 R3 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 124
Şekil 5.69 R3 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 125
Şekil 5.70 R3 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 126
Şekil 5.71 R4 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 127
Şekil 5.72 R4 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi 127
Şekil 5.73 R4 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 129

Şekil 5.74 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R4 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi 130
Şekil 5.75 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R4 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi 131
Şekil 5.76 R4 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 132
Şekil 5.77 R4 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 133
Şekil 5.78 R4 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi 134
Şekil 5.79 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi 135
Şekil 5.80 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi 136
Şekil 5.81 R4 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 137
Şekil 5.82 R4 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 138
Şekil 5.83 R4 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 139
Şekil 5.84 R4 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 140
Şekil 5.85 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi 141
Şekil 5.86 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi 142
Şekil 5.87 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi 142
Şekil 5.88 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi 143
Şekil 5.89 R4 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi 144
Şekil 5.90 R4 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 145
Şekil 5.91 R4 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi 146
Şekil 5.92 R4 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 147
Şekil 5.93 R4 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 148
Şekil 5.94 R5 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 149
Şekil 5.95 R5 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi 149
Şekil 5.96 R5 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 151
Şekil 5.97 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R5 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi 153
Şekil 5.98 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R5 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi 153
Şekil 5.99 R5 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi 155
Şekil 5.100 R5 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi 156

Şekil 5.101 R5 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi 157
Şekil 5.102 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi 157
Şekil 5.103 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi..... 158
Şekil 5.104 R5 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 159
Şekil 5.105 R5 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 161
Şekil 5.106 R5 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 162
Şekil 5.107 R5 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 163
Şekil 5.108 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi 164
Şekil 5.109 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi 165
Şekil 5.110 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi 166
Şekil 5.111 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi 167
Şekil 5.112 R5 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi..... 168
Şekil 5.113 R5 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 169
Şekil 5.114 R5 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 170
Şekil 5.115 R5 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 171
Şekil 5.116 R5 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi 172
Şekil 5.117 R1 ve R2 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması173
Şekil 5.118 R1 ve R3 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması175
Şekil 5.119 R1 ve R4 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması176
Şekil 5.120 R1 ve R5 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması177
Şekil 5.121 Tüm reaktörlerdeki günlük biyogaz üretimlerinin değişimi 179
Şekil 5.122 Çalışma boyunca tüm reaktörlerindeki kümülatif biyogaz üretimi 180
Şekil 5.123 Çalışma boyunca tüm reaktörlerindeki giderilen g TKOİ başına üretilen CH_4 miktarları 182
Şekil 5.124 Çalışma boyunca tüm reaktörlerindeki TKOİ giderim verimlerinin değişimi 183
Şekil 5.125 Çalışma boyunca tüm reaktörlerindeki TKN giderim verimlerinin değişimi 184
Şekil 5.126 Çalışma boyunca tüm reaktörlerindeki TP giderim verimlerinin değişimi 185
Şekil 5.127 Değişen atık katkı oranlarına göre R^2 değişimi..... 185
Şekil 5.128 %20 atık katkısının yapıldığı dönemde TKOİ giderimi ile biyogaz üretimi arasındaki korelasyon 187

Şekil 5.129 %50 atık katkısının yapıldığı dönemde TKOİ giderimi ile biyogaz üretimi arasındaki korelasyon 188
Şekil 5.130 R1 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)... 190
Şekil 5.131 R1 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi 190
Şekil 5.132 R2 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)... 191
Şekil 5.133 R2 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi 191
Şekil 5.134 R3 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)... 192
Şekil 5.135 R3 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi 192
Şekil 5.136 R4 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)... 193
Şekil 5.137 R4 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi 193
Şekil 5.138 R5 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)... 194
Şekil 5.139 R5 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi 194
Şekil 5.140 R1 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)..... 196
Şekil 5.141 R1 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi 196
Şekil 5.142 R2 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 5000X)..... 197
Şekil 5.143 R2 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi 197
Şekil 5.144 R3 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)..... 198
Şekil 5.145 R3 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi 198
Şekil 5.146 R4 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)..... 199
Şekil 5.147 R4 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi 199
Şekil 5.148 R5 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)..... 200
Şekil 5.149 R5 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi 200
Şekil 6.1 Trainscg geri besleme fonksiyonu gizli katman nöron sayısı ile OKH arasındaki ilişki..... 205
Şekil 6.2 Deneysel data YSA model tahminlerinin karşılaştırılması (eğitim)..... 206
Şekil 6.3 Deneysel data ile YSA model tahminleri arasındaki korelasyon (eğitim) 206
Şekil 6.4 Deneysel data YSA model tahminlerinin karşılaştırılması (validasyon)... 206
Şekil 6.5 Deneysel data ile YSA model tahminleri arasındaki korelasyon (validasyon) 207
Şekil 6.6 Deneysel data YSA model tahminlerinin karşılaştırılması (test)..... 207
Şekil 6.7 Deneysel data ile YSA model tahminleri arasındaki korelasyon (test).... 207
Şekil 6.8 R1 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu 209
Şekil 6.9 R2 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu 209
Şekil 6.10 R3 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu 210
Şekil 6.11 R4 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu 210
Şekil 6.12 R5 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu 211
Şekil 7.1 Google Maps arama motorunda “biogas” araması için tüm sonuçlar.... 214
Şekil 7.2 Sabit kubbeli biyogaz tesisi (Nicarao tasarımı)..... 216
Şekil 7.3 HBS 20 gün için biyogaz üretimi m^3/kg (yaş)..... 218
Şekil 7.4 HBS 10 gün için biyogaz üretimi m^3/kg (yaş)..... 218
Şekil 7.5 Düşünülen güneş kollektörlü sabit kubbeli biyogaz tesisi..... 220

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları 5
Çizelge 2.2 Organik yükü yüksek farklı atıkların bazı özellikleri 13
Çizelge 2.3 Türkiye'de bazı şehirler için evsel katı atık bileşimi organik madde içeriği (% ağırlık) 15
Çizelge 4.1 Numune alma muslukları düzeni 36
Çizelge 4.2 Deneysel süreç boyunca çalışma ve atık karışım planı 40
Çizelge 4.3 Reaktörlerde izlenen parametreler ve ölçüm sıklıkları 41
Çizelge 4.4 Beslemede kullanılan ham atıkların genel karakterizasyonu 42
Çizelge 4.5 Reaktörlere beslenen besleme sıvısının genel karakterizasyonu 43
Çizelge 4.6 Reaktörlerde kullanılan floküler aşı çamurun genel karakterizasyonu 44
Çizelge 4.7 Besleme sıvısına katılan stok eser element çözeltisi bileşimi (1 L'lik çözelti için) 46
Çizelge 6.1 YSA modelinde kullanılan girdi ve hedef değerlerin istatiksel analizi 204
Çizelge 6.2 Geri besleme algoritmalarının karşılaştırılması 204
Çizelge 6.3 YSA tabanlı modelin test verileri için istatiksel analizi 208
Çizelge 7.1 Süt sığırcılığı işletmelerinin büyüklük gruplarına göre dağılımı (2013) ... 213
Çizelge 7.2 Sığır besi işletmelerinin büyüklük gruplarına göre dağılımı (2012) 213
Çizelge 7.3 Farklı dizaynlar için yararlanacak kişi sayısı, gerekli BBHG miktarı ve hayvan sayısı 219
Çizelge 7.4 HBS 20 gün için biyogaz üretim miktarına göre gerekli reaktör hacmi ... 220
Çizelge 7.5 Farklı hacimler için biyogaz tesisi ilk yatırım maliyetleri 221
Çizelge 7.6 Düşünülen reaktörler için yıllık işletme maliyeleri 223
Çizelge 7.7 Kapasitelerine göre biyogaz tesislerinin fayda-maliyet hesapları 224

ÖZET

BÜYÜKBAŞ HAYVANSAL ATIKLARIN BİYOMETANİZASYON SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih TUFANER

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar AVŞAR

Bu çalışmada, farklı işletme şartlarında büyükbaş hayvan gübresine (BBHG) organik yükü yüksek atık ilavesi ile arıtma veriminin ve biyometan üretiminin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, birbirine paralel 5 adet 6.15 L hacimli yukarı akışlı havasız çamur yataklı reaktör (YAHÇYR) kullanılmıştır. Reaktörler mezofilik şartlarda (36.5-37°C) 10.000 mg TKOİ/L organik yükleme oranı (OYO) ile işletilmişlerdir. Reaktörlere beslenecek atıklar, birinci dönemde tek kademe ön işlemden ikinci dönemde ise iki kademeli ön işlemden geçirilmişlerdir. Deneysel çalışmalarda organik yükü yüksek atıkların %5, %10, %20, %40 ve %50 oranlarında BBHG'ne ilavesinin biyogaz üretimine etkileri gözlemlenmiştir. Birinci reaktörde (R1), kontrol amaçlı olarak sadece büyükbaş hayvan gübresi (BBHG) kullanılmıştır. İkinci reaktörde (R2), çim atıkları ilave atık olarak kullanılmıştır. Üçüncü reaktörde (R3), %33.3 çim atıkları, %16.7 evsel organik atıkları (mutfak organik atıkları), %16.7 endüstriyel organik atıkları (%50 zeytin prinası ve %50 pamuk küspesi karışımı) ve %33.3 arıtma çamuru karışımı ilave atık olarak kullanılmıştır. Dördüncü reaktörde (R4), %50 evsel organik atıklar ve %50 endüstriyel organik atıkların karışımı ilave atık olarak kullanılmıştır. Beşinci reaktörde (R5), ise arıtma çamuru ilave atık olarak kullanılmıştır. Çalışmalar 20 ve 10 gün olmak üzere iki farklı hidrolik bekleme süresi (HBS) ile yürütülmüştür.

Reaktörlerin içinde, giriş ve çıkışında pH, alkalinite, toplam kimyasal oksijen ihtiyacı (TKOİ), çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ), toplam katı madde (TKM), uçucu katı

madde (UKM), askıda katı madde (AKM) ve uçucu askıda katı madde (UAKM) analizleri yapılmıştır. Sadece reaktör giriş ve çıkışında ise biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), toplam Kjeldahl azotu (TKN), amonyak azotu (NH_3-N), toplam fosfor (TP), çözünmüş fosfor (PO_4^{-3}-P) ve klorür (Cl^-) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca reaktör içerisindeki anaerobik floküler çamurun ve çalışmanın ilerleyen safhalarında teşekkül eden granül çamurların SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri alınmış ve EDX (Enerji Dağılımlı X-ışınları) analizleri yapılmıştır. Tez kapsamında ayrıca birlikte arıtım prosesi için yapay sinir ağları (YSA) tabanlı modelleme ve simülasyon çalışmaları yapılarak anaerobik sistemin deneysel verileri ile günlük biyogaz üretim miktarı arasındaki ilişkinin bütünselliği ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca bu tez kapsamında ülkemiz yerli sanayisinde yapılabilecek biyogaz tesisleri için maliyet analizi çalışmaları da yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında sırasıyla ortalama %79±4, %78±4, %80±4, %81±6, %80±5 ve %76±7, %74±8, %79±6, %79±8, %80±5 oranlarında TKOİ giderimi ile beraber ortalama 0.63±0.19, 0.68±0.23, 0.64±0.17, 0.75±0.21, 0.67±0.23 ve 0.92±0.24, 0.95±0.30, 0.97±0.27, 1.10±0.29, 0.95±0.28 L/gün biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. R2 reaktöründe, günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne %20 (TKOİ olarak) oranında çim atıkları ilavesi durumunda (HBS: 20 gün) %27 oranında olduğu tespit edilmiştir. R3 reaktöründe, günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne %20 (TKOİ olarak) oranında bütün atıkların (çim atıkları, evsel-endüstriyel organik atıkları ve arıtma çamuru) karışımının ilavesi durumunda (HBS: 20 gün) %13 oranında olduğu tespit edilmiştir. R4 reaktöründe, günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne %20 (TKOİ olarak) oranında evsel ve endüstriyel organik atıkları karışımının ilavesi durumunda (HBS: 10 gün) %23 oranında olduğu belirlenmiştir. R5 reaktöründe ise günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne TKOİ olarak %20 oranında arıtma çamuru ilavesi durumunda (HBS: 20 gün) %26 oranında olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte modelleme çalışmaları; BBHG'ne, deneysel çalışmalarda kullanılan ilave atıkları %30 seviyelerine kadar karıştırmanın günlük biyogaz üretimine olumlu katkılarının olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan ham atıkların belirli bir çapa (<5 mm) kadar indirilerek (<1 mm elek altı atıkların) beslenmesi biyogaz üretim performansına olumlu katkı yaparken daha da fazla parçalamanın (<1 mm) ise performansı düşürdüğü tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Büyükbaş hayvan gübresi, biyogaz üretimi, anaerobik arıtma, çim atıkları, evsel organik atıklar, endüstriyel organik atıklar, arıtma çamuru, yapay sinir ağları, fayda maliyet analizi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF IMPROVING BIOMETHANIZATION PROCESSES OF CATTLE MANURE

Fatih TUFANER

Department of Environmental Engineering

Phd. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Yaşar AVŞAR

In this study, the improving of treatment efficiency and biomethane production has been investigated with the addition of wastes containing high levels of organic matter to cattle manure (CM) in different operation conditions. In this experimental study, 5 parallel 6.15 L upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor has been used. These reactors have been operated at mesophilic conditions (36.5-37°C) with organic loading rate (OLR) of 10.000 mg TCOD/L. The wastes that will be fed to the reactors were treated with single and two-stage pretreatment in the first and second period, respectively. In the experimental studies, wastes containing high levels of organic matter are added to CM at the rates of 5%, 10%, 20%, 40% and 50%, and their effects to the production of biogas have been observed. In the first reactor (R1), only cattle manure (CM) was used for control purposes. In the second reactor (R2), grass wastes were used as additional waste. In the third reactor (R3), 33.3% grass wastes, 16.7% homemade organic wastes (kitchen organic wastes), 16.7% industrial organic wastes (50% cottonseed meal and 50% olive press cake mix), and 33.3% sludge mixtures were used as additional wastes. In the fourth reactor (R4), 50% homemade organic wastes and 50% industrial organic waste mixtures were used as additional wastes. In the fifth reactor (R5), sludge mixtures were used as additional wastes. Studies were conducted under two different hydraulic retention time (HRT) of 20 and 10 days.

Parameters such as pH, alkalinity, total chemical oxygen demand (TCOD), dissolved chemical oxygen demand (DCOD), total solids (TS), volatile solids (VS), suspended solids

(SS) and volatile suspended solids (VSS) were monitored in the reactors, influent and effluent of the reactors. The other parameters such as biological oxygen demand (BOD), total Kjeldahl nitrogen (TKN), Ammoniacal nitrogen (NH_3-N), total phosphorus (TP), orthophosphate (PO_4^{-3}-P) and chloride (Cl^-) were monitored in the reactors, influent and effluent of the reactors. Moreover, SEM (Scanning Electron Microscope) photographs have been taken of anaerobic floccular and granular sludge that was formed from the later stages of the study in the reactors and their EDX (Energy Dispersive X-ray) analysis have been carried out. In the thesis, by developing artificial neural network (ANN) based modeling and simulation studies for the treatment process, the integrity of the relationship between the experimental data of anaerobic system and the daily amount of biogas production has been demonstrated. Furthermore, in the thesis, cost analysis studies have been conducted for the biogas plants that can be established in our country's domestic industry.

As a result of the experimental studies, in the R1, R2, R3, R4 and R5 reactors, at the period of HRT 20 days and HRT 10 days, on average %79±4, %78±4, %80±4, %81±6, %80±5 and %76±7, %74±8, %79±6, %79±8, %80±5 TCOD removal as well as 0.63±0.19, 0.68±0.23, 0.64±0.17, 0.75±0.21, 0.67±0.23 and 0.92±0.24, 0.95±0.30, 0.97±0.27, 1.10±0.29, 0.95±0.28 L/day biogas productions are realized. In R2 reactor, the most positive contribution to the daily production of biogas was found to be 27% in the case of adding 20% (as TCOD) grass waste to cattle manure (HRT: 20 days). In R3 reactor, the most positive contribution to the daily production of biogas was found to be 13% in the case of adding of a mixture of 20% (as TCOD) all wastes (grass waste, homemade-industrial organic wastes and sludge) to cattle manure (HRT: 20 days). In R4 reactor, the most positive contribution to the daily production of biogas was found to be 23% in the case of adding a mixture of 20% (as TCOD) homemade and industrial organic wastes to cattle manure (HRT: 10 days). In R5 reactor, the most positive contribution to the daily production of biogas was found to be 26% in the case of adding 20% (as TCOD) sludge to cattle manure (HRT: 10 days). In addition, modeling studies show that there is a positive contribution to the daily production of biogas in the case of mixing up to 30% additional wastes to cattle manure used in experimental studies. Moreover, it was determined that while feeding (<1 mm sieve wastes) the raw wastes after reducing their diameters to a certain value (<5 mm) has positive contribution to biogas production performance, further shredding them (<1 mm) cause performance degradation.

Keywords: Cattle manure, biogas production, anaerobic treatment, grass waste, household organic waste, industrial organic waste, sludge waste, artificial neural network, cost benefit analysis

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Havasız (anaerobik) arıtma kompleks organik maddelerin, basit yapıdaki organiklerin ve çözünmüş nütrientlerin biyokimyasal indirgenmesi ile gerçekleşen mikrobiyal bir prosestir. Bu proses, oksijensiz ortamda birkaç mikroorganizma grubu vasıtasıyla kompleks organik maddelerin birbirini takip eden ve birbirine paralel seriler halinde bozunması ile meydana gelen bir süreçtir. Bu biyokimyasal süreç sonunda organik maddeler biyogaz dediğimiz metan (CH_4), karbondioksit (CO_2), amonyak (NH_3) ve hidrojen sülfür (H_2S) gibi nihai ürünlere dönüştürülmektedir.

Sümerlerin atıkları anaerobik olarak arıttığı bilinmektedir. Bu nedenle biyogaz üretiminin başlangıcı MÖ 3000'lere kadar götürülebilir. Aynı şekilde antik Çin'de atıksuları depolamak için kapalı tankların kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca bazı kanıtlara göre MÖ 10. yüzyıl boyunca Asurlular ve 16. yüzyıl boyunca İranlılar tarafından banyo suyunun ısıtılmasında biyogaz kullanılmıştır [1].

Havasız çürütücünün ilk olarak nerede kurulduğu tam olarak bilinmemektedir. Bazı kaynaklara göre İlk anaerobik çürütücü tesisi 1859'da Hindistan Bombay'da kurulmuştur. Ancak Yeni Zelanda Otago şehrinde de 1840'lı yıllara ait havasız çürütücü kalıntılarına rastlanmıştır [2].

Havasız çürütme prosesi çok eski zamanlardan beri bilinen ve üzerinde bilimsel olarak çalışılan bir konudur. Benjamin Franklin 1764'te ilk olarak New Jersey'de sığ ve çamurlu bir gölün yüzeyinin büyük bir bölümünde alevlenmenin olduğunu belirtmiştir. Daha sonra bu bilgi 1790'da Joseph Priestley tarafından gerçekleştirilen yanıcı hava deneyleri

ile raporlanmıştır [2]. Göl ve bataklık sedimentindeki yanıcı gazın oluşumunu bilimsel olarak 1776'da ilk tanımlayan araştırmacı Alexander Volta'dır [3]. 1804'te Dalton metanın (CH_4) kimyasal formülünü tanımlamıştır [2]. İngiliz kimyacı Humphry Davy 1808'de sığır gübresinden metan üretmeyi başarmıştır. Daha sonra bu çalışma Davy'in öğrencisi İngiltere'nin ünlü fizikçisi Michael Faraday tarafından devam ettirilmiştir. Ayrıca Willliam Henry 1860 yılında bataklıkta oluşan gazın olası formunu çözmüştür [4]. Deneysel başarıları Pastör'ün bir öğrencisi tarafından kaydedilen Gayon 1883-1884 yılarında 35°C'de 1 m^3 gübreden 100 L metan üretilebileceği sonucuna ulaşmıştır. Louis Pasteur, anaerobik gübre fermantasyonu neticesinde oluşan bu derece büyük hacimde toplanan bu gazın özel şartlar altında ısıtma ve aydınlatmada kullanılabileceği sonucuna ulaşmıştır. 1856'da Reiset, metanın dışkılama esnasında dışarı çıktığını bulmuş ve bu prosesi açıklamak için organik maddelerin çürümesi üzerine çalışmalarda bulunmuştur [5].

Buna rağmen atıksu arıtımında ve katı atıklarda anaerobik çürütme 19. Yüzyılın sonlarında uygulanmaya başlanmıştır [4]. Anaerobik çürütme ilk olarak 1860'lardan önce Fransa'da Mouras tarafından basit hava geçirmez odaların geliştirilmesiyle arıtma çamurlarına uygulanmıştır. 1987'de İngiltere Exeter şehrinin yerel yönetim meclisi "septik tank" denen benzer bir anaerobik sistemde şehrin bütün atıksularının arıtılmasını onaylamıştır. 20. Yüzyılın başlarında çökelti çamurlarının birleşerek tek bir bölmede çürümenin gerçekleştiği daha ileri seviye bir sistem olan Imhoff zamanla geliştirilmiştir. İlkel anaerobik filtreler ve hibrit sistemler dönem içerisinde zamanla tanınmaya başlanmıştır [6]. Kararsız, yetersiz ve yavaş bir proses olması gerekçesiyle uzun bir süre değer verilmemesine rağmen anaerobik arıtma 19. Yüzyılın sonlarına kadar kullanılmıştır. Anaerobik çürütmenin gelişmesini sınırlayan en büyük etkenler sistemin düşük verimli oluşu, mikroorganizmaların yavaş çoğalıyor olması ve özellikle asetojenik ve metanojenik safhaların karmaşık oluşudur [4].

Özellikle hayvansal atıklarda alternatif bir enerji kaynağı olarak umut verici görünen anaerobik çürütme 1970'lerde bir atıksu arıtma sistemi olarak ortaya çıkmıştır. Ancak, 1980'ler ve 1990'larda anaerobik çürütme teknolojilerinin geniş ölçüde yayılması endüstriyel organik atıksuların çoğunun arıtıma yöntemi olan Yukarı Akışlı Havasız Çamur Yatak reaktörlerin (YAHÇYR) gelişmesine bağlıdır. Bu dönemde anaerobik

çürütücülerin temel amacı atıksuların arıtılması olmuştur. Anaerobik çürütücülere geri dönüş, çeşitli biyokütle ve biyoatık uygulamaları ile ancak son yüzyılın başlarında olmuştur. Aslında, biyogaz Çin'de yaşayan 25 milyon insan tarafından neredeyse yılın 8-10 ayı aydınlanma ve mutfak işleri için kullanılmaktadır [7]. Organik atıkların anaerobik çürümesiyle biyogaz üretimi 10 yıllardır uygulanmakta ve bu yöntemin birçok işletme koşulu olgun durumdadır [8]. Ancak karmaşık bir sistem olmasından dolayı hala bilinmeyen yönlerinin olduğu yapılan yeni çalışmalarda açıkça görülmektedir.

Havasız çürütücülerin asıl kullanım amacı katı atıkların stabilize edilmesi ve azaltılmasıdır [9]. Etiyopya'ya 1980 ile 2000 yılları arasında 1000'den fazla pilot biyogaz tesisi kurulmuş ancak farkındalık oluşturma ve örnek uygulama olmanın ötesine gidilememiştir [10].

Ülkemizde biyogazla ilgili olarak ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü ile Eskişehir Bölge Toprak Su Araştırma Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir. 1980'li yılların başlarında tüm dünyada yaşanan petrol krizinin etkisiyle, Köy Hizmetleri Ankara Toprak Su Araştırma Enstitüsü'nde bir biyogaz birimi kurulmuş ve biyogazın ülke çapında yaygınlaştırılma çalışmaları hız kazanmıştır [11], [12]. Yapılan araştırma, uygulama, eğitim ve yayım çalışmaları başarılı sonuçlar vermiş, kamuoyunda farkındalık oluşturularak önemli düzeyde bilgi birikimi sağlanmıştır. Ancak sonrasında ise, konunun ülkemiz açısından öneminin tam olarak kavranamaması, araştırmalardan elde edilen verilere olan güvensizlik, yönetimlerin konuya olumsuz bakışları, çalışmaları koordine edebilecek bir yapılanmanın oluşturulamaması ve konuyla ilgili gerekli ve yeterli desteğin sürekli olmaması nedeniyle 1980'li yılların sonunda Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü biyogazla ilgili tüm araştırma ve uygulama çalışmalarını durdurmuştur [13].

Türkiye'deki biyogaz tesislerinin çoğu belediye veya sanayi bünyesinde bulunan çöp gazı veya atıksu arıtma tesisidir. Genellikle bu tesislerin çoğu özellikle İstanbul ve Kocaeli gibi batı şehirlerinde bulunmaktadır. 2011 yılı verilerine göre Türkiye'de toplam 37 tane biyogaz tesisi bulunmaktadır [14]. Her geçen gün sayısı artmakla beraber 2013 yılı itibari ile 18 tanesi büyükbaş hayvan gübresi veya katkısı kullanılan ve bir kısmı da inşaat aşamasında olan toplamda 76 tane biyogaz tesisi bulunmaktadır [15]. Ancak, ülkemiz sadece hayvan atıkları ile çalışabilecek, 2.000 adet biyogaz tesisi kapasitesine sahiptir [14].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, büyükbaş hayvan gübresinin biyometanizasyon süreçlerinin iyileştirilmesi için ön işleme tabi tutulan büyükbaş hayvansal atıklar ile organik yükü yüksek olan çim atıkları evsel organik atıklar (mutfak organik atıkları), endüstriyel organik atıklar (zeytin prinası ve pamuk küspesi) ve arıtma çamuru farklı oranlarda karıştırılarak en uygun karışım oranlarının ve işletme şartlarının saptanması amaçlanmıştır. Ayrıca çalışma boyunca; anaerobik prosesin kararlılığını etkileyebilecek işletme koşulları takip edilerek biyogaz üretimi ve arıtma verimi üzerine olan etkilerinin belirlenmesi, reaktör içerisindeki anaerobik çamurun farklı işletme şartlarındaki durumu ve özelliklerinin incelenmesi, modelleme ve simülasyon çalışmaları yapılarak anaerobik sistemin deneysel verileri ile günlük biyogaz üretim miktarı arasındaki ilişkinin bütünselliğinin ortaya çıkarılması ve ülkemiz yerli sanayisinde yapılıp ülkemiz şartlarında işletilebilecek biyogaz tesisleri için maliyet analizi çalışmalarının yapılması bu tezin kapsamını oluşturmaktadır.

1.3 Hipotez

Büyükbaş hayvan gübresi (BBHG), oluşan atık miktarı ve organik yükü bakımından anaerobik sistemlerin uygulanabileceği önemli bir atıktır. Ancak BBHG'nin bileşiminin C/N oranı düşüklüğü ve kolay hidrolize olabilen substratın azlığı yönüyle anaerobik şartlar için yetersiz olduğu bilinmektedir. Farklı kaynaklardan çıkan ve arıtılması gereken yüksek C/N oranına sahip ve kolay hidrolize olabilen atıklar BBHG'ne karıştırılarak bu eksiklik giderilebilir. Ayrıca organik içeriği yüksek olan atıkların anaerobik işletmeye tabi tutulması ile yenilenebilir bir enerji kaynağı olan biyogaz ve tarımda kullanılabilir organik gübre üretilebilir. Biyometanizasyon süreçlerinin iyileştirilmesi ile anaerobik sistemlerin uygulanabilirliği arttırılabilir.

BÖLÜM 2

ANAEROBİK ÇÜRÜME VE ORGANİK YÜKÜ YÜKSEK ATIKLAR

2.1 Anaerobik Biyoteknoloji

Anaerobik arıtma kompleks organik maddelerin, basit yapıdaki organiklerin ve çözünmüş nütrientlerin biyokimyasal indirgenmesi ile gerçekleşen mikrobiyal bir prosestir. Başka bir tanıma göre, anaerobik arıtma, organik atıkların oksijensiz ortamda biyolojik süreçlerle parçalanmak suretiyle, CH_4, CO_2, NH_3 ve H_2S gibi son ürünlere dönüştürülmesi olarak tanımlanmaktadır. Anaerobik arıtma ile önemli ölçüde enerji üretilebilir. Anaerobik arıtmada giderilen organik karbonun %90-98 biyogaza (metan vd.) dönüştürülür. Anaerobik arıtmada yüksek biyokütle aktivitelerinin oluşabilmesi için NH_4 konsantrasyonlarının 40-70 mg/L gibi yüksek seviyelerde tutmak gerekmektedir. Anaerobik süreci Çizelge 2.1'deki mikroorganizma grupları gerçekleştirmektedir [16].

Çizelge 2.1 Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları [16]

Asit Bakterileri	Bütirik ve propiyonik asit üretenler
	Asetik asit üretenler
Metan Bakterileri	Asetik asit kullananlar
	Hidrojen kullananlar

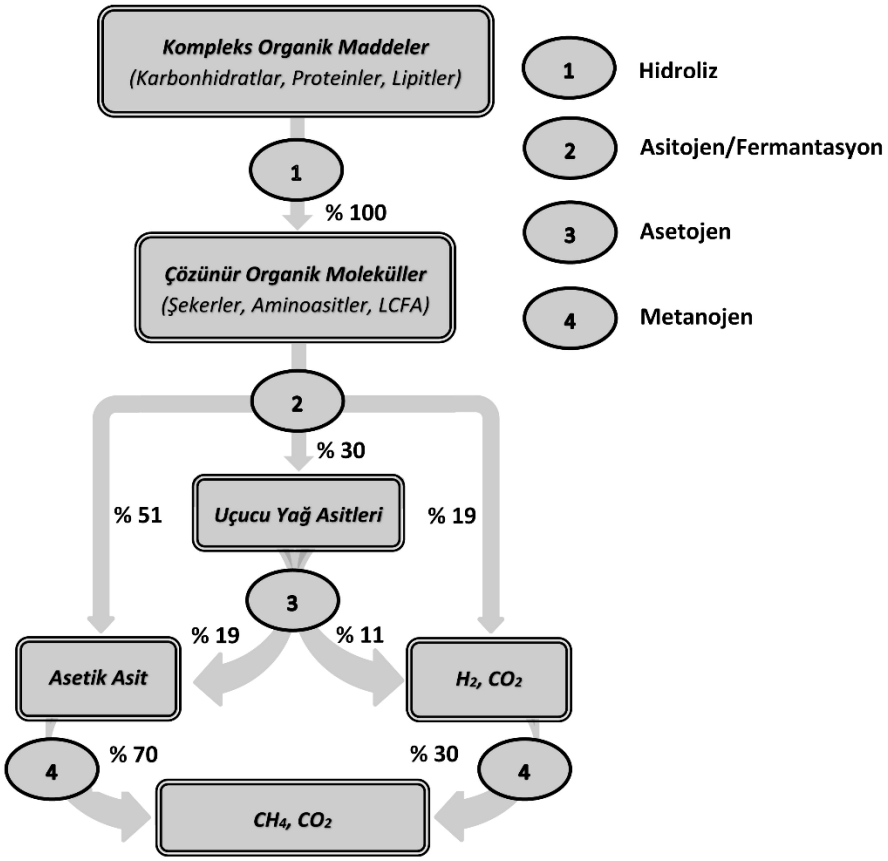
Kompleks organik maddelerin havasız ayrışması en genel halde dört safhada gerçekleşir (Şekil 2.1):

•Yüksek molekül ağırlıklı katı ve çözünmüş organik maddelerin hidrolizi,

•Düşük molekül ağırlıklı maddelerin asit bakterilerince asetik asit, propiyonik asit ve bütirik asit gibi iki karbonludan büyük uçucu yağ asitlerine, alkollere, CO_2 ve H_2'ye dönüştürülmesi,

•Karmaşık yapıdaki fermantasyon ürünlerinin asetik asit, CO_2 ve H_2'ye dönüştürülmesi,

• Asetik asit, H_2 ve CO_2'den metan üretimi.



Şekil 2.1 Kompleks substratın anaerobik şartlarda bozunması esnasında izlediği dört temel yol [17], [18]

2.1.1 Hidroliz

Anaerobik mikroorganizmalar partikül ya da çözünmüş haldeki karbonhidrat, protein ve lipit gibi substratları direkt olarak kullanamazlar. Bu nedenle bu organiklerin daha küçük moleküllere parçalanması gerekmektedir. Enzimatik parçalanma neticesinde karbonhidrat, protein ve lipitlerden sırasıyla monosakkaritler, aminoasitler ve uzun zincirli yağ asitleri (LCFA) oluşmaktadır [19].

Anaerobik sürecin ilk safhası olan hidroliz hücre dışı enzimlerle gerçekleşen yavaş bir süreçtir. Reaksiyon hızında pH, sıcaklık, partikül boyutu, karıştırma durumu, mikroorganizma/substrat oranı ve çamur yaşının önemli etkileri vardır. Yağlar zor hidrolize olan ve reaksiyon hızını yavaşlatan organiklerdir. Yine aynı şekilde selülozda zor hidroliz olan organik yapılardandır. Özellikle lignin anaerobik şartlarda neredeyse hiç hidrolize olmamaktadır [16], [17].

Parçacık halindeki organik maddelerin hidrolizi anaerobik proseste hız sınırlayıcı olarak dikkate alınmalıdır [20], [21], [22]. Bununla birlikte bazı araştırmacılar hidroliz safhasının yeteri kadar tanımlanmadığını belirtmişlerdir [23], [24].

2.1.2 Asit Üretimi (Asitojen/Fermantasyon)

Bu safhada, hidroliz ile daha basit hale gelen ara ürünlerin bir dizi reaksiyon ile fermantasyonu gerçekleşmektedir. Fermantasyon neticesinde hidroliz ürünleri asetik asite (CH_3-COOH) veya işletme şartlarının kararlı olmaması halinde asetik asitin yanında propiyonik asite (CH_3-CH_2-COOH), bütirik asite ($CH_3-CH_2-CH_2-COOH$), izo bütirik asite ($(CH_3)_2-CH_2-COOH$), valerik asite ($CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-COOH$) ve izo valerik asit ($(CH_3)_2-CH_2-CH_2-COOH$) gibi iki karbonludan büyük uçucu yağ asitlerine, alkollere, CO_2'e ve hidrojene (H_2) dönüştürülmektedir [25]. Kararlı anaerobik durumlarında yağ asitleri oldukça düşük konsantrasyonlarda olmaktadır (100-300 mg HAc/L) [26].

Anaerobik ortamdaki uçucu yağ asitleri (UYA) ve H_2 seviyesi prosesin kararsızlığı hakkında önemli bir göstergedir. UYA'nin birikimi pH düşüşüne sebep olarak metanojenik aktivitenin engellenmesine ve sistemin bozulmasına sebep olacaktır [27]. Asit metandan daha hızlı üretildiği için, çözünmüş organik madde oranındaki ani artış asit üretiminin artmasıyla asit birikimine yol açmaktadır. Bu durum metan üretiminde inhibisyona sebep olmaktadır [16]. Anaerobik çürümede asetik asit genellikle diğer UYA'nden daha yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır [28]. Ancak, metanojen mikroorganizmalarını daha çok propiyonik ve bütirik asit inhibisyona uğratır [29]. Son yıllarda yapılan bir çalışmada propiyonik asitin inhibisyona neden olmaktan ziyade direkt etkisinin olduğu bulunmuştur [30].

Hidroliz ürünlerinin dönüşümü bakteri hücresinde gerçekleşmektedir. Fermantasyonun adımları mikroorganizmaların ve substratın varlığına bağlıdır. Asitojenler metanajonlere

göre daha hızlı büyümekte ve pH düşüşüne karşı daha az hassastırlar [31]. Genel olarak, asitojenik (fermantatif) mikroorganizma popülasyonu anaerobik çürütücüdeki toplam mikrobiyal popülasyonun yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır [32]. Bu mikroorganizmalar çok hızlı üremektedir ve bu nedenle asitojenik bakteriler anaerobik sistemler için sınırlayıcı olarak kabul edilmezler [33].

2.1.3 Asetat Üretimi (Asetojen)

Bu safhada, daha karmaşık yapıya sahip indirgenmiş fermantasyon ara ürünleri asetik asit, CO_2 ve H_2'ye dönüştürürler. Aslında asitojen ile asetojen safha arasında açık bir ayrım yoktur [34]. Alkoller ve uzun zincirli yağ asitleri gibi fermantasyon ara ürünlerinin dönüşümü standart koşullar altında mümkün değildir. Reaksiyonların sürdürülebilmesi için sintrofik mikrobiyal ilişkinin olması gereklidir. H_2 üretimi arttığında, ortamda H_2 tüketen mikroorganizmaların (sülfat indirgeyen bakteriler, metanojenler) anaerobik ortamda bulunması oldukça önemlidir. Bu şekilde, anaerobik proseste H_2'nin kısmi basıncı kontrol altına alınmış olur [16]. H_2'nin kısmi basıncı 10^{-4}-10^{-5} atm aralığında olduğunda reaksiyonlar fizıbıl olarak gerçekleşmektedir [17]. Bu şartlar sağlanmadığı takdirde yağ asitleri ortamda birikmeye başlayacak ve pH değeri düşecek ve bu safhadan sonra meydana gelecek olan metan oluşum safhası inhibisyona uğramış olacaktır [16].

Bu safhada çok aktif olan sülfat indirgeyen bakteriler metan bakterilerine çok benzerler. Bu bakteriler H_2, asetik asit ve uzun zincirli uçucu yağ asitlerinin parçalanmasını sağlarlar. Metan bakterileri için H_2S önemli bir nütrienttir. H_2S başka kaynaklardan karşılanamıyorsa sülfatın kullanılması gerekecektir. H_2S kuvvetli bir indirgeyici olduğundan havasız ortamı koruyan önemli bir bileşiktir. Bununla birlikte SO_4^{-2} konsantrasyonu çok yüksek olursa oluşan H_2S metan arkeleri için zehirli seviyeye ulaşabilmektedir. Ayrıca sülfat gideren bakteriler, metan arkeleri ile H_2 için rekabete girebilmektedir. Ortamda yeterince sülfat olmadığında sülfat gideren bakteriler asetik asit üreten bakteriler gibi H_2 üretecek tarzda faaliyet gösterebilmektedir [16].

2.1.4 Metan Üretimi

Son safha olan metanojenik safha CH_4 üretiminin gerçekleştiği oldukça yavaş bir süreçtir. Metan, asetik asitin parçalanması ile %70 ve/veya H_2 ve CO_2'nin sentezi sonucu %30

oranında oluşur. H_2 ve CO_2 kullanan bakteriler asetik asit kullananlara göre çok daha hızlı çoğalmaktadır [16]. Metan üretimi havasız süreçte genelde hız sınırlayıcıdır [16], [35], [36] ancak bazen bu safha hidroliz safhasıdır [16]. Eğer hidroliz safhası kolay ve hızlı gerçekleşirse, metanojen bakterilerinin büyüme hızı asitojen bakterilerinin büyüme hızından yavaş olduğu için metanojen safhası sınırlayıcı olacaktır. Bu durumda, aşırı organik yükleme veya toksik maddeler metabolik ara ürünlerin özellikle UYA'nin birikmesine neden olabilir [37]. Metan üreten türler asit üreten türlere göre pH düşüşünden dolayı daha fazla inhibe olmaktadırlar [38]. Metan bakterileri en iyi 6,7-8 pH aralığında faaliyet gösterirler. Metan arkelerinin kullanacağı besin kaynağı oldukça sınırlı olup asetik asit, metanol (CH_3OH), H_2 ve tek karbonlu format (HCO_2^-) ve metilamin (CH_3NH_2) gibi bileşiklerdir. Asetattan metana *Methanoseata* ve *Methanosarcina* sorumludur. *Methanoseata* çubuksu mikroorganizmalardır ve sadece asetatı karbon ve enerji kaynağı olarak kullanırlar. *Methanosarcina* yuvarlak olup asetat, metanol ve metilaminler ile bazen de hidrojeni enerji kaynağı olarak kullanarak kümeler halinde çoğalırlar. Hangisinin daha aktif olduğunu ortamdaki asetat konsantrasyonu belirler. Asetat konsantrasyonu 60 mg/L üzerinde ise *Methanosarcina* altında ise *Methanoseata* aktiftir. Bu nedenle kararlı sistemlerde, *Methanoseata*'lar aktif mikroorganizmalardır. H_2 kullanarak metan üreten bakterilerin aktif olması pH dengesini koruduğu için önemlidir. Bu bakteriler daha dağınık bir yapıdadırlar. *Methanobacterium, Methanobrevibacter, Methanospirillum* ve *Methanococcus* sık görülen türlerdir. Spesifik çoğalma hızları 0,8-4,1 gün^{-1} arasında değişmektedir [16].

Anaerobik süreçte atıksulardan giderilen KOİ, metan üretimiyle direkt ilişkilidir. Buna göre giderilen KOİ üretilen metan ile değerlendirilebilir. Normal şartlarda teorik metan üretimi 0.35 m^3/kg KOİ'dir. Burada sisteme beslenen substratın toplam KOİ'sinin anaerobik bozunabilirliği çok önemlidir [39].

Kompleks organik maddelerden biyometan üretimini iyileştirmek için anaerobik süreçte yer alan farklı safhalar arasında bir dengenin sağlanması gerekmektedir. Burada organik madde dönüşüm oranı en yavaş safhanın kinetik karakteristiğine göre atık besleme oranı ayarlanmalıdır [4].

2.2 İşletme Koşulları

Anaerobik proseste işletme ve çevre parametreleri sistemin mikrobiyal gidişatını, performansını ve davranışını açık bir şekilde etkilemektedir. Sistemde ilk önce kontrol edilmesi gereken sıcaklık, alkalinite, pH ve toksisite faktörleri anaerobik prosesi önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca sistemde kullanılacak olan aşı çamurunun yapısı anaerobik proses için dikkate alınması gereken bir başka önemli unsurdur [40].

2.2.1 Alkalinite ve pH

Anaerobik sistemlerde alkalinitenin takibi, pH takibinden daha güvenilir bir yöntemdir. UYA birikiminde pH düşüşünden önce alkalinite düşmektedir. Sistemin tamponlama kapasitesi düşük ise organik yükleme oranı düşürülmelidir ya da daha hızlı bir şekilde çözüm üretmek için sisteme direkt olarak sodyum hidroksit veya sodyum karbonat gibi kuvvetli bazlar eklenerek pH seviyesi ayarlanmalıdır [41]. Özellikle bütirat ve izobütirat gibi uçucu yağ asitlerinin izlenmesi proses kararlılığı hakkında bilgi verecektir [42].

Anaerobik çürümede ideal pH aralığı çok dar olup 6.8-7.2 aralığındadır. pH 6.6 değerinin altına düştüğünde metanojenik büyüme oranı önemli ölçüde azalmaktadır [43]. Metanojenik safha için optimal pH 7 civarında olmasına rağmen hidroliz ve asitojen safhası için optimum pH değerinin 5.5-6.5 aralığında olduğu belirtilmiştir [44], [45]. Hayvansal atıklar gibi bazı yüksek amonyak içerikli atıklar amonyağın yüksek tamponlama kapasitesi nedeniyle pH değerinin genellikle 7'den aşağı düşmesine mani olmaktadır [46].

2.2.2 Sıcaklık

Sıcaklık anaerobik mikroorganizmaların metabolik aktivitelerini etkileyen önemli bir parametredir [29]. Ortam sıcaklığındaki 2 ya da 5°C'lik bir düşüş dahi biyogaz üretim hızını düşürmektedir [47]. Anaerobik proseste 20°C'den düşük sıcaklıklar psikofilik, 20-45°C arası mezofilik ve 45-60°C arası sıcaklıklar ise termofilik koşullar olarak dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, reaktörlerin çoğu ya mezofilik ya da termofilik koşullarda optimal olarak sırasıyla 35°C ve 55°C'de işletilmektedir [29]. Aslında anaerobik çürümede mezofilik ve termofilik koşullar için birbiriyle çelişen çok sayıda çalışma olmasından dolayı sıcaklık için bir standarttan ya da optimal bir değerden bahsetmek

çokta mümkün olmamaktadır. Ancak mezofilik safha mikroorganizmaların işletilmesi açısından termofilik safhaya göre çevresel parametrelerin değişimine karşı daha geniş bir toleransa sahiptir [48]. Termofilik bakterilerin toksisite ve sıcaklık dalgalanmalarına karşı daha hassas olması ve mezofilik sürecin daha kararlı olması nedeniyle mevcut anaerobik çürütme sistemlerinde mezofilik işletme şartlarının daha çok kullanıldığı görülmektedir [49]. Daha az maliyet gerektiren mezofilik şartların 33-37°C aralığında daha stabil olduğu belirtilmiştir [50]. Ayrıca mezofilik şartların termofilik şartlara göre amonyak [51], [52] ve UYA [53] inhibisyonuna daha az maruz kaldığı belirtilmiştir. Ancak termofilik şartlarda birim reaktör hacminden mezofilik şartlara göre daha fazla metan üretimi sağlandığı belirtilmiştir [54].

2.2.3 Toksisite ve İnhibisyon

Anaerobik proseslerde toksisite ve inhibisyona genellikle amonyak, sülfür, ağır metaller ve organikler neden olmaktadır. Ayrıca, birbirinden farklı nitelik ve yapıdaki aşı çamuru, atık kompozisyonu, işletme metodu ve şartlarından dolayı inhibisyon ve toksisite çok çeşitlilik göstermektedir [55].

2.2.3.1 Amonyak

Anaerobik mikroorganizmaların en hassası olan metanojenlerin büyümeleri, amonyak inhibisyonundan dolayı genellikle durur [56]. Amonyak inhibisyonu genellikle pH değeri 7'nin üzerine çıktığında görülmektedir [57]. Mikroorganizmalar için azot gerekli bir nütrient olduğundan dolayı amonyağın 200 mg/L'den düşük konsantrasyonlarının anaerobik proses için faydalı olduğu bilinmektedir. [58]. Amonyak konsantrasyonunun 200-1000 mg/L arasında olumsuz etkisinin olmadığı, 1500-3000 mg/L arasında yüksek pH'larda engelleyici ve 3000 mg/L'den büyük konsantrasyonlarda ise zehirlilik etkisinin olduğu belirtilmiştir [18].

2.2.3.2 Ağır Metaller ve Sülfürler

Ağır metaller arıtma çamurlarında yüksek konsantrasyonlarda bulunabilmektedir. Özellikle krom, demir, kobalt, bakır, çinko, kadmiyum ve nikel, önemsenmesi gereken ağır metallerdir [59]. Ağır metaller birçok toksik kimyasalın aksine biyolojik olarak

parçalanmazlar ve toksik konsantrasyona kadar sistemde birikebilirler [60]. Anaerobik reaktör performansının incelendiği bir çalışmada ağır metal toksisitesi çoğunlukla sistemin kararlılığını bozmuş ya da sistem performansını önemli ölçüde düşürmüştür [61].

Anaerobik proseste sülfitler, substrattaki sülfatların indirgenmesi ve atıktaki proteinlerin parçalanması sonucunda oluşmaktadırlar. Sülfat gideren bakteriler pH ve sıcaklık değişikliklerine daha az hassastırlar. H_2S yüksek konsantrasyonlarda anaerobik arıtmayı inhibe etmektedir. Kükürt bileşiklerinin zehirli etkilerinin $SO_4^{-2} < SO_3^{-2} < H_2S + HS^- < S^{-2}$ sırasına göre arttığı tespit edilmiştir. 5000 mg/L'den daha düşük sülfat konsantrasyonlarında asetat kullanan metan bakterilerini KOİ/SO_4^{-2} ≤ 10 olduğu taktirde önemli ölçüde inhibe etmediği belirtilmektedir. Ortamdaki H_2S konsantrasyonunun 250 mg/L'ye ulaştığında asetattan metan üretiminin tamamen inhibe edildiği tespit edilmiştir. H_2S, HS^- ve S^{-2} formundaki toplam çözünmüş sülfit konsantrasyonun 50-100 mg/L olması halinde, anaerobik reaktörlerde önemli bir inhibisyona yol açmadığını ve reaktörün 200 mg/L'ye kadarki konsantrasyonlara alıştırılabildiği belirtilmiştir [16].

2.2.3.3 Organikler

Anaerobik sistemleri inhibe edebilen organik solventler, alkoller ve uzun zincirli yağ asitleri gibi pek çok organik madde bulunmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda toksik olmalarına karşın düşük konsantrasyonda anaerobik olarak arıtılabilmektedirler [18] Özellikle selüloz ve lignin içeren atıklar anaerobik prosessin hidroliz safhasında hız sınırlayıcıdırlar.

2.3 Organik Yükü Yüksek Atıklar

1500 mg/L'den yüksek KOİ'ye sahip atıksularda anaerobik arıtım aerobik arıtmaya göre önemli ölçüde daha ekonomiktir. Anaerobik arıtma ile enerji tüketilmez, biyoenerji (biyogaz) üretilir. Özellikle organik yükü yüksek olan atıklarda anaerobik arıtıma âdeta bir enerji jeneratörü hüviyetini kazanır. Anaerobik arıtma ile 1000 kg KOİ giderimiyle 2700 kW-sa eş değeri enerji üretilebilir [18]. Aerobik sistemlerin yüksek enerji gereksinimleri ve özellikle KOİ yükü 5000 mg/L'nin üzerindeki organik yükü yüksek atıkların arıtılmasında ortaya çıkan uygulama güçlükleri anaerobik sistemlere olan ilgiyi

arttırmıştır [62]. Atık oluşumunun farklı süreçlerinde, atıkların ayrılması ve taşınma maliyeti bu atıkların anaerobik olarak arıtılmasının önündeki zorluklardır [63]. Anaerobik sistemlerde CH_4 üretiminin optimizasyonunda, reaktör dizaynı ve işletme şartlarına odaklanılmıştır. Ancak, reaktöre beslenen substrat anaerobik çürütücünün teknolojisi kadar, belki daha fazla önem arz etmektedir [64] Biyometanizasyon süreçlerinin iyileştirilmesinde uygun atık türlerinin birlikte arıtımı önerilmektedir. Organik yükü yüksek farklı substratların bazı özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Organik yükü yüksek farklı atıkların bazı özellikleri

Atık türü	TKM (%)	UKM (% TKM)	mg TKOİ/g TKM	mg TKN/g TKM	mg NH_3-N/g TKM	mg TP/g TKM	C/N oranı
BBHG [65]	14.6±0.3*	-	-	3.03±0.6	-	-	16.7
BBHG [66]	16.9±0.1	83.2±0.3	1237.5	4.5±0.2	2.35	3.4±0.5	-
BBHG [67]	16.6	75.8	-	18	-	6	20
BBHG [68]	13.8±0.08	84.05	-	49	12.68	8.38	-
BBHG [69]	17.1±0.6	84.2	-	48±5	-	-	5.8
BBHG [70]	16.3±0.1	81	-	51±6	-	-	5.2
BBHG [71]	20.29	86.84	-	14.1	-	-	15.35
BBHG [72]	31	64.5	-	38,7	3.55	35.48	39.17
BBHG [73]	18.24±0.5	83.4±0.5	538.4	18.2	0.41	-	26.7
BBHG [74]	16.85	83	-	49	-	-	5.57
Çim silajı [75]	29.3	91.4	-	-	4	-	26
Çim [76]	27.4	89.8	-	20.6	0.27	-	-
Çim [77]	26.6	93.9	1410	16.1	-	-	-
Armut atıkları [78]	19.36±2.1	98	-	0.4	-	-	279.8
Tatora [67]	27.1	89.6	-	8	-	1	-
Meyve sebze atıkları [79]	7.94±0.83	84.9	-	205	-	-	17.21
Mutfak atıkları [79]	22.17±1.6	80.6	-	106	-	-	13.98
Gıda atıkları [68]	28±1.3	86.1	-	29.54	1.62	4.83	-
Gıda atıkları [80]	30.9±0.1	85.4	-	31.6±2.2	-	-	14.8
Gıda atıkları [70]	18.5±0.1	91.9	-	22±3	-	-	21.1
Gıda atıkları [81]	18.1±0.6	94	1317.7	29.9	0.88	-	13.2
Gıda atıkları [82]	23.74	91.44	-	34.3	-	-	-
Gıda atıkları [83]	25.5±0.4	94.12	1019.6	45.9	1.48	-	-
Gıda atıkları [84]	23.2±0.18	93.5	1310.3	21.12	0.99	-	24.5
Hurma atıkları [71]	36.27	93.67	-	28.32	-	-	57.03
Arıtma çamuru [72]	17	64.7	-	41	1.3	41.18	15.8
Arıtma çamuru [73]	1.43	69.73	1098.6	85.9	2.44	-	4.71
Arıtma çamuru [74]	4.8	75	-	48.5	-	-	7.76

*Bazı veriler ± standart sapması ile verilmiştir.

2.3.1 Büyükbaş Hayvan Gübresi (BBHG)

Organik atıklar içerisinde önemli bir miktara sahip olan hayvansal gübreler anaerobik çürüme proseslerinde kullanılabilir bir kaynaktır [29]. Gübrenin metan potansiyeli karbonhidrat, protein ve lipit bileşenlerini içeren ve altlık malzemesi olarak kullanılan saman ve hayvan dışkısından gelmektedir [85]. Ancak sadece hayvansal gübre kullanımında biyogaz üretimi oldukça düşük olmaktadır. Yardımcı substrat olarak farklı organik atıklar kullanıldığında biyogaz üretim verimi ilave atığın kompozisyon ve miktarına göre %80-400 oranında arttırılabilmektedir [86], [87]. Gübrenin metan potansiyeli hayvanın türüne, cinsine, yaşına, beslenmesine, beslenme miktarına, altlık olarak kullanılan malzemenin tipi ve depolama esnasındaki çürüme prosesine bağlı olarak değişmektedir [85], [88].

Genellikle gübrenin bir kısmı anaerobik şartlarda kolay parçalanamayan liflerden oluşmaktadır [89]. Ancak, gübre asit tamponlama kapasitesi, mikrobiyal büyüme için gerekli nütrientleri sağlaması ve yüksek sıvı muhtevası ile mükemmel bir yardımcı substrattır [17].

2.3.2 Bitkisel Atıklar

Tarımsal üretim neticesinde tarlada kalan veya işleme esnasında meydana gelen her türlü bitkisel kalıntıya bitkisel atıklar veya tarımsal atıklar diyebiliriz. Ülkemizde tarımsal faaliyetler neticesinde buğday, arpa, tütün, pamuk, çeltik, şeker pancarı vb. tarla bitkilerinden hayvan beslemek amacıyla kullanılmayan atıklar, açık havada yakılmakta veya çürümeye terk edilmektedir. Ancak atıkların yakılarak ortadan kaldırılmak istenmesi ve ısı üretiminde kullanılması daha yaygın olarak görülmektedir. Tarımsal atıklar yakıldığında atıkların gübre olarak kullanımı mümkün olmamaktadır. Biyogaz teknolojisi ise organik kökenli atıklardan hem enerji eldesine hem de atıkların toprağa kazandırılmasına imkân sağlamaktadır.

Yem olarak da kullanılan mısır silajı [90], [91], [92], [93], buğday sapları [94], [95], şeker pancarı [96] ve ot silajı [75], [97] gibi bitkisel malzemeler biyogaz üretim verimine olan önemli katkılarından dolayı anaerobik sistemlerde kullanılmaktadır. Bitkiler kolay parçalanabilirliği ve yüksek organik madde muhtevası ile anaerobik çürütücüler için mükemmel bir substrattır. Bitkisel atıkların kalitesi çoğunlukla büyüme koşullarına,

türüne, hasat zamanına ve gübrelenmesine göre değişmektedir. Bitkisel kalıntılar yüksek selüloz içeriğine ve düşük C/N oranına sahiptirler. Bu durum tarımsal atıkların anaerobik çürütülme sürecini zorlaştırmaktadır. Bitkisel atıkların anaerobik sürece dâhil edilebilmesi için parçalama gibi bazı ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Birlikte arıtım yöntemiyle de C/N oranı istenilen seviyelere getirilebilmektedir.

2.3.3 Gıda Atıkları

Gıda atıkları yüksek su muhtevası ve kolay biyobozunabilirliği ile anaerobik proseslerde yüksek enerji içeriğiyle tercih edilen bir atık türüdür. Yemek atıkları gibi evsel atıkların miktarı özellikle büyük şehirlerde belediye katı atıklarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Ayrıca, gelişen ülkelerde gıda ihtiyacının artmasıyla gıda işleme endüstrilerinin sayısı ile beraber atık üretim miktarları da artmaktadır. Özellikle Avrupa'da son yıllarda organik atıklar kanalizasyon suyuna katılarak anaerobik sistemlerde arıtılmaktadır [98]. Ancak belediye katı atıklarının organik kısmının ayrıştırılarak anaerobik olarak arıtıldığı biyogaz tesislerinin çok az olduğu rapor edilmiştir [99].

Ülkemizde evsel nitelikli organik atıkları incelediğimizde, Devlet İstatistik Enstitüsü 2001 yılı belediye katı atık istatistikleri anketi sonuçlarına göre katı atık toplama hizmeti verilen belediyelerden, 2001 yılı yaz mevsiminde ortalama 12,5 milyon ton, kış mevsiminde ortalama 12,6 milyon ton ve yıllık ortalama 25,1 milyon ton katı atık toplandığı belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre kişi başı günlük ortalama katı atık miktarı, yaz mevsimi için 1,28 kg/(kişi.gün), kış mevsimi için 1,32 kg/(kişi.gün) ve yıllık ortalama ise 1,31 kg/kişi-gün olarak bulunmuştur. Buna göre günümüzde, 76 milyonu geçen nüfusuyla Türkiye'de günde yaklaşık 100.000 ton/gün evsel katı atık oluşmakta ve bunun yaklaşık yarısı organik atıklardan oluşmaktadır. Bazı şehirlerin evsel katı atık organik madde içeriği Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Türkiye'de bazı şehirler için evsel katı atık bileşimi organik madde içeriği (% ağırlık) [100], [101]

Şehirler	İstanbul	Bursa	İzmir	Adana	Adıyaman
Organik İçeriği	43	53,1	46	64,4	58

Türkiye'de evsel katı atıkların %50'den fazlası biyolojik olarak parçalanabilir maddeler ihtiva etmektedir.

2.3.4 Arıtma Çamuru

Arıtma çamuru, arıtma tesisi çöktürme havuzlarında çökelen çamurlardan oluşmaktadır. Arıtma tesislerinde çöktürme işlemi üç kademeye kadar çıkabilmektedir. Birincil çökeltim havuzu çamuru gelen atıksuda kaba bileşenlerin olması sebebiyle homojen değildir. %5-10 aralığında katı madde içeriğine sahip olan birincil çökelme çamurunun yaklaşık %70'ini organik maddeler oluşturmaktadır. Atıksu, yapısında binlerce farklı organik maddeyi içerdiğinden birincil çökelme çamuru oldukça kompleks bir yapıya sahiptir. İkincil çökelme çamuru, mikroorganizma ve diğer yaşam formlarının da bulunduğu havalandırma havuzu aktif çamuru ya da damlatmalı filtre humusundan oluşmaktadır. Farklı yöntemlerle yoğunlaştırılan ya da susuzlaştırılan ikincil arıtma çamuru yaklaşık %1-6 oranında katı madde ve %70 civarında organik madde içeriğine sahiptir. Toplam çamurun, uçucu katı madde miktarı baz alındığında %60-80'i birincil çöktürmeden ve %20-40'ı ise ikincil çöktürme çamurundan oluşmaktadır. Arıtma çamurlarının özellikleri atıksu kaynağına ve arıtma prosesinin teknolojisine bağlı olarak değişmektedir [102], [103]. Ayrıca, arıtma çamurunun yapısı birincil ve ikincil çökelme çamuru karışım oranına, çamurların içerdiği karbonhidrat, protein ve lipid miktarına, katı madde konsantrasyonuna ve çamur partiküllerinin ebat dağılımına bağlıdır. Genellikle birincil çökelme çamurunun kompozisyon çeşitliliği ve ebat dağılımı ikincil çökelme çamuruna göre daha geniş ve büyüktür. Birincil çökelme çamurunun anaerobik çürütülebilirliği ikincil çökelme çamuruna göre iki kat daha iyidir [104]. Bununla birlikte ikincil çökelme çamurunun çürüme oranı çamur yaşına bağlı olarak değişmektedir. Anaerobik sisteme beslenen ikincil çökelme çamurunun yaşı 30 gün olduğunda çürüme oranı %14 iken çamurun yaşı 5 gün olduğunda çürüme oranı %31 olmuştur [39].

BÖLÜM 3

BÜYÜKBAŞ HAYVANSAL ATIKLARIN BİYOMETANİZASYON SÜREÇLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ KONUSUNDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Anaerobik teknolojiler ile sıvı ve katı atıklar birlikte arıtılabilmektedir [78]. Anaerobik arıtma atıktan enerji üretme prosesi olarak görülmekte ve farklı nitelikteki organik atıkların (hayvan gübresi, bitkisel atıklar, gıda atıkları, evsel ve endüstriyel organik katı atıklar, arıtma çamuru, vb.) arıtılmasında sıklıkla kullanılmaktadır [105].

Dünyada büyük ölçekli çiftliklerin sayısındaki artış ile beraber hayvan gübresi üretimi de artmıştır. Bu artış ile çiftlik gübreleri bütün ülkeler için önemli bir çevresel problem haline gelmiştir [66]. Çiftlik gübreleri çevre teknolojileri kullanılmadığında sera etkisi, koku, uçucu amonyak, dışkı kaynaklı patojen ve koliformlar, kemirgenler, böcekler, sinekler ve diğer zararlı canlıların üremesi, yüzey ve yer altı suyu kirliliği ve dünyanın biyolojik yapısının bozulması gibi birçok ciddi çevresel problemlere neden olmaktadır [54], [106], [107].

Dünya genelinde oluşan çiftlik gübrelerinin büyük bir kısmı büyükbaş hayvanlardan kaynaklanmaktadır. Yağ, protein ve karbonhidratlardan oluşan BBHG kompleks tipte bir substrattır [108]. Anaerobik süreçte kompleks organik maddeler hidroliz safhasından sonra fermantasyona uğrayarak kısa zincirli yağ asitlerine, alkollere, H_2 ve karbondioksite dönüşürler [16], [109], [110]. H_2, CO_2 ve asetik asit metonojen safhasında direkt kullanılırken diğer hidroliz ve asitojen safha ürünleri diğer asitojenik bakterileri tarafından kullanılarak H_2, CO_2 ve asetik asite dönüşürler [16].

Geviş getiren hayvanların özellikle büyükbaş hayvanların gübresinde gerekli metanojen bakterilerinin bulunması fermantasyon safhasının başlamasını kolaylaştırmaktadır.

Ancak, BBHG'de anaerobik biyobozunur substrat oranının %45-50 oranında azalmasından dolayı yalnızca BBHG kullanıldığında daha az miktarlarda metan üretilebilmektedir [111]. Bununla birlikte, BBHG'nin miktarca önemli bir kısmını oluşturan saman kaynaklı kompleks lignin atıklarından dolayı BBHG'den biyogaz üretim potansiyelinin diğer çiftlik hayvanlarının gübresinin biyogaz üretim potansiyeline göre daha düşük olduğu belirlenmiştir [112]. Ancak, hayvan gübrelerinin yüksek su içeriği ve tamponlama kapasitesi anaerobik proseslerin stabilitesine pozitif katkılarda bulunmaktadır. Sonuç olarak çiftlik tipi anaerobik çürütücülerin çoğu birlikte arıtma olarak adlandırılan diğer organik atıklar ilave edilerek işletilmesi mümkün olabilecektir [113].

Birlikte arıtım için birden fazla substratın kullanılmasının çevresel, teknolojik ve ekonomik açıdan tek tip substrat kullanımına göre önemli avantajları vardır [114]. Son yıllarda, bazı araştırmacılar BBHG ile organik yükü yüksek atıklarının ya da enerji bitkilerinin birlikte arıtımının anaerobik proses üzerine etkilerini incelemişlerdir [67], [93], [115], [116], [117]. Farklı türdeki yardımcı substratlar gerekli uygun oranlarda karıştırılarak aynı anda anaerobik işleme tabi tutulduğunda oluşan sinerjistik etkiden dolayı biyogaz üretimi ve arıtma performansında önemli ve ilginç artışların olduğu görülmektedir [63], [68], [78], [96], [105], [116], [118], [119], [120], [121], [122], [123].

Birlikte arıtma daha ekonomik olmakla beraber daha basit teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanında birlikte arıtma yönteminin anaerobik reaktör içinde toksik bileşiklerin konsantrasyonunun azalması, nütrient ihtiyacının ayarlanması, anaerobik bakterilerin sinerjistik etkileri, biyobozunabilir atık yüklemesinin artması, biyogaz üretiminin artması, hijyenik stabilizasyon ve biyobozunma oranının artması [124], nem yüzdesi ve pH ayarlaması ve gerekli tamponlama kapasitesinin sağlanması gibi ekolojik avantajlarıda bulunmaktadır. Bütün bu avantajlar anaerobik prosesin performansı ve stabilitesi için çok önemlidir [125].

3.1 Anaerobik Proses için Ham Madde

Verimli bir anaerobik biyobozunma için en önemli öncül, uygun ham madde kullanımıdır. Anaerobik süreç için tek tip ham madde kullanımı, istenilen C/N oranın sağlanamaması ve yüksek lipit içeriği gibi nedenlerle yeterli olmamaktadır. Bu şartlar altında hacimsel

metan üretimini iyileştirmek ve anaerobik proses dengesizliklerini çözmek için birlikte arıtım en iyi yaklaşımdır [126]. BBHG diğer organik atıkların çoğuna nazaran biyobozunurluğu daha yavaş olan bir atıktır. Birlikte arıtım için BBHG'ne gıda atıkları, meyve ve sebze atıkları, endüstriyel organik atıklar ya da artıma çamuru gibi farklı niteliklerde ham madde ilavesi biyobozunurluğu ve uçucu katı oranını arttırabilir [70], [123], [127], [128]. Anaerobik reaktörlere beslenecek olan ham maddenin fiziksel ve kimyasal karakteristiği, proses stabilitesini sağlamak için gerekli çok önemli bir tasarım ve işletme kriteridir. Anaerobik şartlarda organik ham maddeden biyogaz üretimi önemli ölçüde substratın C/N oranına, konsantrasyonuna, pH ve sıcaklığına bağlıdır [129]. Azot, aminoasitlerin sentezlenmesinde gerekli bir elementtir ve nihai ürün olarak amonyağa dönüşür. Amonyak fermantatif bakterilerin ürettiği uçucu yağ asitlerini nötralize ederek reaktörün uygun pH aralığında kalmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca azot yeterli miktarda ortamda bulunmadığında sınırlayıcı element olmakta, fazla miktarda bulunması ise amonyak toksisitesine sebep olmaktadır. Anaerobik proses için en uygun C/N oranı 20-35 arasındadır [130], [131], [132]. BBHG'nin C/N oranı 11-14 arasındadır ve bu oran anaerobik bakteriler için yetersizdir [120], [133]. Literatürde, yapılan diğer çalışmalarda ise BBHG'nin C/N oranı 5-26.5 olarak belirlenmiştir [71], [73], [78], [95], [105], [116], [119], [134], [135].

Biyogazın kalitesi ve üretim miktarı organik substratın nütrient içeriğine bağlıdır. Maksimum metan üretimi için reaktör içindeki mikroorganizmalara uygun ve yeterli nütrientlerin sağlanması gerekmektedir [136]. Makronütrient elementler (C, H, N, O ve S) mikrobiyal büyüme için substratta yeterli miktarlarda bulunmalıdır. Karbon, hidrojen ve oksijenin önemli bir kısmı metana ve karbondioksite dönüşmektedir. Azot ve kükürt ise yeni biyokütle bünyesine katılmamakta hızlı bir şekilde çözünmüş ya da gaz formdaki amonyağa ve sülfite dönüşmektedir [119]. Amonyak ve sülfit belirli bir konsantrasyon seviyesinde metanojik bakteriler için toksik etki göstermektedir [126]. Amonyak 2500 mg/L'den yukarı seviyelerde toksik etki göstermektedir [55], [137], [138]. Çözünmüş sülfit ise 50 mg/L seviyelerini aştığında anaerobik proseste inhibisyon başlamaktadır [139], [140], [141], [142]. Eser element olarak da bilinen Ni, Co, Mo, Fe, Se, W, Zn, Cu ve Mn gibi mikronütrientler kararlı bir anaerobik süreç için gerekli elementlerdir [126]. Anaerobik çürütücülerin çoğu metanojen safha için gerekli olan mikronütrientlerin

eksikliğinden dolayı başarısızlığa uğramıştır [97], [126]. BBHG ile gıda atıkları [70], [84] ve bitkisel materyal ve atıklar [128], [143], [144], kıyaslandığında BBHG'nin mikronütrientler açısından daha zengin olduğu saptanmıştır. Çöp deponi alanı taze sızıntı suyu [84] ve arıtma çamurunun [145] ise BBHG'den daha fazla oranda mikronütrient içerdiği tespit edilmiştir.

3.2 Yalnızca BBHG Kullanılarak Yapılan Anaerobik Çalışmalar

Sadece BBHG'nin kullanıldığı anaerobik sistemlerde sıcaklık, katı içeriği, hayvanların beslenmesi, anaerobik safhalar, HBS, reaktör tipi ve kirliliğin azaltılması üzerine farklı şartlar altında bilimsel çalışmalar yapılmıştır.

Ahring vd. [109] anaerobik sistemlerde atık olarak BBHG kullanıldığında en iyi metan üretiminin 55°C'de olduğunu ve 65°C'ye kadar anaerobik sistemin çalıştırılabildiğini belirlemişlerdir. Reaktör sıcaklık dalgalanmasını araştıran El-Mashad vd. [146] hidrolik besleme süresi (HBS) 10 hariç bütün HBS'lerde 50°C'deki metan üretiminin 60°C'dekinden daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Chayovan vd. [147] biyogaz üretiminin reaktör içerisindeki sıcaklığı kontrol ederek ayarlanabileceğini bildirmişlerdir. Bu şekilde gaz üretim miktarı enerji ihtiyacına göre ayarlanarak biyogaz depo hacminin düşürülebileceğini belirtmişlerdir. Mohaibes ve Heinonen-Tanski [148] yüksek sıcaklıklarda mikroorganizmaların hayatta kalamadıklarını, en iyi hijyenik kontrolün 65°C'de gerçekleştiğini ve optimum biyogaz üretiminin ise 55°C'de olduğunu rapor etmişlerdir.

Ghally [149] BBHG ile işletilen anaerobik karıştırmasız enerji tasarruflu reaktör (NEER) ile sürekli karıştırmalı tank reaktör (CSTR) sistemlerinin performanslarını karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre NEER ve CSTR reaktörleri sırasıyla kg uçucu katı başına 0.231-0.455 m^3 ve 0.119-0.343 m^3 aralığında biyogaz üretmişlerdir. Ghaly ve Echiegu [150] pilot ölçekli karışımsız 25 L kapasiteli katı-sıvı ayırıcılı bir reaktör tasarlamışlardır. Bu reaktörün diğerlerine göre daha yüksek miktarlarda biyogaz ürettiğini tespit etmişlerdir. Çıkış suyundaki katı madde, KOİ ve azot konsantrasyonunun sırasıyla %58, 56 ve 48 oranında giderildiği rapor edilmiştir. Ayrıca reaktör çıkış çamurunun azot ve kül miktarının yüksek olduğu ve tarımsal gübre olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Boe ve Angelidaki [151] biyogaz üretim performansını artırmak için laboratuvar ölçekli yeni bir

reaktör tasarlamışlardır. 15 günlük HBS için tek ve seri bağlı CSTR reaktör kullanarak 80:20 ve 90:10 hacim oranları ile çalışmışlardır. Seri bağlı CSTR'nin tekli sistemden %11 daha fazla biyogaz ürettiği belirlenmiştir. Demirer ve Chen [65] iki kademeli bir anaerobik sistemde elekten geçirilmemiş BBHG'nin kullanım avantajlarını ve olanaklarını araştırmışlardır. Çalışmanın sonucuna göre iki kademeli anaerobik sistemin 2 günü asitojenik, 8 günü metanojenik safhada olmak üzere toplamda 10 gün substrat bekleme süresi (SBS)-HBS ile çalışılmıştır. 5 ve 6 g UKM/(L.gün) organik yükleme oranında sırasıyla %50 ve 67 oranlarında daha yüksek biyogaz üretiminin gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Kalia ve Sing [152] ham BBHG ve BBHG'ne %10 anaerobik çamur karıştırılarak kesikli anaerobik reaktörlerde çevre sıcaklığında (20-23°C) 15 haftalık bir çalışma yapmışlardır. Besleme yapılan BBHG'ne anaerobik çamur karıştırmanın biyogaz üretimini arttırdığını belirtmişlerdir. Sung vd. [107] %3.46-14.54 aralığında TKM oranına sahip BBHG'ni kullanarak 14 günlük bir HBS ile çalışmışlardır. Çalışma sonucunda en yüksek olarak TKM'nin %10.32'si ve UKM'nin %42.6 giderilmiştir. Sistemin beslenmesinde TKM konsantrasyonunun %10.35'ten daha yüksek olduğu durumlarda UKM giderimi ve biyogaz üretim performansının düştüğü belirlenmiştir. Güngör-Demirci ve Demirer [66] BBHG, tavuk gübresi ve karışımlarının anaerobik arıtılabilirliğini ve biyogaz üretim potansiyelini araştırmışlardır. 12 ve 53.5 g KOİ/L beslemesi yapıldığında sırasıyla %32 ve %43 KOİ giderimi ile birlikte gr KOİ başına 180 ve 270 mL biyogaz üretiminin gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Rico vd. [153] sıvı fraksiyonun anaerobik çürütülmesini ve katı-sıvı ayırmanın etkilerini araştırmışlardır. HBS 10 günden 20 güne ve OYO'nın 2 den 4.5 kg UKM/(m^3.gün)'e yükselmesiyle dikkate değer bir arıtımın gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Biyogaz üretiminin 0.66-1.47 m^3/(m^3.gün) aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Omer vd. [154] %51 KOİ giderimi ile beraber kg UKM başına 184 L metan üretildiğini belirtmişlerdir. Abubakar ve Nasir [155] ortalama biyogaz üretimini ve metan yüzdesini sırasıyla 0.15 L/kg UKM eklenen ve %47 olarak belirlemişlerdir. Araştırmacılar BBHG'nin, anaerobik sistemlerde biyogaz üretimi ve kararlı şartların sağlanması açısından önemli bir substrat olduğunu bildirmişlerdir. Amon vd. [136] büyükbaş hayvanların beslenmesinin hayvansal gübre kompozisyonuna ve metan üretimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hayvansal diyet ve performansın BBHG'nin anaerobik

çürütülmesini belirgin bir şekilde etkilediği ve en yüksek biyogaz ve metan üretiminin kg UKM başına sırasıyla 0.245 ve 0.166 m^3 olduğunu bildirmişlerdir.

3.3 Meyve ve Sebze Atıklarının BBHG ile Birlikte Arıtımı

Dar ve Tandon [94] lantana atıkları, buğday samanı, elma yaprağı döküntüleri ve armut yaprağı döküntülerini yardımcı çürütücü olarak kullanmışlardır. Yazarlar araştırmada biyogaz üretiminin sistem verimliliği ile ilişkili olduğunu söylemişlerdir. Ön işlemden geçirilmiş bitkisel atıkların gram kuru maddesinden 341-372 mL biyogaz üretmişlerdir. Diğer atıklardan üretilen biyogazın BBHG'nden üretilen biyogazdan %31-42 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Neo vd. [156] çalışmalarının bir bölümünde buğday samanı ve mısır bitki kalıntıları atıkları ile BBHG'ni birlikte anaerobik çürütmeye tabi tutmuşlardır. Sadece BBHG, BBHG ile buğday samanı ve BBHG ile mısır bitki kalıntıları karışımlarından sırasıyla 2215, 1495 ve 3640 mL biyogaz üretiminin olduğunu belirlemişlerdir. Risberg vd. [95] anaerobik sistemde sadece BBHG ve BBHG ile buğday samanı karışımının biyogaz üretim potansiyellerini karşılaştırmışlardır. Her iki durumda da kararlı bir çürüme prosesi oluştuğunu ancak 0.13-0.21 L CH_4/kg UKM aralığında düşük ve birbirine yakın miktarlarda metan üretimi olduğunu belirlemişlerdir. Comino vd. [157] farklı oranlarda silaj ve BBHG karışımının üç farklı anaerobik safhadaki durumlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda BBHG'ne uygun oranda silaj karıştırmanın sadece BBHG kullanılması durumuna göre metan üretimini %100 arttırdığını belirlemişlerdir.

Lehtomaki vd. [116] BBHG ile çim silajı, şeker pancarı yaprakları ve yulaf samanı karışımının birlikte arıtımını incelemişlerdir. En yüksek spesifik metan üretimini BBHG'ne çim silajı, şeker pancarı yaprakları ve yulaf samanı karıştırıldığında sırasıyla 268, 229 ve 213 L CH_4/kg UKM olarak belirlemişlerdir. Jegadabhi vd. [97] laboratuvar ölçekli CSTR reaktörde OYO 2 kg UKM/(m^3.gün) ve 20 günlük HBS şartlarında çim silajı ile BBHG karışımının birlikte arıtımını incelemişlerdir. UKM olarak %30 çim silajı ve %70 BBHG karışım oranını kullanmışlar ve çalışma sonucunda birlikte arıtım prosesinin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Wall vd. [75] yalnız BBHG ve BBHG ile çim silajı karışımının birlikte arıtımını OYO'nı artırarak reaktör performansının optimizasyonunu incelemişlerdir. En iyi durumlarda sadece çim silajı kullanımında 3.5 kg UKM/(m^3.gün)

OYO ile 398 L CH_4/kg UKM ve %20 BBHG %80 çim silajı karışımında 4 kg UKM/(m^3.gün) OYO ile 349 L CH_4/kg UKM olarak belirlemişlerdir.

Yangın-Gömeç ve Öztürk [93] çalışmalarının bir bölümünde BBHG ile mısır silajının birlikte arıtımını incelemişlerdir. BBHG'ne mısır silajı eklendiğinde günlük metan üretiminin 1.2 kat arttığını ifade etmişlerdir. Seppälä vd. [92] %40 mısır silajı karışımında kg UKM başına 259 L metan üretimi gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca mısırın BBHG'nden daha az eser element içerdiğini ve BBHG'nin eser element eksikliğini tolere ettiğini belirtmişlerdir. Arıcı ve Koçar [91] ise mısır silajı BBHG karışımından en iyi şartlarda giderilen g UKM başına 215.2 mL metan üretebildiklerini ifade etmişlerdir. Adeboya vd. [90] en yüksek biyogaz üretiminin kg kuru madde başına 0.426 m^3 olarak BBHG ve mısır bitki atıklarının 3:1 karışımında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Umetsu vd. [96] laboratuvar ölçekli anaerobik çürütücüde şeker pancarı ve BBHG'nin birlikte arıtımını değerlendirmişlerdir. Sürekli beslemenin yapıldığı sistemde BBHG'ne %40 oranında şeker pancarı yaprakları karıştırılmış ve sadece BBHG'nin kullanıldığı sisteme göre 1.49 kat daha fazla metan üretiminin gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Callaghan vd. [158] BBHG'ne farklı oranlarda meyve ve sebze atıkları karıştırarak anaerobik sistemin performansını incelemişlerdir. Meyve sebze atıklarının karışım oranı %20 den %50'ye çıktığında metan üretiminin 0.23'ten 0.45 m^3/kg UKM'ye yükseldiğini ifade etmişlerdir. Dias vd. [78] ön işlemden geçmiş BBHG ile armut atıklarının birlikte arıtım olanaklarını araştırmışlardır. Armut atıklarının anaerobik çürüme için uygun olmadığı sonucunu ifade etmişlerdir.

Alvarez ve Liden [67] BBHG ile *Schoenoplectus tatoranın* yarı sürekli bir reaktörde birlikte anaerobik çürütülmesini değerlendirmişlerdir. UKM olarak %50 oranında bir karışım yapıldığında biyogaz üretiminde %60 oranında bir artışın gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Chen vd. [119] *Spartina alterniflora'*nın yalnız ve BBHG ile birlikte anaerobik çürütülmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada *Spartina alterniflora'*nın zayıf bir çürüme sürecine sahip olmasına karşın en yüksek olarak gr UKM başına 0.19 L metan üretiminin gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Allen vd. [159] BBHG ile kuru ve yaş *Ulva lactuca* karıştırılarak anaerobik performansları değerlendirilmiştir. Optimum karıştırma oranının %25 *Ulva lactuca* ve %75 BBHG olduğunu bildirmişlerdir. Bu durumda 2.5 kg UKM/(m^3.gün) OYO ile kg UKM başına 170 L metan üretildiğini ifade etmişlerdir.

3.4 Evsel Kaynaklı Organik Atıkların BBHG ile Birlikte Arıtımı

El-Mashad ve Zhang [68] ham BBHG ve gıda atıklarının birlikte çürütülme prosesini incelemişlerdir. Sürekli besleme için 20 günlük HBS önerdiklerini ifade etmişlerdir. Zhang vd. [70] gıda atıkları ve BBHG'nin birlikte arıtımını, toplam metan üretim miktarını arttırması nedeniyle 2:1 oranını kesikli ve yarı sürekli sistemler için tavsiye ettiklerini ifade etmişlerdir. Agyeman ve Tao [160] BBHG ile gıda atıklarının partikül boyutunun ve OYO'nın birlikte arıtım üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Gıda atıklarının boyutundaki küçülmeyle beraber metan üretiminin arttığını ve en yüksek metan üretiminin 2.5 mm elekten geçirilmiş atıklarla olduğunu ifade etmişlerdir. Macias-Coral vd. [122] BBHG, belediye katı atıkları organik fraksiyonu ve pamuk tohumu atıklarının anaerobik çürütülmesini incelemişlerdir. Birlikte arıtımın tek tip atık kullanımına göre daha yüksek seviyelerde metan üretimi sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca BBHG ile belediye katı atıklarının birlikte arıtımının sinerjistik etkiye sahip olduğunu ve daha kararlı reaktör şartlarını sağladığını belirtmişlerdir.

Li vd. [105] BBHG ve mutfak atıklarının birlikte arıtılabilirliğini incelemişlerdir. Optimal biyogaz üretimi için 1:3 karışım oranını tavsiye ettiklerini ifade etmişlerdir. Aragaw vd. [161] işkembe içi atıklarını kullanarak organik mutfak atıkları ile BBHG'nin birlikte arıtılabilirliğini incelemişlerdir. En yüksek kümülatif metan üretiminin 14653.5 mL/g UKM ile %25 BBHG ve %75 organik mutfak atıkları karışımında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Neves vd. [162] farklı konsantrasyonlardaki yağlı atıklar, BBHG ve gıda atıklarının kesikli bir reaktörde birlikte arıtımını incelemişlerdir. Çok yağlı atıklar hariç bütün yağ karışımı bulunan atıklarda, birlikte arıtımın pozitif etkilerinin olduğunu ifade etmişlerdir. Neves vd. [163] başka bir çalışmasında BBHG ve gıda atıklarının birlikte arıtımında yağlı atıkların kesikli beslemede kontrol edilmesinin gerektiğini belirtmişlerdir. Castrillon vd. [164] yardımcı substrat olarak gıda atıklarının ve biyodizel endüstrisinden kaynaklanan kaba gliserinin BBHG'ne ilave edilmesinin biyogaz üretimine olan etkilerini incelemişlerdir. En iyi karışım oranının BBHG, gıda atıkları ve gliserin için 87:10:3 olduğunu ifade etmişlerdir.

3.5 Endüstriyel Organik Atıkların BBHG ile Birlikte Arıtımı

Callaghan vd. [127] BBHG'ne balık atıklarını karıştırmanın anaerobik sisteme etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda %4 oranında balık atıkları ilavesi yapıldığında UKM gideriminde önemli ölçüde azalmaların olduğunu ve %6'lık bir ilave yapıldığında ise anaerobik çürütücü performansının önemli ölçüde düştüğünü ifade etmişlerdir. Solli vd. [135] sadece BBHG ve BBHG ile balık atıklarının birlikte çürütülmesi prosesini incelemişlerdir. Maksimum metan üretiminin %16 balık atıkları ilavesinde 0.4 L CH_4/g UKM olduğunu ifade etmişlerdir.

Comino vd. [115] BBHG ile peynir altı suyunun birlikte arıtımını incelemişlerdir. Farklı bir biyokütle karışımının biyogaz içerisindeki metan oranını %51.4 arttırarak kg UKM başına 211.4 L metan üretiminin gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Comino vd. [165] başka bir çalışmalarında BBHG ve peynir altı suyunun anaerobik proseste birlikte çürümeye tabi tutulmasında metan üretim oranını incelemişlerdir. Kararlı şartlarda atıkların yarı yarıya karıştırılmasında 42 günlük HBS ile 621 L/kg UKM metan üretiminin gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Bertin vd. [166] aynı şekilde maksimum metan üretiminin BBHG ile peynir altı suyunun %50 oranında karıştırılması durumunda 258 mL CH_4/g UKM olduğunu ifade etmişlerdir.

Nasir vd. [117] hurma yağı fabrikası atıkları ile BBHG'nin birlikte çürütülmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalar neticesinde kg UKM başına 0.346 m^3 biyogaz üretildiğini belirtmişlerdir. Bah vd. [71] preslenmiş hurma lifleri ile BBHG'ni laboratuvar ölçekli 250 mL hacimli kesikli reaktör kullanarak mezofilik şartlarda birlikte çürütülebilirliğini incelemişlerdir. Günlük en yüksek biyogaz üretiminin preslenmiş hurma lifleri ilavesinde g UKM başına 90 mL ve sadece BBHG kullanımında ise g UKM başına 23.4 mL biyogaz üretiminin olduğunu ifade etmişlerdir. Anaerobik çürümede preslenmiş hurma lifleri ve BBHG'nin UKM olarak 3:1 oranında karıştırılmasını tavsiye ettiklerini bildirmişlerdir. Saidu vd. [167] hurma yağı fabrikası atıkları ile BBHG karışımının anaerobik çürütülebilirliği üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sadece BBHG'ni bir reaktörde ve hurma yağı fabrikası atıklarının BBHG'ne ilavesini de ikinci bir reaktörde kullanmışlardır. Birinci ve ikinci reaktörlerde üretilen biyogazın metan içeriğinin sırasıyla %41-18 ve en yüksek KOİ gideriminin ise %45-35 olduğunu ifade etmişlerdir.

Naik vd. [128] BBHG'nden biyogaz üretiminin fizibıl ve ekonomik olduğunu ancak tek başına kullanımında sınırlayıcı etkilerin oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle zengin besi maddesi içeriğine sahip atıkların anaerobik çürütücüde yardımcı atık olarak kullanılmasının biyogaz üretimini arttıracağını bildirmişlerdir. Soğuk iklim şartları altında BBHG ile soya atıklarının farklı oranlardaki karışımlarının birlikte arıtımını incelemişlerdir. Soya atıkları BBHG ile homojenize edilmediğinde biyogaz üretimindeki artışın %27 homojenize edildiğinde %46.4 oranında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Goberna vd. [168] BBHG ile iki safhalı zeytinyağı fabrikası atıklarının karışımının birlikte arıtımını değerlendirmişlerdir. Yüklenen g UKM başına 179 L metan üretildiğini ifade etmişlerdir. Termofilik şartlarda mezofilik şartlara göre %17.3 daha fazla bir metan üretiminin gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Corro vd. [134] kahve küspesi ile BBHG'nin karışımından biyogaz üretimi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Birlikte çürütme prosesinin daha uygun bir C/N oranı sağlayarak biyogaz üretimini %50 arttırdığını ifade etmişlerdir. Li vd. [169] beş farklı kütle karışım oranında yarı sürekli anaerobik süreçte pirinç, mısır ve buğday atıklarının BBHG ile birlikte çürütülmesini incelemişlerdir. Reaktörün litresinden 101 mL/gün ile 576 mL/gün arasında biyogaz üretiminin gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Optimum metan içeriği ve UKM gideriminin 1:9 buğday samanı ve BBHG karışımında olduğunu ifade etmişlerdir. Maksimum kümülatif biyogaz üretiminin %50 karışımda 19 L olduğunu ve en düşük biyogaz üretiminin ise 9:1 karışım oranında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

3.6 Arıtma Çamurunun BBHG ile Birlikte Arıtımı

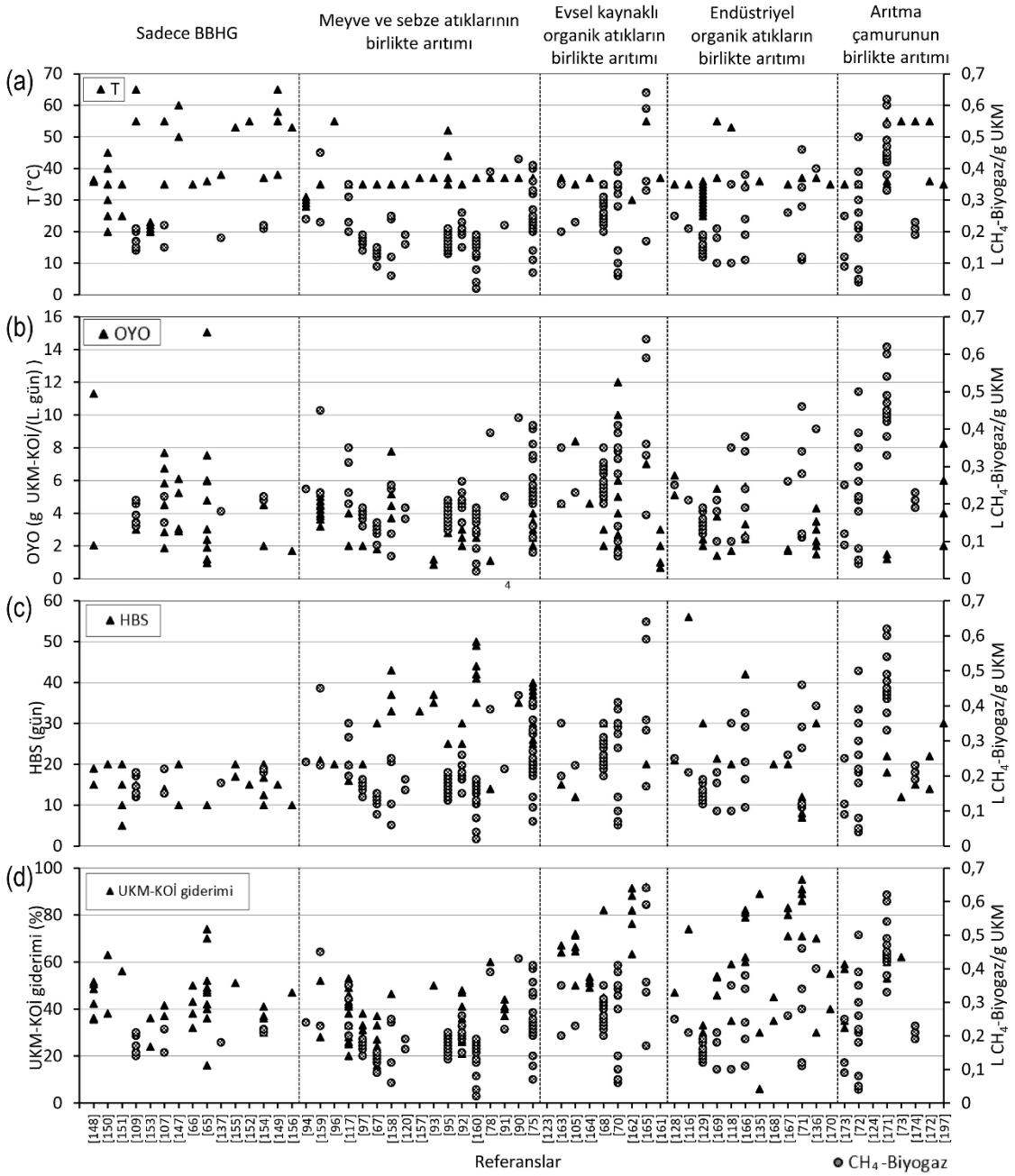
Maranon vd. [170] BBHG ile arıtma çamuru ve gıda atıklarının birlikte çürütülebilirliğini incelemişlerdir. OYO arttırıldığında ve HBS düşürüldüğünde spesifik metan üretiminin azaldığını ifade etmişlerdir. En yüksek metan üretiminin BBHG, gıda atıkları ve arıtma çamurunun sırasıyla %70, %20, %10 oranında karıştırılmasıyla 603 L CH_4/kg UKM olarak tespit edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca OYO'nın 1.5 g UKM/L seviyesine yükseltilmesi durumunda spesifik metan üretiminin %20-28 oranında azaldığını bildirmişlerdir. Quiroga vd. [171] mezofilik ve termofilik şartlarda sürekli beslemeli bir reaktör ile BBHG, gıda atıkları ve arıtma çamurunun sırasıyla %70-20-10 oranında karıştırılarak ultrases ile bir ön arıtma yapmışlardır. Ultrases ile ön işlemden geçen atıkların çürütülmesinin daha düşük HBS'ye ve 36°C'de 0.85 L CH4/(L.gün) ve 55°C'de 0.82 L CH_4/(L.gün) olmak üzere

daha yüksek metan üretimine olanak verdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca ultrases ile ön işlem uygulanmadığında mezofilik ve termofilik şartlarda metan üretim miktarlarının sırasıyla %31 ve %67 oranında azaldığını bildirmişlerdir. Rao ve Baral [123] çalışmalarının bir bölümünde BBHG ve arıtma çamuruna bahçe atıklarının diğer bir bölümünde ise meyve suyu fabrikası atıklarının karışımının birlikte arıtımını incelemişlerdir. Birinci çalışmada %9.71 bahçe atıkları, %20.29 BBHG ve %70 arıtma çamuru karışımında ve ikincisinde ise %75.5 arıtma çamuru ile %24.5 BBHG karışımında anaerobik proses için sinerjistik etkilerin bulunduğunu ifade etmişlerdir. Meyve suyu fabrikası atıkları ve bahçe atıklarının arıtma çamurunun anaerobik arıtılmasında negatif etkilerinin olduğunu ifade etmişlerdir. Meyve suyu fabrikası atıklarının asidifikasyon safhasının hızlı gerçekleşmekte olduğunu ve bahçe atıklarının ilavesinde ise 10. günden sonra biyogaz üretiminin önemli derecede azaldığını belirtmişlerdir. Capela vd. [172] belediye katı atıkları organik fraksiyonu, endüstriyel arıtma çamuru ve BBHG farklı karışım oranlarının anaerobik arıtılabilirliğini incelemişlerdir. En iyi karışım oranının %65 UKM gideriminde %77 belediye katı atıkları organik fraksiyonu, %23 endüstriyel arıtma çamurunda gerçekleştiğini ve 225 m^3 CH_4/ton UKM üretiminde %86 belediye katı atıkları organik fraksiyonu ve %14 endüstriyel arıtma çamuru karışımının kullanılmasıyla gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Garcia ve Perez [73] BBHG ile arıtma çamurunun birlikte arıtılması için uygun sıcaklık ve kompozisyonunun araştırılması üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. En yüksek metan üretiminin 0.3 L CH_4/g UKM ile 1:3 BBHG ve arıtma çamurunun karışımında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Hassan [74] arıtma çamuru ile BBHG'nin birlikte çürütülmesi üzerine çalışmalarda bulunmuştur. BBHG'nin organik madde giderimi ve biyogaz üretiminde pozitif etkilerinin olduğunu ifade etmiştir. Buendia vd. [72] mezofilik kesikli bir reaktörün proses fraksiyonunun modellenmesi üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. BBHG ve işkembe içi atıklarının arıtma çamuru ile birlikte arıtımının olumlu sonuçlarının olduğunu ancak domuz gübresi ve BBHG'nin arıtma çamuru ile birlikte arıtımının olumlu etkilerinin olmadığını ifade etmişlerdir. Maamri ve Armani [173] aktif çamur ve BBHG'nin farklı oranlardaki karışımının arıtılabilirliği üzerine çalışmalar yapmışlardır. TKM miktarının artmasıyla biyogaz potansiyeli ve biyogazdaki metan içeriğinin arttığını ifade etmişlerdir.

3.7 Anaerobik Proseste Önemli İşletme ve Performans Parametreleri

Biyogaz üretimi önemli bir şekilde sıcaklığa bağımlıdır [174], [175], ayrıca HBS, OYO ve beslemede kullanılan substratın içeriği de diğer önemli işletme parametrelerindendir [54], [67], [176], [177]. Anaerobik bir reaktörün kararlılığı sıcaklık, pH, uçucu yağ asitleri, alkalinite, NH_3-N, gerekli besi maddelerinin sağlanması, sülfitler, ağır metaller ve eser elementler gibi faktörlerin uygunluğu ile direkt ilişkilidir [54], [178], [179]. İyi seviyede bir biyometanizasyon için stabilite parametrelerinin uygunluğu sıcaklık, HBS, OYO ve beslenen substratın içeriğine bağlıdır. Bu nedenle birçok araştırmacı bu parametreler üzerinde araştırmalar yapmışlardır [180], [181]. Bununla birlikte biyogaz üretiminin verim değerlendirmesi için UKM ya da KOİ giderimini incelemişlerdir [65], [93], [182], [183], [184], [185]. Şekil 3.1'de literatür çalışmasından derlenen önemli işletme ve performans parametrelerinin, kullanılan farklı substratlardan üretilen metan ya da biyogaz miktarı ile karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.1 İşletme ya da performans parametrelerinin metan-biyogaz üretimi ile karşılaştırılması; (a) Sıcaklık (T°C), (b) OYO (g UKM-KOİ/(L.gün)), (c) HBS (day), (d) UKM-KOİ giderimi (%)

3.8 Birlikte Arıtma Üzerine Literatürden Elde Edilen Öneriler ve Çıkarımlar

Organik atıkların anaerobik çürütülmesi atık stabilizasyon proseslerinde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu atıklar doğaya bırakılmadan önce mutlaka arıtma işlemine tabi tutulmalıdır. Bu bağlamada birkaç arıtma yöntemi geliştirilmiştir. Anaerobik arıtma teknolojileri yüksek organik içeriğe sahip atıkların bertarafında dikkatleri üzerine çekmektedir. Ancak anaerobik sistemlere tek tipte atık beslenmesi halinde atık giderim

verimi ve biyogaz üretim potansiyeli açısından başarı sağlanamamaktadır. Atıkların anaerobik sistemde birlikte çürütülmesi, biyogaz üretimi, atık arıtımı ve proses stabilitesini korumak açısından sinerjistik bir etkiye sahiptir. Bu nedenle çiftlik atıkları, meyve sebze atıkları, evsel kaynaklı organik atıklar, endüstriyel organik atıklar ve arıtma çamuru gibi atıklar birlikte anaerobik çürütmeye tabi tutulmaktadır.

