

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİRİNCİL ÇAMURUN ANAEROBİK ÇÜRÜTÜLMESİNDE FARKLI
KİNETİK MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çevre Müh. Serpil GÖNÜLDİNÇ
(501031715)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Haziran 2006**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Nazik ARTAN (İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Ayşen ERDİNÇLER (B.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesi ve yönlendirilmesindeki değerli katkılarından dolayı danışman hocam Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma esnasında sağladıkları önemli katkılarından dolayı Araş. Gör. Mahmut ALTINBAŞ'a, R. Kaan DERELİ'ye ve Mustafa Evren ERŞAHİN'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmada evsel atıksu arıtma tesisi birincil çamurunun sağlanmasıdaki yardımlarından dolayı Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi Müdürü Emre EREN'e ve Çevre Mühendisi Hakan AYYILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bana her şeyden çok güvenen, inanan ve destekleyen AİLEME içten teşekkür ederim.

Haziran 2006

Serpil GÖNÜLDİNÇ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Konunun anlam ve önemi	1
1.2. Çalışmanın amacı ve kapsamı	2
2. HAVASIZ ARITMANIN ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Havasız arıtmanın esasları	3
2.2. Mikrobiyoloji	4
2.2.1. Hidroliz	4
2.2.2. Asit üretimi	4
2.2.2.1. Çözünebilir karbonhidratların fermantasyonu	5
2.2.2.2. Aminoasitlerin fermantasyonu	5
2.2.2.3. Uzun zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonu	5
2.2.2.4. Kısa zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonu	5
2.2.3. Metan üretimi	6
2.2.3.1. Asetat, hidrojen ve karbondioksitten metan üretimi	6
2.2.4. Anaerobik mikroorganizmalar arasındaki karşılıklı ilişkiler	7
2.3. Proses kimyası	9
2.3.1. Stokiyometri	9
2.3.2. pH ve alkalinite gereksinimi	10
2.3.3. Nütrient gereksinimi	12
2.3.4. İnhibitör maddeler	13
2.4. Havasız arıtma sistemleri	14
2.4.1. Klasik havasız çamur çürütücü	15
2.4.2. Havasız temas reaktörü	15
2.4.3. Havasız filtre	16
2.4.4. Havasız akışkan yataklı reaktör	16
2.4.5. Havasız çamur yataklı reaktör	16
2.4.6. Havasız çamur yataklı filtre	17
2.4.7. Membranlı havasız reaktör	17

2.4.8.	Havasız ardışık kesikli reaktör	17
2.4.9.	Havasız kompost reaktörleri	18
2.4.10.	İki kademeli havasız arıtma sistemleri	18
2.5.	Havasız arıtmanın kinetiği	20
2.5.1.	Giriş	20
2.5.2.	Monod yaklaşımı	20
2.5.3.	Substrat inhibisyon kinetiği	22
2.6.	Arıtma çamurlarının çürütülmesi	22
2.6.1.	Havasız anaerobik çamur çürütme süreci	22
2.6.2.	Çamur çürütücü tipleri	23
2.6.3.	Proses tasarımı ve kontrolü	23
2.6.4.	Çürütücü hacmi	23
2.6.4.1.	Isıtma ve sıcaklık kontrolü	24
2.6.4.2.	Çürütücü çatısı (kapağı)	25
2.6.4.3.	Çürütücülerin karıştırılması	25
2.6.4.4.	Gaz üretimi ve kullanımı	26
2.6.4.5.	Çürümüş çamur suyu özellikleri	27
2.6.4.6.	Çamur stabilizasyon derecesi ve süzülebilirliği	27
2.6.5.	İşletmeye alma ve proses kontrolü	28
2.6.5.1.	İşletmeye alma	28
2.6.5.2.	Optimum çevre şartları	28
2.6.5.3.	Köpük oluşumu ve kontrolü	29
2.6.5.4.	İnhibitör ve zehirli maddeler	30
2.7.	Anaerobik çamur çürütme konusundaki önemli bazı çalışmalar	31
3.	KOİ BİLEŞENLERİ VE İNERT KOİ	36
3.1.	KOİ'nin bileşenlere ayrılması	36
3.2.	İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla yapılmış önemli bazı çalışmalar	38
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALARIN PLANLANMASI, KULLANILAN DÜZENEKLER VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	48
4.1.	Atık karakterizasyonu	48
4.1.1.	Anaerobik çamur çürütme için sisteme beslenen birincil çamur karakterizasyonu	48
4.1.2.	Aşı çamurunun karakterizasyonu	50
4.2.	Deneysel çalışma planı	50
4.3.	Deney düzenekleri	51
4.3.1.	Anaerobik bozunma kinetiği katsayılarının belirlenmesi amacıyla kurulan anaerobik reaktörler	51
4.3.2.	İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kurulan anaerobik reaktörler	52

4.4.	Birincil çamurda anaerobik kinetik katsayıları ve inert KOİ değerini belirlemek amacıyla uygulanan yöntemler	53
4.4.1.	Anaerobik kinetik katsayıların belirlenmesi	53
4.4.2.	İnert KOİ değerinin belirlenmesi	55
4.4.3.	Atıksu çamurlarının anaerobik çürütümü için kararlı hal modeli	57
4.4.3.1.	Kararlı hal modeli – hidroliz kinetiği	59
4.4.3.2.	Kararlı hal modeli – stokiyometrik yaklaşım	61
5.	KARARLI HAL MODELİNİN UYGULANMASI	63
5.1.	Kararlı hal modeli – hidroliz kinetiğinin uygulanması	63
5.2.	Kararlı hal modeli – stokiyometrik denklemlerin uygulanması	69
5.3.	Kararlı hal modelinin Kayseri atıksu arıtma tesisine uygulanması	77
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
6.1.	Sonuçlar	85
6.2.	Öneriler	87
	KAYNAKLAR	89
	EKLER	92
	ÖZGEÇMİŞ	119