Dünya üzerindeki çiftlik gübrelerinin önemli bir çoğunluğunu genellikle BBHG oluşturmaktadır. BBHG kompleks tipte bir substrattır. Sadece BBHG'nin anaerobik olarak çürütülmesi düşük performansa ve reaktörde kararsız hallere neden olmaktadır. Özellikle BBHG'nin farklı organik atıklarla birlikte arıtılması dengesizlikleri elimine edebilmekte ve biyoreaktör üzerinde gösterdiği sinerjistik etki ile reaktör performansını ve biyogaz üretimini arttırmaktadır. Atıkların reaktör içerisindeki biyobozunurluğu bazı şartların uygunluğuna bağlıdır. Temel şartlar reaktörün işletilmesi ile ilgili sıcaklık, OYO, HBS ve besleme karakteristiği gibi işletme parametreleridir. Parametrelerin uygun aralıkta olması anaerobik prosesin dolayısıyla biyogaz üretiminin üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu nedenle uygun bir karışım stratejisi, biyobozunmada yaşanan problemlerin çözümüne ve biyogaz üretimi ile atık arıtımının iyileştirilmesinde yardımcı olabilecektir. Aşağıda literatürden derlenen bilgilere dayanarak birlikte arıtım prosesi ile ilgili tavsiye ve öneriler bulunmaktadır.

1. Anaerobik sistemlerde sadece BBHG'nin kullanılması genellikle düşük performansa ve stabilite zayıflıklarına neden olmaktadır.
2. Organik içerikli atıkların eser element içeriği bakımından yetersizliği anaerobik prosesi inhibe eden önemli faktörlerden biridir.
3. Farklı tipteki organik atıkların özellikle BBHG'nin diğer atıklarla birlikte arıtımı pH, alkalinite, makro ve mikro nütrientlerin yetersizliği gibi dengesizliklerin önüne geçebilmektedir. Bu denge durumu biyoreaktör performansı ile beraber biyogaz üretim potansiyelini arttırmaktadır.
4. BBHG ile birlikte arıtımın tamponlama kapasitesi ile pH ve amonyak inhibisyonun önlenmesi, gerekli eser elementlerin sağlanması ve gerekli metanojenik bakterilerin ortama takviyesi üzerine sinerjistik etkileri bulunmaktadır.

5. Şekil 3.1 (a)'daki verilere göre anaerobik proses üzerine yapılan çalışmaların çoğu 35-37°C'de yani mezofilik şartlarda işletilmişlerdir.

6. Şekil 3.1 (b)'deki verilere göre anaerobik reaktörlere UKM ya da KOİ olarak yapılan OYO'nın kararlı şartlar altında 1-6 g UKM-KOİ/(L.gün) aralığında olduğu görülmektedir. HBS'ne ve atıkların karışım oranına göre optimum OYO değişmektedir.

7. Meyve sebze atıkları ve endüstriyel organik atıklarının birlikte arıtımı çalışmalarında Şekil 3.1 (c) incelendiğinde HBS'nin genelde 20 günü aştığı ancak farklı nitelikteki diğer bütün atıklarla yapılan çalışmalar incelendiğinde HBS'nin çoğunlukla 10-20 gün arasında olduğu görülmektedir.

8. Fiziksel, kimyasal ya da biyolojik ön işlemden geçmiş arıtma çamuru, evsel organik atıklar, endüstriyel organik atıklar ve BBHG gibi atıkların birlikte arıtma prosesinde kullanılmasının arıtma verimini ve biyogaz üretimini arttırmasının yanında daha düşük HBS ve daha yüksek OYO şartlarında işletilebildiği Şekil 3.1 (b) ve (c)'de görülmektedir.

9. Birlikte arıtım prosesinde kimyasal ilavenin gerekli olmadığı ya da çok az bir miktarlarda gereksinimlerin olduğu görülmektedir.

10. Şekil 3.1 (d)'deki verilere göre özellikle evsel ve endüstriyel organik atıkların kullanıldığı birlikte arıtım çalışmalarında %90'ları aşan UKM-KOİ giderme verimlerinin olduğu görülmektedir.

11. Şekil 3.1'e göre metan-biyogaz üretiminin 0.1 ile 0.65 L CH_4-biyogaz/g UKM aralığında olduğu görülmektedir. Bununla birlikte arıtım proseslerinde yaklaşık ortalama 0.4 L CH_4-biyogaz/g UKM üretimi gibi dikkate değer bir başarının yakalandığı görülmektedir.

12. Meyve ve sebze atıklarının lignin içerikli yapısı biyogaz üretim potansiyelini ve UKM-KOİ giderim verimini düşürdüğü görülmektedir (Şekil 3.1 (d).

13. Şekil 3.1 (a), (b), (c) ve (d) incelendiğinde birlikte arıtımın işletme parametreleri üzerine olan etkisi açıkta görülmektedir.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

4.1 Deneysel Çalışmalar

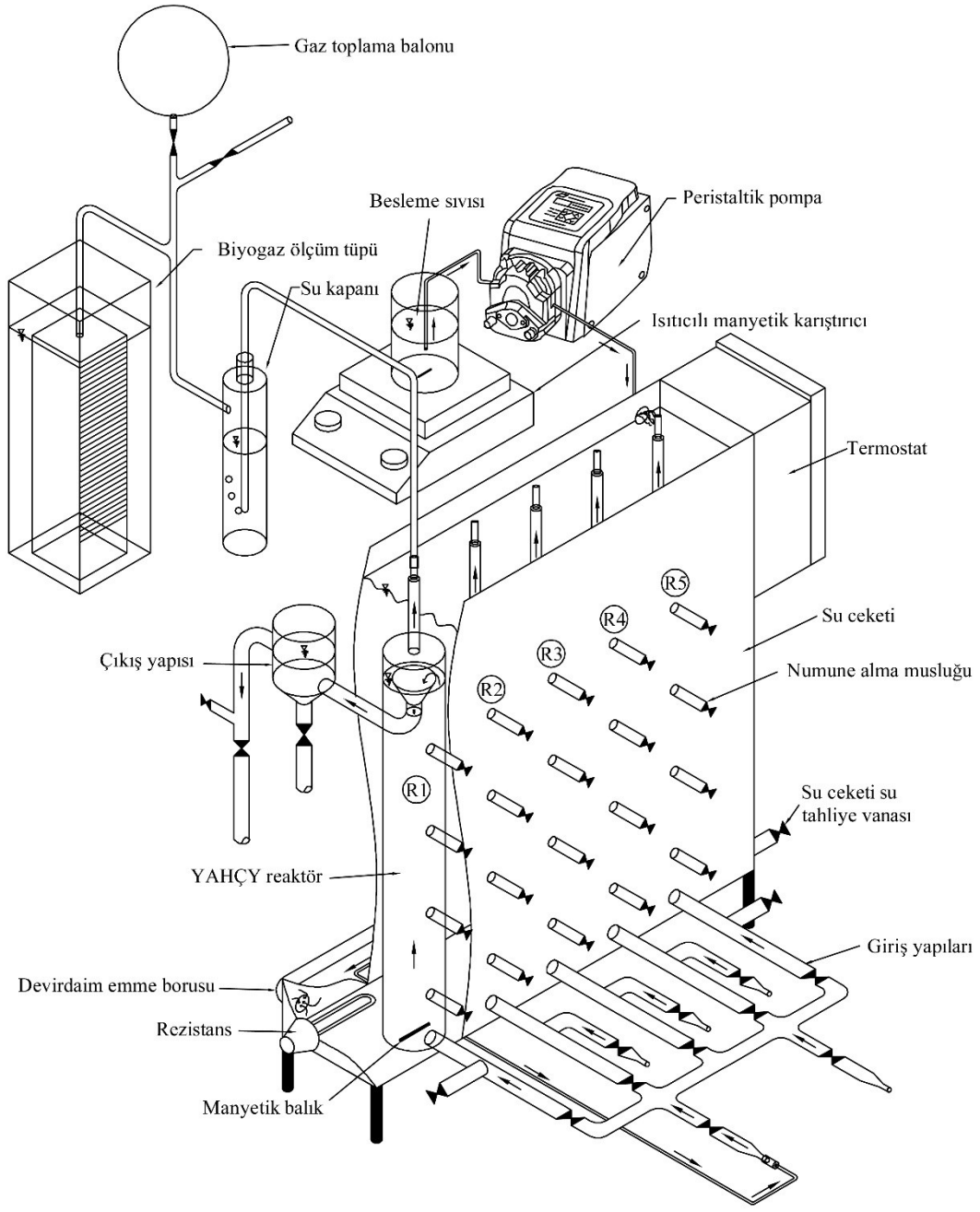
4.1.1 Biyogaz Üretimi ve Atık Arıtımı için Kullanılan Yukarı Akışlı Havasız Çamur Yataklı Deneysel Düzenek

Bu tez çalışmasında, büyükbaş hayvansal atıkların biyometanizasyon süreçlerinin iyileştirilmesi maksadıyla projelendirilen 5 adet (R1, R2, R3, R4, R5) aynı boyutlardaki YAHÇYR'ler kullanılmıştır. Yukarı akışlı havasız çamur yataklı reaktörler ticari uygulamaları bulunan başarılı reaktörlerdir. Yüksek organik madde gideriminden dolayı BBHG uygulamalarında başarılı olduğu belirtilmektedir [54], [137]. BBHG'nin Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin Şekil 4.1'de resmi ve Şekil 4.2'de şematik gösterimi verilmiştir. Reaktörlerin yapımında korozyon ve sızdırmazlık problemlerine karşı 304 kalite krom malzeme ve bağlantı elemanları kullanılmıştır. Reaktörler musluk suyu ile doldurularak hidrolik olarak incelenmiştir. Kaçaklar ve sızdırmalar tespit edilerek problemler giderilmiştir. Reaktörlerin dışarıdan karıştırılması sıvı-gaz giriş çıkışına sebep olmaktadır. Bu nedenle reaktör içlerinin istenilen devir ve zamanlarda karıştırılması, reaktörlerin tabanına bırakılan manyetik balıklar ile (ısıtıcılı) manyetik karıştırıcı (DAIHAN marka MSH-20A model) vasıtasıyla sağlanmıştır.



Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan deney düzeneği

Reaktörler, giriş yapısı, silindirik reaktör gövdesi, çıkış yapısı, reaktörleri saran su ceketi ve gaz takip ünitesi olmak üzere 5 bölümden oluşmaktadır.



Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü

Reaktörlere besleme yapacak olan peristaltik pompanın (LONGERPUMP marka BT100-2j model) farklı KOİ yüklerindeki atık besleme performansı incelenmiş ve 12000 mg/L KOİ'ye kadar problemsiz atık beslemesi yapılabildiği tespit edilmiştir. Reaktörleri beslemek için kullanılacak olan atıklar, matkap (BOSCH marka GSB 13 RE model) ucuna

özel tasarlanan bir parçalayıcı karıştırıcı ile uzun süreli karıştırılıp iyice parçalanarak homojen bir bulamaç haline getirilmiştir. Besleme sıvısı, biyogaz üretiminin iyileştiği deneysel çalışma safhasında matkap ucuna tasarlanan özel parçalayıcı ile birincil parçalamanın öncesinde daha iyi bir fiziksel parçalama sağlamak amacıyla bir kıyma makinesinden (EMES marka DA.12 model) geçirilerek ikincil parçalanması gerçekleştirilmiştir. Homojen atık karışımı 1 mm gözenek aralığına sahip çelik elekten (Loyka Marka çap 20 cm yükseklik 5 cm) geçirilmiştir. Elek altına geçen katı-sıvı atık karışımı istenilen KOİ seviyesine seyreltilip beslemeye hazır hale getirilmiştir. Besleme atığı ısıtıcılı manyetik karıştırıcı ile reaktör sıcaklığına kadar ısıtılarak homojen bir şekilde besleme yapılması sağlanmıştır. Peristaltik pompa çıkışından reaktöre giriş yapana kadar besleme boru çapı 2 mm'den 28 mm'ye kadar arttığı için pompanın basma kuvveti boru çapının artmasıyla birlikte arttırılmıştır.

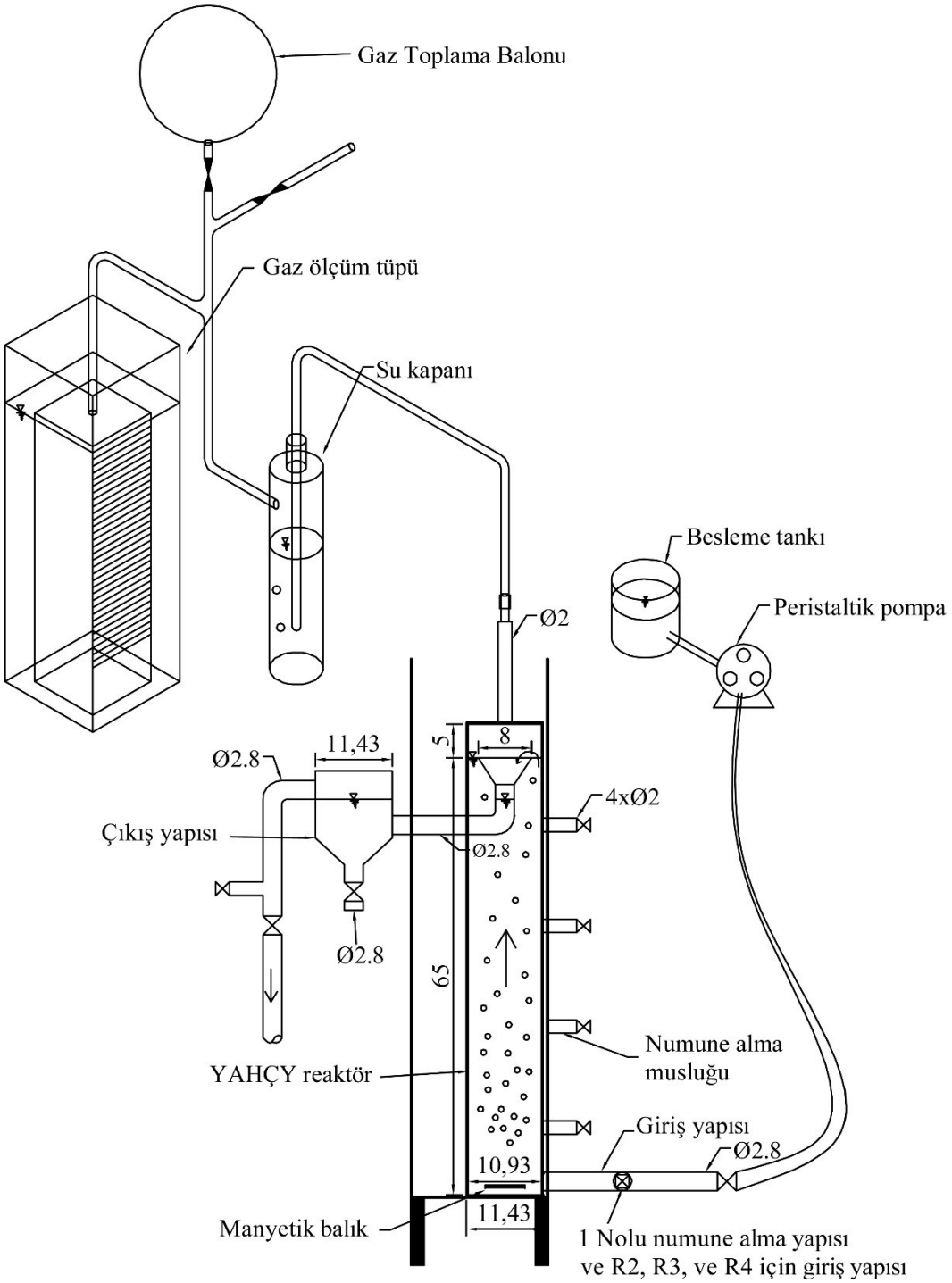
Giriş yapısı (reaktör tabanından 2 cm yükseklikte 2.8 cm dış çapında, 0.2 cm et kalınlığında, 27.5 cm uzunluğunda ve yaklaşık 124 mL hacminde) besleme sırasında oluşabilecek tıkanmalara mani olacak şekilde tasarlanmıştır. Olası tıkanmalarda temizleme yapılabilmesi için (giriş yapısı ile aynı boyutlarda, reaktör girişinden 11 cm uzaklıkta, 10 cm uzunluğunda ve yaklaşık 45 mL hacmindeki) 1 numaralı numune alma musluğu giriş yapısı üzerine monte edilmiştir. R1 ve R5 reaktörlerinin beslenmesi ana girişten yapılırken R2, R3 ve R4 reaktörlerinin beslenmesi (besleme sıvılarının birbirine karışmasını önlemek için) 1 numaralı numune alma muslukları üzerinden yapılmıştır.

R1, R2, R3, R4, R5 olarak adlandırılmış silindirik YAHÇYR'ler (Şekil 4.3) (11,43 cm dış çapında, 0,25 cm et kalınlığında ve 70 cm uzunluk ile) yaklaşık 6566 mL hacme sahiptirler. Reaktörlerin farklı noktalarından kolayca numune almak amacıyla (bir tanesi giriş yapısı üzerinde bulunan) 5 tane numune alma musluğu (2 cm dış çapında, 0.2 cm et kalınlığında, 6.25 cm uzunluğuna ve yaklaşık 13 mL hacim ile) ikincisi reaktör tabanından 10 cm yükseklikte olmak üzere 15 cm aralıklarla reaktör gövdesi üzerine yerleştirilmişlerdir. Bu musluklara ait bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Numune alma muslukları düzeni

Numune Alma Musluğu No	Reaktörün atık girişinden çıkış yönüne doğru yüksekliği (cm)	Musluk ile reaktör tavanı arasındaki hacim (mL)	Musluk ile reaktör tabanı arasındaki hacim (mL)
1	2	5962	188
2	10	5212	938
3	25	3804	2346
4	40	2397	3753
5	55	989	5161

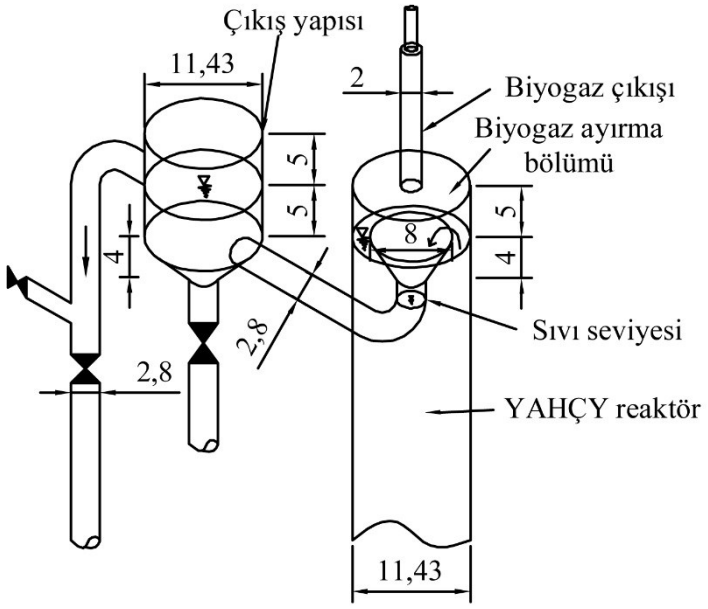
Bu durumda net reaktör hacmi; brüt hacimden (huni üst yüksekliği 65 cm ve bu yüksekliğe kadar olan yaklaşık hacim 6099 mL) reaktör içinde bulunan çıkış yapısının hacmi (huni hacmi ve L boru hacmi sırasıyla yaklaşık 99 mL ve 71 mL) çıkartılıp reaktör giriş yapısının hacmi (giriş yapısı ve 1. numune alma musluğu hacmi sırasıyla yaklaşık 124 mL ve 45 mL) ve numune alma muslukları hacmi (4x13 mL) eklendiğinde (6099-170+169+52) 6150 mL olarak bulunmuştur. Reaktörlerin içleri su ile doldurulduğunda saptanan hacim 6150±50 mL olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.3 Silindirik YAHÇYR'ün kullanıldığı çalışma düzeneği

Huni şeklinde yapılan (üst ve alt çapı sırasıyla 8 cm ve 2.8 cm, yüksekliği 4 cm ve yaklaşık 99 mL hacmindeki) çıkış yapısının (Şekil 4.4) üst noktası reaktör tepesinden 5 cm aşağıda olacak şekilde monte edilmiştir. Huni içine dökülen çıkış suyu L şeklinde (2.8 cm dış çapında dikey ve yatay uzunluğu sırasıyla 4.6 cm ve 6.9 cm, yaklaşık 71 mL hacmindeki)

bir dirsek yapı ile reaktör dışına çıkmaktadır. Buradan çıkış suyu devam eden yaklaşık 11 cm bir boru ile konik tabanlı (üst çapı ve alt çapı sırasıyla 11.43 cm ve 2.8 cm, konik kısım ve silindirik kısım yükseklikleri sırasıyla 4 cm ve 10 cm olan) çıkış yapısına ulaşmaktadır. Çıkış yapısı tahliye yüksekliği ve reaktör içindeki huni sıvı seviyesi yüksekliği reaktör tabanından 58.8 cm'dir. Dolayısıyla çıkış suyu (lavabo çıkış S borusu şeklinde bir yapı ile) 5.2 cm yukarıya çıktıktan sonra tahliye olmaktadır. Bu şekilde reaktör içerisinde oluşan gazın ayrılarak çıkış suyu tahliye borusundan çıkmasına engel olunmaktadır. Çıkış suyunun yükseldiği kısım (2.4 cm iç hacimden 10.93 cm iç hacme) genişlediği için yukarı akışta çöken katı malzemelerden kaynaklanabilecek tıkanmaların önüne geçilmiştir. Ayrıca çıkış suyunun yükseldiği konik tabanlı kısmın alt tabanına bir tahliye vanası yerleştirilmiştir. Katı madde birikimi olduğu takdirde katı maddeler buradan tahliye edilerek tıkanma problemleri önlenmiştir.



Şekil 4.4 Çıkış yapısı şematik görünümü

Reaktörlerde oluşan biyogaz, huni kısmın üstünde (yaklaşık 470 mL hacmindeki) gaz ayırma bölümünde toplanarak plastik gaz tahliye hortumları (1.2 cm dış çapında ve yaklaşık 170 cm uzunluğunda) vasıtasıyla gaz yıkama şişlerine (500 mL hacimli) oradan da deplasman yöntemine göre çalışan gaz ölçüm tüplerine (15x15x50 cm boyutlarındaki su tankı ve 10x10x40 cm boyutlarındaki gaz ölçüm sistemine) iletilmektedir. Hacimsel ölçümü yapılan biyogaz, gaz balonlarına depolanabilmekte veya ikinci bir vana ile biyogaz analizörüne aktarılabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Reaktörler su ceketi (20x80x80 cm) içerisine yerleştirilmiştir. Literatürdeki deneysel çalışmalarda anaerobik reaktörlerde yaşanan önemli problemlerden biri olan sıcaklık üzerinde durularak sıcaklık kontrolü 0.1°C hassasiyetli bir termostat (EMKO marka ESM–3710) ve termostat kontrolünde devreye giren su ceketinin her iki alt tabanına yatay olarak monte edilen iki adet termostatlı (40-80°C ayarlı) bakır rezistans (25 cm uzunluğunda THERMOGERM marka TH-50 model) ile sağlanmıştır. Su ceketi içerisindeki sıcaklık dağılımını dengelemek için su ceketinin tabanından aldığı suyu su ceketi üst noktasına aktaran 3 hızlı sirkülasyon pompası (LEO marka LRP32-60/180 model) kullanılmıştır. Devirdaim işlemi, ayarlanan sıcaklık değerinden istenen sıcaklık değerine ulaşılana kadar devam etmektedir. Bu şekilde hem devirdaim pompası hem de ısıtıcı rezistanslar çalışma süresince belirli aralıklarla dinlendirilmektedir.

4.1.2 Deneysel Çalışma Planı

Deneysel süreç boyunca değişen HBS ve karışım oranlarına göre çalışma planı Çizelge 4.2'de verilmiştir. Burada R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinin hangi HBS ile çalıştığı ve R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde BBHG'ne hangi oranlarda ilave atık katıldığının gösterimi kodlanmıştır. Bu kodlar deneysel analiz sonuçlarının gösteriminde kullanılmıştır.

Reaktörlerde aktif bir biyogaz üretimi gerçekleştiği için uçucu yağ asitleri birikimi olmamaktadır. Yapılan deneysel analizlerde çok düşük konsantrasyonlarda uçucu yağ asitleri ölçüldüğü ve reaktör içerisinde pH değerinde önemli bir düşüş yaşanmadığı için uçucu yağ asitlerinin takibi yapılmamıştır. Ayrıca sistemde yeterli alkalinite olduğundan yine uçucu yağ asitlerinin artması durumunda alkalinite ile tamponlanacağından pH düşüşü oluşmamıştır. Çalışma planında sülfat tayini anaerobik sistemlerde önem arz ettiği için takip edilmek istenmiştir. Yapılan ölçümlerde besleme atığı içerisindeki sülfat miktarının anaerobik şartlar için zararsız konsantrasyonlarda olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte kullanılan atığın çok renkli ve bulanık olması nedeniyle sülfat tayini için Standart Metotlarda belirtilen yöntemler uygulanamamıştır. Yüksek olmayan sülfat konsantrasyonunun anaerobik sistemler için sorun oluşturmaması nedeniyle bu analizden vazgeçilmiştir. Yukarı akışlı havasız çamur yataklı reaktörlerde izlenecek parametreler ve ölçüm sıklıkları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.2 Deneysel süreç boyunca çalışma ve atık karışım planı

Başlama	Bitiş	HBS	Gün	R1		KOD	R2, R3, R4, R5	R2		R3		R4		R5	
				Besleme Atığı 1	KOD		Besleme Atığı 1	Besleme Atığı 2	KOD	Besleme Atığı 2	KOD	Besleme Atığı 2	KOD	Besleme Atığı 2	KOD
08.03.2014	18.03.2014	11	11	BBHG	$R1_H10$	**Hazırlık**	BBHG	-	$R2_H10$	-	$R3_H10$	-	$R4_H10$	-	$R5_H10$
19.03.2014	18.04.2014	31	31	%50 BBHG + %50 Aşı	$R1_{AUS}31$	**AUS**	%50 BBHG + %50 Aşı	-	$R2_{AUS}31$	-	$R3_{AUS}31$	-	$R4_{AUS}31$	-	$R5_{AUS}31$
19.04.2014	08.05.2014	20	20	BBHG	R1-20	**5%**	%95 BBHG	%5 Çim	$R2_520$	%1,67 Çim + %1,67 EEOA + %1,67 AÇ	$R3_520$	%5 EEOA	$R4_520$	%5 AÇ	$R5_520$
09.05.2014	18.05.2014	10	10	BBHG	R1-10				$R2_510$		$R3_510$		$R4_510$		$R5_510$
19.05.2014	07.06.2014	20	20	BBHG	R1-20	**10%**	%90 BBHG	%10 Çim	$R2_{10}20$	%3,33 Çim + %3,33 EEOA + %3,33 AÇ	$R3_{10}20$	%10 EEOA	$R4_{10}20$	%10 AÇ	$R5_{10}20$
08.06.2014	17.06.2014	10	10	BBHG	R1-10				$R2_{10}10$		$R3_{10}10$		$R4_{10}10$		$R5_{10}10$
18.06.2014	07.07.2014	20	20	BBHG	R1-20	**20%**	%80 BBHG	%20 Çim	$R2_{20}20$	%6,67 Çim + %6,67 EEOA + %6,67 AÇ	$R3_{20}20$	%20 EEOA	$R4_{20}20$	%20 AÇ	$R5_{20}20$
08.07.2014	27.07.2014	10	20	BBHG	R1-10				$R2_{20}10$		$R3_{20}10$		$R4_{20}10$		$R5_{20}10$
28.07.2014	16.08.2014	20	20	BBHG	R1-20	**40%**	%60 BBHG	%40 Çim	$R2_{40}20$	%13,33 Çim + %13,33 EEOA + %13,33 AÇ	$R3_{40}20$	%40 EEOA	$R4_{40}20$	%40 AÇ	$R5_{40}20$
17.08.2014	05.09.2014	10	20	BBHG	R1-10				$R2_{40}10$		$R3_{40}10$		$R4_{40}10$		$R5_{40}10$
06.09.2014	25.09.2014	20	20	BBHG	R1-20	**50%**	%50 BBHG	%50 Çim	$R2_{50}20$	%16,67 Çim + %16,67 EEOA + %16,7 AÇ	$R3_{50}20$	%50 EEOA	$R4_{50}20$	%50 AÇ	$R5_{50}20$
26.09.2014	16.10.2014	10	20	BBHG	R1-10				$R2_{50}10$		$R3_{50}10$		$R4_{50}10$		$R5_{50}10$
Toplam			222												

BBHG: Büyük Baş Hayvan Gübresi

EEOA: Evsel Endüstriyel Organik atık (%25 Zeytin prinası + %25 Pamuk küspesi + %50 Mutfak organik atıkları)

AÇ: Arıtma Çamuru

AUS: Aşı Uyum Süreci

Çizelge 4.3 Reaktörlerde izlenen parametreler ve ölçüm sıklıkları

İncelenen Parametre	Takip edilme gerekçesi	Örnekleme noktası	Ölçüm Sıklığı	Örnekleme noktası	Ölçüm Sıklığı
Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg TKOİ/L)	Toplam organik yükün takibi için	Giriş ve çıkışta	Her beş günde (6/ay)	Reaktör içinde	Her farklı atık karışımı ve HBS değişimi başında ve sonunda (10 veya 20 günde bir)
Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg ÇKOİ/L)	Çözünmüş organik yükün takibi için				
pH	Anaerobik şartların kontrolü için				
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	Anaerobik şartların kontrolü için				
Katı Maddeler (mg TKM, UKM, AKM, UAKM/L)	Atığın organik yükünün tasnifi için				
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (mg $BOİ_5$/L)	Atığın biyolojik parçalanabilen kısmını belirlemek için				-
Toplam Kjeldahl Azotu (mg/L)	Atığın azot içeriğini belirlemek için				-
Amonyak azotu (mg NH_3-N/L)	Anaerobik şartların kontrolü için				-
Toplam fosfor (mg/L)	Atığın fosfor içeriğini belirlemek için				-
Fosfat Fosforu (mg PO_4^{-3}- P/L)	Anaerobik şartların kontrolü için				-
Klorür (mg/L)	Anaerobik şartların kontrolü için				-
Biyogaz Üretimi (L/gün)	Biyogaz üretiminin takibi için	Reaktörlerin çıkışında	Günlük		
Arıtma verimi (%)	Atık arıtımının takibi için	-	HBS'ye göre		
Sıcaklık (°C)	Anaerobik şartların kontrolü için	Bütün sistemde	Sürekli		

4.1.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Ham Atıkların ve Beleme Sıvılarının Genel Özellikleri

Yapılan çalışmada kullanılan büyükbaş hayvan gübresi (Adıyaman şehir merkezine 15 km uzaklıktaki Hasankendi köyünde faaliyet gösteren ve veteriner hekim Zeki SELÇUK'a ait) süt üretim çiftliğinden, çim atıkları Adıyaman Üniversitesi kampüsü yeşil alanlarından, evsel organik atıklar (temsil edici özellikte olmasına dikkat edilerek) mutfak organik atıklarından, endüstriyel organik atık olarak zeytin prinası ve pamuk küspesi Adıyaman Organize Sanayi bölgesinde faaliyet gösteren (Ünal Turizm Ulus. Taş. Tic.Ltd. Şti.'ye ait)

bitkisel ham yağ üretim tesislerinden, arıtma çamuru ise Malatya Atıksu Arıtma tesisinden temin edilmiştir.

Çizelge 4.4 Beslemede kullanılan ham atıkların genel karakterizasyonu

Parametreler		Büyükbaş Hayvan Gübresi	Çim atıkları	Evsel organik atıklar	Endüstriyel organik atıklar	Arıtma çamuru
TKM (%)	Ortalama	16.67	26.6	3.79	96.2	11.01
	Std. Sapma	0.16	2.34	0.29	3.337	0.17
UKM (%)	Ortalama	12.67	21.9	3.52	80	7.49
	Std. Sapma	0.45	1.9	0.32	4.4	0.28
mg KOİ/g TKM	Ortalama	1130	730	1659	791	1182
	Std. Sapma	187	65	93	19.5	94
mg TKN/g TKM	Ortalama	12.85	18.7	22.37	13.04	53.72
	Std. Sapma	1.37	1.2	0.61	2.15	0.47
mg NH_3-N/g TKM	Ortalama	1.22	4.4	4.92	1.81	20.1
	Std. Sapma	0.2	0.41	0.41	0.15	0.89
mg TP/g TKM	Ortalama	16.38	11.39	5.32	22.32	46.68
	Std. Sapma	0.51	0.67	0.79	2.6	2.7
mg PO_4-P/g TKM	Ortalama	8.3	4.8	0.18	1.07	7.55
	Std. Sapma	0.3	0.29	0.012	0.06	0.3

Çizelge 4.4'te genel karekterizasyonu verilen atıklar gerekli parçalama işlemlerinden sonra musluk suyu ile sulandırılıp 1 mm çaplı elekten geçirildikten sonra TKOİ değerleri yaklaşık 10.000 mg/L'ye ayarlanarak +4°C'de buzdolabında muhafaza edilmiştir. Reaktörlere beslenen besleme sıvısının genel karakterizasyonuna ait ortalama değerler ve standart sapmaları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Reaktörlere yapılacak olan atık beslemeleri Çizelge 4.2'deki atık besleme planına göre yapılmıştır.

Çizelge 4.5 Reaktörlere beslenen besleme sıvısının genel karakterizasyonu

Bileşenler		Büyükbaş Hayvan Gübresi (BBHG)	BBHG + Çim Atıkları	BBHG + Çim Atıkları Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar + Arıtma Çamuru	BBHG + Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar	BBHG + Arıtma Çamuru
		R1	R2	R3	R4	R5
TKM (mg/L)	Ortalama	9832	9693	9498	9319	9673
	Std. Sapma	964	1205	1191	1403	1324
UKM (mg/L)	Ortalama	7152	6912	7005	7041	7082
	Std. Sapma	1116	1364	1153	1228	1132
AKM (mg/L)	Ortalama	6154	5689	5929	5626	6600
	Std. Sapma	782	801	786	731	1159
UAKM (mg/L)	Ortalama	5071	4595	4743	4769	5412
	Std. Sapma	619	573	601	640	971
TKOİ (mg/L)	Ortalama	10111	9846	10149	10217	10055
	Std. Sapma	733	670	862	633	781
BOİ (mg/L)	Ortalama	4143	4438	4349	4378	4246
	Std. Sapma	659	739	839	785	705
TKN (mg/L)	Ortalama	449	451	454	438	505
	Std. Sapma	28	34	48	41	46
NH_3-N (mg/L)	Ortalama	183	202	191	190	197
	Std. Sapma	40	42	42	45	52
TP (mg/L)	Ortalama	295	273	285	286	379
	Std. Sapma	57	49	47	62	125
PO_4-P (mg/L)	Ortalama	94	85	93	90	110
	Std. Sapma	20	15	22	20	32
Klorür (mg/L)	Ortalama	357	314	320	308	301
	Std. Sapma	87	72	73	75	72
pH	Ortalama	6,94	7.07	6.90	6.81	7.03
	Std. Sapma	0.28	0.34	0.38	0.53	0.30
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	Ortalama	1540	1726	1416	1172	1372
	Std. Sapma	457	641	427	443	409

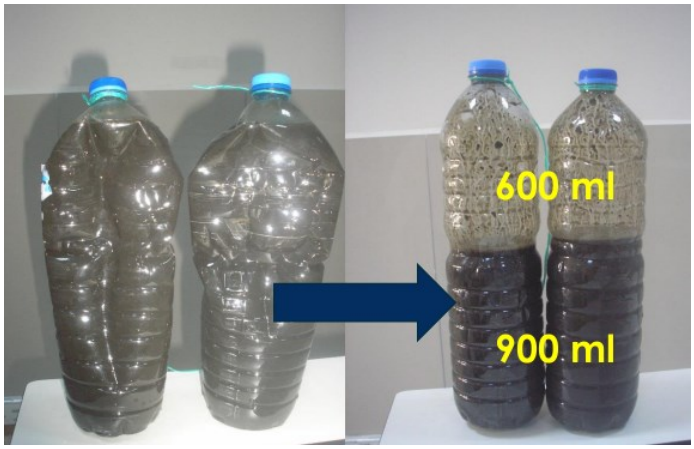
4.1.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan Floküler Aşı Çamurunun Genel Özellikleri

Reaktörlerde kullanılan aşı çamuru Gaziantep Atıksu Arıtma tesisi anaerobik çamur çürütme tankları çıkışından temin edilmiştir. Çizelge 4.6'da aşı çamurunun genel karaterizasyonu verilmiştir. Çamur hiç bekletilmeden 5-6 saat içerisinde reaktörlere beslenmiştir.

Çizelge 4.6 Reaktörlerde kullanılan floküler aşı çamurun genel karakterizasyonu

Parametreler	Floküler Aşı Çamuru
TKM (%)	4.01
UKM (%)	3.13
mg KOİ/g TKM	807
mg TKN/g TKM	47.2
mg NH_3-N/g TKM	16.6
mg TP/g TKM	77.7
mg PO_4-P/g TKM	0.8

Aşı çamurlarının biyogaz üretim aktivitesi hiç besleme yapılmaksızın takip edilmiştir. 1500 mL hacmindeki iki pet şişeye 900'er mL aşı çamuru konulmuş ve pet şişeler içerisindeki hava tamamen boşaltılarak 36.5-37°C sıcaklık aralığına sahip su ceketi içerisine bırakılmıştır. Pet şişelerin 600 mL'lik boş olan hacmi 3, 8, 15, 32, 57. ve 141. günlerin sonunda biyogaz ile dolmuştur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Floküler aşı biyogaz üretimi

4.1.5 Reaktörlerin Devreye Alınması ve İşletilmesi

Laboratuvar ölçekli YAHÇYR sisteminin anaerobik şartlara alıştırılması için TKOİ değeri yaklaşık 10.000 mg/L olan 6.15 L BBHG 11 gün boyunca 36.5-37°C'de reaktör içerisinde bekletilmiştir. Anaerobik aşı temininden sonra reaktör içerisine daha önce beslenen BBHG karışımının 3'er L'si reaktör dışına alınmıştır. Temin edildiği gün bir miktar sulandırılarak 1 mm gözenek çapına sahip elekten geçirilen floküler aşı çamuru her bir reaktöre tekrar yaklaşık 3 er L olacak şekilde beslenmiştir. Daha sonra aşının 31 gün boyunca BBHG'ne adaptasyonu sağlanmıştır. Aşı çamurunun reaktörlere adaptasyon periyodunun 10. gününde TKOİ değeri 10.000 mg/L olan 500 er mL BBHG beslemesi

yapılmıştır. Bu periyotta aşı çamurunun ortama alışması sağlanmıştır. Ayrıca, aşı uyum sürecinde reaktörlere beslenen aşı çamuru ve BBHG'nin içerdiği organik muhtevanın belli oranda tükenmesi sağlanarak ilk başta yapılan besi maddesi yüklemelerinin biyogaz üretimine olabilecek katkıları minimize edilmiştir.

Devreye alınan sisteme çalışma planına göre her gün atık beslemesi yarı sürekli olarak peristaltik pompa vasıtası ile yapılmıştır. Besleme süresi her bir reaktörde HBS 20 gün periyodu için yaklaşık olarak 25 dakika iken HBS 10 gün periyodu için yaklaşık 45 dakika sürmüştür. Atık besleme işleminden sonra reaktörlerin içi manyetik karıştırıcılar ile 67. güne kadar yaklaşık 1 saat kadar karıştırılmıştır. Ancak karıştırmadan ötürü anaerobik çamur kaçışının olduğu tespit edildikten sonra karıştırma işleminden vazgeçilmiştir. Reaktör içerisindeki biyogaz oluşumunun ve atığı reaktöre tabandan beslemenin reaktörü yeterli ölçüde karıştırdığı anlaşılmıştır.

Çalışmada reaktör içerisinin değişiminin incelenmesi maksadıyla temsil edici olabilmeleri için fazlaca alınan numunelerin aktif anaerobik çamur artışını bir nebze engellediği görülmüştür. Bu nedenle, 10 günde bir yapılan reaktör içi analizleri 102. günden sonra 20 günde bir olacak şekilde analiz sayısı düşürülmüştür. Bununla birlikte reaktör içi analiz aralığı arttırılınca çamur yatağının yükseldiği gözlemlenmiştir.

Biyogaz hacim ölçümleri her gün aynı saatlerde besleme yapmadan önce okunmuştur. Bunun uygulanamadığı bazı istisna durumlarda mevcut biyogaz üretimi geçen saate bölünüp 24 saat ile çarpılarak günlük biyogaz üretim miktarı bulunmuştur.

Atıklar çalışma süreci boyunca iki farklı ön işleme tabi tutulmuşlardır. Birincil parçalama döneminde atıklar, %20 atık ilave periyodunun sonuna kadar tek kademeli olarak parçalanmıştır. Bu periyottan sonra ise iki kademede parçalanmıştır. Parçalanmış organik maddelerin bulunduğu sıvı 1 mm çaplı elekten geçirildikten sonra TKOİ değeri 10.000 mg/L seviyesine ayarlanmıştır. Parçalama ve TKOİ ayarlaması yapılan besleme sıvıları 5 L'lik pet bidonlara Çizelge 4.2'deki deneysel planda belirtilen oranlarda karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan 5 L'lik besleme sıvılarına 5 mL stok eser element ilavesi yapılarak buzdolabında +4°C'de muhafaza edilmiştir. Besleme sıvısı, bidonlar çalkalanıp homojen hale getirildikten sonra alınmıştır. Daha sonra besleme sıvısı, ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda reaktör sıcaklığına kadar ısıtılarak peristaltik pompa vasıtası ile reaktörlere beslenmiştir. Besleme sıvılarına katılacak stok eser element çözeltinin

hazırlanması için kullanılan elementler ve miktarları Çizelge 4.7'de verilmiştir. 1 L besleme atığına 1 mL stok eser element çözeltisi katılmıştır [62].

Çizelge 4.7 Besleme sıvısına katılan stok eser element çözeltisi bileşimi (1 L'lik çözelti için)

Element	Kimyasal Formülü	Miktar
Magnezyum Sülfat	$MgSO_4.7H_2O$	5 gr
Demir Klorür	$FeCl_2.6H_2O$	6 gr
Kobalt Klorür	$CoCl_2.6H_2O$	10 gr
Borik Asit	H_3BO_3	1 mg
Çinko Sülfat	$ZnSO_4.7H_2O$	1 mg
Bakır Sülfat	$CuSO_4.5H_2O$	1 mg
Mangan Klorür	$MnCl_2.6H_2O$	100 mg
Amonyum Hepta Molibdat	$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$	1 mg
Alüminyum Sülfat	$Al_2(SO_4)_3.18H_2O$	585 mg
Sodyum Silikat	$Na_2SiO_3.9H_2O$	1 g

4.1.6 Deneysel Yöntemler

Reaktör giriş çıkışından ve reaktör içerisinden alınan numuneler gerekli ön işlemlerden geçirilerek standart metotlarda [186] belirtilen yöntemlere göre analiz edilmiştir.

KOİ tayinleri kapalı refluks, kolorimetrik yöntemine (APHA SM (2012) 5220-D) göre analiz edilmiştir. Analiz için hazırlanan tüplerin kapakları kapatılarak 2 saat süreyle 148°C'de termoreaktörde (Hach Lange marka LT 200 model) ısıtılmıştır. Isıtma işleminden sonra termoreaktörden çıkartılan ve soğutulan numunelerin, spektrofotometrede (Hach Lange Marka DR 6000 model) 600 nm dalga boyunda absorbans değeri okunmuştur. Daha önceden Potasyum Hidrojen Ftalat (KHP) çözeltisi ile hazırlanan standartların absorbans değerleri ile oluşturulan kalibrasyon doğrusunun denkleminde absorbans değeri yerine konularak ve yapılan seyreltmelerde hesaplamaya katılarak TKOİ değeri bulunmuştur. ÇKOİ deneyinde, numune 0.45 µm membran filtreden süzülmüş, süzüntüye aynı işlemler uygulanarak ÇKOİ değeri belirlenmiştir. BOİ tayinleri oksijenin tüketilmesi ve oluşan CO_2'in NaOH ile emilmesi neticesinde oluşan vakumu mg/L olarak ifade edebilen oksitop cihazı (Oxitop IS 12) ile analiz edilmiştir.

pH ölçümleri pH metre (Orion Star marka A211 model) ile gerçekleştirilmiştir. Alkalinite tayini (APHA SM (2012) 2320-B), numuneler çok renkli ve bulanık olduğundan dolayı pH metre kontrolünde, manyetik balık ile karıştırılırken 0.02 N H_2SO_4 ile pH 4.2-4.5 seviyesine kadar titre edilerek analiz edilmiştir.

TKM tayini (APHA SM (2012) 2540-B), darası alınıp sabit tartıma getirilen porselen krozelere konulan bir miktar numune 103-105°C'de etüvde (Nüve marka FN 500 model) kurutulduktan ve sabit tartıma getirildikten sonra sonra hassas terazide (Axis marka AGN 220 C model) tartılmış baştaki dara sabit tartımı çıkartılmış ve numune miktarına bölünerek mg/L olarak TKM değeri belirlenmiştir. Aynı numune 550°C'de kül fırınında 15 dakika yakılır sabit tartıma getirilip tekrar tartılmıştır. Porselen krozenin etüv çıkış ağırlığından kül fırını çıkış ağırlığı çıkartılıp numune miktarına bölünerek UKM değeri mg/L olarak hesaplanmıştır (APHA SM (2012) 2540-E). AKM tayininde (APHA SM (2012) 2540-C), bir miktar numune 0.7 µm cam elyaf filtreden süzülmüş, filtre kağıdına TKM ve UKM'deki işlemler uygulanarak mg/L olarak AKM ve UAKM değerleri bulunmuştur.

TKN tayininde (APHA SM (2012) 4500-N_{org} B) kuvvetli oksitleyici kullanılarak organik azot amonyak azotuna dönüştürülmüştür. Numunede bulunan amonyak ve amonyak azotuna dönüştürülen organik azot bazik ortamda distilasyon ünitesi vasıtasıyla borik asit çözeltisinde tutulmuştur. Daha sonra borik asit içerisinde tutulan amonyak miktarı 0.02 N H_2SO_4 ile titre edildikten sonra mg/L olarak hesaplanmıştır. Amonyak tayininde (APHA SM (2012) 4500-NH_3 C) ise yüksek pH'ya getirilen numune içindeki amonyak, distilasyon sonrasında borik asit içerisinde tutulmuş ve sonra titrimetrik yöntemle tayin edilmiştir.

TP analizinde (APHA SM (2012) 4500-P D) uygun oranda seyreltilmiş numuneye H_2SO_4-HNO_3 asit ilavesi ile parçalama ve pH nötralizasyonu işlemleri uygulanır. Daha sonra kalay klorür metodu kullanılarak oluşan mavi rengin spektorfotometrede 690 nm'de absorbans değeri okunmuştur. Absorbans değeri, standartlarla oluşturulmuş kalibrasyon doğrusunun denkleminde yerine konularak ve seyreltmelerde hesaba katılarak TP değeri hesaplanmıştır. PO_4-P değerinin belirlenmesinde ise TP analizindeki parçalama işlemi haricindeki diğer işlemler uygulanmıştır.

Klorür tayininde (APHA SM (2012) 4500-Cl^- B) alınan numuneye $Al(OH)_3$ ilave edilmiştir. Numune dinlendirildikten sonra filtrelenmiştir. Süzüntüye H_2O_2 ilave edilip pH 7-10 değeri arasına ayarlandıktan sonra potasyum kromat ilave edilmiştir. Daha sonra numune $AgNO_3$ çözeltisi ile pembemsi-sarı renge kadar titre edildikten sonra klorür miktarı mg/L olarak hesaplanmıştır.

4.1.7 Reaktörlerdeki Anaerobik Floküler Çamurun ve Oluşan Granüllerin SEM (Scanning Electron Microscop) ile İncelenmesi ve Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobunda (Scanning Electron Microscope-SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir [187].

Çalışmanın nihayetinde (222. günde) her bir reaktörün 1. numune alma musluğundan alınan yaklaşık 500 mL anaerobik çamur numunesi öncelikle 0.5 mm çaplı elekten geçirilerek çamur içerisindeki granüller ayrılmıştır. Organik numunelerin incelenebilmesi için numunelerin yüksek vakuma dayanıklı ve kuru olması gerekmektedir. Bu nedenle yaklaşık 10 mL floküler çamur ve saf su ile yıkanan granüller etüvde yaklaşık yaklaşık 24 saat süreyle 40°C petri kabı içerisinde kurutularak SEM analizine hazır hale getirilmiştir. Daha sonra kurutulan numuneler, numune tutucular (stub) üzerine yapıştırılmıştır. Organik yalıtkan numunelerin yüzeyleri iletkenliği sağlayıcı altın-paladyum (Au/Pd) ile kaplanması gerekmektedir. Bu nedenle SEM analizleri için numuneler (Quorum marka SC7620 model kaplama cihazı kullanılarak) altın-paladyum ile kaplanmıştır. Numuneler kaplandıktan sonra (Zeiss marka EVO LS 10 model) SEM (Şekil 4.6) ile incelenip fotoğraflanmıştır.



Şekil 4.6 Elektron taramalı mikroskop (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları için Adıyaman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Elektron Mikroskobu laboratuvarında bulunan SEM cihazı kullanılmıştır.

4.1.7.1 Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi (EDX)

Herhangi bir örnek veya örnek üzerindeki ilgili küçük bir alanda elemental kompozisyonu tanımlamak için kullanılan bir tekniktir. Elektron mikroskobunda (SEM) bulunan EDX analizi, örnek üzerine taramalı bir elektron demeti düşürülerek gerçekleştirilir. Bu elektronların bazıları numune içindeki elektronlar ile çarpışarak elektronların yörüngelerinden çıkması sağlanır. Boşalan pozisyonlar x-ışınları yayan yüksek enerjili elektron tarafından doldurulur. Yayılan x-ışınları analiz edilerek, numunenin elemental kompozisyonu tespit edilebilmektedir [188].

Elektron taramalı mikroskopta, 9 mm çalışma mesafesinde (Working Distance (WD)) 1000X oranında büyütülen numune görüntülerinin EDX analizleri yapılmıştır. EDX analizlerinde grafiksel sonuç ile birlikte her elementin kütlesel olarak yüzde (%) dağılımının normalize edilmemiş konsantrasyonu (unn. C wt.%), kütlesel dağılımının %100'e normalize edilmiş konsantrasyonu (norm. C wt. %), elementlerin atom olarak

yüzdesi (atom C at.%) ve 1 sigma olarak hata değerleri (erros (1 sigma) wt.%) elde edilmiştir.

4.2 Modelleme Çalışmaları

Çalışmanın bu bölümünde, anaerobik birlikte arıtım prosesinde biyogaz üretiminin tahmininde ve simülasyonunda bir modelleme aracı olan bilgisayar esaslı yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak eğitilen YSA modeli ile BBHG'ne %1-50 oranı aralığında farklı atık ilavesi neticesinde üretilebilecek biyogaz miktarı simüle edilmiştir.

YSA girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişki ile doğrusal olmayan parametrelerin tahmininde kullanılan en iyi tahmin araçlarından biridir. YSA eğitim veri kümesine dayalı olarak karmaşık bilgileri anlamlandıran insan beyninin çalışma mekanizması taklit edilerek oluşturulan bir sistemdir. Sistemin temel yapısında bir tane girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman bir tane de çıktı katmanı bulunmaktadır [189].

Modelleme çalışmasında sayısal hesaplama yapabilen MATLAB V7.14.0.739 (R2012a) bilgisayar programı kullanılmıştır. 180 deneysel veri seti girdi matriksi [p] ve çıktı matriksi [t] olarak ayrılmıştır. Girdi değişkenleri deneysel çalışma süresi, giriş KOİ, giriş pH, giriş alkalinite, giriş amonyak, giriş toplam fosfor, hidrolik bekleme süresi, organik atık ilave oranı, ön işlem ve eklenen atık türü (reaktör no) hedef değişkeni ise günlük biyogaz üretimi olarak belirlenmiştir.

Eğitimden önce girdi ve hedef değerler MATLAB premnmx fonksiyonu kullanılarak -1–1 aralığında normalize edilmiştir. Bunun için (4.1) eşitliğindeki kod kullanılmıştır.

```
[pn,minp,maxp,tn,mint,maxt]=premnmx(p,t);
```
(4.1)

Modellemede kullanılan girdi (p) ve çıktı (t) parametrelerinin istatiksel analizleri yapılmıştır. Girdi (pn) ve hedef (tn) değerlerinin normalizasyonu (4.2) eşitliğindeki algoritma ile gerçekleştirilmiştir.

$$xn=(2\times(x-minx))/((maxx-minx))-1 \quad (4.2)$$

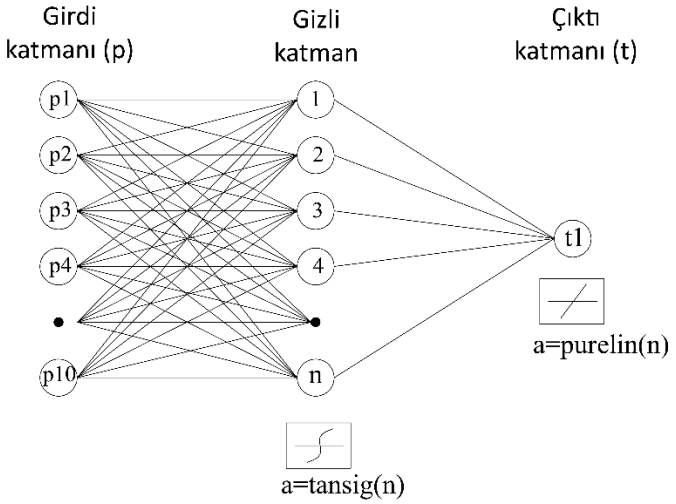
Burada minp, maxp ve mint, maxt gerçek girdi ve hedef değerlerinin minimum ve maksimum değerlerini ifade etmektedir. YSA'da eğitim işlemi tamamlandıktan sonra değerler (4.3) eşitliğindeki algoritma ile denormalize edilmiştir.

outputdn=((outputn+1)×(maxt-mint))/2+mint (4.3)

Bazı durumlarda girdi parametreleri çok sayıda ve birbirleri ile yüksek derecede korelasyonlu olabilmektedirler. Böyle bir durumda girdi parametrelerinin azaltılması faydalı olmaktadır. Bu uygulama için temel bileşen analizi (TBA) etkin bir metottur. Bu uygulama ile girdi bileşenleri ilintisiz hale getirilerek hedef değere istenenden az katkı sağlayan bileşenlerin çıkarılması sağlanmaktadır. TBA analizi ise (4.4) eşitliğinde gösterilen prepca kodu ile gerçekleştirilmiştir.

[ptrans,transMat]=prepca(p,min_frac) (4.4)

YSA tabanlı modellemede 5 reaktörden elde edilen toplam 180 deneysel set kullanılmıştır. Deneysel verilerin yarısı eğitim, dörtte biri doğrulama ve geri kalan veriler ise test için rasgele olarak üçe ayrılmıştır. İleri beslemeli YSA modelinde girdi katmanı gizli katman ve çıktı katmanı olmak üzere üç katman bulunmaktadır. Biyogaz üretimine etkileri dikkate alınarak seçilen 10 parametre biyogaz üretim seviyesini tahmin etmek üzere girdi katmanı olarak belirlenmiştir. Gizli katmanda tanjant sigmoid fonksiyonu (tansig) çıktı katmanında ise lineer transfer fonksiyonu (purelin) kullanılmıştır. Şekil 4.7'de kullanılan YSA modelinin genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Modellemede kullanılan YSA'nın genel yapısı

Geri besleme eğitim algoritmasında ise MATLAB üzerine yüklü 11 algoritma kullanılmıştır. En düşük ortalama karesel hata değerine ulaşılıncaya kadar her bir geri besleme eğitim algoritmasında YSA gizli katmanı nöron sayısı 1 nörondan 10 nörona kadar denenmiştir. Deneme yanılma yoluyla geri besleme eğitim algoritması ve nöron sayısı belirlenmiştir.

YSA tabanlı modelin performansını belirlemek için determinasyon katsayısı (R^2), korelasyon katsayısı (R), uyumluluk indeksi (IA) ve 2'nin faktörü (FA2) istatiksel indikatörleri kullanılarak modelin doğruluğu analiz edilmiştir.

4.3 Maliyet Analizi Çalışmaları

Bu çalışmada anaerobik şartları en iyi sağlayacak bir biyogaz tesisinin tasarlanılması düşünülmüştür. Bu nedenle sabit kubbeli biyogaz tesisi model olarak seçilmiştir. Tesisin kurulumu için tamamen yerel imkânların kullanılması hedeflenmiştir. Tesisin yer altına inşa edilmesi düşünülmüştür. Anaerobik şartlar için gerekli sıcaklık değerlerinin güneş kollektörleri ile sağlanması planlanmıştır. Reaktör gövdesinin metal malzemeden inşa edilmesi ve gerekli izolasyonların yapılması planlanmıştır.

Biyogaz tesisinin boyutlandırılması, üretilecek biyogazdan yararlanacak kişi sayısına göre yapılmıştır. Buna göre bir kişinin günlük pişirme işleri için kullanacağı biyogaz miktarı 0.5 m^3/gün olarak kabul edilmiştir. Buna göre 2, 4, 8, 16, 32 ve 64 kişinin yararlanabileceği

1, 2, 4, 8, 16 ve 32 m^3/gün biyogaz üretim kapasitesine sahip 6 farklı hacimdeki biyogaz tesissi için fayda maliyet analizi yapılmıştır. Ayrıca büyükbaş hayvanların günlük 10 kg yaş gübre üreteceği kabul edilerek 20 günlük HBS'ye göre tesisler boyutlandırılmıştır. Biyogaz tesislerinde ısı kontrolünü yapmak amacıyla gerekli hacmin yarısı kadar tesis tabanına su ceketi yapılması planlanmıştır. Gerekli güneş kollektörlerinin hesabı için tesis kurulum yeri olarak Adıyaman şehri seçilmiştir. Biyogaz üretim değeri olarak, deneysel çalışmalarda R1 reaktörünün yaş BBHG'nin kilogramı başına biyogaz üretim değeri olan 0.0034m^3/kg yaş atık değeri referans olarak alınmıştır. Reaktöre beslenecek atığın TKM oranı için deneysel çalışmalarda reaktör içi TKM oranları dikkate alınarak besleme atığı toplam TKM oranı %5 olarak seçilmiştir. Bu TKM oranını yakalamak için ortalama %16.67 TKM oranına sahip BBHG'nin 1 kilogramına 2-2.5 L arası musluk suyu ilave edilmesi planlanmıştır.

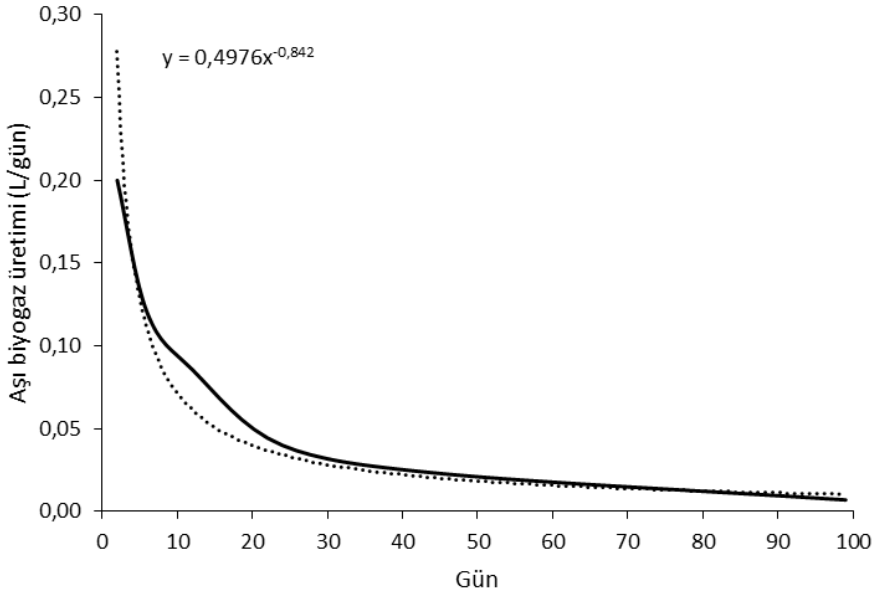
Biyogaz tesislerinin kurulumunda sabit maliyet kalemleri olarak inşaat kaleminde; paslanmaz sac, paslanmaz boru (Ø 10 cm), güneş kollektörü, termostat, plastik boru, su kapanı, diğer sarf malzemeler dikkate alınmış, emek kaleminde ise; çukur kazma ve reaktör yapımı kalemlerinin maliyetleri öngörülmüştür. İşletme maliyetleri bileşenleri olarak; bakım onarım giderleri, elektrik giderleri, su giderleri, işçilik giderleri ve ilave atık giderlerinin maliyetleri öngörülmüştür. 12 m^3 hacimli reaktör de dâhil olmak üzere küçük ölçekli tesislerde su ve işçilik giderleri işletme maliyet hesabına katılmamıştır. Üretilen biyogazın değeri ise 2014 yılı sonu itibari ile 12 kg'lık mutfak tüpü fiyatı eş değeri üzerinden hesaplanmıştır. Hesaplamalara BBHG'nin elde edilme maliyeti, üretilen tarımsal gübrenin getirisi, sosyal ve çevresel fayda gibi getiriler dâhil edilmemiştir. Tesisler mümkün olduğu kadarıyla yerli piyasada temin edilebilecek ve işletilebilecek şartlar göz önünde bulundurularak dizayn edilmeye çalışılmıştır. Bazı kalemler düşünülenden daha kolay ve ucuza temin edilebilmesine karşın her zaman güvenli sınırlarda kalınmaya çalışılmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Aşı Çamuru Biyogaz Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi

1500 mL hacimdeki pet şişelerin biyogaz dolan hacmi (600 ml) dolum günü sayısına bölünerek ortalama günlük biyogaz üretim değerleri bulunmuştur. Dolum zamanının yaklaşık ortası olan 2, 6, 12, 24, 45. ve 99. günlerde ortalama günlük biyogaz üretiminin gerçekleştiği kabulüyle aşı çamurunun biyogaz üretimi aktivitesi bulunmuştur. Şekil 5.1'de 20. gün sonunda biyogaz üretiminin 4 kat düştüğü ve 31. günün sonunda 900 mL aşı çamurunun 0.0276 L/gün biyogaz ürettiği hesaplanmıştır. Ayrıca reaktörün tamamıyla (6.15 L) anaerobik floküler aşı çamuru ile doldurulduğu kabul edilirse Şekil 4.2'deki 900 mL aşı çamurunun maksimum biyogaz üretimine göre (0.2 L/gün) günde maksimum 1.37 L biyogaz üretimi gerçekleşebileceği tahmin edilmiştir. Reaktörlere 3 L aşı çamuru beslemesi yapıldığına göre 31 ve 61. günün sonunda her bir reaktörde aşı kaynaklı olarak sırasıyla 92 ve 52 mL/gün biyogaz üretilebileceği hesaplanmıştır. Bu değer gün geçtikçe önemli ölçüde düştüğünden aşı kaynaklı biyogaz üretimi ihmal edilmiştir.



Şekil 5.1 Aşı çamuru (900 mL) biyogaz üretim aktivitesinin takibi

5.2 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktörü

5.2.1 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

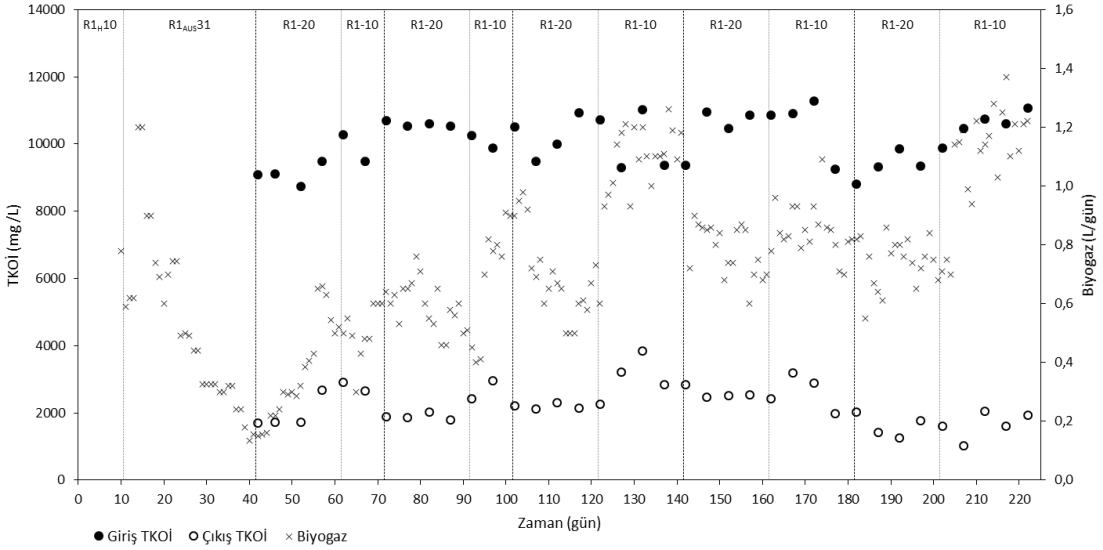
5.2.1.1 R1 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı (TKOİ), atıksuların organik kirlilik derecesini belirlemede kullanılan en önemli parametrelerden birisidir. Anaerobik sistemlerde KOİ giderimi ile metan üretimi arasında direkt bir ilişki vardır. Bu nedenle, metan üretimi sistemdeki KOİ dengesiyle yani temel olarak KOİ giderimi ile değerlendirilebilir. Standart şartlara göre teorik olarak metan üretimi 0.35 m^3/kg KOİ giderilen olarak ifade edilebilir. Substrat içerisindeki kullanılabilir (çürütülebilir) ve toplam giriş KOİ değerini birbirinden ayırmak oldukça önemlidir, çünkü TKOİ konsantarasyonunun tamamı anaerobik süreçte biyolojik olarak bozunmayabilir [39].

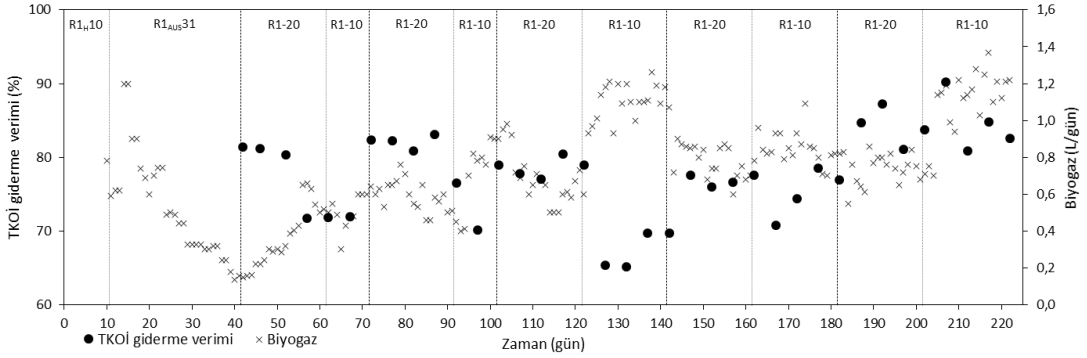
R1 reaktöründe tüm çalışma boyunca 20 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 8740-10945 ve 1254-2900 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.2), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 10061±693 ve 2075±440 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.437-0.547 (ortalama; 0.503) g TKOİ/(L.gün)

arasında değişmiştir. Şekil 5.3'te 20 günlük HBS için R1 TKOİ giderme verimi görülmektedir. Giderme verimi %72-87 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %79±4 olarak bulunmuştur.

R1 reaktöründe tüm çalışma boyunca 10 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 8810-11270 ve 1027-3838 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.2), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 10176±801 ve 2447±720 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.881-1.127 (ortalama; 1.018) g TKOİ/(L.gün) arasında değişmiştir. Şekil 5.3'te 10 günlük HBS için R1 TKOİ giderme verimi görülmektedir. Giderme verimi %65-90 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %76±7 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.2 R1 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi



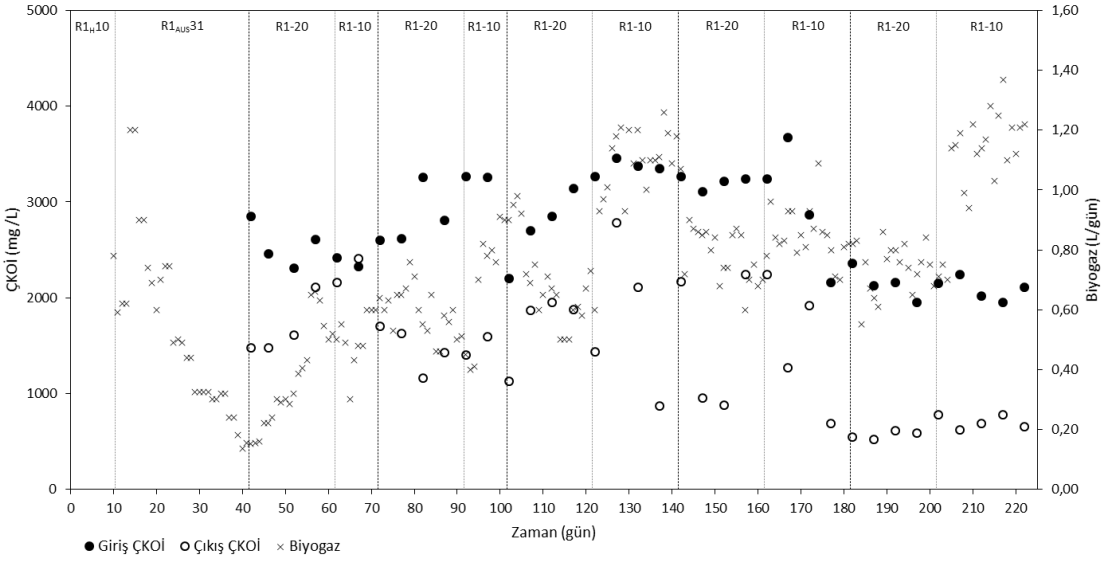
Şekil 5.3 R1 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışmanın tek kademeli parçalama dönemi olan 42-142. günleri arasında R1-20 periyotlarında giderme verimi yaklaşık %80'ler civarında iken R1-10 çalışma periyotlarında %70'ler civarındadır. Tek kademeli parçalama döneminde uzun süre besleme yapılmayan reaktörün günlük biyogaz üretiminin sürekli yükseldiği görülmektedir. Bu dönemde HBS 20 gün periyotlarında arıtma verimi daha iyi iken HBS 10 gün periyotlarında ise biyogaz üretiminin daha yüksek olduğu görülmektedir. HBS 10 gün periyotlarında OYO'nın yaklaşık iki katına çıkmasıyla beraber çözünmüş organik madde yüklemesi de artmıştır. HBS 10 gün periyotlarındaki günlük biyogaz üretiminin HBS 20 gün periyotlarındaki biyogaz üretiminden daha fazla olmasının sebebi daha fazla organik yükleme yapılmasındandır. OYO, HBS 10 gün periyotlarında yaklaşık 1 g TKOİ/(L.gün) civarında iken HBS 20 gün periyotlarında ise 0.5 g TKOİ/(L.gün) civarında olmuştur. Ancak kümülatif biyogaz üretimi incelendiğinde arıtma veriminden de anlaşılacağı üzere HBS 20 gün periyodundaki kümülatif biyogaz üretiminin HBS 10 gün periyodundan daha fazla olduğu görülmektedir.

Çalışmanın iki kademeli parçalama dönemi olan 122-222. günleri arasında parçalanmış atıkların daha hızlı bir şekilde hidroliz ve asitojen safhalarını geçmesiyle sistemin TKOİ giderme veriminin 122-182. günleri arasında yaklaşık %80'lerin altına düştüğü görülmektedir. R1 reaktöründeki performans kaybının fiziksel parçalama neticesinde uçucu asitlerin sistemde birikmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Uçucu asitlerin birikimi pH değerini düşürmekte bununla birlikte metanojenik mikroorganizmalar inhibe olmaktadır [190]. Ancak BBHG'nin iyi bir asit tamponlama kapasitesine sahip olmasından ötürü [113] 182-222. günleri arasında TKOİ giderme veriminin %80'lerin üzerine çıktığı görülmüştür. İki kademeli fiziksel parçalamanın ve R1 reaktöründe aktif anaerobik çamur hacminin artması ile HBS 20 gün ve HBS 10 gün periyotları arasındaki TKOİ giderim farkının kapandığı düşünülmektedir. Bu dönemde BBHG'nin ikincil bir parçalamadan geçirilmesiyle önceden elek üzerinde kalabilen tam sindirilmemiş yem parçalarının atık özelliğinin iyileştirmesiyle biyogaz üretimine artı katkılarının olduğu düşünülmektedir. R1 reaktöründeki asitlenmeden kaynaklı performans düşüşü o güne kadarki oluşmuş anaerobik çamur ve BBHG'nin tamponlama kapasitesi ile elimine edilmiş ve özellikle çalışmanın son 20 gününde (R1-10) TKOİ gideriminde ve biyogaz üretiminde önemli bir artışın olduğu gözlemlenmiştir.

Tüm deneysel süreç boyunca 20 günlük HBS için ÇKOİ değeri R1 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1948-3270 ve 516-2243 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.4), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2750±447 ve 1446±561 mg/L'dir. Giderme verimi %11-76 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %48±19 olarak bulunmuştur.

10 günlük HBS için tüm deneysel süreç boyunca ÇKOİ değeri R1 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1950-3459 ve 541-2784 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.4), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2636±564 ve 1376±761 mg/L olarak tespit edilmiştir. Giderme verimi %-4-77 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %48±26 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.4 R1 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Buna göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama ÇKOİ/TKOİ oranı sırasıyla 0.27 ve 0.26'dır. Reaktör çıkışında ise sırasıyla 0.7 ve 0.56'dır. Buradan BBHG'nin 1 mm gözenek çaplı elekten geçen kısmının %70-75 oranında partikül yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bu oranın çıkış suyunda daha fazla dalgalanma yaptığı görülmektedir. Çıkış suyundaki bu dalgalanmanın, reaktör içinin çalışmanın 42-67. günleri arasında yapılan 1 saat/gün karıştırılması neticesinde anaerobik çamur kaçışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle çalışmanın 67. gününden sonra reaktör içi karıştırılmamış ve rektör içinin çalışma boyunca biyogaz oluşumundan dolayı hareketliliğini koruduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek organik yüklerle işletilen anaerobik reaktörün üst kısmı çökelmelerden dolayı durulmuş olsa da anaerobik proseste ÇKOİ

değerinin mikrobiyal parçalanmaya uğrayan organik maddeler ile yükseldiği düşünülmektedir. R1 reaktörü çıkışında 20 günlük HBS'nin kullanıldığı işletme şartlarında ortalama ÇKOİ/TKOİ oranının 10 günlük HBS'nin kullanıldığı işletme şartlarına göre (0.14) daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun artan HBS ile ÇKOİ/TKOİ oranının artmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çalışmanın tek kademeli parçalama döneminin bahar aylarına rastlamasından dolayı büyükbaş hayvanların beslenme şekli zamanla değişmiştir. Saman ve yem ile beslenen hayvanlar otların bol olduğu dönemlerde yeşil taze biçilmiş ot ile beslenmişlerdir. Bu nedenle 102 ve 142. günleri arasındaki günlük biyogaz üretiminin artışına bu durumunda katkısının olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın iki kademeli parçalama döneminde (142-222) 142-182. günler arasında özellikle çıkış ÇKOİ değerlerinin daha değişken olduğu görülmektedir. Bu değişkenliğin ikinci parçalanma ile beraber reaktör stabilitesinin bozulmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Giriş ÇKOİ değerinin 142-162. günler arasında 3000 mg/L seviyesindeyken yemleme programından yeşil otun zamanla çıkmasıyla beraber 2000 mg ÇKOİ/L mertebesine gerilediği görülmektedir. İki kademeli parçalanma döneminin 182-222. günleri arasında giriş ve çıkış ÇKOİ değerlerinin daha kararlı olduğu görülmektedir. İkincil parçalama ile atık karakterizasyonunun daha homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

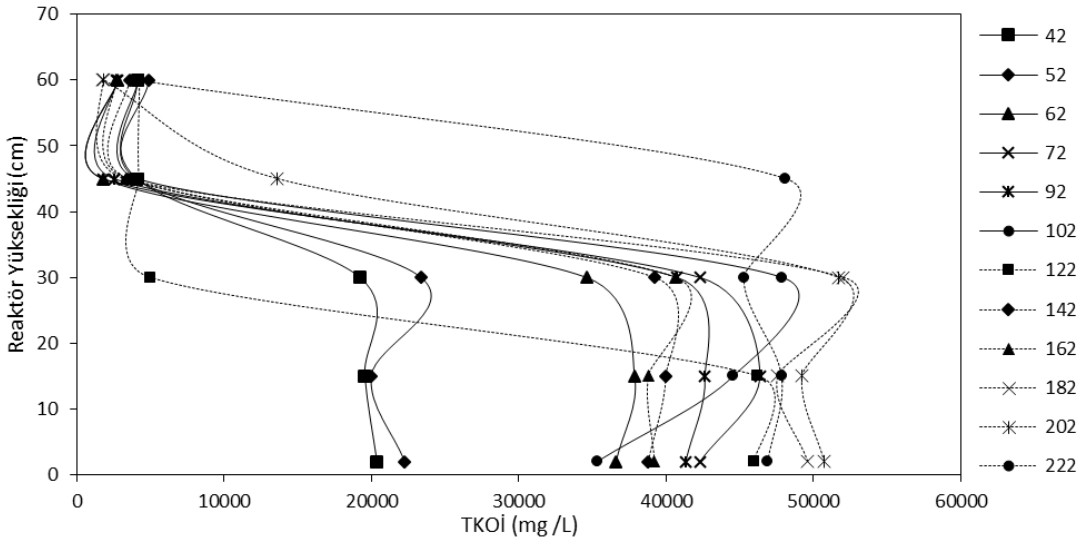
5.2.1.2 R1 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

Şekil 5.5 incelendiğinde hazırlık ve aşı uyum sürecinden sonra 42. günde beslenmeye başlanan R1 reaktöründe 1, 2 ve 3. musluklarda TKOİ değerinin yaklaşık 20000 mg/L civarında, 4 ve 5. musluklarda ise 4000 mg/L civarında olduğu görülmektedir. 1, 2 ve 3. numune muslukları seviyesinde 62. günün sonunda TKOİ değerinin önemli bir artışla 35000 mg/L seviyesini aştığı görülmektedir. 72. günden sonra reaktörün kararlı olduğu durumlarda aktif anaerobik çamurun TKOİ değerinin 40000-50000 mg/L arasında olduğu görülmektedir. Sadece İkinci kademe parçalama işleminden sonra 142 ve 162. günde yapılan analizlerde TKOİ değerinin 40000 mg/L değerinin altına düştüğü belirlenmiştir. Bu durumun metanojen bakterilerinin asitojen bakterilerinin hızına yetişememesinden ötürü oluşan asitleşmenin çamur yoğunluğunu düşürmesinden kaynaklandığı

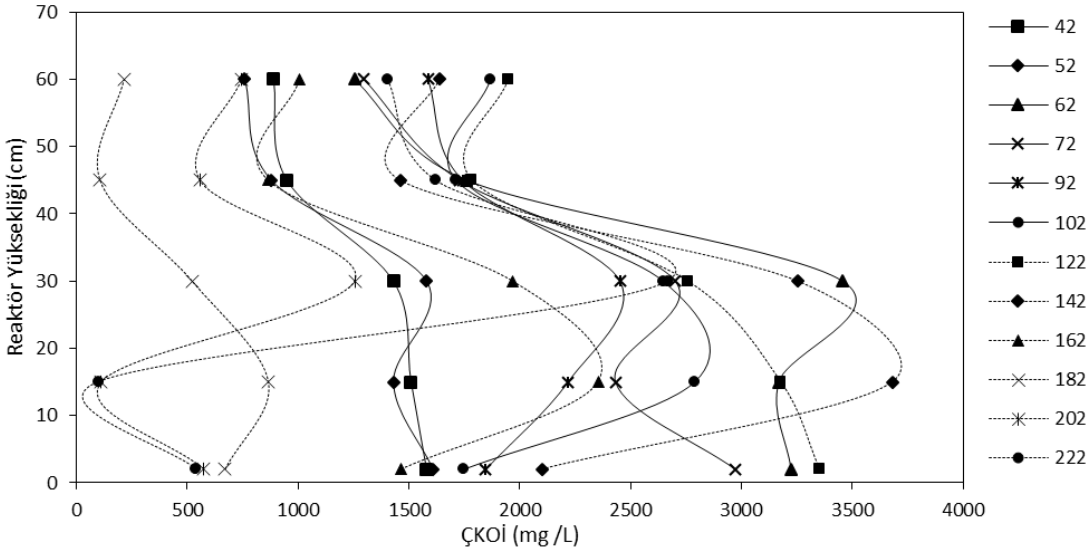
düşünülmektedir. 182. günden sonra ise reaktör içerisindeki çamur seviyesinin yükseldiği görülmektedir. 202. günde 4. muslukta TKOİ'nin 13000 mg/L seviyelerindeyken 222. günde ise 4. muslukta bu değerin 45000 mg/L değerini geçtiği görülmektedir.

Yapılan analizlerde reaktör üst kısmındaki duru fazın TKOİ değerinin 4000 mg/L'yi ve reaktör tabanındaki aktif anaerobik çamurun ise 50000 mg/L'yi aşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çamur seviyesinin 3. musluktan 4. musluğa yükselirken, 4. muslukta TKOİ değerinin 4000 mg/L değerlerinden 50000 mg/L değerlerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu veri çamur tabakası ile duru fazın keskin bir çizgi ile ayrılmadığını, çamur üst tabakasının belirli bir aralık içerisinde TKOİ değerinin düşerek duru fazın TKOİ değerine yaklaştığı görülmektedir.

Şekil 5.6 incelendiğinde musluklar arasında ÇKOİ değeri bakımından önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Özellikle TKOİ değeri 50000 mg/L mertebelerinde olan anaerobik çamurun ÇKOİ değerinin 4000 mg/L'yi aşmamasının çamurdaki biyokütleden kaynaklandığı düşünülmektedir. Hem mikroorganizma grupları floküler yapıdan dolayı 0.45 mikron filtreye takılmakta hem de mikroorganizmalar çözünmüş organik maddeleri iyi bir şekilde arıtmaktadırlar. Reaktör içerisindeki anaerobik çamur TKOİ ve ÇKOİ değerleri, OYO ve sistem stabilitesine göre değişmektedir. Zhang vd. [191] anaerobik çamur TKOİ değerinin 19853 mg/L ve ÇKOİ değerinin ise 2494 mg/L olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle 182. günden sonra reaktör içerisindeki biyokütle artışından dolayı ÇKOİ değerinin yaklaşık olarak 1500 mg/L'nin altına düştüğü görülmektedir. Ayrıca reaktörün üst kısmındaki ÇKOİ değerinin de çamur içerisindeki değerden yüksek olmaması hatta daha düşük seviyelerde olması ve burada ÇKOİ değerinin TKOİ değerinin yaklaşık yarısı olması durumu reaktör beslemesi esnasında by-pass olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.5 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R1 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi



Şekil 5.6 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R1 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi

5.2.2 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri

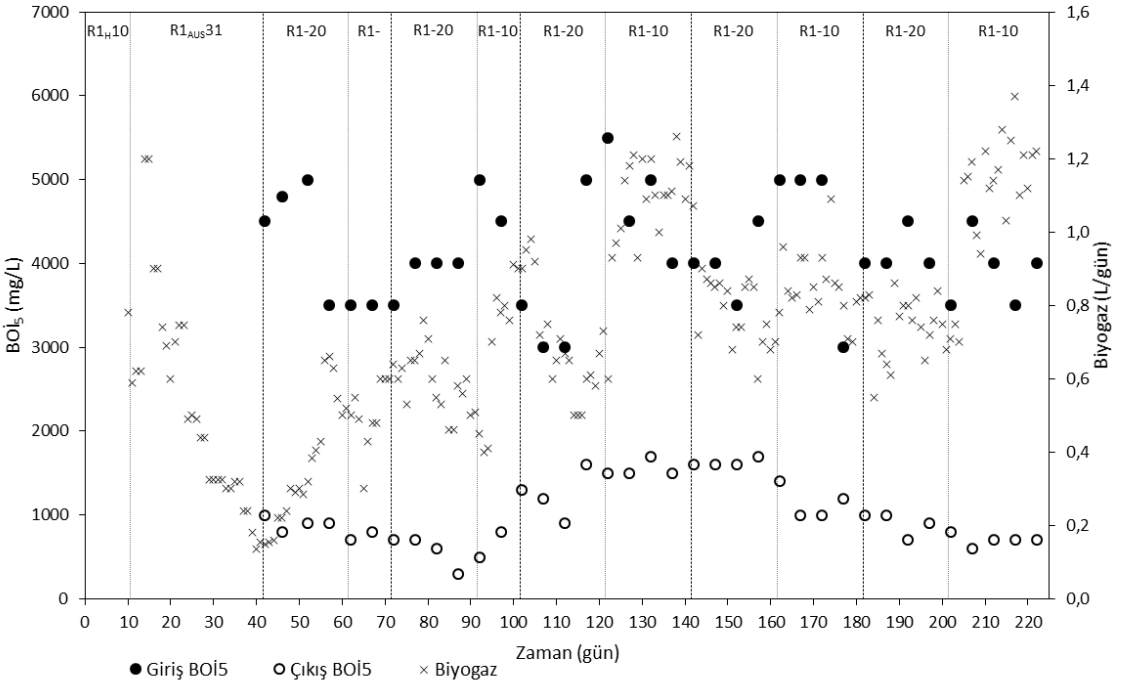
5.2.2.1 R1 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri

Reaktöre besleme yapılan giriş sıvısının biyolojik olarak parçalanabilirliğinin belirlenmesi açısından $BOİ_5$ değerinin takip edilmesi oldukça önem taşımaktadır. $BOİ_5$/TKOİ oranı biyolojik olarak parçalanabilirliğin bir göstergesi olup bu oranın 0.5'e yakın veya daha

büyük olması kullanılacak olan atığın biyolojik olarak parçalanabilirliğinin iyi bir seviyede olduğunu göstermektedir [192].

Deneysel çalışma süresince 20 günlük HBS için R1 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 3000-5500 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 300-1700 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4181±705 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 1014±407 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %54.3-92.5 arasında değişmekte olup ortalama $BOİ_5$ giderme verimi %75.3±10.2 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.42'dir ve reaktör çıkışında ise bu değer 0.49 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışma süresince 10 günlük HBS için R1 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 3000-5000 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 600-1700 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4033±581 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 1053±381 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %60-86.7 arasında değişmekte olup ortalama $BOİ_5$ giderme veriminin %74±9.3 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.4'tür ve bu değer reaktör çıkışında ise 0.43 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.7'de R1 reaktörünün giriş ve çıkışında $BOİ_5$ parametresinin zamanla değişimi ile günlük biyogaz üretiminin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.7 R1 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

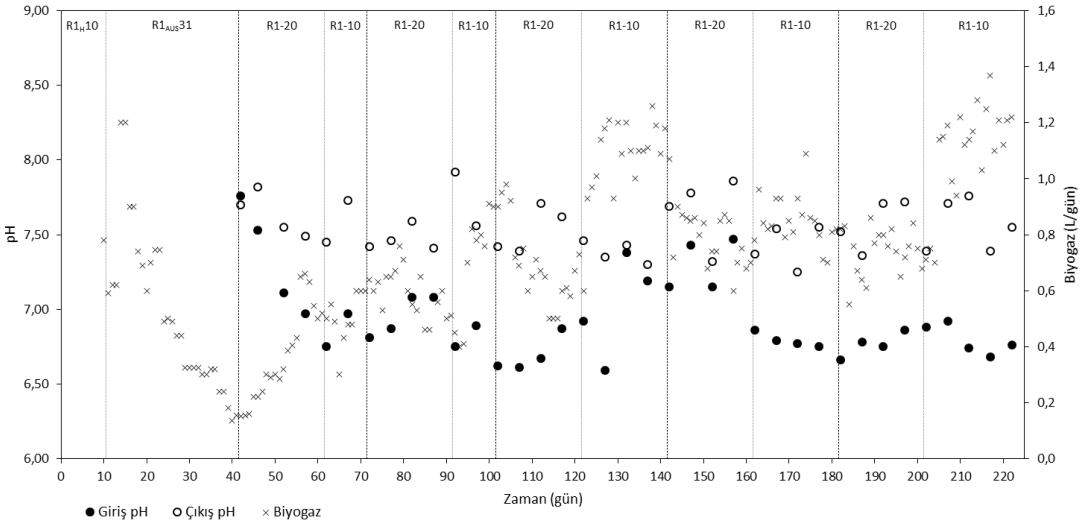
5.2.3 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri

5.2.3.1 R1 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri

Anaerobik ortamda bulunan H^+ iyonu miktarı, mikroorganizmaların gelişimi ve aktivitesi açısından önem taşır. Metan oluşumu 6.5-8.5 pH aralığında, optimum olarak da 6.5-8.2 [16] aralığında veya 6.7-7.5 [193] aralığında gerçekleşir. Aksi halde metan üretimi durur ve sistemin eski haline döndürülmesi için bir alışma periyodu gerektirir. pH değeri 6'dan aşağı düştüğünde ve 8.5'in üzerine çıktığında ise proses inhibe olmaktadır. Azot içerikli maddelerin parçalanması sonrasında ortamda amonyum birikmesi ile pH artar. Buna karşın karbonhidratların parçalanması ve birikimi ile uçucu yağ asitleri oranı artar ve susbstratların tamponlama kapasitesine (alkalinite) bağlı olarak ortamın asiditesi artabilir. BBHG'nin yüksek alkalinitesi nedeniyle pH daha kolay stabilize olabilir [194]. Alkalinite değerinin 4000 mg $CaCO_3$/L seviyesini geçtiği durumlarda, metanojen aktivitesinin devamlılığı kontrol edilmelidir [138], [195]. Ayrıca pH düşüşünden önce alkalinitedeki düşüş, sistemi kontrol altına almak için önemli bir uyarıcı olmaktadır. Emniyetli bir işletme için atık yükleme stratejisi ayarlanmalıdır. Alkalinitede bir düşüş yaşandığında sebebi araştırılmalı ve gerekli kontrol tedbirleri uygulanmalıdır [16].

Çalışma boyunca R1 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.61-7.76 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerlerinin 7.32-7.92 arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 7.01±0.31 çıkış ortalama pH değeri ise 7.58±0.18 olarak tespit edilmiştir.

Çalışma boyunca R1 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.59-7.38 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerlerinin 7.25-7.76 arasında olduğu görülmüştür. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 6.86±0.23 çıkış ortalama pH değeri ise 7.51±0.16 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.8'de R1 reaktörünün giriş ve çıkışta pH parametresinin zamanla değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.

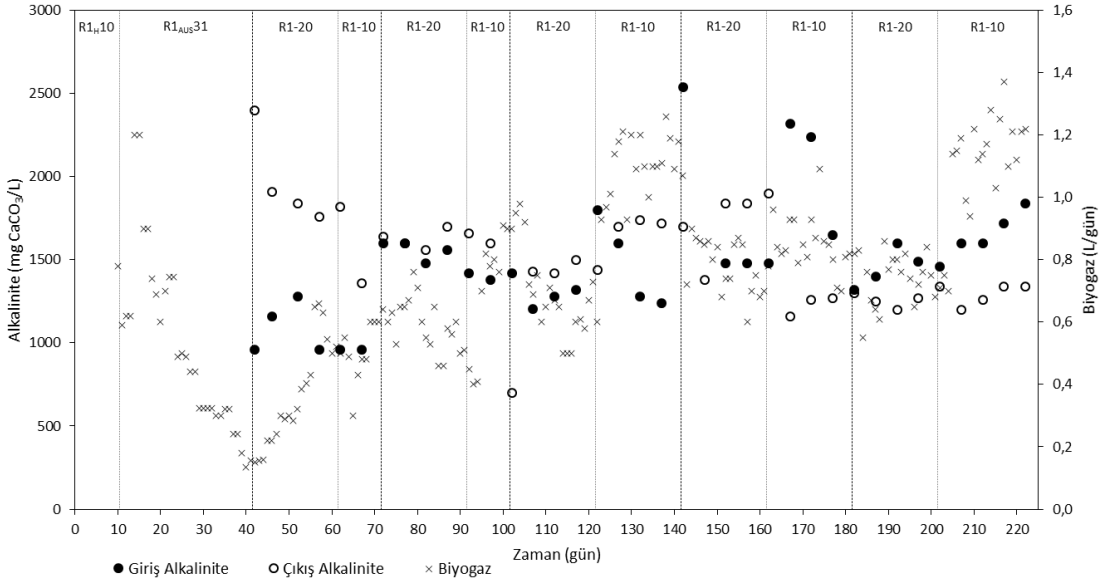


Şekil 5.8 R1 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

Çalışma boyunca R1 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değeri 960-3300 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 1200-2400 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1461±477 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1622±290 mg $CaCO_3$/L olarak tespit edilmiştir.

Çalışma boyunca R1 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değeri 960-2540 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 700-1740 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1599±394 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1409±280 mg $CaCO_3$/L olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.9'da R1 reaktörünün

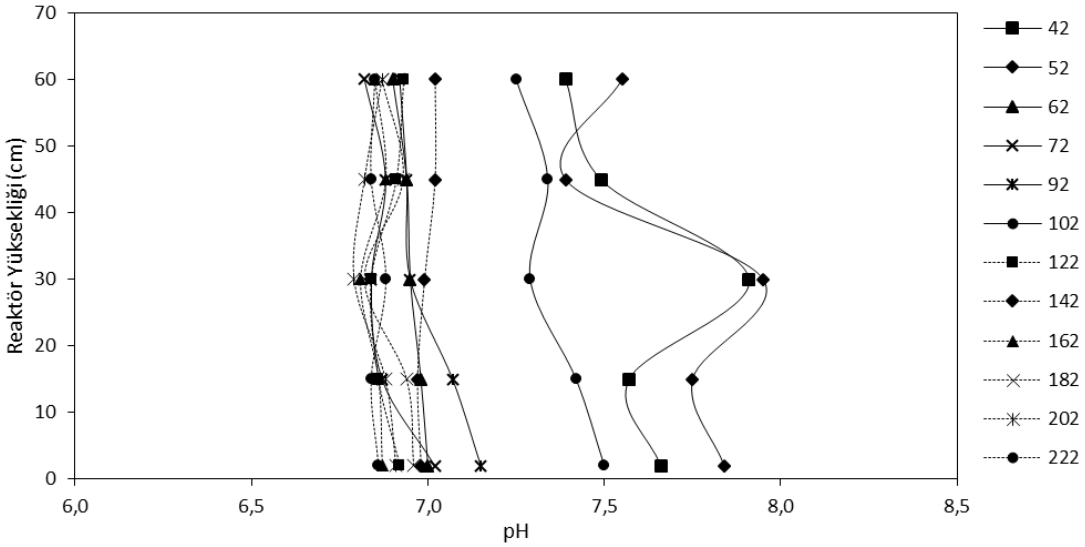
giriş ve çıkış alkalinite değerinin zamanla değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.9 R1 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

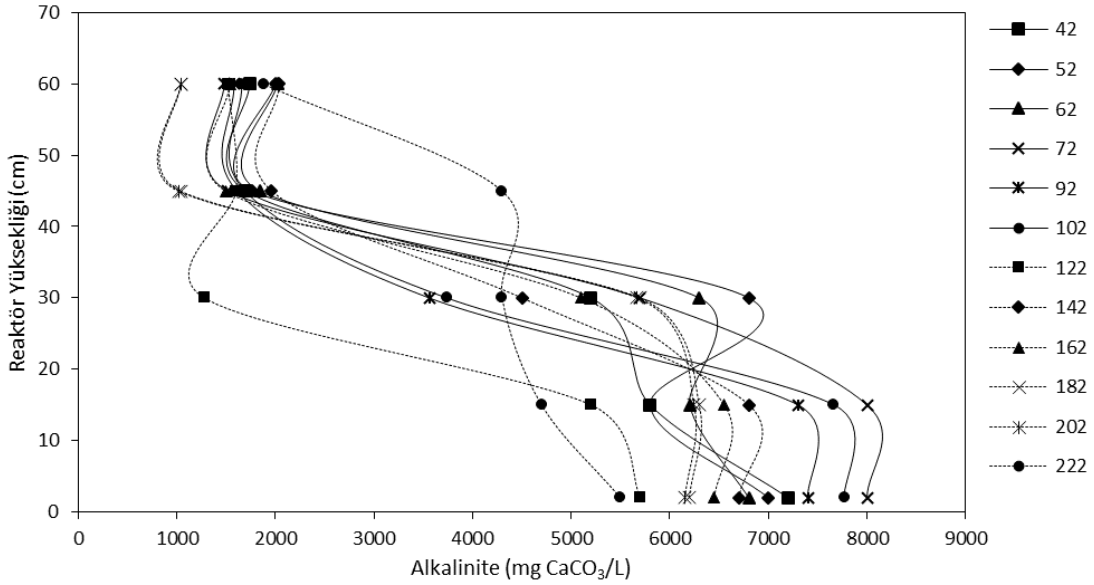
5.2.3.2 R1 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri

Çalışma süresince R1 reaktöründe pH 6.8-8.0 arasında bir değişim göstermiştir. 42, 52 ve 102. günlerde pH 7.2-8.0 aralığında bir değişim gösterirken çalışmanın diğer zamanlarında 6.8-7.2 değerleri arasında ölçülmüştür. Çalışmada R1 reaktörünün beslenmeye başlandığı ilk zamanlar olan 42 ve 52. günlerde anaerobik sistemin kararlı hale gelmemesinden dolayı, 102. günde ise biyogaz üretimindeki artıştan kaynaklı olarak pH parametresinin daha yüksek ölçüldüğü düşünülmektedir. Şekil 5.10'da R1 reaktörü içerisindeki pH parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.10 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi

Çalışma boyunca R1 reaktörü içerisinde alkalinite parametresi çamur yoğunluğuna göre değişim göstermiştir. 1 ve 2. musluklarda alkalinite 5800-8000 mg $CaCO_3$/L arasında, 3. muslukta 3700-6800 mg $CaCO_3$/L arasında ve 4 ile 5. musluklarda ise 1000-2100 mg $CaCO_3$/L aralığında değiştiği görülmüştür. Reaktör içerisinde çamur seviyesi yükseldikçe anaerobik çamurun yükseldiği musluk seviyesindeki alkalinite değeri de artmıştır. Ancak reaktörün kararsız olduğu durumlarda ya da organik yükün kaldırılamadığı durumlarda alkalinite parametresinin düştüğü düşünülmektedir. 122 ve 222. günlerde 1 ve 2. musluklarda alkalinite 4700-5700 mg $CaCO_3$/L aralığında ölçülmüştür. 122. günde 3. muslukta alkalinite değeri 4 ve 5. muslukların alkalinite değerleri seviyelerine düşmüştür. 222. günde çamur seviyesinin yükselmesiyle beraber 4. muslukta alkalinite 4300 mg $CaCO_3$/L civarlarında ölçülmüştür. Şekil 5.11'de R1 reaktörü içerisindeki alkalinite değerinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.11 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi

5.2.4 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

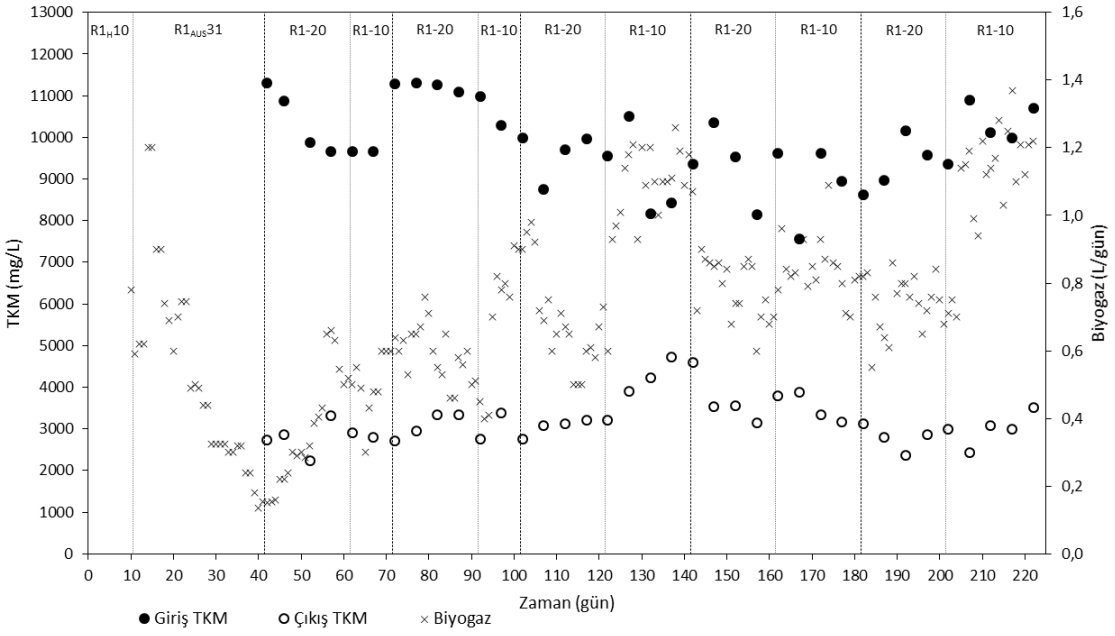
5.2.4.1 R1 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

Organik yükü yüksek atıklar kaynağına, toplama sıklığına ve mevsime göre yapısal olarak farklılık gösterebilirler. Benzer atıkların TKM konsantrasyonları çok farklı olabilmektedir. Hatta atıklar aynı kaynaktan ve aynı zamanda dahi alınsa yapısal olarak farklılıkların olduğu görülmektedir. Bu nedenle anaerobik sistemlere beslenen atıkların içerdiği katı madde oranı (TKM) ve bu TKM konsantrasyonunun ne kadar UKM içerdiği oldukça önemlidir. Özellikle atığın UKM konsantrasyonu ile atıktan üretilen metan ya da biyogazın birebir ilgili olduğu görülmektedir. Ayrıca anaerobik çürümede fiziksel ön işlemin proses üzerindeki etkilerinin takibi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle beslenen atığın AKM ve UAKM konsantrasyonlarının takibi oldukça önemlidir.

R1 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma dönemlerinde besleme sıvısı TKM değerleri 8146-11300 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 9985±885 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri ise 2230-3790 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 3052±378 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında TKM giderme

verimi %60.6-77.4 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %69.2±4.9 olarak tespit edilmiştir.

R1 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma dönemlerinde besleme sıvısı TKM değerleri 8158-11284 mg/L aralığında değişmiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 9770±929 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerlerinin ise 2426-4732 mg/L arasında olduğu belirlenmiştir. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 3383±962 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında TKM giderme verimi %43.8-77.8 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %63.7±10.3 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.12'de R1 reaktöründe 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış TKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



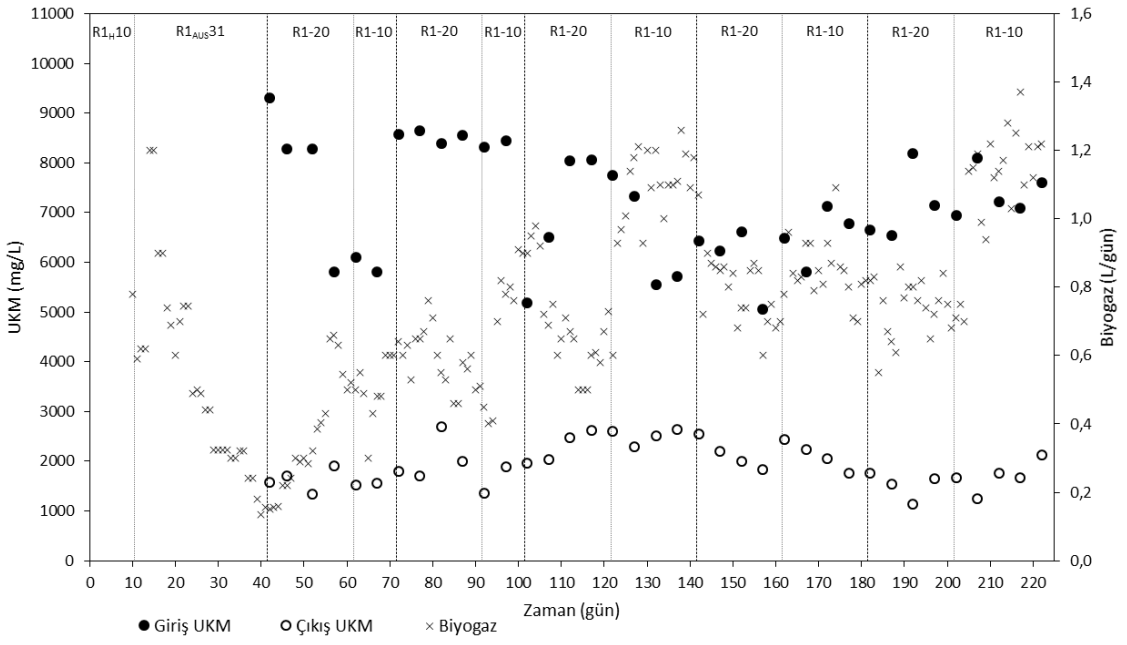
Şekil 5.12 R1 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

R1 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UKM değerleri 5056-9298 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 7393±1136 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri 1145-2693 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1905±454 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UKM giderme verimi %62.4-

86 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UKM giderme verimi %73.6±7.4 olarak tespit edilmiştir.

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında R1 reaktöründe besleme sıvısı UKM değerleri 5184-8570 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 6906±1038 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri ise 1244-2630 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1972±394 mg/L olarak tespit edilmiştir. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UKM giderme verimi %54-84.6 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UKM giderme verimi %69.9±8.9 olarak tespit edilmiştir. R1 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma süreci boyunca (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi Şekil 5.13'te verilmiştir.

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UKM/TKM oranı sırasıyla 0.74 ve 0.71'dir. Reaktör çıkışında ise bu oran sırasıyla 0.62 ve 0.58 olarak hesaplanmıştır.

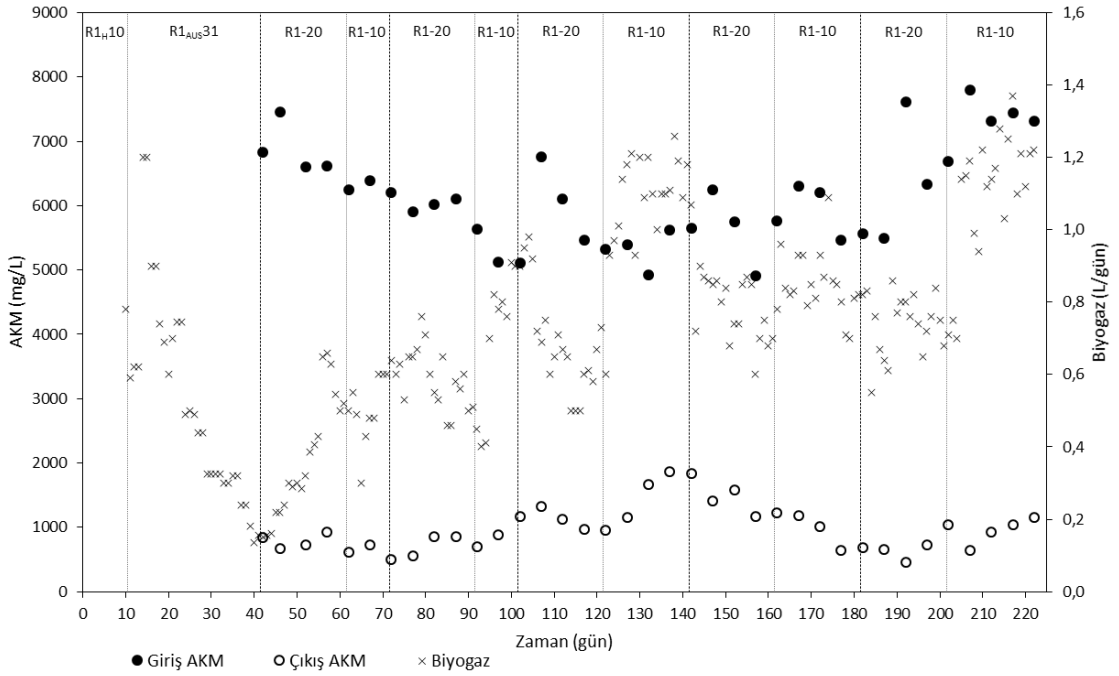


Şekil 5.13 R1 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

R1 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu deneysel periyotlarda besleme sıvısı AKM değerleri 4917-7620 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu

değerlere göre besleme sıvısının ortalama AKM değeri 6185±679 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu AKM değerleri 457-1580 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 923±298 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında AKM giderme verimi %72.5-94 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama AKM giderme verimi %84.8±5.5 olarak tespit edilmiştir.

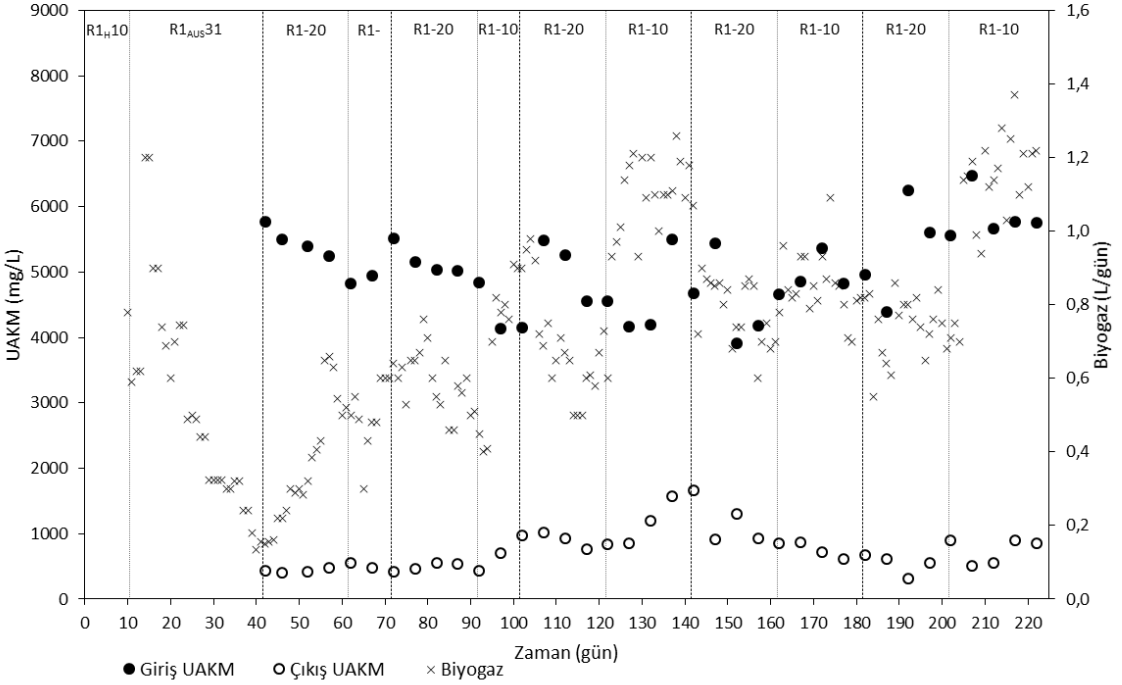
Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma dönemlerinde R1 reaktöründe besleme sıvısı AKM değerlerinin 4924-7800 mg/L aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama AKM değeri 6101±954 mg/L olarak belirlenmiştir. Reaktör çıkış suyu AKM değerlerinin 500-1860 mg/L arasında olduğu görülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 1059±431 mg/L olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında AKM giderme veriminin %66.3-91.9 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Buna göre ortalama AKM giderme verimi %81.9±8.5 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.14'te R1 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma süreci boyunca (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış AKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



Şekil 5.14 R1 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

R1 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UAKM değerleri 3910-6245 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 5079±569 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UAKM değerleri 313-1310 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 678±262 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %66.5-95 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %86.2±6.6 olarak tespit edilmiştir.

R1 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu deneysel çalışma periyotlarında besleme sıvısı UAKM değerleri 4140-6480 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 5074±722 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UAKM değerlerinin 420-1660 mg/L arasında olduğu görülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 847±374 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %64.5-92.4 aralığında ölçülmüştür. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %82.7±8.1 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.15'te R1 reaktöründe (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UAKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

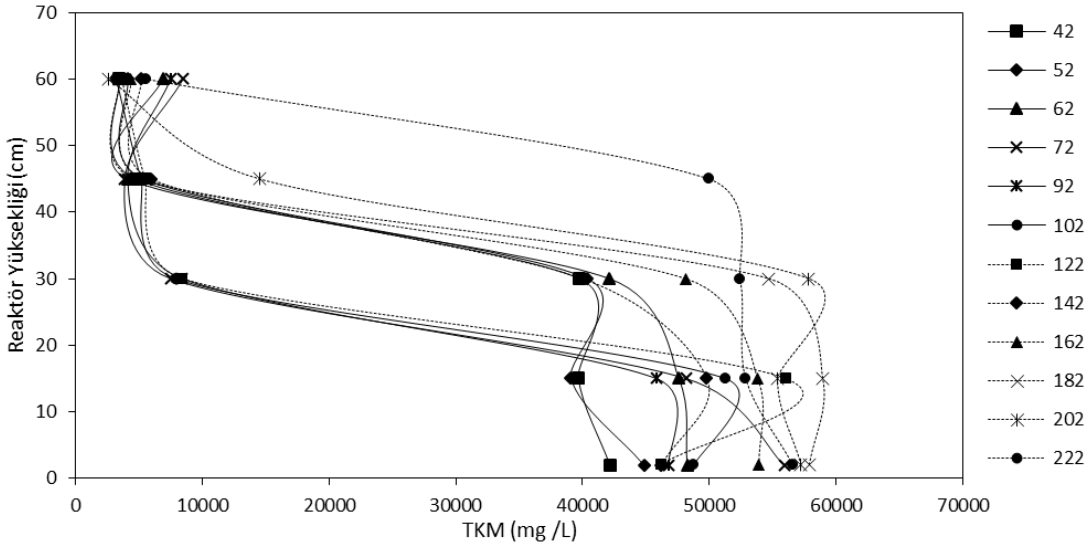


Şekil 5.15 R1 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UAKM/AKM oranı sırasıyla 0.82 ve 0.83 olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkışında ise bu oran sırasıyla 0.73 ve 0.80 olarak bulunmuştur.

5.2.4.2 R1 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

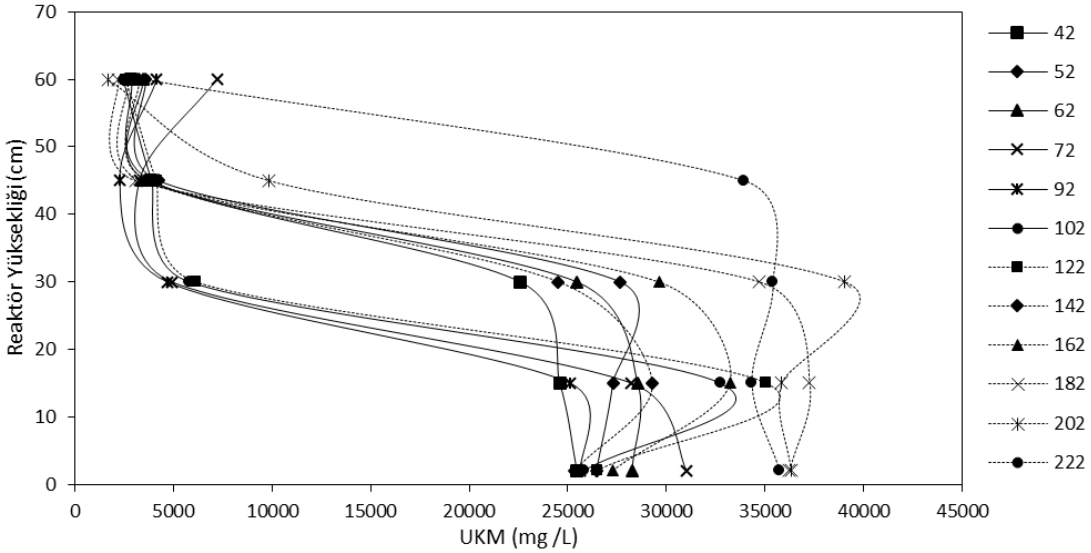
R1 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1 ve 2. musluklarda TKM değerleri 39000-59000 mg/L arasında değişim göstermiştir. 3. muslukta 72 ve 122. günler arasında TKM 5500-8500 mg/L aralığında iken diğer ölçüm zamanlarında 1 ve 2. muslukların TKM değerleri ile aynı aralıkta ölçülmüştür. 4. muslukta TKM konsantrasyonu 202. güne kadar 3500-6000 mg/L aralığında, 202. günde 14500 mg/L ve 222. günde ise 50000 mg/L civarında ölçülmüştür. 5. muslukta ise TKM konsantrasyonunun 2500-7500 mg/L aralığında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 5.16'da R1 reaktörü içerisindeki TKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.16 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi

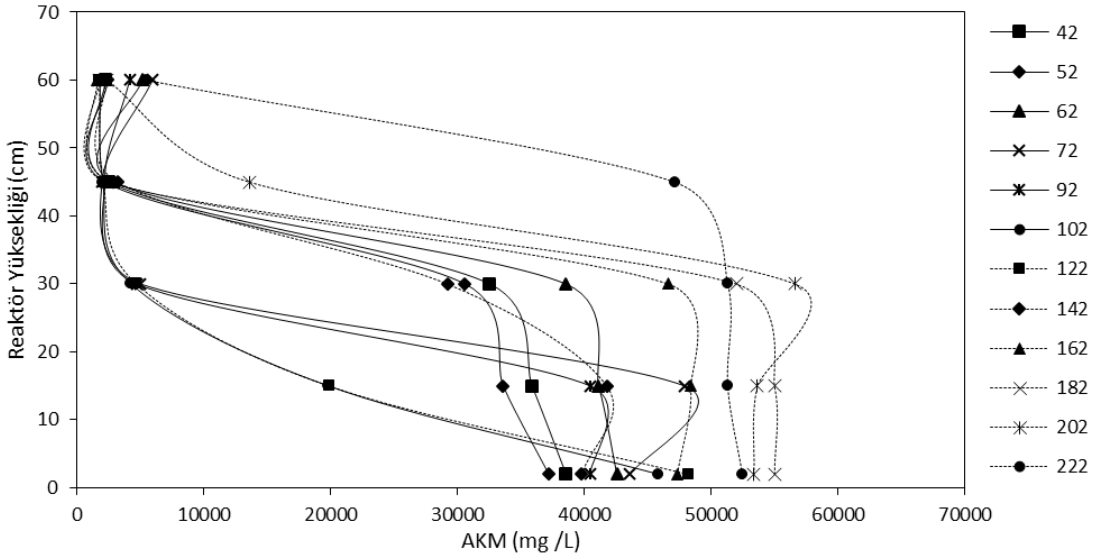
R1 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1 ve 2. musluklarda UKM değerleri 25300-37300 mg/L arasında değişim göstermiştir. 3. muslukta 72 ve 122. günler arasında UKM 4600-6200 mg/L aralığında iken diğer ölçüm zamanlarında 22500-39100 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta UKM konsantrasyonu 202. güne kadar 2200-4200 mg/L aralığında, 202. günde 9800 mg/L ve 222. günde ise 33900 mg/L civarında ölçülmüştür. 5. muslukta UKM konsantrasyonu 72. günde 7200 mg/L ve diğer ölçüm zamanlarında

1600-3600 mg/L aralığında ölçülmüştür. Şekil 5.17'de R1 reaktörü içerisindeki UKM konsantrasyonlarının değişimi gösterilmiştir.



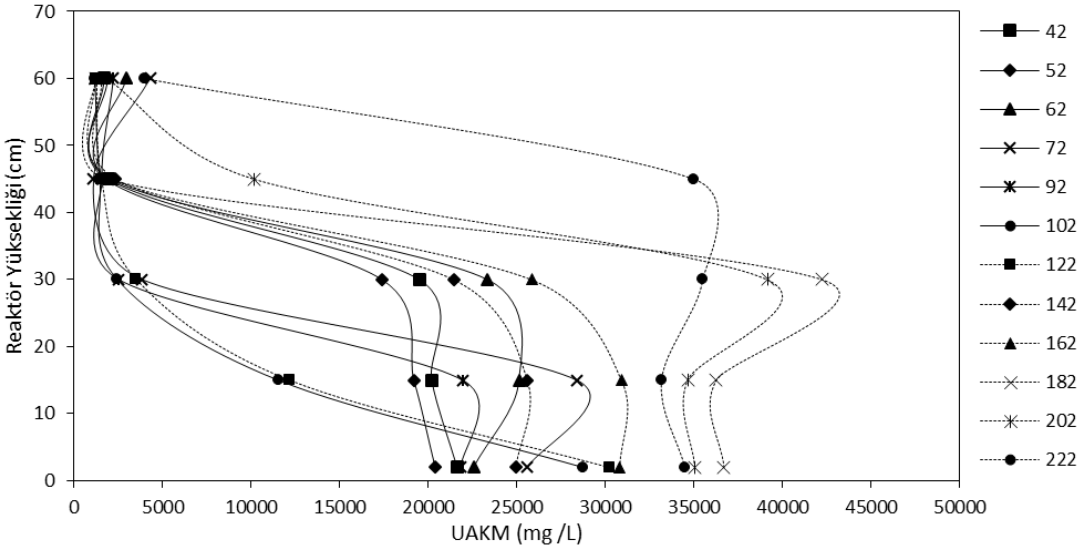
Şekil 5.17 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi

R1 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1. muslukta AKM değerleri 37200-55000 mg/L arasında değişim göstermiştir. 2. muslukta 102 ve 122. günlerde AKM 19900 mg/L civarında iken diğer ölçüm zamanlarında 33600-53700 mg/L aralığında ölçülmüştür. 3. muslukta 72 ve 122. günler arasında AKM konsantrasyonu 4200-4700 mg/L aralığında, diğer zamanlarda ise 29200-56700 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta 202. günde 13600 mg/L ve 222. günde ise 47200 mg/L civarında ölçülmüş ve diğer zamanlarda ise 2400 mg/L civarında ölçülmüştür. 5. muslukta AKM konsantrasyonu 2300-5500 mg/L aralığında ölçülmüştür. 1, 2 ve 3. musluklarda 182. günden sonra AKM değerinin önceki ölçümlerden ayrılarak 51300-56700 değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.18'de R1 içerisindeki AKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.18 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi

R1 reaktörü içerisinde tüm deneysel çalışma süreci boyunca (42-222) 1. muslukta UAKM değerleri 20400-36700 mg/L arasında değişim göstermiştir. 2. muslukta 102 ve 122. günlerde UAKM 12200 mg/L civarında iken diğer ölçüm zamanlarında 19200-36300 mg/L aralığında ölçülmüştür. 3. muslukta 72 ve 122. günler arasında UAKM konsantrasyonu 2400-3600 mg/L aralığında, diğer zamanlarda ise 17400-42300 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta 202. günde 10200 mg/L ve 222. günde ise 35000 mg/L civarında ölçülmüş ve diğer zamanlarda ise 1200-1900 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta UAKM konsantrasyonu 1200-4000 mg/L aralığında ölçülmüştür. 1, 2 ve 3. musluklarda 182. günden sonra UAKM değerinin önceki ölçümlerden ayrılarak 33100-42300 değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.19'da R1 içerisindeki UAKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.19 R1 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi

5.2.5 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri

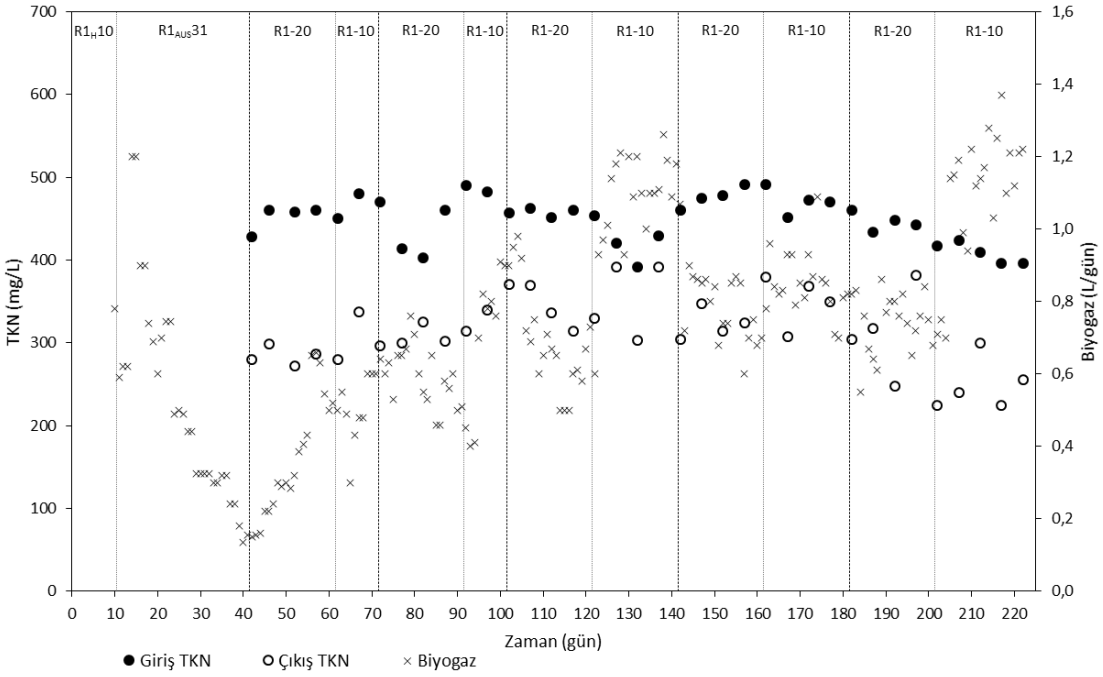
5.2.5.1 R1 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri

Organik azot, partiküler ve çözünmüş formda olabilir ve bunların bir kısmı biyolojik olarak ayrışamazlar [196]. Atıkların ayrışması sırasında ortaya çıkan azotun büyük bir kısmını amonyum azotu oluşturur ve genellikle proteinlerin, aminoasitlerin ayrışması sonucu ortaya çıkar [197]. Amonyak, anaerobik arıtmada toksik etki yapan bileşenlerden biridir. Bununla birlikte organik yükü yüksek atıklarda ve özelliklede bazı hayvansal atıklarda amonyum, amonyak toksisite seviyesine ulaşabilmektedir. Genellikle amonyum için 1500mg/L'den sonra yüksek pH'larda sınırlayıcı etkisinin olduğu ve 3000 mg/L'den sonra anaerobik sistemler için toksik özellikte olduğu bilinmektedir [18], [198], [199]. Biyolojik sistemlerde azot genellikle sınırlayıcı nütrient olarak karşımıza çıkmamaktadır ancak yine de önemli bir nütrient olduğu için kararlı durumun devamlılığı için takip edilmesi gerekmektedir.

Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R1 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TKN değerleri 403-491 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 224-382 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 454±25 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri

312±40 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %13.8-46.3 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %31.3±8.4 olarak tespit edilmiştir.

Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R1 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında beslenen atık karışımının TKN değerleri 392-482 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 224-392 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 441±33 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 319±52 mg/L olarak hesaplanmıştır. Buna göre TKN giderim verimi %6.7-43.4 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %28.1±10.6 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.20'de tüm deneysel çalışma boyunca R1 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TKN değerleri ve biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.

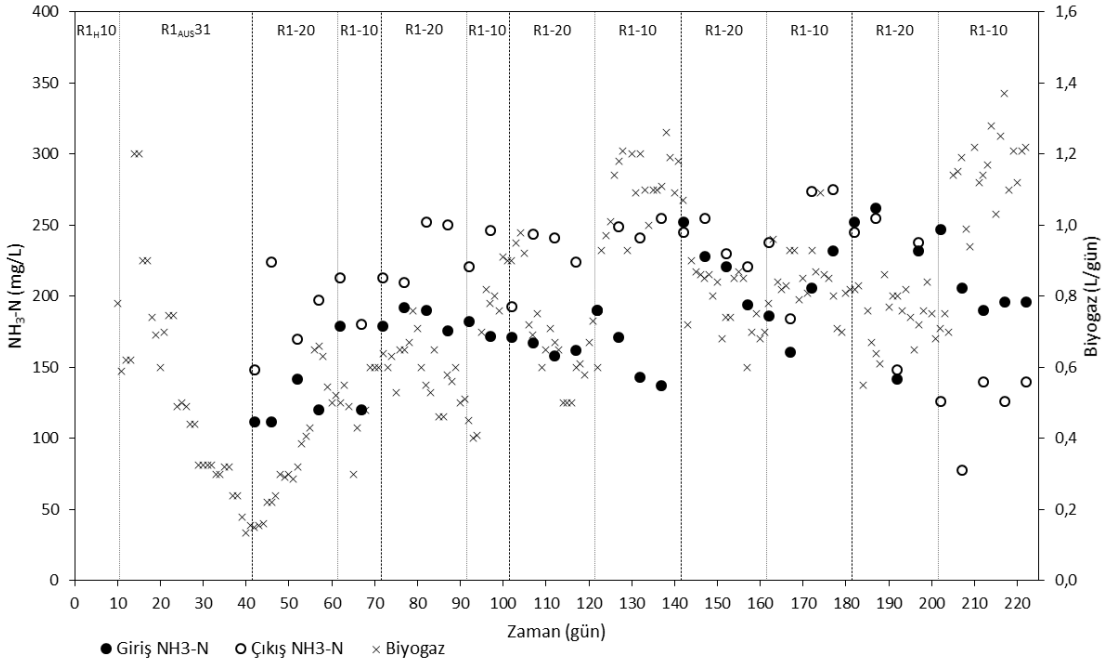


Şekil 5.20 R1 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

R1 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında tüm deneysel çalışma incelendiğinde giriş atığının NH_3-N değerleri 112-262 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 126-255 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 181±42 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değerinin 214±38 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Buna göre NH_3-N konsantrasyonu bazı dönemlerde %49

oranında azalırken bazı dönemlerde %100 oranına kadar arttığı görülmüştür. Bu verilere göre ortalama konsantrasyon artışı %23.4±29.8 olarak tespit edilmiştir.

R1 reaktöründe deneysel çalışma incelendiğinde HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının NH_3-N değerleri 120-252 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 78-275 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 188±39 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değerinin 207±61 mg/L olduğu görülmüştür. Buna göre NH_3-N konsantrasyonu %62.1 oranına kadar azalmış ve %86.1 oranına kadar da artmıştır. Buna göre ortalama konsantrasyon artışı %14.5±40 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.21'de tüm deneysel çalışma boyunca R1 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış NH_3-N değerleri ve biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.21 R1 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.2.6 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri

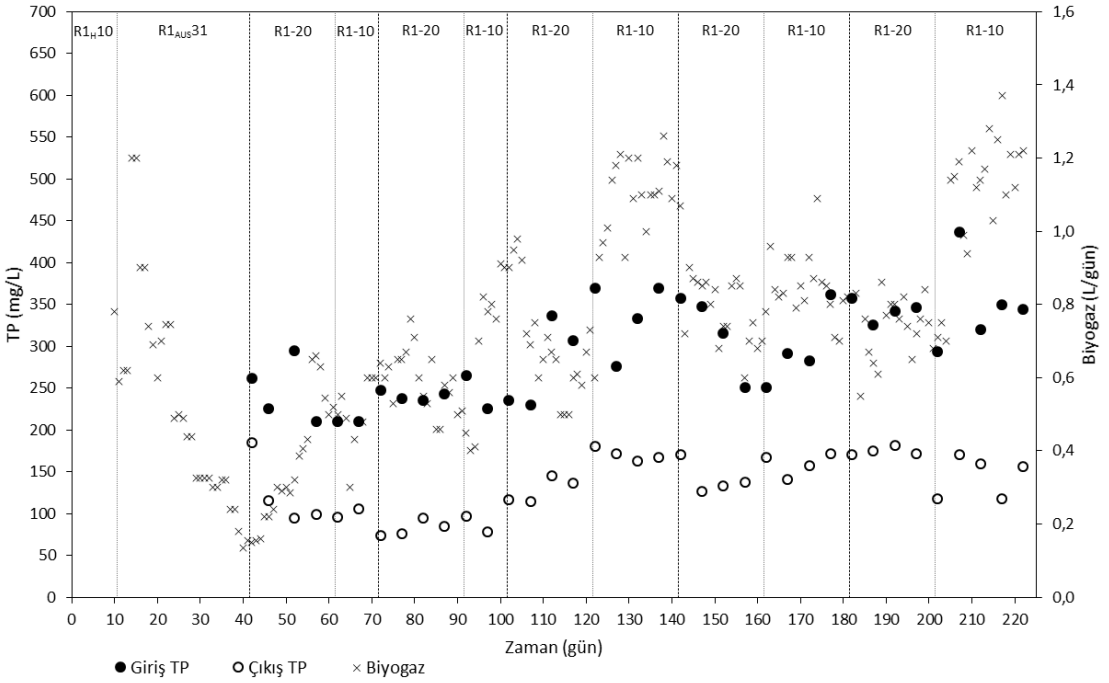
5.2.6.1 R1 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri

Mikrobiyolojik aktivitelerin olduğu sistemlerde fosfor genellikle karşımıza sınırlayıcı element olarak çıkmaktadır. Bu nedenle anaerobik sistemlerde arıtılan atığın KOİ/N/P

bakımından dengeli olması çok önemlidir. Anaerobik arıtma süreci için gerekli optimum KOİ/N/P oranları farklı organik maddelere göre farklılık göstermektedir. Toplam KOİ esas alındığında ise bu değerlerin daha düşük seviyelerde tutulması gerekir. Ayrıca çamur yaşının çok uzun tutulduğu durumlarda KOİ/N/P oranı da (nütrient ilavesi) uygun şekilde düşürülmelidir. Biyokütle oluşumunun hızlı olduğu işletmeye alma dönemlerinde KOİ/N/P oranı 300/5/1-500/5/1 aralığında tutulur. Kararlı işletme hallerinde ise 700/5/1 oranı uygulanabilir [16].

Deneysel çalışma boyunca R1 reaktöründe HBS'nin 20 gün olduğu deneysel çalışma periyotlarında besleme sıvısı karışımının TP değerleri 210-370 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 76-185 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 281±50 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 130±40 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TP giderim verimi %29.4-68.1 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %53.6±10.1 olarak tespit edilmiştir.

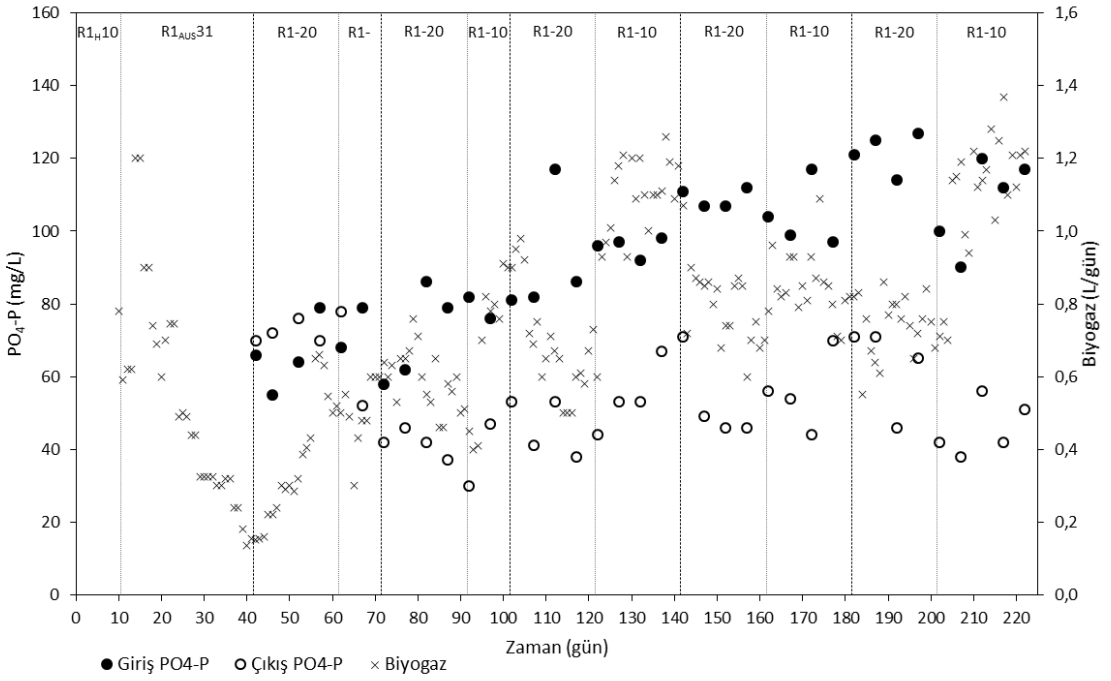
Deneysel süreç boyunca R1 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TP değerleri 210-437 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 74-172 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 314±65 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 143±35 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TP giderim verimi %37.7-70.2 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %54±8.3 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.22'de tüm deneysel çalışma boyunca R1 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TP değerleri ve biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.22 R1 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Tüm deneysel çalışma süresince R1 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme atığının PO_4-P değerleri 55-127 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 30-78 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 91±22 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 53±15 mg/L olarak hesaplanmıştır. Buna göre PO_4-P giderim verimi %-30.9-63.4 arasında değişmiş olup ortalama giderim veriminin %36.9±29.8 olduğu belirlenmiştir.

Deneysel süreç boyunca R1 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 58-121 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 38-71 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 98±19 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 54±11 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre PO_4-P giderim verimi %27.6-62.5 aralığında değişmiş olup ortalama giderim verimi %43.6±11.8 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.23'te tüm deneysel çalışma boyunca R1 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış PO_4-P değerleri ve biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.23 R1 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.2.7 Sadece BBHG'nin Kullanıldığı R1 Reaktöründe Klorür Değişimleri

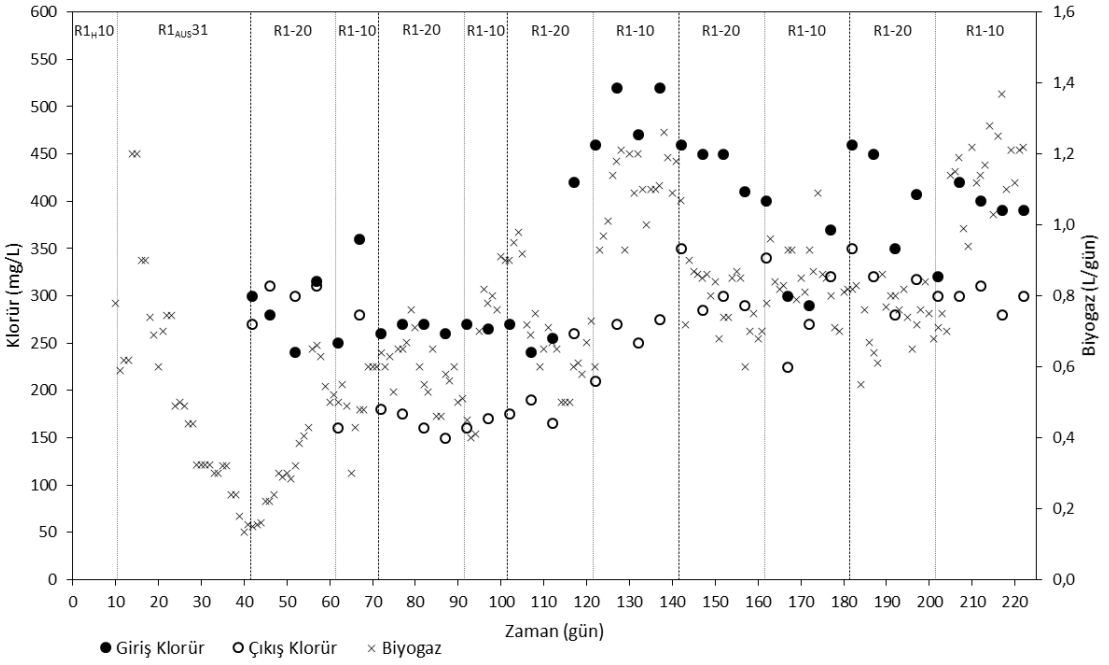
5.2.7.1 R1 Reaktörü Giriş Çıkışında Klorür Değişimleri

Yüksek tuz (NaCl) içeriğinin katyonlardan dolayı anaerobik çürüme üzerinde negatif etkiye sahip olduğu bilinmektedir. 10 g/L'yi aşan sodyum içeriğinin metan bakterilerini engellediği bildirilmiştir [200]. Özellikle hayvansal yemlerdeki tuzlar ve ağıllara bırakılan tuz yalama taşları ya direk ya da sindirimden sonra BBHG'ne dâhil olmaktadır. Bu nedenle atıklar içerisindeki (klorür tayini ile) tuz miktarının bilinmesi optimum metan üretimi için önem arz etmektedir.

Çalışma süresince yapılan klorür analizlerinde klorür değerlerinin düşük olduğu ve çok fazla değişmediği tespit edilmiştir. R1 reaktörü HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 240-460 mg/L ve reaktör çıkışında 150-340 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama klorür değeri besleme sıvısında 337±81 mg/L, reaktör çıkışında 250±67 mg/L olduğu belirlenmiştir.

R1 reaktörü HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 260-520 mg/L ve reaktör çıkışında 170-350 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre

ortalama klorür değeri besleme sıvısında 390±88 mg/L, reaktör çıkışında 272±58 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.24'te deneysel süreç boyunca R1 reaktöründe ölçülen giriş ve çıkış klorür değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.24 R1 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

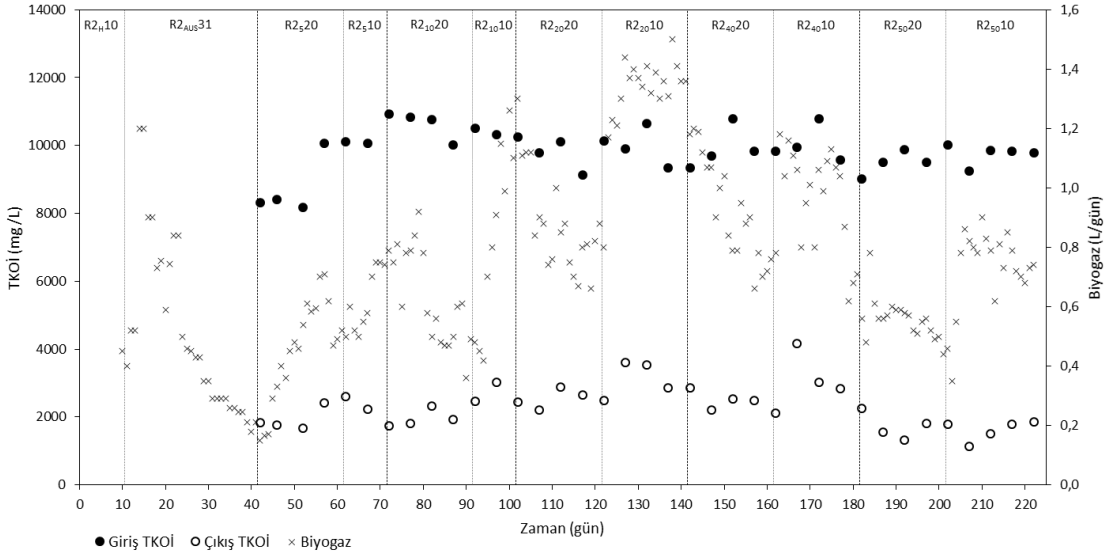
5.3 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktörü

5.3.1 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

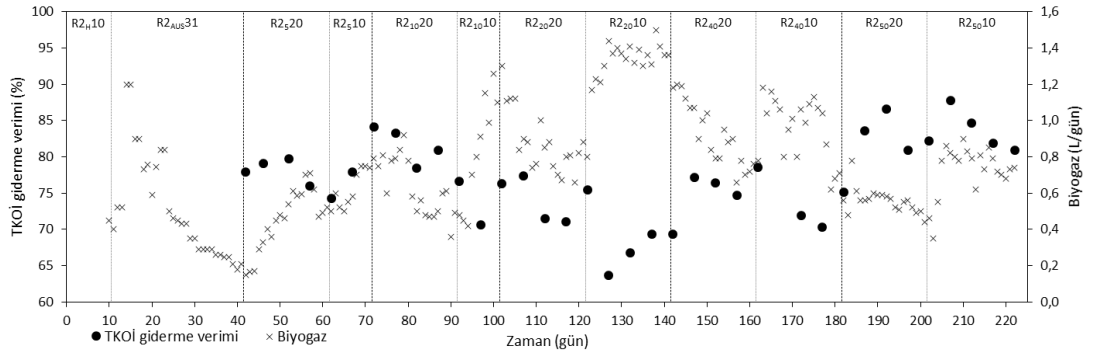
5.3.1.1 R2 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

R2 reaktöründe tüm çalışma boyunca 20 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 8180-10845 ve 1321-2892 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.25), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 9784±753 ve 2137±420 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.409-0.542 (ortalama; 0.489) g TKOİ/(L.gün) arasında değişmiştir. Şekil 5.26'da 20 günlük HBS için R2 reaktörü TKOİ giderme verimi görülmektedir. Giderme verimi %71-87 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %78±4 olarak bulunmuştur.

Tüm deneysel süreç boyunca R2 reaktöründe 10 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ konsantrasyonları sırasıyla 9027-10919 ve 1135-4162 mg/L aralığında belirlenmiş olup (Şekil 5.25), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 9927±556 ve 2554±834 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.903-1.092 (ortalama; 0.993) g TKOİ/(L.gün) arasında belirlenmiştir. Şekil 5.26'da 10 günlük HBS için R2 reaktörü TKOİ giderme veriminin değişimi görülmektedir. Giderme verimi %58-87 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme veriminin %74±8 olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 5.25 R2 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi



Şekil 5.26 R2 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışmanın tek kademeli parçalama dönemi olan 42-142. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne %5, 10 ve 20 artan oranlarda çim atıkları ilave edilmiştir. Giriş ve çıkış TKOİ konsantrasyon değişimleri ve giderme verimi incelendiğinde (Şekil 5.25, Şekil 5.26) $R2_5 20$ periyodunda 8000 mg TKOİ/L civarında besleme yapıldığında giderme verimi %75-80 aralığında iken 10000 mg

TKOİ/L'ye yakın değerlerde bir besleme yapıldığında giderme veriminin %75-70 aralığına gerilediği görülmektedir. Beslemedeki bu değişim günlük biyogaz üretimindeki düzenli artışı durdurduğu düşünülmektedir. $R2_5$10 periyodunda TKOİ giderme verimi %80'lerin altından üstüne çıkmıştır. Çalışmanın bu döneminde 0.5 L/gün civarlarında olan biyogaz üretimi dönemin sonlarına doğru 0.7 L/gün seviyelerine çıkmıştır.

$R2_{10}$20 periyodunun başlarında TKOİ giderme verimi %80'lerin üzerindeyken periyodun sonlarına doğru %5 civarında bir gerileme gözlemlenmiştir. Günlük biyogaz üretimi 0.7 L iken periyodun son günlerinde 0.5 L civarına gerilemiştir. $R2_{10}$10 periyodunda arıtma verimi %5 oranında önce düşmüş sonra tekrar aynı oranda yükselmiştir. Bu periyottaki günlük biyogaz üretimi 0.4 L'den 1.3 L civarına yükselmiştir. Bu yükselişin $R2_{10}$10 periyodunda OYO'nın iki katına çıkması ile besleme atığında eksik olan besi maddelerinin çim atığı takviyesi ile giderilmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.

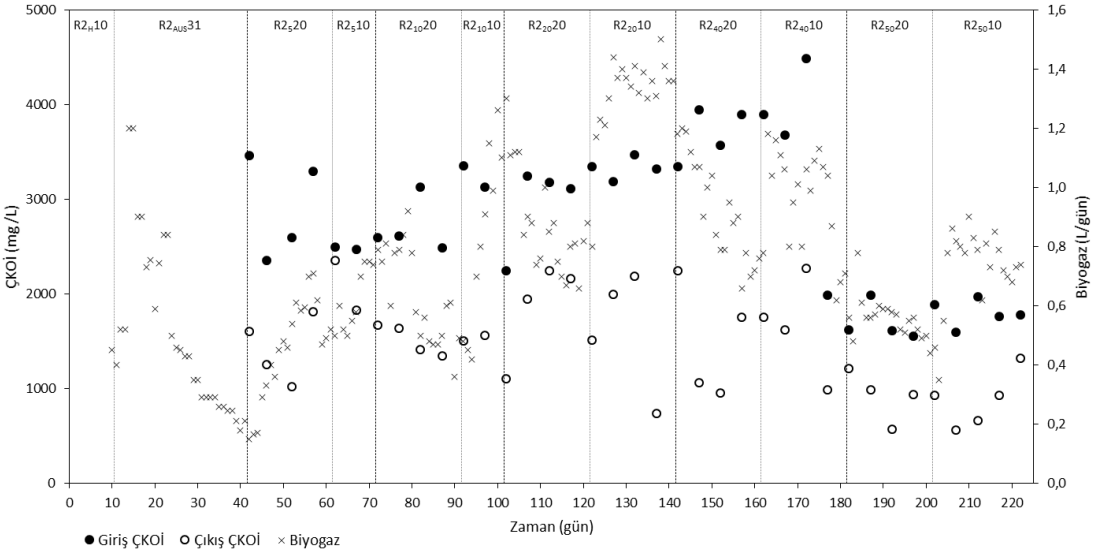
$R2_{20}$20 periyodunda TKOİ giderme verimi %70-75 aralığında, biyogaz üretimi ise 0.8 L/gün civarındadır. Sistemin bu döneminde daha kararlı bir biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. $R2_{20}$10 periyoduna geçildiğinde TKOİ giderme verimi %65'lerin altına düşmüş ve periyodun sonuna kadar ise %70'ler civarına yükselmiştir. Bu dönemde HBS değişimi ile birlikte günlük biyogaz üretiminde fark edilir bir artış görülmüştür. 0.8 L'den birden 1.1 L civarına bir sıçrama yapmış ve periyodun son 15 gününde 1.3-1.5 L/gün biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. Bu artışta çim atıklarının katkısı olduğu düşünülmektedir. Ancak büyükbaş hayvanların bahar beslenme dönemindeki yeşil ot takviyesiyle BBHG'nin organik yapısının iyileşmesinin de katkısı olduğu düşünülmektedir. Her iki durumda da yeşil bitki takviyesi olduğundan BBHG'ne yeşil bitkilerin en az %20 oranında bir ilavenin BBHG'nden biyogaz üretimine önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. Seppälä vd. [92] en yüksek metan üretiminin BBHG'ne UKM olarak %40 oranında mısır silajı ilavesinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Çalışmanın iki kademeli parçalama dönemi olan 142-222. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne sırasıyla %40 ve %50 oranlarında çim atıkları ilave edilmiştir. $R2_{40}$20 periyodu boyunca günlük biyogaz üretimi 1.1 L'den 0.8 L seviyelerine gerilemiştir. Bu dönemde TKOİ giderim verimi %75-80 aralığında gerçekleşmiştir. $R2_{40}$10 periyodunda biyogaz üretimi çoğunlukla 0.9-1.2 L/gün aralığında iken TKOİ giderim verimi %70-75 aralığında olmuştur. $R2_{50}$20 periyodunda

biyogaz üretimi 0.5 L/gün civarına gerilerken TKOİ giderim verimi %80-85 aralığında gerçekleşmiş, bir ölçümde de %85 seviyesini geçmiştir. Bu periyottaki biyogaz üretiminin $R2_{40}20$ periyodundaki günlük biyogaz üretiminden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu düşüşün yine ikincil parçalamadan ötürü kaynaklanan asitleşmeden ötürü reaktör performansının zayıflamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. $R2_{50}10$ periyodunda TKOİ giderme verimi %85-90 aralığından %80'lere kadar gerilemiştir. Günlük biyogaz üretimi ise 0.8 L civarında gerçekleşmiştir. $R2_{50}$ periyotlarında TKOİ giderme verimi diğer periyotlardan yaklaşık %5 daha yüksek olmuştur. Bu durumun çim atıklarının lifli yapısının anaerobik çamur içerisinde tutulmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca %20 çim atığı karışımından sonraki %40 ve %50 karışım oranlarında sisteme olumlu katkılarının olmadığı görülmüştür. İkincil parçalamadan dolayı hidroliz ve asitojen safhalarının hızlanarak asit birikimine neden olmasıyla reaktör biyogaz performansının düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca BBHG'nin karışım yüzdesinin azalmasıyla anaerobik şartlar için gerekli besin dengesinin bozulduğu da düşünülmektedir.

Tüm deneysel çalışma boyunca 20 günlük HBS için R2 reaktörü giriş ve çıkışında ÇKOİ değeri sırasıyla 1552-3946 ve 575-2358 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.27), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2906±735 ve 1466±486 mg/L'dir. Giderme verimi %6-73 aralığında değişmekte olup ortalama giderme verimi %49±15 olarak bulunmuştur.

Çalışma boyunca 10 günlük HBS için ÇKOİ değeri R2 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1595-4486 ve 568-2270 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.27), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2598±856 ve 1420±592 mg/L'dir. Giderme verimi %25-78 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %45±16 olarak bulunmuştur.



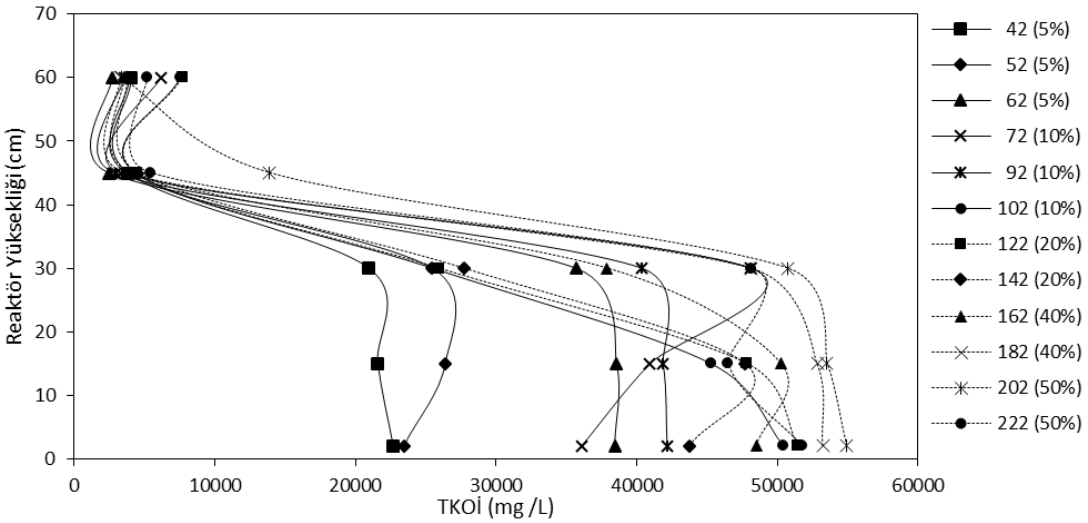
Şekil 5.27 R2 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Buna göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama ÇKOİ/TKOİ oranı sırasıyla 0.30 ve 0.26'dır. Reaktör çıkışında ise bu oran sırasıyla 0.69 ve 0.56'dır. R2 reaktöründe 42-177. günler arasında giriş ÇKOİ değeri 2000 mg/L'den 4000 mg/L değerine kadar yükselmiştir. 177-222. günler arasında giriş ÇKOİ değeri 2000 mg/L seviyelerinde ölçülmüştür. Bu düşüşün atıklara bağlı olarak 1 mm elekten geçen partikül madde miktarının artmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Günlük biyogaz üretimi ile ÇKOİ giriş değerlerinin bir paralellik gösterdiği bu nedenle de biyogaz üretimindeki kısa dönemli artış ve azalışlarda ÇKOİ değerinin önemli etkilerinin olduğu düşünülmektedir.

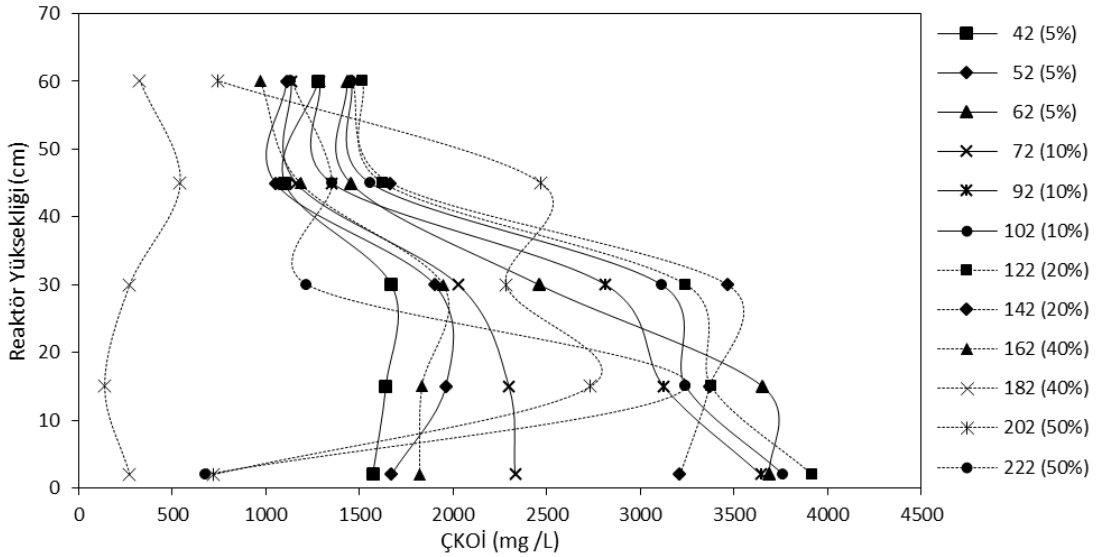
5.3.1.2 R2 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

Şekil 5.28 incelendiğinde hazırlık ve aşı uyum sürecinden sonra 42. günde beslenmeye başlanan R2 reaktöründe 1, 2 ve 3. musluklarda TKOİ değerlerinin yaklaşık 22000 mg/L civarında, 4 ve 5. musluklarda ise 4000 mg/L civarında olduğu görülmektedir. 1, 2 ve 3. numune musluğu seviyesinde 92. günün sonunda TKOİ değerlerinin önemli bir artışla 40000 mg/L seviyesini aştığı görülmektedir. 92. günden sonra reaktörün kararlı olduğu durumlarda aktif anaerobik çamurun TKOİ değerlerinin 45000-55000 mg/L arasında olduğu görülmektedir. R2 reaktöründe 202. günde anaerobik çamurun TKOİ değeri 55000 mg/L seviyelerine çıkmıştır. 4. muslukta sadece 202. günde yapılan analizde TKOİ değerinin yaklaşık 14000 mg/L seviyesine çıkmış olduğu 222. günde yapılan analizde ise bu değerin tekrar yaklaşık 4000 mg/L seviyelerine gerilediği görülmüştür.

Şekil 5.29 incelendiğinde musluklar arasında ÇKOİ değeri bakımından önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Özellikle TKOİ değeri 50000 mg/L mertebelerinde olan anaerobik çamurun ÇKOİ değerinin 4000 mg/L'yi aşmamasının çamurdaki biyokütleden kaynaklandığı düşünülmektedir. Hem mikroorganizmalar floküler yapıdan dolayı 0.45 mikron filtreye takılmakta hem de mikroorganizmalar çözünmüş organik maddeleri iyi bir şekilde arıtmaktadırlar. Özellikle 182. günden sonra reaktör içerisindeki biyokütle artışından dolayı ÇKOİ değerinin yaklaşık olarak 1500 mg/L'nin altına düştüğü görülmektedir. Ayrıca reaktörün üst tarafındaki ÇKOİ değerinin de çamur içerisindeki değerden yüksek olmaması hatta daha düşük seviyelerde olması ve burada ÇKOİ değerinin TKOİ değerinin yaklaşık yarısı olması durumu reaktör beslemesi esnasında by-pass olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.28 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R2 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi



Şekil 5.29 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R2 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi

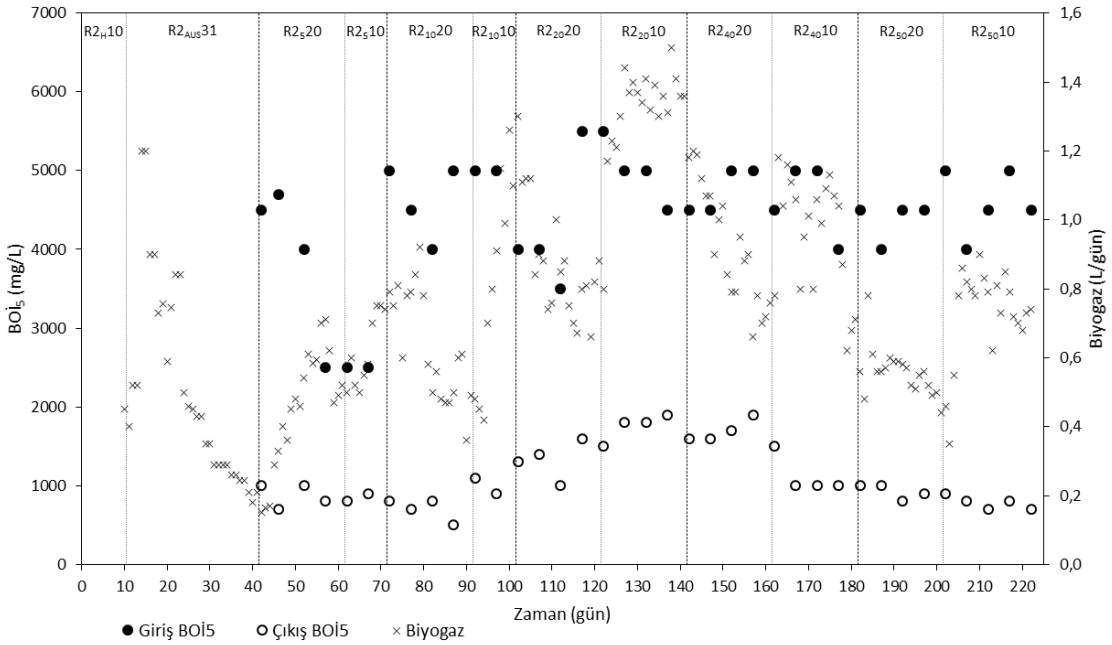
5.3.2 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri

5.3.2.1 R2 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri

Deneysel çalışma süresince 20 günlük HBS için R2 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 2500-5500 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 500-1900 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4390±807 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 1105±392 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %62-90 arasında değişmiştir. Ortalama $BOİ_5$ giderme veriminin %74.5±7.9 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre $BOİ_5$/TKOİ oranı reaktör girişinde ortalama 0.45, reaktör çıkışında ise 0.52 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma boyunca 10 günlük HBS için R2 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 2500-5000 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 500-1700 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4467±667 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 1133±480 mg/L olarak tespit edilmiştir. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %57.8-84.4 arasında değişmekte olup ortalama $BOİ_5$ giderme veriminin %74.6±9.3 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.45'tir ve reaktör çıkışında ise 0.44 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.30'da R2 reaktörü giriş ve çıkışında BOİ$_5$ parametresinin zamanla değişimi ile günlük biyogaz üretiminin değişimi gösterilmiştir.



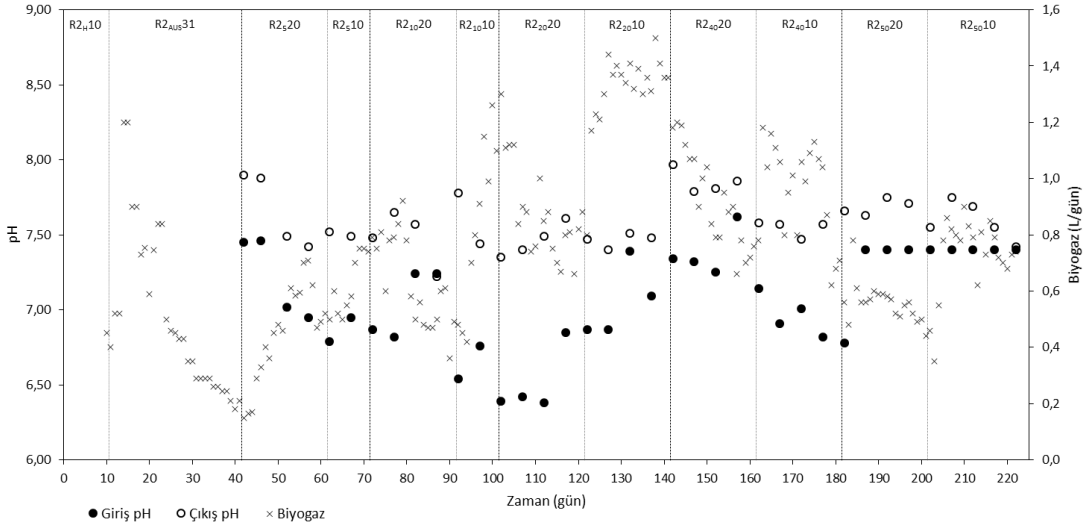
Şekil 5.30 R2 giriş-çıkış BOİ$_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

5.3.3 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri

5.3.3.1 R2 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri

Çalışma boyunca R2 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.38-7.62 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerlerinin 7.22-7.90 arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 7.09±0.36 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.62±0.18 olarak tespit edilmiştir.

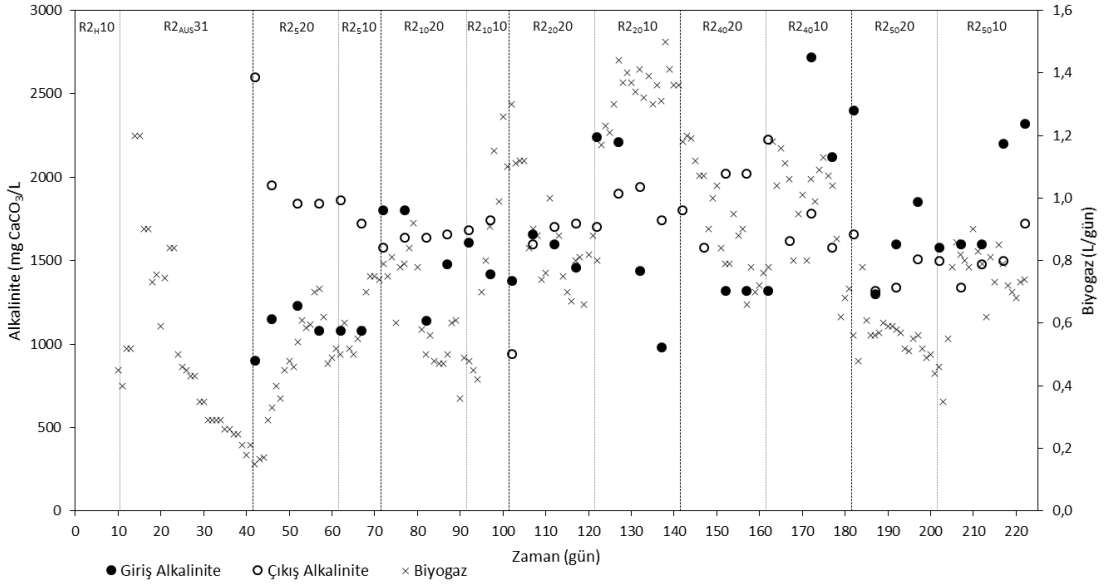
Tüm deneysel çalışma boyunca R2 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan besleme atığının pH değeri 6.39-7.40 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerleri 7.35-7.97 arasında ölçülmüştür. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 7.06±0.32 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.55±0.16 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.31'de R1 reaktörünün giriş ve çıkışında pH parametresinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.31 R2 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

Çalışma sürecinde R2 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değerleri 900-3540 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 1320-2600 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1536±554 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1759±294 mg $CaCO_3$/L olarak tespit edilmiştir.

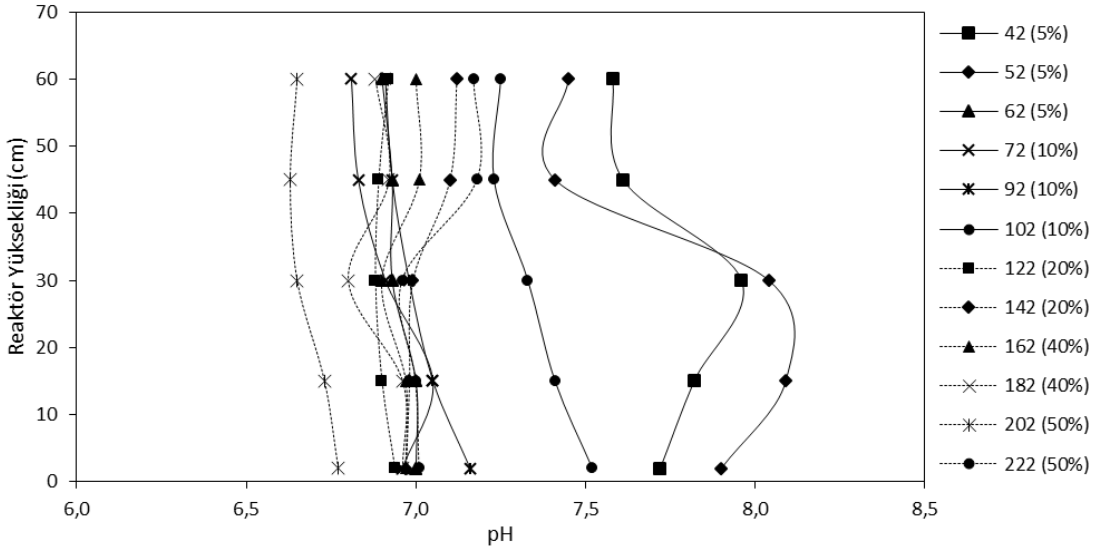
Deneysel süreç boyunca R2 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan besleme atığının alkalinite değerleri 980-3300 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 940-1940 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu belirlenmiştir. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1905±639 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1628±249 mg $CaCO_3$/L olarak bulunmuştur. Şekil 5.32'de R1 reaktörünün giriş ve çıkışında alkalinite parametresinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.32 R2 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

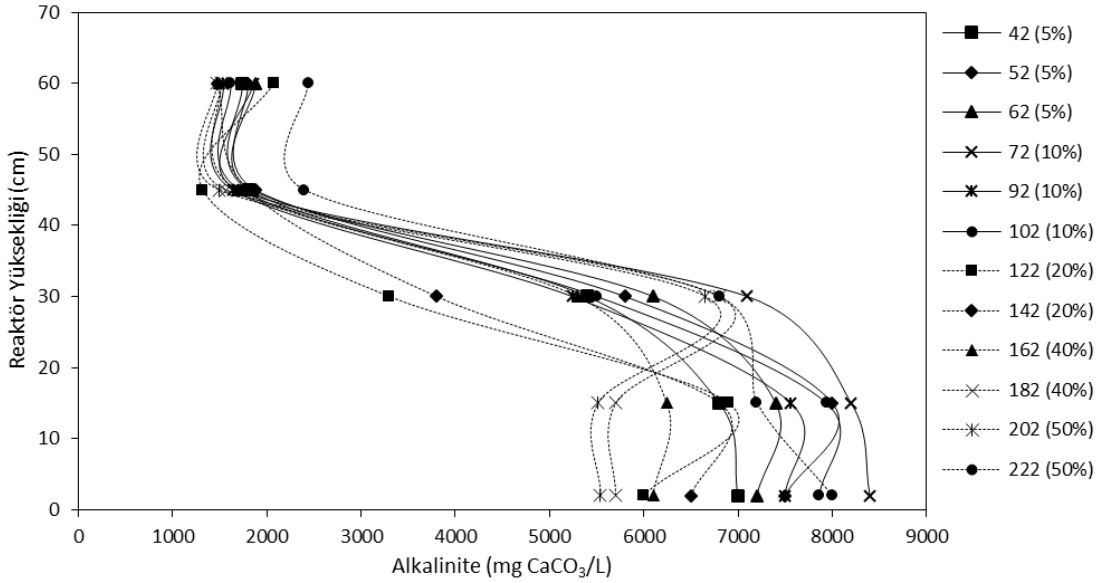
5.3.3.2 R2 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri

Çalışma boyunca R2 reaktöründe pH 6.6-8.1 arasında bir değişim göstermiştir. 42, 52 ve 102. günlerde 7.2-8.1 aralığında bir değişim görünürken 202. günde 6.7 seviyelerinde, çalışmanın diğer zamanlarında ise 6.8-7.2 değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada R2 reaktörünün beslenmeye başlandığı ilk zamanlar olan 42 ve 52. günlerde anaerobik sistemin kararlı hale gelmemesinden dolayı, 102. günde ise biyogaz üretimindeki artış ile beraber NH_3-N üretiminin de artmasından kaynaklı olarak pH parametresinin daha yüksek ölçüldüğü düşünülmektedir. 202. günde reaktör içerisindeki pH değerinin ikincil parçalamadan dolayı asit birikimiyle pH değerinin aşağı düştüğü düşünülmektedir. Sadece 202. günde pH'ın 6.6-6.8 aralığına olduğu görülmüştür. Çalışmanın 202. gününden sonra pH seviyesini tekrar 6.8-7.2 aralığına getirmek için besleme atığına pH değeri 7.4'e gelene kadar NaOH ilavesi yapılmıştır. Şekil 5.33'te R2 reaktörü içerisindeki pH parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.33 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi

Çalışma süresince R2 reaktörü içerisinde alkalinite dağılımı çamur yoğunluğuna göre değişim göstermiştir. 1 ve 2. musluklarda alkalinite 5500-8400 mg $CaCO_3$/L arasında, 3. muslukta 5300-7300 mg $CaCO_3$/L arasında ve 4 ile 5. musluklarda ise 1300-2100 mg $CaCO_3$/L aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Reaktör içerisinde çamur seviyesi yükseldikçe alkalinite değeri de çamurun ulaştığı muslukta yükselmiştir. Ancak reaktörün kararsız olduğu durumlarda alkalinite parametresinin düştüğü düşünülmektedir. 122 ve 142. günde alkalinite sırasıyla 3300 ve 3800 mg $CaCO_3$/L olarak ölçülmüştür. Çalışmanın son günü olan 222. günde 4 ve 5. musluklarda alkalinite 2400 mg $CaCO_3$/L seviyelerinde ölçülmüştür. Şekil 5.34'te R2 reaktörü içerisindeki alkalinite parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.34 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi

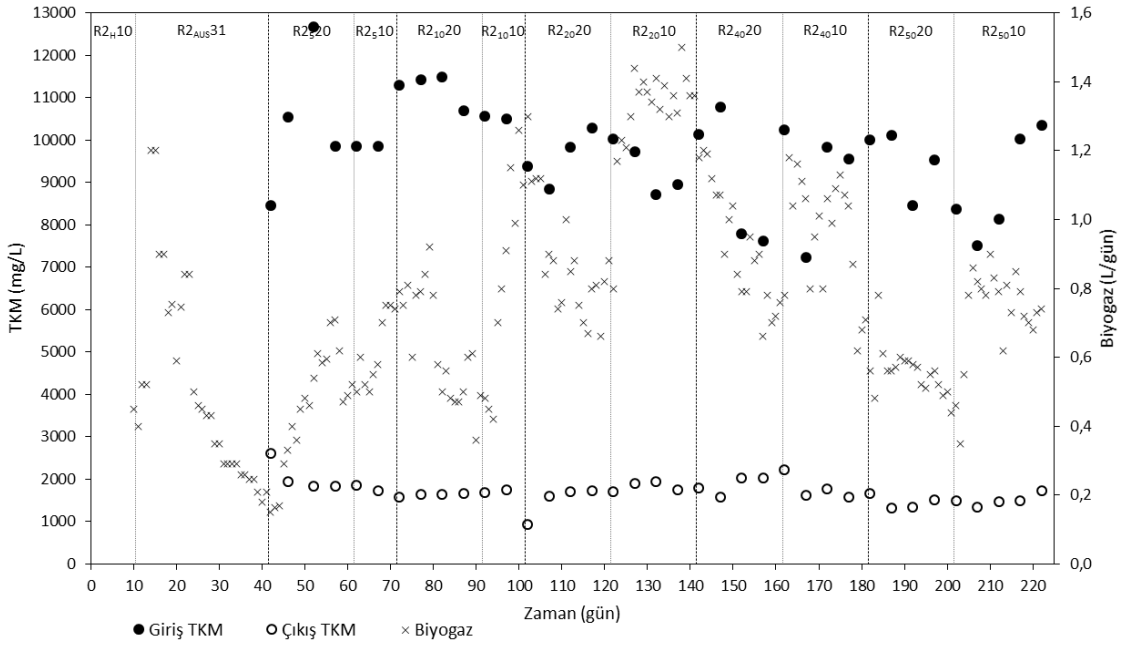
5.3.4 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

5.3.4.1 R2 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı TKM değerleri 7612-12680 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 9878±1276 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 1478-3776 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 3038±444 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında TKM giderme verimi %56-82.6 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %68.8±5.9 olarak tespit edilmiştir.

R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında beslenen atığın TKM değerleri 7510-11302 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme atığının ortalama TKM değeri 9598±956 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 1292-4586 mg/L arasında değişim göstermiştir. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 3417±839 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında TKM giderme verimi %44.4-82.8 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama TKM giderme

veriminin %63±10.3 olduğu bulunmuştur. Şekil 5.35'te R2 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış TKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



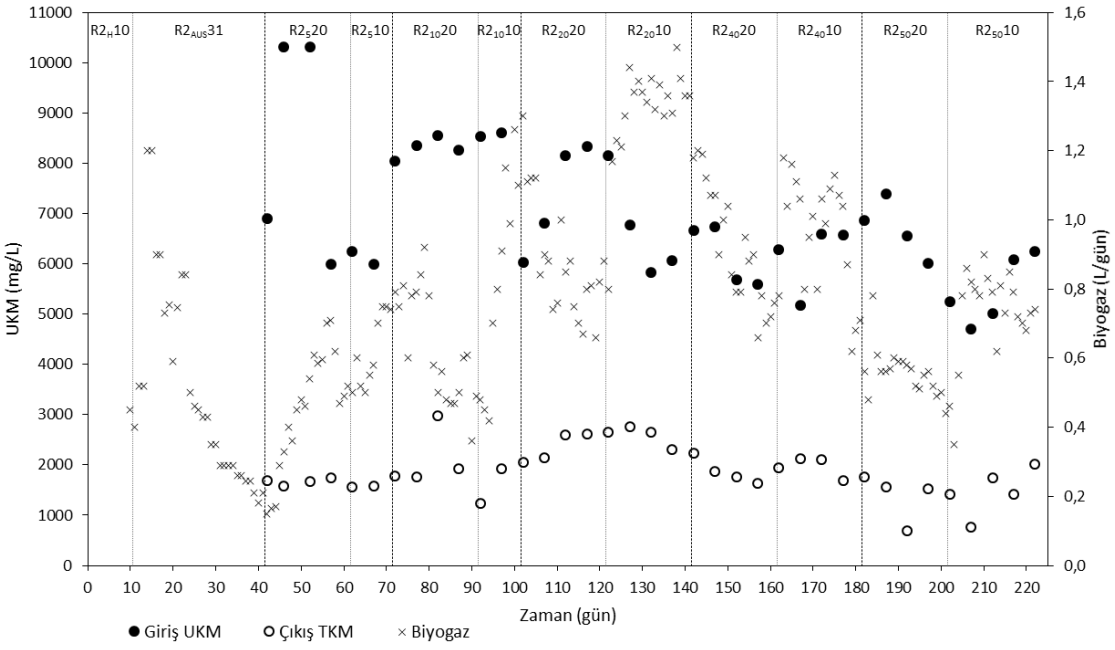
Şekil 5.35 R2 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Deneysel çalışmada R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma dönemlerinde besleme sıvısı UKM değerleri 5246-10320 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 7354±1455 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri 697-2970 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1835±526 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UKM giderme verimi %65.3-89.4 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UKM giderme verimi %74.6±6.8 olarak tespit edilmiştir.

R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma dönemlerinde giriş atığı UKM değerleri 4710-8616 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre giriş atığının ortalama UKM değeri 6408±991 mg/L olarak belirlenmiştir. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri 760-2756 mg/L arasında değişim göstermiştir. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1918±493 mg/L olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UKM giderme verimi %54.5-83.9 aralığında

ölçülmüştür. Buna göre ortalama UKM giderme verimi %69.2±8.2 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.36'da R2 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UKM/TKM oranı sırasıyla 0.74 ve 0.67, reaktör çıkışında ise sırasıyla 0.60 ve 0.56 olarak bulunmuştur.

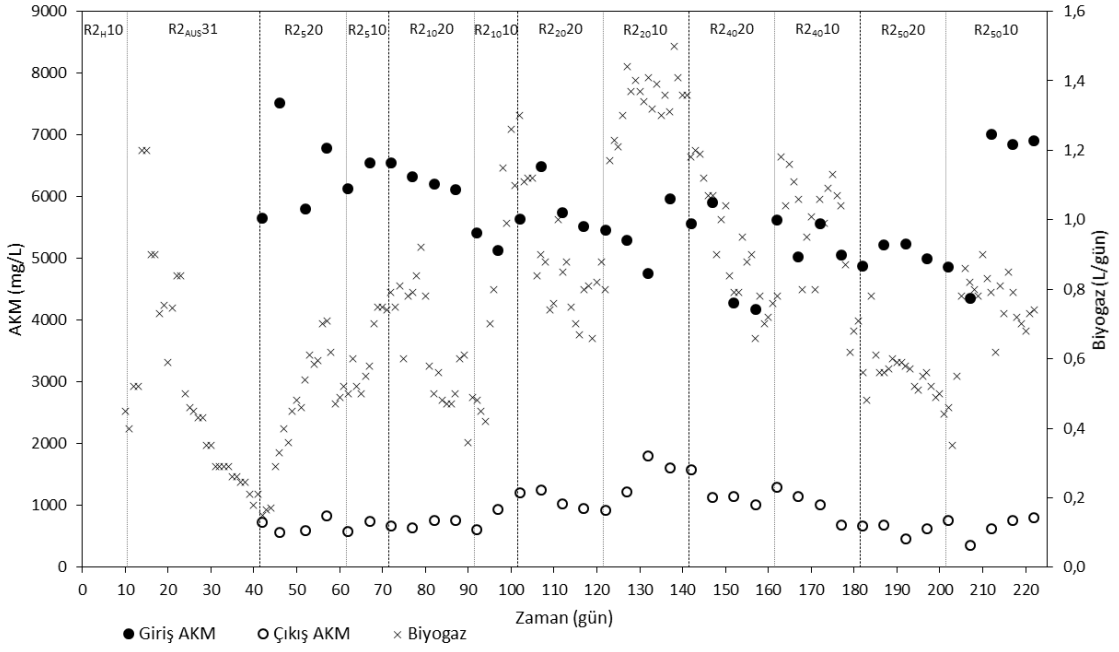


Şekil 5.36 R2 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışmada R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında giriş sıvısı AKM değerleri 4171-7520 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre giriş sıvısının ortalama AKM değeri 5687±786 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu AKM değerleri 468-1302 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 827±243 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında AKM giderme verimi %73.3-92.6 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama AKM giderme verimi %85.1±5.3 olarak tespit edilmiştir.

R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı AKM değerleri 4360-7010 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre giriş sıvısının ortalama AKM değeri 5737±856 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör çıkış

suyu AKM değerleri 352-1800 mg/L arasında değişim göstermiştir. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 979±421 mg/L olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında AKM giderme verimi %62.2-91.9 aralığında ölçülmüştür. Buna göre ortalama AKM giderme verimi %82.1±8.4 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.37'de R2 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış AKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

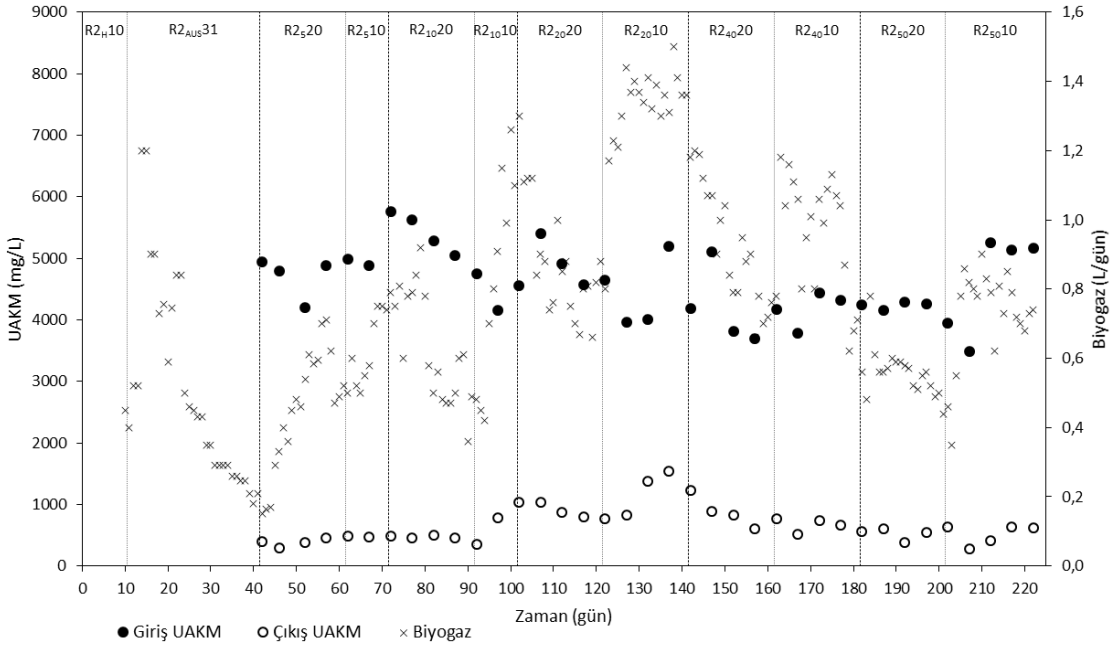


Şekil 5.37 R2 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Deneysel süreçte R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma dönemlerinde besleme sıvısı UAKM değerleri 3693-5630 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 4643±534 mg/L olarak belirlenmiştir. Reaktör çıkış suyu UAKM değerleri 300-1030 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 594±208 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %68.3-93.8 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %87±4.7 olarak tespit edilmiştir.

Deneysel çalışma boyunca R2 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma dönemlerinde giriş suyu UAKM değerleri 3480-5760 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre giriş suyunun ortalama UAKM değeri 4582±623 mg/L

olarak belirlenmiştir. Reaktör çıkış suyu UAKM değerleri 280-1545 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 778±367 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %65.5-92.1 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %82.9±8.3 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.38'de R2 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UAKM değerlerinin değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

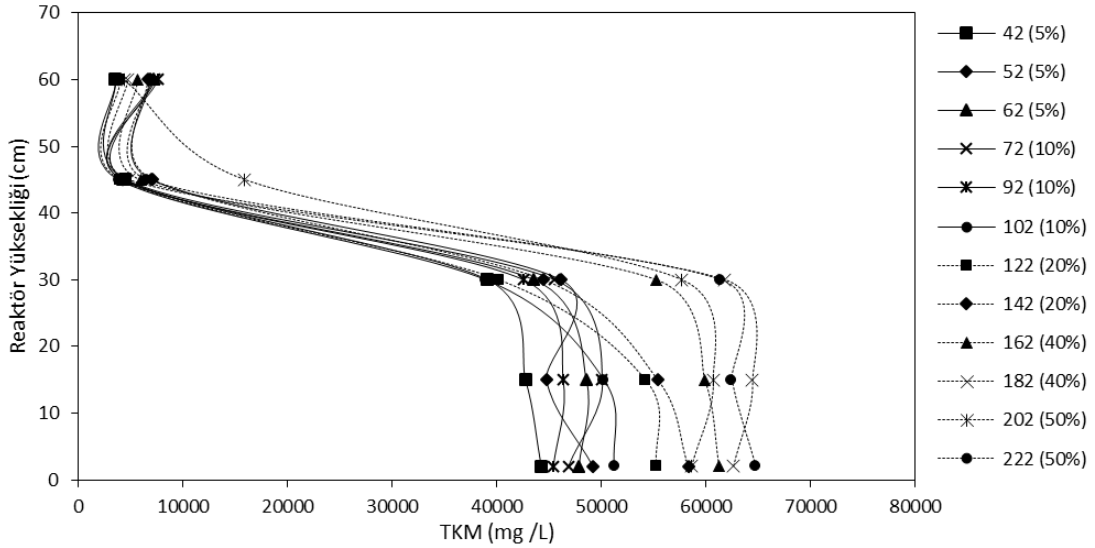


Şekil 5.38 R2 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UAKM/AKM oranı sırasıyla 0.82 ve 0.80 olarak bulunmuştur. Reaktör çıkışında ise bu oran sırasıyla 0.72 ve 0.79 olarak bulunmuştur.

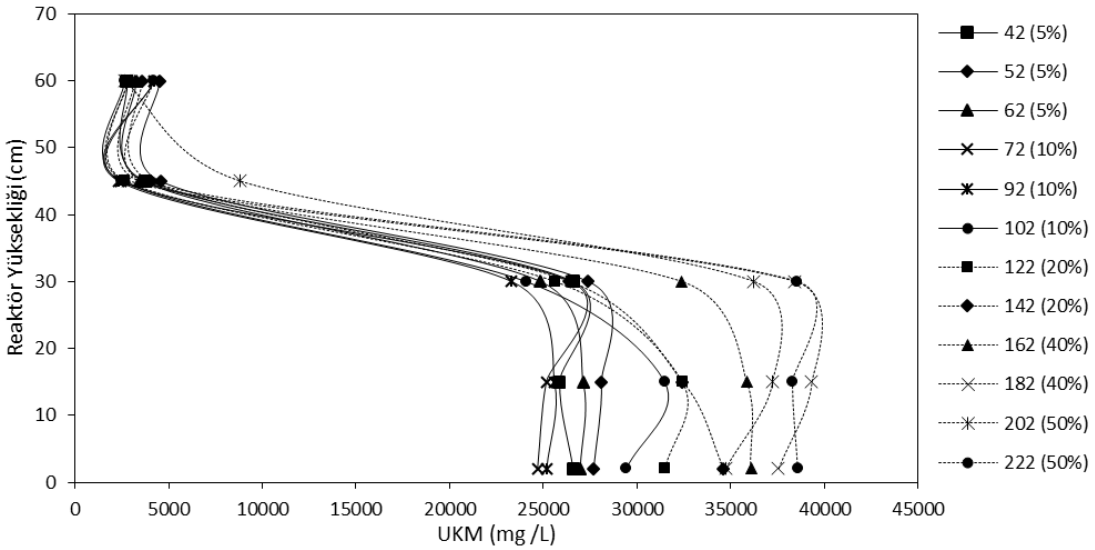
5.3.4.2 R2 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

Tüm deneysel çalışma boyunca R2 reaktörü içerisinde 1, 2 ve 3. musluklarda TKM değerleri 40100-64800 mg/L arasında değişim göstermiştir. 4. muslukta TKM konsantrasyonu 202. günde 15900 mg/L civarında, diğer günlerde 4800-6600 mg/L arasında ölçülmüştür. 5. muslukta TKM konsantrasyonu 4300-6900 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Şekil 5.39'da R2 içerisindeki TKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.39 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi

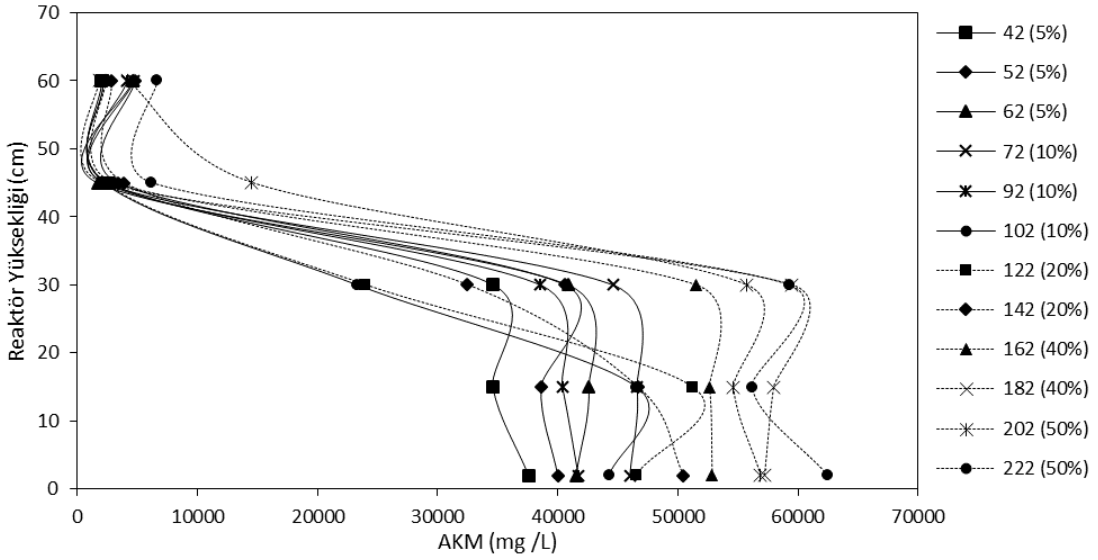
R2 reaktörü içerisinde deneysel çalışma boyunca 1, 2 ve 3. musluklarda UKM değerleri 23300-39400 mg/L arasında ölçülmüştür. 4. muslukta UKM konsantrasyonu 202. günde 8800 mg/L civarında, diğer günlerde 2800-4100 mg/L arasında ölçülmüştür. 5. muslukta UKM konsantrasyonu 2600-4200 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Şekil 5.40'ta R2 içerisindeki UKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.40 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi

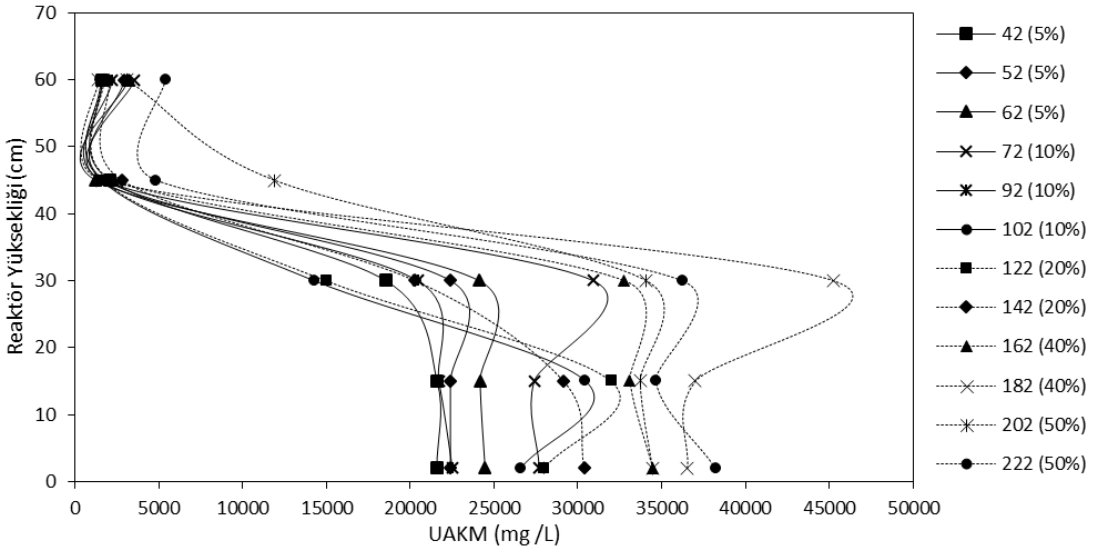
R2 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1 ve 2. musluklarda AKM değerleri 34500-62500 mg/L arasında değişim göstermiştir. 3. muslukta 102 ve 122. günlerde AKM 24000 mg/L civarında iken diğer ölçüm zamanlarında 32400-59300 mg/L aralığında

ölçülmüştür. 4. muslukta AKM değeri 202. günde 14500 mg/L ve 222. günde 6200 mg/L aralığında, diğer zamanlarda ise 2200-3900 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta AKM konsantrasyonu 222. günde 6700 mg/L civarında ve diğer zamanlarda ise 1800-4700 mg/L aralığında ölçülmüştür. Şekil 5.41'de R2 içerisindeki AKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.41 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi

R2 reaktörü içerisinde deneysel süreç boyunca 1 ve 2. musluklarda UAKM değerleri 21500-38300 mg/L arasında ölçülmüştür. 3. muslukta 102 ve 122. günlerde UAKM 15000 mg/L civarında, 182. günde 45300 mg/L iken diğer ölçüm zamanlarında 18500-36300 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta UAKM değeri 202. günde 11900 mg/L ve 222. günde 4900 mg/L civarında, diğer zamanlarda ise 1600-2800 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 5. muslukta UAKM konsantrasyonu 222. günde 5400 mg/L civarında diğer zamanlarda ise 1400-3200 mg/L aralığında ölçülmüştür. Şekil 5.42'de R2 içerisindeki UAKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



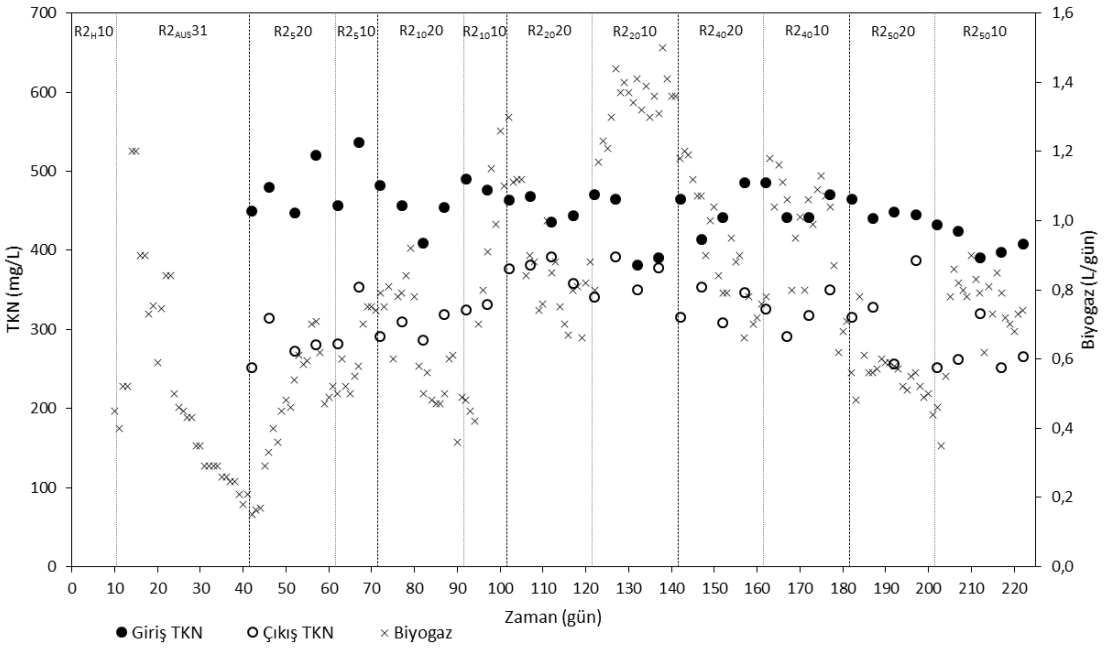
Şekil 5.42 R2 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi

5.3.5 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri

5.3.5.1 R2 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri

Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R2 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TKN değerleri 409-520 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 252-392 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 456±26 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 318±43 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %10.1-46 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %30.1±10.3 olarak tespit edilmiştir.