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları 4
Tablo 2.2	Çeşitli organik maddelerin anaerobik arıtımındaki stokiyometrik denklemlerin katsayıları..... 10
Tablo 2.3	Anaerobik arıtmada nütrient gereksinimi..... 13
Tablo 2.4	Havasız arıtma sistemlerinin, organik yük ve verim bakımından mukayesesi..... 14
Tablo 2.5	Tek ve iki kademeli işletmenin karşılaştırılması..... 19
Tablo 2.6	Yaygın kullanılan havasız arıtma sistemlerinin karşılaştırılması..... 19
Tablo 2.7	HÇYR, HF ve HAYR sistemlerinin başlıca işletme sorunları..... 19
Tablo 2.8	Çamur çürütücüler için tasarım kriterleri..... 24
Tablo 2.9	Havasız çamur çürütücü çıkış suyu özellikleri..... 27
Tablo 2.10	Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartları..... 29
Tablo 2.11	Katı madde oranı %4,5 olan evsel atıksu arıtma tesisi çamurunun çürütüldüğü bir çürütücü için inhibitör madde zehirlilik sınır konsantrasyonları..... 30
Tablo 3.1	Endüstriyel atıksuların inert çözülmüş KOİ bileşenleri (Yılmaz ve Ozturk, 1995)..... 47
Tablo 4.1	Sisteme beslenen birincil çamur karakterizasyonu..... 49
Tablo 4.2	Sisteme ilave edilen aşı çamuru karakterizasyonu..... 50
Tablo 4.3	İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla izlenen parametreler ve izleme sıklıkları..... 50
Tablo 4.4	Kinetik katsayıların belirlenmesi amacıyla izlenen parametreler ve izleme sıklıkları..... 51
Tablo 4.5	Sisteme ilave edilen nütrient madde miktarları..... 56
Tablo 4.6	Kararlı hal modeli anaerobik çürütücü kinetik denklemleri (Sötemann ve diğ.,2005b)..... 60
Tablo 5.1	Çamur bekletme süresi 10 ile 30 gün arasında değişen tam karışımli mezofilik anaerobik çürütücülerde ölçülen giriş ve çıkış konsantrasyonları..... 63
Tablo 5.2	Birincil çamurun anaerobik çürütülmesinde stabilizasyon prosesi için esas alınan kinetik katsayılar..... 64
Tablo 5.3	Birinci dereceden Sbp'ye bağlı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar..... 65
Tablo 5.4	Birinci dereceden Sbp & ZAD'ye bağlı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar..... 65
Tablo 5.5	Monod kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar..... 66
Tablo 5.6	Doygunluk kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar... 66
Tablo 5.7	İyonlaşmış ve iyonlaşmamış uçucu yağ asitlerinin toplam stokiyometrik denkleme getireceği katsayılar..... 71

Tablo 5.8	Birincil çamurun çürümesini temsil eden genel stokiyometrik denklem bileşenlerinin çamur yaşı 10 ile 30 gün arasında değişen reaktörler için hesaplanan katsayıları.....	74
Tablo 5.9	Birincil çamurun çürümesini temsil eden genel stokiyometrik denklem bileşenlerinin katsayılarının $\Delta S_{bp}/131,3$ ile çarpılması sonucu çamur yaşı 10 ile 30 gün arasında değişen reaktörler için hesaplanan katsayılar.....	74
Tablo 5.10	Çamur yaşı 10, 12, 15, 20, 25 ve 30 gün olan reaktörlerdeki birincil çamurun anaerobik parçalanmasını temsil eden toplam stokiyometrik denklem bileşenlerinin katsayıları.....	75
Tablo 5.11	Reaktör çıkışındaki tahmini konsantrasyonlar.....	77
Tablo 5.12	Kayseri atıksu arıtma tesisine ait 5 günlük çamur çürütücü giriş, çıkış ve ortalama KOİ değerleri.....	78
Tablo 5.13	Birinci dereceden S_{bp} 'ye bağlı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar.....	79
Tablo 5.14	Birinci dereceden S_{bp} & ZAD'ye bağlı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar.....	79
Tablo 5.15	Monod kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar.....	79
Tablo 5.16	Doygunluk kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar...	79
Tablo 5.17	Kayseri atıksu arıtma tesisi birincil çamur çürütümünü temsil eden stokiyometrik denkleminin katsayıları.....	81
Tablo 5.18	Kayseri atıksu arıtma tesisi çürütücü çıkışında tahmin edilen kirletici konsantrasyonları.....	83
Tablo A.1	Atıksu arıtma tesisi dizayn giriş ve çıkış değerleri.....	93
Tablo A.2	Atıksu arıtma tesisi dizayn hidrolik yükleri.....	93
Tablo C.1	Kayseri atıksu arıtma tesisi çürütücü çıkışı alkalinite değerleri.....	115
Tablo C.2	Kayseri atıksu arıtma tesisi çürütücü çıkışı metan üretimi değerleri.	117