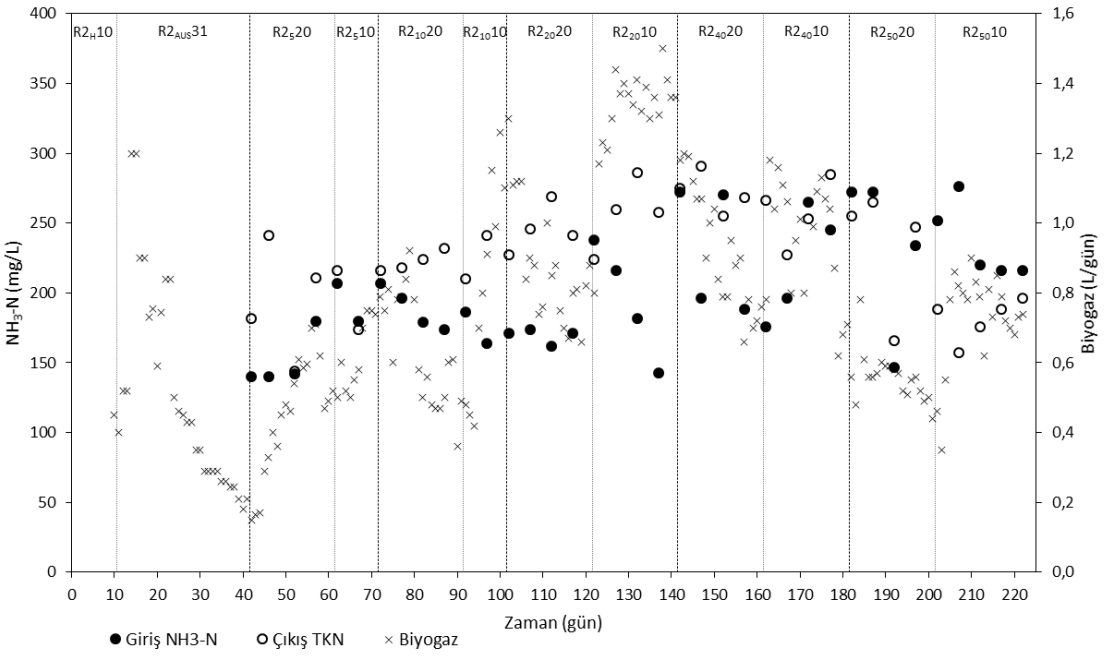
Çalışma boyunca R2 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında giriş atıksu karışımının TKN değerleri 381-536 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 252-392 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre giriş atıksu karışımının ortalama TKN değeri 444±44 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 325±43 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %3.3-39.6 arasında ölçülmüştür. Ortalama giderim verimi %26.8±11 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.43'te tüm deneysel çalışma boyunca R2 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TKN değerleri ve biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.43 R2 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi

R2 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında giriş atığı karışımının NH_3-N değerleri 140-272 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 144-291 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 192±40 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri 229±37 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre NH_3-N konsantrasyonu bazı durumlarda %25.4 oranına kadar azalırken bazı durumlarda ise %72.1 oranına kadar yükselmiştir. Buna göre ortalama konsantrasyon artışı %22.7±25.5 olarak tespit edilmiştir.

Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R2 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının NH_3-N değerleri 143-276 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 157-286 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 216±43 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri 230±43 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre NH_3-N konsantrasyonunun %43.1 oranına kadar azaldığı ve %80.4 oranına kadar arttığı görülmüştür. Bu verilere göre ortalama konsantrasyon artışı %11±31.2 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.44'te tüm deneysel çalışma boyunca R2 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış NH_3-N değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.44 R2 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

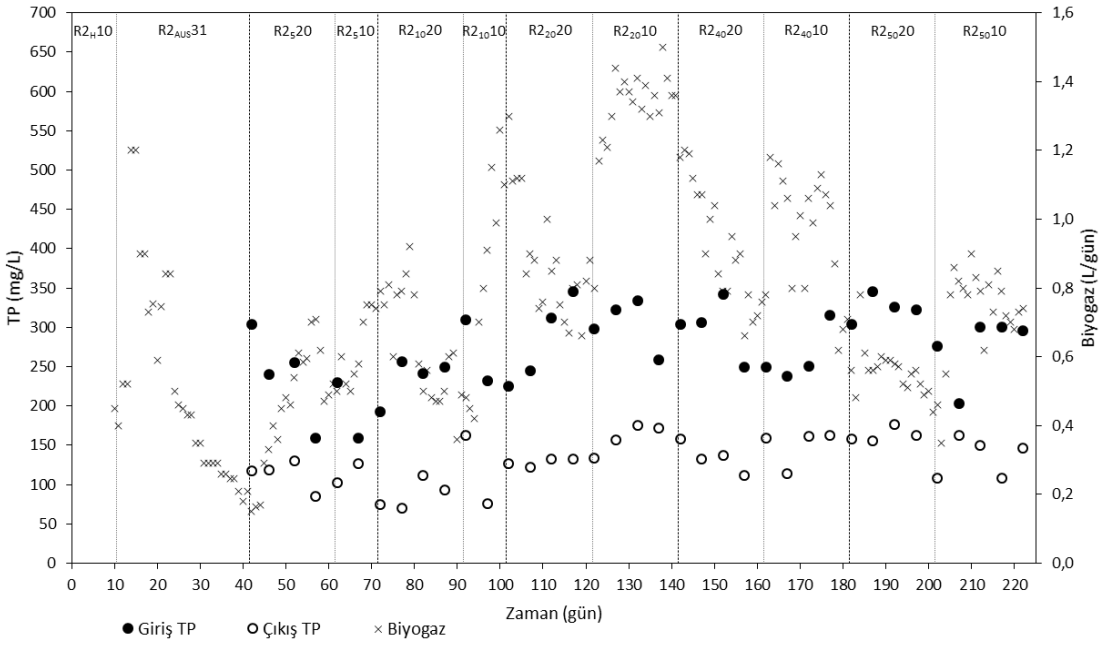
5.3.6 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri

5.3.6.1 R2 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri

Deneysel çalışma boyunca R2 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TP değerleri 159-345 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 70-176 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 279±48 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 126±27 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TP giderim verimi %36.1-72.7 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %54.5±7.7 olarak tespit edilmiştir.

Deneysel süreç boyunca R2 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısının TP değerleri 159-334 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 74-175 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 266±54 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 141±32 mg/L olarak hesaplanmıştır. Buna göre TP giderim verimi %20.1-67.2 arasında değişmiştir. Buna göre ortalama giderim verimi

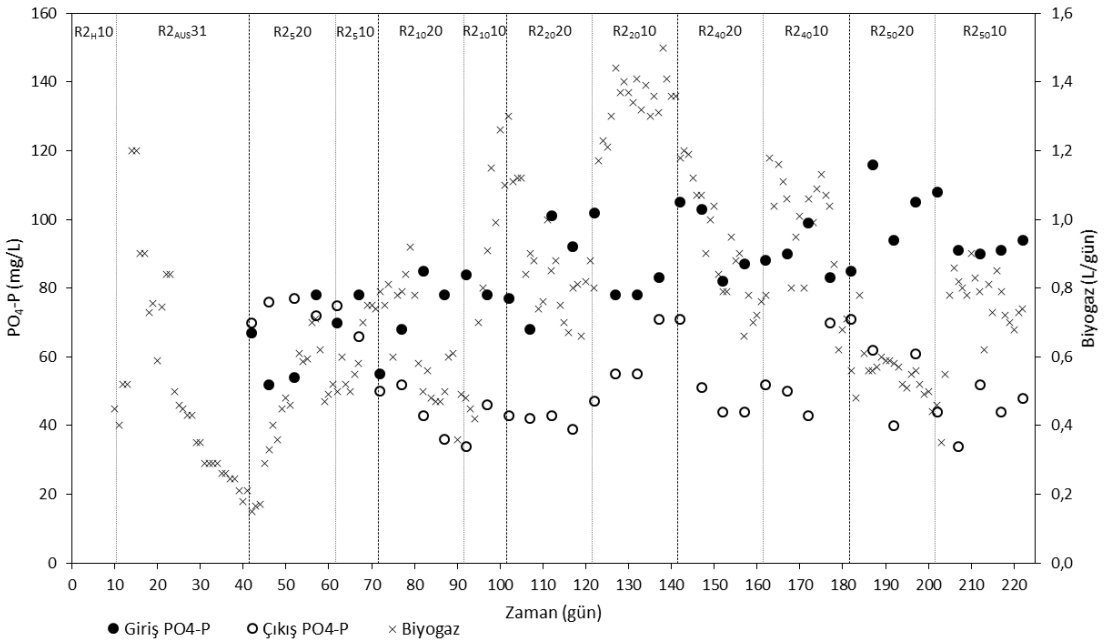
%46.4±13.5 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.45'te tüm deneysel çalışma boyunca R2 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TP değerleri ve biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.45 R2 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

HBS 20 gün periyotlarında R2 reaktöründe besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 52-116 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 34-77 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 85±18 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 53±14 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre PO_4-P konsantrasyonu bazı ölçümlerde %46.2 oranına kadar artış göstermiş bazı ölçümlerde %59.5 oranlarına kadar giderimin olduğu görülmüştür. Buna göre ortalama giderim verimi %33±22.5 olarak tespit edilmiştir.

Deneysel süreç boyunca R2 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 55-105 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 34-71 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 84±12 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 55±12 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre PO_4-P giderim verimi %9.1-62.6 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %34.6±16.8 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.46'da tüm deneysel çalışma boyunca R2 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış PO_4-P değerleri değişimi ve biyogaz üretimi gösterilmiştir.



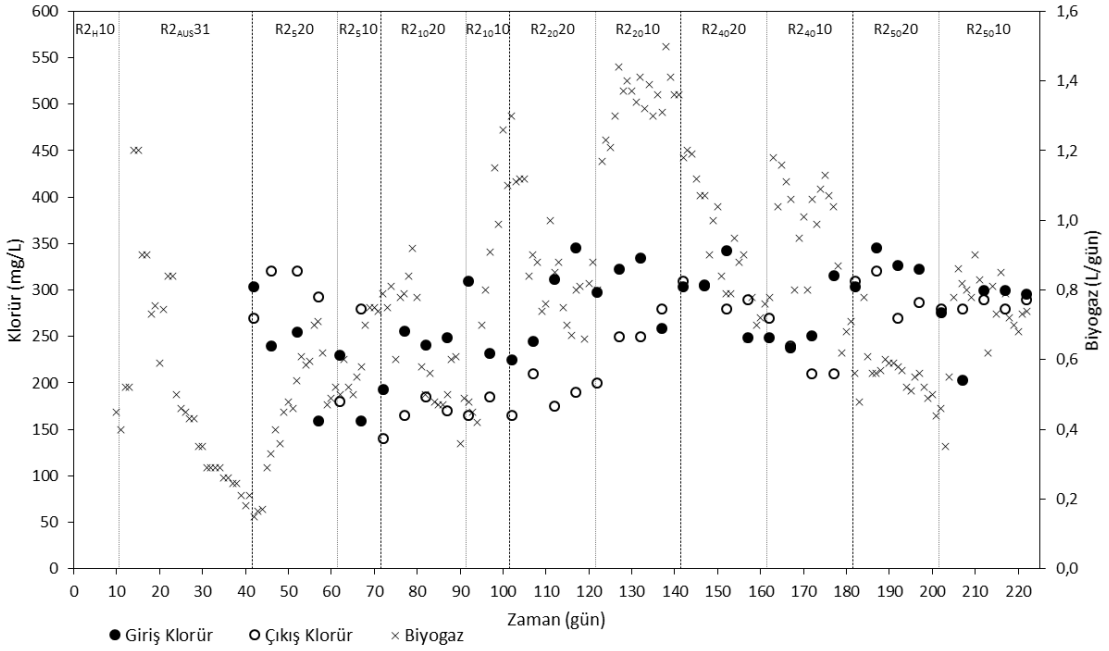
Şekil 5.46 R2 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.3.7 BBHG ile Çim Atıklarının Birlikte Kullanıldığı R2 Reaktöründe Klorür Değişimleri

5.3.7.1 R2 Reaktörü Klorür Değişimleri

Çalışma süresince yapılan klorür analizlerinde klorür konsantrasyonlarında çok az bir değişimin olduğu görülmüştür. R2 reaktörü HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 220-470 mg/L ve reaktör çıkışında 165-320 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama klorür değeri besleme sıvısında 322±74 mg/L, reaktör çıkışında ise 245±58 mg/L olduğu belirlenmiştir.

Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında R2 reaktörü besleme atığında klorür konsantrasyonu 190-420 mg/L ve reaktör çıkışında 140-310 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre ortalama klorür konsantrasyonunun besleme sıvısında 306±72 mg/L, reaktör çıkışında ise 249±54 mg/L olduğu bulunmuştur. Şekil 5.47'de deneysel süreç boyunca R2 reaktöründe ölçülen giriş ve çıkış klorür değerleri değişimi ve biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.47 R2 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.4 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktörü

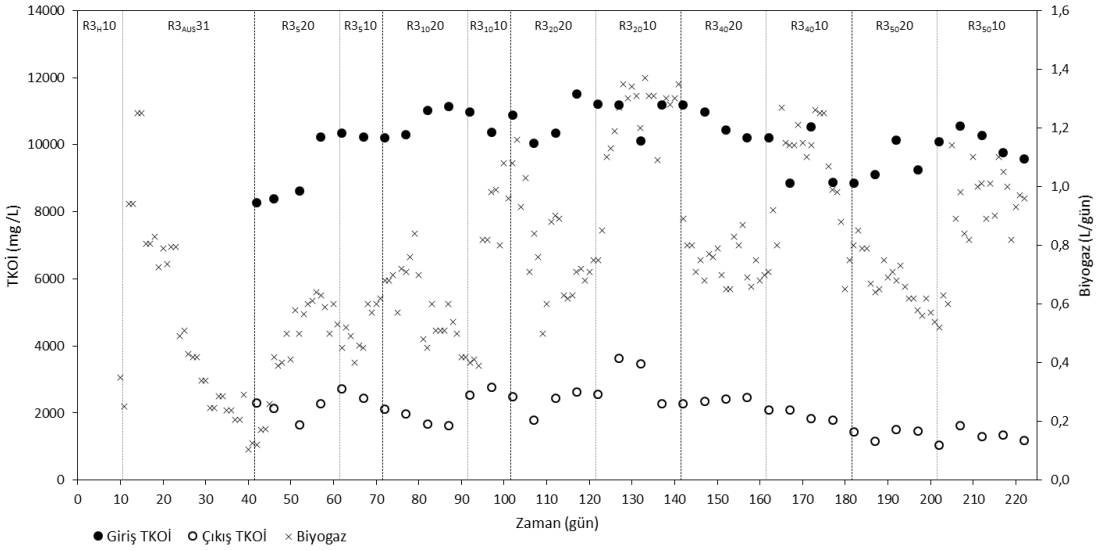
5.4.1 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

5.4.1.1 R3 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

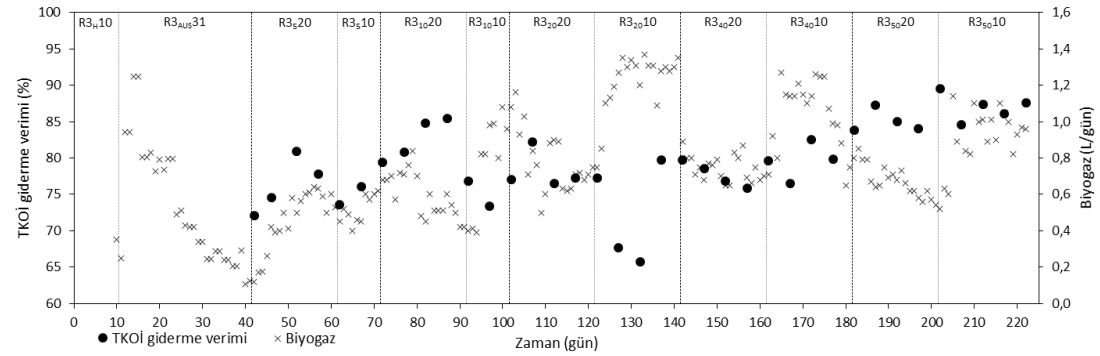
R3 reaktöründe tüm çalışma boyunca 20 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 8265-11514 ve 1054-2730 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.48), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 10135±927 ve 2039±495 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.413-0.576 (ortalama; 0.507) g TKOİ/(L.gün) arasında değişmiştir. Şekil 5.49'da 20 günlük HBS için R3 TKOİ giderme verimi görülmektedir. Giderme verimi %72-90 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %80±4 olarak bulunmuştur.

Tüm çalışma boyunca R3 reaktöründe 10 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 8865-11189 ve 1189-3621 mg/L aralığında değişim göstermiş olup (Şekil 5.48), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 10167±799 ve 2127±721 mg/L olduğu bulunmuştur.

Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.887-1.119 (ortalama; 1.017) g TKOİ/(L.gün) arasında değişmiştir. Şekil 5.49'da 10 günlük HBS için R3 TKOİ giderme veriminin değişimi görülmektedir. Giderme verimi %66-88 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %79±6 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.48 R3 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi



Şekil 5.49 R3 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışmanın tek kademeli parçalama dönemi olan 42-142. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne %5, 10 ve 20 artan oranlarda çim atığı, evsel-endüstriyel organik atık ve arıtma çamuru karışımı ilave edilmiştir. TKOİ giriş-çıkış değişimleri ve giderme verimi incelendiğinde (Şekil 5.48 ve Şekil 5.49) $R3_520$ periyodunda 8000 mg TKOİ/L civarında besleme yapıldığında giderme verimi %70'lerden %80'lere kadar artarken 10000 mg TKOİ/L'ye yakın değerlerde bir besleme yapıldığında ise giderme veriminin gerileyerek %75'lerin altına düştüğü görülmüştür. Beslemedeki bu değişimin günlük biyogaz üretimindeki düzenli artışı durdurduğu düşünülmektedir.

$R3_5$10 periyodunda TKOİ giderme verimi %75'lerin altından %80'ler civarına çıkmıştır. Çalışmanın $R3_5$20 döneminde günlük biyogaz üretimi 0.7 L/gün seviyelerine çıkmış, giriş sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarına yükselince biyogaz üretimi 0.5 L/gün seviyelerine düşmüştür. $R3_5$10 periyodunun sonlarına doğru tekrar 0.7 L/gün seviyelerine yükselmiştir.

$R3_{10}$20 periyodunun başlarında TKOİ giderme verimi %80'ler civarındayken periyodun 87. gününde %85'ler seviyesine yükselmiş 92. günde ise %75'ler seviyesine düşmüştür. Bu periyodun başlarında 0.7 L/gün olan biyogaz üretimi periyodun sonunda 0.4 L/gün seviyelerine gerilemiştir. Arıtma veriminin artması ve günlük biyogaz üretiminin düşmesi yeterli organik yüklemenin yapılmamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. $R3_{10}$10 periyodunda TKOİ giderme verimi %75'in altından üstüne çıkmış ve biyogaz üretimi de 0.4 L/gün seviyesinden 1.2 L/gün seviyelerine yükselmiştir.

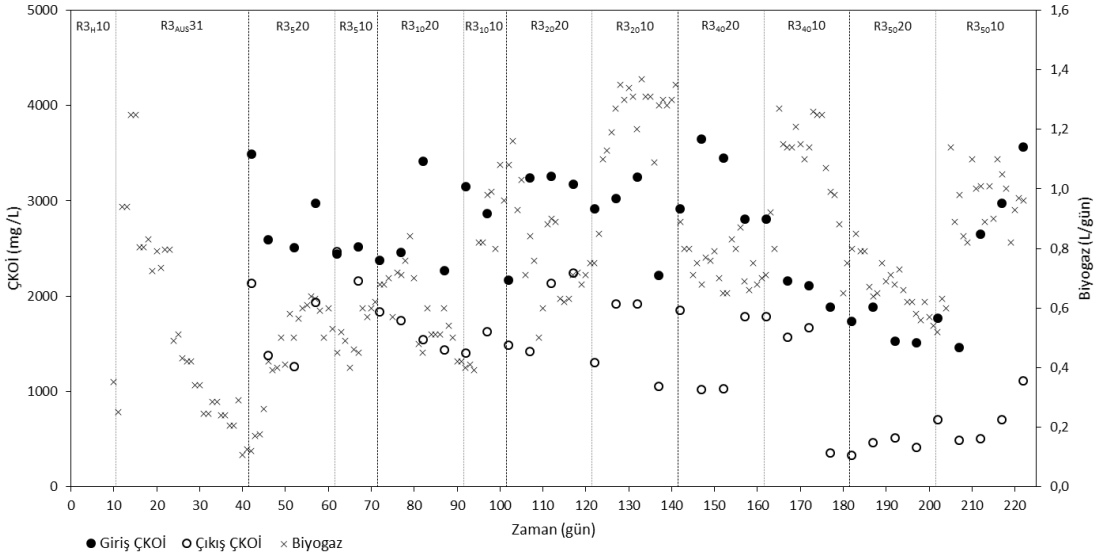
$R3_{20}$20 periyodunda TKOİ giderme verimi %80 seviyesinden %75-80 aralığına düşmüştür. Biyogaz üretimi ise 1.2 L/gün seviyelerinden 0.7 L/gün seviyelerine gerilemiştir. $R3_{20}$10 periyodunda TKOİ giderme verimi %80 civarından önce %65 seviyelerine kadar düşmüş sonra tekrar %80'ler civarına çıkmıştır. Bu periyotta biyogaz üretimi 0.7 L/gün seviyelerinden 1.3 L/gün seviyelerine yükselmiş ve bu seviyelerde kararlı bir biyogaz üretiminin olduğu görülmüştür.

Çalışmanın iki kademeli parçalama dönemi olan 142-222. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne sırasıyla %40 ve %50 oranlarında çim atığı, evsel-endüstriyel organik atık ve arıtma çamuru karışımı ilave edilmiştir. $R3_{40}$20 periyodu boyunca 0.7 L/gün civarında kararlı bir biyogaz üretimi görülmüştür. Bu periyotta TKOİ giderim verimi %75-80 aralığında gerçekleşmiştir. $R3_{40}$10 periyodunda biyogaz üretimi önce 1.2 L/gün seviyesine yükselmiş daha sonra 0.7 L/gün seviyelerine kadar gerilemiştir. Bu periyotta TKOİ giderim verimi %75-85 aralığında değişim göstermiştir. $R3_{40}$ döneminde ikincil parçalamadan kaynaklı asit birikimi ile sistem performansının düştüğü düşünülmektedir

$R3_{50}$20 periyodunda TKOİ giderim verimi %85-90 aralığında gözlemlenmiş ve bu periyotta biyogaz üretimi 0.8 L/gün civarından 0.5 L/gün civarlarına gerilemiştir. $R3_{50}$10 periyodunda biyogaz üretimi 1 L/gün civarında ve TKOİ giderme veriminin %85-90 arasında olduğu gözlemlenmiştir.

Tüm deneysel süreç boyunca 20 günlük HBS için ÇKOİ değeri R3 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1506-3649 ve 411-2464 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.50), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2729±651 ve 1431±594 mg/L olarak belirlenmiştir. ÇKOİ değeri bazı durumlarda giriş atığına göre %1 oranında artmış ancak genel olarak %76 seviyelerine kadar bir giderme veriminin olduğu görülmüştür. Bu verilere göre ortalama giderme verimi %48±19 olarak bulunmuştur.

Çalışma boyunca 10 günlük HBS için ÇKOİ değeri R3 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1457-3568 ve 324-2160 mg/L aralığında değişmiş (Şekil 5.50), ortalama ÇKOİ değerleri ise sırasıyla 2514±594 ve 1265±653 mg/L olarak tespit edilmiştir. Giderme verimi %14-81 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme veriminin %48±25 olduğu hesaplanmıştır.



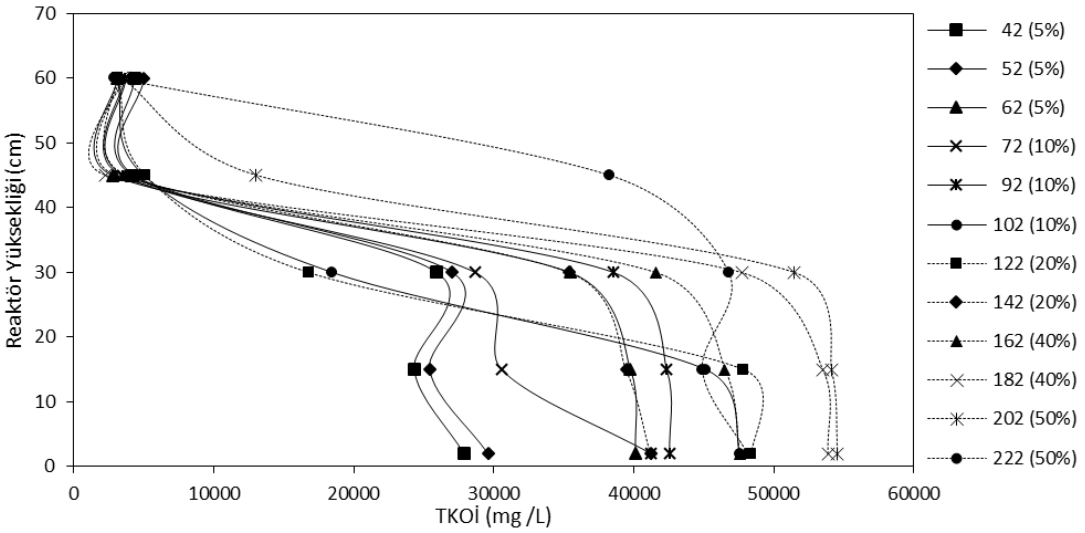
Şekil 5.50 R3 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Buna göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama ÇKOİ/TKOİ oranı sırasıyla 0.27 ve 0.25 olarak bulunmuştur. Reaktör çıkışında ise bu oranın sırasıyla 0.7 ve 0.59 olduğu görülmüştür. R3 reaktöründe 42-142. günler arasında giriş ÇKOİ değeri 2500 mg/L'den 3200 mg/L değerine kadar yükselmiştir. 142-207. günler arasında giriş ÇKOİ değeri 1500 mg/L seviyelerine kadar düşmüş ve 222. güne kadar tekrar 3500 mg/L seviyesine yükseldiği gözlemlenmiştir.

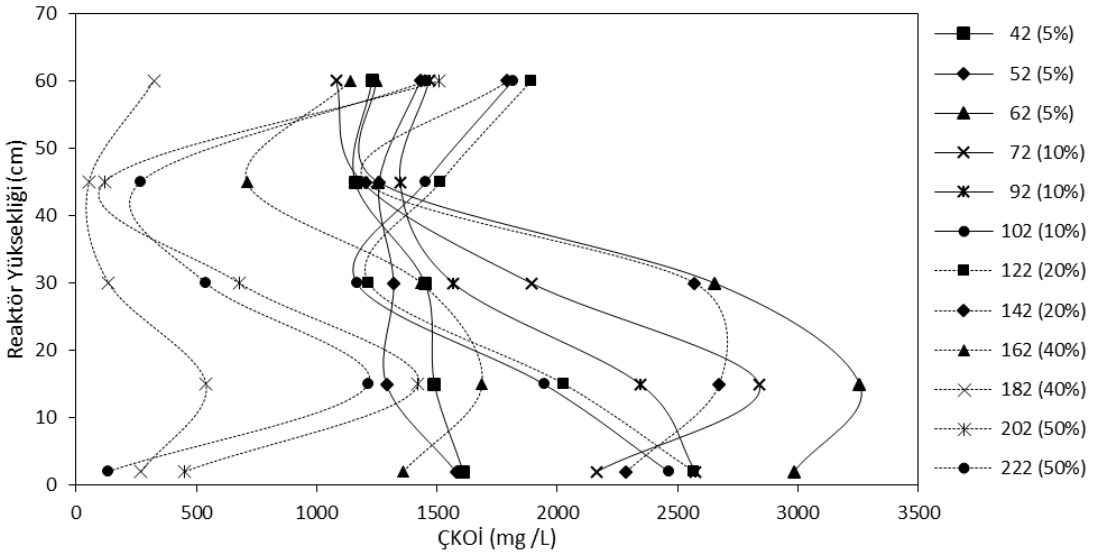
5.4.1.2 R3 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

Şekil 5.51'i incelendiğinde hazırlık ve aşı uyum sürecinden sonra 42. günde beslenmeye başlanan R3 reaktöründe 1, 2 ve 3. musluklarda TKOİ değerinin yaklaşık 28000 mg/L civarında, 4 ve 5. musluklarda ise 4000 mg/L civarında olduğu görülmektedir. 1, 2 ve 3. numune muslukları seviyesinde 62. günün sonunda TKOİ değerinin önemli bir artışla 40000 mg/L seviyesini aştığı görülmektedir. 72. günde 2. ve 3. musluklarda TKOİ değerinin 30000 mg/L seviyelerine düştüğü ancak 92. günden sonra ilk üç muslukta TKOİ değerinin 40000 mg/L den yüksek olduğu görülmüştür. 182 ve 202. gün ölçümlerinde 1 ve 2. musluklarda TKOİ değeri 55000 mg/L civarında ölçülmüştür. 202. günde 4. muslukta TKOİ değeri 15000 mg/L civarlarında 222. günde ise 40000 mg/L civarında ölçülmüştür. 222. günde ilk üç muslukta TKOİ değeri 48000 mg/L civarında ölçülmüştür.

Şekil 5.52 incelendiğinde numune alma muslukları arasında ÇKOİ değeri bakımından önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Reaktör içerisinde yüksek TKOİ değerlerinin olmasına rağmen ÇKOİ değerlerinin 3500 mg/L değerini geçmediği görülmüştür. Özellikle ikincil parçalama döneminden sonra devamlı bir düşüşle beraber ÇKOİ değerleri 1700 mg/L'den aşağı seviyelerde ölçülmüştür. 182. gün ölçümlerinde bütün musluklarda ÇKOİ değerlerinin 500 mg/L den düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.51 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R3 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi



Şekil 5.52 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R3 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi

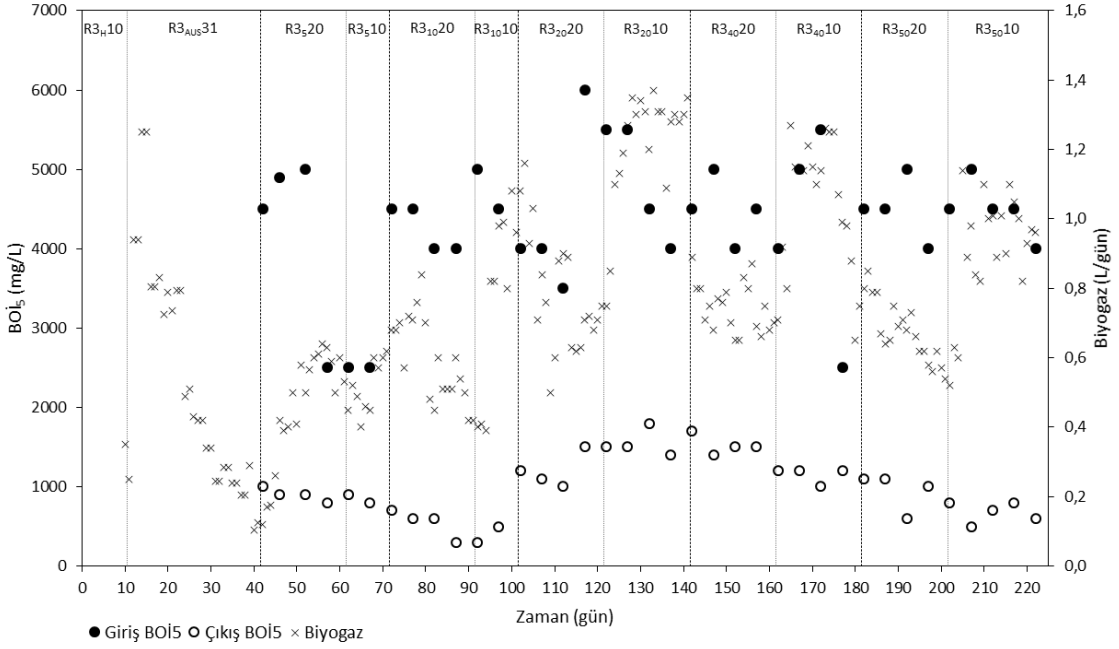
5.4.2 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri

5.4.2.1 R3 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri

Deneysel çalışma süresince 20 günlük HBS için R3 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 2500-6000 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 300-1500 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4352±850 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 976±373 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %62.5-94 arasında değişmekte olup ortalama $BOİ_5$ giderme veriminin %76.9±9 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.43'tür ve reaktör çıkışında ise bu değer 0.48 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma boyunca R3 reaktöründe HBS 10 gün için besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 2500-5500 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 500-1800 mg/L aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4300±862 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 1033±425 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %52-90 arasında ölçülmüş ve buna göre ortalama $BOİ_5$ giderme veriminin %74.9±11.2 olduğu bulunmuştur. Buna göre reaktör girişinde

ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.42'dir ve reaktör çıkışında ise 0.49 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.53'te R3 reaktörü giriş ve çıkışında $BOİ_5$ parametresinin zamanla değişimi ile günlük biyogaz üretiminin değişimi gösterilmiştir.



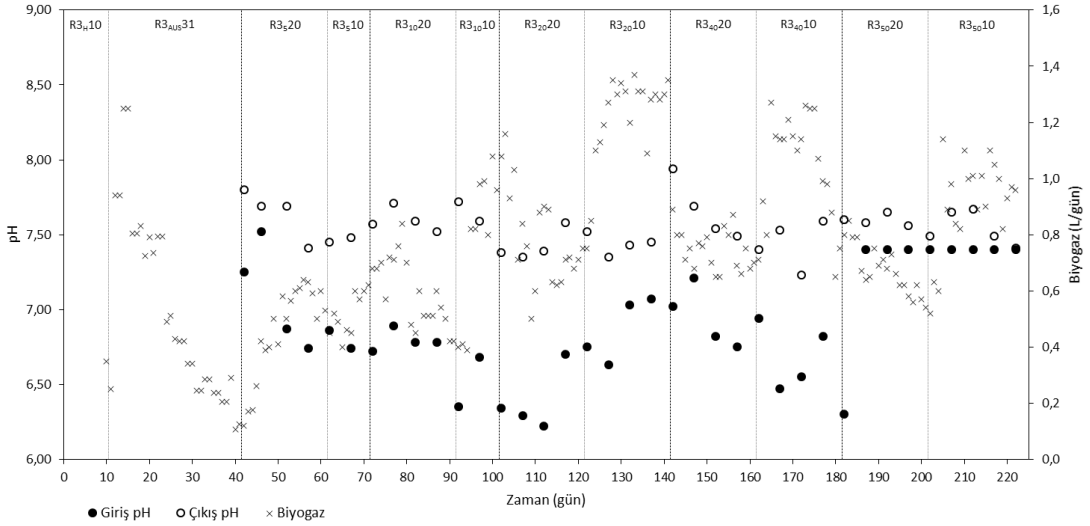
Şekil 5.53 R3 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

5.4.3 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri

5.4.3.1 R3 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri

Tüm çalışma boyunca R3 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.22-7.52 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerlerinin 7.35-7.80 arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 6.92±0.38 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.56±0.13 olarak tespit edilmiştir.

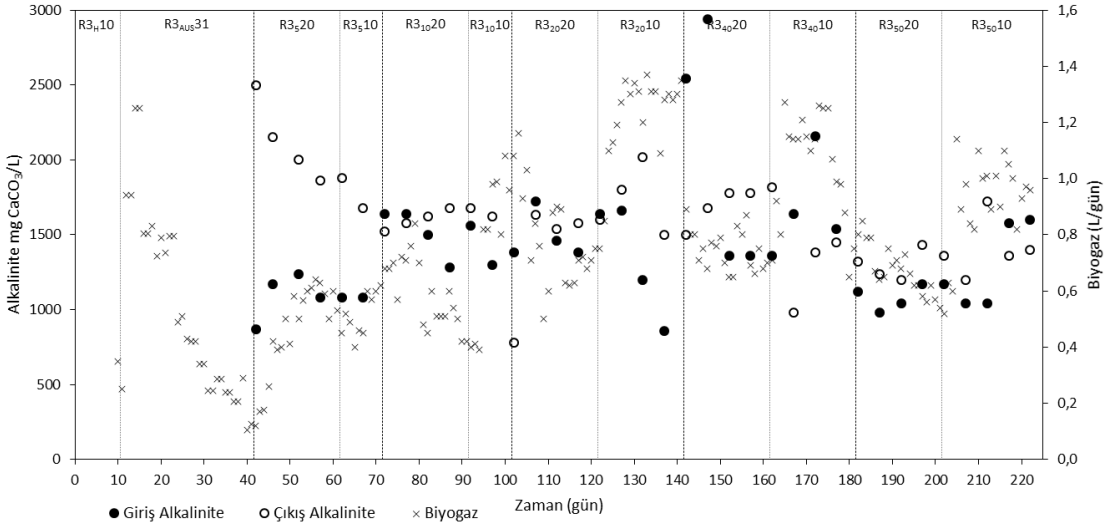
Çalışma boyunca HBS 10 gün periyotlarında R3 reaktörü için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.30-7.40 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerleri 7.23-7.94 arasında ölçülmüştür. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 6.90±0.38 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.52±0.17 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.54'te R3 reaktörünün girişinde ve çıkışında pH parametresinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.54 R3 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

Deneysel çalışmalarda R3 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değeri 870-2940 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 1200-2500 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyotları için giriş ortalama alkalinite değeri 1381±425 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1695±295 mg $CaCO_3$/L olarak tespit edilmiştir.

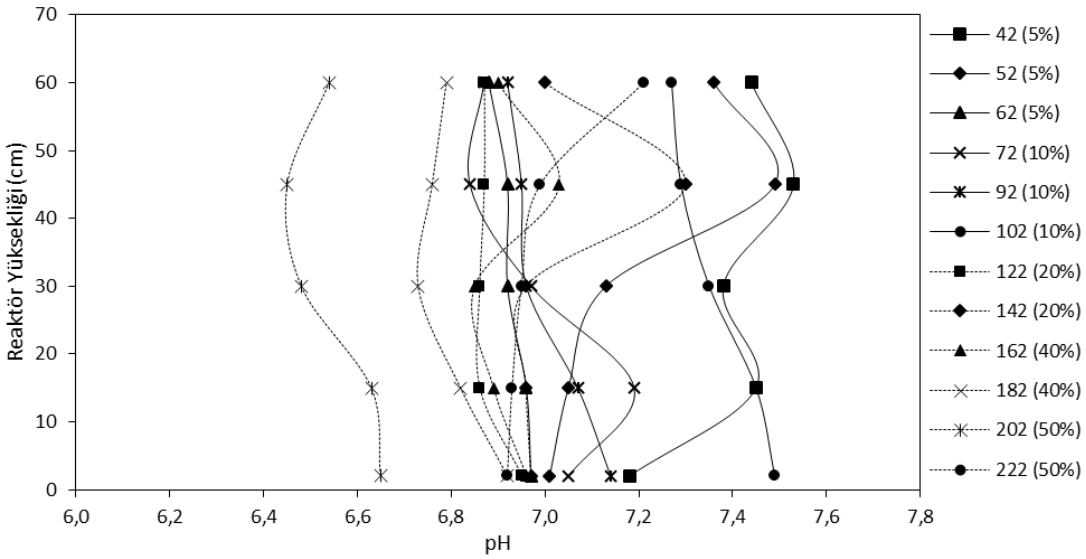
Deneysel çalışma boyunca R3 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değerleri 860-2540 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerleri 780-2020 mg $CaCO_3$/L arasında ölçülmüştür. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1449±450 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1483±285 mg $CaCO_3$/L olarak bulunmuştur. Şekil 5.55'te R3 reaktörü giriş ve çıkışında alkalinite parametresinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.55 R3 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

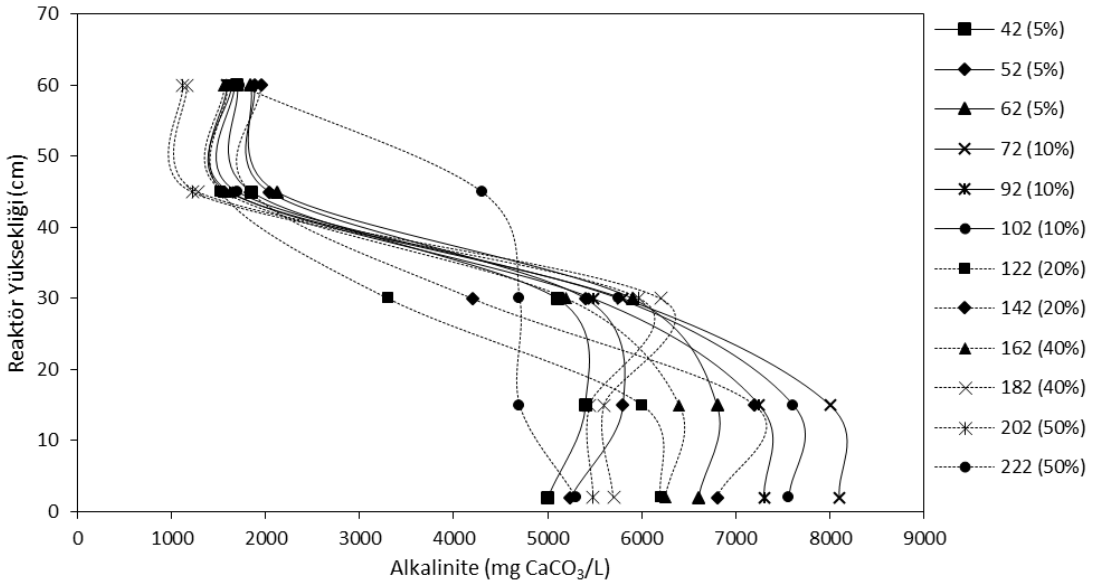
5.4.3.2 R3 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri

Çalışma süresince R3 reaktöründe pH 6.4-7.6 arasında bir değişim göstermiştir. 42, 52 ve 102. günlerde 7.2-7.6 aralığında bir değişim gözlemlenmiştir. Çalışmada R3 reaktörünün beslenmeye başlandığı ilk zamanlar olan 42. günden sonra pH 6.8-7.2 aralığında kalmıştır. Sadece 202. günde pH'ın 6.4-6.7 aralığına olduğu görülmüştür. Çalışmanın 202. gününden sonra pH seviyesini tekrar 6.8-7.2 aralığına getirmek için pH değeri 7.4'e gelene kadar besleme atığına NaOH ilavesi yapılmıştır. Şekil 5.56'da R3 reaktörü içerisindeki pH değerlerinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.56 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi

Çalışma süresince R3 reaktörü içerisinde alkalinite dağılımı çamur yoğunluğuna göre değişim göstermiştir. 1 ve 2. musluklarda alkalinite 4700-8100 mg $CaCO_3$/L arasında, 3. muslukta 3300-6200 mg $CaCO_3$/L arasında ve 4 ile 5. musluklarda ise 1100-2200 mg $CaCO_3$/L aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Reaktör içerisinde çamur seviyesi yükseldikçe alkalinite değeri de çamurun ulaştığı muslukta yükselmiştir. Ancak alkalinite parametresinin düştüğü durumlarda yani reaktörün kararsız olduğu durumlarda biyogaz üretim miktarının da gerilediği görülmüştür. Çalışmanın son günü olan 222. günde 4. muslukta alkalinite 4300 mg $CaCO_3$/L seviyelerinde ölçülmüştür. Şekil 5.57'de R3 reaktörü içerisindeki alkalinite parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.57 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi

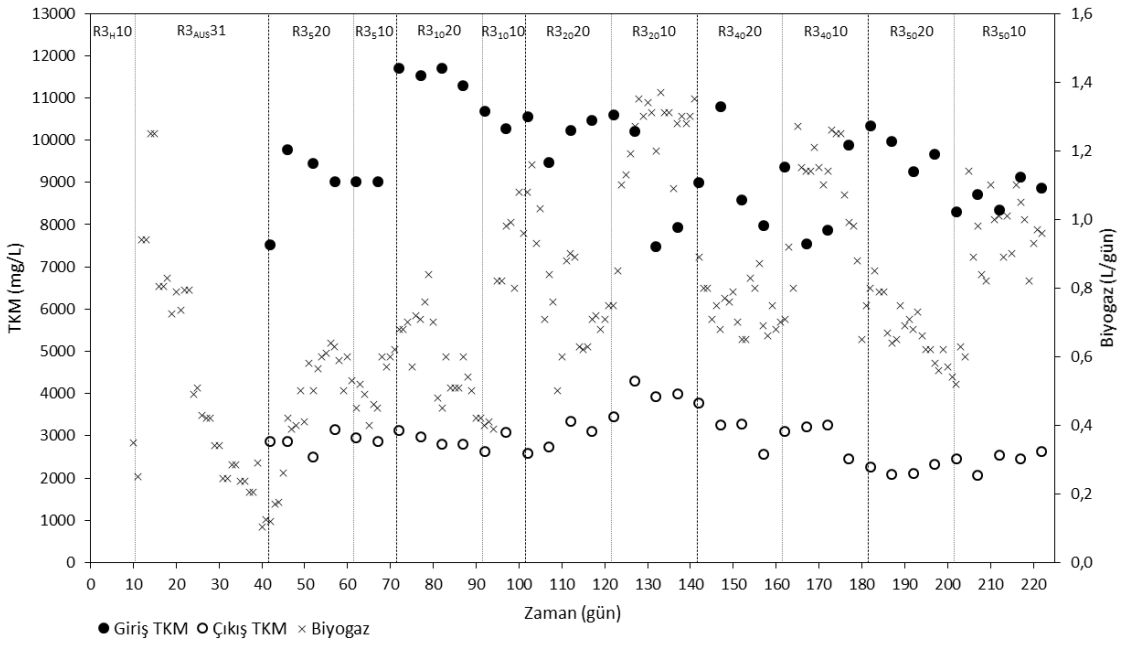
5.4.4 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

5.4.4.1 R3 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

R3 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı TKM değerleri 7518-11700 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 9743±1139 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 2100-3452 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 2829±388 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında TKM giderme verimi %61.7-

78.9 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %70.7±4.9 olarak tespit edilmiştir.

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında R3 reaktöründe besleme sıvısı TKM değerleri 7474-11696 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 9286±1176 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 2070-4292 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 3022±694 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında TKM giderme verimi %47.4-78.1 aralığında ölçülmüştür. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %66.2±9.8 olarak bulunmuştur. Şekil 5.58'de R3 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış TKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



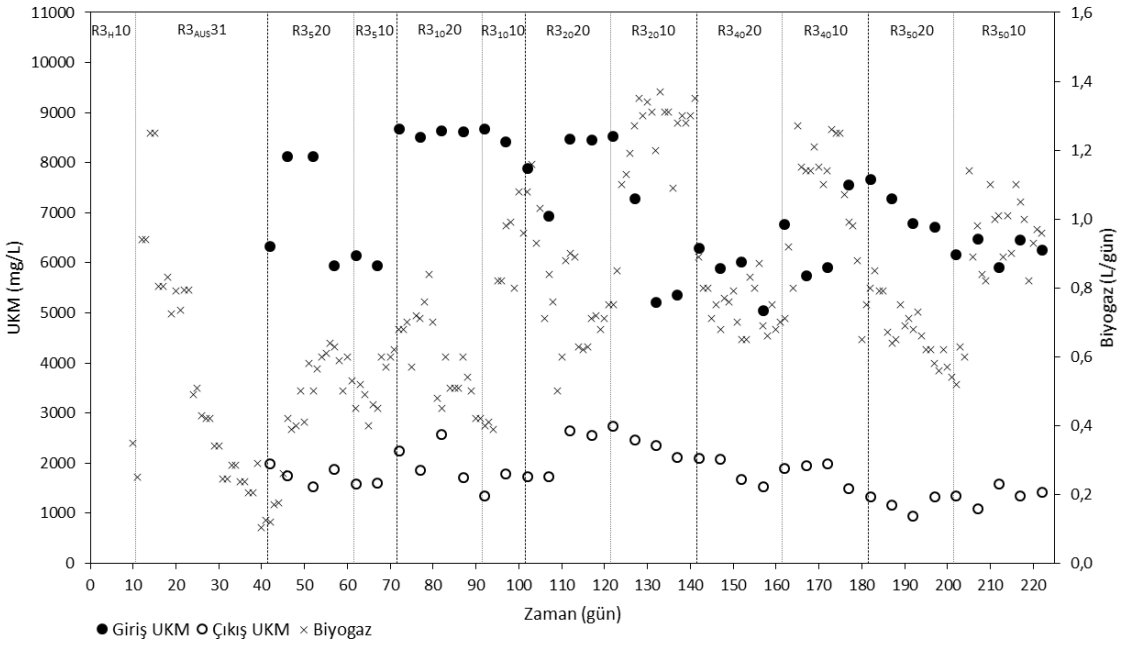
Şekil 5.58 R3 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

R3 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu periyotlarda besleme atığı UKM değerleri 5050-8670 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 7245±1173 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri 946-2746 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1801±494 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma

süresince HBS 20 gün periyotlarında UKM giderme verimi %64.6-86.1 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UKM giderme verimi %74.9±6.3 olarak tespit edilmiştir.

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında R3 reaktöründe besleme sıvısı UKM değerleri 5216-8682 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 6753±1087 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri 1094-2472 mg/L arasında değişim göstermiştir. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1777±416 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UKM giderme verimi %54.8-83.1 aralığında ölçülmüştür. Buna göre ortalama UKM giderme verimi %72.5±8.3 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.59'da R3 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UKM/TKM oranı sırasıyla 0.74 ve 0.73 olarak bulunmuştur. Reaktör çıkışında ise bu oranın sırasıyla 0.64 ve 0.59 olduğu görülmüştür.

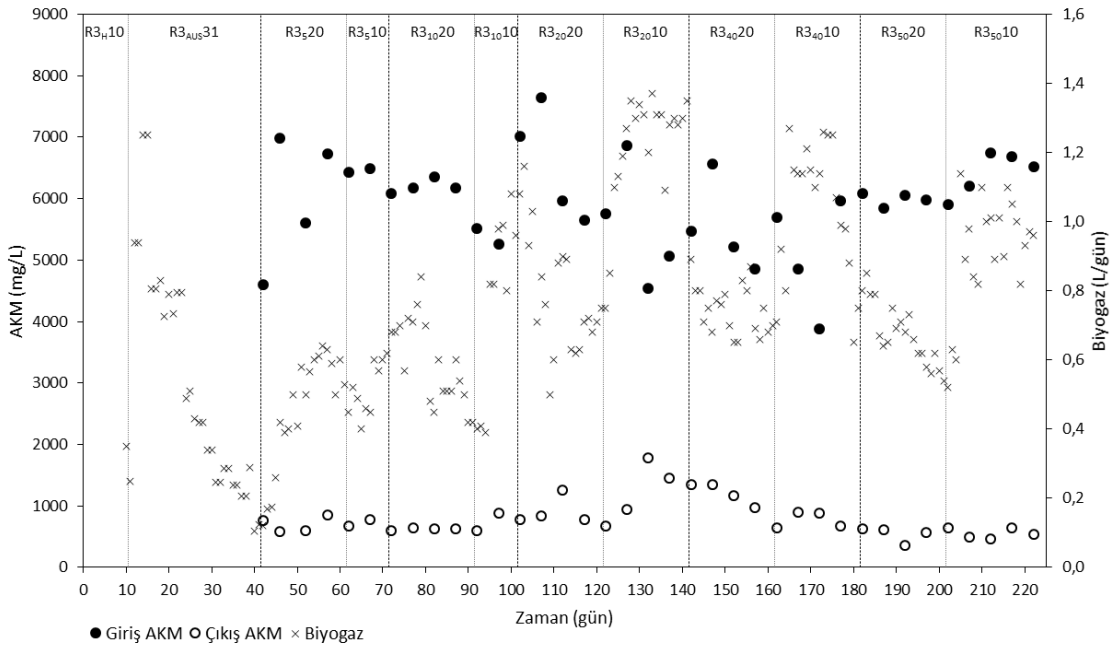


Şekil 5.59 R3 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

R3 reaktöründe 20 günlük HBS periyotlarında besleme sıvısı AKM değerleri 4600-7640 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama AKM

değeri 5984±687 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu AKM değerleri 356-1355 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 755±247 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında AKM giderme verimi %77.6-94.1 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama AKM giderme verimi %87.2±4.6 olarak tespit edilmiştir.

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında R3 reaktöründe giriş atığı AKM değerleri 3880-7010 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre besleme atığının ortalama AKM değeri 5925±909 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör çıkış suyu AKM değerleri 457-1780 mg/L arasında değerler almıştır. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 858±384 mg/L olarak tespit edilmiştir. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında AKM giderme verimi %60.8-93.2 aralığında belirlenmiştir. Buna göre ortalama AKM giderme veriminin %84.3±9 olduğu görülmüştür. Şekil 5.60'ta R3 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış AKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

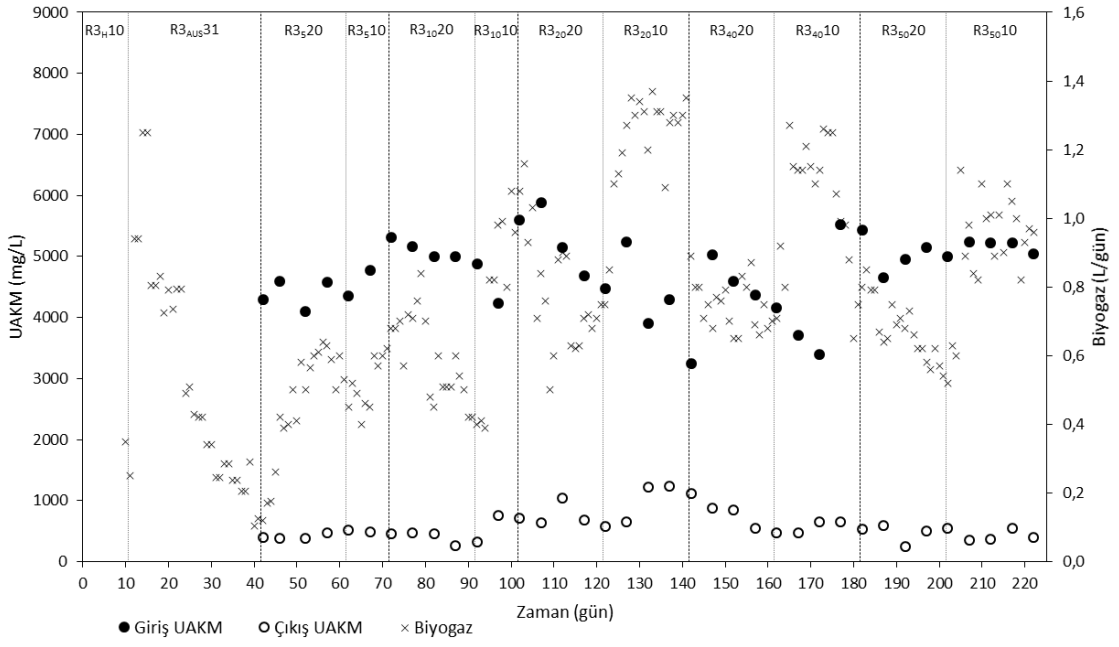


Şekil 5.60 R3 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında R3 reaktöründe giriş atığı UAKM değerleri 4100-5880 mg/L aralığında değerler almıştır. Bu değerlere

göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 4765±419 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör çıkış suyu UAKM değerleri 248-1035 mg/L arasında değerler almıştır. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 533±198 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UAKM giderme veriminin %79.9-95 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %88.8±3.9 olarak hesaplanmıştır.

R3 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UAKM değerleri 3250-5600 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 4781±773 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UAKM değerleri 348-1230 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 673±295 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %65.7-93.4 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %84.9±8.9 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.61'de R3 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UAKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

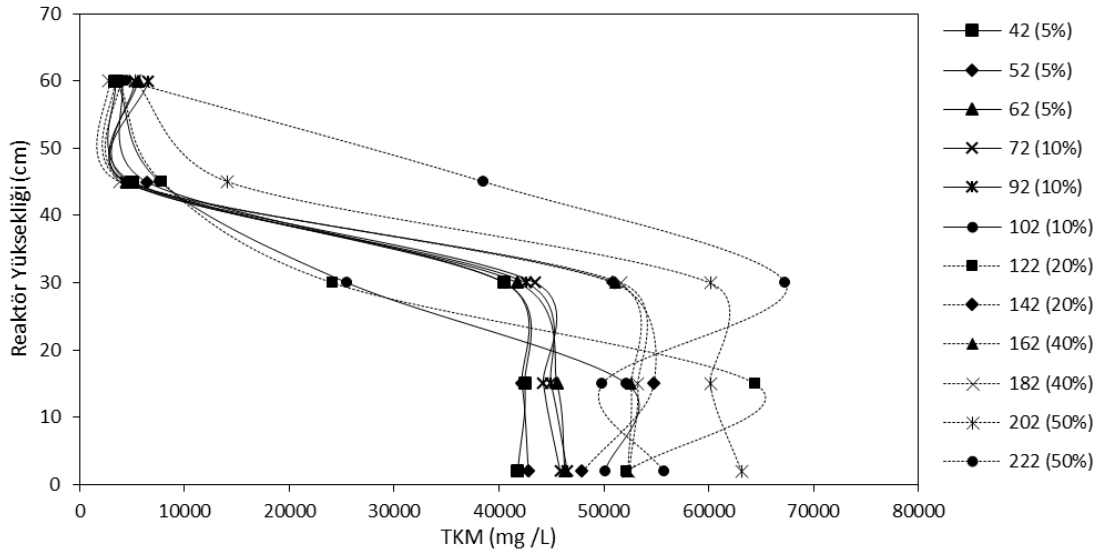


Şekil 5.61 R3 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UAKM/AKM oranı sırasıyla 0.80 ve 0.81 olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkışında ise bu oranın sırasıyla 0.71 ve 0.78 olduğu görülmüştür.

5.4.4.2 R3 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

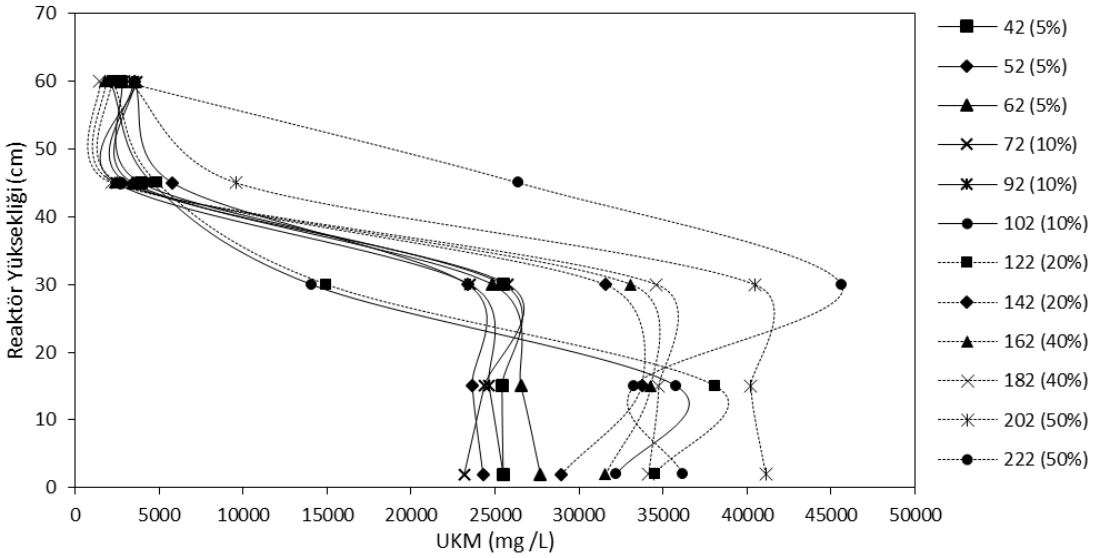
R3 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1 ve 2. musluklarda TKM değerleri 42800-64500 mg/L arasında değişim göstermiştir. 3. muslukta TKM konsantrasyonu 42 ve 92. günler arasında 40400-42600 mg/L aralığında, 102 ve 122. günlerde 24000 mg/L seviyelerinde, daha sonra 142 ve 182. günler arasında 51000 mg/L civarında, 202. günde 60200 mg/L ve 222. günde ise 67300 mg/L civarında ölçülmüştür. 4. muslukta TKM konsantrasyonu 202. günde 14200 mg/L, 222. günde 38600 mg/L civarında diğer günlerde 3800-7900 mg/L arasında ölçülmüştür. 5. muslukta TKM konsantrasyonu 2800-6600 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Şekil 5.62'de R3 içerisindeki TKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.62 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi

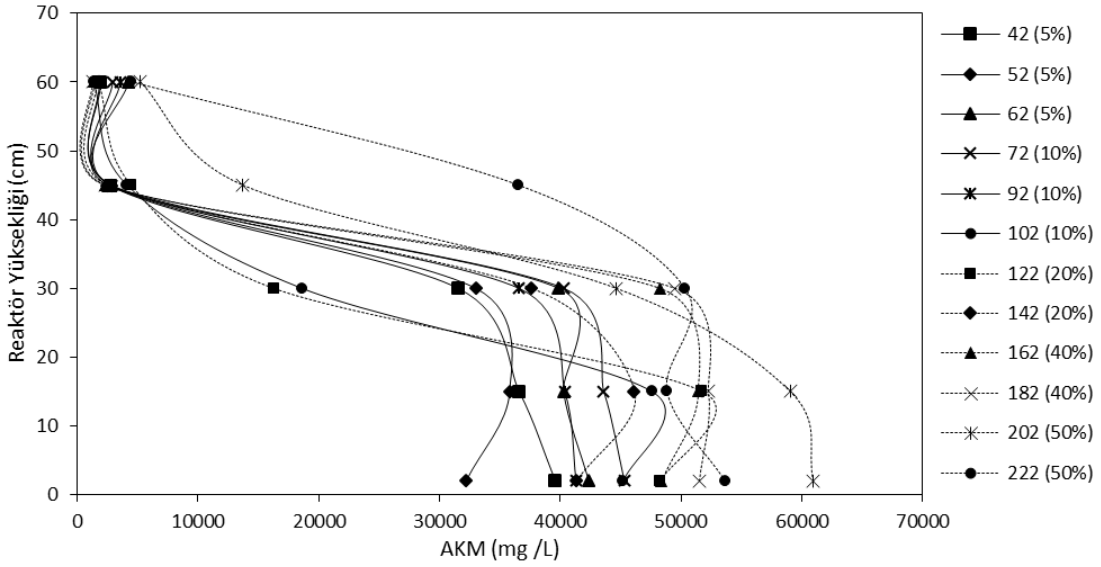
42-222. günler arasında R3 reaktörü içerisinde 1 ve 2. musluklarda UKM değerleri 23600-41200 mg/L arasında ölçülmüştür. 3. muslukta UKM konsantrasyonu 42 ve 92. günler arasında 23500-25800 mg/L aralığında, 102 ve 122. günlerde 15000 mg/L seviyelerinde, daha sonra 142 ve 182. günler arasında 31500-34600 mg/L aralığında, 202. günde 40500 mg/L ve 222. günde 45600 mg/L civarında ölçülmüştür. 4. muslukta UKM

konsantrasyonu 202. günde 9600 mg/L ve 222. günde 26400 mg/L civarında, diğer günlerde 2100-5800 mg/L arasında ölçülmüştür. 5. muslukta UKM konsantrasyonu 1400-3200 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Şekil 5.63'te R3 içerisindeki UKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



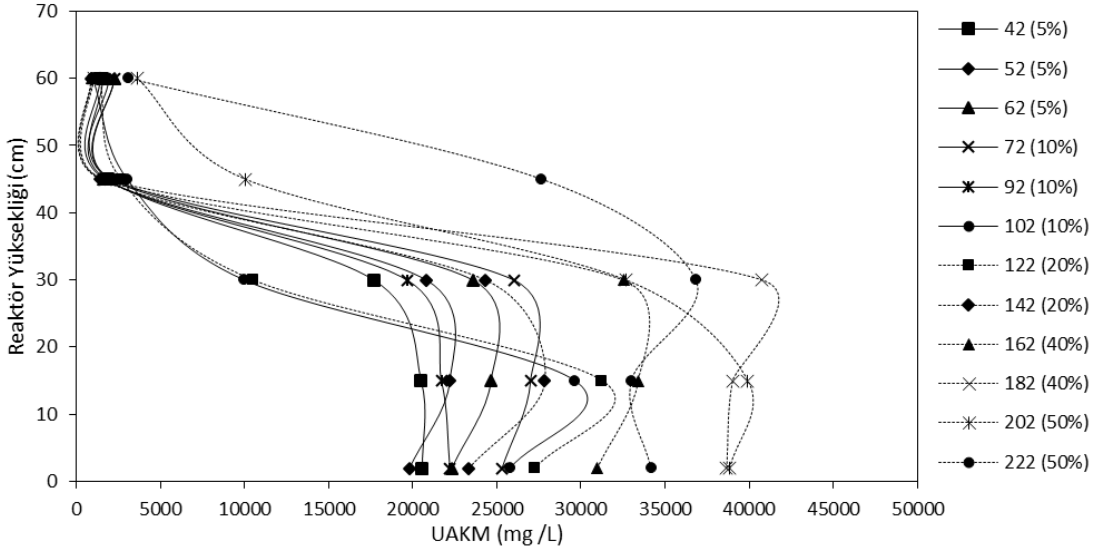
Şekil 5.63 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi

Çalışma boyunca R3 reaktörü içerisinde 1 ve 2. musluklarda AKM değerleri 202. günde 60000 mg/L civarında diğer ölçüm zamanlarında ise 32200-53700 mg/L arasında değişim göstermiştir. 3. muslukta 102 ve 122. günlerde AKM 17000 mg/L civarında iken diğer ölçüm zamanlarında 31500-50300 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta AKM değeri 202. günde 13700 mg/L ve 222. günde 36500 mg/L civarında, diğer zamanlarda ise 2200-4500 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta AKM konsantrasyonu 222. günde 6700 mg/L civarında ve diğer zamanlarda ise 1200-4500 mg/L aralığında ölçülmüştür. Şekil 5.64'te R3 içerisindeki AKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.64 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi

R3 reaktörü içerisinde deneysel çalışma boyunca 1 ve 2. musluklarda UAKM değerleri 19800-39900 mg/L arasında değişim göstermiştir. 3. muslukta 102 ve 122. günlerde UAKM 10500 mg/L civarında, 182. günde 40800 mg/L iken diğer ölçüm zamanlarında 17600-36800 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta UAKM değeri 202. günde 10000 mg/L ve 222. günde 27700 mg/L civarında, diğer zamanlarda ise 1700-2600 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta UAKM konsantrasyonu 1000-3100 mg/L aralığında ölçülmüştür. Şekil 5.65'te R3 içerisindeki UAKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



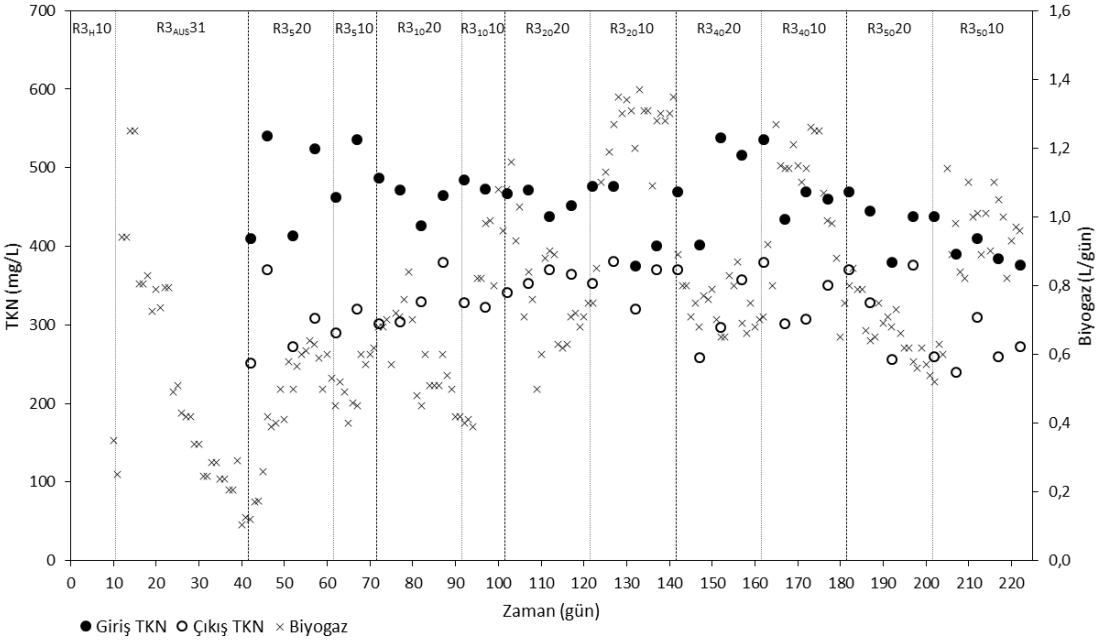
Şekil 5.65 R3 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi

5.4.5 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri

5.4.5.1 R3 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri

R3 reaktöründe tüm deneysel çalışma incelendiğinde HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TKN değerleri 380-540 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 252-380 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 463±47 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 323±45 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %14.2-44.8 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %30.1±8.6 olarak tespit edilmiştir.

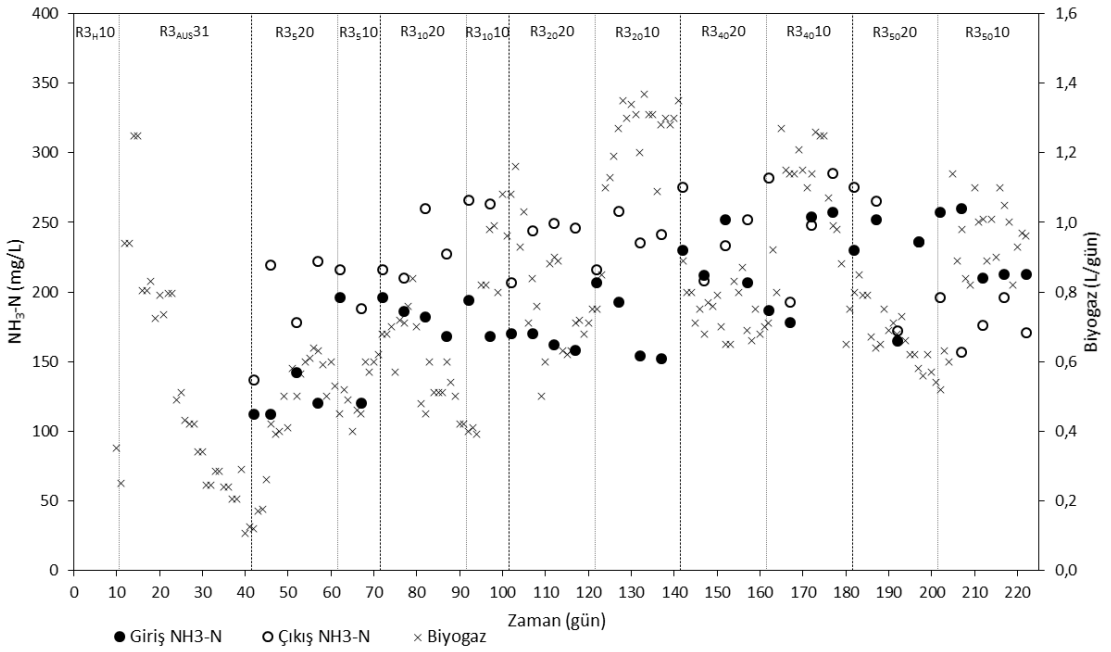
Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R3 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısının TKN değerleri 375-536 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 240-381 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 443±49 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 322±43 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %7.7-40.3 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %27.1±9 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.66'da tüm deneysel çalışma boyunca R3 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TKN değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.66 R3 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışma boyunca R3 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısının NH_3-N değerleri 112-257 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 137-282 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 185±43 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri 225±35 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre NH_3-N konsantrasyonu bazı durumlarda %23.7 oranında azalırken bazı durumlarda %95.5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu verilere göre ortalama NH_3-N konsantrasyon artışı %27.3±30.2 olarak tespit edilmiştir.

Tüm deneysel süreç incelendiğinde R3 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının NH_3-N değerleri 120-260 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 157-285 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 201±42 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri 226±42 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre NH_3-N konsantrasyon artışı %-39.6-58.6 arasında değişmiş olup ortalama konsantrasyon artışı %16.4±29.7 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.67'de tüm deneysel çalışma boyunca R3 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış NH_3-N değerlerinin değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



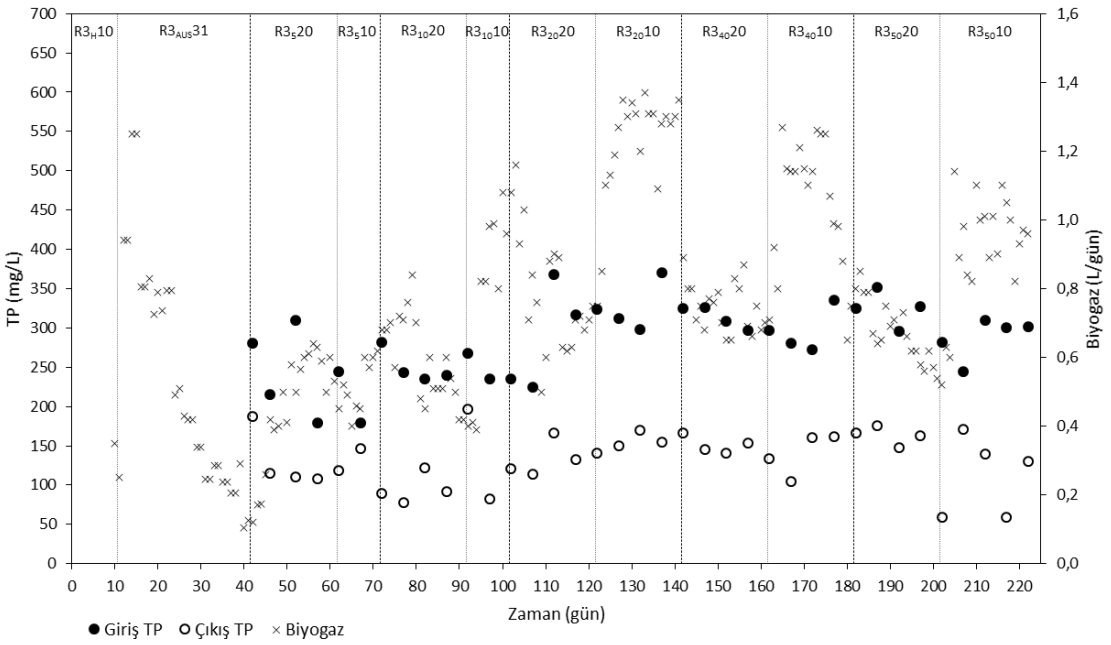
Şekil 5.67 R3 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.4.6 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri

5.4.6.1 R3 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri

Deneysel çalışma boyunca R3 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TP değerleri 179-368 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 59-197 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 283±48 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 133±35 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TP giderim verimi %26.5-79.1 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %52.4±11.3 olarak tespit edilmiştir.

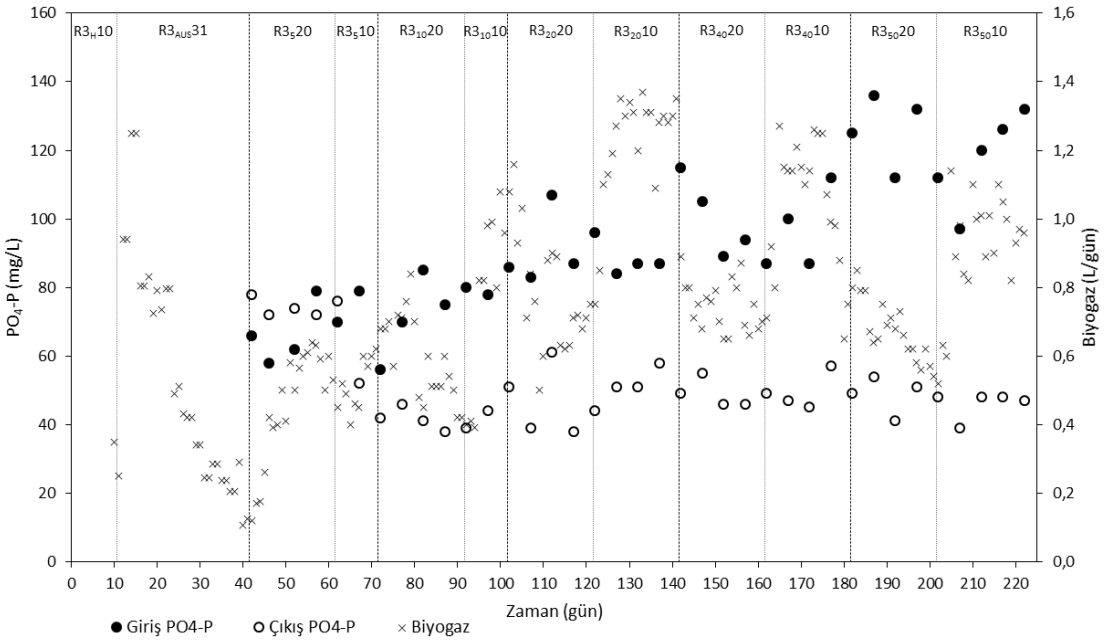
R3 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında deneysel süreç boyunca besleme atığının TP değerleri 179-370 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 59-171 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme atığının ortalama TP değeri 288±48 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 138±35 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TP giderim verimi %18.4-80.3 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %51.8±14.8 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.68'de tüm deneysel çalışma boyunca R3 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TP değerlerinin değişimi ve biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.68 R3 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

HBS 20 gün periyotlarında çalışma boyunca R3 reaktöründe besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 58-136 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 38-78 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 90±21 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 53±14 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre PO_4-P giderim verimi %-24.1-63.4 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %36.4±29.2 olarak tespit edilmiştir.

Deneysel süreç boyunca R3 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme atığı PO_4-P değerleri 56-132 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 39-58 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme atığının ortalama PO_4-P değeri 98±22 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 49±5 mg/L olarak hesaplanmıştır. Buna göre PO_4-P giderim verimi %25-64.4 arasında ölçülmüş olup ortalama giderim verimi %48.3±12 olarak bulunmuştur. Şekil 5.69'da tüm deneysel çalışma boyunca R3 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış PO_4-P değerlerinin değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



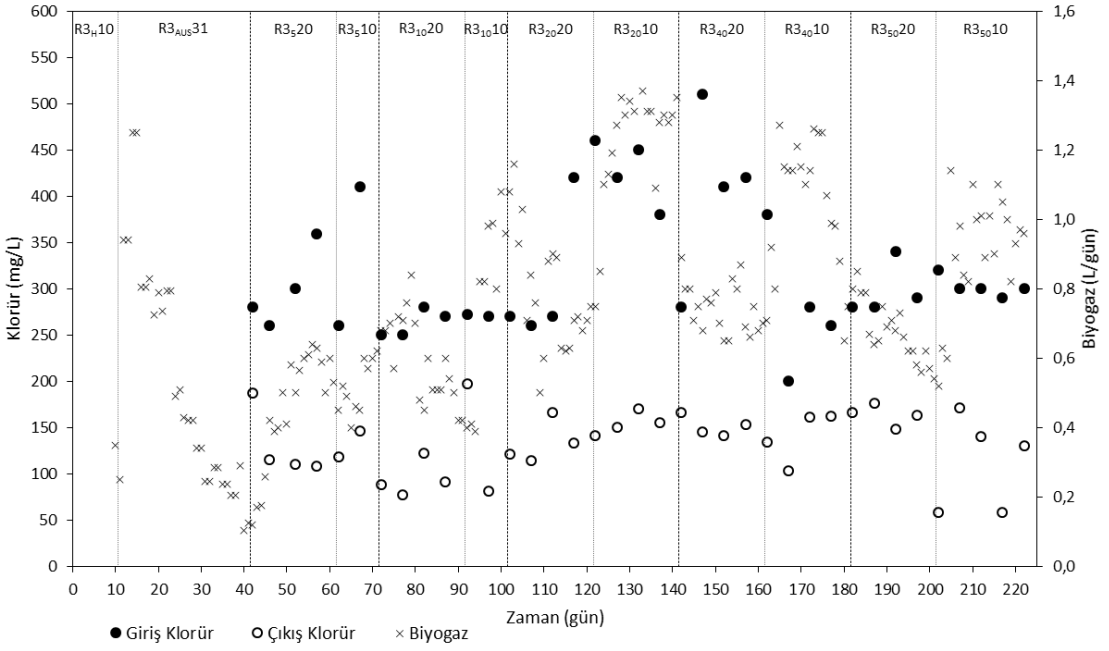
Şekil 5.69 R3 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.4.7 BBHG, Çim Atıkları, Evsel-Endüstriyel Organik Atıklar ve Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R3 Reaktöründe Klorür Değişimleri

5.4.7.1 R3 Reaktörü Klorür Değişimleri

Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında yapılan klorür analizlerinde klorür değerlerinin çok fazla değişmediği tespit edilmiştir. R3 reaktörü besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 250-510 mg/L ve reaktör çıkışında 145-320 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama klorür değeri besleme sıvısında 328±76 mg/L, reaktör çıkışında 237±57 mg/L olduğu belirlenmiştir.

HBS 10 gün periyotlarında R3 reaktörü besleme atığında klorür konsantrasyonu 250-450 mg/L ve reaktör çıkışında 165-300 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre ortalama klorür değeri besleme atığında 316±65 mg/L, reaktör çıkışında 246±50 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.70'te deneysel süreç boyunca R3 reaktöründe ölçülen giriş ve çıkış klorür değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.70 R3 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.5 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktörü

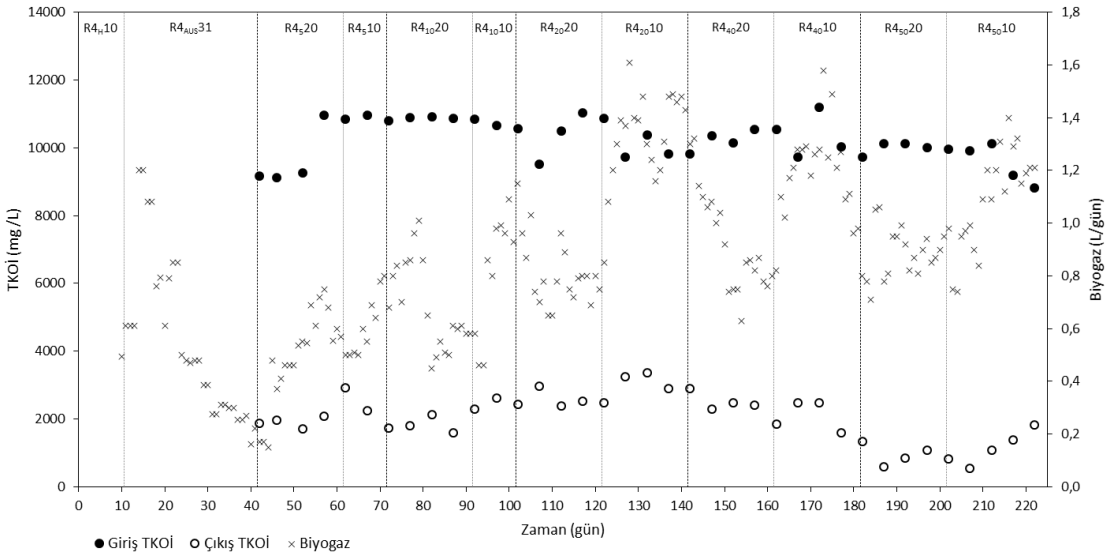
5.5.1 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

5.5.1.1 R4 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

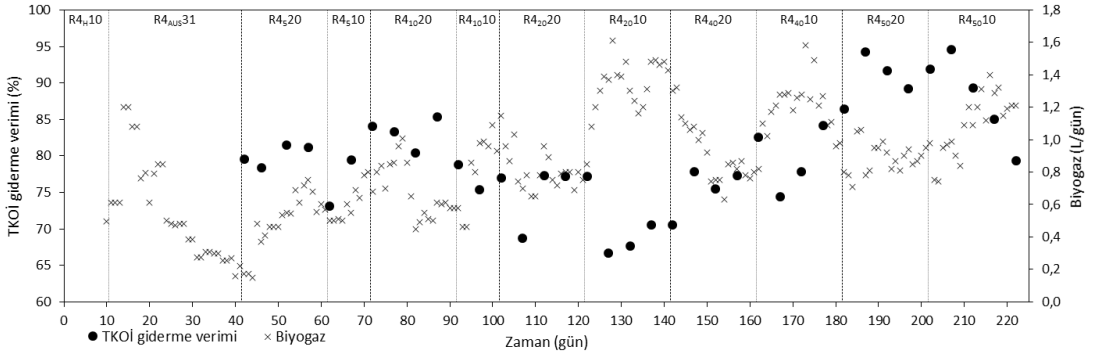
20 günlük HBS için R4 reaktöründe tüm çalışma boyunca giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 9115-11027 ve 582-2973 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.71), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 10315±623 ve 1956±667 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.456-0.551 (ortalama; 0.516) g TKOİ/(L.gün) arasında değişmiştir. Şekil 5.72'de 20 günlük HBS için R4 TKOİ giderme verimi değişimi görülmektedir. Giderme verimi %69-94 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %81±6 olarak bulunmuştur.

R4 reaktöründe deneysel çalışma boyunca 10 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 8810-11200 ve 540-3354 mg/L aralığında değerler almış olup (Şekil 5.71), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 10090±643 ve 2132±812 mg/L olduğu bulunmuştur. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.881-1.12 (ortalama; 1.009) g TKOİ/(L.gün)

arasında değişmiştir. Şekil 5.72'de 10 günlük HBS için R4 TKOİ giderme verimleri görülmektedir. Giderme verimi %67-95 aralığında ölçülmüş olup, ortalama giderme verimi %79±8 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.71 R4 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi



Şekil 5.72 R4 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışmanın tek kademeli parçalama dönemi olan 42-142. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne %5, 10 ve 20 artan oranlarda evsel-endüstriyel organik atık karışımı ilave edilmiştir. TKOİ giriş-çıkış değişimleri ve giderme verimi incelendiğinde (Şekil 5.71 - Şekil 5.72) $R4_5$20 periyodunda 9000 mg TKOİ/L civarında besleme yapıldığında giderme verimi %80'ler civarındayken 11000 mg TKOİ/L'ye yakın değerlerde bir besleme yapıldığında giderme verimi gerileyerek %75'lerin altına düşmüştür. Beslemedeki bu değişimin günlük biyogaz üretimindeki düzenli artışı durdurduğu düşünülmektedir. $R4_5$10 periyodunda TKOİ giderme veriminin %75'lerin altından %80-85 aralığına çıkmıştır. Çalışmanın $R4_5$20 döneminde günlük

biyogaz üretimi 0.75 L/gün seviyelerine çıkmış, giriş sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarına yükseldiğinde ise biyogaz üretimi 0.5 L/gün seviyelerine düşmüştür. $R4_5$10 periyodunun sonlarına doğru biyogaz üretimi 0.8 L/gün seviyelerine yükselmiştir.

$R4_{10}$20 periyodunun başlarında TKOİ giderme verimi %85'ler civarındayken periyodun 82. gününde %80'ler seviyesine düşmüştür. Bu periyodun başlangıcında 0.8 L/gün seviyelerinde olan biyogaz üretimi 82. günde 0.5 L/gün seviyelerine düşerek periyodun sonuna kadar bu şekilde devam etmiştir. $R4_{10}$10 periyodunda TKOİ giderme verimi %75-80 arasında ölçülmüştür. Periyodun başlangıcında 0.5 L/gün seviyelerinde olan biyogaz üretimi artarak periyot sonunda biyogaz üretimi 1.1 L/gün seviyelerine çıkmıştır.

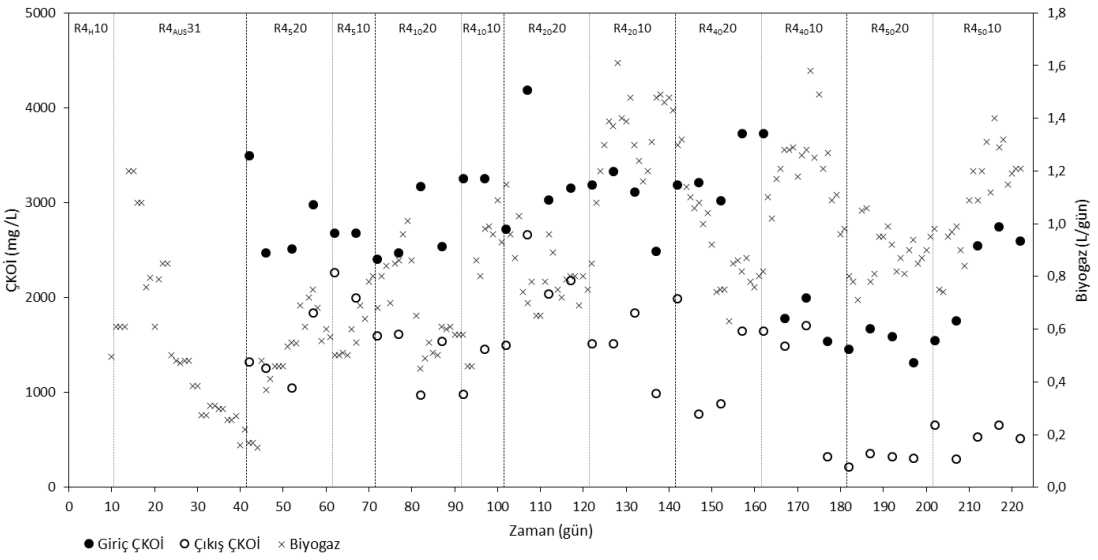
$R4_{20}$20 periyodunda TKOİ giderme verimi 107. günde %70 seviyelerinde diğer ölçüm günlerinde ise %75 seviyelerinde ölçülmüştür. Bu periyotta biyogaz üretimi 1.1 L/gün'den 0.75 L/gün seviyelerine gerilemiştir. $R4_{20}$10 periyodunda TKOİ giderme verimi %65-70 aralığında ölçülmüştür. Bu periyotta biyogaz üretimi 0.75 L/gün seviyelerinden 1.4 L/gün seviyelerine yükselmiş ve sadece 2-3 gün 1.2 L/gün seviyelerine düşmüştür.

Çalışmanın iki kademeli parçalama dönemi olan 142-222. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne sırasıyla %40 ve %50 oranlarında evsel-endüstriyel organik atık karışımı ilave edilmiştir. $R4_{40}$20 periyodu başlangıcında 1.3 L/gün seviyelerinde olan biyogaz üretimi 0.75 L/gün seviyelerine düşmüştür. Bu periyotta TKOİ giderim verimi %75-80 aralığında gerçekleşmiştir. $R4_{40}$10 periyodunda biyogaz üretimi önce 1.2 L/gün seviyesine çıkmış daha sonra 0.7 L/gün seviyelerine kadar düşmüştür. Bu periyotta TKOİ giderim verimi 157. güne kadar %75-80 aralığında iken 162. günde %83 olarak ölçülmüştür. $R4_{40}$ döneminde ikincil parçalamanın sistem performansına olumsuz bir etkisinin olmadığı bununla birlikte $R4_{40}$10 periyodunda TKOİ giderimine artı etkilerinin olduğu düşünülmektedir.

$R4_{50}$20 periyodunda TKOİ giderim verimi %90-95 aralığında olmuş ve bu periyotta biyogaz üretimi 0.9 L/gün civarlarında ölçülmüştür. $R4_{50}$10 periyodunda biyogaz üretimi 0.9 L/gün seviyelerinden 1.3 L/ seviyelerine kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu periyotta TKOİ giderme verimi 202 ve 207. günlerde %90-95 aralığında ölçülmüş ve 222. güne kadar TKOİ giderim verimi %80 seviyelerine kadar düşmüştür.

Tüm deneysel süreç boyunca 20 günlük HBS için ÇKOİ değeri R4 reaktörünün giriş ve çıkışında sırasıyla 1315-4189 ve 305-2659 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.73), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2807±773 ve 1324±664 mg/L'dir. Giderme verimi %16-80 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %54±18 olarak bulunmuştur.

10 günlük HBS için tüm deneysel süreç boyunca ÇKOİ değeri R4 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1459-3330 ve 216-1994 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.73), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2521±601 ve 1141±659 mg/L'dir. Giderme verimi %15-85 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %53±25 olarak bulunmuştur.



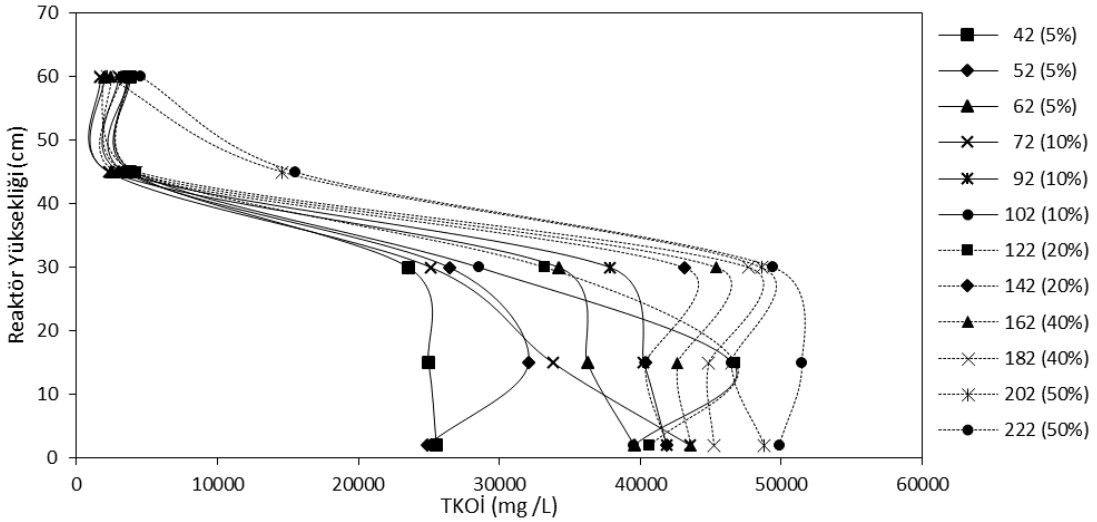
Şekil 5.73 R4 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Buna göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama ÇKOİ/TKOİ oranı sırasıyla 0.27 ve 0.25, reaktör çıkışında ise bu oranın sırasıyla 0.68 ve 0.54 olduğu bulunmuştur. R4 reaktöründe 42. günde 3500 mg/L civarında 107. günde 4200 mg/L civarında ölçülen giriş ÇKOİ değeri bu değerler haricinde 42-142. günler arasında 2500 mg/L'den 3200 mg/L değerine kadar yükselmiştir. 142-222. günler arasında $R4_{40}20$ periyodunda 3000-4000 mg/L arasında değişen giriş ÇKOİ değeri $R4_{40}10$ ve $R4_{50}20$ periyotlarında 1300-2000 mg/L arsında ölçülmüştür. $R4_{50}10$ periyodunda giriş ÇKOİ değeri 1500 mg/L seviyelerinden 2700 mg/L seviyelerine yükselmiştir. Özellikle $R4_{50}$ döneminde çıkış ÇKOİ değerinin 600 mg/L'den düşük olduğu görülmüştür.