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Evsel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü.....	7
Şekil 2.2 : Havasız reaktör tipleri.....	15
Şekil 3.1 : Atıksuda KOİ bileşenleri dağılımı (Aydın, 2002).....	37
Şekil 3.2 : Çıkış akımındaki KOİ bileşenleri dağılımı (Aydın, 2002).....	38
Şekil 4.1 : Çamur çürütme sistemi.....	52
Şekil 4.2 : Çamur çürütme sistemi.....	52
Şekil 4.3 : Havasız şartlarda inert KOİ bileşenlerinin deneysel olarak bulunduğu çalışma düzeneği.....	53
Şekil 5.1 : Laboratuvar ölçekli yapılan çalışmalar sonucu birincil çamur için belirlenen karakterizyon değerlerinin farklı kinetik ifadelerle uygulanması ile elde edilen KOİ giderim verimlerinin karşılaştırılması	67
Şekil 5.2 : Biyolojik olarak parçalanabilir organiklere karşılık özgül hidroliz hızı grafiği	68
Şekil A. 1 : Kayseri evsel atıksu arıtma tesisine ait akım şeması.....	100
Şekil B.1 : Anaerobik çamur çürütme reaktörlerinde KOİ'nin zamana bağlı değişimi.....	103
Şekil B.2 : Reaktörlerdeki TKM miktarlarının zamana bağlı değişimi.....	105
Şekil B.3 : Reaktörlerdeki TUKM miktarlarının zamana bağlı değişimi.....	105
Şekil B.4 : Reaktörlerde oluşan biyogaz hacminde zamana bağlı değişim....	107
Şekil B.5 : Çamur yaşı 10, 12 ve 15 gün olan reaktörlerde üretilen biyogaz hacimlerinin günlük değişimleri.....	108
Şekil B.6 : Çamur yaşı 20, 25 ve 30 gün olan reaktörlerde üretilen biyogaz hacimlerinin günlük değişimleri.....	108
Şekil B.7 : Reaktörlerdeki pH'ın zamana bağlı değişimi.....	109
Şekil B.8 : Reaktörlerdeki alkalitenin zamana bağlı değişimi.....	110
Şekil B.9 : İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kurulan reaktörlerdeki toplam ve süzölmüş KOİ'nin zamana bağlı değişimi.....	112
Şekil B.10 : Reaktörlerdeki pH değişiminin zamana bağlı değişimi.....	113
Şekil B.11 : İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kurulan reaktörlerdeki toplam ve süzölmüş KOİ'nin zamana bağlı değişimi (İkinci çalışma).....	114

SEMBOL LİSTESİ

E	: Çamur kütleline dönüştürülen giderilmiş KOİ fraksiyonu
f_{PS'}up	: Birincil çamurdaki biyolojik olarak parçalanamayan KOİ fraksiyonu
K_h	: Birinci dereceden S _{bp} 'ye bağlı kinetik ifadelerde kullanılan hidroliz hız sabiti (1/gün)
K_H	: Birinci dereceden S _{bp} ve Z _{AD} 'ye bağlı kinetik ifadelerde kullanılan hidroliz hız sabiti (l/g KOİ biyokütle.gün)
K_m	: Monod kinetiği için maksimum spesifik substrat giderim hızı (g KOİ organik / (g KOİ biyokütle.gün)
K_M	: Doygunluk kinetiği için maksimum spesifik substrat giderim hızı (g KOİ organik / (g KOİ biyokütle.gün)
K_s	: Monod kinetiği için yarı doygunluk sabiti (g KOİ/l)
K_S	: Doygunluk kinetiği için yarı doygunluk sabiti (g KOİ/l)
Q_m	: Metan gazı üretimi (l CH ₄ /l giriş debisi)
r_h	: Hidroliz hızı (g KOİ/l.gün)
r_h/Z_{AD}	: Özgül hidroliz hızı (1/gün)
S_{bp}	: Kalıntı biyolojik olarak parçalanabilir KOİ konsantrasyonu (g KOİ/l)
S_{bsai}	: Girişteki UYA konsantrasyonu (mg KOİ/l)
S_m	: Metan üretimi konsantrasyonu (gKOİ/l)
S_{ti}	: Birincil çamurun toplam partiküler KOİ konsantrasyonu (mg KOİ/l)
S_{te}	: Çürütücü çıkışındaki KOİ konsantrasyonu (g KOİ/l)
S_{upi}	: Sisteme giren çamurun partiküler biyolojik olarak parçalanamayan kısmı (mg KOİ/l)
S_{up}	: Biyolojik olarak parçalanamayan KOİ konsantrasyonu (gKOİ/l)
Z_{AD}	: Asidojen biyokütle konsantrasyonu (g KOİ/l)

BİRİNCİL ÇAMURUN ANAEROBİK ÇÜRÜTÜLMESİNDE FARKLI KİNETİK MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Atıksuların arıtımı sırasında oluşan çamurlar gerekli önlemler alınmadığı takdirde çok önemli çevre sorunlarına sebep olmaktadır ve yüksek katı muhtevası içeren arıtma çamurlarının uzaklaştırılması oldukça zor işlemleri gerektirmektedir. Başlıca çamur stabilizasyon yöntemlerinden biri olan havasız çamur çürütme prosesi bu alanda en yaygın kullanılan yöntemdir.

Bu çalışma, bir büyükşehir kentsel atıksu arıtma tesisi birincil yoğunlaştırma tankından alınan birincil çamurun inert KOİ değerinin ve anaerobik arıtma kinetiği sabitlerinin deneysel olarak belirlenmesini, bulunan değerlerin daha önce yapılmış olan kinetik modellere uygulanmasını kapsamaktadır. Birincil çamurun laboratuvar ölçekli anaerobik çürütülmesi, mezofilik sıcaklık şartlarının sağlandığı bir sabit sıcaklık odasında yarı kesikli olarak çalışan farklı çamur bekletme sürelerine sahip model reaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte 3 ayrı reaktörde gerçekleştirilen anaerobik parçalanma sonunda birincil çamur için inert KOİ değeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmalarla belirlenen birincil çamur konsantrasyonu ve daha önce yapılmış olan çalışmalarla belirlenmiş olan hidroliz kinetik katsayıları kararlı hal modeline her bir çürütücü için ayrı ayrı uygulanmış ve yorumlanmıştır. Kararlı hal modeli-stokiyometrik denklemleri kullanılarak her bir çürütücünün çıkış akımındaki amonyak konsantrasyonu, alkalinite ve karbondioksit kısmi basıncı da hesaplanmıştır. Buna ilave olarak, kararlı hal modeli tam ölçekli bir atıksu arıtma tesisinin çamur çürütücü reaktörüne uygulanmış ve çürütücü çıkış akımındaki alkalinite, gaz kompozisyonu, amonyak ve KOİ konsantrasyonlarının kinetik model ile hesaplanan konsantrasyonlar ile yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalar, hidroliz kinetik denklemlerinin uygulanması sonucunda çamur bekletme süresinin artması ile KOİ giderim veriminin arttığını ve model ile tahmini olarak elde edilen KOİ giderim veriminin ve metan üretiminin tam ölçekli bir tesiste ölçülen verilerle karşılaştırıldığında birbiriyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla yapılan çalışmalar sonunda bulunması hedeflenen kinetik katsayıların daha önce yapılmış olan çalışmalar sonucunda birincil çamur için belirlenmiş olan kinetik katsayılardan beligin derecede farklı olmayacağı sonucuna varılmıştır.

COMPARISON OF DIFFERENT KINETIC MODELS FOR ANAEROBIC DIGESTION OF PRIMARY SLUDGE

SUMMARY

Treatment sludges cause important environmental problems unless necessary precautions are taken. Disposal of treatment sludges with high solid content requires quite difficult operations. Anaerobic sludge digestion is the widely used method among the sludge stabilization processes.

In this study, inert COD values and anaerobic treatment kinetic coefficients of the primary sludge taken from the primary thickener of a large municipal wastewater treatment plant were intended to be determined experimentally. The concentration values which were obtained during characterization of the primary sludge were applied to a steady state model developed by previous studies in the literature. The lab-scale anaerobic digestion of the primary sludge was performed in the reactors having different sludge retention times and operated as semi-continuous systems in a constant temperature room in which mesophilic conditions were supplied. In addition, inert COD value of the primary sludge was intended to be determined in anaerobic degradation process carried out in 3 different reactors. Primary sludge characteristics determined by experimental studies and hydrolysis kinetic coefficients derived from the previous studies were applied to the steady state model for each digester and the results were evaluated. Ammonia concentration, alkalinity generated and partial pressure of carbondioxide in the effluent of each digester were also calculated using the stoichiometric equations of the steady-state model. Besides, the steady state model was also applied to the values of the sludge digester of a full-scale wastewater treatment plant. Results indicated that the estimated alkalinity, gas composition, ammonia and COD concentrations in the effluent using the kinetic model were approximately equal to those of the digester values.

The study showed that the COD removal efficiency increased as the sludge retention time increased by the application of hydrolysis kinetic equations to the primary sludge. The estimated COD removal and methane production using the model could well fit to the data measured in the digester of a full-scale wastewater treatment plant. Hence, it was concluded that the kinetic coefficients of the primary sludge to be found at the end of the experimental studies would not differ significantly from the kinetic coefficients obtained by previous studies.

1. GİRİŞ

Anaerobik arıtma ile organik maddeler temel olarak metan ve karbondioksitten oluşan gaz karışımına dönüşmektedirler. Bu yöntem atık arıtmak amacıyla geleneksel olarak kullanılan bir yöntemdir ve arıtma sonucunda oluşan metan iyi bir enerji kaynağı teşkil etmektedir (Lyberatos ve diğ., 1999). Organik çökeltilerin çürümesi sonucu metan ortaya çıktığı 18. yüzyıldan beri bilinmektedir. 19. yüzyılın ortalarında bu ayrışmada bakterilerin rol oynadığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte anaerobik arıtmanın evsel atıksu arıtma tesisi çamurlarının çürütülmesinde kullanılabileceği 1881 yılında ortaya konmuştur. Bu tarihten itibaren havasız arıtmanın atıksu arıtımındaki uygulamaları ile ilgili çalışmalarda proses biyokimyası ve mikrobiyolojisi alanındaki gelişmelere paralel bir artış görülmüştür. Yakın zamana kadar hemen sadece biyolojik arıtma çamurlarının çürütülmesinde uygulanan havasız arıtma süreci, son yıllarda endüstriyel ve evsel atıksular ile katı atıkların organik kısmının arıtılmasında da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Öztürk, 1999).

1.1. Konunun anlam ve önemi

Su kaynaklarımızın giderek kirlendiği günümüzde atıksuların arıtılarak alıcı ortamlara verilmesi daha da önem kazanmaktadır. Ancak atıksuların arıtılması sırasında oluşan çamurlar gerekli önlemler alınmadığı takdirde çok önemli çevre problemlerine neden olmaktadır. Bu yüzden oluşan çamurların bertarafı gerekmektedir. Çamur bertaraf yöntemlerinden, havasız çamur çürütme prosesi gerek çamurun hacim ve ağırlığındaki azalma gerekse biyogaz oluşumu sebebiyle giderek yaygınlaşarak kullanılmaktadır. Ayrıca anaerobik çamur çürütme ile evsel çamurların organik içerikleri azalmaktadır ve 1000 kg KOİ giderimi sonunda 2700 kW-sa eşdeğeri net enerji üretilebilmektedir. Bu çalışma ile farklı çamur yaşlarına sahip laboratuvar ölçekli çürütücülerin kararlı hale ulaştıkları andaki KOİ değerleri kullanılarak kinetik katsayıları ve birincil çamurun inert KOİ bileşenleri belirlenmeye çalışılmıştır. Laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen birincil

çamura ait karakterizasyon verileri, kararlı hal kinetik modeline yerleştirilmiş ve birincil çamurun anaerobik çürütülmesi farklı kinetik modellerle karşılaştırılmıştır. İncelenen model, Türkiye'ye özgü verilerle benzer çamur çürütücülere de uygulanabilecektir.