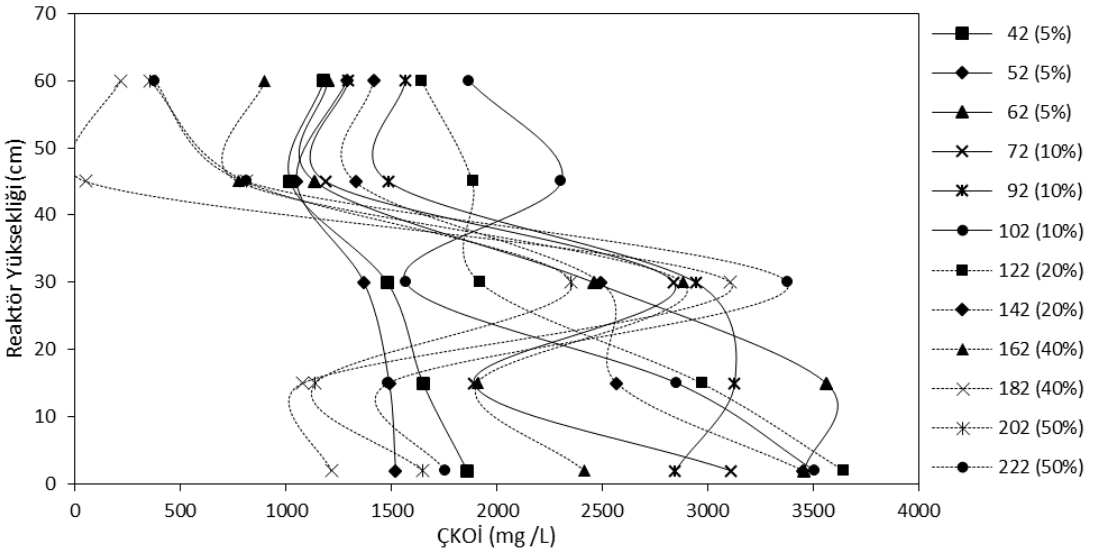
5.5.1.2 R4 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

Şekil 5.74 incelendiğinde hazırlık ve aşı uyum sürecinden sonra 42. günde beslenmeye başlanan R4 reaktöründe 1, 2 ve 3. musluklarda TKOİ değerinin yaklaşık 25000 mg/L civarında, 4 ve 5. musluklarda ise 4000 mg/L civarında olduğu görülmektedir. 1, 2 ve 3. numune muslukları seviyelerinde 62. günün sonunda TKOİ değerinin önemli bir artışla 36000 mg/L seviyesini aştığı görülmektedir. Reaktör içinde ilk üç musluktan alınan numunelerde TKOİ değerlerinin genellikle 40000-50000 mg/L arasında olduğu görülmüştür. 202 ve 222. günlerde 4. muslukta TKOİ değerinin 15000 mg/L seviyelerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.75 incelendiğinde musluklar arasında ÇKOİ değeri bakımından önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Reaktör içerisinde yüksek TKOİ değerlerinin olmasına rağmen ÇKOİ değerlerinin 3700 mg/L seviyelerini geçmediği görülmüştür.



Şekil 5.74 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R4 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi



Şekil 5.75 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R4 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi

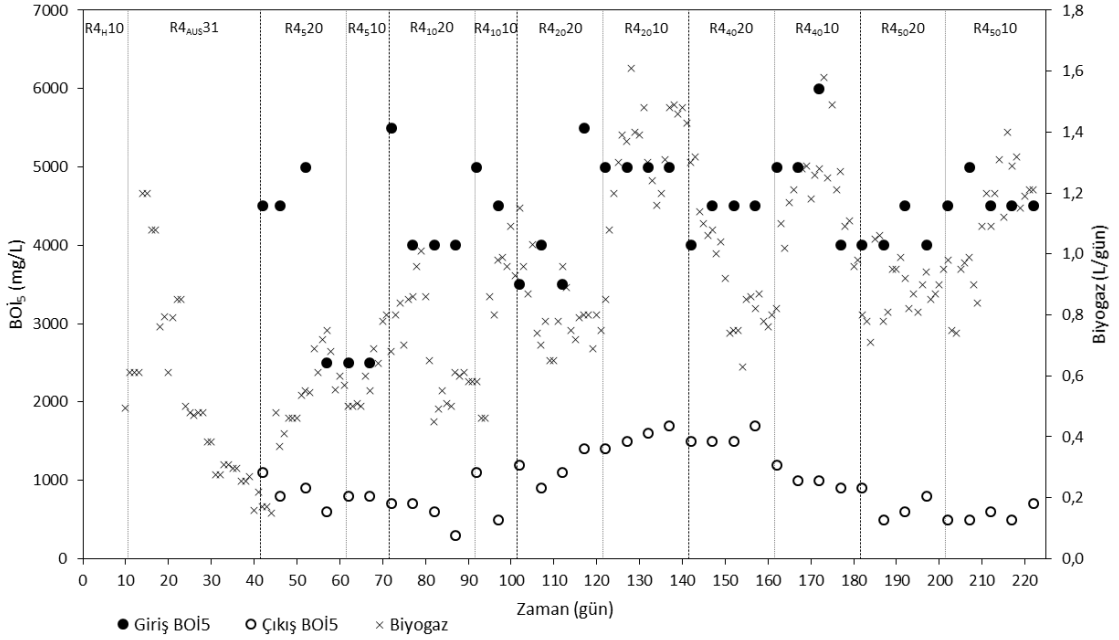
5.5.2 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri

5.5.2.1 R4 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri

Deneysel çalışma süresince 20 günlük HBS için R4 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 2500-5500 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 300-1700 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4262±752 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 952±389 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %62.2-92.5 arasında değişmekte olup ortalama $BOİ_5$ giderme verimi %77.6±8.2 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.41 ve reaktör çıkışında ise bu değer 0.49 olarak hesaplanmıştır.

10 günlük HBS için çalışma süresince R4 reaktörü giriş atığı $BOİ_5$ değerlerinin 2500-6000 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 500-1700 mg/L aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bu verilere göre giriş atığı ortalama $BOİ_5$ değeri 4500±845 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 973±425 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışmalarda $BOİ_5$ giderme verimi %62.5-90 arasında bulunmuş olup ortalama $BOİ_5$ giderme veriminin %77.8±9.7 olduğu belirlenmiştir. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.45 olarak

hesaplanmıştır. Reaktör çıkışında ise bu değerin 0.46 olduğu görülmüştür. Şekil 5.76'da R4 reaktörü giriş ve çıkışında $BOİ_5$ parametresinin zamanla değişimi ile günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



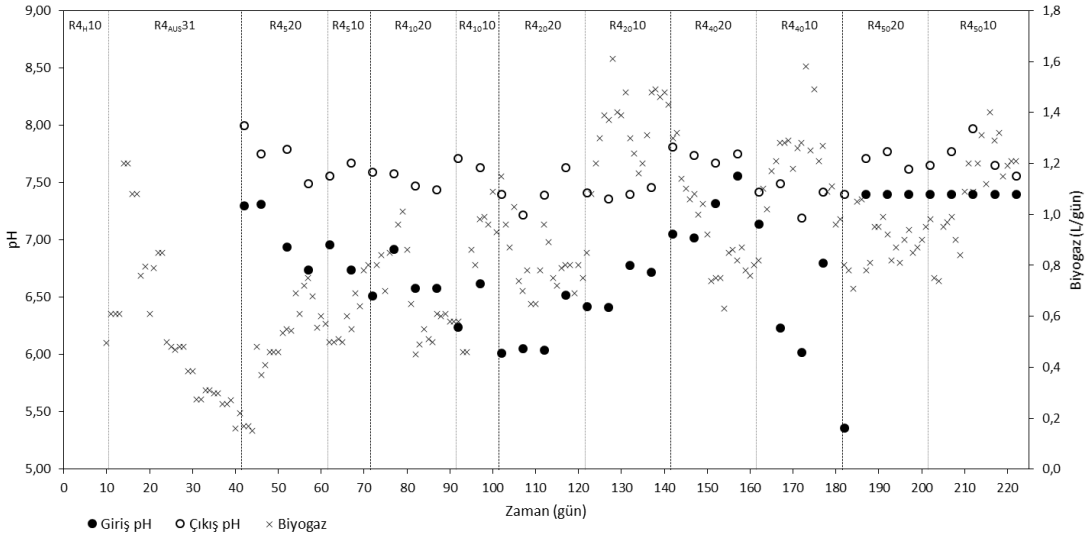
Şekil 5.76 R4 giriş-çıkış $BOİ_5$ değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

5.5.3 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri

5.5.3.1 R4 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri

Çalışma boyunca R4 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.04-7.56 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerlerinin 7.22-8.0 arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 6.92±0.48 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.61±0.18 olarak tespit edilmiştir.

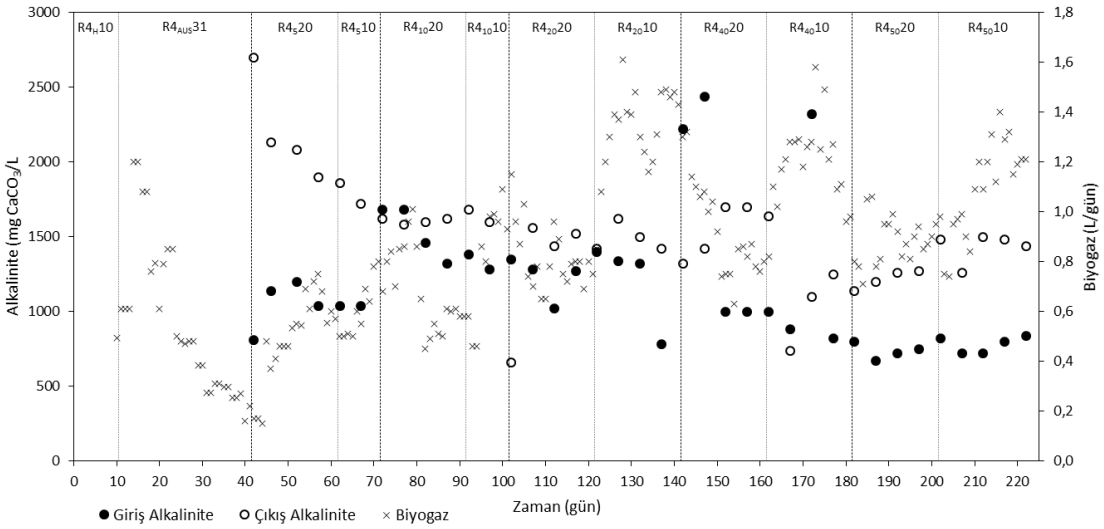
HBS 10 gün periyotlarında çalışma boyunca R4 reaktörü için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 5.36-7.40 arasında ölçülmüş olup çıkış suyu pH değerlerinin 7.19-7.97 arasında olduğu tespit edilmiştir. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama pH değeri 6.71±0.60 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.55±0.20 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.77'de R4 reaktörünün giriş ve çıkışında pH parametresinin zamanla değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.77 R4 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

HBS 20 gün periyotlarında çalışma boyunca R4 reaktörü için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değeri 670-2440 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 1200-2700 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1164±395 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1655±342 mg $CaCO_3$/L olarak bulunmuştur.

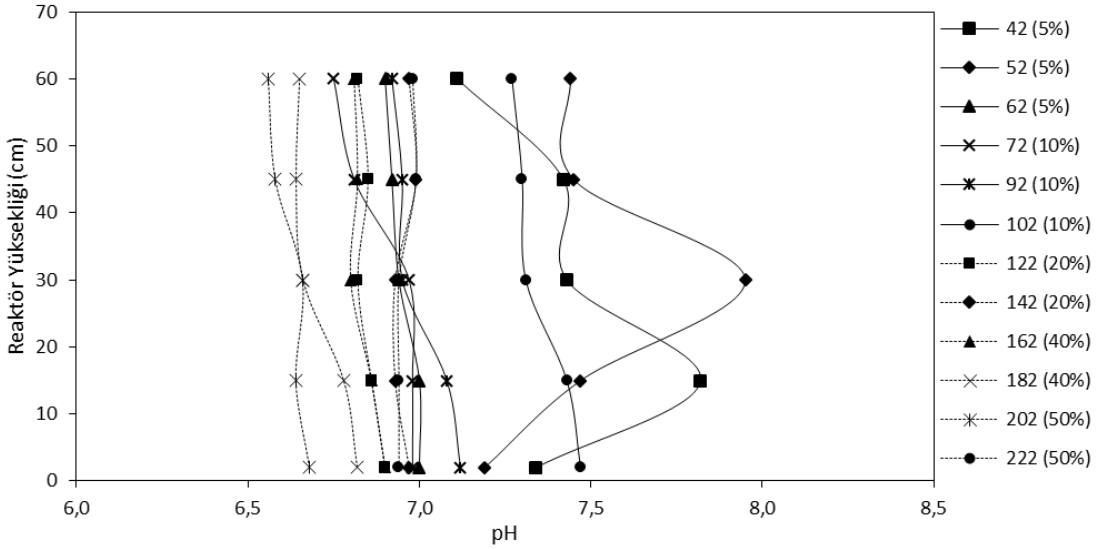
Deneysel çalışma boyunca R4 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan giriş atığının alkalinite değeri 720-2320 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 660-1720 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterdiği görülmüştür. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1202±524 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1375±269 mg $CaCO_3$/L olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.78'de R4 reaktörü giriş ve çıkışta alkalinite parametresinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.78 R4 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve biyogaz üretimi

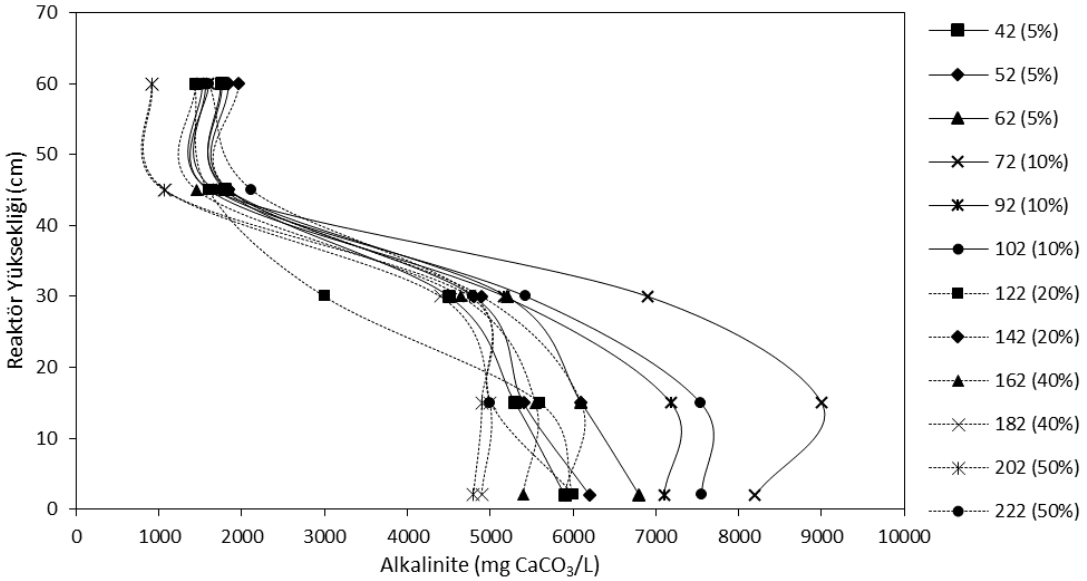
5.5.3.2 R4 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri

Çalışma süresince R4 reaktöründe pH 6.5-8.0 arasında bir değişim göstermiştir. 42 ve 52. günlerde pH değerlerinde 7.1-8.0 aralığında bir değişim gözlemlenmiştir. Çalışmada R4 reaktöründe 52. ve 102. gün ölçümlerinde pH 7.2-7.5 aralığında diğer ölçüm zamanlarında ise 6.5-7.2 aralığında kalmıştır. 182 ve 202. günlerde ise pH'ın 6.5-6.8 aralığında olduğu görülmüştür. Çalışmanın 202. gününden sonra pH seviyesini tekrar 6.8-7.2 aralığına getirmek için pH değeri 7.4'e gelene kadar besleme atığına NaOH ilavesi yapılmıştır. Şekil 5.79'da R4 reaktörü içerisindeki pH parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.79 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi

Deneysel çalışma boyunca R4 reaktörü içerisinde alkalinite dağılımı çamur yoğunluğuna göre değişim göstermiştir. 1 ve 2. musluklarda alkalinite 4800-9000 mg $CaCO_3$/L arasında, 3. muslukta 3000-5500 mg $CaCO_3$/L arasında ve 4 ile 5. musluklarda ise 900-2200 mg $CaCO_3$/L aralığında değiştiği görülmüştür. Çalışmanın 72, 92 ve 102. günleri arasında 1 ve 2. musluklarda alkalinitenin 7000-9000 mg $CaCO_3$/L arasında diğer zamanlarda ise 4800-5000 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. 3. muslukta alkalinite 72. günde 6900 mg $CaCO_3$/L, 122. günde 3000 mg $CaCO_3$/L, diğer zamanlarda ise 4400-5500 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. Şekil 5.80'de R4 reaktörü içerisindeki alkalinite parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.80 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi

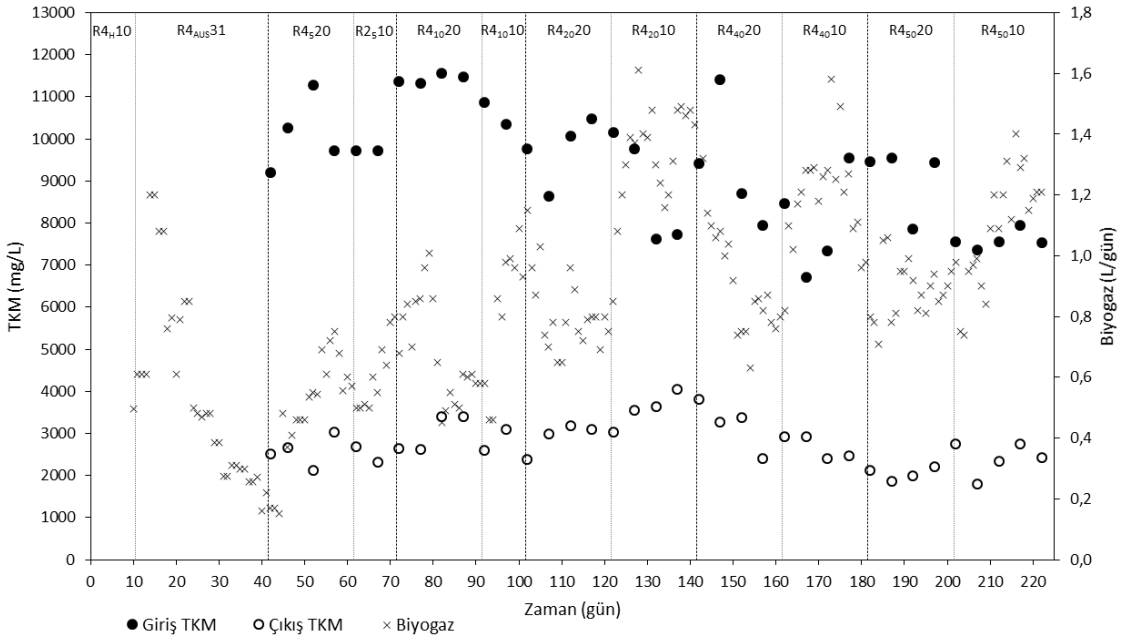
5.5.4 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

5.5.4.1 R4 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

R4 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı TKM değerleri 7557-11550 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 9792±1268 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 1856-3406 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 2768±468 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında TKM giderme verimi %61.1-81.2 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %71.4±5.2 olarak tespit edilmiştir.

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında R4 reaktöründe besleme sıvısı TKM değerleri 7344-11362 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre giriş atığının ortalama TKM değerleri 8831±1300 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 1794-4052 mg/L arasında olduğu görülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 2785±679 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında TKM giderme verimi %47.5-77.5 aralığında değerler almıştır. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %67.2±9.2

olarak bulunmuştur. Şekil 5.81'de R4 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış TKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



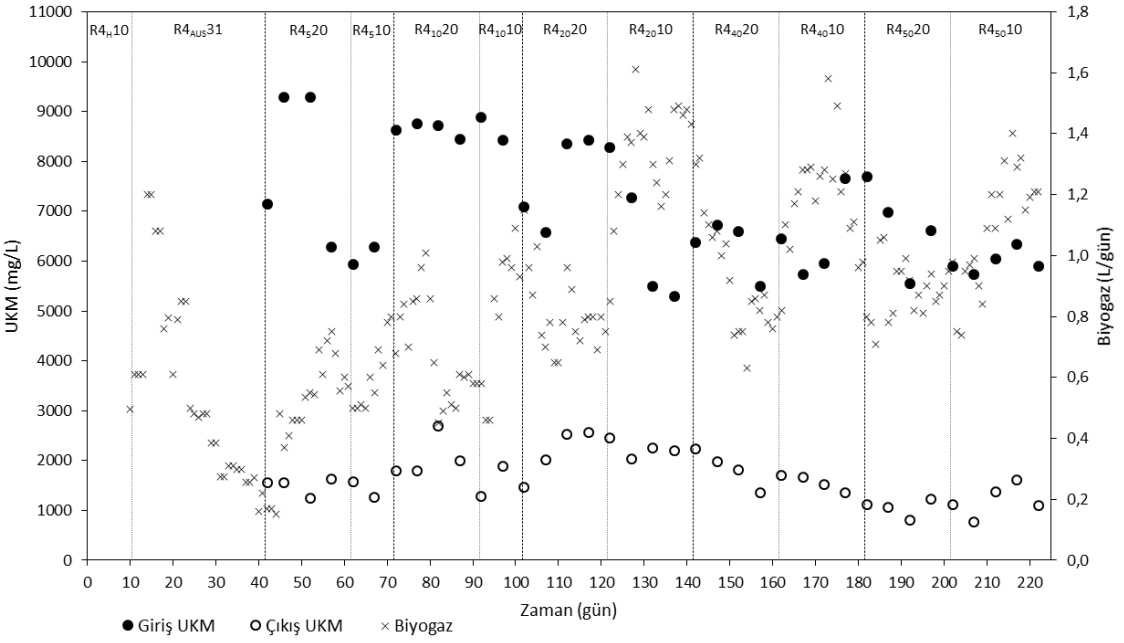
Şekil 5.81 R4 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Deneysel süreç boyunca R4 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UKM değerleri 5490-9280 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 7363±1284 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM konsantrasyonlarının 812-2686 mg/L arasında değerler aldığı görülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1710±528 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UKM giderme verimi %69.2-86.6 aralığında ölçülmüş olup ortalama UKM giderme verimi %76.7±6.1 olarak tespit edilmiştir.

R4 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UKM değerleri 5292-8632 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 6677±1051 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri 764-2260 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1597±457 mg/L olarak tespit edilmiştir. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UKM giderme verimi %58.6-86.7 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UKM giderme verimi

%75.2±8.4 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.82'de R4 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UKM/TKM oranı sırasıyla 0.75 ve 0.76 olarak tespit edilmiştir. Reaktör çıkışında ise bu oranın sırasıyla 0.62 ve 0.57 olduğu bulunmuştur.

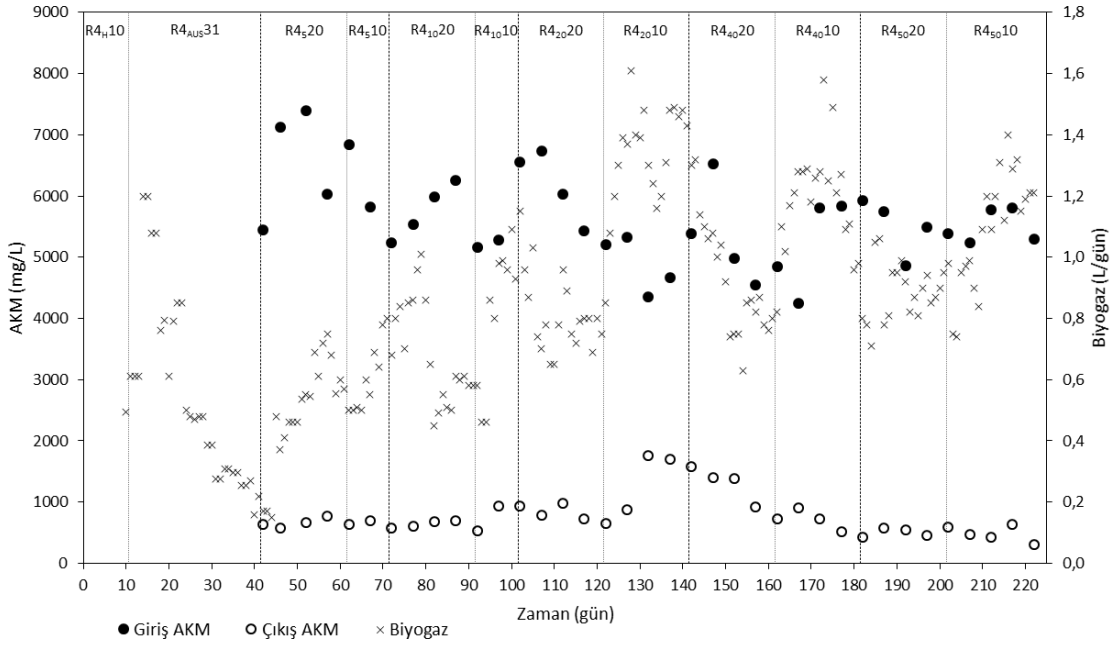


Şekil 5.82 R4 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında R4 reaktöründe besleme sıvısı AKM değerleri 4549-7400 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama AKM değeri 5788±791 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu AKM değerleri 456-1397 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 739±250 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında AKM giderme verimi %72.1-91.9 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama AKM giderme verimi %87±4.9 olarak tespit edilmiştir.

R4 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı AKM değerleri 4356-6550 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama AKM değeri 5489±536 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör

çıkış suyu AKM değerleri 306-1760 mg/L arasında değerler almıştır. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değerinin 840±475 mg/L olduğu görülmüştür. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında AKM giderme verimi %59.6-94.2 aralığında ölçülmüştür. Buna göre ortalama AKM giderme veriminin %83.7±10.5 olduğu bulunmuştur. Şekil 5.83'te R4 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış AKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

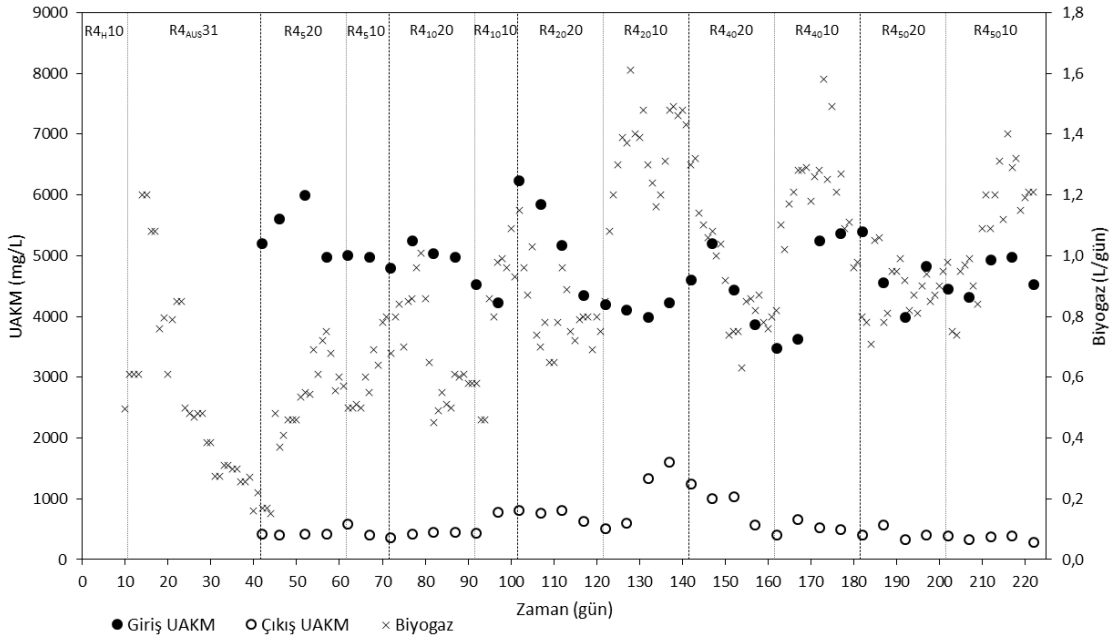


Şekil 5.83 R4 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Deneysel çalışma boyunca R4 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UAKM değerleri 3477-6000 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 4806±641 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UAKM değerleri 334-1040 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 544±203 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %76.6-93.1 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %88.5±4.3 olarak tespit edilmiştir.

R4 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UAKM değerlerinin 3980-6240 mg/L aralığında değiştiği görülmüştür. Bu

değerlere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 4794±608 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UAKM değerlerinin 278-1600 mg/L arasında olduğu görülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 663±415 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %62.2-93.9 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme veriminin %85.4±10 olduğu bulunmuştur. Şekil 5.84'te R4 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UAKM değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



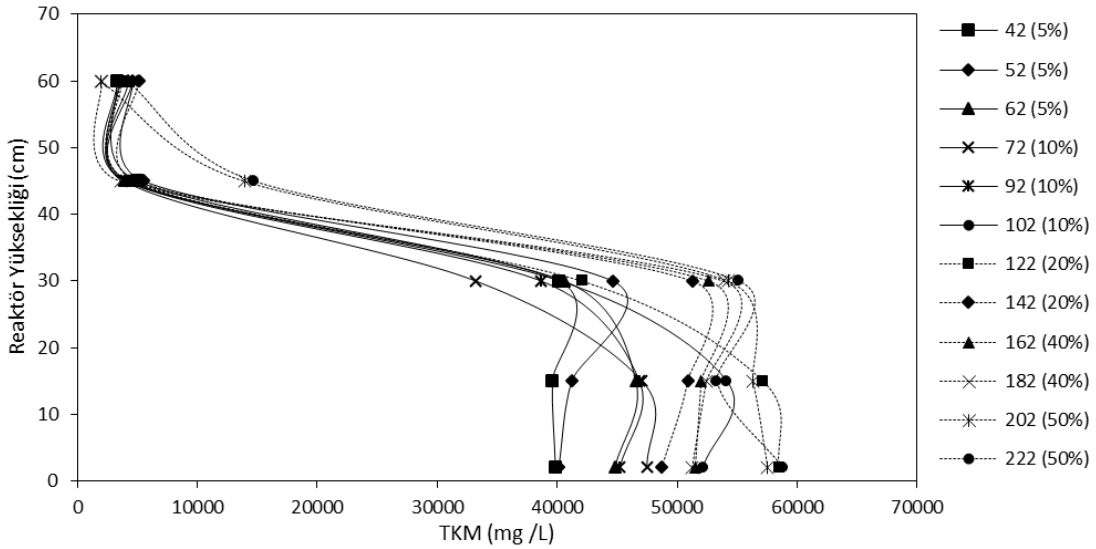
Şekil 5.84 R4 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UAKM/AKM oranı sırasıyla 0.83 ve 0.81 olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkışında ise bu oranın sırasıyla 0.74 ve 0.79 olduğu görülmüştür.

5.5.4.2 R4 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

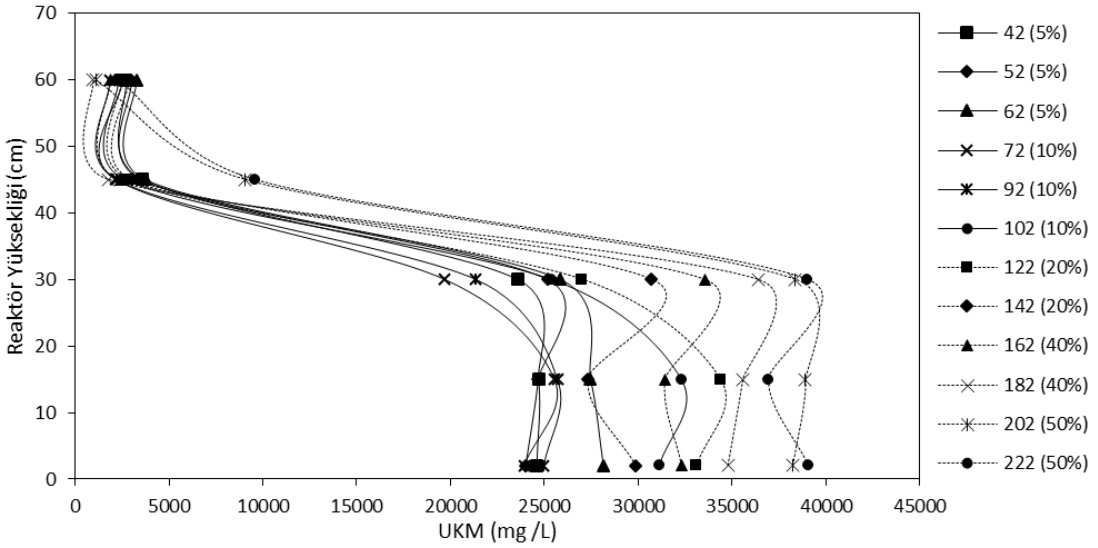
Tüm çalışma boyunca R4 reaktörü 1 ve 2. numune alma musluklarında TKM değerleri 40100-58800 mg/L arasında değişim göstermiştir. 3. muslukta TKM konsantrasyonu 72. günde 33200 mg/L diğer zamanlarda 38700-55200 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta TKM konsantrasyonu 202 ve 222. günde 14700 mg/L civarında diğer günlerde 3600-4900 mg/L arasında ölçülmüştür. 5. muslukta TKM konsantrasyonu 1900-4200

mg/L aralığında tespit edilmiştir. Şekil 5.85'te R4 içerisindeki TKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



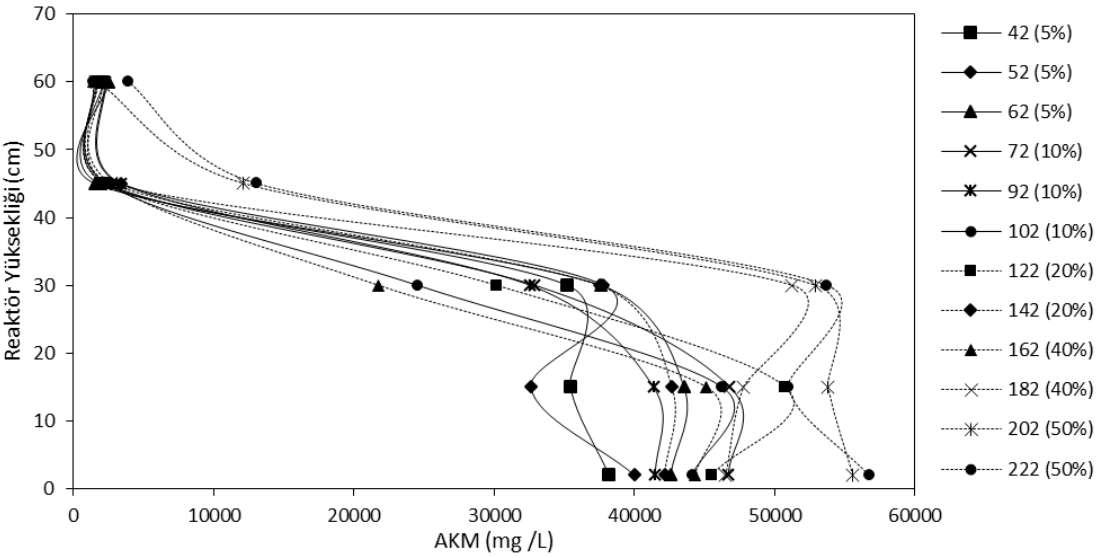
Şekil 5.85 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi

R4 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1 ve 2. musluklarda UKM değerleri 23900-39100 mg/L arasında ölçülmüştür. 3. muslukta UKM konsantrasyonu 72 ve 92. günde 20000 mg/L diğer zamanlarda 23500-39000 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta UKM konsantrasyonu 202 ve 222. günde 9500 mg/L civarında diğer günlerde ise 1800-3100 mg/L arasında ölçülmüştür. 5. muslukta UKM konsantrasyonu 1100-2900 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Şekil 5.86'da R4 içerisindeki UKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



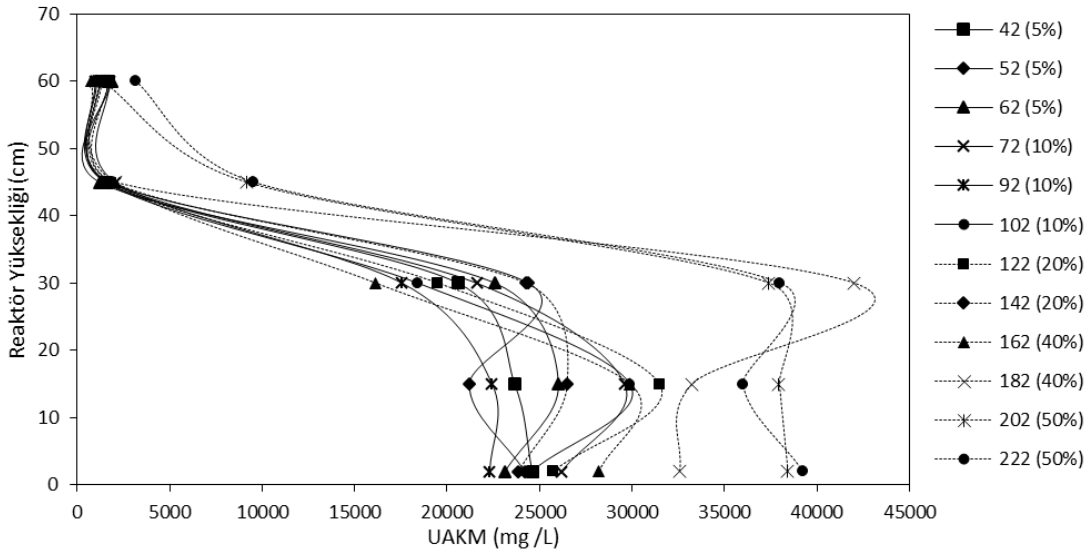
Şekil 5.86 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi

42-222. günler arasında R4 reaktörü içerisinde 1 ve 2. muslukları seviyesinde AKM değerleri 32600-56800 mg/L arasında ölçülmüştür. 3. muslukta 182 ve 222. günlerde AKM 51200-53800 mg/L aralığında iken diğer ölçüm zamanlarında 21700-35500 mg/L aralığında değerler aldığı görülmüştür. 4. muslukta AKM değeri 202 ve 222. günlerde 12500 mg/L civarında, diğer zamanlarda ise 1500-2600 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta AKM konsantrasyonu 222. günde 3900 mg/L civarında ve diğer zamanlarda ise 1700 mg/L civarında ölçülmüştür. Şekil 5.87'de R4 içerisindeki AKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.87 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi

R4 reaktörü içerisinde 42-162. günler arasında 1. muslukta UAKM değerleri 23300-28300 mg/L arasında, 182-222. günler arasında 32500-39300 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 2. muslukta 42-162. günler arasında UAKM 21200-31500 mg/L aralığında iken 182-222. günler arasında 33200-38000 mg/L aralığında ölçülmüştür. 3. muslukta UAKM değeri 42-162. günler arasında 16100-24300 mg/L aralığında, 182-222. günler arasında ise 37300-42000 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta 202 ve 222. günlerde UAKM 9500 mg/L civarında diğer zamanlarda ise 2000 mg/L civarlarında tespit edilmiştir. 5. muslukta UAKM konsantrasyonu 222. günde 3150 mg/L ve diğer zamanlarda ise 1400 mg/L civarında ölçülmüştür. Şekil 5.88'de R4 içerisindeki UAKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.88 R4 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi

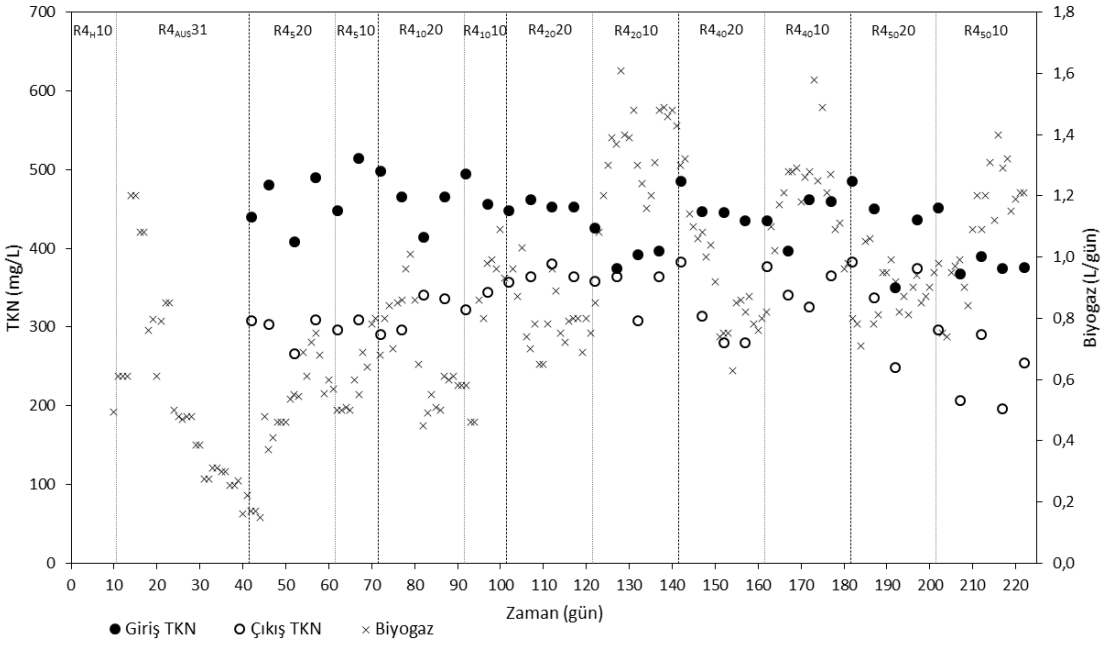
5.5.5 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri

5.5.5.1 R4 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri

Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R4 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TKN değerleri 350-490 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 248-380 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 445±31 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri ise

321±39 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %13.3-37.1 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %27.6±8.6 olarak tespit edilmiştir.

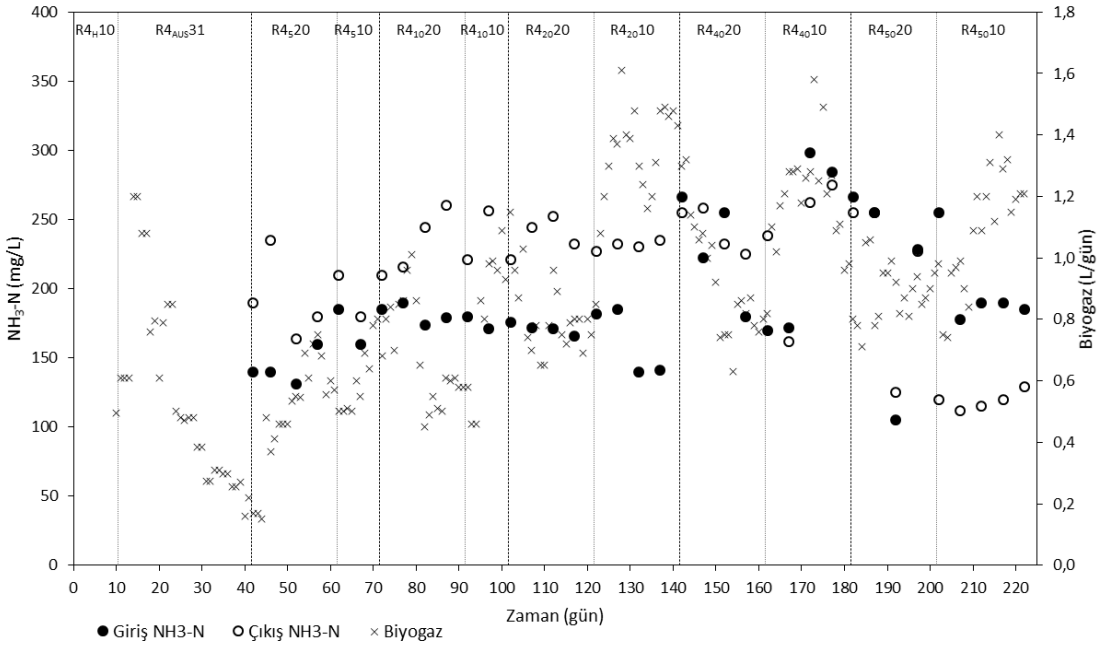
Çalışma boyunca R4 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısının TKN değerleri 368-514 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 196-382 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısının ortalama TKN değeri 432±52 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 316±60 mg/L olarak hesaplanmıştır. Buna göre TKN giderim verimi %2.9-47.6 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %25.9±12.7 olarak bulunmuştur. Şekil 5.89'da tüm deneysel çalışma boyunca R4 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TKN değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.89 R4 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi

Deneysel çalışmalar incelendiğinde R4 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında giriş sıvısı karışımının NH_3-N değerleri 105-255 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 120-260 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 183±41 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri 217±40 mg/L olarak hesaplanmıştır. Buna göre NH_3-N konsantrasyonunun %52.9 oranına kadar azaldığı ve %67.9 oranına kadar arttığı görülmüştür. Bu verilere göre ortalama NH_3-N konsantrasyon artışı %22.3±25.2 olarak tespit edilmiştir.

Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R4 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının NH_3-N değerleri 140-298 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerlerinin ise 112-275 mg/L aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 201±51 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri ise 206±59 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre NH_3-N konsantrasyonunun bazı durumlarda %39.5 oranında azaldığı bazı durumlarda ise %66.7 oranında arttığı görülmüştür. Bu verilere göre ortalama konsantrasyon artışı %5.3±34.3 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.90'da tüm deneysel çalışma boyunca R4 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış NH_3-N değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.90 R4 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

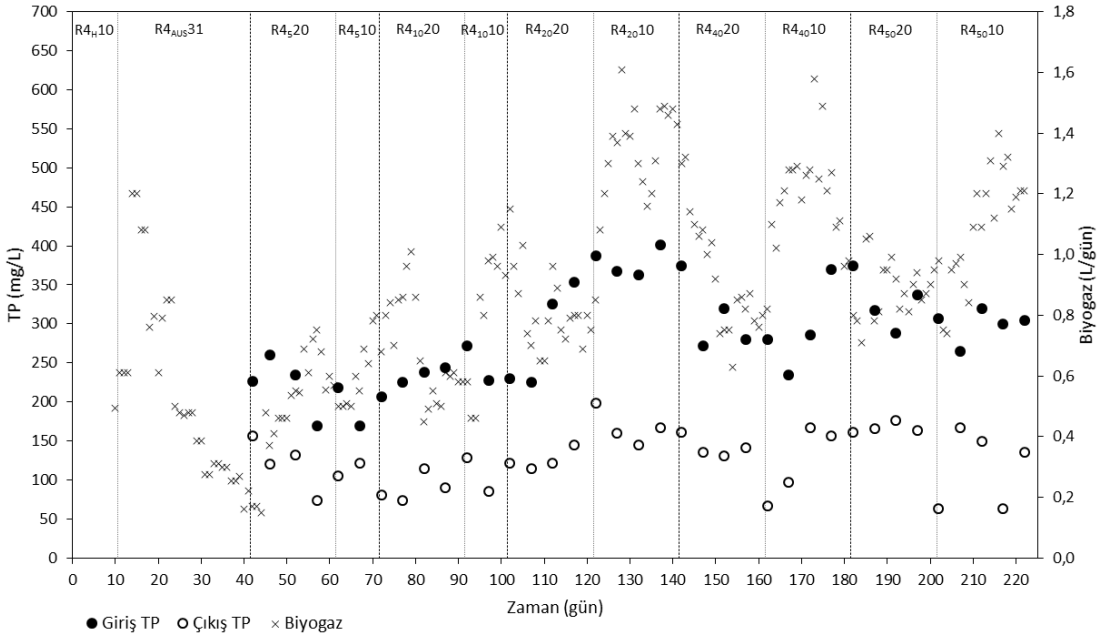
5.5.6 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri

5.5.6.1 R4 Reaktörü TP ve PO_4-P Değişimleri

Deneysel çalışma boyunca R4 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TP değerleri 169-387 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 63-198 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 275±53 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri ise 125±37 mg/L olarak

bulunmuştur. Buna göre TP giderim verimi %30.5-79.5 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %54.4±11.3 olarak tespit edilmiştir.

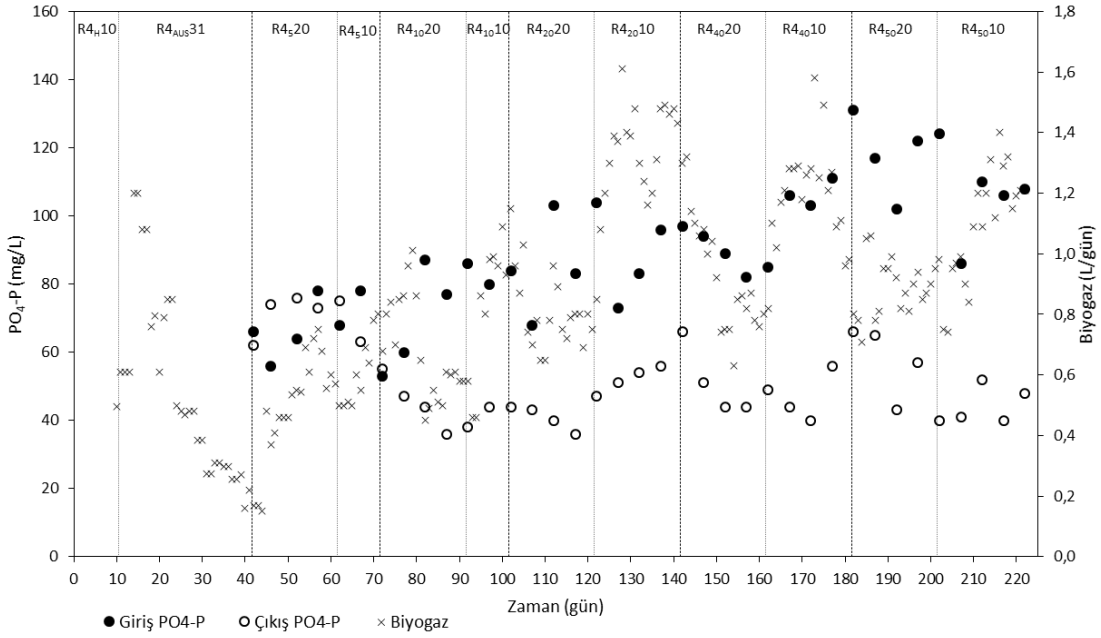
Çalışma boyunca R4 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında giriş sıvısının TP değerleri 169-401 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 63-167 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 304±72 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 136±35 mg/L olarak tespit edilmiştir. Buna göre TP giderim verimi %28.4-79 arasında değişmiş olup ortalama giderim veriminin %54.4±11.6 olduğu bulunmuştur. Şekil 5.91'de tüm deneysel çalışma boyunca R4 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TP değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.91 R4 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi

HBS 20 gün periyotlarında deneysel çalışma boyunca R4 reaktöründe besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 56-124 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 36-76 mg/L aralığında ölçülmüştür. Buna göre giriş sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 86±20 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 52±14 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre PO_4-P konsantrasyonu çalışmanın başlangıç safhalarında çamur kaçışıyla beraber %32.1 oranında artmış ve çalışmanın ilerleyen dönemlerinde %67.7 oranına kadar giderimin gerçekleştiği görülmüştür. Bu verilere göre ortalama giderim veriminin %35.7±28.6 olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel süreç boyunca R4 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 53-131 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 40-66 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 93±19 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 52±9 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre PO_4-P konsantrasyonu çamur kaçışından kaynaklı olarak %3.8 oranında artmış ancak çalışmanın genelinde %62.3 oranına kadar giderimin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Buna göre ortalama giderim verimi %43±17.3 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.92'de tüm deneysel çalışma boyunca R4 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış PO_4-P değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.92 R4 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

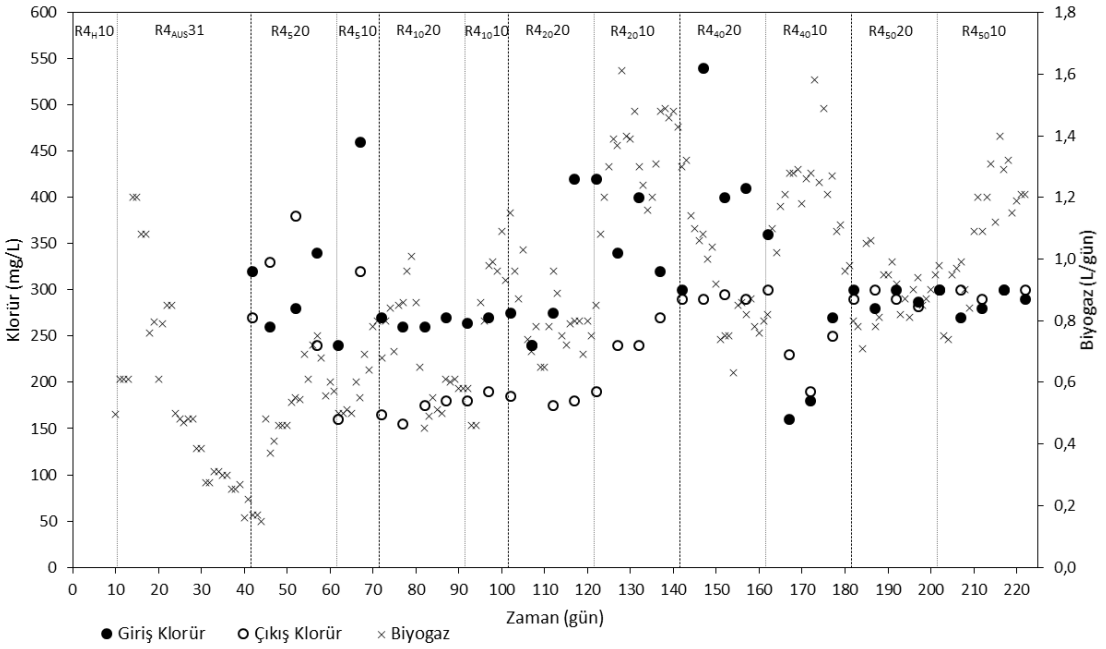
5.5.7 BBHG ile Evsel-Endüstriyel Organik Atıkların Birlikte Kullanıldığı R4 Reaktöründe Klorür Değişimleri

5.5.7.1 R4 Reaktörü Klorür Değişimleri

Çalışma süresince yapılan klorür analizlerinde klorür değerlerinin anaerobik sistemi etkilemeyecek derecede düşük olduğu görülmüştür. R4 reaktörü HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 240-540 mg/L ve reaktör

çıkışında 155-380 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama klorür değeri besleme sıvısında 320±78 mg/L, reaktör çıkışında 248±66 mg/L olduğu belirlenmiştir.

HBS 10 gün periyotlarında R4 reaktörü besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 180-460 mg/L ve reaktör çıkışında 165-320 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre ortalama klorür değeri besleme sıvısında 302±64 mg/L, reaktör çıkışında 255±51 mg/L olduğu bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca R4 reaktöründe ölçülen giriş ve çıkış klorür değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi Şekil 5.93'te gösterilmiştir.



Şekil 5.93 R4 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.6 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktörü

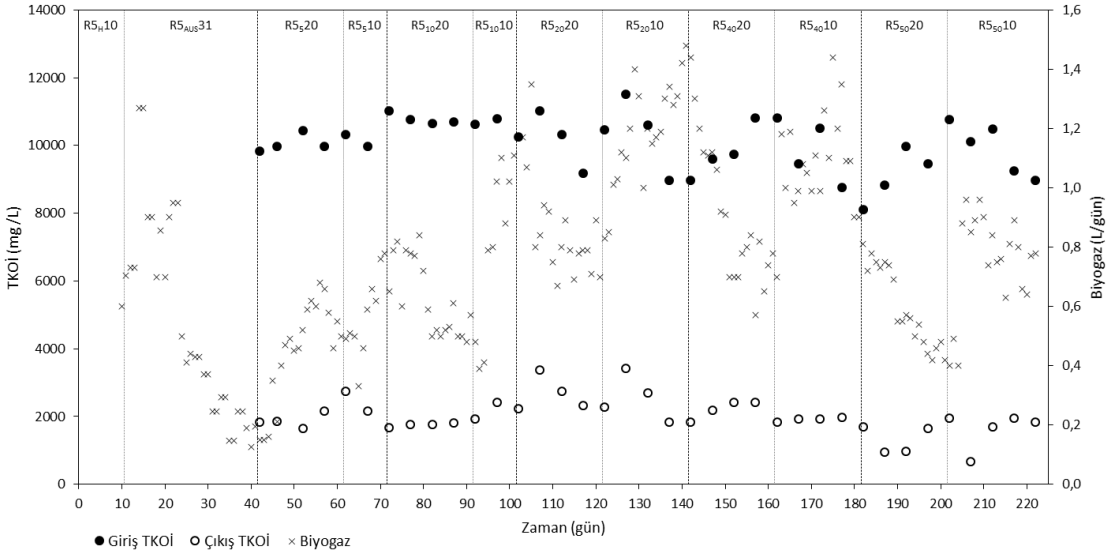
5.6.1 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

5.6.1.1 R5 Reaktörü TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

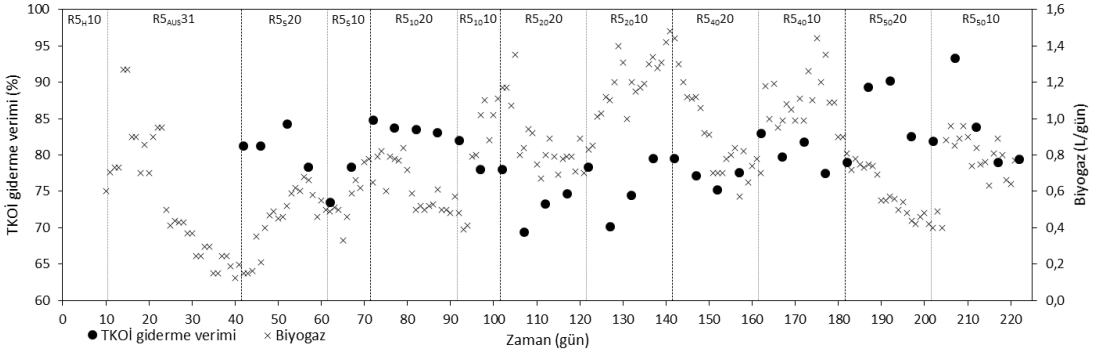
Tüm çalışma boyunca R5 reaktöründe 20 günlük HBS için giriş ve çıkış TKOİ değerleri sırasıyla 8829-11027 ve 940-3378 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.94), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 10202±667 ve 2028±559 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Bu

değerlere göre organik yükleme oranı 0.441-0.551 (ortalama; 0.510) g TKOİ/(L.gün) arasında değişmiştir. Şekil 5.95'te 20 günlük HBS için R5 TKOİ giderme verimi görülmektedir. Giderme verimi %69-90 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %80±5 olarak bulunmuştur.

R5 reaktöründe tüm çalışma boyunca 10 günlük HBS için TKOİ giriş ve çıkış değerleri sırasıyla 8108-11514 ve 676-3432 mg/L aralığında değişmiş olup (Şekil 5.94), ortalama TKOİ değerlerinin sırasıyla 9861±956 ve 1999±573 mg/L olduğu bulunmuştur. Bu değerlere göre organik yükleme oranı 0.810-1.15 (ortalama; 1.004) g TKOİ/(L.gün) arasında değişim göstermiştir. Şekil 5.95'te 10 günlük HBS için R5 TKOİ giderme verimi görülmektedir. Giderme verimi %70-93 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme veriminin %80±5 olduğu görülmüştür.



Şekil 5.94 R5 giriş-çıkış TKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi



Şekil 5.95 R5 TKOİ giderme veriminin değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışmanın tek kademeli parçalama dönemi olan 42-142. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne %5, 10 ve 20 artan oranlarda arıtma çamuru ilave edilmiştir. TKOİ giriş-çıkış değişimleri ve giderme verimi incelendiğinde (Şekil 5.94-5.95) $R5_5$20 periyodunun başında %80'ler civarında olan TKOİ giderme veriminin %70 seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. $R5_5$10 periyodunda TKOİ giderme veriminin tekrar yükselerek %85 seviyesine çıktığı görülmüştür. Çalışmanın $R5_5$20 periyodunda günlük biyogaz üretimi 0.65 L/gün seviyelerine çıkmış ve 57. günden sonra ise 0.5 L/gün seviyelerine düşmüştür. $R5_5$10 periyodunun sonlarına doğru biyogaz üretimi 0.8 L/gün seviyelerine kadar yükselmiştir.

$R5_{10}$20 periyodunun başlarında TKOİ giderme verimi %85'ler civarındayken periyodun sonuna kadar %82'ler seviyesine düşmüştür. Bu periyodun başlangıcında 0.8 L/gün seviyelerinde olan biyogaz üretimi 82. günde 0.5 L/gün seviyelerine düşerek periyodun sonuna kadar bu şekilde devam etmiştir. $R5_{10}$10 periyodunda TKOİ giderme verimi %75-80 arasında ölçülmüştür. Periyodun başlangıcında 0.5 L/gün seviyelerinde olan günlük biyogaz üretimi artarak 1.1 L/gün seviyelerine yükselmiştir.

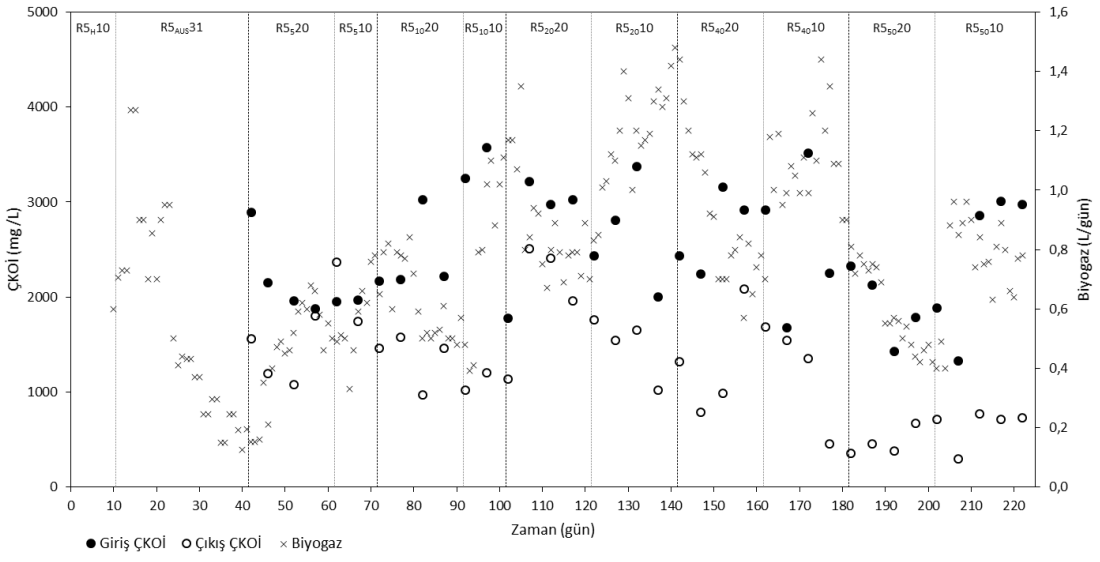
$R5_{20}$20 periyodunda TKOİ giderme verimi 107. günde %70 seviyelerine düşmüş ve periyodun sonunda %80 seviyelerine kadar çıkmıştır. Bu periyotta 1.1 L/gün seviyelerinde olan biyogaz üretimi düşerek 107. günden periyodun sonuna kadar 0.8 L/gün civarlarında ölçülmüştür. $R5_{20}$10 periyodunda TKOİ giderme verimi 107. günde %70 seviyelerine düşmüş ve periyodun sonuna kadar %80 seviyelerine kadar bir yükseliş göstermiştir. Bu periyodun başlangıcında 0.8 L/gün seviyelerinde olan biyogaz üretimi önemli bir yükseliş ile 1.5 L/gün seviyelerine ulaşmıştır.

Çalışmanın iki kademeli parçalama dönemi olan 142-222. günleri arasında besleme sıvısı TKOİ değeri 10000 mg/L civarında olacak şekilde BBHG'ne sırasıyla %40 ve %50 oranlarında arıtma çamuru ilave edilmiştir. $R5_{40}$20 periyodu başlangıcında 1.5 L/gün seviyelerinde olan biyogaz üretimi 0.7 L/gün seviyelerine düşmüştür. Bu periyodda TKOİ giderim verimi %80 seviyelerinden %75 seviyelerine düşmüş sonra ise %83 seviyelerine kadar yükselmiştir. $R5_{40}$10 periyodunda 177. güne kadar biyogaz üretimi 0.95 L/gün'den 1.5 L/gün seviyelerine kadar yükselmiş daha sonra 182. güne kadar 0.8 L/gün seviyelerine düşmüştür.

$R5_{50}20$ periyodunda TKOİ giderim verimi %90 seviyelerinden %80 seviyelerine düşmüştür. Bu periyotta biyogaz üretimi 0.8 L/gün seviyelerinden 0.4 L/gün seviyelerine düşmüştür. $R5_{50}10$ periyodunda biyogaz üretimi 0.9 L/gün seviyelerinden 0.8 L/gün seviyelerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu periyodda TKOİ giderme verimi 207. günde %93 seviyelerinde diğer ölçümlerde ise %80'ler civarında olduğu görülmüştür.

Tüm deneysel süreç boyunca 20 günlük HBS için ÇKOİ değeri R5 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1428-3247 ve 376-2511 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.96), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2457±561 ve 1400±647 mg/L'dir. ÇKOİ konsantrasyonu çalışmanın başlarında %21 oranında arttığı görülse de genel itibari ile %79 oranlarına kadar bir giderimin olduğu görülmüştür. Bu verilere göre ortalama giderme verimi %43±25 olarak bulunmuştur.

10 günlük HBS için deneysel süreç boyunca ÇKOİ değeri R5 reaktörü giriş ve çıkışında sırasıyla 1324-3576 ve 297-1744 mg/L aralığında ölçülmüş olup (Şekil 5.96), ortalama ÇKOİ değerleri sırasıyla 2557±668 ve 1048±474 mg/L olarak hesaplanmıştır. Giderme verimi %8-85 aralığında değişmekte olup, ortalama giderme verimi %53±26 olarak bulunmuştur.



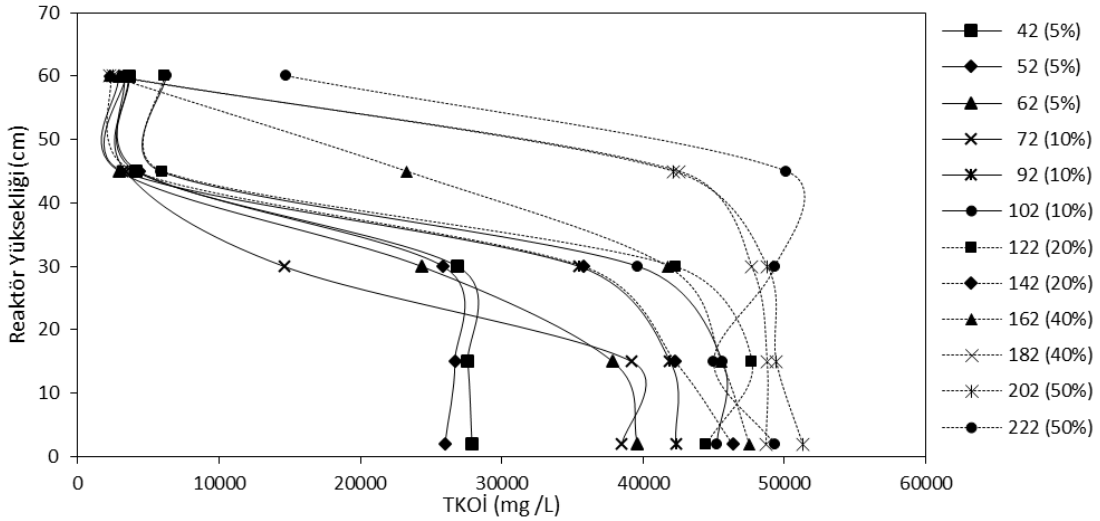
Şekil 5.96 R5 giriş-çıkış ÇKOİ konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Buna göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama ÇKOİ/TKOİ oranı sırasıyla 0.24 ve 0.26'dır. Reaktör çıkışında ise bu oran sırasıyla 0.69 ve 0.52'dir. Tek kademeli parçalama döneminde giriş ÇKOİ değeri 1700-3600 mg/L aralığında ölçülmüştür. 42-102.

günler arasında çıkış ÇKOİ değeri ise 1000-2300 mg/L aralığında ölçülmüştür. 102-142. günler arasında çıkış ÇKOİ değerinin 2500 mg/L'den 1000 mg/L'ye doğru düştüğü gözlemlenmiştir. 142-222. günler arasında iki kademeli parçalama döneminde 142-177. günler arasında çıkış ÇKOİ değerinin 750-2000 mg/L arasında değişim gösterdiği 177-222. günler arsında ise 700 mg/L civarlarında olduğu görülmüştür.

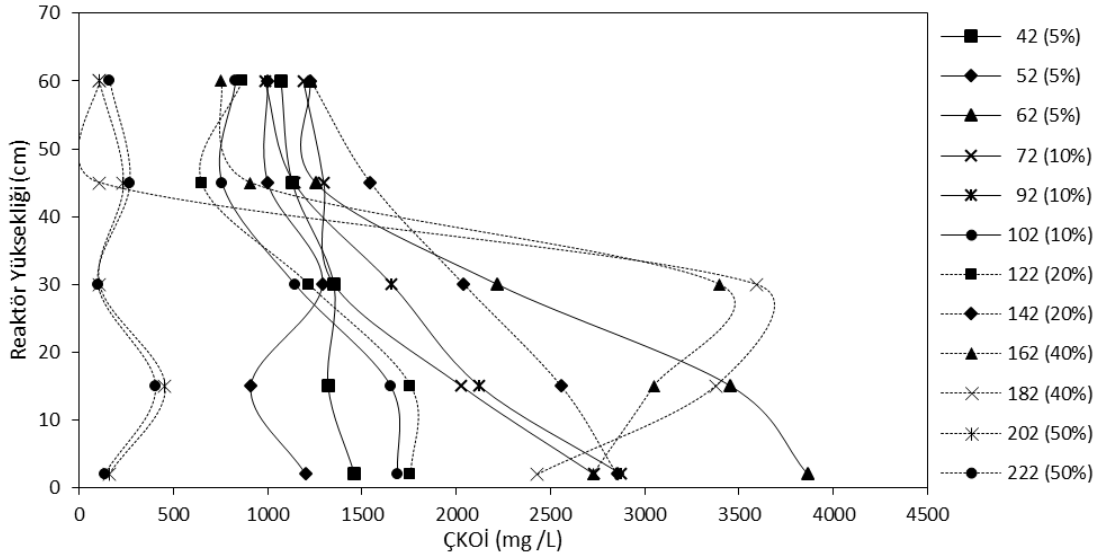
5.6.1.2 R4 Reaktörü İçinde TKOİ-ÇKOİ Değişimleri

Şekil 5.97 incelendiğinde hazırlık ve aşı uyum sürecinden sonra 42. günde beslenmeye başlanan R5 reaktöründe 1, 2 ve 3. musluklarda TKOİ değerinin yaklaşık 27000 mg/L civarında, 4 ve 5. musluklarda ise 4000 mg/L civarında olduğu görülmektedir. 1 ve 2. numune musluğu seviyelerinde 62. günün sonunda TKOİ değerinin önemli bir artışla 40000 mg/L seviyesini aştığı 3. musluk seviyesinde ise 25000 mg/L seviyelerinde olduğu görülmektedir. 72. günde 1, 2, 4 ve 5 musluklarında önemli bir değişme gözlemlenmezken 3. musluk TKOİ değerinin 15000 mg/L seviyelerine gerilediği görülmüştür. Çalışmanın 72. gününden sonraki zamanlarda 1, 2 ve 3. musluklarda TKOİ değerinin yaklaşık olarak 40000-50000 mg/L değerleri arasında olduğu görülmüştür. R5 reaktöründe 4. musluktaki TKOİ değeri 162. günde 23000 mg/L, 182 ve 202. günde 42000 mg/L ve 222. günde 52000 mg/L civarlarında ölçülmüştür. 5. muslukta sadece 222. günde 15000 mg/L seviyelerinde bir ölçüm yapılmıştır. Arıtma çamurunun hidrofobik çökelebilen yapısından dolayı çamur birikiminin diğer reaktörlere göre daha hızlı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.97 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R5 reaktörü içerisindeki TKOİ dağılımının değişimi

Şekil 5.98 incelendiğinde musluklar arasında ÇKOİ değeri bakımından önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Reaktör içerisinde ÇKOİ değerleri genellikle 1000-2000 mg/L arasında ölçülmüştür. Özellikle 202. günden sonra ÇKOİ değerlerinin 500 mg/L değerinin altında olduğu gözlemlenmiştir.



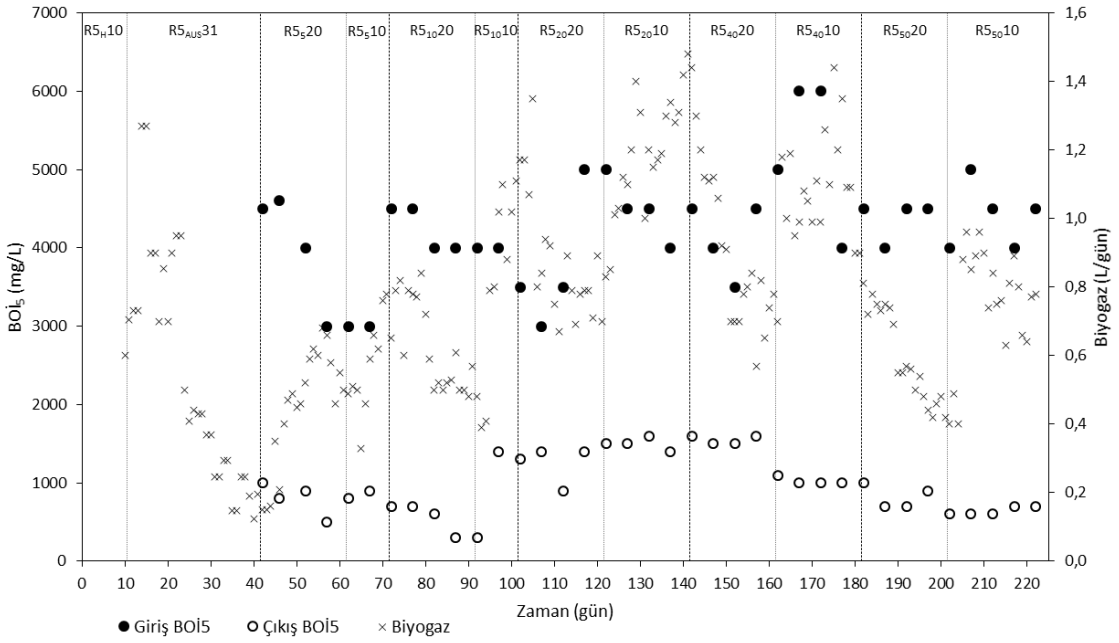
Şekil 5.98 Deneysel süreç boyunca (42-222 günler arası) R5 reaktörü içerisindeki ÇKOİ dağılımının değişimi

5.6.2 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe $BOİ_5$ Değişimleri

5.6.2.1 R5 Reaktörü $BOİ_5$ Değişimleri

Deneysel çalışma süresince 20 günlük HBS için R5 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 3000-5000 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 300-1600 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4100±628 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 938±406 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %53.3-92.5 arasında değişmekte olup ortalama $BOİ_5$ giderme veriminin %76.8±10.6 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.40'tır ve reaktör çıkışında ise 0.46 olarak bulunmuştur.

Çalışma süresince 10 günlük HBS için R5 reaktörü besleme sıvısı $BOİ_5$ değerlerinin 3000-6000 mg/L aralığında, çıkış suyu $BOİ_5$ değerlerinin ise 600-1600 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı ortalama $BOİ_5$ değeri 4333±673 mg/L ve çıkış suyu ortalama $BOİ_5$ değeri 1067±370 mg/L olarak bulunmuştur. Deneysel süreç boyunca $BOİ_5$ giderme verimi %62.9-88 arasında değişmekte olup ortalama $BOİ_5$ giderme verimi %75.2±9.5 olduğu hesaplanmıştır. Buna göre reaktör girişinde ortalama $BOİ_5$/TKOİ oranı 0.44 olarak hesaplanmış olup reaktör çıkışında ise bu değerin 0.53 olduğu görülmüştür. Şekil 5.99'da R5 reaktörü giriş ve çıkışında $BOİ_5$ parametresinin zamanla değişimi ile günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



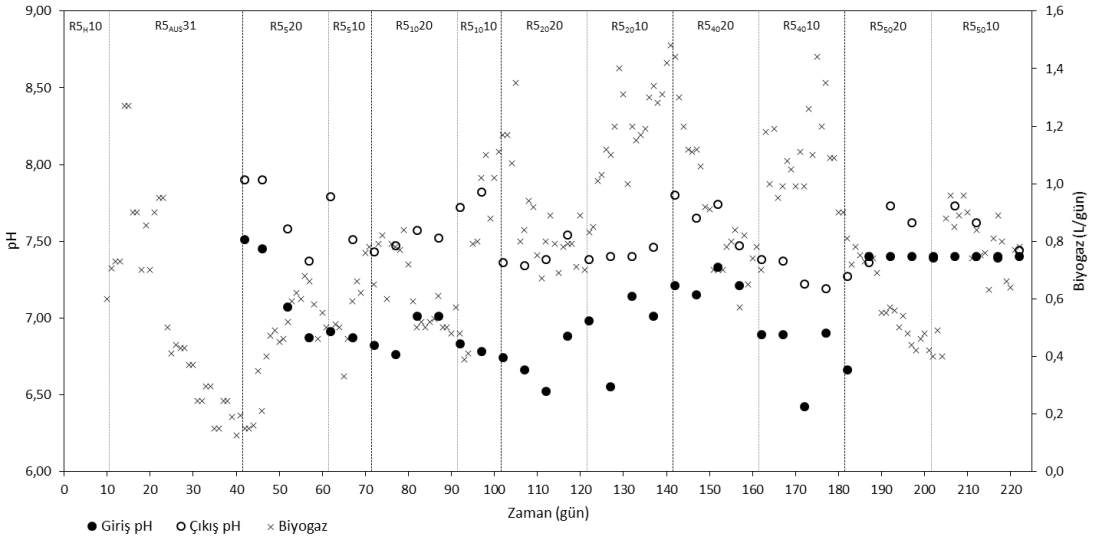
Şekil 5.99 R5 giriş-çıkış BOİ$_5$ değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.6.3 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe pH-Alkalinite Değişimleri

5.6.3.1 R5 Reaktörü pH-Alkalinite Değişimleri

R5 reaktörü HBS 20 gün periyotları için çalışma boyunca hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.52-7.51 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerlerinin 7.34-7.90 arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyotları için giriş ortalama pH değeri 7.08±0.29 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.56±0.18 olarak tespit edilmiştir.

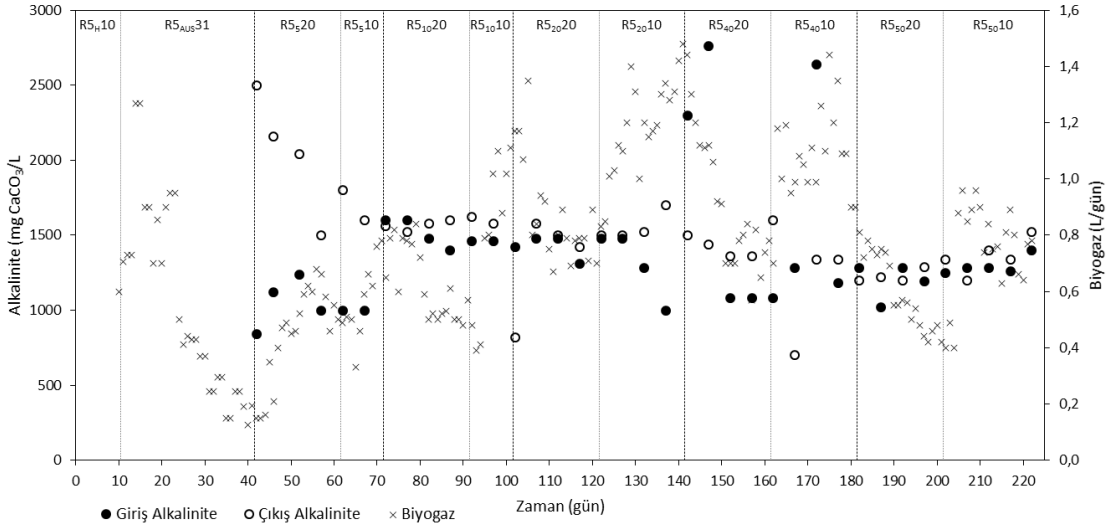
Çalışma boyunca R5 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının pH değeri 6.42-7.40 arasında değişim gösterirken çıkış suyu pH değerlerinin 7.19-7.82 arasında olduğu görülmüştür. HBS 10 gün periyotları için giriş ortalama pH değeri 6.98±0.33 ve çıkış ortalama pH değeri ise 7.47±0.20 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.100'de R5 reaktörünün giriş ve çıkışında pH parametresinin zamanla değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.100 R5 giriş-çıkış pH değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Tüm çalışma boyunca R5 reaktörü HBS 20 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değeri 840-2760 mg $CaCO_3$/L arasında değişim gösterirken çıkış suyu alkalinite değerlerinin 1200-2500 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. HBS 20 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1316±390 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1578±318 mg $CaCO_3$/L olarak tespit edilmiştir.

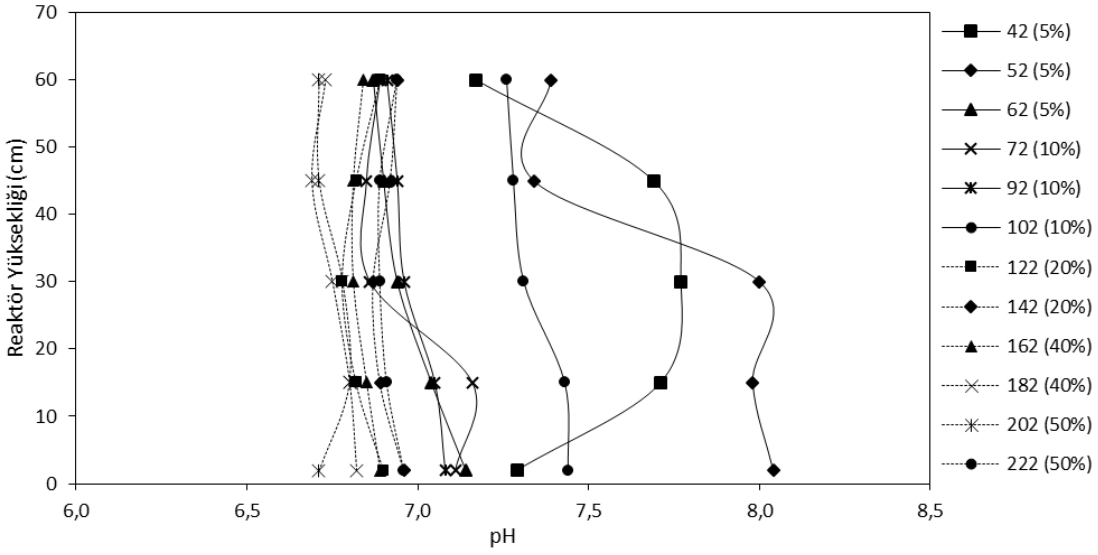
R5 reaktörü HBS 10 gün periyotları için hazırlanan besleme sıvısının alkalinite değeri 1000-2640 mg $CaCO_3$/L arasında ölçülmüş olup çıkış suyu alkalinite değerlerinin ise 820-1700 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. HBS 10 gün periyodu için giriş ortalama alkalinite değeri 1457±447 mg $CaCO_3$/L ve çıkış ortalama alkalinite değeri ise 1408±218 mg $CaCO_3$/L olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.101'de R5 reaktörü giriş ve çıkışında alkalinite parametresinin zamanla değişimi ve günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.101 R5 giriş-çıkış alkalinite değerleri değişimi ve günlük biyogaz üretimi

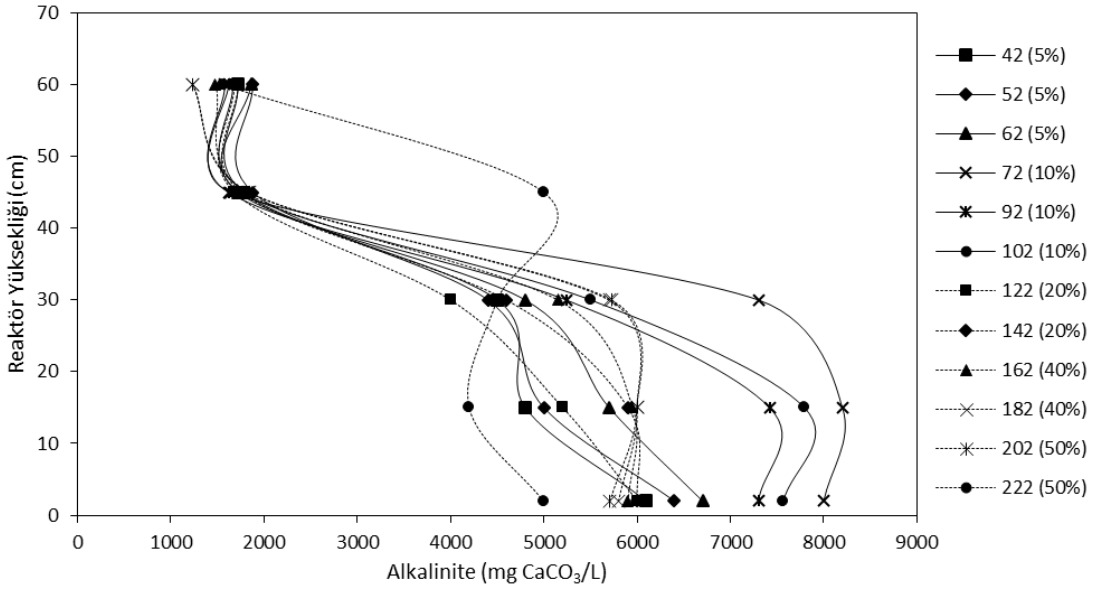
5.6.3.2 R5 Reaktörü İçinde pH-Alkalinite Değişimleri

Çalışma süresince R5 reaktöründe pH 6.7-8.1 arasında bir değişim göstermiştir. 42 ve 52. günlerde pH değerlerinde 7.1-8.1 aralığında bir değişim gözlemlenmiştir. Çalışmada 102. günde pH 7.2-7.5 aralığında diğer ölçüm zamanlarında ise 6.7-7.1 aralığında kalmıştır. R5 rektörü içerisinde 182 ve 202. günlerde pH'ın 6.7-6.8 aralığına olduğu görülmüştür. Çalışmanın 202. gününden sonra pH seviyesini tekrar 6.8-7.2 aralığına getirmek için pH değeri 7.4'e gelene kadar besleme atığına NaOH ilavesi yapılmıştır. Şekil 5.102'de R5 reaktörü içerisindeki pH parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.102 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) pH dağılımlarının değişimi

Çalışma süresince R5 reaktörü içerisinde alkalinite dağılımı çamur yoğunluğuna göre değişim göstermiştir. 1 ve 2. musluklarda alkalinite 4200-8200 mg $CaCO_3$/L arasında, 3. muslukta 4000-7300 mg $CaCO_3$/L arasında ve 4 ile 5. musluklarda ise 1200-1900 mg $CaCO_3$/L aralığında değiştiği tespit edilmiştir. 222. günde 4. muslukta 5000 mg $CaCO_3$/L olarak ölçülmüştür. Çalışmanın 72, 92 ve 102. günlerinde 1 ve 2. musluklarda alkalinitenin 7300-8200 mg $CaCO_3$/L arasında diğer zamanlarda ise 4200-6700 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. 3. muslukta alkalinite 72. günde 7300 mg $CaCO_3$/L ve diğer zamanlarda ise 4000-5800 mg $CaCO_3$/L arasında olduğu görülmüştür. 222. günde alkalinite 1. muslukta 5000 mg $CaCO_3$/L 2. muslukta 4200 mg $CaCO_3$/L olarak ölçülmüştür. Şekil 5.103'te R5 reaktörü içerisindeki alkalinite parametresinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.103 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) alkalinite dağılımlarının değişimi

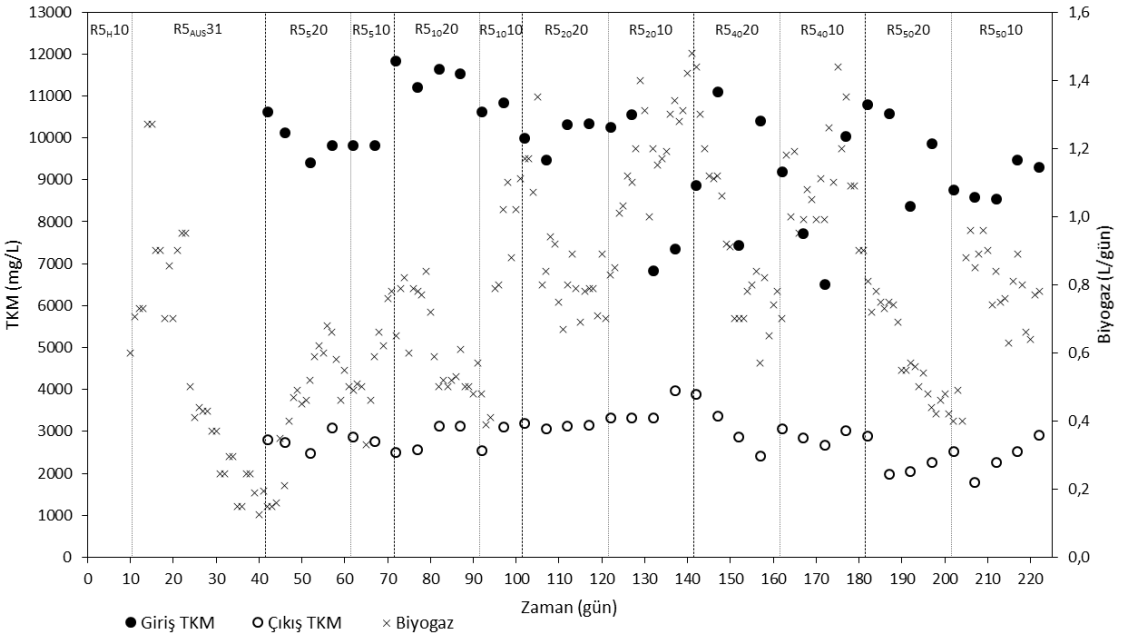
5.6.4 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

5.6.4.1 R5 Reaktörü TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

Tüm çalışma boyunca R5 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı TKM değerleri 7426-11640 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 10041±1035

mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 1985-3360 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 2787±401 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında TKM giderme verimi %61.3-81.2 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama TKM giderme verimi %72±4.5 olarak tespit edilmiştir.

R5 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı TKM değerleri 6516-11838 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama TKM değeri 9289±1530 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör çıkış suyu TKM değerleri 1790-3966 mg/L arasında değişim göstermiştir. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama TKM değeri 2972±574 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında TKM giderme verimi %46.1-79.2 aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama TKM giderme veriminin %67±9.5 olduğu görülmüştür. Şekil 5.104'te R5 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış TKM konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



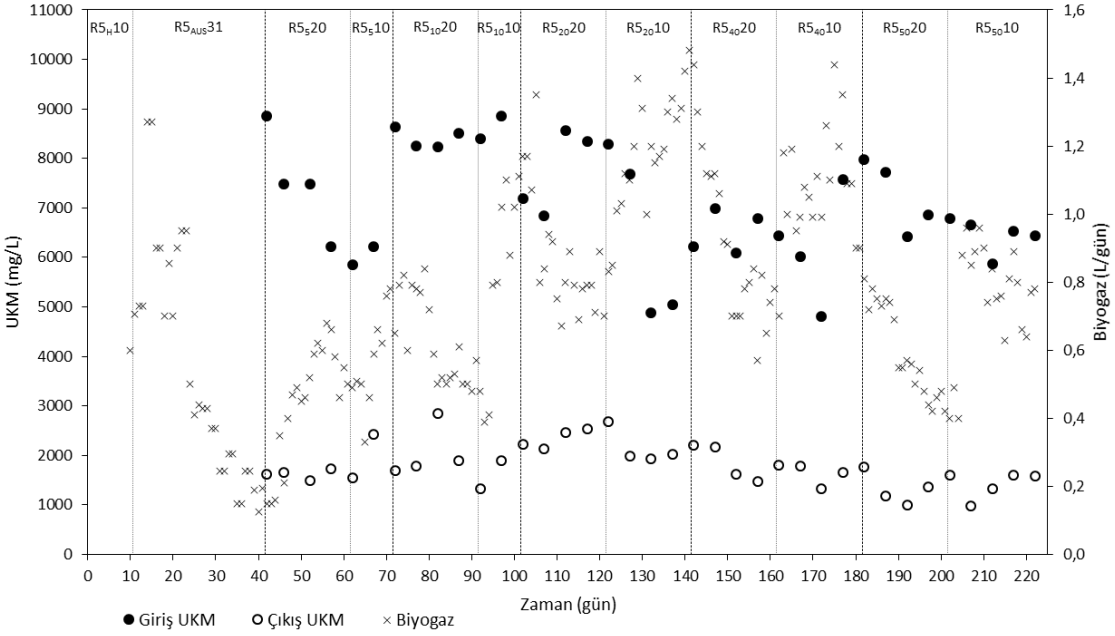
Şekil 5.104 R5 giriş-çıkış TKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Çalışma boyunca R5 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UKM değerleri 5860-8864 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 7401±944 mg/L

olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM değerleri 1002-2852 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1807±497 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UKM giderme verimi %65.3-84.6 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UKM giderme verimi %75.6±5.8 olarak tespit edilmiştir.

R5 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UKM değerleri 4812-8864 mg/L aralığında ölçülmüştür. Buna göre besleme sıvısının ortalama UKM değeri 6705±1280 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UKM değerlerinin 978-2430 mg/L arasında olduğu görülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UKM değeri 1776±386 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UKM giderme veriminin %60-85.3 aralığında olduğu görülmüştür. Bu verilere göre ortalama UKM giderme verimi %72.5±7.7 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.105'te R5 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) UKM konsantrasyonu değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

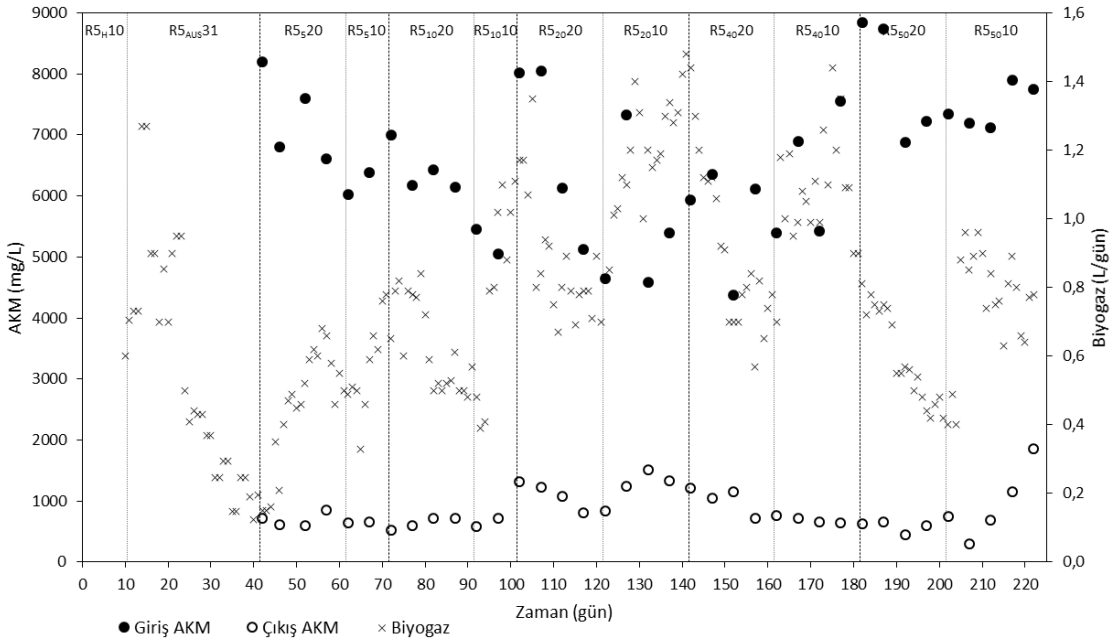
Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UKM/TKM oranı sırasıyla 0.74 ve 0.72 olarak bulunmuş olup reaktör çıkışında ise bu oranın sırasıyla 0.65 ve 0.60 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.105 R5 giriş-çıkış UKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında R5 reaktöründe giriş sıvısı AKM değerleri 4368-8735 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama AKM değeri 6468±1138 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu AKM değerleri 452-1230 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM değeri 769±203 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında AKM giderme verimi %73.7-93.4 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama AKM giderme verimi %87.6±4.7 olarak tespit edilmiştir.