1.2. Çalışmanın amacı ve kapsamı

Kayseri Evsel Atıksu Arıtma Tesisi birincil çamurunun havasız arıtma ile çürütülmesine çalışılmıştır. Çamur çürütme işlemi birbirinden farklı çamur bekletme sürelerine sahip laboratuvar ölçekli 6 ayrı reaktörde gerçekleştirilmiştir. Her bir reaktörün kararlı hale ulaştığı andaki KOİ değerleri kullanılarak anaerobik arıtma bozunma kinetiği katsayıları belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde mevcut olan kararlı hal kinetik modelinde verilmiş olan kinetik katsayılar kullanılarak reaktörlerin kararlı hale ulaşması durumundaki KOİ giderim verimleri de elde edilmiş ve literatürde daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bunla ilaveten birincil çamur için inert KOİ bileşenleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla her birinin başlangıç toplam KOİ konsantrasyonu birbirine eşit 3 farklı reaktör kurulmuştur. Reaktörlerden birine birincil çamur, ikincisine süzölmüş birincil çamur ve üçüncüsüne ise süzölmüş birincil çamur KOİ konsantrasyonuna eşdeğer KOİ içeren glikoz çözeltisi konulmuştur. Literatürdeki birincil çamur için biyolojik olarak parçalanamayan fraksiyon değerleri de dikkate alınarak kinetik modelin uygulanması gerçekleştirilmiştir.

2. HAVASIZ ARITMANIN ÖZELLİKLERİ

2.1. Havasız arıtmanın esasları

Havasız arıtma, kompleks ve askıdaki organik maddelerin havasız ortamda ayrışması esnasında meydana gelen seri ve paralel çok adımlı biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan biyolojik bir prosestir. Bu proseste ilk adımda polisakkaritler, karbonhidratlar, protein ve lipidler gibi polimerik yapıdaki kompleks maddeler hücre dışı enzimler vasıtasıyla daha küçük boyutta ve hücre zarından geçebilecek çözünebilir ürünlere dönüşürler. Nispeten basit ve çözünebilir yapıdaki bu bileşikler fermentasyon veya anaerobik oksidasyonla kısa zincirli yağ asitlerine, alkollere, karbondioksit, hidrojene ve amonyağa dönüşürler. Asetat dışındaki kısa zincirli yağ asitleri de asetata, hidrojen gazına ve karbondioksit dönüşürler. Prosesin son safhasında asetatin parçalanması veya H_2 ile CO_2 'nin sentezi yoluyla CH_4 üretimi gerçekleştirilir (Ubay, 1993).

Kompleks bir atığın havasız arıtımındaki reaksiyon hızı, çözünmez halde olan fakat biyolojik olarak ayrışabilen moleküllerin parçalanma hızının yanı sıra reaktördeki bakteri tipine ve atığın özelliklerinin bir fonksiyonu olan besin maddesi dönüşüm verimi ile reaktörün pH ve sıcaklığına bağlıdır. Yapılan çalışmalar havasız arıtmada açığa çıkan metanın yaklaşık %70'inin CH_3COOH , %30'unun $H_2 + CO_2$ yoluyla üretildiğini göstermektedir.

2.2. Mikrobiyoloji

Havasız arıtma farklı mikroorganizma gruplarının rol aldığı oldukça kompleks bir biyokimyasal süreçtir. Bununla birlikte genelde başlıca 2 grup bakterinin , asit bakterileri ve metan bakterileri, esas görevi üstlendiği bilinmektedir. Bu iki grup da kendi arasında her biri ikiye alt gruba ayrılmaktadır. Tablo 2.1'de başlıca anaerobik mikroorganizma grupları verilmektedir.

Tablo 2.1 : Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları

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

Havasız reaktörlerde, genetik özellikleri tam olarak tespit edilemeyen çok heterojen mikroorganizma grupları kolektif olarak görev yapmaktadır (Öztürk, 1999).

Kompleks organik maddelerin havasız ayrışması en genel halde üç safhalı bir proses halinde ele alınabilir (Öztürk, 1999).

- 1) Yüksek molekül ağırlıklı katı ve çözünmüş organik maddelerin analizi,
- 2) Düşük molekül ağırlıklı organik maddelerin asit bakterilerince muhtelif uçucu yağ asitleri ve müteakiben de asetik asite dönüştürülmesi,
- 3) Asetik asit, H_2 ve CO_2 'den metan üretimi.

Havasız ayrışma süreci esnasında açığa çıkan enerji mikroorganizmalarca hücre yenilenmesi ve biyokütle sentezinde kullanılır.