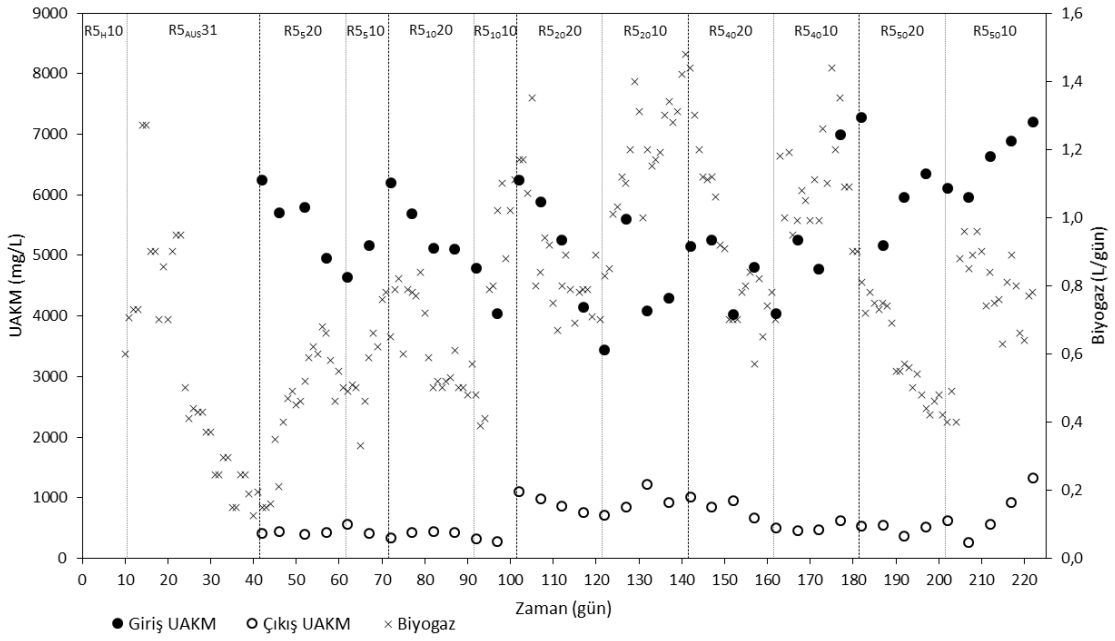
R5 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı AKM değerlerinin 4583-8840 mg/L aralığında olduğu görülmüştür. Buna göre besleme sıvısının ortalama AKM değeri 6765±1241 mg/L olarak bulunmuştur. Reaktör çıkış suyu AKM değerleri 302-1850 mg/L arasında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama AKM konsantrasyonu 965±439 mg/L olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında AKM giderme veriminin %66.8-95.8 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre ortalama AKM giderme veriminin %85.3±7.7 olduğu görülmüştür. Şekil 5.106'da R5 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış AKM konsantrasyonu değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.



Şekil 5.106 R5 giriş-çıkış AKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Hidrolik bekleme süresinin (HBS) 20 gün olduğu çalışma periyotlarında R5 reaktöründe besleme sıvısı UAKM değerleri 3440-6348 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 5166±799 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UAKM değerleri 320-980 mg/L arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 582±200 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 20 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %76.4-93.8 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme verimi %88.3±5.1 olarak tespit edilmiştir.

R5 reaktöründe hidrolik bekleme süresinin (HBS) 10 gün olduğu çalışma periyotlarında besleme sıvısı UAKM değerlerinin 4039-7280 mg/L aralığında olduğu görülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısının ortalama UAKM değeri 5767±1135 mg/L olarak hesaplanmıştır. Reaktör çıkış suyu UAKM konsantrasyonunun 268-1320 mg/L arasında değerler aldığı görülmüştür. Bu verilere göre reaktör çıkış suyundaki ortalama UAKM değeri 723±348 mg/L olarak bulunmuştur. Çalışma süresince HBS 10 gün periyotlarında UAKM giderme verimi %70.1-95.5 aralığında değişim göstermiştir. Buna göre ortalama UAKM giderme veriminin %87.3±7.0 olduğu görülmüştür. Şekil 5.107'de R5 reaktöründe gerçekleştirilen 222 günlük çalışma sürecindeki (HBS: 20 gün ve 10 gün) giriş ve çıkış UAKM konsantrasyonları değişimleri ve günlük biyogaz üretimi verilmiştir.

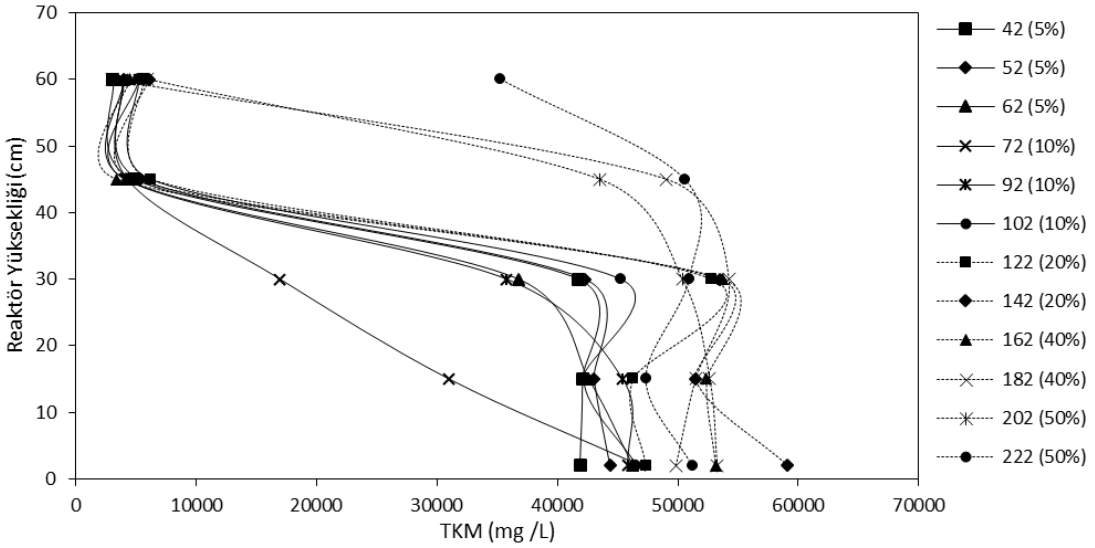


Şekil 5.107 R5 giriş-çıkış UAKM konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Bu verilere göre reaktör girişinde 20 ve 10 günlük HBS için ortalama UAKM/AKM oranının sırasıyla 0.80 ve 0.85 olduğu görülmüştür. Reaktör çıkışında ise bu değerlerin sırasıyla 0.76 ve 0.75 olduğu bulunmuştur.

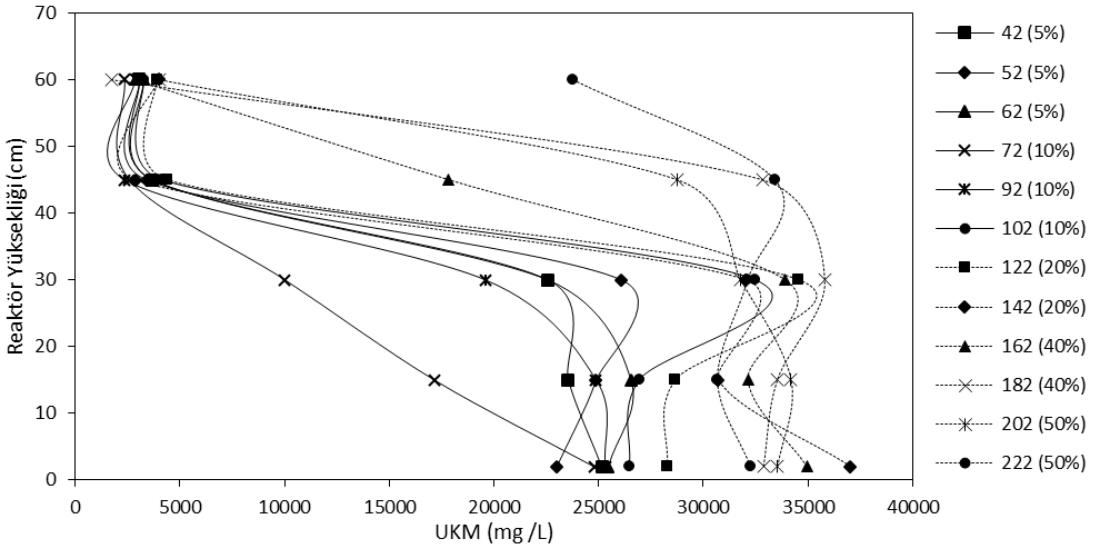
5.6.4.2 R5 Reaktörü İçinde TKM, UKM, AKM ve UAKM Değişimleri

R5 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1. muslukta TKM değerleri 41800-59100 mg/L arasında değişim göstermiştir. 2. muslukta 72. günde TKM 31000 mg/L civarında diğer günlerde ise 42100-52700 mg/L aralığında ölçülmüştür. 3. muslukta TKM konsantrasyonu 72. günde 17000 mg/L civarında diğer zamanlarda ise 35800-54300 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta TKM konsantrasyonu 182 ve 222. günler arasında 43500-50600 mg/L aralığında diğer ölçüm günlerinde ise 3400-6300 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta TKM konsantrasyonun 222. günde 35300 mg/L civarında diğer günlerde ise 3000-6100 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.108'de R5 içerisindeki TKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



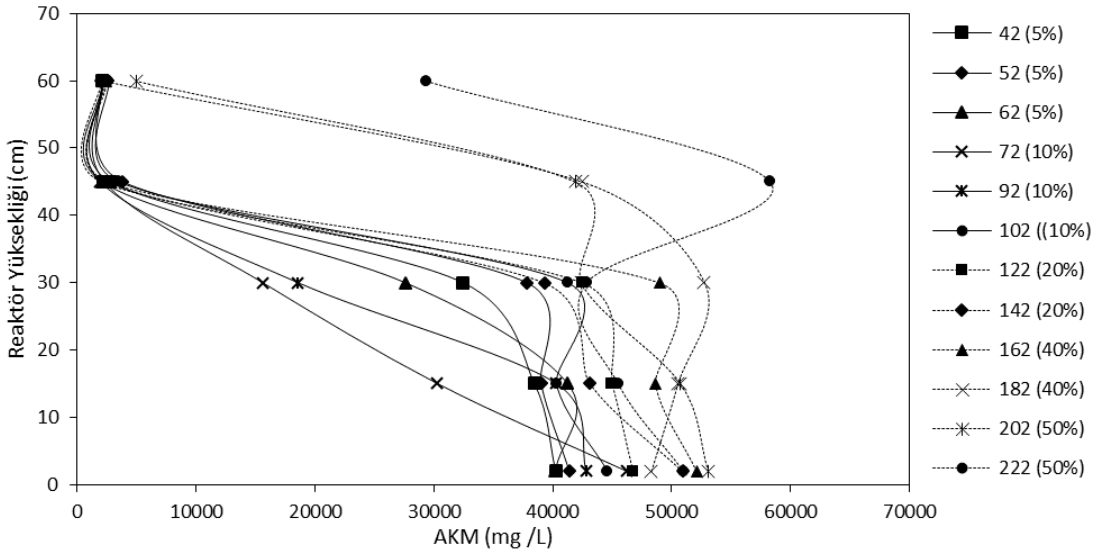
Şekil 5.108 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) TKM dağılımlarının değişimi

42-222. günler arasında R5 reaktörü içerisinde 1. muslukta UKM değerleri 23000-37000 mg/L arasında değişim göstermiştir. 2. muslukta 72. günde UKM 17200 mg/L civarında diğer günlerde ise 23500-34200 mg/L aralığında ölçülmüştür. 3. muslukta UKM konsantrasyonu 72. günde 10000 mg/L civarında diğer zamanlarda ise 19600-35800 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta UKM konsantrasyonu 162. günde 17800 mg/L civarında, 182 ve 222. günler arasında 28700-33400 mg/L aralığında diğer ölçüm günlerinde ise 3900-4500 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta UKM konsantrasyonun 222. günde 23700 mg/L civarında diğer günlerde ise 1700-4100 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.109'da R5 içerisindeki UKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



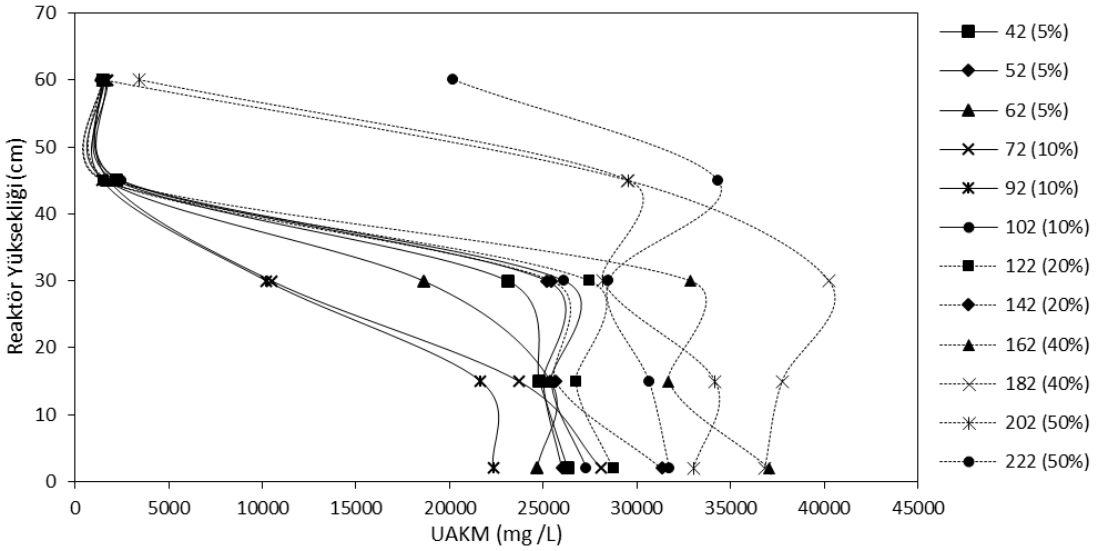
Şekil 5.109 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UKM dağılımlarının değişimi

R5 reaktörü içerisinde 42-222. günler arasında 1. muslukta AKM değerleri 40200-53100 mg/L arasında değişim göstermiştir. 2. muslukta 72. günde AKM 30300 mg/L civarında diğer günlerde ise 39000-50800 mg/L aralığında ölçülmüştür. 3. muslukta AKM konsantrasyonu 72 ve 92. günde sırasıyla 15600 mg/L ve 18500 mg/L civarında diğer zamanlarda ise 27500-52800 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta AKM konsantrasyonu 182 ve 202. günlerde 41800 mg/L, 222. günde 58300 mg/L civarında, diğer ölçüm günlerinde ise 2500-3500 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta AKM konsantrasyonun 202. günde 5100 mg/L, 222. günde 29400 mg/L civarında diğer günlerde ise 2300 mg/L civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.110'da R5 içerisindeki AKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.110 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) AKM dağılımlarının değişimi

42-222. günler arasında R5 reaktörü içerisinde 1. muslukta UAKM değerleri 22300-36900 mg/L arasında değişim göstermiştir. 2. muslukta 42-162. günler arasında 21600-26800 mg/L aralığında, 162 ve 222. günler arasında ise 30600-37800 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir. 3. muslukta UAKM konsantrasyonu 72 ve 92. günlerde 10300 mg/L, 182. günde 40300 mg/L civarında, diğer zamanlarda ise 18600-32900 mg/L aralığında ölçülmüştür. 4. muslukta UAKM konsantrasyonu 182 ve 202. günlerde 29500 mg/L, 222. günde 34300 mg/L civarında, diğer ölçüm günlerinde ise 1400-2000 mg/L aralığında ölçülmüştür. 5. muslukta UAKM konsantrasyonun 202. günde 3400 mg/L, 222. günde 20200 mg/L civarında diğer günlerde ise 1500 mg/L civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.111'de R5 içerisindeki UAKM dağılımlarının değişimi gösterilmiştir.



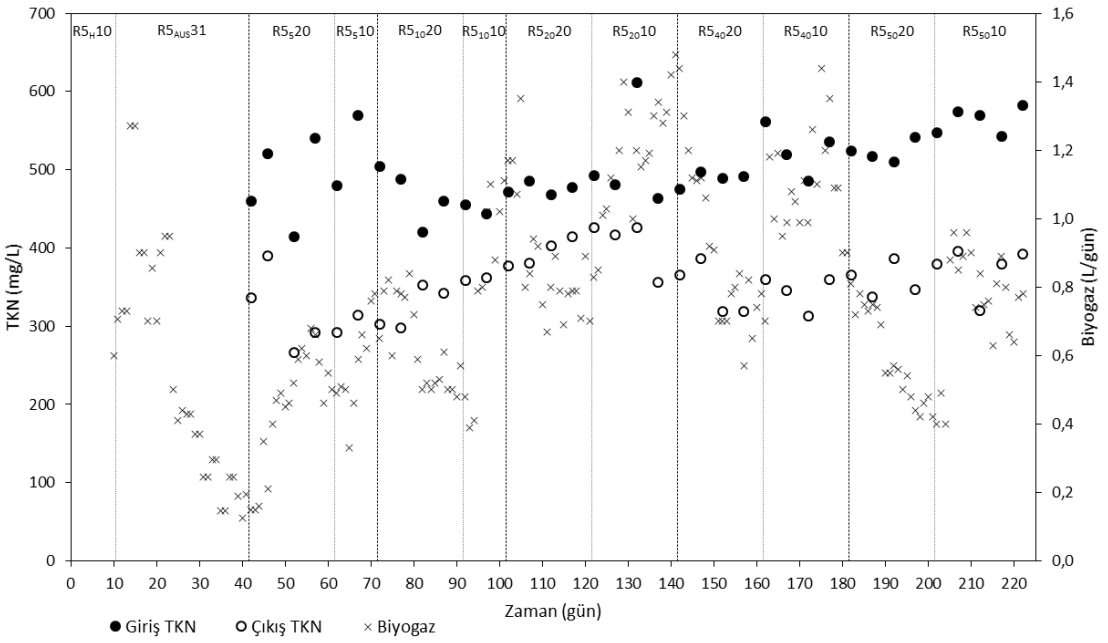
Şekil 5.111 R5 reaktörü içerisinde (42-222 günler arası) UAKM dağılımlarının değişimi

5.6.5 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TKN ve NH_3-N Değişimleri

5.6.5.1 R5 Reaktörü TKN ve NH_3-N Değişimleri

Tüm deneysel çalışma incelendiğinde R5 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TKN değerleri 414-561 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 266-426 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 491±39 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 352±43 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %13.4-45.9 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %28.1±9.5 olarak tespit edilmiştir.

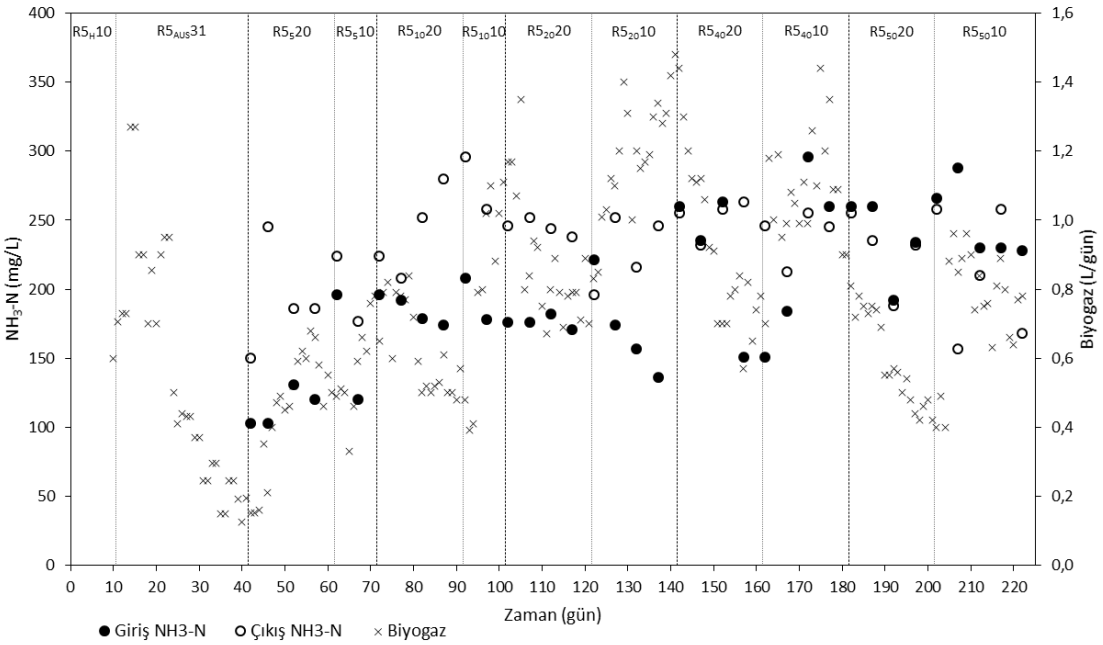
R5 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TKN değerleri 444-612 mg/L aralığında, çıkış suyu TKN değerleri ise 302-426 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TKN değeri 522±51 mg/L ve çıkış suyu ortalama TKN değeri 363±38 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TKN giderim verimi %13.3-44.9 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %30.2±8.9 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.112'de tüm deneysel çalışma boyunca R5 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TKN değerleri ve biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.112 R5 reaktörü giriş-çıkış TKN konsantrasyonları ve günlük biyogaz üretimi değişimi

Deneysel çalışma incelendiğinde R5 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının NH_3-N değerleri 103-266 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 150-296 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 186±49 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri 232±35 mg/L olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre NH_3-N konsantrasyonu %11.3 oranında düşmüş ve %137.9 oranında artmıştır. Bu değerlere göre ortalama konsantrasyon artışı %31.9±36.2 olarak bulunmuştur.

R5 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının NH_3-N değerleri 120-296 mg/L aralığında, çıkış suyu NH_3-N değerleri ise 157-258 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama NH_3-N değeri 213±55 mg/L ve çıkış suyu ortalama NH_3-N değeri 228±35 mg/L olarak bulunmuştur. Bu verilere göre NH_3-N konsantrasyonu %45.5 oranına kadar azalmış ve %80.9 oranına kadar artmıştır. Ortalama konsantrasyon artışı ise %14.6±32.7 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.113'te tüm deneysel çalışma boyunca R5 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış NH_3-N değerleri değişimi ve biyogaz üretimi gösterilmiştir.



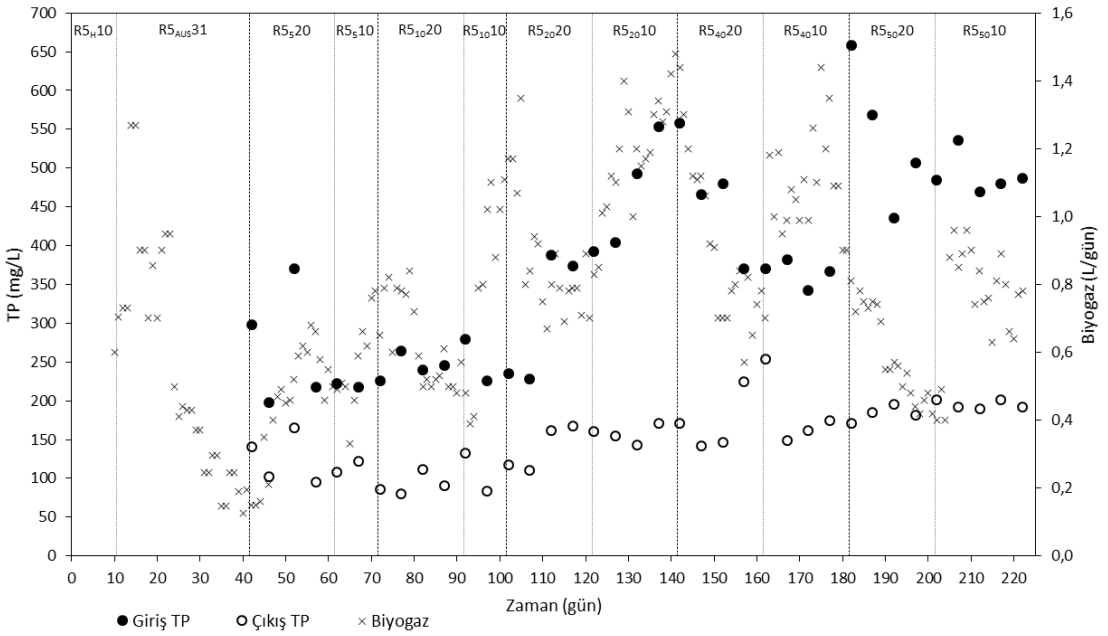
Şekil 5.113 R5 reaktörü giriş-çıkış NH_3-N konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.6.6 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe TP ve PO_4-P Değişimleri

5.6.6.1 R5 Reaktörü Giriş Çıkışında TP ve PO_4-P Değişimleri

Deneysel çalışma boyunca R5 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TP değerleri 198-568 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 80-254 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 352±110 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 150±46 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre TP giderim verimi %31.4-69.7 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi %56.3±9.6 olarak tespit edilmiştir.

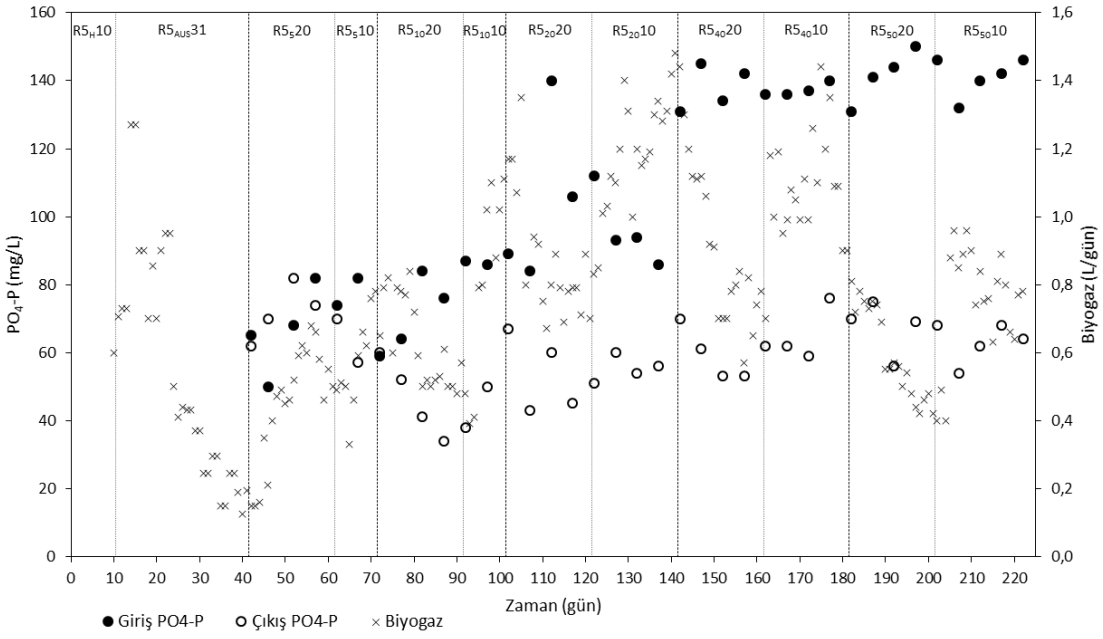
R5 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının TP değerleri 218-658 mg/L aralığında, çıkış suyu TP değerleri ise 83-201 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama TP değeri 417±142 mg/L ve çıkış suyu ortalama TP değeri 155±38 mg/L olarak hesaplanmıştır. Buna göre TP giderim verimi %44-74 arasında değişmiş olup ortalama giderim verimi 60.8±8.1 olarak bulunmuştur. Şekil 5.114'te tüm deneysel çalışma boyunca R5 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış TP değerleri değişimi ve biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.114 R5 reaktörü giriş-çıkış TP konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

Deneysel çalışma boyunca R5 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 50-150 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 34-82 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 106±34 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 58±13 mg/L olarak bulunmuştur. Buna göre PO_4-P konsantrasyonu %40 oranında düşmüş ve %62.7 oranında artmış olup ortalama giderim verimi %38.5±29.7 olarak tespit edilmiştir.

R5 reaktöründe HBS 10 gün periyotlarında besleme sıvısı karışımının PO_4-P değerleri 59-146 mg/L aralığında, çıkış suyu PO_4-P değerleri ise 50-76 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre besleme sıvısı karışımının ortalama PO_4-P değeri 113±29 mg/L ve çıkış suyu ortalama PO_4-P değeri 62±7 mg/L olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre çalışmanın ilk zamanlarındaki dengesizliklerinden dolayı PO_4-P konsantrasyonu %1.7 oranında arttığı görülmüştür. Ancak genel olarak giderim gerçekleşmiş ve bu oranın %59.1 seviyelerine kadar çıktığı tespit edilmiştir. Bu verilere göre ortalama giderim verimi %42.6±15.6 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.115'te tüm deneysel çalışma boyunca R5 reaktöründe izlenen giriş ve çıkış PO_4-P değerleri değişimi ve biyogaz üretimi gösterilmiştir.



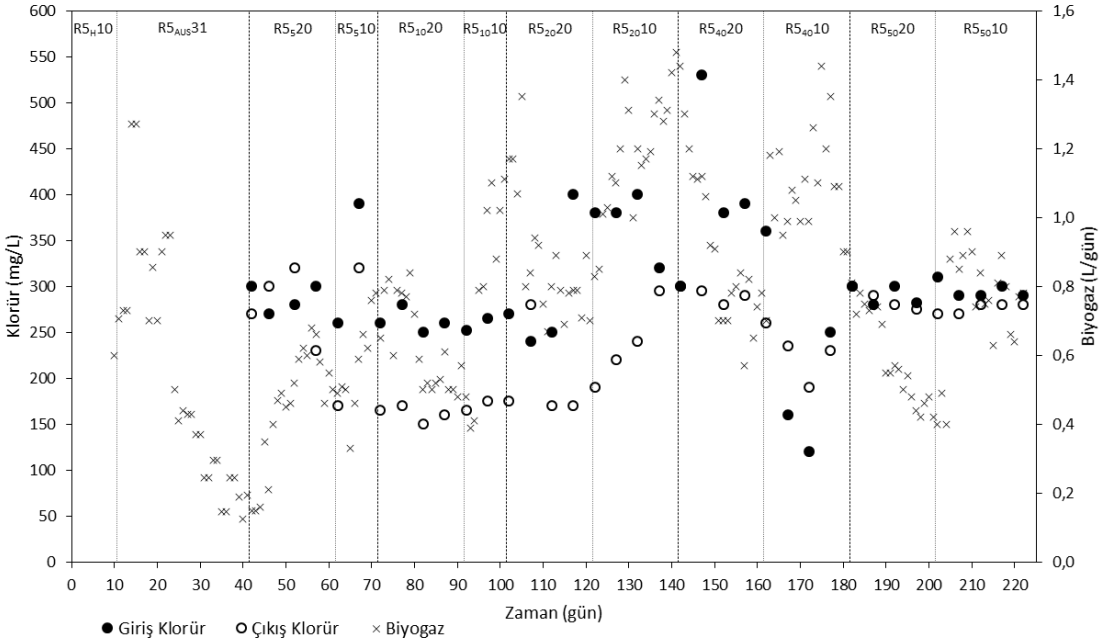
Şekil 5.115 R5 reaktörü giriş-çıkış PO_4-P konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.6.7 BBHG ile Arıtma Çamurunun Birlikte Kullanıldığı R5 Reaktöründe Klorür Değişimleri

5.6.7.1 R5 Reaktörü Klorür Değişimleri

Çalışma süresince yapılan klorür analizlerinde klorür değerlerinin zararsız konsantrasyonlarda olduğu tespit edilmiştir. HBS 20 gün periyotlarında R5 reaktörü besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 240-530 mg/L ve reaktör çıkışında ise 150-320 mg/L aralığında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama klorür konsantrasyonu besleme sıvısında 312±71 mg/L, reaktör çıkışında ise 237±58 mg/L olduğu belirlenmiştir.

HBS 10 gün periyotlarında R5 reaktörü besleme sıvısında klorür konsantrasyonu 120-400 mg/L ve reaktör çıkışında ise 165-320 mg/L aralığında değişim göstermiştir. Bu verilere göre ortalama klorür değeri besleme sıvısında 295±67 mg/L, reaktör çıkışında ise 248±52 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.116'da deneysel süreç boyunca R5 reaktöründe ölçülen giriş ve çıkış klorür değerleri değişimi ve biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.116 R5 reaktörü giriş-çıkış klorür konsantrasyonları değişimi ve günlük biyogaz üretimi

5.7 Deneysel Çalışmalar Boyunca R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Analiz Edilen Parametrelerin Kıyaslanması

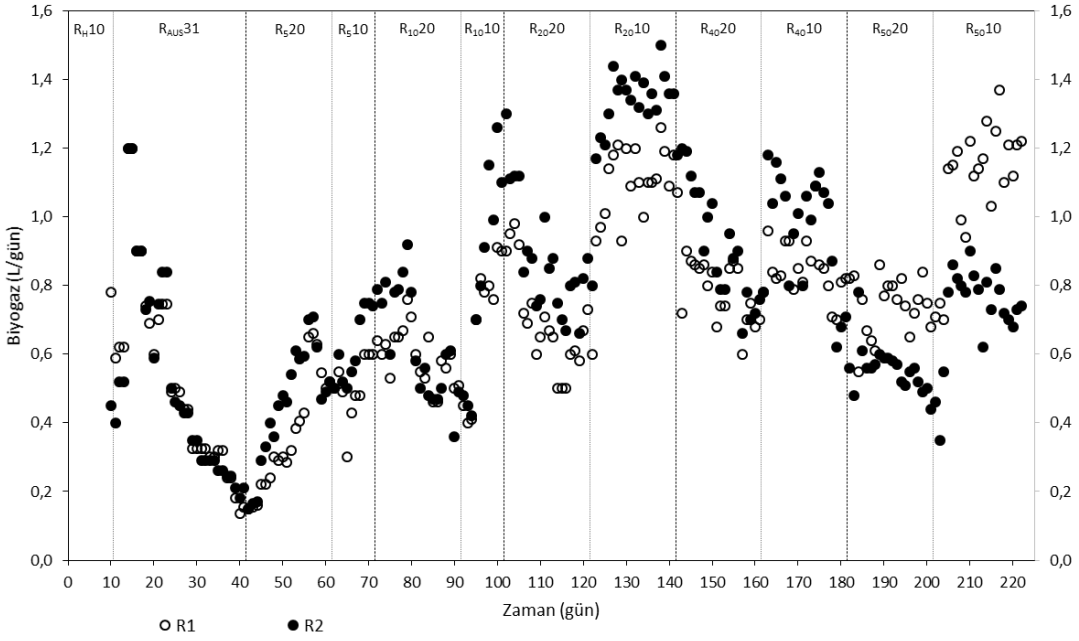
5.7.1 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Günlük Biyogaz Üretimlerinin Karşılaştırılması

Laboratuvar ölçekli deneysel çalışmanın 42-222. günleri arasında R1 reaktöründe biyogaz üretimi 20 günlük hidrolik bekleme sürelerinde 0.15-0.98 L/gün arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama biyogaz üretimi 0.63±0.19 L/gün olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma boyunca HBS 10 gün periyotlarında biyogaz üretimi 0.3-1.37 L/gün arasında ölçülmüştür. Buna göre ortalama biyogaz üretimi 0.92±0.24 L/gün olarak tespit edilmiştir.

5.7.1.1 R1-R2 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması

R2 reaktöründe biyogaz üretimi 20 günlük hidrolik bekleme sürelerinde 0.15-1.20 L/gün arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama biyogaz üretimi 0.68±0.23 L/gün olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma boyunca HBS 10 gün periyotlarında biyogaz üretimi 0.35-1.5 L/gün arasında ölçülmüştür. Buna göre ortalama biyogaz üretimi 0.95±0.30

L/gün olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.117'de deneysel süreç boyunca R1 ve R2 reaktörlerinde günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.117 R1 ve R2 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması

31 günlük aşı uyum sürecinin ardından $R_5$20 periyodunda R2 reaktörü günlük biyogaz üretiminin belirgin bir şekilde R1 reaktörü biyogaz üretiminden fazla olduğu görülmüştür. Uzun süre beslenmeyen reaktörler 42. günde atık beselemesi yapılması ile beraber $R_5$20 periyodunda biyogaz üretimi 56. güne kadar artış göstermiştir. R2 reaktöründe periyodun son günlerinde yaklaşık 0.2 L/gün kadar bir düşüş gözlemlenmiştir. $R_5$10 periyodunda 68. güne kadar R1 reaktörü ile arasında bir fark görülmezken bu günden sonra yaklaşık 0.1 L/gün bir fark ile R1'in önüne geçtiği görülmüştür.

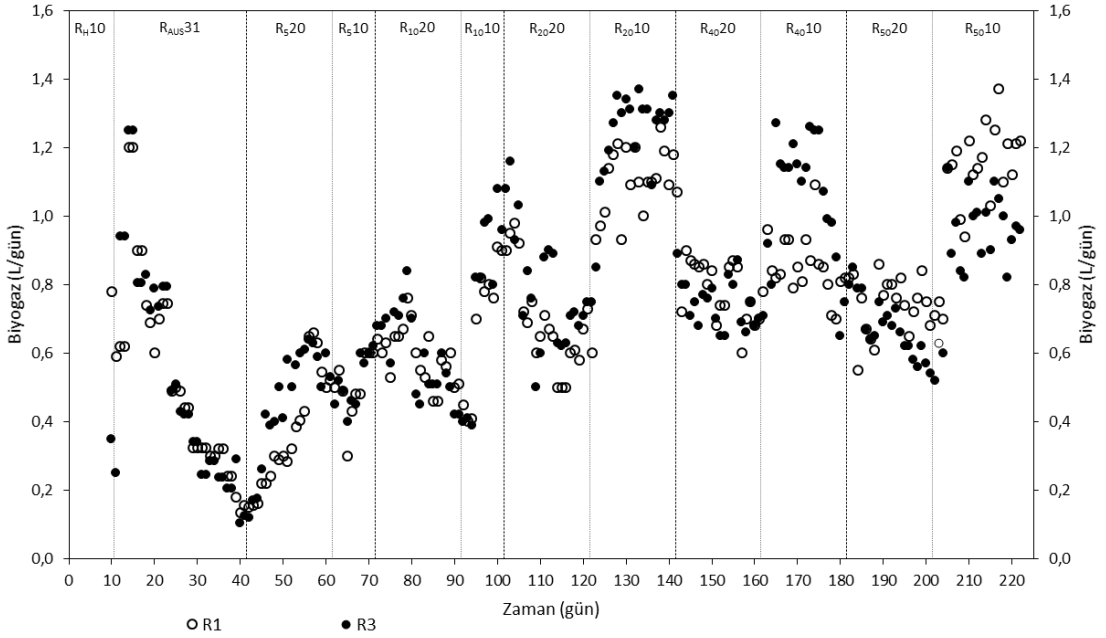
R_{10}20 periyodunda başlangıçta R1 reaktöründen 0.1 L/gün önde olan R2 reaktörünün periyodun ilerleyen günlerinde bir düşüş ile beraber yaklaşık R1 reaktörü biyogaz üretimi ile aynı seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. R_{10}10 periyodunda her iki reaktörde de önce bir düşüş daha sonrada hızlı bir artış görülmüştür. Ancak R2 reaktöründe periyodun son dönemlerindeki artış R1 rektöründen yaklaşık 0.3 L/gün daha fazla olmuştur. HBS 10 gün periyodundan HBS 20 gün periyoduna geçişte organik yükleme oranının düşmesiyle beraber genel bir düşüşün olduğu görülmektedir. R_{20}20 periyodunda R2 reaktöründeki üretilen günlük biyogaz miktarının açık bir şekilde R1 reaktöründe üretilen miktardan

fazla olduğu görülmektedir. Bu açık farkın $R_{20}10$ periyodunda daha da belirginleştiği görülmektedir. Burada %20 çim atığı ilavesinin BBHG'nin anaerobik çürütülmesiyle biyogaz üretimine önemli bir katkı sağladığı veya da BBHG'nin anaerobik çürümedeki eksik yönünü gerekli besi elementlerinin takviyesi ile tamamladığı düşünülmektedir.

Çalışmanın iki kademeli parçalama döneminde her iki reaktörde de genel olarak bir düşüşün yaşandığı gözlenmiştir. Ancak yine de $R_{40}20$ ve $R_{40}10$ periyotlarında R2 reaktörünün genel itibari ile biyogaz üretiminde R1 reaktöründen daha iyi olduğu görülmektedir. %40 atık besleme döneminin tersine olarak $R_{50}20$ ve $R_{50}10$ periyotlarında çim atığı ilavesinin biyogaz üretimine negatif etkisi olduğu görülmektedir. Özelliklede $R_{50}10$ periyodunda bu fark yaklaşık 0.4 L/gün ve daha fazla olarak ölçülmüştür. Bu düşüşün çim atıklarının hidroliz ve asitojen safhasını hızlı bir şekilde geçmesi ile beraber anaerobik şartlar için uygun besi karışımını bozmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.7.1.2 R1 ve R3 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması

R3 reaktöründe biyogaz üretimi 20 günlük hidrolik bekleme sürelerinde 0.12-1.16 L/gün arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama biyogaz üretimi 0.64±0.17 L/gün olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma boyunca HBS 10 gün periyotlarında biyogaz üretimi 0.39-1.37 L/gün arasında ölçülmüştür. Buna göre ortalama biyogaz üretimi 0.97±0.27 L/gün olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.118'de deneysel süreç boyunca R1 ve R3 reaktörlerinde günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.118 R1 ve R3 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması

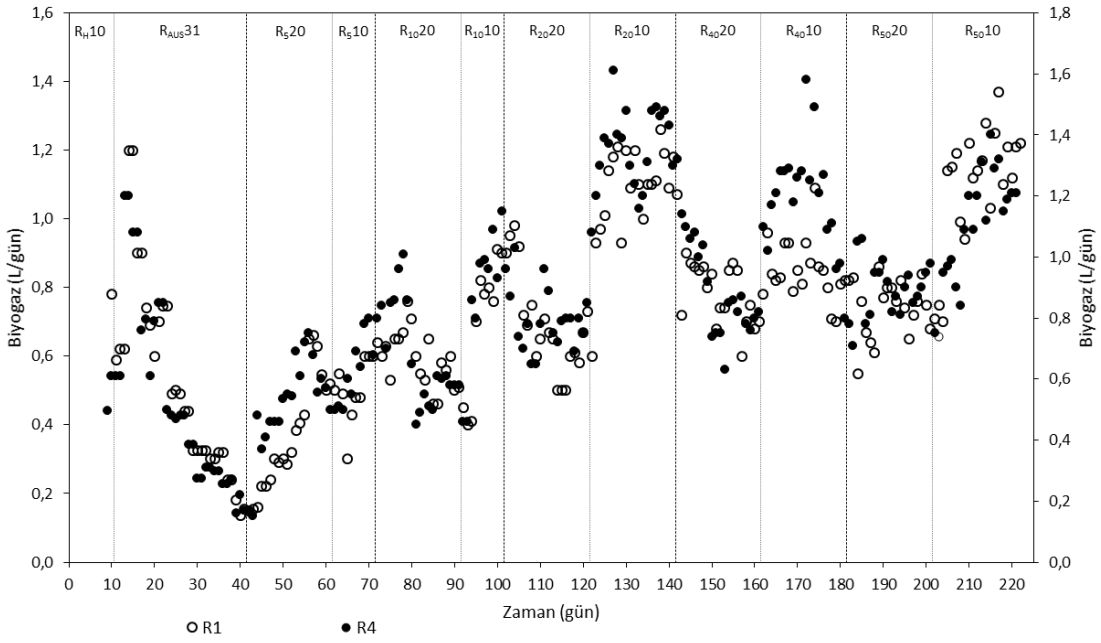
Çalışmada kullanılan bütün atıkların farklı karışım oranları ile BBHG'ne karıştırıldığı R3 reaktöründe $R_5$20 periyodunda beslemeye başlanılması ile günlük biyogaz üretimde hızlı bir artış gerçekleşmiştir. R3 reaktöründe %5'lik bir katkı olmasına rağmen biyogaz üretiminin sadece BBHG'nin kullanıldığı R1 reaktöründen daha iyi seviyelerde olduğu görülmüştür. $R_5$10 periyodunda R3 ile R1 reaktörlerinde yaklaşık aynı seviyelerde biyogaz üretimi gerçekleştiği görülmüştür. R_{10}20 ve R_{10}10 periyotlarında R3 ile R1 reaktörleri arasında önemli bir farkın olmadığı görülmüştür. Sadece R_{10}10 periyodunun sonunda R3 reaktöründe biyogaz üretiminin R1 reaktöründen daha fazla gerçekleştiği tespit edilmiştir. R_{20}20 periyodunda fark edilir bir düzeyde R1 reaktörü biyogaz üretim performansının üzerine çıkan R3 reaktörünün R_{20}10 periyodunda biyogaz üretiminin yaklaşık 0.3 L/gün gibi önemli bir farkla öne çıktığı görülmüştür.

R_{40}20 periyodunda R3 ve R1 reaktörlerinde birbirine yakın biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. R3 reaktöründe R_{40}10 periyodunda R_{20}10 periyoduna göre biyogaz üretiminde bir düşüş yaşanmış ancak R1 reaktöründen yaklaşık 0.3 L/gün kadar daha fazla bir biyogaz üretiminin gerçekleştiği tespit edilmiştir. R_{50}20 periyodunda R3 reaktöründe günlük biyogaz üretiminin R1 reaktörü günlük biyogaz üretimine göre daha az olduğu görülmüştür. R_{50}10 periyodunda ise bu durum daha da belirginleşmiştir. Yine

aynı şekilde R3 reaktöründe bu periyotta atık karışımının biyogaz üretimine negatif bir etkisinin olduğu görülmüştür.

5.7.1.3 R1 ve R4 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması

R4 reaktöründe biyogaz üretimi 20 günlük hidrolik bekleme sürelerinde 0.15-1.32 L/gün arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama biyogaz üretimi 0.75±0.21 L/gün olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma boyunca HBS 10 gün periyotlarında biyogaz üretimi 0.46-1.61 L/gün arasında ölçülmüştür. Buna göre ortalama biyogaz üretimi 1.10±0.29 L/gün olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.119'da deneysel süreç boyunca R1 ve R4 reaktörlerinin günlük biyogaz üretimi karşılaştırılmıştır.



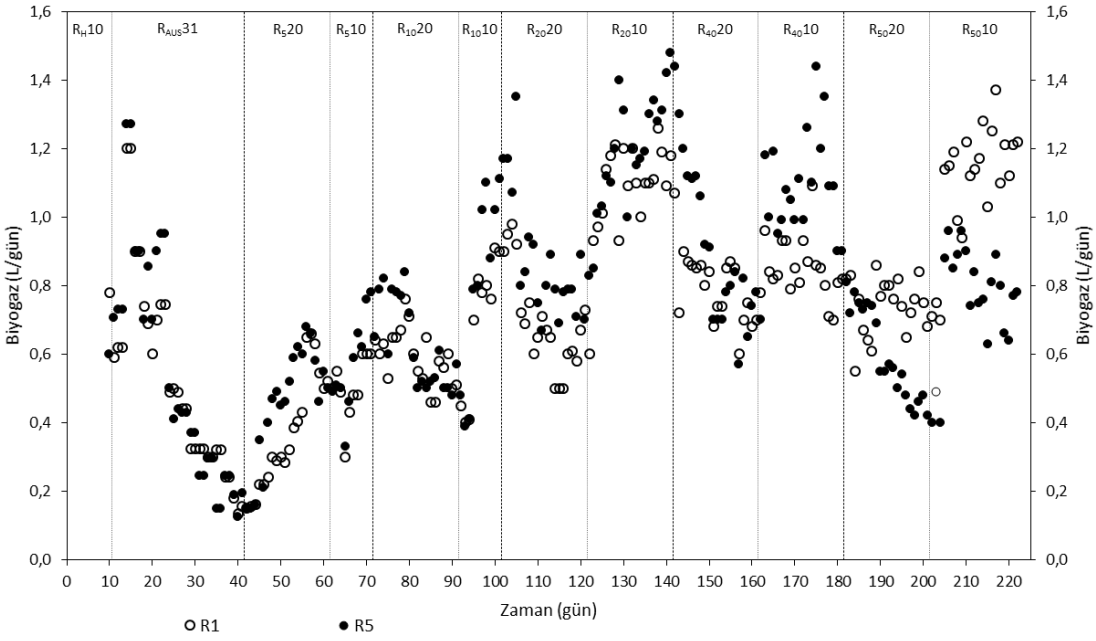
Şekil 5.119 R1 ve R4 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması

R4 reaktöründe de atık beslemesinden sonra günlük biyogaz üretiminde hızlı bir artış gerçekleşmiş ve R1 rektöründen 57. güne kadar daha fazla biyogaz üretildiği tespit edilmiştir. Genel olarak R1 reaktörü ile yakın değerlerde biyogaz üretiminin gerçekleştiği görülmüştür. $R_{20}10$ periyodunda R1 reaktöründe üretilen biyogaz miktarından bir miktar daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca $R_{40}10$ periyodunda da R4 reaktöründe biyogaz üretiminin R1 reaktöründen daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu üstünlük çok azda olsa $R_{50}20$ periyodunda da devam etmiştir. $R_{50}10$ periyodunda durum tersine dönmüş ve R4 reaktöründe biyogaz üretiminin R1'den azda olsa düşük olduğu görülmüştür.

Ancak biyogaz üretimi açısından ikincil parçalamandan kaynaklı negatif etkilere en dirençli R1 reaktörünün daha sonrada R4 reaktörünün olduğu görülmüştür.

5.7.1.4 R1 ve R5 Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması

R5 reaktöründe biyogaz üretimi 20 günlük hidrolik bekleme sürelerinde 0.15-1.35 L/gün arasında ölçülmüştür. Bu verilere göre ortalama biyogaz üretimi 0.67±0.23 L/gün olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma boyunca HBS 10 gün periyotlarında biyogaz üretimi 0.33-1.48 L/gün arasında ölçülmüştür. Buna göre ortalama biyogaz üretimi 0.95±0.28 L/gün olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.120'de deneysel süreç boyunca R1 ve R5 reaktörlerinde günlük biyogaz üretimi gösterilmiştir.



Şekil 5.120 R1 ve R5 reaktörlerindeki günlük biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması

R5 reaktöründe de diğer atık ilave edilen reaktörlerde olduğu gibi günlük biyogaz üretiminin R_S20 periyodunda R1 reaktörüne göre daha iyi olduğu görülmüştür. R_S20 periyodunun sonunda ve R_S10'nun başlarında bir düşüşle beraber günlük biyogaz üretiminin çoğunlukla R1 reaktöründen daha yüksek olduğu görülmüştür. R_{10} periyodunda benzer biyogaz üretimleri gözlenmiştir. Sadece R_{10}'un başında ve sonunda R5 reaktörü biyogaz üretiminin fark edilir bir şekilde R1 biyogaz üretiminden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. $R_{10}10$ periyodunun son günlerinden itibaren R_{20} periyodunun sonuna kadar belirgin bir şekilde biyogaz üretiminin R5 reaktöründe daha yüksek olduğu

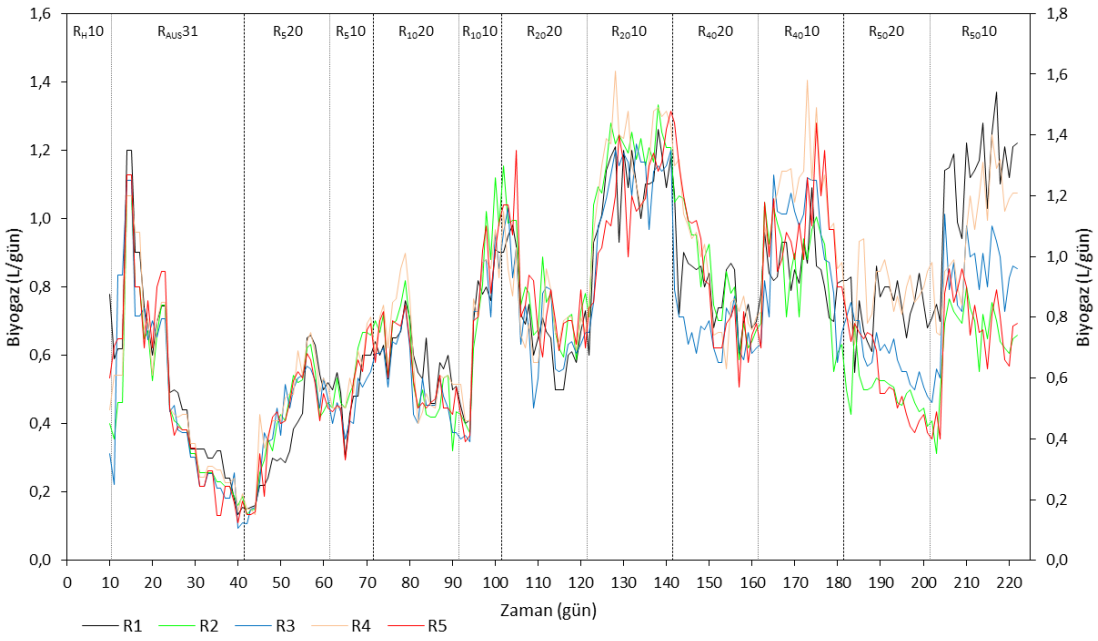
tespit edilmiştir. $R_{20}10$ periyodunun başlangıcında biyogaz üretiminde her iki reaktörde de bir artışla birlikte benzer değerler elde edilmiştir ancak bu periyodun sonunda R5 reaktöründe daha yüksek değerler ölçülmüştür.

$R_{40}20$ periyodunda her iki reaktörde de birbirine yakın biyogaz üretiminin gerçekleştiği görülmüştür. Ancak periyodun başlangıcında R5 reaktöründe bir önceki periyodun performansının yansımalarından dolayı biyogaz üretiminin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. $R_{40}10$ periyodunda R5 reaktörü günlük biyogaz üretiminin belirgin bir şekilde R1 reaktörü biyogaz üretiminin üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. $R_{50}20$ periyoduna geçildiğinde R5 reaktöründeki biyogaz üretiminin R1 reaktörü biyogaz üretiminden yaklaşık 0.3 L/gün gibi belirgin bir farkla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. $R_{50}10$ periyodunda ise bu fark iyice açılarak 0.4 L/gün civarlarında olduğu tespit edilmiştir.

5.7.1.5 Tüm Reaktörlerinin Günlük Biyogaz Üretimi Bakımından Karşılaştırılması

Deneysel çalışmalar boyunca tüm reaktörler incelendiğinde 42. günde beslemeye başlanılmasıyla beraber günlük biyogaz üretimi bütün reaktörlerde hızlı bir şekilde artış göstermiştir. %5 farklı atık katkısının yapıldığı $R_5$20 periyodunda atık karışımı yapılan reaktörlerin R1 reaktöründen daha yüksek miktarlarda biyogaz ürettiği saptanmıştır. Bu üstünlük genel olarak $R_{40}10$ periyodunun sonuna kadar devam etmiştir. $R_{50}20$ ve $R_{50}10$ periyotlarında durum tersine dönmüş ve farklı atık katkısıyla birlikte çürütmenin yapıldığı rektörlerdeki günlük biyogaz üretim seviyesi R4 reaktörü hariç R1 reaktörü biyogaz üretim seviyesinin altına düşmüştür. R4 reaktörü besleme atığı içerisinde kullanılan pamuk küspesi ve zeytin prinası atıklarının parçalanmasına rağmen partikül yapısını koruduğu ve bu hali ile de BBHG'ne bir benzerliğinin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca tek kademeli parçalama döneminde hayvansal yemde bulunan pamuk küspesi türevi malzemeler elek üzerinde kalırken iki kademeli parçalama döneminde elek altına geçebilir durma gelmiş ve R4 reaktöründe kullandığımız endüstriyel atık karışımına benzer bir yapıya gelmiştir. Tek kademeli parçalama döneminde özellikle %20 farklı atık karışımının kullanıldığı reaktörlerde fark edilir bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun BBHG'nin hayvansal sindirimden geçtikten sonra kolay kullanılabilir substrat miktarının azalması ile eksilen substratın diğer atıklarla tamamlanması sayesinde olduğu

düşünülmektedir. Bütün reaktörlerde iki kademeli atık parçalama işleminden sonra günlük biyogaz üretim miktarında belirgin bir düşüş yaşanmıştır. Bu düşüşün daha küçük parçalara ayrılan atıkların hidroliz ve asitojen safhalarını daha hızlı ve kolay bir şekilde aşmalarıyla asit birikimine sebep olmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.121'de deneysel süreç boyunca tüm reaktörlerdeki günlük biyogaz üretimi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.121 Tüm reaktörlerdeki günlük biyogaz üretimlerinin değişimi

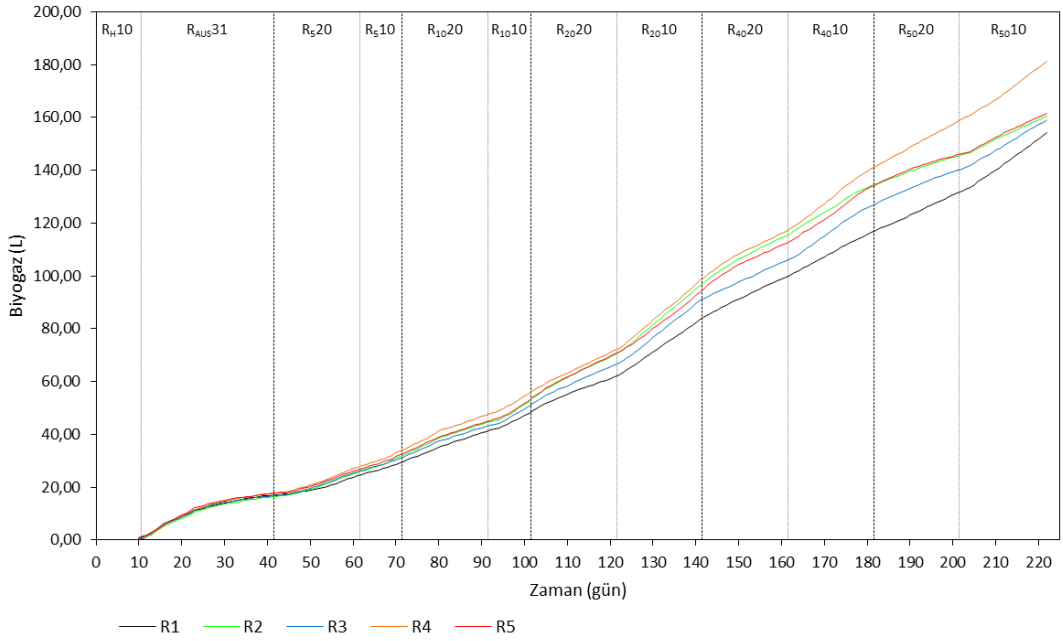
5.7.2 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Kümülatif Biyogaz Üretimlerinin Karşılaştırılması

Aşı uyum sürecinde kesikli beslenen reaktörler 31 gün boyunca BBHG'ne adapte olurken hem besleme sıvısı hemde aşı ile gelen ve kolay parçalanabilen substratı tüketmesi sağlanmıştır. Bu şekilde 42. günde besleme yapılmasıyla beraber oluşan biyogaz üretimi ve atık arıtımının genel itibariyle besleme sıvısına bağlı olması sağlanmıştır.

Tek kademeli parçalama döneminde en yüksek biyogaz üretimi R4 reaktöründe daha sonra R2 ve R5 reaktöründe olduğu gözlemlenmiştir. Ancak R2 reaktörü $R_{20}10$ periyodunun yarısından sonra R5 reaktörü biyogaz üretimini de geçtiği tespit edilmiştir. R3 reaktörü bu sıralamada R4, R2 ve R5 ten sonra gelmiştir. Biyogaz üretimi kümülatif

olarak incelendiğinde R1 reaktörünün en geride kaldığı bu veriye göre de BBHG'ne farklı atık ilavesinin biyogaz üretiminde artı katkılar sunduğu görülmüştür.

İki kademeli parçalama döneminde biyogaz üretiminde nispeten bir gerileme görülmüş $R_{50}10$ periyodundan sonra R1 reaktörü aradaki farkı kapatmaya başlamıştır. Özellikle R2 ve R5 rektörlerinde 182. günden sonra önemli bir düşüş görülmüştür. R5 reaktörünün iki kademeli parçalama döneminde de en fazla biyogaz üreten reaktör olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra R2 ve R5 reaktörü biyogaz üretiminde öne çıkmış ve 142-182. günler arasında daha iyi olan R2 reaktörüne R5 reaktörü yetişmiş ve her iki reaktörde de toplamda birbirine yakın bir biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. R3 reaktörü kümülatif olarak sadece R1 rektörünün önüne geçmiştir ancak en son periyotta R4 reaktörü ile benzer bir biyogaz üretimi sergileyerek bu dönemde diğer reaktörlerden daha fazla biyogaz ürettiği tespit edilmiştir. Tüm deneysel süreç boyunca rektörlerin kümülatif biyogaz üretimleri Şekil 5.122'de gösterilmiştir.

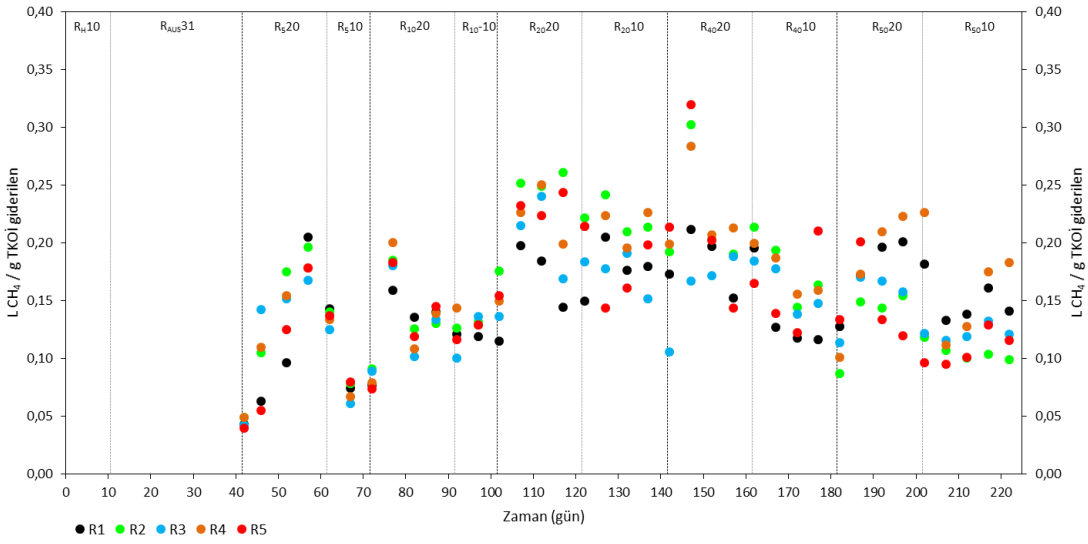


Şekil 5.122 Çalışma boyunca tüm reaktörlerindeki kümülatif biyogaz üretimi

5.7.3 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde Giderilen TKOİ Başına Üretilen CH_4 Miktarlarının Karşılaştırılması

1 mol CH_4'ın oksidasyonu için 2 mol (64 g) O_2 gerekmektedir. Bu durumda standart şartlarda giderilen 1 g KOİ başına 0.35 L CH_4 üretilebilmektedir. Bu miktar, 35°C sıcaklık ve 760 mm Hg basıncında 0.395 L CH_4/g $KOİ_{gid.}$'e karşı gelmektedir [16].

Deneysel çalışmalarda üretilen biyogazın %65 oranında CH_4 ihtiva ettiği kabulüyle R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde giderilen g KOİ başına üretilen L CH_4 miktarları Şekil 5.123'te gösterilmiştir. Burada en yüksek metan üretiminin 0.32 L CH_4/g $KOİ_{gid.}$ olduğu görülmektedir. Biyogaz üretim potansiyelinin iyileştiği %20 ilave atık döneminde HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında metan üretiminin 0.15-0.25 L CH_4 /g $KOİ_{gid.}$ aralığında değiştiği görülmektedir. Burada standart şartlara göre metan üretim potansiyelinin beklenenden daha düşük çıkmasının sebebi olarak, beslenen organik maddenin bir kısmının deneysel çalışma için kullanılması ve bir kısmının ise reaktörler içerisinde biyokütle olarak birikmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir. Yine Şekil 5.123 incelendiğinde çim atığı ilavesi kullanılan R2 reaktöründe çalışmanın son kırk günü hariç genel olarak diğer reaktörlere göre giderilen KOİ'ye göre daha yüksek seviyelerde metan üretildiği görülmektedir. Özellikle mısır bitkisinin hızlı büyümesi ve daha az alanda daha fazla bitkisel yeşil materyal üretebilmesinin yanında R2 reaktöründe de görülen artı katkıların yeşil bitkisel bir materyal olan mısır bitkisinin birçok ülkede anaerobik sistemlerde kullanılmasında önemli bir etken olduğu düşünülmektedir. Biyogaz üretimini UKM başına üretilen biyogaz miktarı olarak ifade etmek istersek, literatür araştırmalarına göre BBHG'nin biyogaz üretim potansiyeli kg UKM başına 140-266 L arasında değişmektedir [136]. Deneysel çalışmalarda reaktörlerde biyogaz üretiminin 50-500 L biyogaz/kg UKM giderilen arasında değiştiği görülmüştür.

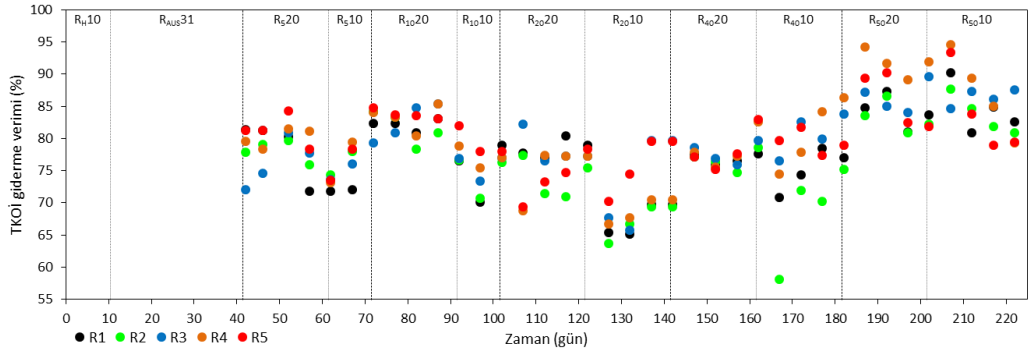


Şekil 5.123 Çalışma boyunca tüm reaktörlerdeki giderilen g TKOİ başına üretilen CH_4 miktarları

5.7.4 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde TKOİ Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması

Deneysel çalışma boyunca bütün reaktörlerde HBS 20 gün periyotlarında TKOİ giderimi %69-94 aralığında HBS 10 gün periyotlarında ise %58-93 aralığında gerçekleşmiştir. Çiler [62] kuvvetli atıksuların anaerobik arıtılması üzerine yaptığı çalışmada TKOİ gideriminin %24.4-93.9 arasında değiştiğini görmüş ve kararlı süreçlerde TKOİ gideriminin %70-80 aralığında olduğunu tespit etmiştir. Çalışma genel olarak incelendiğinde HBS 20 gün periyotlarında TKOİ giderim veriminin HBS 10 gün periyotlarına göre %10 civarında daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. TKOİ giderim veriminin $R_5$20 ve $R_5$10 atık döneminden R_{10}20 ve R_{10}10 dönemine geçildiğinde az da olsa verimde bir artışın olduğu belirlenmiştir. Bu artışın uzun süre beslenmeyen reaktörlerin besleme yapılmasıyla beraber anaerobik şartların iyileşmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. %10 atık katkısının yapıldı dönemden %20 atık katkısının yapıldığı döneme geçildiğinde TKOİ giderim veriminde R_{10}20 ve R_{10}10 periyotlarının her ikisinden sonra yaklaşık %5 civarında bir düşüşün yaşandığı tespit edilmiştir. Bu düşüşün biyogaz oluşumunun çamuru çıkışa taşımasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. İki kademeli parçalama (%40 ve 50 atık katkısı) dönemleri incelendiğinde hem reaktörlerdeki anaerobik çamur artışından hem de ikincil parçalamadan kaynaklı olarak TKOİ giderim veriminin yükseldiği düşünülmektedir. Bu artışa fiziksel ön işlemin pozitif, ikincil parçalanmadan kaynaklı olduğu düşünülen asit birikiminin ise negatif tesirinin olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.124'te deneysel süreç

boyunca R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde günlük TKOİ giderim verimlerinin değişimi gösterilmiştir.



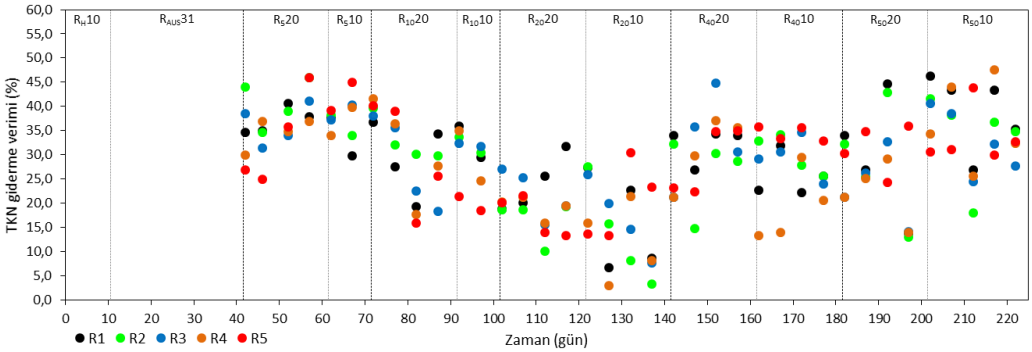
Şekil 5.124 Çalışma boyunca tüm reaktörlerdeki TKOİ giderim verimlerinin değişimi

R2 reaktöründe TKOİ gideriminin diğer reaktörlere göre genel olarak daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun çözünmüş kısmın reaktör içerisinde duru faza geçerek reaktörden çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. R5 reaktöründe TKOİ gideriminin genel olarak diğer reaktörlere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. R5 reaktöründe kullanılan arıtma çamuru katkısının hidrofobik yapısı nedeniyle genellikle çamur yapısında tutulmasından hem de biyobozunurluğunun daha önceki arıtma işlemlerinden dolayı daha kolay olmasından ötürü TKOİ giderme verimini iyileşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. İki kademeli parçalama döneminde (142-222. günler arasında) R3 reaktöründe de TKOİ gideriminin genel olarak diğer reaktörlere nazaran üst seviyelerde olduğu görülmüştür.

5.7.5 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde TKN Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması

TKN giderim verimi genel itibari ile bütün reaktörlerde birbirine yakın seviyelerde gerçekleşmiştir. Tek kademeli parçalama döneminin başlangıcında hafif bir artışın ardından dönemin sonuna kadar azalan bir seyirde ilerlemiştir. İki kademeli periyodun başlangıcından itibaren belirgin bir artıştan sonra reaktörlerdeki çamur birikimine paralel olarak TKN gideriminin arttığı düşünülmektedir. Besleme atığında azot konsantrasyonu ne kadar yüksek olursa olsun mevcut anaerobik mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu azot miktarı değişmeyeceğinden düşük TKN konsantrasyonuna sahip BBHG'nin ana atık olarak kullanıldığı çalışmada, TKN gideriminin biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Çalışma genelinde reaktörlerde TKN giderimi ortalama %28, en fazla ise %45'ler civarında gerçekleşmiştir. Demirer ve Chen [65] anaerobik reaktöre 0.96

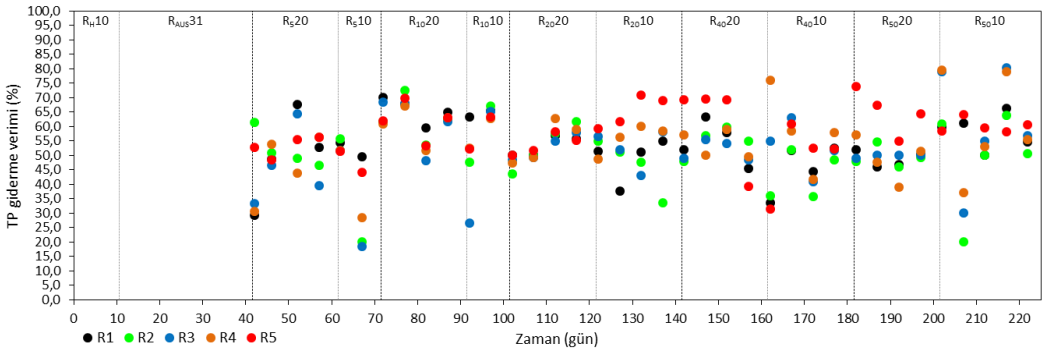
g/L KOİ (BBHG) beslemesi yaptıklarında %20-30 oranında TKN gideriminin gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. BBHG'nin kullanıldığı farklı çalışmalarda %48 [150] ve %40 [65] oranlarına kadar TKN gideriminin olduğunu bildirmişlerdir. Bunun yanında anaerobik çalışmalarda genellikle TKN gideriminin oldukça düşük olduğu görülmüş ve bunun anaerobik süreçler için normal bir durum olduğu belirtilmiştir [65], [201]. Bu durumun anaerobik prosesten çıkan çamurun tarımsal gübre olarak kullanılmasına imkân tanıyacağı düşünülmektedir. Şekil 5.125'te çalışmada kullanılan 5 reaktör için TKN giderme verimi gösterilmiştir.



Şekil 5.125 Çalışma boyunca tüm reaktörlerdeki TKN giderim verimlerinin değişimi

5.7.6 R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörlerinde TP Giderim Verimlerinin Karşılaştırılması

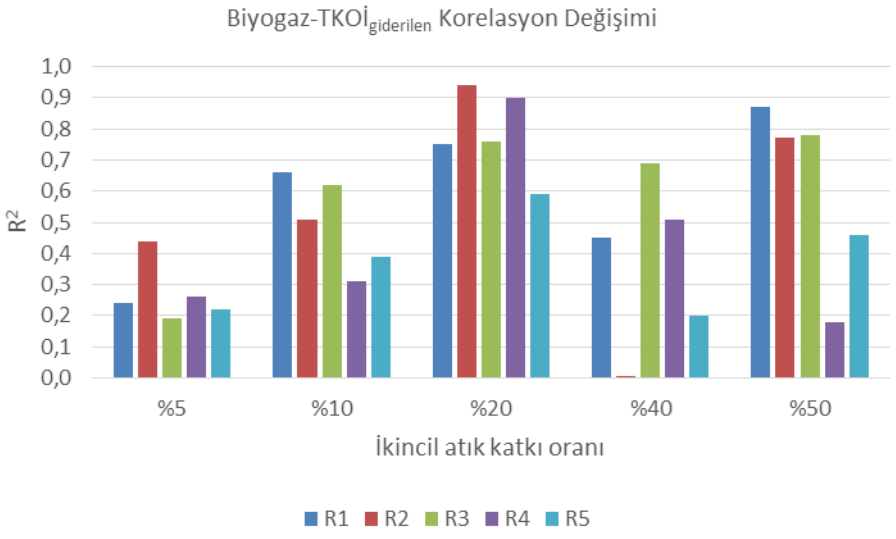
Çalışma boyunca TP gideriminin bütün reaktörlerde benzer aralıkta olduğu tespit edilmiştir. TP giderim verimi HBS 20 gün periyodunda %27-80 iken HBS 10 gün periyotlarında ise %18-80 aralığında olduğu görülmüştür. Demirer ve Chen [65] anaerobik reaktöre yaklaşık 1 g/L KOİ beslemesi yapıldığında %27-61 oranında TP gideriminin gerçekleştiğini görmüşlerdir. Deneysel çalışmada, musluk suyundan gelen kalsiyumun reaktör içerisindeki fosforu bağlayarak kalsiyum orta-fosfat şeklinde çökeltmesinden dolayı TP giderim veriminin literatür verilerine göre biraz daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Anaerobik ortam mikroorganizmaları için gerekli olan fosfor mikroorganizmaların faaliyetleri nispetince kullanılmış geri kalanı çıkış suyu ile ortamdan ayrılmıştır. İşte bu sebepten ötürü anaerobik ortamda daha basit formlara parçalanan fosfor, çıkış suyunu bitkisel gübre bakımından değerli kılmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan 5 reaktör için TP giderim veriminin değişimi Şekil 5.126'de gösterilmiştir.



Şekil 5.126 Çalışma boyunca tüm reaktörlerindeki TP giderim verimlerinin değişimi

5.7.7 Reaktörlerde TKOİ Giderim Verimi ile Biyogaz Üretimi Arasındaki Korelasyonun İncelenmesi

Rektörlerde biyometanizasyon süreçlerinin iyileşmesi ile beraber TKOİ giderim verimi ile biyogaz üretimi arasındaki korelasyonun iyileştiği görülmüştür. Reaktörler %5-10 atık katkısının yapıldığı HBS 20 gün periyotlarında 20 gün HBS 10 gün periyotlarında 10 gün süreyle toplamda 30 gün, %20-40-50 atık katkısının yapıldığı periyotlarda ise HBS 20 gün ve 10 gün işletme şartlarının her ikisinde de 20 gün toplamda 40 süre ile çalışılmıştır. Reaktörlerde %5 katkının yapıldığı periyotlar incelendiğinde R2 reaktöründe TKOİ giderimi ile biyogaz üretimi arasındaki korelasyonun daha iyi olduğu görülmektedir (Şekil 5.127). Burada çim katkısı ile beraber BBHG'nin anaerobik çürüme için gerekli olan şartları daha iyi karşıladığı düşünülmektedir.

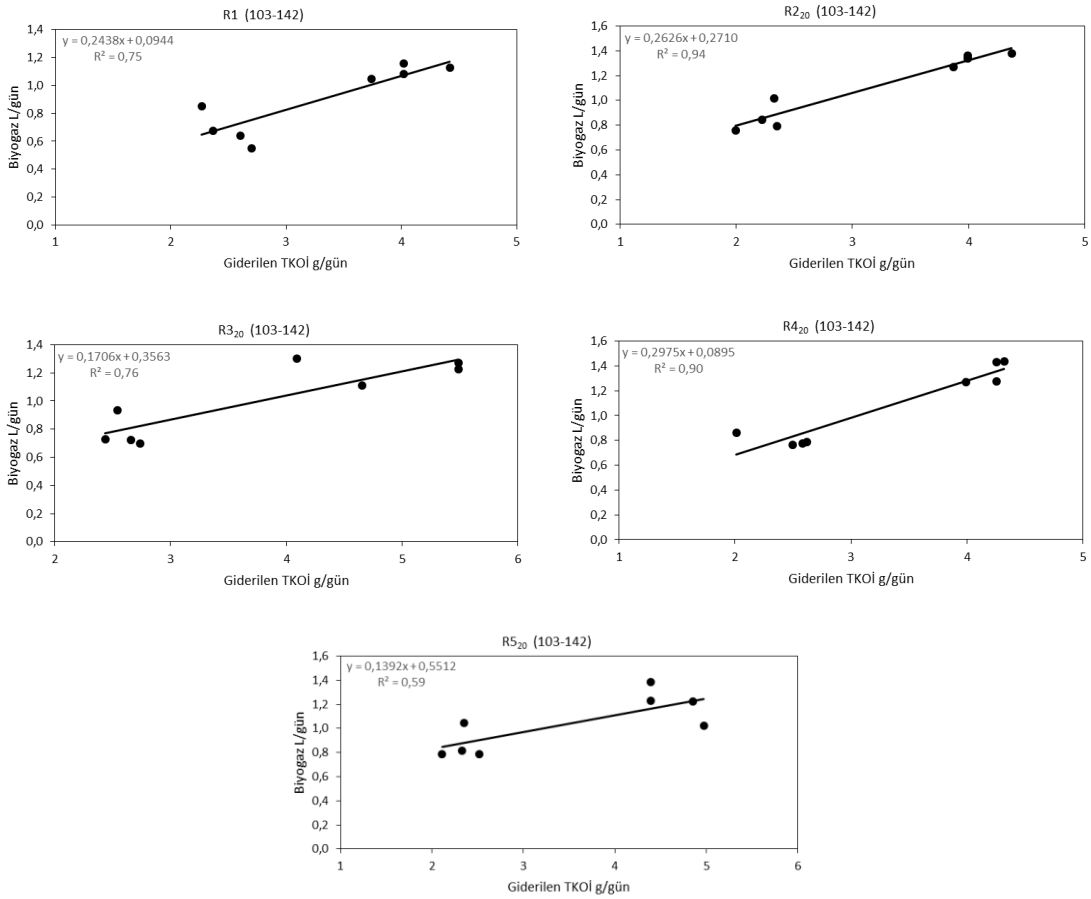


Şekil 5.127 Değişen atık katkı oranlarına göre R^2 değişimi

Şekil 5.127 incelendiğinde %20 katkının yapıldığı döneme kadar korelasyonda genel bir iyileşmenin olduğu ve R^2'nin %20 katkının yapıldığı periyotta, o döneme kadarki en iyi değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Ancak İkincil parçalama dönemine geçildiğinde korelasyonun tekrar bozulduğu daha sonra sisteme NaOH ilave edilmesi ile beraber %50 atık katkısının olduğu periyotta R4 hariç diğer reaktörlerde önemli bir düzelmenin olduğu tespit edilmiştir. Burada R4 reaktörüne sodyum hidroksit ilavesinin olumsuz etkisinin olduğu düşünülmektedir.

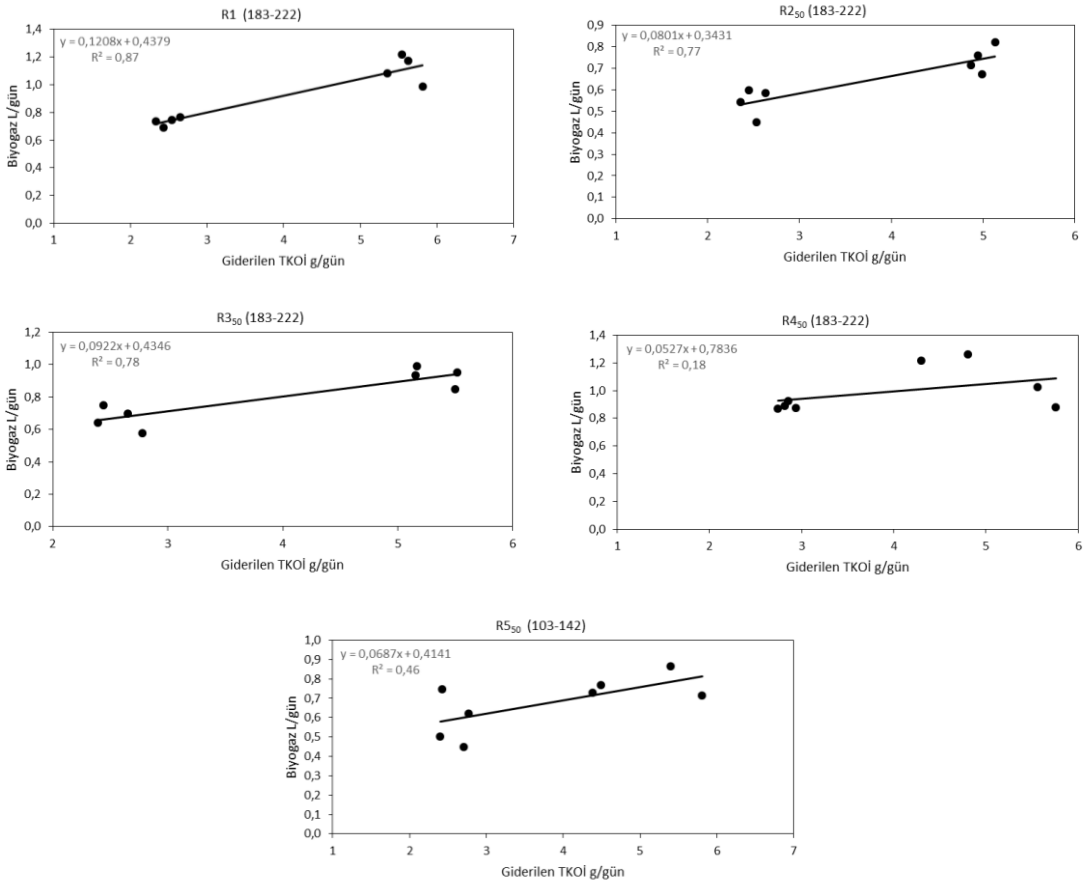
İkincil parçalama ile beraber bütün reaktörlerde sistem stabilitesinin bozulduğu gözlemlenmiştir. Bu dönemde en dirençli reaktörün R1 reaktörü olduğu belirlenmiştir. Bu direncin BBHG'sinin iyi bir tamponlama kapasitesine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. %40 atık ilavesinin yapıldığı dönemde R3 reaktöründe giderilen TKOİ ve biyogaz üretimi arasındaki korelasyonun diğer reaktörlere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Burada R3 reaktöründe bütün atıkların karıştırılmasından dolayı biyobozunabilirlik oranının yüksek olduğu ve bu nedenle de ikincil parçalamaya karşı daha dirençli olduğu düşünülmektedir. Bu dönemde R3 reaktöründe R^2=0.7 civarında bir korelasyonun olduğu tespit edilmiştir. %40 atık ilavesi döneminin sonunda reaktörlere NaOH ile yapılan alkalinite takviyesinin sistem kararlılığını bununla birlikte giderilen TKOİ ve biyogaz üretimi arasındaki korelasyonu iyileştirdiği düşünülmektedir.

Şekil 5.128'de görüldüğü üzere, %20 atık katkısının yapıldığı dönemin kısa süreli bir çalışıma dönemi olmasına karşın giderilen TKOİ yükü ile biyogaz üretimi arasında önemli bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Burada özellikle çim atıkları katkısının yapıldığı R2 (R^2=0.94) reaktörü ve evsel-endüstriyel atık katkısının yapıldığı R4 reaktöründe (R^2=0.90) oldukça yüksek bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.128 %20 atık katkısının yapıldığı dönemde TKOİ giderimi ile biyogaz üretimi arasındaki korelasyon

Şekil 5.129 incelendiğinde %40 atık ilavesinin yapıldığı dönemle beraber başlatılan ikincil parçalama süreci %50 atık katkısının yapıldığı dönemde ikincil parçalamadan ötürü proses kararlılığı genel itibari ile bozulduğundan bu dönemde korelasyonlar nispeten düşük çıkmıştır. R1, R2 ve R3 reaktörlerinde sırasıyla 0.87, 0.77 ve 0.78 gibi nispeten iyi sayılabilecek korelasyonların olduğu görülmektedir. Ancak R4 ve R5 için aynı durum söz konusu olmamış ve sırasıyla 0.18 ve 0.46 gibi düşük korelasyon değerlerinin olduğu görülmüştür. Aslında burada korelasyonun iyi çıkma durumu HBS 20 gün periyodunda yapılan yüklemeye göre üretilen biyogazın HBS 10 gün periyodundaki yüklemede üretilen biyogaz miktarının belli bir katı olmasına bağlıdır. Stabilite bozulduğunda korelasyon değeri de bozulmaktadır.



Şekil 5.129 %50 atık katkısının yapıldığı dönemde TKOİ giderimi ile biyogaz üretimi arasındaki korelasyon

Tüm deneysel çalışma süresi boyunca R1 reaktöründe giderilen TKOİ ve biyogaz üretimi arasındaki korelasyonun ikincil parçalamadan sonraki %40 atık ilavesi periyodu hariç devamlı bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. En yüksek korelasyonun ise çalışmada %20 atık ilavesi yapılan periyotta gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun anaerobik çamur miktarının ve çamur içerisindeki biyokütlenin kararlılığının artması ile de ilişkili olduğu düşünülmektedir. Buna göre iyi bir korelasyonda anaerobik sistemin, OYO değişiminden dolayısıyla HBS değişiminden etkilenmemesi gerektiği görülmektedir. Ancak mevcut biyokütlenin organik muhtevayı biyogaza dönüştürme oranı, HBS'nin artması yani OYO'nın düşmesi ile günlük biyogaz üretimi düşmekte ve atık arıtımı artmaktadır. Buna göre de kümülatif biyogaz üretiminin artacağı aşikardır. Bununla birlikte çevre mühendisliği anlayışı içerisinde maksimum biyogaz üretimi ve maksimum atık arıtımının birlikte sürdürülmesi istenmektedir. Buna göre Şekil 5.127, Şekil 5.128 ve Şekil 5.129 incelendiğinde yaklaşık 10000 mg/L TKOİ yüklemesinde HBS 20 ve 10 günlük işletme

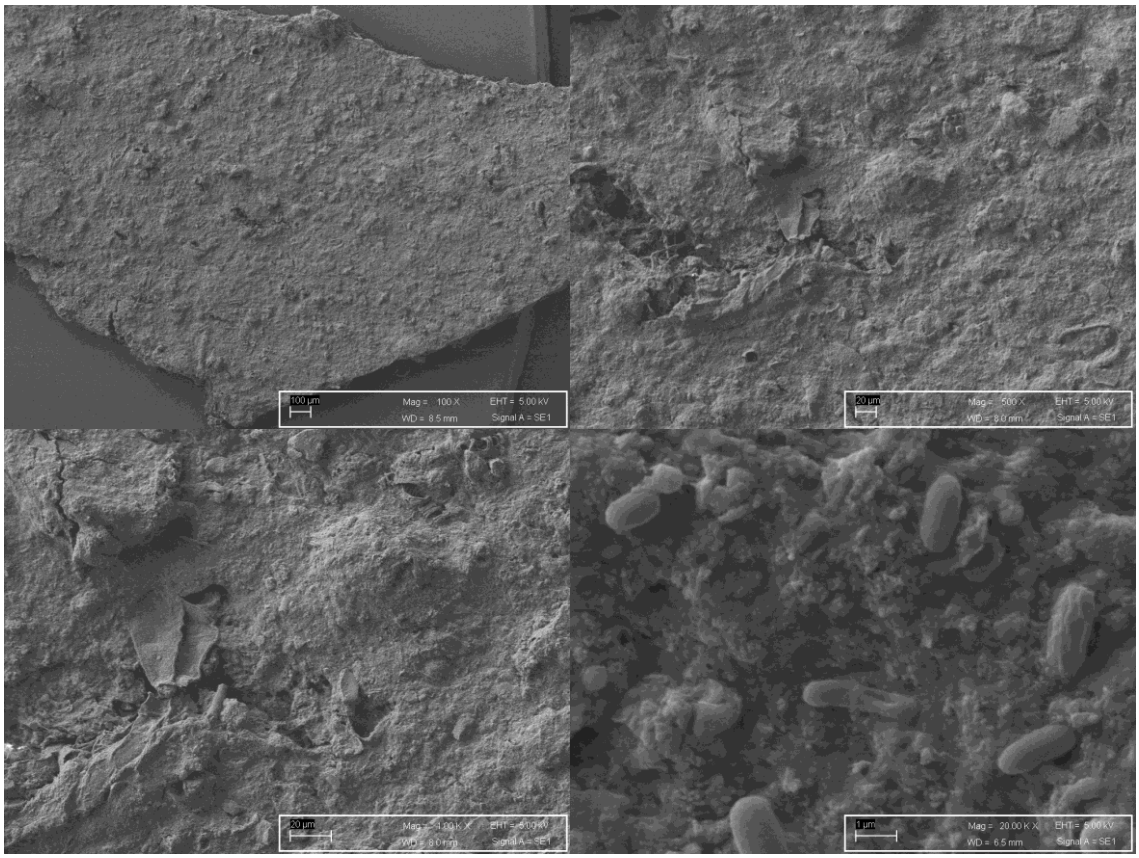
şartlarında uygulanabilecek karışım oranları ve atık ön işleme yöntemi başarısı hakkında genel durum ortaya çıkarılmıştır.

R2 reaktöründe %40 atık ilavesi döneminde günlük biyogaz üretimindeki hızlı düşüş, korelasyonun çok düşük çıkmasına sebep olmuştur. Bu düşüş, parçalama seviyesinin önemini ortaya koymaktadır. R2 reaktöründe bir sonraki %50 atık ilavesi döneminde NaOH ilavesi ile tamponlama kapasitesi yükselen sistemde korelasyonun R^2= 0.77 seviyelerine çıkması parçalama işleminin asitleşmeye sebep olduğu çıkarımını doğrular niteliktedir. R3 reaktöründe ise R^2=0.78 seviyelerinde tespit edilmiştir. Burada da NaOH ilavesi ile sistemin korelasyon değerlerine göre kararlılığının düzeldiği tespit edilmiştir. R4 reaktöründe %50 atık ilavesi döneminde HBS 10 gün periyodundaki giderilen TKOİ değerine göre üretilen biyogaz miktarındaki hızlı yükselişten kaynaklı olarak korelasyon düşük çıkmıştır. Burada sistemin kendini toparlamaya çalıştığı düşünülmektedir. R5 reaktöründe %50 atık ilavesi döneminde HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında düşüş eğilimli biyogaz üretiminden dolayı korelasyon değerinin düşük çıktığı düşünülmektedir.

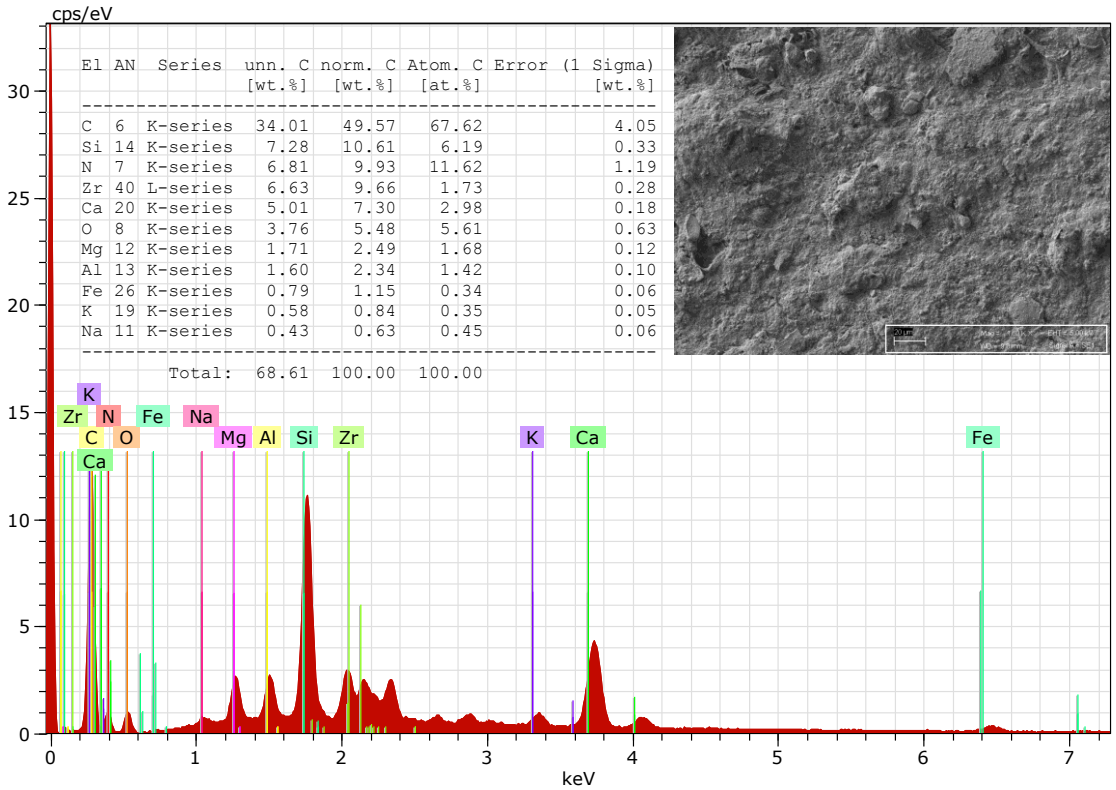
5.7.8 Çalışmada Kullanılan R1, R2, R3, R4 ve R5 Reaktörleri İçerisindeki Çamurun SEM Görüntüleri ve EDX Analizleri

5.7.8.1 Reaktörlerin Floküler Çamur Numunesi Görüntüleri ve EDX Analizleri

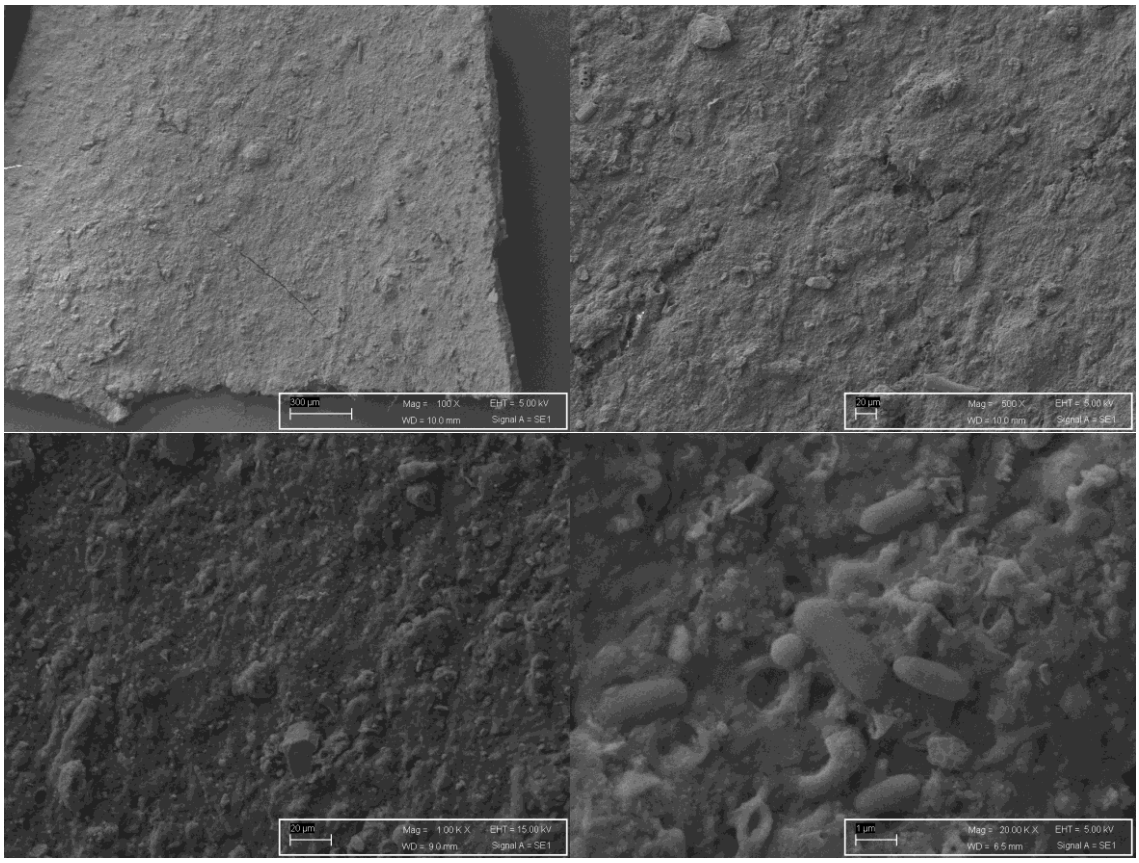
R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde incelenen floküler çamur numuneleri 100, 500, 1000 ve 20000 kat büyütme ile incelenmiştir. Çamur yapısının çok küçük partikül yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. 20000 büyütmenin gerçekleştirildiği SEM görüntülerinde silindirik ve küresel yapıda metan bakterilerinin görüntülendiği düşünülmektedir. Şekil 5.130, Şekil 5.132, Şekil 5.134, Şekil 5.136 ve Şekil 5.138'de sırasıyla R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörleri floküler çamur SEM fotoğrafları gösterilmiştir.