2.2.1. Hidroliz

Hidroliz, hücre dışı enzimlerce gerçekleştirilen oldukça yavaş bir süreçtir. Reaksiyon hızını etkileyen en önemli faktörler pH, sıcaklık ve çamur yaşıdır. Yağlar çok yavaş hidrolize olduğundan önemli nispette yağ ve diğer yavaş hidrolize olan maddeler ihtiva eden atıkların havasız arıtımında hidroliz hız sınırlayıcı bir faktör olabilmektedir (Öztürk, 1999). Özellikle bazı selülozlu atıkların havasız arıtımında da hız sınırlayıcı rol oynar. Lignin de oldukça kompleks bir maddedir ve rasgele moleküler yapısı dolayısı ile anaerobik şartlarda hiç hidrolize olmaz veya reaksiyon hızı çok düşük olur.

2.2.2. Asit üretimi

Asit üretimi safhasında hidroliz ürünleri asetik asit veya reaktördeki işletme şartlarının kararlı olması halinde, propiyonik, butirik, izobutirik, valerik ve izo valerik asit gibi ikiden fazla karbonlu yağ asitlerine dönüştürülür. Kararlı havasız süreçlerdeki yağ asitleri konsantrasyonu oldukça düşük seviyelerde bulunur (100-300 mg HAc/l). Havasız reaktörlerin işletmeye alma safhasında uçucu asit konsantrasyonunun 1000-1500 mg HAc/l'yi geçmemesi arzu edilir. (Öztürk, 1999).

2.2.2.1. Çözünebilir karbonhidratların fermantasyonu

Metan bakterilerinin olmadığı ortamda anaerobik bakteriler vasıtasıyla karbonhidratların fermantasyonunun başlıca ürünleri, etanol, H_2 ve CO_2 'dir. Bununla birlikte H_2 kullanan bakterilerin bulunması durumunda etanolde indirgenme ve asetat üretiminde bir artış gözlenir (Ubay, 1993).

2.2.2.2. Aminoasitlerin fermantasyonu

Aminoasitlerin fermantasyonu redoks reaksiyonlarını da içeren oldukça karmaşık bir prosestir. İndirgenme reaksiyonunda, havasız bakteriler tarafından kullanılan başlıca elektron alıcısı aminoasitler, keto asitler ve doymamış asitlerle protonlardır. Aminoasitlerin fermantasyonunun son ürünleri, kısa zincirli yağ asitleri, suksinat asit ve hidrojen gazıdır. (Ubay, 1993).

2.2.2.3. Uzun zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonu

Yağlar suda çözünmeyen ancak, organik çözücülerde çözünebilen heterojen organik bileşiklerdir.

Yağ asitlerinin genel formülleri $CH_3 (CH_2)_n COOH$ olup β oksidasyonu ile ayrıştırılırlar. β oksidasyonu ile asidin $-COOH$ kökünden asetil grupları ardışık olarak koparılacak asetik asit ve H_2 'e dönüştürülür. Anaerobik β oksidasyonu yolu ile doymuş ve 14 ve 18 karbonlu yağ asitleri önce asetata müteakiben de CO_2 ve CH_4 'e dönüştürülürler.

Evsel arıtma çamurları genellikle yüksek miktarda lipid ve serbest yağ asitleri içerirler. Uzun zincirli yağ asitlerinin fermantasyonu sonucu oluşan kısa zincirli yağ asitleri ya sadece asetik asit ya da asetik asit ve propiyonik asittir. (Ubay, 1993).

2.2.2.4. Kısa zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonu

Kısa zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonunun başlıca ürünleri asetat ve hidrojen gazıdır. Esas karbon ürünü asetat olduğundan bu reaksiyonlar asetojenesis olarak adlandırılırlar. Kısa zincirli asitlerin ayrışmasının başarılı olması için sistemde üretilen hidrojen gazının etkili şekilde giderimi gereklidir.

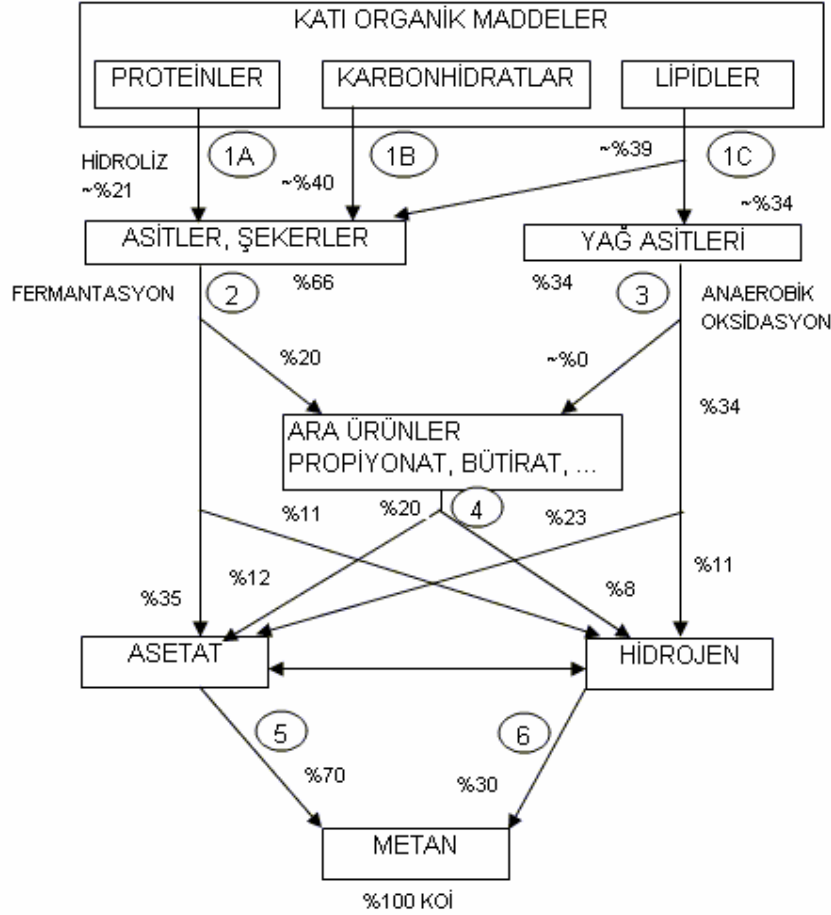
2.2.3. Metan üretimi

2.2.3.1. Asetat, hidrojen ve karbondioksitten metan üretimi

Asetat, metan üreten bakteriler için en önemli besin kaynağıdır. Evsel çamurların çürütüldüğü reaktörlerde metan üretiminin %65 – 70'i asetat metil grubunun indirgenmesi sonucu elde edilir. Şekil 2.1 'de evsel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü verilmektedir.

Hidrojen kullanan metan bakterileri H_2 ve CO_2 kullanarak CH_4 üretirler (Ubay, 1993). H_2 ve CO_2 'den metan üreten bakteriler, asetik asit kullanan bakterilere göre çok daha hızlı bir şekilde çoğalmaktadırlar. Dolayısı ile ortamda yeterli H_2 ve CO_2 olduğu ve H_2 kısmi basıncı da uygun uygun olduğu sürece bu yolla CH_4 üretimi devam eder.

Metan üretimi yavaş bir süreçtir ve genellikle havasız arıtmada hız sınırlayıcı safha olarak kabul edilmektedir. Ancak metan üretimi safhasının her zaman hız sınırlayıcı olması söz konusu değildir, bazen hidroliz safhası daha kritik olabilir.



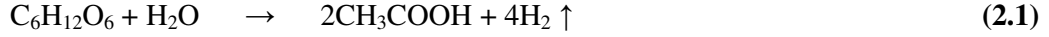
Şekil 2.1 : Evsel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü

2.2.4. Anaerobik mikroorganizmalar arasındaki karşılıklı ilişkiler

Havasız arıtma alanındaki mevcut bilgiler, 3 grup bakterinin kolektif çalışması gerektiğini ortaya koymaktadır (Şekil 2.1). Asetat kullanan metan bakterileri fermentasyon bakterileri ile müşterek çalışarak asetik asit konsantrasyonunu ve pH'ı kontrol eder. Asetat kullanan metan bakterilerinin çoğalma hızları nispeten yavaş (minimum ikilenme hızları 2/3 gün, $T=35^{\circ}\text{C}$ de), buna mukabil fermentasyon bakterilerinin ise oldukça hızlıdır (2-3 saat, $T=35^{\circ}\text{C}$ de). Dolayısıyla organik yükün artması durumunda asit üretimi istenen şekilde gerçekleşebildiği halde, metan üretimi aynı hızla cereyan etmeyebilir ve reaktörde aşırı uçucu asit birikimi ile karşılaşılabilir.

Havasız reaktörlerde arıtma sürecinin durumu biyogazdaki H_2 konsantrasyonu izlenmek suretiyle hassas bir şekilde açıklanabilmektedir. Gaz fazındaki H_2

konsantrasyonunun artması halinde hidrojen kullanan bakterilerce CO₂ ve H₂'den CH₄ üretimi azalmaktadır. Bu en basit şekilde glikozun şok yükler halinde beslenmesi sonucu havasız reaktörlerde oluşan aşağıdaki reaksiyonla izah edilebilir:



Sisteme glikoz ani olarak verildiğinde, fermantasyon (asit) bakterileri bu şok yüke kısa sürede uyum göstererek yukarıdaki reaksiyona göre asetik asit üretirler. Bu durum pH'ı düşürür ve metan bakterilerinin rol oynadığı reaksiyonların hızını yavaşlatarak ortamda H₂ birikmesine yol açar. Reaktörde H₂ konsantrasyonunun artması;

- 1) Toplam asit üretim hızının düşmesine yol açar. Bu halde sistemin kararlı hale dönebilmesi için ilave zamana ihtiyaç duyulur.
- 2) Bütirik ve propiyonik asit konsantrasyonlarının artmasına sebep olur. Bu da asetik asit üretimini ve asetat kullanan metan bakterilerinin CH₄ üretmelerini engeller.
- 3) Hidrojen konsantrasyonunun daha artması propiyonik asit üretimini hızlandırır ve reaktörde pH daha da düşer.

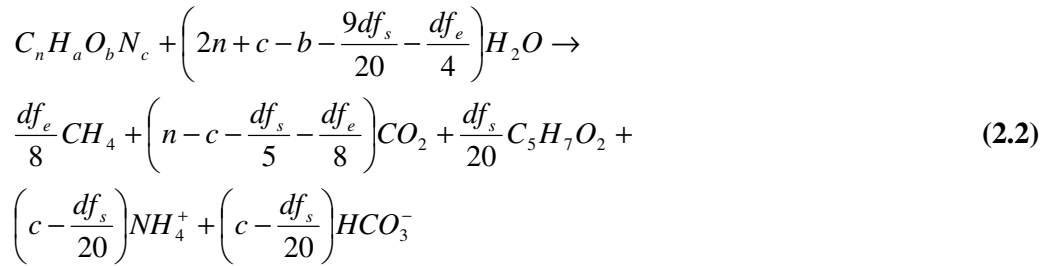
Kompleks organik maddelerin metana dönüştürülmesi söz konusu üç bakteri grubunun müşterek çalışmasını gerekli kılmakla birlikte hidrojen üreten ve hidrojen kullanan bakterilerin özel önemleri vardır. Hidrojen üreten ve kullanan bakteriler için hidrojenin kısmi basıncı ile serbest enerji seviyesi arasındaki ilişki konunun önemini daha net bir şekilde açıklamaktadır. Buna göre propiyonik asidin asetik asit ve hidrojene parçalanabilmesi için ortamdaki H₂'nin kısmi basıncının 10⁻⁴ atmosferi (100 mg/l) aşmaması gerekmektedir. Bu düşük basınç ortamında hidrojen kullanan metan bakterileri için gerekli enerji kısmi basıncın 1 atm olması haline göre önemli ölçüde azaltılmış olmakta ve sonuç olarak reaksiyon kolaylaştırılmaktadır. Diğer bir deyişle birim hacim H₂'i kullanmak için gerekli bakteri miktarı daha da azalmaktadır. Bu yüzden H₂ kullanan metan bakterilerinin maksimum hızla faaliyeti için H₂ kısmi basıncının 10⁻⁴ ~ 10⁻⁶ atm aralığında tutulması büyük önem taşır.