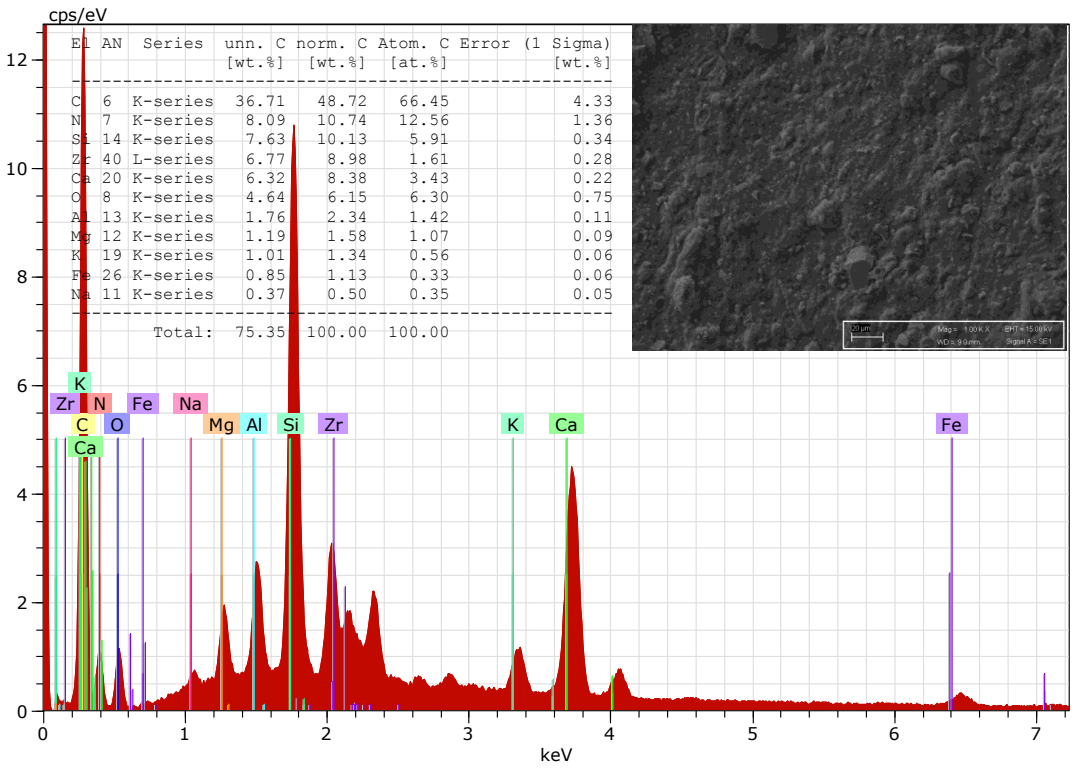
Şekil 5.130 R1 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)



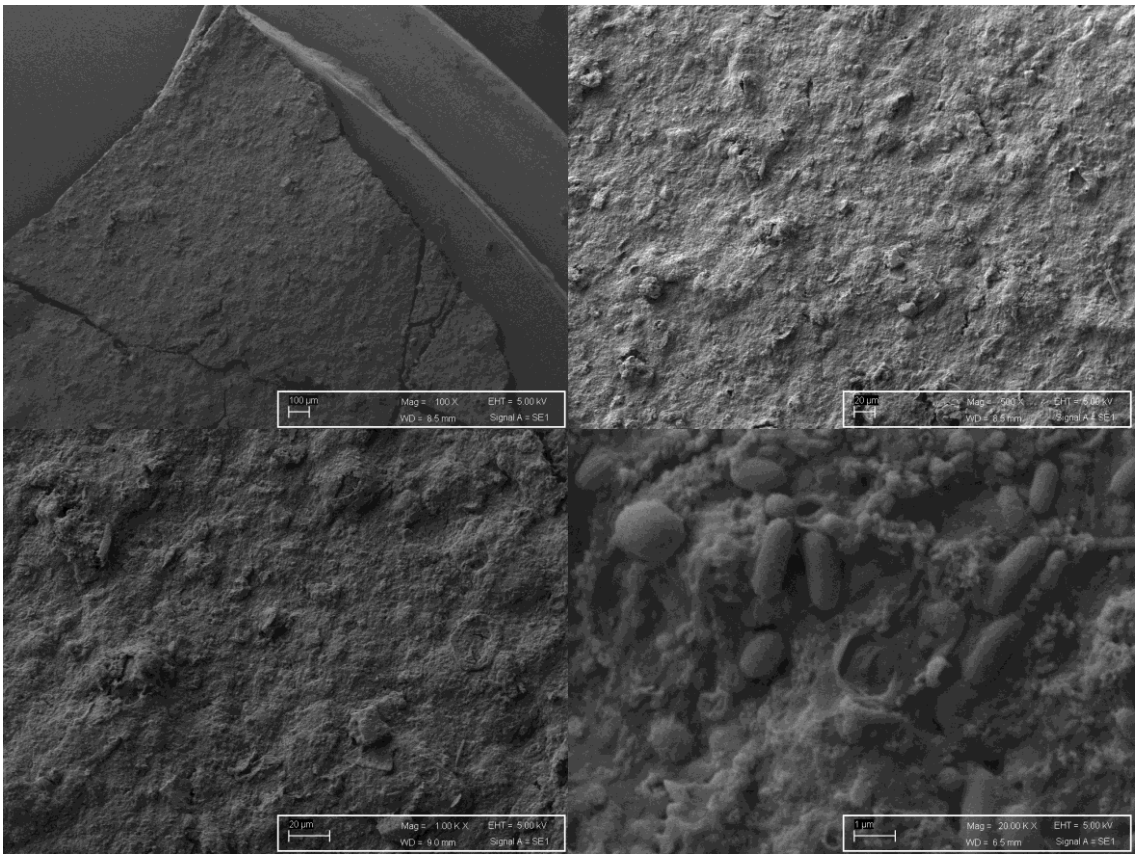
Şekil 5.131 R1 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi



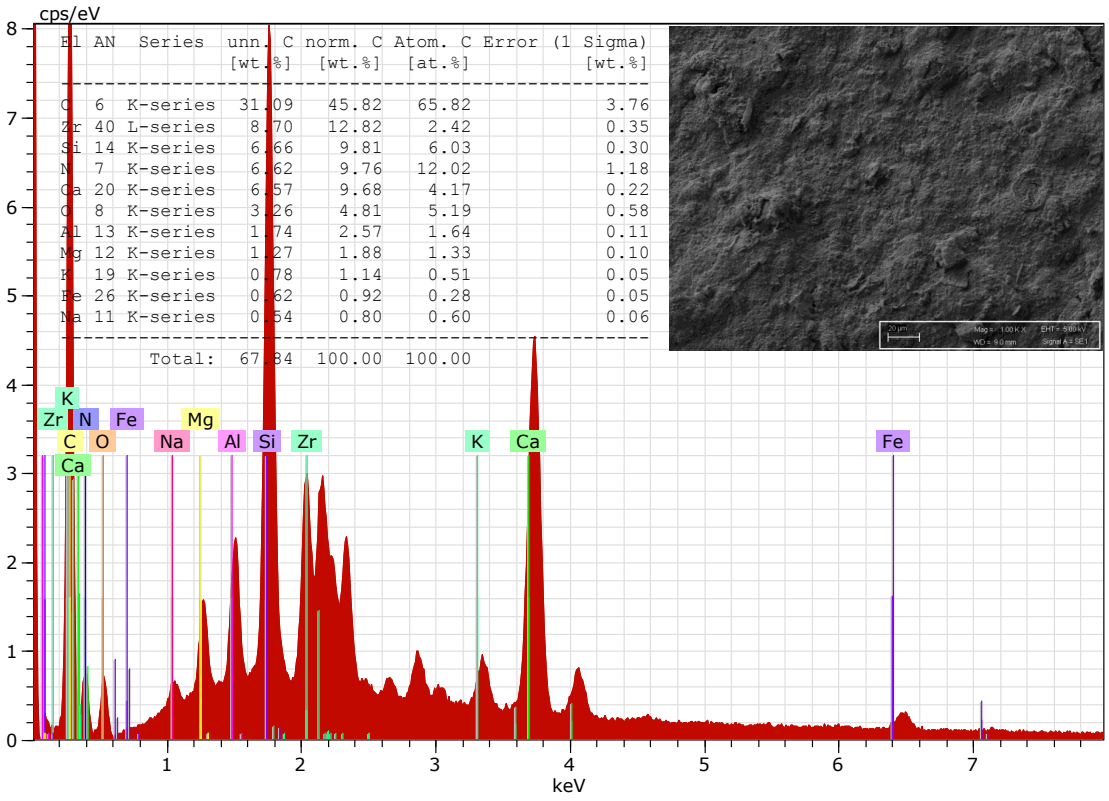
Şekil 5.132 R2 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)



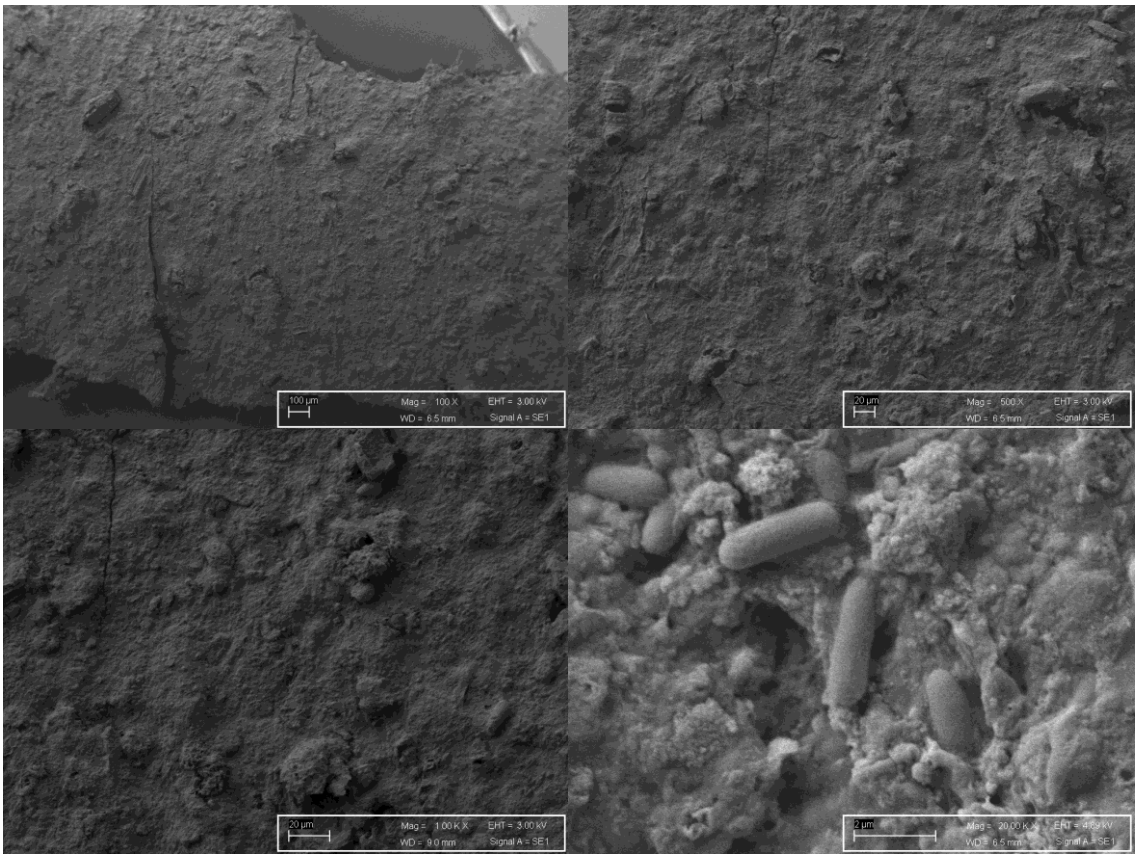
Şekil 5.133 R2 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi



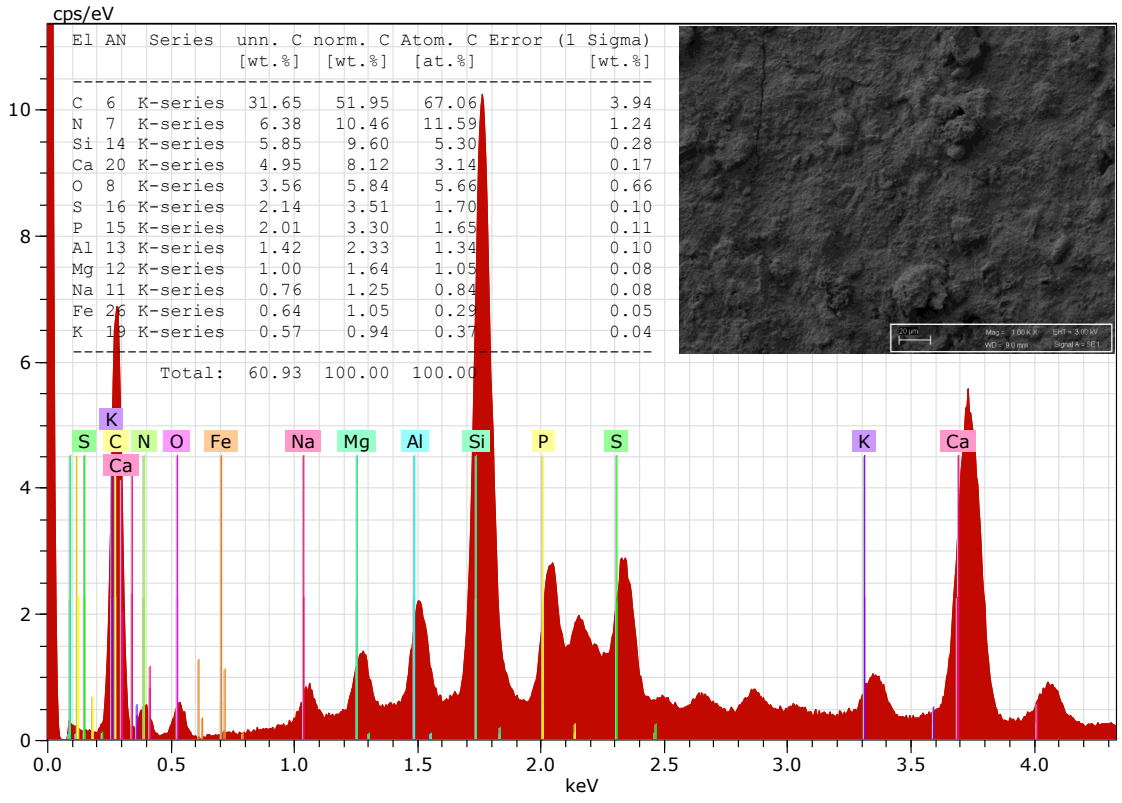
Şekil 5.134 R3 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)



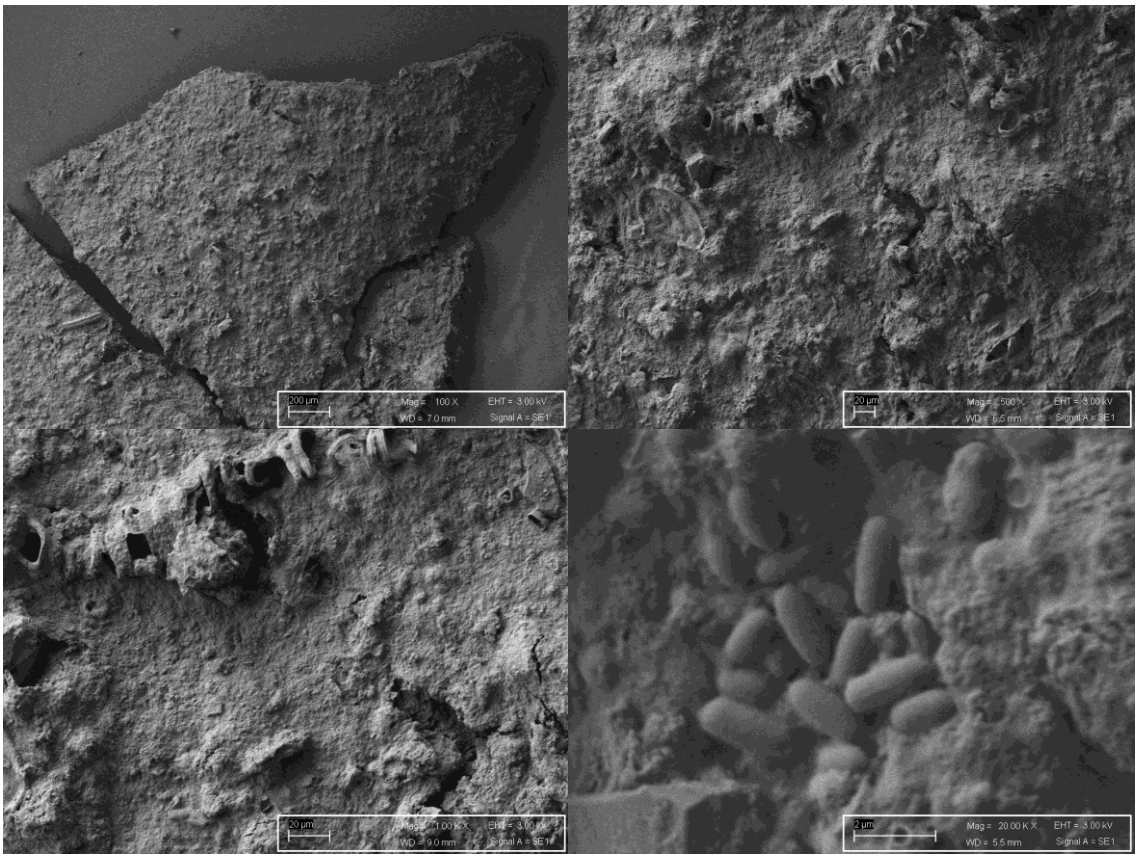
Şekil 5.135 R3 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi



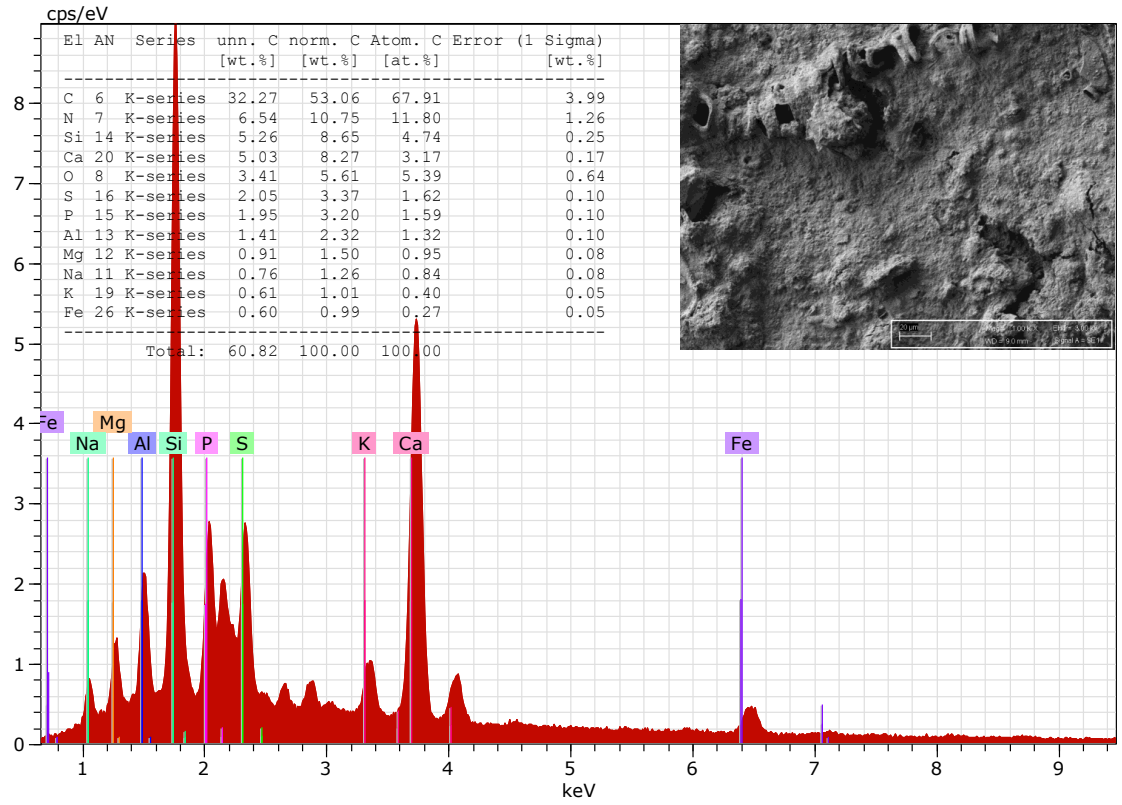
Şekil 5.136 R4 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)



Şekil 5.137 R4 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi



Şekil 5.138 R5 reaktörü floküler çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 20000X)



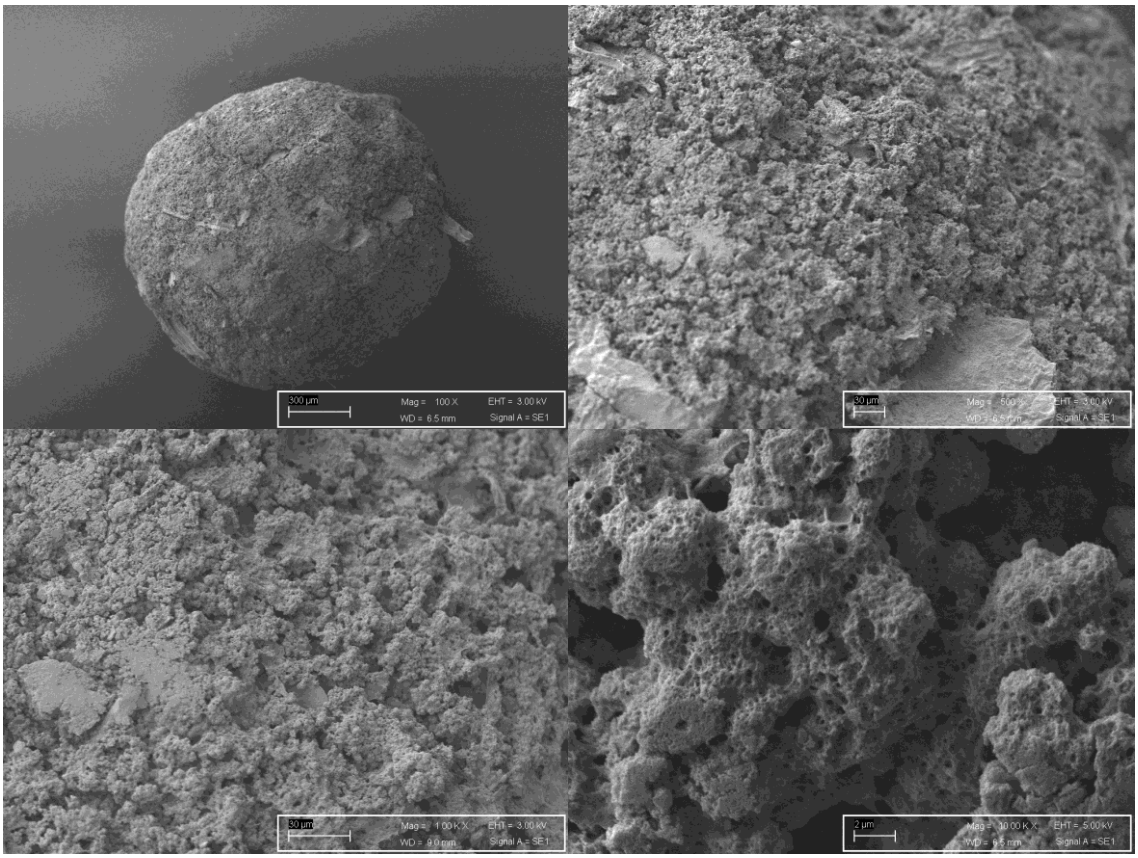
Şekil 5.139 R5 reaktörü floküler çamur numunesi EDX analizi

Reaktörler içerisinden alınan floküler çamur numunelerinin EDX analizlerine göre (Şekil 5.131, Şekil 5.133, Şekil 5.135, Şekil 5.137, Şekil 5.139) karbon (C) %45.82-53.06 arasında, azot (N) %9.76-10.74 arasında olduğu tespit edilmiştir. Silisyum (Si) elementinin R5'te %5 civarında diğer rektörlerde %10 civarında olduğu belirlenmiştir. R4 ve R5 reaktörlerinde zirkonyum (Zr) tespit edilemezken diğer reaktörlerde %9-13 aralığında olduğu belirlenmiştir. Kalsiyum (Ca) %7-10 aralığında ve oksijenin (O) %4-7 aralığında olduğu bulunmuştur. Mg, Al, Fe, K, Na elementlerinin ise %3'ten daha az olduğu tespit edilmiştir. R4 ve R5 reaktöründe ayrıca %4 civarında kükürt (S) olduğu belirlenmiştir. SEM analizi standart yönteminden önce altın-paladyum kaplaması yapıldığından EDX analizinde bu iki element miktarları dahil edilmemiştir. Özellikle fosfor elementinin R1, R2 ve R3 reaktörlerinde tespit edilebilir düzeyin altında olduğu görülmüştür. R4 ve R5 reaktörlerinde sırasıyla %3.3, 3.2 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. Karbon miktarının yüksek olması floküler çamurun organik muhtevasının yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca anaerobik şartlar için gerekli Mg, Al, Fe, Na gibi iz elementlerin mevcudiyeti de tespit edilmiştir.

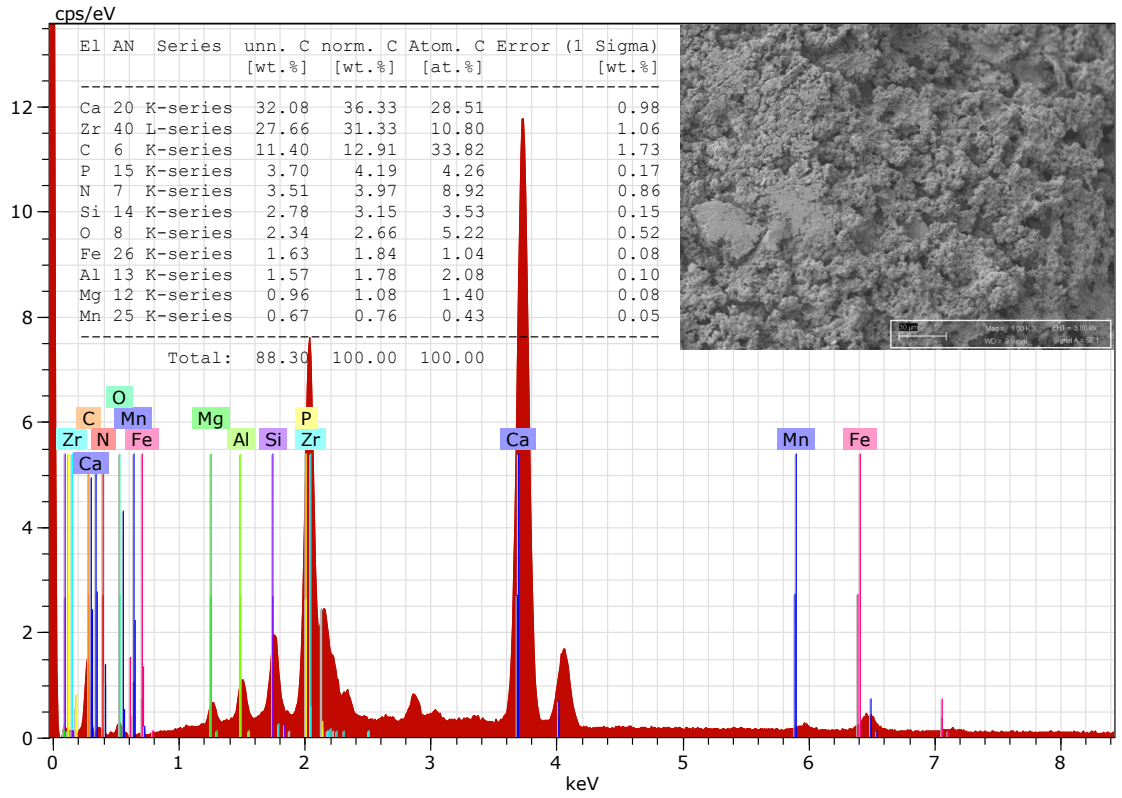
5.7.8.2 Reaktörlerin Granül Çamur Görüntüleri ve EDX Analizleri

Anaerobik reaktörlerde floküler çamur olmasına rağmen çalışmanın ilerleyen dönemlerinde numune olarak alınan floküler çamurun kullanılmayan kısmı reaktörlere geri beslenmek istenmiş ancak peristaltik pompada sıklıkla yaşanan tıkanmaların granül oluşumundan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Çalışmanın ilerleyen safhalarında granül oluşumunun arttığı ve granüllerin büyüdüğü gözlemlenmiştir.

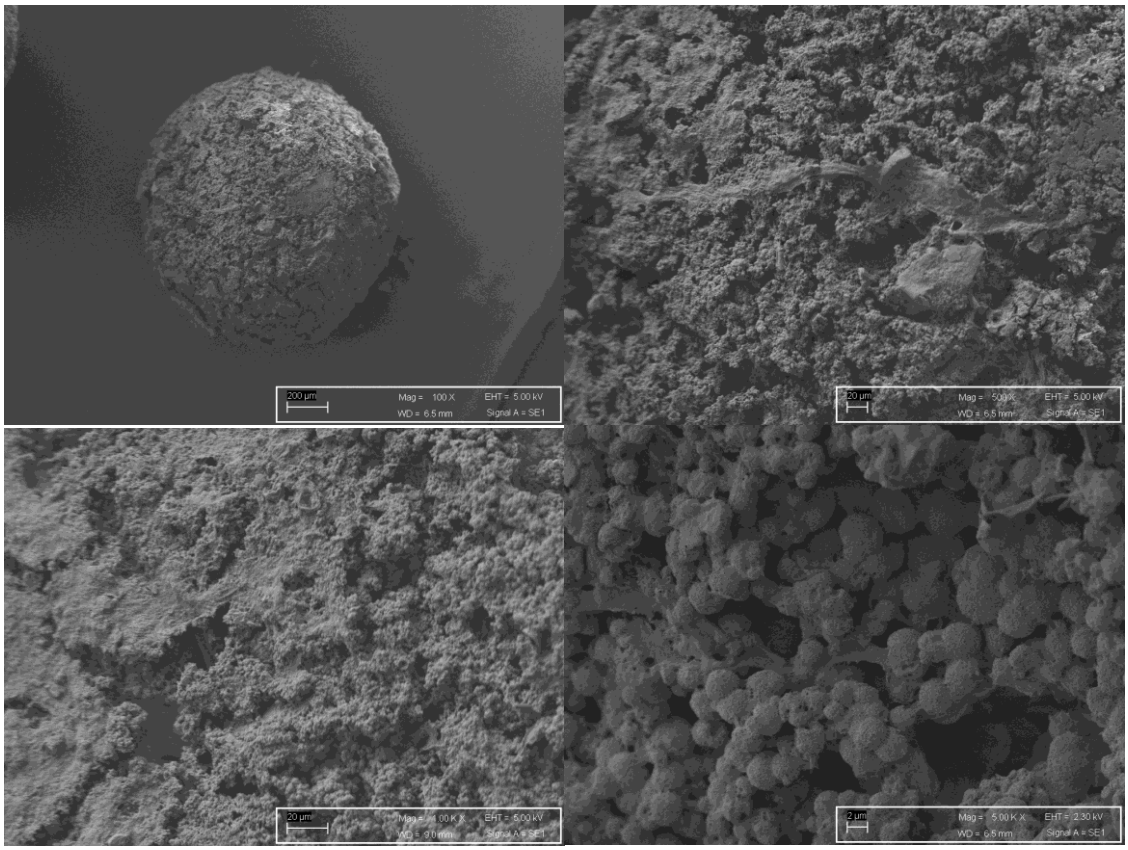
R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinden alınan granül çamur numuneleri 100, 500, 1000 ve 5000 ya da 10000 kat büyütme ile incelenmiştir. Granüllerin genellikle küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir. Granül yüzeylerinin çok küçük girinti çıkıntı ve çatlaklardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Büyütme kat sayısı arttıkça girinti ve çıkıntılar daha belirgin hale gelmiştir. 5000 ya da 10000 kat büyütme yapıldığında anaerobik granülün yüzeyinde delikli yapıda üzüm salkımı şeklinde metan bakterilerinin görüntülendiği düşünülmektedir. Şekil 5.140, Şekil 5.142, Şekil 5.144, Şekil 5.146 ve Şekil 5.148'de sırasıyla R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörleri granüler çamur SEM fotoğrafları gösterilmiştir.



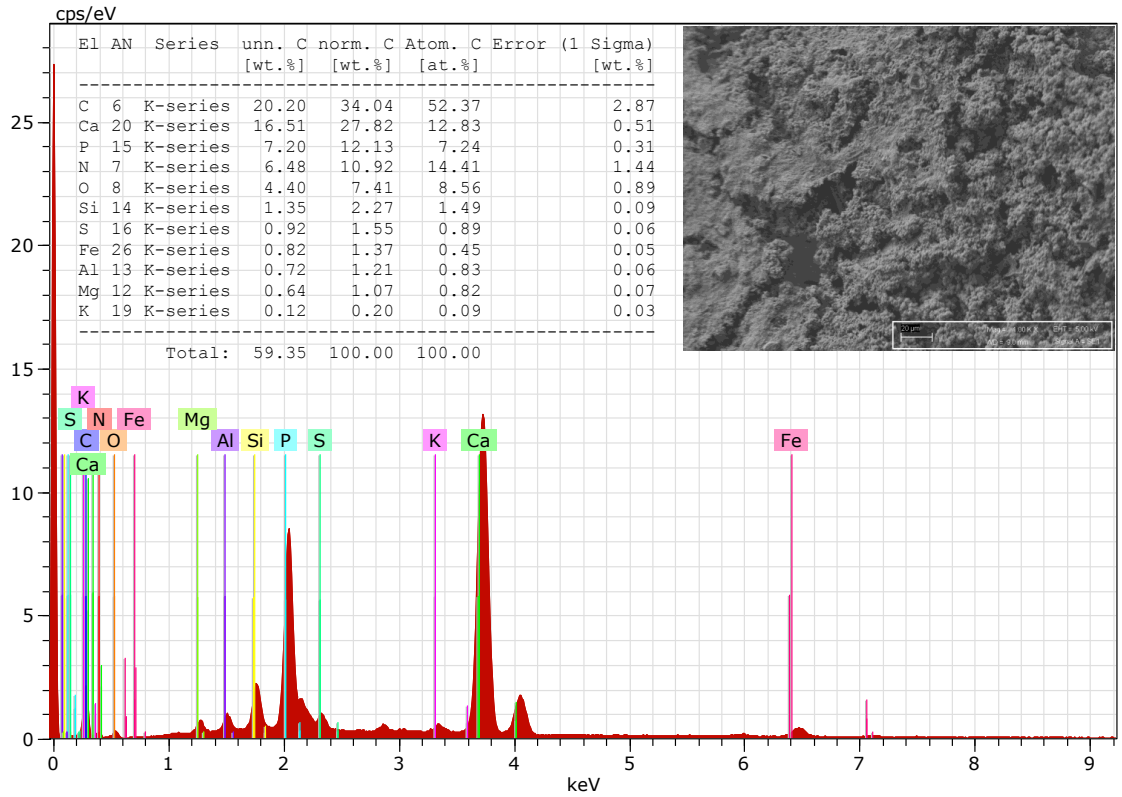
Şekil 5.140 R1 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)



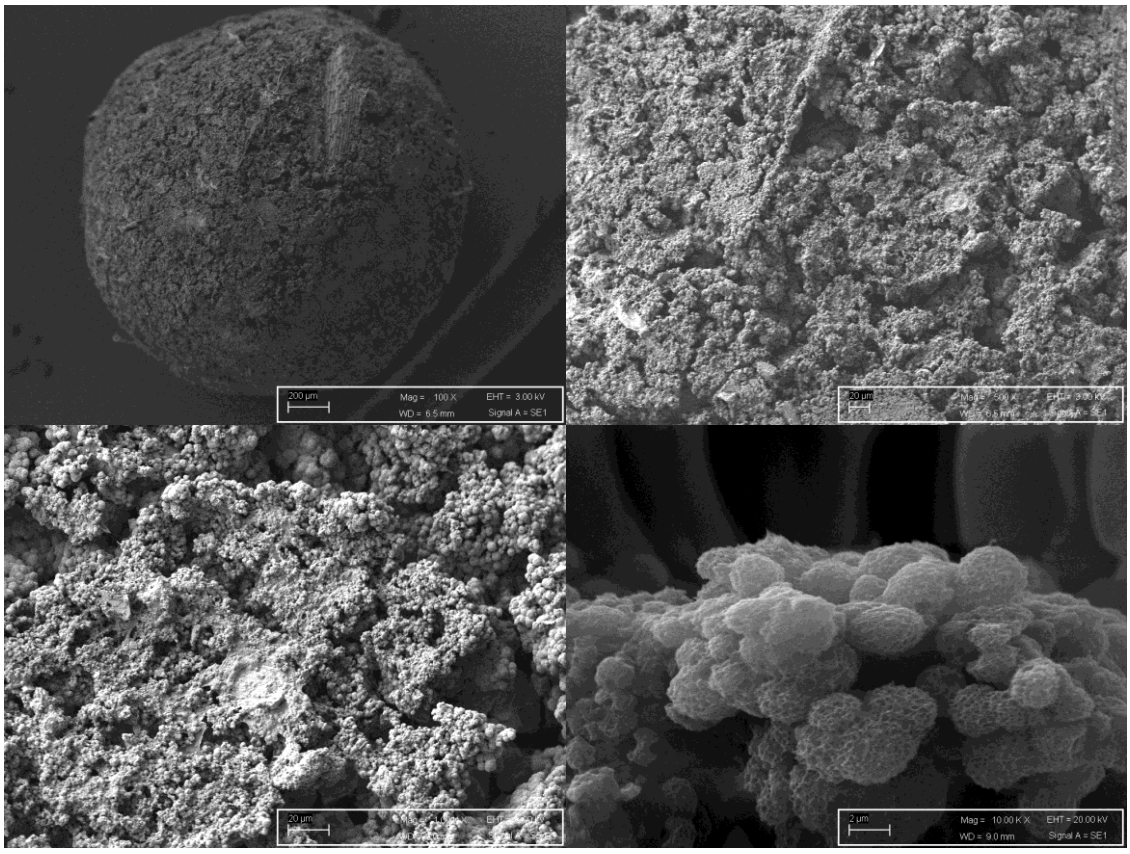
Şekil 5.141 R1 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi



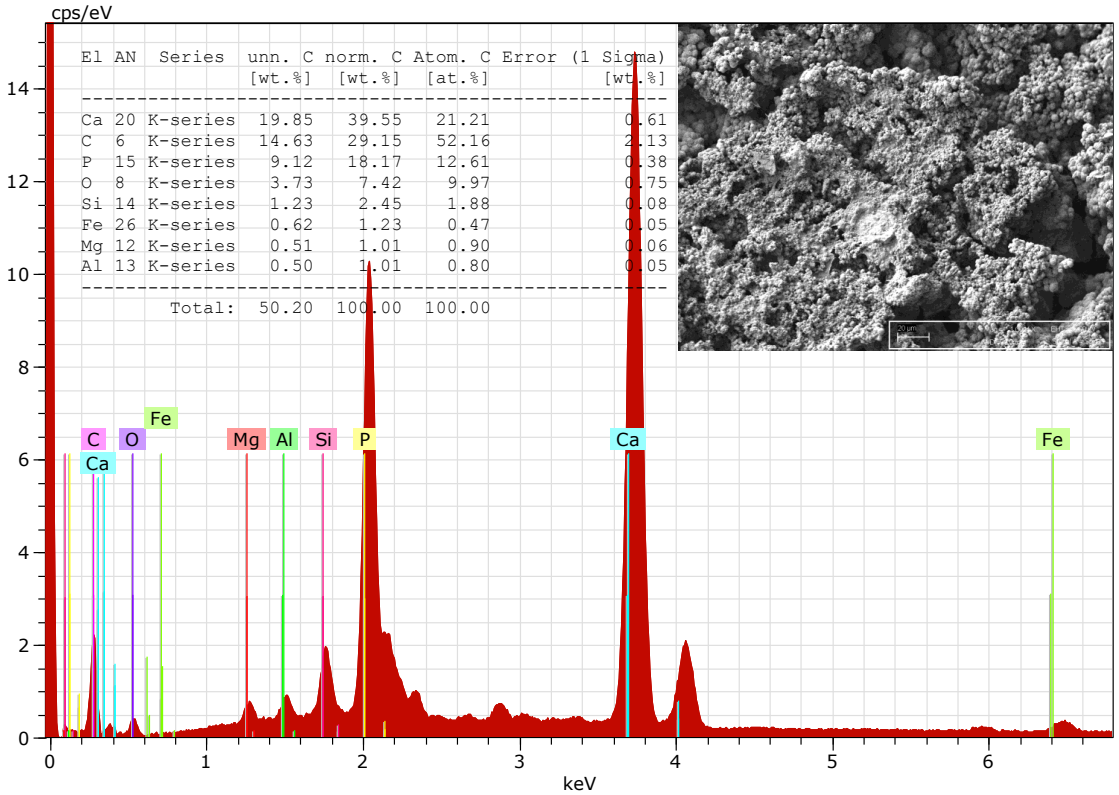
Şekil 5.142 R2 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 5000X)



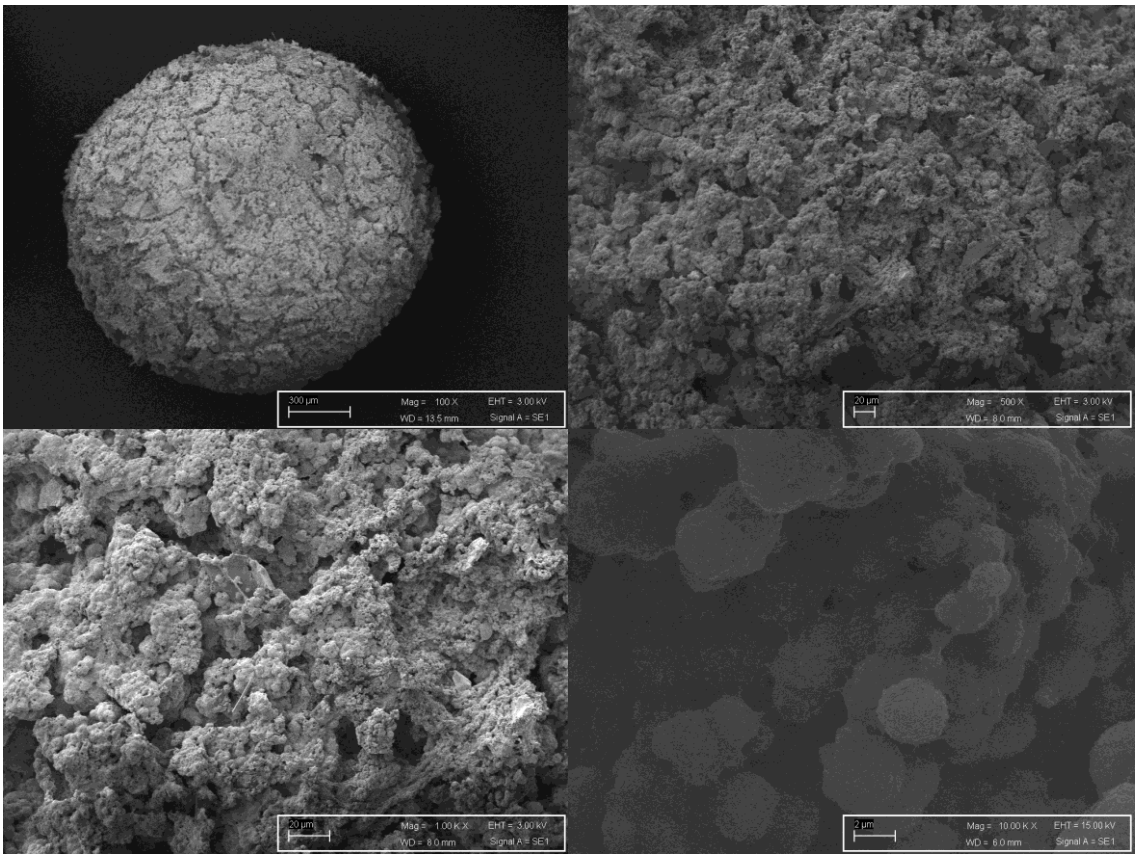
Şekil 5.143 R2 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi



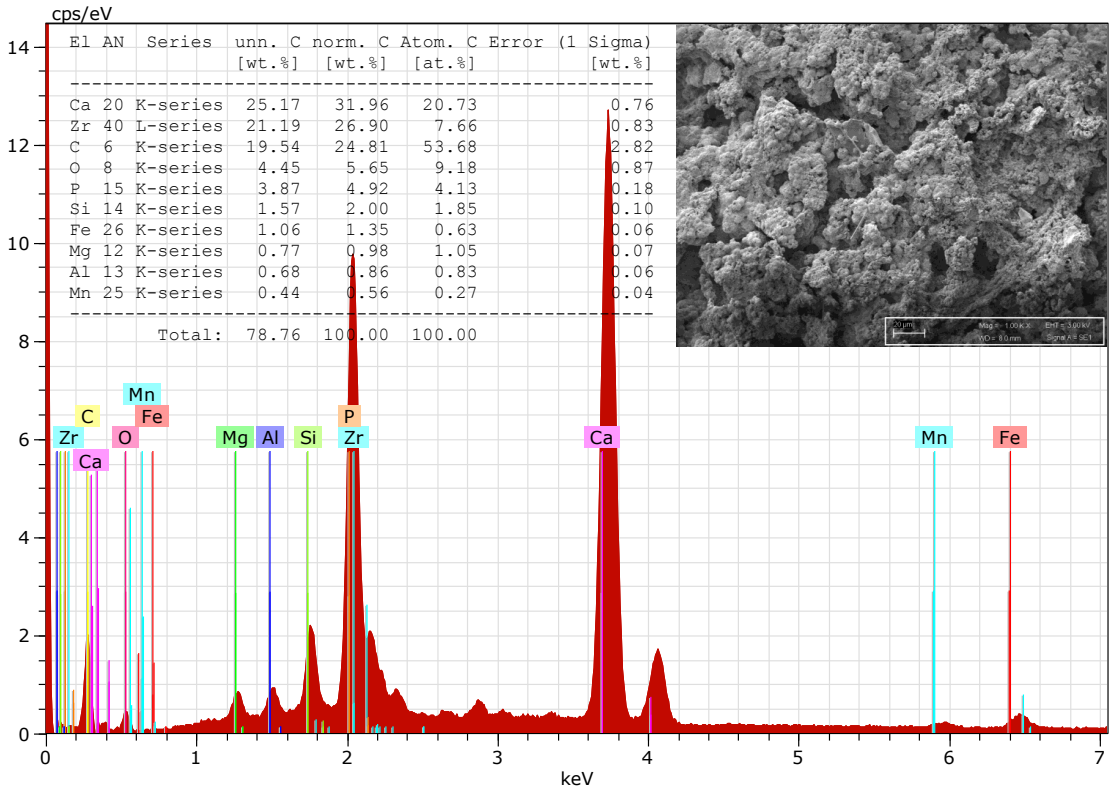
Şekil 5.144 R3 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)



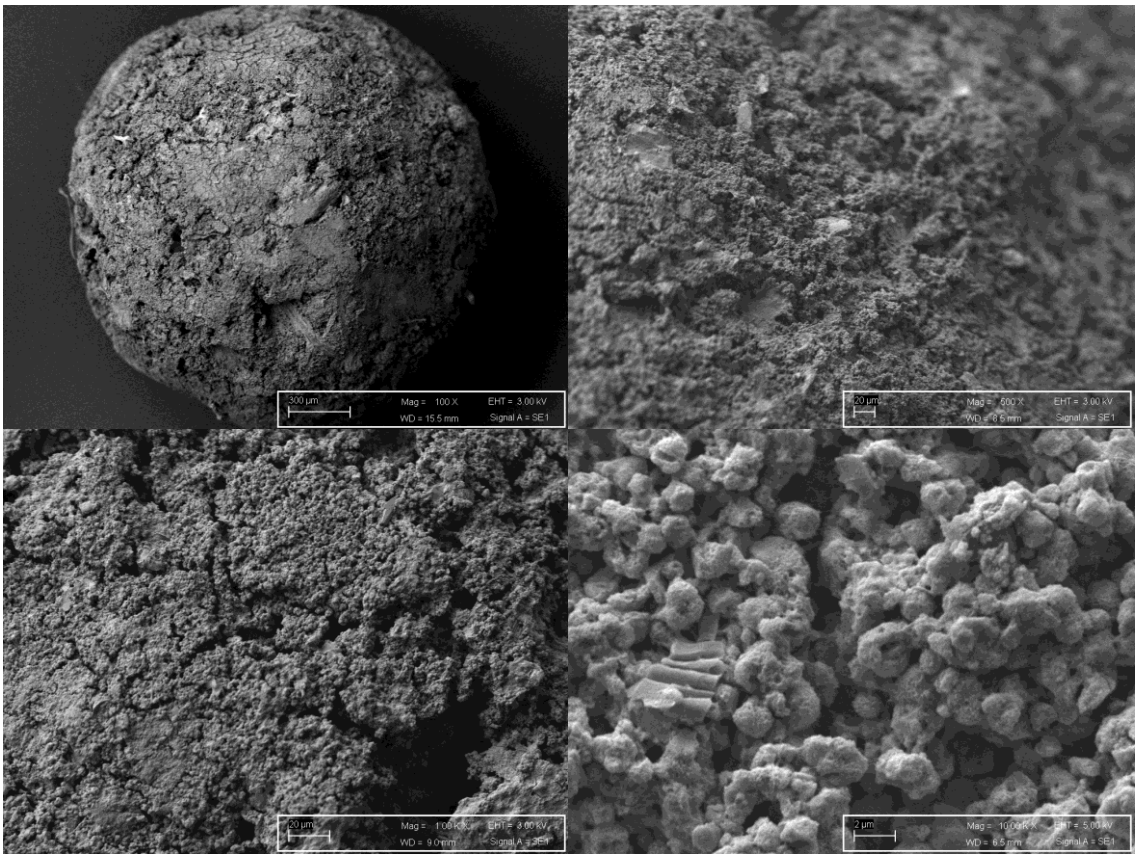
Şekil 5.145 R3 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi



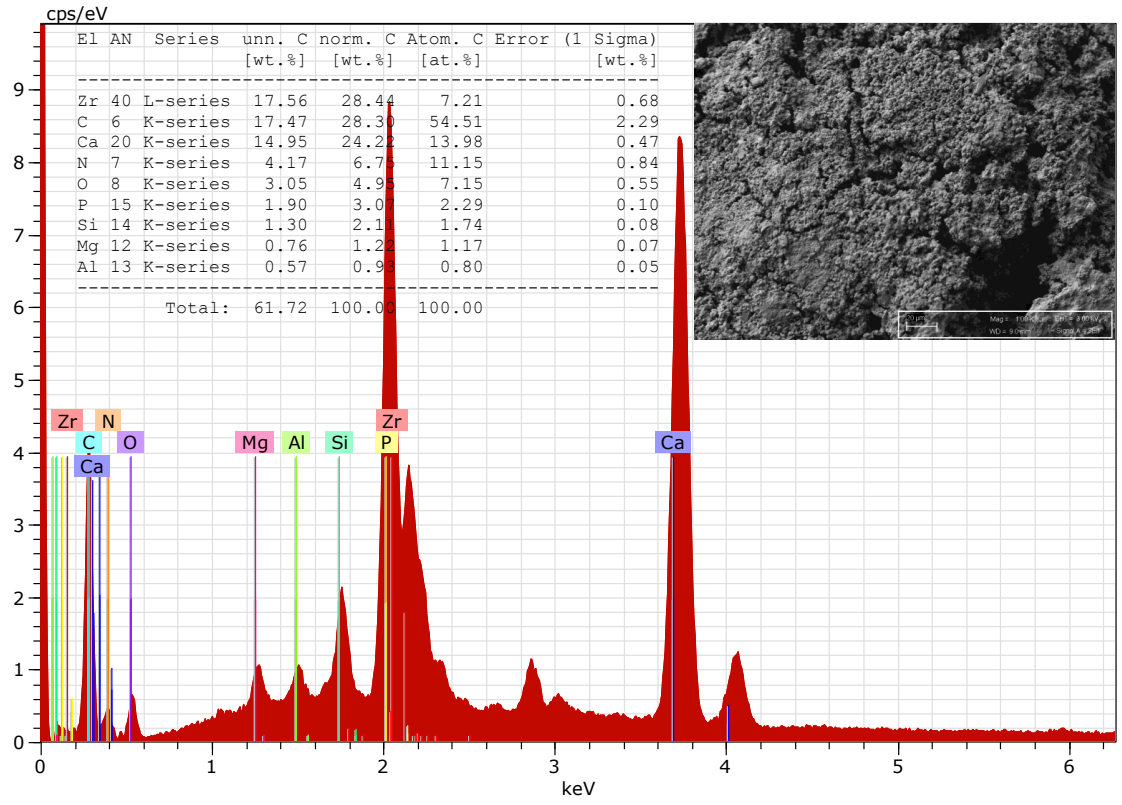
Şekil 5.146 R4 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)



Şekil 5.147 R4 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi



Şekil 5.148 R5 reaktörü granül çamur görüntüleri (100X, 500X, 1000X, 10000X)



Şekil 5.149 R5 reaktörü granül çamur numunesi EDX analizi

Reaktörler içerisinden alınan granül çamur numunelerinin EDX analizlerine göre (Şekil 5.141, Şekil 5.143, Şekil 5.145, Şekil 5.147, Şekil 5.149) karbon (C) %12.91-34.04 arasında, kalsiyum (Ca) %24.22-39.55 ve fosforun (P) %3.07-18.17 arasında olduğu tespit edilmiştir. Zirkonyum (Zr) elementine R2 ve R3 reaktörlerinden alınan granül örneklerinde rastlanmamış ancak diğer reaktörlerde %26.90-31.33 arasında olduğu tespit edilmiştir. Azot (N) elementine R3 ve R4 reaktörlerinden alınan granül örneklerinde rastlanmamış ancak diğer reaktörlerde %3.97-6.75 arasında olduğu tespit edilmiştir. Oksijenin %2.66-7.42 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Miktarları granüller arasında farklılık göstermekle beraber granüllerin EDX analizinde Fe, Al, Mg, Mn, S ve K elementlerinin bulunduğu tespit edilmiştir. SEM analizi standart yönteminden önce altın-paladyum kaplaması yapıldığından EDX analizinde bu iki element miktarları dahil edilmemiştir. Floküler çamurda fosfor çok düşük oranlarda olmasına rağmen granül yüzeylerinde yapılan EDX analizlerinde %3.07-18.17 gibi yüksek oranlarda çıkmıştır. Bunun sebebinin musluk suyu ile geldiği düşünülen kalsiyumun ortamdaki fosforu kalsiyum orto-fosfat ($Ca_3(PO_4)_2$) halinde kendine bağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Metanojen bakterileri ihtiyaçları olan fosforu buradan temin etmek için bu bileşiğin olduğu bölgede birikimlere ve granülleşmelere sebep olduğu düşünülmektedir.

BÖLÜM 6

BİRLİKTE ARITIM PROSESİNDE MODELLEME ÇALIŞMALARI

6.1 Anaerobik Şartlarda Farklı Organik Atıklar ile BBHG'nden Biyogaz Üretiminin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

Anaerobik sistemler oldukça kompleks sistemlerdir. Organik atıkların arıtılmasında uygun substratların kullanılması anaerobik çürütme prosesi için oldukça önemlidir. Birlikte arıtımın etkin olabilmesi için atık kombinasyonunun ve işletme parametrelerinin çok iyi ayarlanması gerekmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda anaerobik sistemlerin girdi ve çıktı değerleri arasında bir ilişki kurmak mümkündür. Bu maksatla geliştirilmiş model ve programlar bulunmaktadır. Ancak girdi parametrelerinin değişkenlik göstermesi model ve programların kullanım alanını kısıtlamaktadır. Farklı işleteme parametreleri kullanılarak geliştirilen modeller uygulamada daha iyi sonuçlara ulaşmak için önemli bir araç olmaktadırlar. Burada iyi bir tahmin için oluşturulan modelin çerçevesinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel sonuç değerleri ile model tahmin değerleri arasında iyi bir korelasyon oluşturulduğu takdirde anaerobik sistemlerin takibi ve işletilmesi daha kolay olacaktır. Burada oluşturulan modelin çalışma şartlarının iyi belirlenmesi modelin etkin kullanımı açısından çok önemlidir.

Anaerobik sistemlerde prosesin modellenmesi biyogaz üretiminin tahmini için oldukça faydalı bir araçtır [202], [203]. Anaerobik proses yıllardır bilinmesine ve üzerinde çok sayıda çalışmalar yapılmasına rağmen mikrobiyolojik, kimyasal ve fiziksel olarak kompleks süreçler içermesinden dolayı henüz tam olarak anlaşılamamıştır[204]. Bu nedenle, anaerobik sürecin iyi bir şekilde kontrol edilmesi deneysel çalışmalara dayalı bazı anahtar parametreler kullanılarak reaktör performansını tahmin edilebilen güçlü

matematiksel modellerin geliştirilmesine bağlıdır [203], [205]. Anaerobik reaktörlerin işletilmesinde ve kontrolünde biyometanizasyon süreçlerinin iyileştirilerek biyogaz üretiminin maksimize edilmesi önemli bir adımdır. Bu adımın gerçekleştirilmesinde yapay sinir ağları (YSA), verilerin işlenmesi ve tahmin için kullanılabilir bir araçtır. Simülasyon tahmininde ve problem çözümlerinde YSA tabanlı modeller oldukça başarılıdır. YSA anaerobik prosesler gibi karmaşık sistemlerde girdi-çıktı ilişkilerini güçlü modellerle tanımlayabilmektedir. Bu nedenle YSA, biyogaz üretimini tahmin ve kontrol etme aracı olarak kullanılabilir [206].

Kanat ve Saral [207] termofilik anaerobik reaktörden biyogaz üretimini tahmin etmek için YSA'nı kullanmışlardır. Kana [208] yardımcı substrat ilavesinin biyogaz üretimine katkısını, Özkaya vd. [209] çöp depo alanında üretilen biyogazın metan içeriğini, Şahinkaya [210] ise anaerobik reaktör çıkışındaki çinko, asetat, KOİ ve sülfat konsantrasyonunu tahmin etmek için YSA tabanlı modelleri kullanılmışlardır.

Bu çalışmada YSA tabanlı modelin oluşturulmasında deneysel çalışma süresi, giriş KOİ, giriş pH, giriş alkalinite, giriş amonyak, giriş toplam fosfor, hidrolik bekleme süresi, organik atık ilave oranı, ön işlem ve eklenen atık türü (reaktör no) girdi değişkeni olarak belirlenmiştir. YSA tabanlı modelleme çalışması ile YAHÇY reaktöre farklı oranlarda eklenen organik atıklardan üretilen biyogaz miktarı modellenmiştir. Biyogaz üretimini belirlemek için geri besleme ile eğitilen ve üç katmanlı YSA modeli kullanılmıştır. Gizli katmandaki nöron sayısı ve geri besleme algoritması optimize edilmiştir. Deneysel veriler ile modelden üretilen çıktı verileri kıyaslanmıştır. Geliştirilen YSA modelinin tahmin performansı istatiksel olarak analiz edilerek değerlendirilmiştir. Modelleme çalışmasının sonunda R1 reaktörü simülasyon sonuçları ile diğer reaktörlerin simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.2 Biyogaz Üretiminin YSA ile Modellenmesi

Model girdi parametrelerinin hedef tahmininde minimum %0.07 den daha fazla katkısı olmuştur. Modele katkı sağlayan giriş parametreleri ve istatiksel analizleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Buna göre YSA tabanlı model %99.93 oranında bir doğruluktan sorumlu tutulmuştur.

Çizelge 6.1 YSA modelinde kullanılan girdi ve hedef değerlerin istatiksel analizi

Girdi (p) hedef (t) değişkenleri	Min-Maks	Ortalama	Standart sapma	Medyan
$p_1 = Çalışma\ günleri$	46–222	–	–	–
$p_2 = Giriş\ KOİ\ (mg/L)$	8108–11514	10107	721	10151
$p_3 = Giriş\ pH$	5.36–7.62	6.94	0.379	6.89
$p_4 = Giriş\ Alkalinite\ (mgCaCO_3/L)$	670–3540	1461	510	1370
$p_5 = Giriş\ NH_3 - N\ (mg/L)$	103–298	196	43	186
$p_6 = Giriş\ TP\ (mg/L)$	159–658	304	84	297.5
$p_7 = HBS\ (gün)$	10–20	–	–	–
$p_8 = Atık\ ilave\ oranı\ (\%)$	0–50	–	–	–
$p_9 = Ön\ işlem$	1–2	–	–	–
$p_{10} = Reaktör\ no$	1–5	–	–	–
$t = Biyogaz\ (L/gün)$	0.181–1.486	0.81	0.2698	0.768

6.2.1 Geri Besleme Eğitim Algoritmasının Seçimi

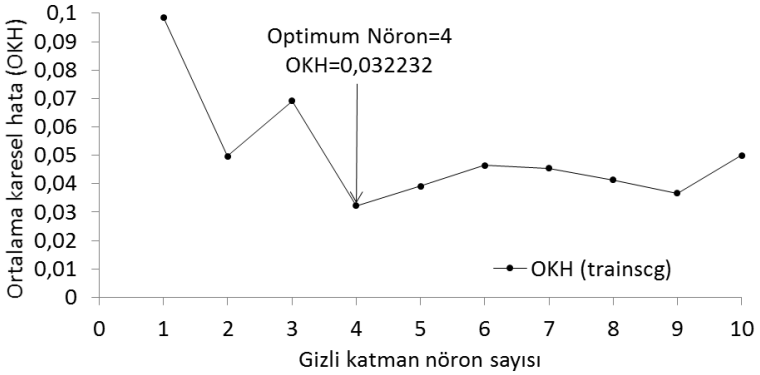
Geri besleme eğitim algoritması 11 algoritma içerisinden seçilmiştir. Bütün geri besleme algoritmalarında gizli katmanda 1 nöron ile denemeye başlanılmıştır. Çizelge 6.2'de geri besleme algoritmalarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Model geri beslemesinde denenen bu algoritmalar ortalama karesel hata (OKH) değerlerine göre kıyaslandığında en düşük OKH değerine Scaled Conjugate Gradient Backpropagation algoritması kullanıldığında ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 6.2 Geri besleme algoritmalarının karşılaştırılması

Geri besleme algoritmaları	Fonksiyon	Ortalama karesel hata (OKH)	Gizli katman nöron sayısı	İterasyon
Scaled conjugate gradient backpropagation	trainscg	0.0322	4	1000
Powell–Beale conjugate gradient backpropagation	traincgb	0.0340	10	1000
Fletcher–Reeves conjugate gradient backpropagation	traincgf	0.0351	9	1000
BFGS quasi-Newton backpropagation	trainbfg	0.0353	7	963
Variable learning rate back propagation	traingdx	0.0355	8	1000
Levenberg-Marquardt backpropagation	trainlm	0.0363	9	184
One step secant backpropagation	trainoss	0.0396	9	1000
Resilient backpropagation (Rprop)	trainrp	0.0400	4	1000
Polak–Ribi'ere conjugate gradient backpropagation	traincgp	0.0423	6	1000
Batch gradient descent	traingd	0.0717	8	1000
Batch gradient descent with momentum	traingdm	0.0726	9	1000

Tahmin ve eğitim değerleri için minimum OKH değerini sağlayan gizli katman nöron sayısı optimum nöron sayısı olarak belirlenir [211]. Geri besleme algoritmalarında gizli katman nöron sayısı 1-10 arasında denenmiştir. 10. nörondan sonra eğitim seti OKH'sı düşerken doğrulama ve test verileri OKH'sı artmıştır bu nedenle gizli katmanda 10

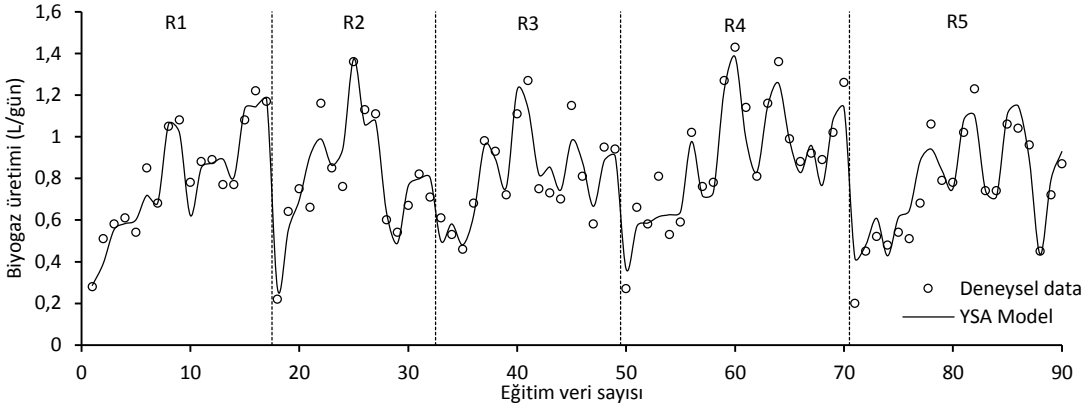
nörondan sonra deneme yapılmamıştır. Şekil 6.2'de trainscg fonksiyonu için nöron sayısı ve OKH arasındaki ilişki gösterilmiştir. Gizli katmanda 4 nöron kullanıldığında 0.032232 değeri ile en düşük OKH'ya ulaşılmıştır (Şekil 6.1). Bu şekilde YSA model yapısı bir girdiler katmanı, tansig fonksiyonunun kullanıldığı 4 nöronlu bir gizli katman ve purelin fonksiyonunun kullanıldığı bir çıktı katmanı ile optimize edilmiştir.



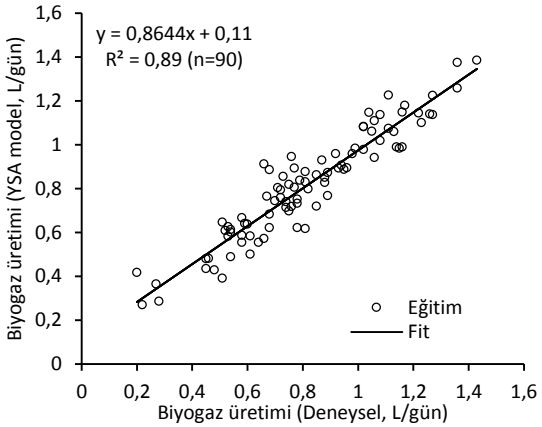
Şekil 6.1 Trainscg geri besleme fonksiyonu gizli katman nöron sayısı ile OKH arasındaki ilişki

6.2.2 Deneysel Veriler ile Model Tahmin Sonuçlarının Karşılaştırılması

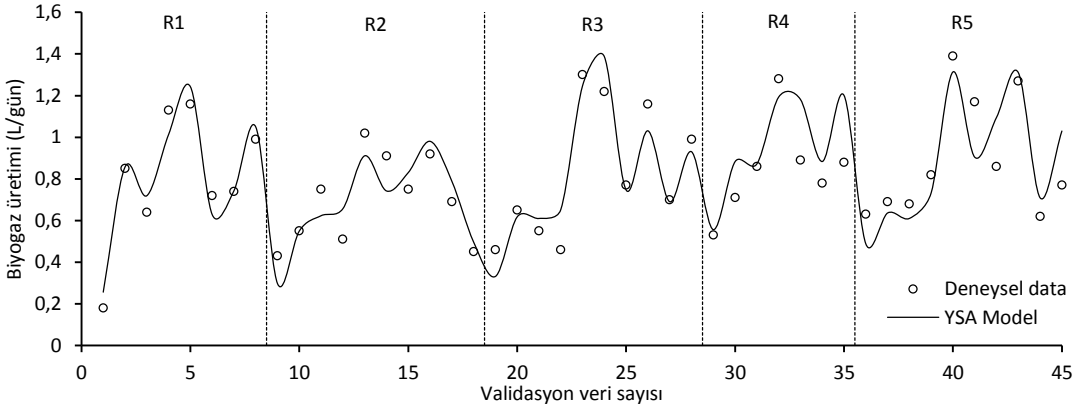
Şekil 6.2, Şekil 6.4 ve Şekil 6.6'daki grafiklerde 5 reaktörden biyogaz üretimi için rasgele seçilen deneysel veriler ile YSA eğitim, doğrulama ve test tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.3, Şekil 6.5 ve Şekil 6.7'de ise eğitim, doğrulama ve test tahmin sonuçları aralarındaki korelasyon, en iyi lineer denklem ile birlikte gösterilmiştir. Buradan YSA modelinin biyogaz üretimi tahmini için memnun edici sonuçlar verdiği görülmektedir. Model tahmin değerleri ile deneysel veri sonuçları arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Determinasyon katsayısı (R^2) eğitim, validasyon ve test setinde sırasıyla 0.89, 0.79 ve 0.75 olarak bulunmuştur.



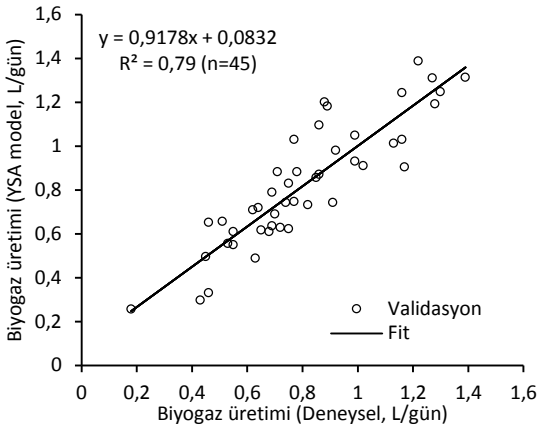
Şekil 6.2 Deneysel data YSA model tahminlerinin karşılaştırılması (eğitim)



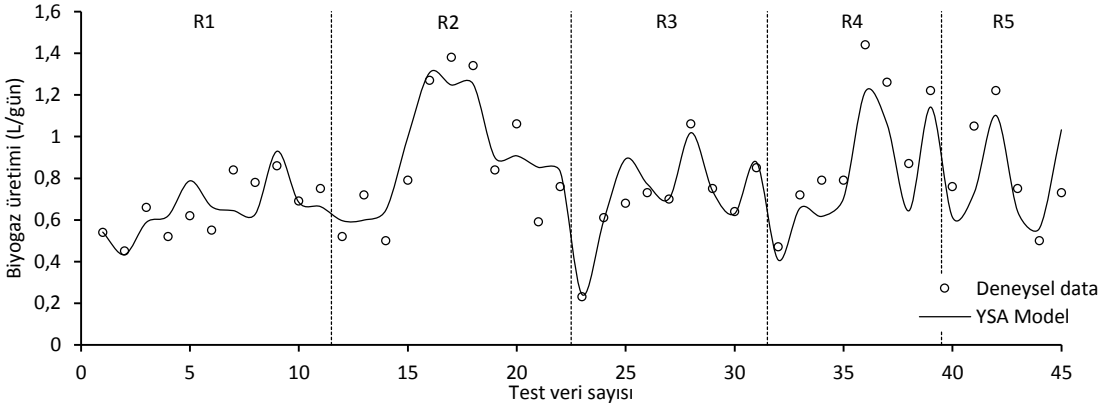
Şekil 6.3 Deneysel data ile YSA model tahminleri arasındaki korelasyon (eğitim)



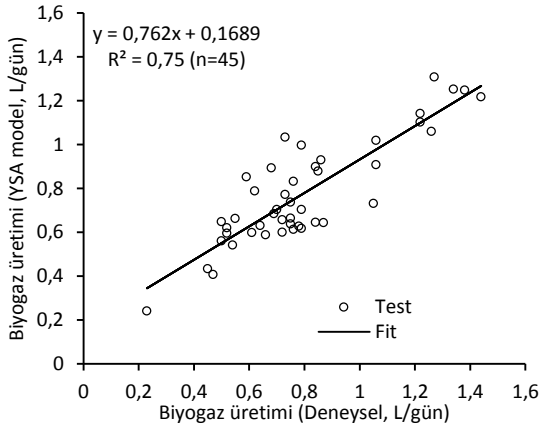
Şekil 6.4 Deneysel data YSA model tahminlerinin karşılaştırılması (validasyon)



Şekil 6.5 Deneysel data ile YSA model tahminleri arasındaki korelasyon (validasyon)



Şekil 6.6 Deneysel data YSA model tahminlerinin karşılaştırılması (test)



Şekil 6.7 Deneysel data ile YSA model tahminleri arasındaki korelasyon (test)

Geliştirilen YSA tabanlı modelin performansı determinasyon katsayısı (R^2), korelasyon katsayısı (R), uyumluluk indeksi (IA) ve 2'nin faktörü (FA2) indikatörleri ile değerlendirilmiştir. İstatiksel indikatörler modelin doğruluğu hakkında bilgi vermektedir. Boyutsuz IA indikatörü 0-1 aralığında değerler alır. Bu indikatör OKH ile potansiyel hata arasındaki oranı tanımlar [212]. FA2 0,5–2 aralığında değerler alır ve gözlenen değerlerin

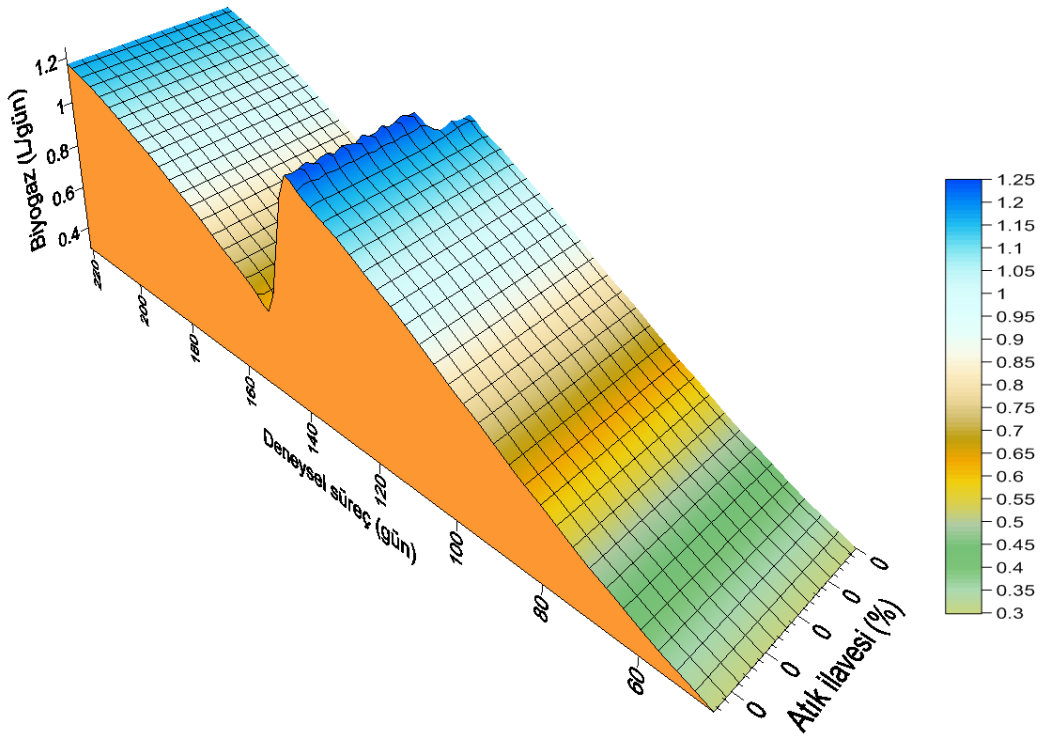
ikinin bir faktörü içinde tahminlerin yüzdesi olarak tanımlanır. Bu istatiksel indikatörlerin 1'e yakın olması modelin tahmin başarısını gösterir. YSA tabanlı modelin test verileri için istatiksel analizleri Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3 YSA tabanlı modelin test verileri için istatiksel analizi

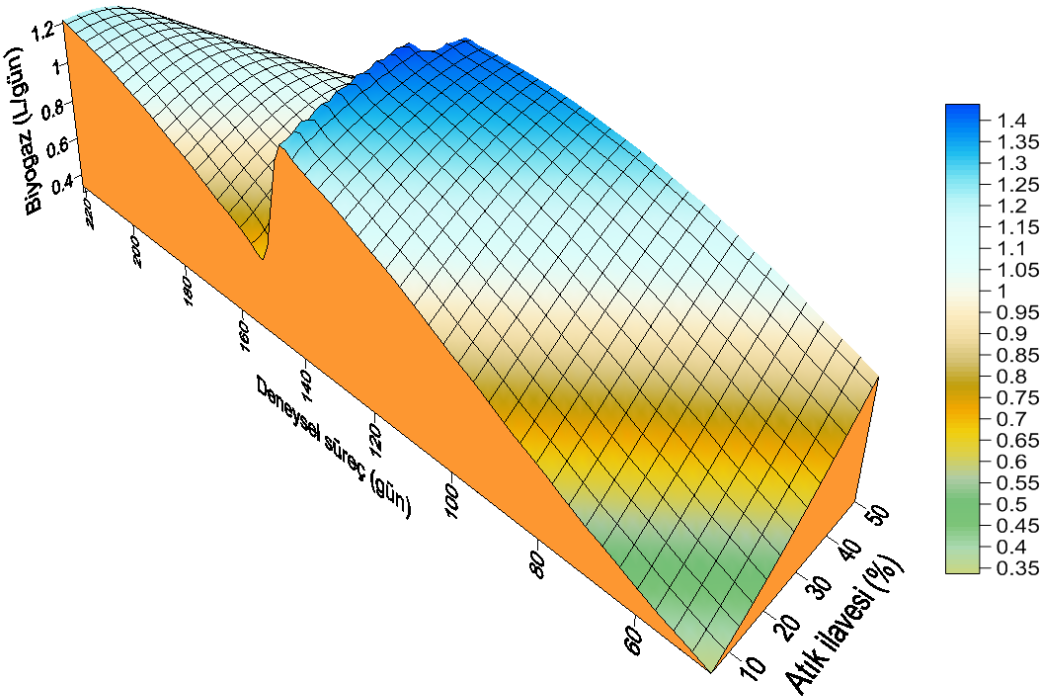
İstatiksel performans indikatörleri	Matematiksel ifadeleri	YSA Modeli için sonuçlar
Determinasyon katsayısı (R^2):	$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(O_i - O_m)(P_i - P_m))^2}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - P_m)^2}$	0.75332
Korelasyon katsayısı (R):	$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - O_m)(P_i - P_m)}{(n-1)(\sigma_o - \sigma_p)}$	0.86794
Uyumluluk indeksi (IA):	$IA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n}(\lvert P_{i-}O_m\rvert + \lvert O_i - O_m\rvert)}\right]$	0.9255
İkinin faktörü (FA2):	$FA2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{O_i}{P_i}}{n}$	1.0319

6.2.3 BBHG'ne İlave Atık Karışım Oranının Değişimi Durumunda Biyogaz Üretiminin Model Simülasyonu (HBS 10 gün için)

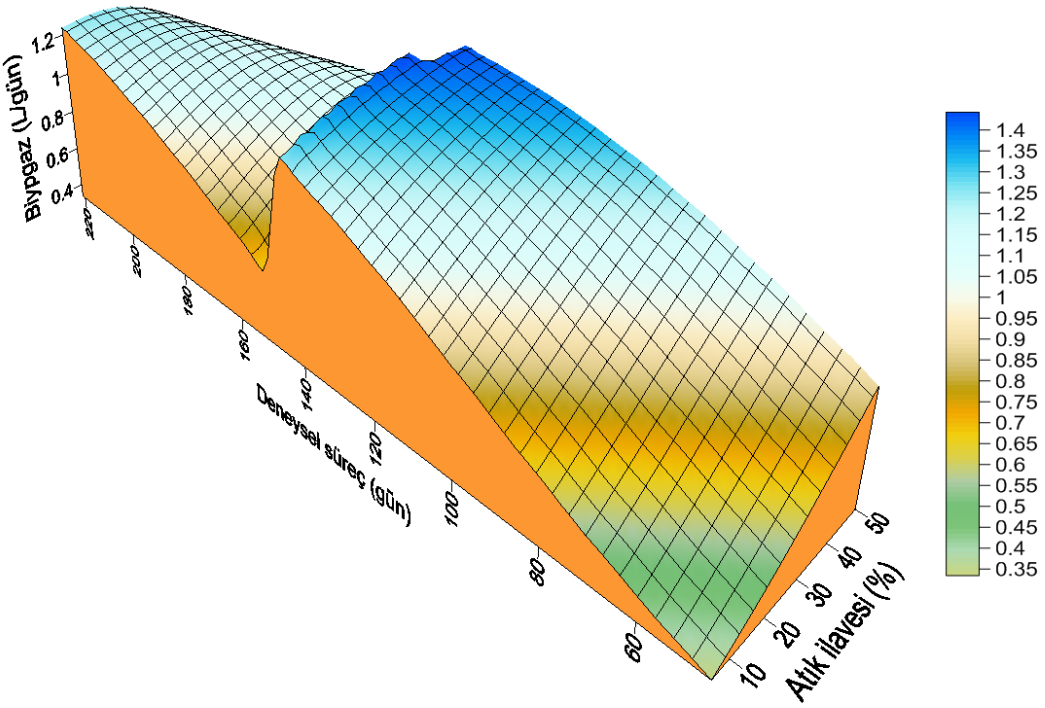
Biyogaz üretimi tahmini için geliştirilen YSA modeli ile çalışmanın 42-222 günleri arasında HBS 10 gün için atık karıştırma oranına göre (%1'den %50'ye kadar) 5 reaktörde iki farklı atık parçalama kademesi için p2, p3, p4, p5 ve p6 değişkenlerinin ortalama değerleri kullanılarak bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de deneysel süreç ve atık ilavesine göre biyogaz üretiminin 3D yüzey simülasyon grafikleri gösterilmiştir. BBHG'ne katılan atıkların oranları incelendiğinde biyogaz üretiminin en iyi %20-30 katkı oranında gerçekleştiği görülmektedir. Çalışmanın 100. gününden sonra tek kademeli parçalama döneminde %30'dan daha fazla atık ilavesi yapılması durumunda biyogaz üretimindeki artışın düştüğü görülmektedir. 142. günde iki kademeli atık parçalama dönemine geçilmesi ile beraber biyogaz üretimindeki düşüş simülasyon grafiğinde çok net bir şekilde görünür duruma gelmiştir. Bununla birlikte iki kademeli parçalama döneminde %30'dan fazla atık ilavesi yapılması durumunda atık ilavesinin biyogaz üretimini negatif olarak etkilediği görülmektedir. 3D yüzey simülasyon grafiklerine göre ikincil parçalama döneminde atık ilavesinden en az olumsuz etkilenen reaktöreler sırasıyla R5, R4, R3 ve R2 olduğu görülmektedir.



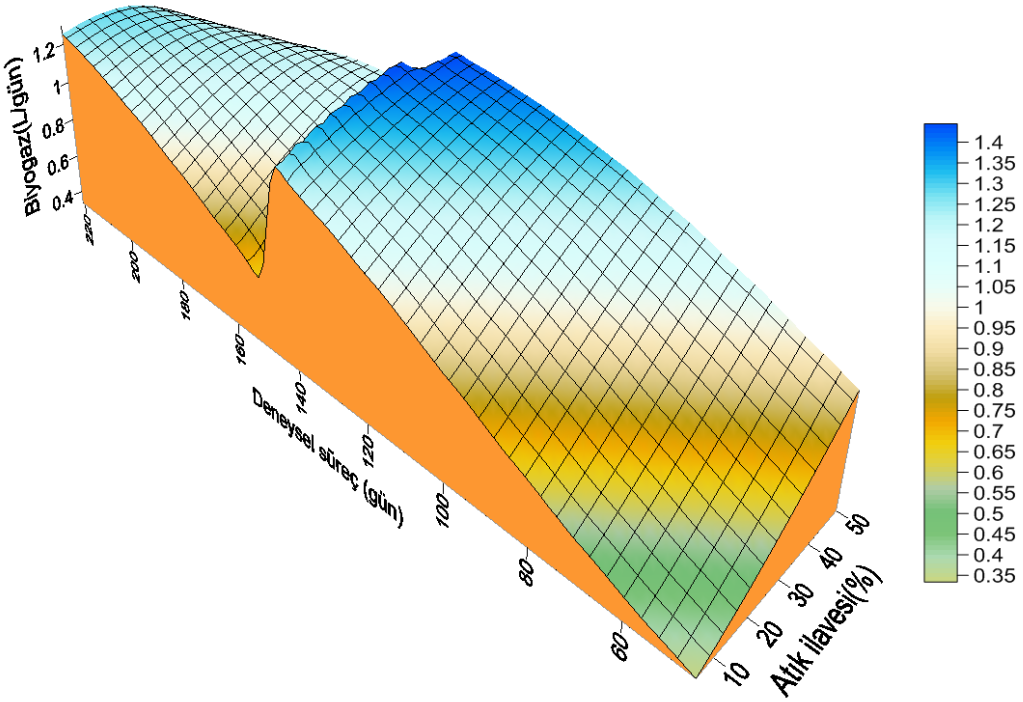
Şekil 6.8 R1 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu



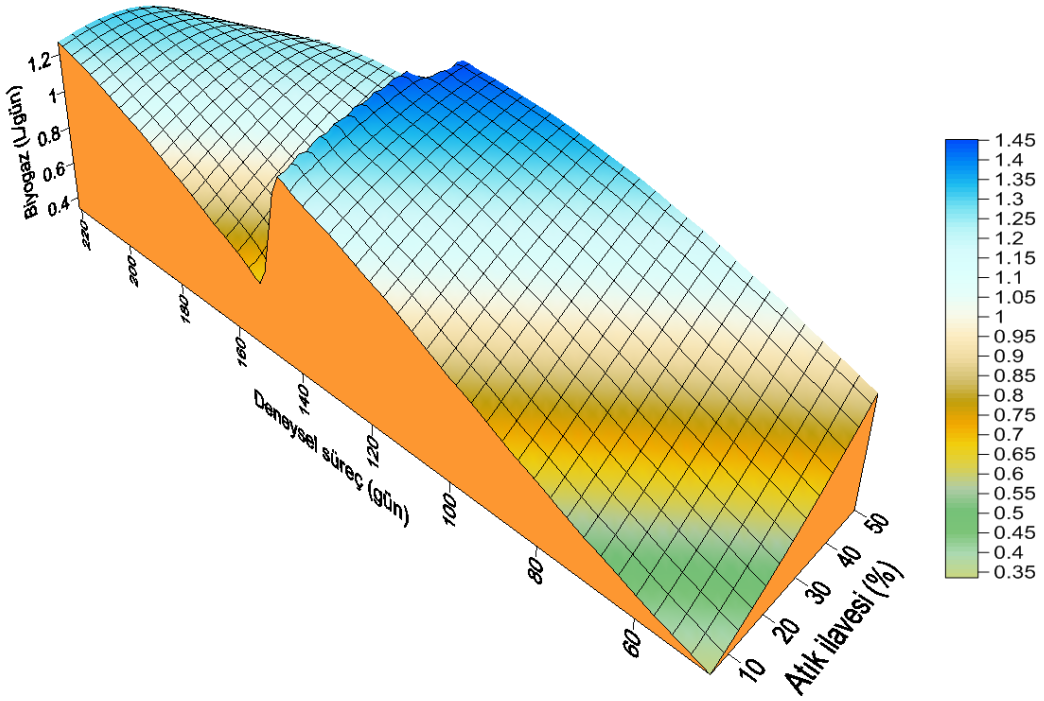
Şekil 6.9 R2 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu



Şekil 6.10 R3 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu



Şekil 6.11 R4 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu



Şekil 6.12 R5 reaktörü biyogaz üretiminin YSA tabanlı model simülasyonu

BÖLÜM 7

BİYOGAZ TESİSİ İÇİN MALİYET ANALİZİ

7.1 BBHG Biyogaz Üretim Tesisi Maliyet Analizi

Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin gerçek ölçekli çalışmalar için değerlendirilmesi çalışmanın en önemli çıktılarındadır. Ülkemizde özellikle günümüze kadar biyogaz üretim tesislerinin kurulumunda yurt dışı menşeli firmalar faaliyet göstermiştir. Bu durum hem sistemin kurulumu hem de işletilmesi açısından büyük sorunlar oluşturmaktadır. Anaerobik arıtma konusunda ülkemizde ve yurt dışında oldukça fazla çalışmalar bulunmaktadır. Ancak biyogaz tesisi yapımında yerel imkânların değerlendirilerek kurulabilecek sistemler için yol gösterici maliyet analizleri yeteri kadar bulunmamaktadır.

Sürdürülebilir üretim insanların huzur ve refahı için gerekli en önemli faktörlerden birisidir. Üretimin sürdürülebilirliği ve canlılığın devamı için sağlıklı bir çevre en temel gereksinimlerdendir. Ülkemizde insan faydasına sunulabilecek birçok doğal kaynak bulunmaktadır. Bu doğal kaynaklardan biriside organik yükü yüksek atıklardır. Aslında atık olma yönüyle de bertaraf edilme zorunluluğu karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle organik atıkların anaerobik çürümeye tabi tutularak hem atık bertarafının sağlanması hem de biyogaz ve organik gübre gibi eldelerin olması biyogaz üretim sistemlerini cazip hale getirmektedir.

Günümüzde artan nüfusla beraber üretim miktarını arttırmak bir zorunluluk haline gelmiştir. Üretimin artmasıyla beraber atık oluşumu da artmıştır. Üretim sektörünün önemli kollarından birisi temel gıda üretimidir. Temel gıda denilince ilk akla gelen

ürünler; et, et ürünleri, süt ve süt ürünleridir. Bu üretim dalında önemli bir payı, büyük, orta ve küçük ölçekli büyükbaş hayvancılık çiftlikleri almaktadır. Ülkemizde bu ürünlere olan ihtiyacın artması neticesinde büyükbaş hayvancılık sektörü son yıllarda devletin teşvikleriyle beraber ciddi bir büyüme göstermiştir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2013 yılsonu verilerine göre büyükbaş hayvan sayısı bir önceki yıla göre %12,3 artarak 13 milyon 915 bine yükselmiştir [213].

Türkiye'de süt sığırcılığı ve sığır besi işletmelerinin büyüklüğü ve sayısına ilişkin bilgiler Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verilmiştir. Bu verilere göre 50 ve daha fazla sığır sayısına sahip toplam 32835 büyükbaş hayvan işletmesinin olduğu görülmektedir. İşletmelerin yarısından fazlasında sığır sayısı 1-5 baş arasında, %76`sındaki sığır sayısı da 10 başın altındadır. [214].

Çizelge 7.1 Süt sığırcılığı işletmelerinin büyüklük gruplarına göre dağılımı (2013) [214]

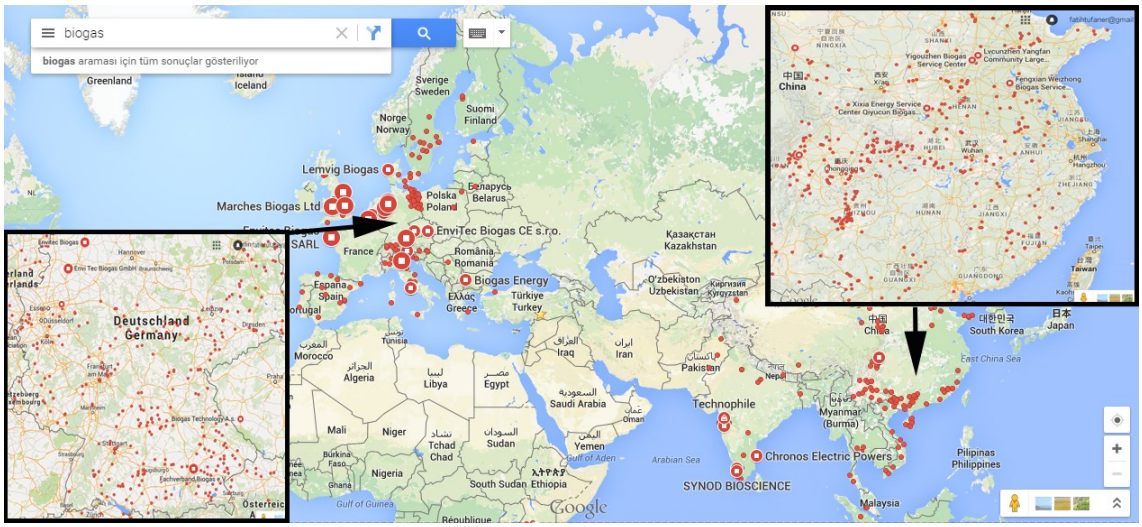
Büyüklük grubu (baş)	İşletme sayısı	Grubun payı (%)
1-5	701907	56.1
6-9	252776	20.2
10-19	190009	15.2
20-49	85910	6.9
50-99	16204	1.3
100-199	3141	0.3
200+	1000	0.1
Toplam	1250947	100

Çizelge 7.2 Sığır besi işletmelerinin büyüklük gruplarına göre dağılımı (2012) [214]

Büyüklük grubu (baş)	İşletme sayısı	Grubun payı (%)
1-5	210532	56,2
6-10	76084	20,3
11-25	58917	15,7
26-49	16339	4,4
50-100	10720	2,9
100-200	1770	0,5
201+	589	0,2
Toplam	374951	100

Hayvancılık sektörü aslında önemli bir geçim kaynağı olmakla birlikte önemli maliyetleri olan ve çok emek isteyen bir iştir. Bu sektörde maliyetleri aşağı çekmek üreticiler için çok önemlidir. Biyogaz üretimi, hayvancılık sektöründe üretim maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabilecek bir teknolojidir. Almanya, Danimarka, İtalya, Hindistan, Pakistan ve Çin gibi birçok ülkede önemli sayılara ulaşmış olan biyogaz tesislerinin kullanımının

ülkemizde de yaygınlaştırılmasının gerekliliği açıktır. Bir çok ülkede biyogaz üzerine yapılan çalışmaların yoğunluğu, harita arama motorunda "biogas" kelimesi arattırıldığında da görülmektedir (Şekil 7.1). Özellikle doğal gazın kullanılmadığı gaz ihtiyacının tüple sağlandığı kırsal kesimlerde ve köylerde hayvancılık neticesinde oluşan gübrelerin bu amaç için kullanılmasında çok sayıda maslahatın olduğu görülmektedir. Üretilen biyogazın özelliklede doğal gazın kullanılmadığı yerlerde daha maliyetli olan tüp gaz yerine kullanılması daha fizibıl olmaktadır.



Şekil 7.1 Google Maps arama motorunda "biogas" araması için tüm sonuçlar [215]

Özellikle kırsal kesimde hayvancılık meralarda yapıldığı için küçükbaş hayvancılıkta çok fazla gübre birikimi olmamaktadır. Ancak büyükbaş hayvancılıkta hayvanlar en azından gece vakitleri ağıllarda oluğu için atık birikimi her zaman olmaktadır. Bu nedenle biyogaz tesislerinde kullanılacak atık çoğunluğu olarak BBHG'nin seçilmesi tesisin işletilmesi açısından büyük kolaylıklar sağlayacaktır. Bununla birlikte çalışmamızda BBHG'ne yaklaşık %20 oranında normal şartlarda etrafımızda oluşan diğer organik yükü yüksek olan atıkların ilavesinin olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Bu şekilde diğer organik yükü yüksek olan atıklarda anaerobik sürece dâhil edilmiş olunacaktır.

BBHG ile organik yükü yüksek atıkların (bitkisel atıklar, evsel - endüstriyel atıklar, arıtma tesisi çamuru vb.) birlikte arıtımını gerçekleştirmek ve neticesinde biyogaz ve organik gübre elde etmek için yerel sanayi şartları kullanılarak yapılabilecek bir sistem esas alınmıştır. Bu nedenle hayvansal üretim yapan yerel halkın uygulayabileceği ekonomisine ve çevreye katkı sağlayabilecek bir sistem, maliyet analizi çalışmasının çerçevesini oluşturmaktadır.

7.2 Planlanan BBHG Biyogaz Tesisi için Model Seçimi

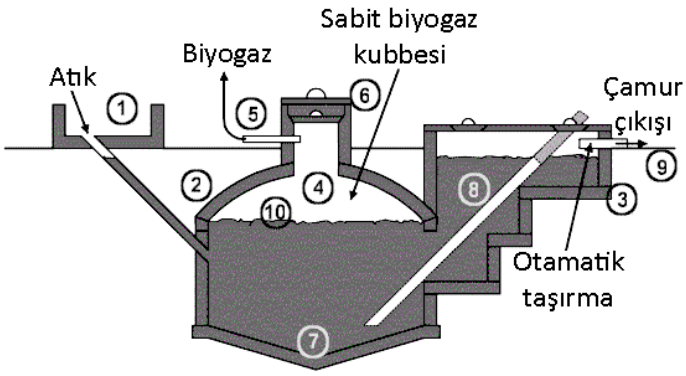
Biyogaz üretimi ve biyogazın kullanımı çok eskilere dayandığı için çok farklı tipte sistemler geliştirilmiştir. Tasarlanan tesisler yapısına ve işletme şartlarına göre sınıflandırılmışlardır. Aslında havasız bir ortam uygun sıcaklık ve besi maddesi varlığında anaerobik şartlar oluşmaktadır. Günümüze kadar yapılmış olan çalışmalar ve mevcut teknolojik imkânlar kullanıldığında daha uygulanabilir sistemler tasarlanabilmektedir.

Teknolojik imkanların kullanılabilirliği fayda maliyet ilişkisinin optimum olduğu noktaya kadardır. İthal edilerek kurulan tesislerin maliyet geri dönüşleri çok uzun olduğundan tercih edilirliği düşmektedir. Bu nedenle ülkemiz şartlarında küçük, orta ve büyük ölçekli biyogaz tesisleri için kullanılacak sistemlerin yerli sanayide üretilebilir olması gerekmektedir. Bu durumda hayvancılık ile uğraşan insanların kurabileceği, işletebileceği fayda maliyet analizleri yapılmış sürdürülebilir sistemlerin tasarlanması gerekmektedir.

Tasarlanan biyogaz üretecinin özellikle sızdırmaz olması ve kararlı bir sıcaklığa sahip olması gerekmektedir. Ayrıca atık yükleme miktarı arttıkça karıştırma ihtiyacı da hâsıl olmaktadır. Bu nedenle yukarıda bahsedilen şartları en iyi sağlayabilecek olan modelin sabit kubbeli biyogaz tesisi (fixed dome biogas plant) (Şekil 7.2) modeli olduğu düşünülmektedir.

Sabit kubbeli biyogaz tesisleri dış ortam ile atık giriş-çıkışı ve biyogaz çıkış haricinde bağlantısı olmayan tamamen kapalı bir sistemlerdir. Sistemden biyogaz çıkışı başladığında biyogaz baloncukları sistemin karıştırılmasında etkin rol oynamaktadır. Üretilen biyogaz reaktör üst kısmında biriktikçe iç basıncı artırmakta ve reaktör çamurunu giriş ve çıkış hattında yükseltmektedir. Bu durumda yine reaktör içerisine hareketlilik kazandırmaktadır.

Sabit kubbeli biyogaz sistemlerinin hareketli parçası olmadığından basit bir yapıya sahiptir ve kurulum maliyeti oldukça düşüktür. Çelik gibi paslanmaz bir malzeme ile üretildiğinde 20 yıldan daha fazla bir ömrü vardır. Sistem toprağa gömüldüğünde fiziksel dış ortam şartlarından korunabilmekte ve gece gündüz sıcaklık farkları önlenerek daha stabil bir sistem oluşturulabilmektedir. Sistemde atık giriş ve çıkış mekanizasyona bağlı olmazsa atık beslemesi insan gücü ile yapılmakta böylece işletme maliyeti oldukça düşmektedir.



1. Kum tuzaklı karıştırma haznesi ve giriş borusu. 2. Anaerobik reaktör. 3. Atık çıkış tankı. 4. Biyogaz haznesi. 5. Biyogaz çıkış borusu. 6. Gaz sızdırmaz tank giriş kapağı. 7. Anaerobik çamur. 8. Çıkış borusu. 9. Referans seviyesi. 10. Gaz basıncı ile değişen sıvı seviyesi.

Şekil 7.2 Sabit kubbeli biyogaz tesisi (Nicarao tasarımı)

Sabit kubbeli biyogaz üreteçlerinin farklı modelleri bulunmaktadır. Çin tipi model, bu modelin ilk arketiplerindendir. Reaktör silindirik bir gövdeden oluşmaktadır. Janata tipi model Hindistan'da kullanılmış çatlak ve sızıntı problemlerinden dolayı günümüzde kullanılmamaktadır. Deenbandhu modeli, Janata modelinin daha gelişmişi ve çatlamalara karşı daha dirençli olduğu görülmüştür. CAMARTEC ise 80'lerde Tanzanya'da geliştirilen bir modeldir [216].

Soğuk iklimlere karşı dirençli olan sabit kubbeli biyogaz üreteçlerinin 5-200 m^3 aralığında bilinen dizaynları bulunmaktadır. Yerel imkânlar ile kolay ve düşük kurulum maliyetine sahip bu tesisler yer altında olması ve sıcaklık kontrolü kolaylığı ile tercih edilebilir bir sistemdir. Gaz kaçaklarının olması ve yer altı sıcaklığının düşük olması sistemin önemli dezavantajlarındandır. Tesis metal gövde ile tasarlanıp, güneş enerjisi kullanılarak ısıtma yapıldığında gerekli izolasyonlarla beraber bu sorunların önüne geçilebileceği düşünülmektedir. Günümüzde fiberglas malzeme ile çok düşük maliyetlere üretilebilmektedir. Ancak reaktör ömrünün daha uzun olması açısından metal gövdeli bir tasarımın daha avantajlı olacağı düşünülmektedir.

7.3 BBHG Biyogaz Üretim Tesisi Boyutlandırılması

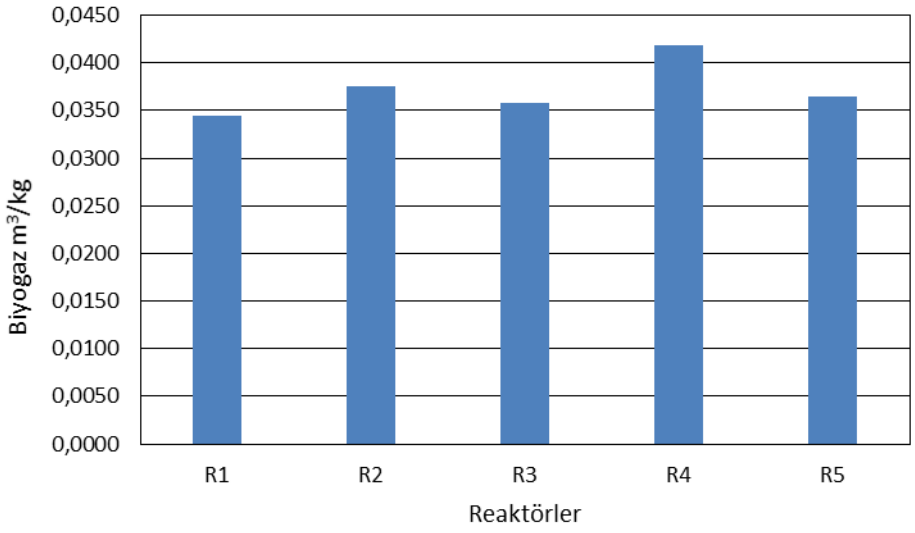
Özellikle biyogaz tesislerinin projelendirilmesinde oluşan atık miktarı en önemli dizayn kriteridir. Ülkemizde son yıllarda büyükbaş hayvancılık devlet teşvikleri ile hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Yeterli otlakların bulunmayışı sebebiyle de özellikle büyükbaş hayvancılık daha ziyade ahırlarda yapılmaktadır. En azından gece vaktinde ahırlarda

bulunan büyükbaş hayvanlar otlama dönemlerinde bile biyogaz tesisini işletecek kadar gübre üretebilmektedirler. Ahır hayvancılığı yapıldığında ise atık sıkıntısı yaşanmamakla beraber arıtmaya tabi tutulması gereken önemli hacimlerde BBHG oluşmaktadır.

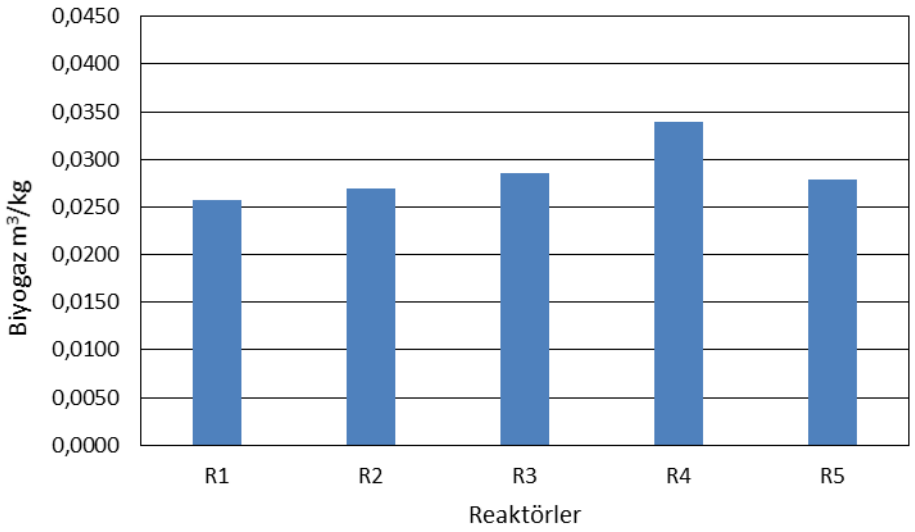
Planlanan tesiste sadece büyükbaş hayvan gübresi kullanılacaksa günlük ortaya çıkan gübre miktarı, hayvanların beslenme şekilleri ve gübrelerin katı madde miktarları bilinmelidir. Günlük ortaya çıkan gübre miktarı hayvanların cins ve yaşlarına göre değişik miktarlarda olabilmektedir. Gübre üretimi büyükbaş hayvanlar için 10-20 kg/gün (yaş) kabul edilebileceği gibi canlı ağırlığın %5-6'sı da günlük gübre üretimi hesabında kullanılabilir [217]. Bunun yanında BBHG'nin biyometanizasyon süreçlerini iyileştirmek için yardımcı atık kullanılması durumunda kullanılacak ilave atığın KOİ yükünün BBHG'nin KOİ yükünün yaklaşık %20'sine tekabül eden atık miktarı da tesis dizaynı için hesaplamalara katılabilir.

7.3.1 Gerekli Atık Hesabı

Tasarlanacak olan biyogaz tesisi günlük üretilecek biyogaz miktarına göre boyutlandırılabilir. Biyogaz tesisi kaç kişinin biyogaz ihtiyacına cevap vereceğine ya da kullanılabilir BBHG'nin miktarına göre projelendirilebilir. Bir kişi günlük yemek pişirme ihtiyacını karşılamak için 0.34-0.42 m^3 biyogaz gereklidir ve 1 kg yaş BBHG'nden 0.04 m^3 biyogaz üretilebilir. Buna göre 25 kg BBHG ile 1 m^3 biyogaz üretilebilir [218], [219]. Farklı kullanımlara göre günlük biyogaz tüketimi değişkenlik göstermekte olup yemek pişirmek için gerekli günlük biyogaz tüketimini Karttek [220] 0.227 m^3 olarak belirtmiştir. Deneysel çalışma sürecinde bütün reaktörlerde kullanılan atıkların BBHG'nin ortalama %16.67 TKM oranına sahip atık kullanıldığı kabulüyle, deneysel çalışmalarda HBS 20 gün ve 10 gün için 5 reaktörde üretilen kg yaş atık başına üretilen ortalama m^3 biyogaz miktarları sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te gösterilmiştir.



Şekil 7.3 HBS 20 gün için biyogaz üretimi m^3/kg (yaş)



Şekil 7.4 HBS 10 gün için biyogaz üretimi m^3/kg (yaş)

Şekil 7.3 ve 7.4'ten de görüleceği üzere HBS arttıkça kg atık başına üretilen biyogaz miktarı artmaktadır. Ancak HBS'nin artması reaktör hacmini arttıracağı için biyogaz tesisinin kurulum ve işletme maliyetini arttıracaktır. İlave atık karışımı biyogaz üretimini arttıracaktır ancak yine emniyet için kg yaş atık başına biyogaz üretim miktarı için referans olarak HBS 20 gün için R1 reaktörü biyogaz üretim değeri (0.034 m^3/kg) hesaplamalarda kullanılmıştır. Kişi başına ihtiyaç duyulan biyogaz miktarı güvenlik açısından 0.5 m^3/gün olarak alınmıştır. Gübre üretimi büyükbaş hayvanlar için 10-20 kg/gün (yaş) ya da canlı ağırlığın %5-6'sı olmasına rağmen gübre içerisinde anaerobik

sistemde çürütülemeyecek ya da zor çürüyen saman gibi materyaller bulunmaktadır. Buna göre büyükbaş hayvanların günlük gübre üretimi (anaerobik sistem için zorluk oluşturabilecek maddelerin çıkartıldığı kabulüyle) 10 kg (yaş) olarak kabul edilirse üretilecek biyogaz miktarına göre faydalanabilecek kişi sayısı, gerekli gübre miktarı ve büyükbaş hayvan sayısı Çizelge 7.3'deki gibi olacaktır.

Çizelge 7.3 Farklı dizaynlar için yararlanacak kişi sayısı, gerekli BBHG miktarı ve hayvan sayısı

Biyogaz tesisi dizayn no	Tesisin biyogaz kapasitesi (m^3/gün)	Yararlanabilecek kişi sayısı	Gerekli BBHG miktarı (kg (yaş)/gün)	Gerekli büyükbaş hayvan sayısı
1	1	2	29	3
2	2	4	59	6
3	4	8	118	12
4	8	16	235	24
5	16	32	471	47
6	32	64	941	94

7.3.2 Reaktör Hacim Hesapları

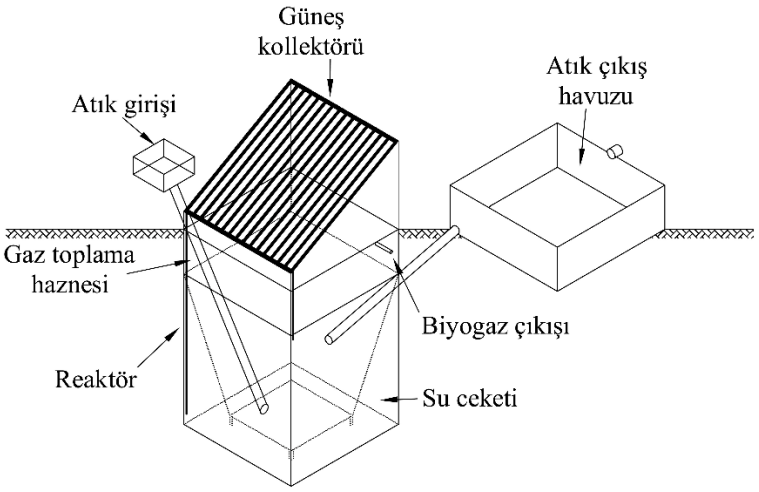
Organik yükü yüksek atıkların anaerobik olarak arıtılabilmesi için su ilavesi ile organik yükleme oranının ayarlanması gerekmektedir. Bu durumda atık hacmi artacağından dolayı reaktör hacminin artması ile beraber ısıtma, karıştırma, pH dengesi, susuzlaştırma gibi işlemlerin maliyeti atık hacminin artışına göre artacaktır. Buna göre de ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti artacaktır. Bu nedenle BBHG ve diğer katkı atıkların rahatlıkla sisteme beslenip sistemden tahliye edilebileceği bir katı madde oranı seçilmesi gerekmektedir. Biyogaz reaktörlerine beslenen substratın katı madde oranı bazı araştırmacılar tarafından %2.8 [163], %5 [146], %6.07 [109] ve %6.7 [151] olarak seçilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada reaktörlerdeki anaerobik çamur TKM oranı %3-6 arasında değişim göstermiştir. Bu veriden hareketle besleme atığı katı madde oranı %5 olarak seçmenin uygun olacağı düşünülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda BBHG ortalama TKM oranı %16.67 olarak belirlenmiştir. Bu değeri %5'e indirmek için 1 kg yaş gübreye yaklaşık 2.334 L (pratikte 2-2.5 L arası) su eklemek gerekmektedir. 20 günlük HBS ve 1 kg yaş BBHG kullanımında gerekli hacim 66.68 L olacaktır. Buna göre üretilmek istenen biyogaz miktarına göre yaklaşık reaktör hacmi Çizelge 7.4'de verilmiştir.

Çizelge 7.4 HBS 20 gün için biyogaz üretim miktarına göre gerekli reaktör hacmi

Tesisin biyogaz kapasitesi (m^3/gün)	Gerekli BBHG miktarı (kg (yaş)/gün)	Eklenmesi gereken su miktarı (L/gün)	Besleme hacmi (L/gün)	Besleme sıvısı için gerekli reaktör hacmi (m^3)	Biyogaz toplama bölmesi ile beraber toplam hacim (m^3)
1	29	68	98	2	3
2	59	138	197	4	6
4	118	275	393	8	12
8	235	548	783	16	24
16	471	1099	1570	31	47
32	941	2196	3137	62	94

7.4 İlk Yatırım Maliyeti (Sabit Maliyet)

Biyogaz tesisinde gerekli hacmin yarısı kadar bir hacimde reaktör çevresine sıcaklık kontrolü için su ceketi inşa edilecektir. Buna bağlı olarak güneş kollektörü ve termostatın tesise montajlanması düşünülmüştür. Düşünülen biyogaz tesisi Şekil 7.5'te gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Düşünülen güneş kollektörlü sabit kubbeli biyogaz tesisi

Düşünülen reaktörlerin hacimleri arasındaki oran yaklaşık olarak 2 kattır. Hacim değişimine göre alansal malzeme değişimi katsayısı yaklaşık 1.6 olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle maliyet hesapları yaklaşık hesaplardır. Farklı hacimler için biyogaz tesisi ilk yatırım maliyetleri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5 Farklı hacimler için biyogaz tesisi ilk yatırım maliyetleri

Harcama kalemleri	Biyogaz tesisi hacmine göre kullanılan materyallerin maliyeti (TL)					
	3 m^3	6 m^3	12 m^3	24 m^3	47 m^3	94 m^3
A. İnşaat						
1. Paslanmaz sac	1040	1840	2880	4150	6910	11520
2. Paslanmaz boru (Ø 10 cm)	186	186	372	372	372	558
3. Güneş kollektörü	1200	1200	2400	4800	9600	19200
4. Termostat	272	272	272	272	272	272
5. Plastik boru	60	60	60	60	60	60
6. Su kapanı	45	45	45	45	45	45
7. Diğer sarf malzeme	120	132	145	160	176	193
8. Boya	70	112	180	287	459	734
9. İzolasyon	120	180	240	420	660	1020
Ara Toplam	3113	4027	6594	10566	18554	33602
B. Emek						
1. Çukur kazma	120	240	480	960	1920	3840
2. Reaktör yapımı	1200	1920	3072	4915	7864	12582
Ara Toplam	1320	2160	3552	5875	9784	16422
Toplam maliyet (A+B)	4433	6187	10146	16441	28338	50024

Kollektör yüzey alanının hesaplanmasında; sistemden faydalanma zamanı, ısıtılması gereken su miktarı, suyun sisteme giriş sıcaklığı ve yükseltilmek istenilen sıcaklık düzeyi önemli rol oynamaktadır. Biyogaz tesisinin Adıyaman'a kurulması planlanmaktadır. Güneş kollektörü sisteminden yıl boyu yararlanılmak istenmektedir. Bu nedenle 37.4 enleminde bulunan Adıyaman'da tüm yıl için en verimli kollektör açısı (enlem x 0.9) 33.66 olarak hesaplanmıştır. Gerekli kollektör yüzey alanı hesabında ısıtılmak istenen su sıcaklığı 38°C, dönüş suyu sıcaklığı 34°C, kollektör yüzeyine gelen güneş enerjisi miktarı (TRA) 4328 (kcal/m^2gün) gibi güvenli bir değer ve verim %60 olarak alınarak gerekli kollektör alanı bulunmuştur. Farklı hacimler için ihtiyaç duyulan kollektör maliyetleri Çizelge 7.5'de verilmiştir [221]. İhtiyaç duyulan kollektör yüzey alanı (7.1) ve (7.2) eşitlikleri yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Q_{sı} = m \times c \times \Delta t \text{ (kcal/gün)} \quad (7.1)$$

$$Fk = Q_{sı}/TRA \times \eta \ (m^2) \quad (7.2)$$

Formüllerde;

$Q_{sı}$: Sıcak su enerji ihtiyacı (kcal/gün)

m: Isıtılacak su miktarı (L/gün)

c: Suyun ısınma ısısı (kcal/kg°C), 1 alınabilir.

Δt: İstenilen su sıcaklığı derecesi ile suyun sisteme giriş sıcaklığı arasındaki fark (°C)

Fk: Kollektör yüzeyi (m^2)

TRA: Kollektör yüzeyine gelen güneş enerjisi miktarı (kcal/(m^2.gün))

η: Kollektör verimi (%). Kollektörlerde ortalama verim %55-65 arasında alınabilir.

7.5 Yıllık İşletme Maliyeti

Biyogaz tesisinin yıllık işletme maliyeti içerisinde tesisin bakım giderleri, kontrol için gerekli elektrik giderleri, gübrenin rektörlere beslenmesi için işçilik giderleri ve ilave atık giderleri olabilir. Biyogaz tesisinde atık hazırlığı için gerekli suyun bir kısmının reaktör çıkış suyundan temin edilmesi düşünüldüğünden su giderleri ve işçilik giderleri 24 m^3 hacme sahip tesise kadar ihmal edilmiştir. Çizlge 4.4'teki verilere göre kullanılacak ilave atığın gram kuru maddesinin TKOİ değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Maliyet güvenliği açısından ülkemizde maliyeti fazla olabilecek değerli bir hayvansal yem olan mısır silajı ilave katkı malzemesi olarak (%20) düşünülmüştür. Mısır silajı en az %30 kuru madde bulundurmaktadır [222] ve 2015 yılı fiyat istatistiklerine göre 1 ton mısır silajı 250 TL'dir [223]. BBHG'nin TKM oranı %16.67 olarak tespit edilmiştir bu oran mısır silajı TKM oranının yaklaşık yarısıdır. Buna göre %20 atık ilavesini sağlamak için ilave edilecek mısır silajı BBHG'nin yaklaşık %10'u oranında olacaktır. Bu şekilde çevrede oluşabilecek her türlü organik yükü yüksek atığın tesise getirilerek anaerobik sistemde kullanılabilir hale getirilmesi için gerekli bütün maliyetleri kapsayacak bir işletme maliyetinin seçildiği düşünülmektedir. 24 m^3 hacimli reaktör ve daha büyük reaktörlerde atık beslemesinin pompa ile yapılması düşünülmektedir. Bu nedenle elektrik giderleri de artacaktır. Düşünülen reaktörler için yıllık işletme maliyetleri Çizelge 7.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.6 Düşünülen reaktörler için yıllık işletme maliyeleri

Maliyet bileşeni	Biyogaz tesisi hacmine göre yapılacak işlemlerin maliyeti (TL)					
	3 m^3	6 m^3	12 m^3	24 m^3	47 m^3	94 m^3
1. Bakım onarım giderleri (%4)	177	247	405	657	1133	2000
2. Elektrik giderleri	240	240	240	600	960	1680
3. Su giderleri	-	-	-	416	815	1630
4. İşçilik giderleri	-	-	-	2920	2920	2920
5. İlave atık giderleri	265	538	1077	2144	4298	8587
Toplam maliyet	682	1025	1722	6737	10126	16817

7.6 Biyogaz Tesisi Fayda Maliyet Analizi

Kırsal alanda pişirme ihtiyacı mutfak tüpleri ile karşılanmaktadır. 2014 yılı sonu itibari ile 12 kg'lık mutfak tüpü fiyatı ortalama 65 TL'dir. Buna göre 1 kg sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) 5.417 TL'dir [224]. 1 m^3 biyogaz 0.43 kg LPG'ye eş değerdir [218]. Yapılan hesaplamalara göre yaklaşık 3 büyükbaş hayvandan (10 kg yaş BBHG/(gün büyükbaş)) yaklaşık 1 m^3/gün biyogaz üretilebileceği öngörülmüştür. Yıllık olarak düşünüldüğünde 365 m^3 biyogaz eş değeri olarak yaklaşık 157 kg LPG yani 13 mutfak tüpü ederi üretilecektir. Ancak sabit ve işletme maliyetini de hesaplara kattığımızda 20 yıllık süreç içerisinde 3 ve 24 büyükbaş hayvan için düşünülen tesislerde sabit maliyetin karşılanamadığı öngörülmüştür. Diğer hacimler için yani 6, 12, 47 ve 94 büyükbaş hayvan için kurulacak tesislerde yıllık olarak yaklaşık sırasıyla 10, 26, 54 ve 160 mutfak tüpü ederi bir net getirinin olacağı öngörülmektedir. Çizelge 7.7'de kapasitelerine göre biyogaz tesislerinin fayda-maliyet hesaplamaları verilmiştir.

Ayrıca BBHG ve organik yükü yüksek atıklarla işletilebilecek bir biyogaz tesisi kurulduğunda yüksek kalorifik değere sahip biyogaz ile birlikte bitki besleme nütrienti bakımından zengin gübre üretilmiş olunacaktır. Ancak çiftçilerin nazarında BBHG, anaerobik prosesten geçmemiş haliyle de tarımsal gübre olarak değerlendirildiği için bu aşamada oluşan organik gübrenin mali ederi maliyet hesaplarına ilave edilmemiştir.

Buna ilaveten bu atıklardan kaynaklanabilecek koku, sinek patojen mikroorganizmalar, su kirliliği ve sera etkisi gibi çevresel olumsuzlukların bertaraf edilmiş olması da görünmeyen bir getiri yönüdür. Dünya özellikle son yıllarda sera gazı salınımı üzerinde önemle durmaktadır. Bu nedenle anaerobik sistemler sera gazı oluşumunu kontrol etmede de ayrı bir öneme sahiptir. Bilindiği üzere sera gazları küresel ısınma potansiyellerine göre değerlendirildiğinde, CH_4 ve diazotmonoksit (N_2O)'in CO_2'e göre

sırasıyla 23 ve 296 kat daha fazla sera etkisine sahip olduğu bilinmektedir [225]. Atıkların anaerobik arıtılması neticesinde N_2O emisyonunun %10 azaltımı sağlanabilmektedir. Ayrıca 1 m^3 biyogaz 0,5 kg petrol eş değeri olup, petrol yerine biyogaz tercih edildiğinde CO_2 emisyonu 2.6 kg azaltılmış olmaktadır [226]. Barton vd. [227] organik yükü yüksek atıkların farklı arıtma yöntemleriyle arıtılması varsayımında oluşacak sera gazı emisyonlarını değerlendirmişlerdir. Buna göre atıklar araziye serildiğinde 0.74 ton (CO_2 eş/ton atık), deponi sahasında 1.2 ton (CO_2 eş/ton atık), deponi sahasında oluşan gazların yakılması durumunda 0.19 ton (CO_2 eş/ton atık), deponi sahasında oluşan gazların hem yakılması hem de jenaratörde elektirik üretiminde kullanılması durumunda 0.09 ton (CO_2 eş/ton atık) oluştuğunu, atıkların kompostlaştırılmasında nötre yakın ve anaerobik çürümeye tabi tutulması durumunda ise sera gazı emisyonuna olan katkının 0.21 ton (CO_2 eş/ton atık) azaldığını bildirmişlerdir. Ülkemizde BBHG genellikle araziye serilmektedir. Bu atıkların anaerobik sistemlerde arıtılmasıyla sera gazı emisyonunu ton atık başına CO_2 eşdeğeri olarak (0.74 ton+0.21 ton) 0.85 ton azaltılmış olunacaktır. 100 büyükbaş hayvan bir günde yaklaşık (10 kg/gün büyükbaş) 1 ton yaş gübre (TKM:%16.67), 167 kg kuru gübre üretmektedir. Bir yılda yaklaşık 61 ton atık oluşacaktır. Bu verilere göre 100 büyükbaş hayvanın gübresi anaerobik çürümeye tabi tutulduğunda yıllık olarak yaklaşık (61x0.85) 51.8 ton CO_2 eş değerinde sera gazı emisyonu azaltılmış olunacaktır.

Çizelge 7.7 Kapasitelerine göre biyogaz tesislerinin fayda-maliyet hesapları

Biyogaz tesisi kapasitesi (m^3)	Yıllık biyogaz üretimi (m^3)	Biyogazın LPG eş değeri (kg)	Üretilen Biyogazın yıllık getirisi (TL)	Biyogaz tesisi ilk kurulum maliyeti (TL)	Biyogaz tesisi yıllık işletme maliyeti (TL)	Biyogaz tesisi yıllık net getirisi (TL)	Biyogaz tesisi geri ödeme periyodu (yıl)	20 yıllık işletme sürecinde net kar (TL)
3	365	157	850	4433	682	168	26.4	-1069
6	730	314	1700	6187	1025	675	9.2	7321
12	1460	628	3401	10146	1722	1679	6	23430
24	2920	1256	6802	16441	6737	65	254.6	-15149
47	5840	2511	13603	28338	10126	3477	8.1	41205
94	11680	5022	27206	50024	16817	10389	4.8	157763

Kurulacak biyogaz tesislerinde üretilebilecek biyogazın eş LPG değeri üzerinden getirisi hesaplanmıştır. Yıllık getiriye göre tesislerin ömrünün 20 yıl olması kabulüyle tesislerin 20 yıllık getirisi ve geri ödeme periyodu belirlenmiştir. Çizelge 7.7'den görüleceği üzere tesis kapasitesi arttıkça geri ödeme periyodunun ve net karın arttığı görülmektedir. Bu

çalışmada bütün öngörülerin maliyeti çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle net getiride düşüşler yaşanmıştır. Özellikle sistemin metal aksandan yapılması planlandığı için farklı malzemeler kullanıldığında dikkate alındığı gibi işletme maliyeti olmayacaktır. Aynı şekilde üretilen organik gübrenin getirisi de maliyete katılmamıştır. Ayrıca kurulacak biyogaz tesisinin çevreyi koruması nedeniyle sosyal zarara yol açmama gibi bir getirisinin olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Bu durum, bu tip projelerde devlet katkısının olması gerektiğinin önemli bir göstergesidir. Devletin bu gibi yatırımlara destek vermesiyle beraber diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de biyogaz tesislerinin sayısının hızla artacağı düşünülmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında 100 büyükbaş hayvandan yılda oluşan 365 ton gübre 20 günlük HBS ile 100 m^3 kapasiteli bir tesiste bertaraf edilerek yılda yaklaşık 12.000 m^3 biyogaz üretimi ve net 7.888 TL getirinin olacağı öngörülmüştür. Ayrıca yine 100 büyükbaş hayvanın gübresinin bu yöntem ile bertarafında CO_2 eş değeri olarak 51.8 ton sera gazı emisyonu azaltılacağı öngörülmektedir. Yukarıda ifade edilen faydalar da ilave edildiğinde anaerobik sistemlerin BBHG'nin bertarafında kullanılabilecek dikkate değer bir yöntem olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

Anaerobik teknolojiler; atık oluşumuyla beraber çevresel kaygıları, atık yönetimi ve yenilenebilir enerjinin kullanılabilirliğini sağlamakla en hızlı bir şekilde çözüme kavuşturabilen bir yöntemdir. Ülkemizde üretimin artmasıyla beraber atık oluşumu da artmaktadır. Bu atıkların bertarafı ve ekonomiye kazandırılması sürdürülebilirliğin devamı için oldukça önemlidir. Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkede organik yükü yüksek atıkların bertarafında anaerobik teknolojiler sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı şekilde bu ülkelerde BBHG atıkları anaerobik teknolojiler kullanılarak bertaraf edilmekte, neticesinde biyogaz ve organik gübre elde edilmektedir. Yapılan araştırmalara göre ülkemizde de BBHG atıklarının bertarafı konusunda en uygun yöntemlerden birisinin anaerobik teknolojiler olduğu görülmektedir. Ancak ülkemizde bu tip atıkların anaerobik sistemlerde (biyogaz tesislerinde) bertarafı konusunda bir takım endişeler bulunmaktadır. Ülkemiz şartlarının bu teknolojiler için diğer ülkelere göre daha iyi olmasına karşın ülkemizdeki biyogaz tesisi sayısının, uygulanabilirlik konusunda duyulan endişelerden ötürü çok az olduğu görülmektedir. Bu endişelerin giderilmesine katkı sağlamak maksadıyla yürütülen bu tez çalışmasında, BBHG ile işletilmek istenen sistemlerin biyometanizasyon süreçlerinin iyileştirilmesi için farklı işletme şartları ve atık ilavesi durumları açıklanarak elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Anaerobik proseslerde en önemli süreç sistemin devreye alınması aşamasıdır. Buna göre aktivitesi yüksek, yeterli ve uygun bir aşı seçilmelidir. Reaktörün beslenmesi, işletme ve çevresel faktörler çok iyi kontrol edilmelidir.

İki farklı parçalama işleminden geçen BBHG ve organik yükü yüksek olan farklı atık karışımlarının HBS 20 gün ve HBS 10 gün şartları altında biyogaz üretim performansları incelenmiş, BBHG'nin anaerobik prosesler için oldukça uygun bir ana atık olduğu tespit edilmiştir. 41 günlük hazırlık ve aşı uyum sürecinden sonra 42. ve 222. günler arasındaki 180 günlük çalışma süresince bütün reaktörlere aynı işletme şartları uygulanmış olup sadece BBHG atığının beslendiği R1 reaktörünün özellikle atıkların 1 mm gözenek çaplı elekten geçecek şekilde parçalanmasından kaynaklı asit birikimine karşı oldukça dirençli olduğu tespit edilmiştir. R1 reaktöründe HBS 20 gün periyotlarında ortalama %79±4, HBS 10 gün periyotlarında ise ortalama %76±7 oranında TKOİ giderimi gerçekleşmiştir. Bir nevi kontrol reaktörü olan R1 reaktöründe HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında ortalama biyogaz üretimi sırasıyla 0.63±0.19 ve 0.92±0.24 L/gün olarak tespit edilmiştir. İkincil parçalama döneminde BBHG içerisinde bulunan sindirilemeyen yem tanelerinin parçalanarak atık bileşimine dâhil edilmesi, beklendiği gibi biyogaz üretimini arttırmamış aksine asit birikimine neden olarak biyogaz üretiminin performansını düşürmüştür. Bu nedenle BBHG ve diğer atıkların 1 mm gözenek çaplı elekten geçecek şekilde parçalanmasının anaerobik sistemler için ideal olmadığı tespit edilmiştir. Substratın gereğinden fazla parçalanması metanojen bakterilerinden daha hızlı gelişebilen asitojen bakterilerinin hızını daha da arttırarak sistemin metanojen safhasını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

Laboratuvar ölçekli çalışmada BBHG içerisindeki elekten geçemeyen kısım büyük çaplı tesislerde besleme ve aktarımda problem oluşturmayacağı, atık partikül yapısını zenginleştirmesi ve mikroorganizmalar için tutunacak yüzey oluşturacağından dolayı gerçek ölçekli bir tesiste problem olmaktan ziyade faydalı katkılarının olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle besleme esnasında pompalarda sıkıntı oluşturmayacak şekilde atıkların tanecikli yapıda olması sistemin daha kararlı işletilebilmesi için önem arz etmektedir.

R2 reaktöründe arıtma verimi HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında sırasıyla ortalama %78±4 ve %74±8 olarak bulunmuş olup biyogaz üremi ise sırasıyla ortalama 0.68±0.23 ve 0.95±0.30 L/gün olarak tespit edilmiştir. BBHG'ne %40 çim atıkları ilavesine kadar ilave atığın biyogaz üretimine pozitif katkılarının olduğu tespit edilmiştir. HBS 20 gün periyotlarında %5, %10, %20 ve %40 çim atığı ilavesinin biyogaz üretimini (R1 reaktörü

üretimine göre) sırasıyla %23, %7, %27, %16 oranlarında arttırdığı görülmüştür. Diğer reaktörler içerisinde de biyogaz artışına en fazla katkının HBS 20 gün periyodunda %20 çim ilavesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu periyotta R1 rektörünün ortalama biyogaz üretimi 0.694 L/gün iken, R2 reaktöründe 0.8795 L/gün olarak tespit edilmiştir. %50 çim atığı ilavesinin ise biyogaz üretimini %25 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. HBS 10 gün periyotlarında biyogaz üretiminin %5, %10, %20 ve %40 atık ilavesine kadar sırasıyla %23, %19, %22 ve %13 oranlarında arttığı, %50 atık ilavesinde ise %34 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Çalışmada kullanılan bütün atıkların (%33.3 çim atıkları, %16.7 evsel organik atık, %16.7 endüstriyel organik atık, %33.3 arıtma çamuru) BBHG'ne ilave edildiği R3 reaktöründe çalışma boyunca 20 ve 10 günlük HBS için ortalama TKOİ giderimi sırasıyla %80±4 ve %79±6, ortalama biyogaz üretimi ise sırasıyla 0.64±0.17 ve 0.97±0.27 L/gün olarak tespit edilmiştir. Bu reaktörde 20 günlük HBS periyotlarında %5, %10 ve %20 oranında atık ilavesi yapıldığında biyogaz üretiminde sırasıyla %25, %1 ve %13 oranlarında artışın olduğu bulunmuştur. %40 ve %50 oranlarında atık ilavesi yapıldığı durumlarda ise biyogaz üretiminin sırasıyla %6 ve %9 oranlarında düştüğü tespit edilmiştir. HBS'nin 10 gün olduğu durumlarda ise %40 atık ilavesine kadar biyogaz üretiminin sırasıyla %3, %10, %13 ve %23 oranında arttığı, %50 atık ilavesinde ise %17 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bütün atıkların ilavesi durumunda, daha önceden iyi parçalanmış evsel organik atık beslemesine alışkın olan R3 reaktöründe, BBHG'nin biyometan üretimine en çok katkının (iki kademeli parçalama döneminde) %40 atık ilavesi durumunda %23 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Bu periyotta R1 reaktöründe ortalama biyogaz üretimi 0.85 L/gün iken R3 reaktöründe 1.04 L/gün olarak tespit edilmiştir.

R4 reaktöründe HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında ortalama TKOİ gideriminin sırasıyla %81±6 ve %79±8 olduğu ortalama biyogaz üretiminin ise 0.75±0.21 ve 1.10±0.29 L/gün olduğu bulunmuştur. HBS 20 gün ve 10 gün periyodunda %50 atık ilavesine kadar ilave atıkların biyogaz üretimine ortalama katkıları %35, %16, %17, %17, %19 ve %21, %17, %23, %40, %0 olarak tespit edilmiştir. Evsel ve endüstriyel atık ilavesi durumunda ikincil parçalamadan kaynaklı asit artışına karşı dirençli olduğu için bu dönemde %40 atık ilavesinin yapıldığı HBS 10 gün periyodunda BBHG'nin biyogaz üretimine %40 katkının

olduğu tespit edilmiştir. Bu periyotta R1 reaktöründe ortalama biyogaz üretimi 0.85 L/gün iken R4 reaktöründe 1.19 L/gün olarak tespit edilmiştir.

Arıtma çamuru ilavesinin kullanıldığı R5 reaktöründe HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında ortalama TKOİ gideriminin her iki periyotta da %80±5 olduğu ortalama biyogaz üretiminin ise sırasıyla 0.67±0.23 ve 0.95±0.28 L/gün olduğu tespit edilmiştir. HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında %5, %10, %20 ve %40 atık ilavesinde sırasıyla %23, %6, %26, %15 ve %13, %15, %10, %27 oranlarında BBHG'nin biyogaz üretimine olumlu katkıların olduğu tespit edilmiştir. Ancak %50 arıtma çamuru ilavesinde HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında R1 reaktörüne göre biyogaz üretiminin sırasıyla %19 ve %31 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.

Bütün reaktörler incelendiğinde aslında ikincil parçalamadan sonra R1 reaktörünün biyogaz üretim performansının düşüşünün diğer reaktörlerde de aynı sonuca sebebiyet verdiğinden ikincil parçalama dönemindeki katkılar ehemmiyetini yitirmiştir. Ancak burada da ilave atıkların bozulan reaktör stabilitesini iyileştirme oranları saptanmıştır. Bu nedenle çalışmada ilave atıkların BBHG'ne en çok katkısının olduğu periyodun HBS 20 gün periyodu, %20 atık ilavesi durumu ve tek kademeli parçalama dönemi olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler incelendiğinde; R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerine yapılan %20 atık ilavesi neticesindeki biyogaz üretiminin R1 reaktörü biyogaz üretimine göre sırasıyla %27, %13, %17 ve %26 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışma verilerine göre 20 günlük HBS, %20 atık ilavesi ve tek kademe basit bir parçalama ya da parçalama yapmaksızın atıkların anaerobik sürece tabi tutulmasıyla BBHG'nden biyogaz üretiminin en iyi seviyelerde olduğu görülmektedir. Özellikle %5 atık ilavesinde R1 reaktörüne göre diğer reaktörlerin biyogaz üretiminde fark edilir bir fazlalığın olduğu görülmektedir. Ancak bu periyodun başlangıç periyodu olması nedeniyle gaz üretimleri düşük seviyelerde olduğu için ilave substratın biyogaz üretimine katkısı daha belirgin olmuştur. Sadece BBHG ile beslenen R1 reaktörünün günlük biyogaz üretim miktarının çok düşük olduğu %5 atık ilaveleri döneminde ilave atıkların biyogaz üretimine katkıları ehemmiyetini yitirmiştir.

Kümülatif biyogaz üretimi incelendiğinde, R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde tek kademeli parçalama döneminin sonunda (142.gün) toplam biyogaz üretiminin sırasıyla 85, 98, 92, 100 ve 96 L iken iki kademeli parçalama döneminin sonunda (222. gün)

toplam biyogaz üretiminin sırasıyla 154, 161, 159, 181 ve 161 L olduğu tespit edilmiştir. Burada iki kademeli parçalama döneminde R1 reaktörü asitlenmeden kaynaklı olumsuzluklara karşı dirençli olmasına rağmen toplamda diğer reaktörlerin biyogaz üretimi miktarına yetişememiştir. Bu verilere göre biyogaz üretiminde reaktörlerin sırasıyla tek kademeli dönemde R4>R2>R5>R3>R1 iken, iki kademeli parçalama döneminde sadece R4 reaktöründe bir katkının olduğu görülmüştür. İki kademeli parçalama döneminde reaktörlerin biyogaz üretimine negatif etkilerinin ise R2>R5>R3>R4>R1 şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde oluşan biyogaz üretimlerinin yanı sıra %80'leri aşan TKOİ giderimlerinin de elde edilmiş olması, bu tesislerin sadece biyogaz üretim alternatifi olarak görülmemesi aynı zamanda bir atık bertaraf prosesi olarak da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. Bütün reaktörlerde çalışma boyunca ortalama TP ve TKN gideriminin sırasıyla %54 ve %28 olduğu tespit edilmiştir. TKN ve TP gideriminin düşük olması nedeniyle yüksek azot ve fosfor içeriğine sahip olan reaktör çıkış suyunun ve reaktör içi çamurunun tarımsal sıvı gübre olarak değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir. 03.10.2015 tarih ve 29498 yayım sayılı "Mekanik Ayırma, Biyokurutma ve Biyometanizasyon Tesisleri ile Fermente Ürün Yönetimi Tebliği" isimli Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu tebliğinin geliştirilip genişletilerek yönetmeliğe dönüştürülmesi faydalı olacaktır.

Reaktörlerde giderilen TKOİ değerine göre üretilen biyogaz miktarı arasındaki en iyi korelasyonun %20 atık ilavesinin yapıldığı periyotta olduğu görülmektedir. Bu periyotta R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde determinasyon katsayıları (R2) sırasıyla 0.75, 0.94, 0.76, 0.90 ve 0.59 olarak tespit edilmiştir.

Yapılan SEM analizlerinde giriş besleme sıvısı tanecikli yapıda olmasına rağmen reaktörlerin içerisindeki çamurların çok küçük partikül yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. 20000 kat büyütme neticesinde reaktör içerisinde silindirik ve küresel yapıda bakterilerin varlığı tespit edilmiştir. Floküler çamur EDX analizlerinde C, N, O, K, Si, Ca, Zr elementlerinin ağırlıkça ortalama değerleri sırasıyla %50, %11, %6, %1, %9, %10 civarında iken fosfor elementinin R4 ve R5 reaktörlerinde ağırlıkça %3 civarlarında diğer reaktörlerde ise ölçülebilir seviyenin altında olduğu tespit edilmiştir. Reaktörler içerisinde çalışmanın ilerleyen safhalarında anaerobik granülün oluştuğu tespit

edilmiştir. SEM görüntülerinde granül yüzeyinin oldukça fazla girinti çıkıntılardan oluştuğu tespit edilmiştir. 5000 ya da 10000 kat büyütülmüş fotoğraflarda anaerobik granülün üzerinde üzüm salkımı benzeri mikroorganizmalar tespit edilmiştir. Granül çamurların EDX analizlerinde ağırlıkça karbonun %12-34, kalsiyumun %24-40, fosforun %3-18 ve oksijenin %3-7 arasında olduğu bulunmuştur. Azot elementinin R3 ve R4 reaktöründen alınan granüllerde ölçülebilir değerlerin altında, diğerlerinde ise ağırlıkça %4-7 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yapılan modelleme çalışmalarında eğitim, validasyon ve test setlerinde determinasyon katsayısının (R^2) sırasıyla 0.89, 0.79 ve 0.75 olduğu bulunmuştur. Test verileri için İstatiksel olarak analiz edilen modelin istatiksel performans indikatörlerine göre (R=0.87, IA=0.93, FA2=1.03) oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Bu verilere göre anaerobik sistemlerin temsil edici derecede modellenebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle gerçek ölçekli anaerobik sistemlerde modelleme çalışmaları yapılarak sistemin kullanılması önerilmektedir. Modelleme sonrasında yapılan simülasyon çalışmasında BBHG'ne %20-30 arasında atık katılması durumunda biyogaz üretiminin en iyi olacağı bulunmuştur. %30'dan daha fazla atık ilavesi yapılması durumunda biyogaz üretimindeki artışın düşeceği tespit edilmiştir. Bununla birlikte iki kademeli parçalama döneminde %30'dan fazla atık ilavesi yapılması durumunda, atık ilavesinin biyogaz üretimini negatif olarak etkileyeceği tespit edilmiştir.

Biyogaz tesisinin yerli sanayide kurulmasına yönelik maliyet analizi çalışması neticesinde 20 yıl boyunca 3, 6, 12, 24, 47, 94, m^3/gün biyogaz üretimi yapabilecek sistemlerin geri ödeme periyotlarının sırasıyla 26, 9, 6, 255, 8 ve 5 yıl civarında olduğu tespit edilmiştir. Biyogaz tesislerinin günlük aynı sırayla 29, 59, 118, 235, 471, 941 kg yaş gübre bertarafı neticesinde 20 yıl sonunda toplamda net getirisinin günümüz değer karşılığı olarak sırasıyla -1, 7, 23, -15, 41, 158 bin TL civarında olacağı tespit edilmiştir. Genel olarak 100 büyükbaş hayvanın bir yıllık (365 ton) yaş gübresi biyogaz tesisinde bertaraf edildiğinde, yaklaşık 12.000 m^3 biyogaz üretimiyle yıllık net 7.888 TL gelir elde edilebileceği ve CO_2 eş değeri olarak 51.8 ton sera gazı emisyonunun azaltılacağı öngörülmüştür. Ülkemizde biyogaz tesislerinin sayısının artmasının, biyogaz tesislerinin kendi yerli sanayimizde üretilerek erişilebilir maliyetlerle halka arz edilmesine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle anaerobik arıtma ve biyogaz üretimi konusunda üniversite-sanayi işbirliği

projelerine teşvik ve desteklerin arttırılması önerilmektedir. Ayrıca bu tesislerin çevresel olumsuzlukları bertaraf ederek sağlamış olduğu fark edilmeyen toplumsal faydanın karşılığı olarak küçük tesislerin kurulumunda kurulum maliyetinin %80'inin, büyük ölçekli tesislerde ise kurulum maliyetinin yarısının devlet desteği ile karşılanması önerilmektedir.

Bu çalışma kapsamında 0.5 ve 1.0 g KOİ/L.gün OYO ile YAHÇYR'lerde organik yükü yüksek olan çim atıklarının, evsel-endüstriyel organik atıkların ve arıtma çamurunun farklı işletme şartlarında BBHG'nin biyometanizasyon süreçlerine olan katkısı incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda daha yüksek organik yükleme oranlarının (2-6 g KOİ/L.gün) ve farklı anaerobik sistemlerin (reaktör tiplerinin) biyogaz üretimi ve atık arıtımı performansına olan etkileri araştırılabilir. Deneysel çalışmalarda atık beslemesi yarı sürekli olarak yapılmıştır. Beslemenin kesikli ya da sürekli yapılmasının biyogaz üretimi ve atık arıtımında nasıl bir etki ortaya koyacağı da araştırılmalıdır.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde R1, R2, R3, R4 ve R5 reaktörlerinde HBS 20 gün ve 10 gün periyotlarında sırasıyla ortalama %79±4, %78±4, %80±4, %81±6, %80±5 ve %76±7, %74±8, %79±6, %79±8, %80±5 oranlarında TKOİ giderimi ile beraber ortalama 0.63±0.19, 0.68±0.23, 0.64±0.17, 0.75±0.21, 0.67±0.23 ve 0.92±0.24, 0.95±0.30, 0.97±0.27, 1.10±0.29, 0.95±0.28 L/gün biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. R2 reaktöründe, günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne TKOİ olarak %20 oranında çim atıkları ilavesi durumunda (HBS: 20 gün) %27 oranında olduğu tespit edilmiştir. R3 reaktöründe, günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne TKOİ olarak %20 oranında bütün atıkların (çim atıkları, evsel-endüstriyel organik atık ve arıtma çamuru) karışımının ilavesi durumunda (HBS: 20 gün) %13 oranında olduğu tespit edilmiştir. R4 reaktöründe, günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne TKOİ olarak %20 oranında evsel ve endüstriyel organik atıkları karışımının ilavesi durumunda (HBS: 10 gün) %23 oranında olduğu belirlenmiştir. R5 reaktöründe ise günlük biyogaz üretimine en fazla olumlu katkının BBHG'ne TKOİ olarak %20 oranında arıtma çamuru ilavesi durumunda (HBS: 20 gün) %26 oranında olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte modelleme çalışmasına göre BBHG'ne %30 seviyelerine kadar deneysel çalışmada kullanılan ilave atıkları karıştırmanın biyogaz üretimine olumlu katkılarının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan ham atıkların BBHG'ndeki organik

materyallerin çap seviyelerine (<5 mm) kadar indirilerek (<1 mm elek altı atıkların) beslenmesinin daha uygun olduğu fakat bunun yanında 1 mm gözenek çaplı elekten geçecek şekilde parçalanmaları durumunda ise alkalinite ilavesi yapılmadığında biyogaz üretim performansını düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Kennes, C. ve Veiga, M.C., (2013). Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy, Wiley, West Sussex.

[2] Tietjen, C., (1975). From Biodung to Biogas—Historical Review of European Experience, Ann Arbor Science Publishers, Michigan.

[3] Barker, H.A., (1956). Biological Formation of Methane. In Bacterial Fermentations, John Wiley & Sons, New York.

[4] Gijzen, H.J., (2002). "Anaerobic Digestion for Sustainable Development: A Natural Approach", Water Science and Technology, 45 (10): 321-328.

[5] Buswell, A.M. ve Hatfield, W.D., (1938). "Anaerobic Fermentions ", State Water Survey, Bulletin No. 32.

[6] McCarty, P.L., (2001). "The Development of Anaerobic Treatment and Its Future", Water Science and Technology, 44 (8): 149-156.

[7] Babel, S., Sae-Tang, J. ve Pecharaply, A., (2009). "Anaerobic Co-Digestion of Sewage and Brewery Sludge for Biogas Production and Land Application", International Journal of Environmental Science & Technology, 6 (1): 131-140.

[8] Riggle, D., (1998). "Acceptance Improves for Large-Scale Anaerobic Digestion", BioCycle (USA), 39 (6): 51-55.

[9] Nayono, S.E., (2010). Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste for Energy Production, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.

[10] Mogues, W., (2009). "Biogas Generation from Human Excreta", A Multi-Dimensional Sanitation Approach-Experience of Lem Ethiopia Presented at the 3rd International Dry Toilet Conference 12-15 August Tampere, Finland

[11] Bilgin, N., (2003). "Biyogaz Nedir?", Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Ankara Araştırma Enstitüsü, Ankara.

[12] Koçer, N.N., Öner, C. ve Sugözü, İ., (2006). "Türkiye'de Hayvancılık Potansiyeli ve Biyogaz Üretimi", Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları.

[13] Deniz, Y., (1987). "Türkiye'de Biyogaz Potansiyeli ve Biyogazın Sağlayacağı Yararlar", Köy Hizmetleri Ankara Araştırma Enstitüsü, Ankara.

[14] The International Energy Agency (IEA).Task 37, Anaerobic Digestion Report Turkey's Situation in Biogas, http://www.iea-biogas.net/ download/publications/countryreports/april2011/Turkey Country Report.pdf., 15 Temmuz 2013.

[15] Tufaner, F., (2014). "Yenilenebilir Bir Enerji Kaynağı Olarak Organik İçeriği Yüksek Atıklardan Biyogaz Üretim Teknolojisi", Adıyaman Ünivrsitesi Bilim, Kültür ve Sanat Sempozyumu-I, 03-04 Nisan 2014, Adıyaman, Türkiye, Adıyaman Üniversitesi Yayınları, 11 156-160.

[16] Öztürk, İ., (2007). "Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, Genişletilmiş 2 Baskı", Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

[17] Neves, L., (2009). Anaerobic Co-Digestion of Organic Wastes, Phd Thesis, Universidade do Minho, Doctorate in Chemical and Biological Engineering, Braga.

[18] Carty, M. ve Perry, L., (1964). "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals, Part One: Chemistry and Microbiology", Public Works, 95 (9): 107-112.

[19] Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhny, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., Sanders, W., Siegrist, H. ve Vavilin, V., (2002). Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1), IWA Publishing, London.

[20] Eastman, J.A. ve Ferguson, J.F., (1981). "Solubilization of Particulate Organic Carbon During the Acid Phase of Anaerobic Digestion", Journal (Water Pollution Control Federation), 53: 352-366.

[21] Parkin, G.F. ve Owen, W.F., (1986). "Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges", Journal of Environmental Engineering, 112 (5): 867-920.

[22] Pavlostathis, S. ve Giraldo-Gomez, E., (1991). "Kinetics of Anaerobic Treatment", Water Science & Technology, 24 (8): 35-59.

[23] Gavala, H.N., Angelidaki, I. ve Ahring, B.K., (2003). Kinetics and Modeling of Anaerobic Digestion Process, ed. Biomethanation I, Springer, Heidelberg.

[24] Miron, Y., Zeeman, G., Van Lier, J.B. ve Lettinga, G., (2000). "The Role of Sludge Retention Time in the Hydrolysis and Acidification of Lipids, Carbohydrates and Proteins During Digestion of Primary Sludge in CSTR Systems", Water Research, 34 (5): 1705-1713.

[25] Harper, S.R. ve Pohland, F.G., (1986). "Recent Developments in Hydrogen Management During Anaerobic Biological Wastewater Treatment", Biotechnology and Bioengineering, 28 (4): 585-602.

[26] Öztürk, İ., Timur, H. ve Koşkan, U., (2005). Atıksu Arıtımının Esasları, ed. Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.

[27] Zoetemeyer, R., Arnoldy, P., Cohen, A. ve Boelhouwer, C., (1982). "Influence of Temperature on the Anaerobic Acidification of Glucose in a Mixed Culture Forming Part of a Two-Stage Digestion Process", Water Research, 16 (3): 313-321.

[28] Wang, Q., Kuninobu, M., Ogawa, H.I. ve Kato, Y., (1999). "Degradation of Volatile Fatty Acids in Highly Efficient Anaerobic Digestion", Biomass and Bioenergy, 16 (6): 407-416.

[29] Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J. ve Jones, D.L., (2008). "Optimisation of the Anaerobic Digestion of Agricultural Resources", Bioresource Technology, 99 (17): 7928-7940.

[30] Pullammanappallil, P.C., Chynoweth, D.P., Lyberatos, G. ve Svoronos, S.A., (2001). "Stable Performance of Anaerobic Digestion in the Presence of a High Concentration of Propionic Acid", Bioresource Technology, 78 (2): 165-169.

[31] Cohen, A., Breure, A., Van Andel, J. ve Van Deursen, A., (1980). "Influence of Phase Separation on the Anaerobic Digestion of Glucose—I Maximum COD-Turnover Rate During Continuous Operation", Water Research, 14 (10): 1439-1448.

[32] Zeikus, J., (1980). "Microbial populations in digesters", First International Symposium on Anaerobic Digestion, London, Applied Science Publishers, 61-89.

[33] Mosey, F., (1983). "Mathematical Modelling of the Anaerobic Digestion Process: Regulatory Mechanisms for the Formation of Short-Chain Volatile Acids from Glucose", Water Science & Technology, 15 (8-9): 209-232.

[34] Fox, P. ve Pohland, F.G., (1994). "Anaerobic Treatment Applications and Fundamentals: Substrate Specificity During Phase Separation", Water Environment Research, 66 (5): 716-724.

[35] Fang, H., Chui, H.-K. ve Li, Y.-Y., (1995). "Anaerobic Degradation of Butyrate in a UASB Reactor", Bioresource Technology, 51 (1): 75-81.

[36] Huang, J.S., Jih, C.G., Lin, S.D. ve Ting, W.H., (2003). "Process Kinetics of UASB Reactors Treating Non-Inhibitory Substrate", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 78 (7): 762-772.

[37] Rozzi, A., (1991). "Alkalinity Considerations with Respect to Anaerobic Digesters", Proceedings 5th Forum Applied Biotechnology. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent, 1499-1514.

[38] Anderson, G. ve Yang, G., (1992). "pH Control in Anaerobic Treatment of Industrial Wastewater", Journal of Environmental Engineering, 118 (4): 551-567.

[39] Gossett, J.M. ve Belser, R.L., (1982). "Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge", Journal of the Environmental Engineering Division, 108 (EE6): 1101-1120.

[40] Guyot, J.P., Gutierrez, G. ve Rojas, M.G., (1993). "Anaerobic Microbial Counts of Different Potential Anaerobic Inocula", Applied Microbiology and Biotechnology, 40 (1): 139-142.

[41] Guwy, A., Hawkes, F., Wilcox, S. ve Hawkes, D., (1997). "Neural Network and On-Off Control of Bicarbonate Alkalinity in a Fluidised-Bed Anaerobic Digester", Water Research, 31 (8): 2019-2025.

[42] Ahring, B.K., Sandberg, M. ve Angelidaki, I., (1995). "Volatile Fatty Acids as Indicators of Process Imbalance in Anaerobic Digestors", Applied Microbiology and Biotechnology, 43 (3): 559-565.

[43] Mosey, F. ve Fernandes, X., (1989). "Patterns of Hydrogen in Biogas from the Anaerobic Digestion of Milk-Sugars", Water Science & Technology, 21 (4-5): 187-196.

[44] Kim, H.W., Han, S.K. ve Shin, H.S., (2003). "The Optimisation of Food Waste Addition as a Co-Substrate in Anaerobic Digestion of Sewage Sludge", Waste Management & Research, 21 (6): 515-526.

[45] Yu, H. ve Fang, H., (2002). "Acidogenesis of Dairy Wastewater at Various pH Levels", Water Science & Technology, 45 (10): 201-206.

[46] Montusiewicz, A., Lebiocka, M. ve Pawłowska, M., (2008). "Characterization of the Biomethanization Process in Selected Waste Mixtures", Archives of Environmental protection, 34: 49-61.

[47] Chae, K., Jang, A., Yim, S. ve Kim, I.S., (2008). "The Effects of Digestion Temperature and Temperature Shock on the Biogas Yields from the Mesophilic Anaerobic Digestion of Swine Manure", Bioresource Technology, 99 (1): 1-6.

[48] Nguyen, P., Kuruparan, P. ve Visvanathan, C., (2007). "Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste as a Treatment Prior to Landfill", Bioresource Technology, 98 (2): 380-387.

[49] Biey, E., Musibono, E. ve Verstraete, W., (2003). "Start-up of a Multi-Stage System for Biogas Production and Solid Waste Treatment in Low-Tech Countries", Water Science & Technology, 48 (4): 239-243.

[50] Fernández, J., Perez, M. ve Romero, L., (2008). "Effect of Substrate Concentration on Dry Mesophilic Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)", Bioresource Technology, 99 (14): 6075-6080.

[51] Angelidaki, I. ve Ahring, B., (1994). "Anaerobic Thermophilic Digestion of Manure at Different Ammonia Loads: Effect of Temperature", Water Research, 28 (3): 727-731.

[52] Hansen, K.H., Angelidaki, I. ve Ahring, B.K., (1998). "Anaerobic Digestion of Swine Manure: Inhibition by Ammonia", Water Research, 32 (1): 5-12.

[53] Fields, P.A., (2001). "Review: Protein Function at Thermal Extremes: Balancing Stability and Flexibility", Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 129 (2): 417-431.

[54] Sakar, S., Yetilmezsoy, K. ve Kocak, E., (2009). "Anaerobic Digestion Technology in Poultry and Livestock Waste Treatment - A Literature Review", Waste Management & Research, 27 (1): 3-18.

[55] Chen, Y., Cheng, J.J. ve Creamer, K.S., (2008). "Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A Review", Bioresource Technology, 99 (10): 4044-4064.

[56] Kayhanian, M., (1994). "Performance of a High-Solids Anaerobic Digestion Process under Various Ammonia Concentrations", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 59 (4): 349-352.

[57] Chastain, J.P., Camberato, J.J. ve Skewes, P., (2001). Poultry Manure Production and Nutrient Content, https://www.clemson.edu/extension/livestock/camm/camm_files/poultry/pch3b_00.pdf, 31 Temmuz 2015.

[58] Liu, T. ve Sung, S., (2002). "Ammonia Inhibition on Thermophilic Aceticlastic Methanogens", Water Science & Technology, 45 (10): 113-120.

[59] Jin, P., Bhattacharya, S.K., Williams, C.J. ve Zhang, H., (1998). "Effects of Sulfide Addition on Copper Inhibition in Methanogenic Systems", Water Research, 32 (4): 977-988.

[60] Sterritt, R.M. ve Lester, J.N., (1980). "Interactions of Heavy Metals with Bacteria", Science of the Total environment, 14 (1): 5-17.

[61] Swanwick, J.D., Shurben, D.G. ve Jackson, S., (1969). "A Survey of The Performance of Sewage Sludge Digesters in Great Britain", Water Pollution Control, 68: 639-661.

[62] Çiler, M.F., (1985). Kuvvetli Atıksuların Yukarı Akışlı Havasız Çamur Yatağında Arıtım ve Tasarım Esasları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[63] Mata-Alvarez, J., Mace, S. ve Llabres, P., (2000). "Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of Research Achievements and Perspectives", Bioresource Technology, 74 (1): 3-16.

[64] Lissens, G., Vandevivere, P., De Baere, L., Biey, E. ve Verstraete, W., (2001). "Solid Waste Digestors: Process Performance and Practice for Municipal Solid Waste Digestion", Water Science & Technology, 44 (8): 91-102.

[65] Demirer, G.N. ve Chen, S., (2005). "Two-Phase Anaerobic Digestion of Unscreened Dairy Manure", Process Biochemistry, 40 (11): 3542-3549.

[66] Gungor-Demirci, G. ve Demirer, G.N., (2004). "Effect of Initial COD Concentration, Nutrient Addition, Temperature and Microbial Acclimation on Anaerobic Treatability of Broiler and Cattle Manure", Bioresource Technology, 93 (2): 109-117.

[67] Alvarez, R. ve Liden, G., (2008). "Anaerobic Co-Digestion of Aquatic Flora and Quinoa with Manures from Bolivian Altiplano", Waste Management, 28 (10): 1933-1940.

[68] El-Mashad, H.M. ve Zhang, R.H., (2010). "Biogas Production from Co-Digestion of Dairy Manure and Food Waste", Bioresource Technology, 101 (11): 4021-4028.

[69] Li, X., Li, L., Zheng, M., Fu, G. ve Lar, J.S., (2009). "Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure with Corn Stover Pretreated by Sodium Hydroxide for Efficient Biogas Production", Energy & Fuels, 23 (9): 4635-4639.

[70] Zhang, C.S., Xiao, G., Peng, L.Y., Su, H.J. ve Tan, T.W., (2013). "The Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Cattle Manure", Bioresource Technology, 129: 170-176.

[71] Bah, H., Zhang, W.Q., Wu, S.B., Qi, D.D., Kizito, S. ve Dong, R.J., (2014). "Evaluation of Batch Anaerobic Co-Digestion of Palm Pressed Fiber and Cattle Manure Under Mesophilic Conditions", Waste Management, 34 (11): 1984-1991.

[72] Buendia, I.M., Fernandez, F.J., Villasenor, J. ve Rodriguez, L., (2009). "Feasibility of Anaerobic Co-Digestion as a Treatment Option of Meat Industry Wastes", Bioresource Technology, 100 (6): 1903-1909.

[73] García, K. ve Pérez, M., (2013). "Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure and Sewage Sludge: Influence of Composition and Temperature", International Journal of Environmental Protection, 3 (6): 8-15.

[74] Hassan, R., (2014). "Anaerobic Digestion of Sewage Sludge and Cattle Manure for Biogas Production: Influence of Co-Digestion.", International Water Technology Journal, 4: 107-113.

[75] Wall, D.M., Allen, E., Straccialini, B., O'Kiely, P. ve Murphy, J.D., (2014). "Optimisation of Digester Performance with Increasing Organic Loading Rate for Mono- and Co-Digestion of Grass Silage and Dairy Slurry", Bioresource Technology, 173: 422-428.

[76] Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. ve Rintala, J., (2009). "Biogas Production from Boreal Herbaceous Grasses–Specific Methane Yield and Methane Yield Per Hectare", Bioresource Technology, 100 (12): 2952-2958.

[77] Xie, S., Wu, G., Lawlor, P., Frost, J. ve Zhan, X., (2012). "Methane Production from Anaerobic Co-Digestion of the Separated Solid Fraction of Pig Manure with Dried Grass Silage", Bioresource Technology, 104: 289-297.

[78] Dias, T., Fragoso, R. ve Duarte, E., (2014). "Anaerobic Co-Digestion of Dairy Cattle Manure and Pear Waste", Bioresource Technology, 164: 420-423.

[79] Wang, L., Shen, F., Yuan, H., Zou, D., Liu, Y., Zhu, B. ve Li, X., (2014). "Anaerobic Co-Digestion of Kitchen Waste and Fruit/Vegetable Waste: Lab-Scale and Pilot-Scale Studies", Waste Management, 34 (12): 2627-2633.

[80] Zhang, R., El-Mashad, H.M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C. ve Gamble, P., (2007). "Characterization of Food Waste as Feedstock for Anaerobic Digestion", Bioresource Technology, 98 (4): 929-935.

[81] Zhang, L., Lee, Y.-W. ve Jahng, D., (2011). "Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Piggery Wastewater: Focusing on the Role of Trace Elements", Bioresource Technology, 102 (8): 5048-5059.

[82] Banks, C.J., Zhang, Y., Jiang, Y. ve Heaven, S., (2012). "Trace Element Requirements for Stable Food Waste Digestion at Elevated Ammonia Concentrations", Bioresource Technology, 104: 127-135.

[83] De Vrieze, J., De Lathouwer, L., Verstraete, W. ve Boon, N., (2013). "High-Rate Iron-Rich Activated Sludge as Stabilizing Agent for the Anaerobic Digestion of Kitchen Waste", Water Research, 47 (11): 3732-3741.

[84] Zhang, W.L., Zhang, L. ve Li, A.M., (2015). "Anaerobic Co-Digestion of Food Waste with MSW Incineration Plant Fresh Leachate: Process Performance and Synergistic Effects", Chemical Engineering Journal, 259: 795-805.

[85] Møller, H.B., Sommer, S.G. ve Ahring, B.K., (2004). "Methane Productivity of Manure, Straw and Solid Fractions of Manure", Biomass and Bioenergy, 26 (5): 485-495.

[86] Braun, R., Brachtl, E. ve Grasmug, M., (2003). "Codigestion of Proteinaceous Industrial Waste", Applied Biochemistry and Biotechnology, 109 (1-3): 139-153.

[87] Weiland, P., (2000). "Anaerobic Waste Digestion in Germany–Status and Recent Developments", Biodegradation, 11 (6): 415-421.

[88] Møller, H.B., Sommer, S.G. ve Ahring, B.K., (2004). "Biological Degradation and Greenhouse Gas Emissions During Pre-Storage of Liquid Animal Manure", Journal of Environmental Quality, 33 (1): 27-36.

[89] Angelidaki, I. ve Ahring, B.K., (2000). "Methods for Increasing the Biogas Potential from the Recalcitrant Organic Matter Contained in Manure", Water Science & Technology, (41): 189-194.

[90] Adebayo, A., Jekayinfa, S. ve Linke, B., (2014). "Anaerobic Co-Digestion of Cattle Slurry with Maize Stalk at Mesophilic Temperature", American Journal of Engineering Research, 3: 80-88.

[91] Arici, Ş. ve Koçar, G., (2015). "The Effect of Adding Maize Silage as a Co-Substrate for Anaerobic Animal Manure Digestion", International Journal of Green Energy, 12 (5): 453-460.

[92] Seppälä, M., Pyykkonen, V., Vaisanen, A. ve Rintala, J., (2013). "Biomethane Production from Maize and Liquid Cow Manure - Effect of Share of Maize, Post-Methanation Potential and Digestate Characteristics", Fuel, 107: 209-216.

[93] Yangin-Gomec, C. ve Ozturk, I., (2013). "Effect of Maize Silage Addition on Biomethane Recovery from Mesophilic Co-Digestion of Chicken and Cattle Manure to Suppress Ammonia Inhibition", Energy Conversion and Management, 71: 92-100.

[94] Dar, G.H. ve Tandon, S.M., (1987). "Biogas Production from Pretreated Wheat Straw, Lantana Residue, Apple and Peach Leaf Litter with Cattle Dung", Biological Wastes, 21 (2): 75-83.

[95] Risberg, K., Sun, L., Leven, L., Horn, S.J. ve Schnurer, A., (2013). "Biogas Production from Wheat Straw and Manure - Impact of Pretreatment and Process Operating Parameters", Bioresource Technology, 149: 232-237.

[96] Umetsu, K., Yamazaki, S., Kishimoto, T., Takahashi, J., Shibata, Y., Zhang, C., Misaki, T., Hamamoto, O., Ihara, I. ve Komiyama, M., (2006). "Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure and Sugar Beets", International Congress Series, Elsevier, 307-310.

[97] Jagadabhi, P., Lehtomäki, A. ve Rintala, J., (2008). "Co-Digestion of Grass Silage and Cow Manure in a CSTR by Re-Circulation of Alkali Treated Solids of the Digestate", Environmental Technology, 29 (10): 1085-1093.

[98] De Bere, L., (2000). "Anaerobic Digestion of Solid Waste: State-of-the-Art", Water Science and Technology, 41 (3): 283-290.

[99] Climenhaga, M. ve Banks, C., (2008). "Anaerobic digestion of catering wastes: effect of micronutrients and solids retention time", Water Science & Technology, 57 (5): 687-692.

[100] Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Eylem Planı http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/EylemPlan/atikeylemplani.pdf, 25 Mart 2014.

[101] Türkiye İstatistik Kurumu, Seçilmiş Göstergelerle Adıyaman, http://www.tuik.gov.tr/ilGostergeleri/iller/ADIYAMAN.pdf, 25 Mart 2014.

[102] Henze, M., (2002). Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes, Springer Science & Business Media,

[103] Mudrack, K. ve Kunst, S., (1986). Biology of Sewage Treatment and Water Pollution Control, Ellis Horwood Ltd., Chichester, England.

[104] Ghosh, S., Buoy, K., Dressel, L., Miller, T., Wilcox, G. ve Loos, D., (1995). "Pilot- and Full-Scale Two-Phase Anaerobic Digestion of Municipal Sludge", Water Environment Research: 206-214.

[105] Li, R., Chen, S. ve Li, X., (2009). "Anaerobic Co-digestion of Kitchen Waste and Cattle Manure for Methane Production", Energy Sources Part a-Recovery Utilization and Environmental Effects, 31 (20): 1848-1856.

[106] Nelson, C. ve Lamb, J., (2002). Haubenschild Farms Anaerobic Digester, Updated! The Minnesota Project,

[107] Sung, S.W. ve Santha, H., (2003). "Performance of Temperature-Phased Anaerobic Digestion (TPAD) System Treating Dairy Cattle Wastes", Water Research, 37 (7): 1628-1636.

[108] McInerney, M.J., (1998). Anaerobic Hydrolysis and Fermentation of Fats and Proteins, A.J.B. Zehnder, ed. Biology of Anaerobic Microorganisms, Wiley, New York.

[109] Ahring, B.K., Ibrahim, A.A. ve Mladenovska, Z., (2001). "Effect of Temperature Increase from 55 to 65 Degrees C on Performance and Microbial Population Dynamics of an Anaerobic Reactor Treating Cattle Manure", Water Research, 35 (10): 2446-2452.

[110] Sawyer, C.N., McCarty, P.L. ve Parkin, G.F., (2003). Chemistry for Environmental Engineering and Science, McGraw-Hill, Boston.

[111] Rico, J.L., Garcia, H., Rico, C. ve Tejero, I., (2007). "Characterisation of Solid and Liquid Fractions of Dairy Manure with Regard to Their Component Distribution and Methane Production", Bioresource Technology, 98 (5): 971-979.

[112] Monteiro, E., Mantha, V. ve Rouboa, A., (2011). "Prospective Application of Farm Cattle Manure for Bioenergy Production in Portugal", Renewable Energy, 36 (2): 627-631.

[113] Rico, C., Diego, R., Valcarce, A. ve Rico, J.L., (2014). "Biogas Production from Various Typical Organic Wastes Generated in the Region of Cantabria (Spain): Methane Yields and Co-Digestion Tests", Smart Grid and Renewable Energy, 5 (06): 128.

[114] Brown, D. ve Li, Y., (2013). "Solid State Anaerobic Co-Digestion of Yard Waste and Food Waste for Biogas Production", Bioresource Technology, 127: 275-280.

[115] Comino, E., Rosso, M. ve Riggio, V., (2009). "Development of a Pilot Scale Anaerobic Digester for Biogas Production from Cow Manure and Whey Mix", Bioresource Technology, 100 (21): 5072-5078.

[116] Lehtomaki, A., Huttunen, S. ve Rintala, J.A., (2007). "Laboratory Investigations on Co-Digestion of Energy Crops and Crop Residues with Cow Manure for Methane Production: Effect of Crop to Manure Ratio", Resources Conservation and Recycling, 51 (3): 591-609.

[117] Nasir, I.M., Ghazi, T.I.M., Omar, R. ve Idris, A., (2012). "Palm Oil Mill Effluent as an Additive with Cattle Manure in Biogas Production", International Conference on Advances Science and Contemporary Engineering 2012, 50: 904-912.

[118] Angelidaki, I. ve Ellegaard, L., (2003). "Codigestion of Manure and Organic Wastes in Centralized Biogas Plants - Status and Future Trends", Applied Biochemistry and Biotechnology, 109 (1-3): 95-105.

[119] Chen, G., Zheng, Z., Yang, S., Fang, C., Zou, X. ve Zhang, J., (2010). "Improving Conversion of Spartina Alterniflora into Biogas by Co-Digestion with Cow Feces", Fuel Processing Technology, 91 (11): 1416-1421.

[120] Hills, D.J. ve Roberts, D.W., (1981). "Anaerobic-Digestion of Dairy Manure and Field Crop Residues", Agricultural Wastes, 3 (3): 179-189.

[121] Li, J., Jha, A.K., He, J., Ban, Q., Chang, S. ve Wang, P., (2011). "Assessment of the Effects of Dry Anaerobic Co-Digestion of Cow Dung with Waste Water Sludge on Biogas Yield and Biodegradability", International Journal of Physical Sciences, 6 (15): 3679-3688.

[122] Macias-Corral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H. ve Longworth, J., (2008). "Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste and Agricultural Waste and the Effect of Co-Digestion with Dairy Cow Manure", Bioresource Technology, 99 (17): 8288-8293.

[123] Rao, P.V. ve Baral, S.S., (2011). "Experimental Design of Mixture for the Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge", Chemical Engineering Journal, 172 (2-3): 977-986.

[124] Sosnowski, P., Wieczorek, A. ve Ledakowicz, S., (2003). "Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge and Organic Fraction of Municipal Solid Wastes", Advances in Environmental Research, 7 (3): 609-616.

[125] Esposito, G., Frunzo, L., Panico, A. ve Pirozzi, F., (2012). "Enhanced Bio-Methane Production from Co-Digestion of Different Organic Wastes", Environmental Technology, 33 (24): 2733-2740.

[126] Wellinger, A., Murphy, J.D. ve Baxter, D., (2013). The Biogas Handbook: Science, Production and Applications, Elsevier,

[127] Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. ve Forster, C.F., (1998). "An Examination of the Continuous Anaerobic Co-Digestion of Cattle Slurry and Fish Offal", Process Safety and Environmental Protection, 76 (B3): 224-228.

[128] Naik, S., Goud, V.V., Rout, P.K., Jacobson, K. ve Dalai, A.K., (2010). "Characterization of Canadian Biomass for Alternative Renewable Biofuel", Renewable Energy, 35 (8): 1624-1631.

[129] Dioha, I., Ikeme, C., Nafi'u, T., Soba, N. ve Yusuf, M., (2013). "Effect of Carbon to Nitrogen Ratio on Biogas Production", International Research Journal of Natural Sciences, 1 (3): 1-10.

[130] Abbasi, T., Tauseef, S. ve Abbasi, S.A., (2011). Biogas Energy, Springer Science & Business Media,

[131] Ghasimi, S., Idris, A., Chuah, T. ve Tey, B., (2009). "The Effect of C: N: P Ratio, Volatile Fatty Acids and Na Levels on the Performance of an Anaerobic Treatment of Fresh Leachate from Municipal Solid Waste Transfer Station", African Journal of Biotechnology, 8 (18): 4572-4581.

[132] Zhang, R. ve Zhang, Z., (1999). "Biogasification of Rice Straw with an Anaerobic-Phased Solids Digester System", Bioresource Technology, 68 (3): 235-245.

[133] Hashimoto, A.G., (1983). "Conversion of Straw–Manure Mixtures to Methane at Mesophilic and Thermophilic Temperatures", Biotechnology and Bioengineering, 25 (1): 185-200.

[134] Corro, G., Paniagua, L., Pal, U., Banuelos, F. ve Rosas, M., (2013). "Generation of Biogas from Coffee-Pulp and Cow-Dung Co-Digestion: Infrared Studies of Postcombustion Emissions", Energy Conversion and Management, 74: 471-481.

[135] Solli, L., Bergersen, O., Sorheim, R. ve Briseid, T., (2014). "Effects of a Gradually Increased Load of Fish Waste Silage in Co-Digestion with Cow Manure on Methane Production", Waste Management, 34 (8): 1553-1559.

[136] Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. ve Gruber, L., (2007). "Biogas Production from Maize and Dairy Cattle Manure—Influence of Biomass Composition on the Methane Yield", Agriculture, Ecosystems & Environment, 118 (1): 173-182.

[137] Borja, R., Sánchez, E. ve Weiland, P., (1996). "Influence of Ammonia Concentration on Thermophilic Anaerobic Digestion of Cattle Manure in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors", Process Biochemistry, 31 (5): 477-483.

[138] Hashimoto, A.G., (1986). "Ammonia Inhibition of Methanogenesis from Cattle Wastes", Agricultural Wastes, 17 (4): 241-261.

[139] Imai, T., Ukita, M., Sekine, M., Nakanishi, H. ve Fukagawa, M., (1998). "Treatment Characteristics of High Strength Fermentation Wastewater Consisting of High Sulfate and Ammonia by UAHB Process", Water Science and Technology, 38 (8): 377-384.

[140] Koster, I., Rinzema, A., De Vegt, A. ve Lettinga, G., (1986). "Sulfide Inhibition of the Methanogenic Activity of Granular Sludge at Various pH-Levels", Water Research, 20 (12): 1561-1567.

[141] Lawrence, A.W. ve McCarty, P.L., (1969). "Kinetics of Methane Fermentation in Anaerobic Treatment", Journal (Water Pollution Control Federation), 41 (2-Part 2): R1-R17.

[142] Speece, R.E., (1983). "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment", Environmental Science & Technology, 17 (9): 416-427.

[143] Demirel, B. ve Scherer, P., (2011). "Trace Element Requirements of Agricultural Biogas Digesters During Biological Conversion of Renewable Biomass to Methane", Biomass & Bioenergy, 35 (3): 992-998.

[144] Schattauer, A., Abdoun, E., Weiland, P., Plochl, M. ve Heiermann, M., (2011). "Abundance of Trace Elements in Demonstration Biogas Plants", Biosystems Engineering, 108 (1): 57-65.

[145] Ishaq, F., Roussel, J., Marquet, C.C. ve Bridgeman, J., (2005). "Trace Metal Supplementation in Sludge Digesters", AD 12 IWA World Congress, Guadalajara, Mexico,

[146] El-Mashad, H.M., Zeeman, G., van Loon, W.K.P., Bot, G.P.A. ve Lettinga, G., (2004). "Effect of Temperature and Temperature Fluctuation on Thermophilic Anaerobic Digestion of Cattle Manure", Bioresource Technology, 95 (2): 191-201.

[147] Chayovan, S., Gerrish, J.B. ve Eastman, J.A., (1988). "Biogas Production from Dairy Manure - The Effects of Temperature Perturbations", Biological Wastes, 25 (1): 1-16.

[148] Mohaibes, M. ve Heinonen-Tanski, H., (2012). "Effect of Temperature on Survival of Micro-Organisms and Performance of Anaerobic Two-Stage Reactors Treating Cattle Slurry", Environmental Technology, 33 (5): 573-578.

[149] Ghaly, A., (1989). "Biogas Production from Dairy Manure Using Continuous Mix and No-Mix Mesophilic Reactors", Energy sources, 11 (4): 221-235.

[150] Ghaly, A. ve Echiegu, E., (1992). "Performance Evaluation of a Continuous-Flow No-Mix Anaerobic Reactor Operating on Dairy Manure", Energy sources, 14 (2): 113-134.

[151] Boe, K. ve Angelidaki, I., (2009). "Serial CSTR Digester Configuration for Improving Biogas Production from Manure", Water Research, 43 (1): 166-172.

[152] Kalia, A.K. ve Singh, S.P., (2001). "Effect of Mixing Digested Slurry on The Rate of Biogas Production from Dairy Manure in Batch Fermenter", Energy sources, 23 (8): 711-715.

[153] Rico, C., Rico, J.L., Tejero, I., Munoz, N. ve Gomez, B., (2011). "Anaerobic Digestion of the Liquid Fraction of Dairy Manure in Pilot Plant for Biogas Production: Residual Methane Yield of Digestate", Waste Management, 31 (9-10): 2167-2173.

[154] Omar, R., Harun, R.M., Mohd Ghazi, T., Wan Azlina, W., Idris, A. ve Yunus, R., (2008). "Anaerobic Treatment of Cattle Manure for Biogas Production", Proceedings Philadelphia, Annual meeting of American Institute of Chemical Engineers, Philadelphia, 1-10.

[155] Abubakar, B. ve Ismail, N., (2012). "Anaerobic Digestion of Cow Dung for Biogas Production", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 7 (2): 169-172.

[156] Neo, S., Vintilă, T. ve Bura, M., (2012). "Conversion of Agricultural Wastes to Biogas using as Inoculum Cattle Manure and Activated Sludge", Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies, 45 (1): 328-334.

[157] Comino, E., Rosso, M. ve Riggio, V., (2010). "Investigation of Increasing Organic Loading Rate in the Co-Digestion of Energy Crops and Cow Manure Mix", Bioresource Technology, 101 (9): 3013-3019.

[158] Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. ve Forster, C.F., (2002). "Continuous Co-Digestion of Cattle Slurry with Fruit and Vegetable Wastes and Chicken Manure", Biomass & Bioenergy, 22 (1): 71-77.

[159] Allen, E., Wall, D.M., Herrmann, C. ve Murphy, J.D., (2014). "Investigation of the Optimal Percentage of Green Seaweed That may be Co-Digested with Dairy Slurry to Produce Gaseous Biofuel", Bioresource Technology, 170: 436-444.

[160] Agyeman, F.O. ve Tao, W.D., (2014). "Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Dairy Manure: Effects of Food Waste Particle Size and Organic Loading Rate", Journal of Environmental Management, 133: 268-274.

[161] Aragaw, T., Andargie, M. ve Gessesse, A., (2013). "Co-Digestion of Cattle Manure with Organic Kitchen Waste to Increase Biogas Production Using Rumen Fluid as Inoculums", Int J Phys Sci, 8: 443-450.

[162] Neves, L., Oliveira, R. ve Alves, M.M., (2009). "Co-Digestion of Cow Manure, Food Waste and Intermittent Input of Fat", Bioresource Technology, 100 (6): 1957-1962.

[163] Neves, L., Oliveira, R. ve Alves, M.M., (2009). "Fate of LCFA in the Co-Digestion of Cow Manure, Food Waste and Discontinuous Addition of Oil", Water Research, 43 (20): 5142-5150.

[164] Castrillon, L., Maranon, E., Fernandez-Nava, Y., Ormaechea, P. ve Quiroga, G., (2013). "Thermophilic Co-Digestion of Cattle Manure and Food Waste Supplemented with Crude Glycerin in Induced Bed Reactor (IBR)", Bioresource Technology, 136: 73-77.

[165] Comino, E., Riggio, V.A. ve Rosso, M., (2012). "Biogas Production by Anaerobic Co-Digestion of Cattle Slurry and Cheese Whey", Bioresource Technology, 114: 46-53.

[166] Bertin, L., Grilli, S., Spagni, A. ve Fava, F., (2013). "Innovative Two-Stage Anaerobic Process for Effective Codigestion of Cheese Whey and Cattle Manure", Bioresource Technology, 128: 779-783.

[167] Saidu, M., Yuzir, A., Salim, M.R., Salmiati, Azman, S. ve Abdullah, N., (2013). "Influence of Palm Oil Mill Effluent as Inoculum on Anaerobic Digestion of Cattle Manure for Biogas Production", Bioresource Technology, 141: 174-176.

[168] Goberna, M., Schoen, M.A., Sperl, D., Wett, B. ve Insam, H., (2010). "Mesophilic and Thermophilic Co-Fermentation of Cattle Excreta and Olive Mill Wastes in Pilot Anaerobic Digesters", Biomass & Bioenergy, 34 (3): 340-346.

[169] Li, J., Wei, L.Y., Duan, Q.W., Hu, G.Q. ve Zhang, G.Z., (2014). "Semi-Continuous Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure with Three Crop Residues for Biogas Production", Bioresource Technology, 156: 307-313.

[170] Marañón, E., Castrillon, L., Quiroga, G., Fernandez-Nava, Y., Gomez, L. ve Garcia, M.M., (2012). "Co-Digestion of Cattle Manure with Food Waste and Sludge to Increase Biogas Production", Waste Management, 32 (10): 1821-1825.

[171] Quiroga, G., Castrillon, L., Fernandez-Nava, Y., Maranon, E., Negral, L., Rodriguez-Iglesias, J. ve Ormaechea, P., (2014). "Effect of Ultrasound Pre-Treatment in the Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure with Food Waste and Sludge", Bioresource Technology, 154: 74-79.

[172] Capela, I., Rodrigues, A., Silva, F., Nadais, H. ve Arroja, L., (2008). "Impact of Industrial Sludge and Cattle Manure on Anaerobic Digestion of The OFMSW under Mesophilic Conditions", Biomass & Bioenergy, 32 (3): 245-251.

[173] Maamri, S. ve Amrani, M., (2014). "Biogas Production from Waste Activated Sludge Using Cattle Dung Inoculums: Effect of Total Solid Contents and Kinetics Study", Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 50: 352-359.

[174] Appels, L., Lauwers, J., Degreve, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Van Impe, J. ve Dewil, R., (2011). "Anaerobic Digestion in Global Bio-Energy Production: Potential and Research Challenges", Renewable & Sustainable Energy Reviews, 15 (9): 4295-4301.

[175] Sanchez, E., Borja, R., Weiland, P., Travieso, L. ve Martin, A., (2001). "Effect of Substrate Concentration and Temperature on the Anaerobic Digestion of Piggery Waste in a Tropical Climate", Process Biochemistry, 37 (5): 483-489.

[176] Ashekuzzaman, S.M. ve Poulsen, T.G., (2011). "Optimizing Feed Composition for Improved Methane Yield During Anaerobic Digestion of Cow Manure Based Waste Mixtures", Bioresource Technology, 102 (3): 2213-2218.

[177] Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T. ve Dawson, L., (2011). "The Anaerobic Digestion of Solid Organic Waste", Waste Management, 31 (8): 1737-1744.

[178] Borja, R., Rincon, B. ve Raposo, F., (2006). "Anaerobic Biodegradation of Two-Phase Olive Mill Solid Wastes and Liquid Effluents: Kinetic Studies and Process Performance", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 81 (9): 1450-1462.

[179] Yadanaparthi, S.K.R., Chen, L. ve Glaze, B., (2014). "Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure with Potato Waste", Idaho Nutrient Management Conference, March 6, Idaho, ABD.

[180] Garcia-Pena, E.I., Parameswaran, P., Kang, D.W., Canul-Chan, M. ve Krajmalnik-Brown, R., (2011). "Anaerobic Digestion and Co-Digestion Processes of Vegetable and Fruit Residues: Process and Microbial Ecology", Bioresource Technology, 102 (20): 9447-9455.

[181] Wu, X.M., Yang, H.H. ve Guo, L.J., (2010). "Effect of Operation Parameters on Anaerobic Fermentation Using Cow Dung as a Source of Microorganisms", International Journal of Hydrogen Energy, 35 (1): 46-51.

[182] Debik, E. ve Coskun, T., (2009). "Use of the Static Granular Bed Reactor (SGBR) with Anaerobic Sludge to Treat Poultry Slaughterhouse Wastewater and Kinetic Modeling", Bioresource Technology, 100 (11): 2777-2782.

[183] Demir, N.M., Coşkun, T. ve Debik, E., (2011). "The Effect of Distinct Operational Conditions on Organic Material Removal and Biogas Production in the Anaerobic Treatment of Cattle Manure", World Renewable Energy Congress, 8-13 May 2011, Linköpink, Sweden,

[184] Razaviarani, V., Buchanan, I.D., Malik, S. ve Katalambula, H., (2013). "Pilot-Scale Anaerobic Co-Digestion of Municipal Wastewater Sludge with Restaurant Grease Trap Waste", Journal of Environmental Management, 123: 26-33.

[185] Ye, J.Q., Li, D., Sun, Y.M., Wang, G.H., Yuan, Z.H., Zhen, F. ve Wang, Y., (2013). "Improved Biogas Production from Rice Straw by Co-Digestion with Kitchen Waste and Pig Manure", Waste Management, 33 (12): 2653-2658.

[186] Federation, W.E. ve Association, A.P.H., (2012). "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.

[187] SEM-Taramalı Elektron Mikroskobu, http://www.selcukiltek.com/equipment-105-sem-taramali-elektron-mikroskobu.aspx, 27 Mart 2015.

[188] Dicle, G., (2015). Titanyum Alaşım Biyomalzemelerde Plazma Polimerizasyon Tekniği Kullanılarak Kemik Morfogenetik Protein Tutuklanmasının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[189] Bunsan, S., Chen, W.Y., Chen, H.W., Chuang, Y.H. ve Grisdanurak, N., (2013). "Modeling the Dioxin Emission of a Municipal Solid Waste Incinerator Using Neural Networks", Chemosphere, 92 (3): 258-264.

[190] Florencio, L., Field, J. ve Lettinga, G., (1997). "High-Rate Anaerobic Treatment of Alcoholic Wastewaters", Brazilian Journal of Chemical Engineering, 14 (4).

[191] Zhang, S., Guo, H., Du, L., Liang, J., Lu, X., Li, N. ve Zhang, K., (2015). "Influence of NaOH and Thermal Pretreatment on Dewatered Activated Sludge Solubilisation and Subsequent Anaerobic Digestion: Focused on High-Solid State", Bioresource Technology, 185: 171-177.

[192] Yetilmezsoy, K., (2008). Tavuk Çiftliği Atıklarının Havasız Çamur Yataklı Reaktörde Arıtılabilirliği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[193] Converti, A., Del Borghi, A., Zilli, M., Arni, S. ve Del Borghi, M., (1999). "Anaerobic Digestion of the Vegetable Fraction of Municipal Refuses: Mesophilic Versus Thermophilic Conditions", Bioprocess Engineering, 21 (4): 371-376.

[194] Weiland, P., (2010). "Biogas Production: Current State and Perspectives", Applied Microbiology and Biotechnology, 85 (4): 849-860.

[195] Angelidaki, I. ve Ahring, B.K., (1993). "Thermophilic Anaerobic Digestion of Livestock Waste: The Effect of Ammonia", Applied Microbiology and Biotechnology, 38 (4): 560-564.

[196] Metcalf, E., (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, McGraw-Hill, New York.

[197] Inanc, B., Calli, B. ve Saatci, A., (2000). "Characterization and Anaerobic Treatment of the Sanitary Landfill Leachate in Istanbul", Water Science & Technology, 41 (3): 223-230.

[198] Akkaya, E., (2009). Sızıntı Sularının Havasız Çamur Yataklı Reaktör ve Mikrofiltrasyonlu Biyoreaktör Sistemi ile Arıtılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[199] Alkalay, D., Guerrero, L., Lema, J.M., Mendez, R. ve Chamy, R., (1998). "Review: Anaerobic Treatment of Municipal Sanitary Landfill Leachates: The Problem of Refractory and Toxic Components", World Journal of Microbiology and Biotechnology, 14 (3): 309-320.

[200] Aslan, S., (2009). Yukarı Akışlı Havasız Çamur Yataklı Reaktörde Ağır Metal ve Tuzluluğun Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[201] Lusk, P. ve Wiselogel, A., (1998). Methane Recovery from Animal Manures: The Current Opportunities Casebook, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado

[202] Hu, W., Thayanithy, K. ve Forster, C., (2002). "A Kinetic Study of the Anaerobic Digestion of Ice-Cream Wastewater", Process Biochemistry, 37 (9): 965-971.

[203] Yetilmezsoy, K., Turkdogan, F.I., Temizel, I. ve Gunay, A., (2013). "Development of ANN-Based Models to Predict Biogas and Methane Productions in Anaerobic Treatment of Molasses Wastewater", International Journal of Green Energy, 10 (9): 885-907.

[204] Lauwers, J., Appels, L., Thompson, I.P., Degrève, J., Van Impe, J.F. ve Dewil, R., (2013). "Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion of Biomass and Waste: Power and Limitations", Progress in Energy and Combustion Science, 39 (4): 383-402.

[205] Hamed, M.M., Khalafallah, M.G. ve Hassanien, E.A., (2004). "Prediction of Wastewater Treatment Plant Performance Using Artificial Neural Networks", Environmental Modelling & Software, 19 (10): 919-928.

[206] Abu Qdais, H., Hani, K.B. ve Shatnawi, N., (2010). "Modeling and Optimization of Biogas Production from a Waste Digester Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm", Resources Conservation and Recycling, 54 (6): 359-363.

[207] Kanat, G. ve Saral, A., (2009). "Estimation of Biogas Production Rate in a Thermophilic UASB Reactor Using Artificial Neural Networks", Environmental Modeling & Assessment, 14 (5): 607-614.

[208] Kana, E.B.G., Oloke, J.K., Lateef, A. ve Adesiyan, M.O., (2012). "Modeling and Optimization of Biogas Production on Saw Dust and Other Co-Substrates Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm", Renewable Energy, 46: 276-281.

[209] Ozkaya, B., Demir, A. ve Bilgili, M.S., (2007). "Neural Network Prediction Model for the Methane Fraction in Biogas From Field-Scale Landfill Bioreactors", Environmental Modelling & Software, 22 (6): 815-822.

[210] Sahinkaya, E., (2009). "Biotreatment of Zinc-Containing Wastewater in a Sulfidogenic CSTR: Performance and Artificial Neural Network (ANN) Modelling Studies", Journal of Hazardous Materials, 164 (1): 105-113.

[211] Yetilmezsoy, K. ve Demirel, S., (2008). "Artificial Neural Network (ANN) Approach for Modeling of Pb(Ii) Adsorption from Aqueous Solution by Antep Pistachio (Pistacia Vera L.) Shells", Journal of Hazardous Materials, 153 (3): 1288-1300.

[212] Willmott, C.J., (1984). On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography, ed. Spatial Statistics and Models, Springer, Netherlands.

[213] Türkiye İstatistik Kurumu. "Hayvansal Üretim İstatistikleri", http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=13512, 26 Şubat 2014.

[214] TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası, Türkiye'de Büyükbaş Hayvan Yetiştiriciliği, http://www.zmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=23449&tipi=17&sube=0, 23 Kasım 2015.

[215] Google Maps "Biogas" için Arama Sonuçları, https://www.google.com/maps/search/biogas+/@44.7642108,43.3069914,3z, 22 Temmuz 2015.

[216] Types of Biogas Plants, Fixed-dome Plants, http://www.sgpindia.org/documents/Biogas_Plants.pdf, 13 Mayıs 2015.

[217] BERKES, F. ve KIŞLALIOĞLU, M., (1994). Ekoloji ve Çevre Bilimleri, Remzi Kitabevi, İstanbul.

[218] Singh, K.J. ve Sooch, S.S., (2004). "Comparative Study of Economics of Different Models of Family Size Biogas Plants for State of Punjab, India", Energy Conversion and Management, 45 (9): 1329-1341.

[219] Vu, Q.D., Tran, T.M., Nguyen, P.D., Vu, C.C., Vu, V.T.K. ve Jensen, L.S., (2012). "Effect of Biogas Technology on Nutrient Flows for Small- and Medium-Scale Pig Farms in Vietnam", Nutrient Cycling in Agroecosystems, 94 (1): 1-13.

[220] Karttek, D., Venkata Seshaiah, C., Suresh, J., Punyakumari, B., V., D.R.M. ve Srivani, M., (2014). "Potential for Value Addition of Buffalo Dung through Eco-friendly Disposal in India", International Research Journal of Natural Sciences, 3 (12): 52-57.

[221] Abuşka, M., Güneş Enerjisi ve Uygulamaları Ders Notları III , Güneş Enerjili Su Isıtma Sistem Projelendirilmesi, http://akhisarmyo.cbu.edu.tr/documents/courses/149_201411072256201.pdf, 17 Mayıs 2015.

[222] Kaba Yem Kalitesi – Türkiye'de İnek Performansını Arttıran En Önemli Faktör, http://www.egevet.com.tr/kaba_yem_kalitesi_turkiyede_inek_performansini_artiran_en_onemli_faktor.htm, 22 Temmuz 2015.

[223] Türkiye Damızlık Sığır Yetiştiricileri Merkez Birliği (TDSYMB) Fiyat İstatistikleri, http://www.dsymb.org.tr, 22 Temmuz 2015.

[224] Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK), LPG Piyasası Ürün Fiyatları, https://lpg.epdk.org.tr/LpgFiyatlar/Fiyatlar.aspx, 18 Mayıs 2015.

[225] Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. ve Haan, C.d., (2006). Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

[226] Güç, M. ve Yılmaz, V., (2008). "Organik Atıklardan Kaynaklı Sera Gazları Salınımlarının Azaltılmasında Anerobik Bozundurmanın Önemi", VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008, 17-19 Aralık 2008, İstanbul,

[227] Barton, J., Issaias, I. ve Stentiford, E.I., (2008). "Carbon–Making the Right Choice for Waste Management in Developing Countries", Waste Management, 28 (4): 690-698.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Fatih TUFANER

Doğum Tarihi ve Yeri : 09.07.1982 - Yerköy

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : fatihtufaner@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lisans 1	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lisans 2	İşletme	Anadolu Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Yozgat Atatürk (Süper) Lisesi	2000

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012-……	Adıyaman Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2010-2012	Çankırı Karatekin Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

2007-2010	Beyoğlu Belediyesi	Mühendis
2005-2006	Özel Sektör/Çevre Firması	Mühendis
2004-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi	Öğrenci Asistan