2.3. Proses kimyası

2.3.1. Stokiyometri

Anaerobik proseslerin mikrobiyolojisi kompleks bir yapıya sahiptir ve genel olarak organik bileşikler, temel son ürün olan metana dönüşmeden önce bir çok ara ürüne dönüşmektedirler.

Arıtma sonrasında ortamda ara ürünlerden bir miktar bulunmasına rağmen mikroorganizmalar tarafından tüketilen organik maddenin çoğu genelde asıl son ürünlere (karbondioksit, metan, su ve biyokütle) dönüştürülmekteyken tüketilen organik maddenin diğer kısımlarını oluşturan azot, kükürt gibi elementler amonyum ve sülfür gibi inorganik formlara dönüştürülürler. Temel olarak bir organik atığın anaerobik arıtımı sonucunda oluşan son ürünler, stokiyometrik denklemlerin yazılmasıyla kolaylıkla belirlenebilmektedir (McCarty, 2001). Örneğin organik madde için ampirik moleküler formülün $C_nH_aO_bN_c$ olduğu kabul edilmiştir. Buna göre karbondioksit, elektron alıcısı olduğu varsayılarak $C_nH_aO_bN_c$ olarak genelleştirilmiş olan organik atık için aşağıdaki stokiyometrik denklem elde edilir:



$d = 4n + a - 2b - 3c$ ifadesi ile hesaplanır.

Burada f_s biyokütleye dönüştürülen organik madde fraksiyonunu temsil etmekte iken f_e enerjiye dönüştürülen kısmı temsil etmektedir ve f_s ve f_e toplamı 1'e eşittir. Kararlı halde çalışan bir reaktör için (2.3) denklemini kullanılarak f_s tahmin edilmektedir.

$$f_s = f_s^0 \left[\frac{1 + (1 - f_d)b\theta_x}{1 + b\theta_x} \right] \quad (2.3)$$

Organik bileşiklerin metan fermentasyonu için gereken f_s^0 ve b değerlerinin tipik değerleri Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2 : Çeşitli organik maddelerin anaerobik arıtımındaki stokiyometrik denklemlerin katsayıları

Atık Bileşeni	Atığın Kimyasal Denklemi	f_s^0	Y g VSS/g KOİ tüketilen	b gün ⁻¹
Karbohidratlar	$C_6H_{10}O_5$	0,28	0,20	0,05
Proteinler	$C_{16}H_{24}O_5N_4$	0,08	0,056	0,02
Yağ asitleri	$C_{16}H_{32}O_2$	0,06	0,042	0,03
Evsel Atıksu Çamuru	$C_{10}H_{19}O_3N$	0,11	0,077	0,05
Etanol	CH_3CH_2OH	0,11	0,077	0,05
Metanol	CH_3OH	0,15	0,11	0,05
Benzoik Asit	C_6H_5COOH	0,11	0,077	0,05

2.3.2. pH ve alkalinite gereksinimi

Anaerobik arıtma için gerekli olan pH değeri 6.6 ile 7.6 arasında değişmektedir. Bu aralığın dışındaki değerler metanojenesis adımı üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Anaerobik arıtma sırasında oluşan en büyük problem pH'ı 6.6 değerinin üzerinde tutmaya çalışmaktır çünkü işletmeye alma aşamasında ya da reaktörün aşırı yüklenmesinde ara ürün olarak üretilen organik asitlerin miktarı artmakta bu da pH'ın hızlı düşüşüne sebep olup metan üretimini durdurmaktadır. Bu şekilde bir durum oluşması durumunda reaktörün yeniden işletmeye alınması haftalar hatta aylar sürebilmektedir. Dolayısıyla reaktör içerisinde oluşabilecek pH düşüşlerinden kaçınmak gerekmektedir (McCarty, 2001).

Anaerobik arıtmada pH'ı kontrol eden temel kimyasal türler karbonik asit sistemi ile ilişkilidir ve aşağıdaki reaksiyonlar ile açıklanmaktadır:



Çeşitli türler arasındaki denge ilişkisi (2.9) denklemi ile verilmektedir:

$$\frac{[CO_2(g)]}{[H_2CO_3^*]} = K_H = 38 atm / mol(35^\circ C) \quad (2.9)$$

Buna göre aşağıdaki denge denklemleri yazılabilir:



$$\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} = K_{a,1} = 5.10^{-7} (35^\circ C) \quad (2.11)$$

$$\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = K_{a,2} = 6.10^{-11} (35^\circ C) \quad (2.12)$$

$$[H^+][OH^-] = K_w = 2 \times 10^{-14} (35^\circ C) \quad (2.13)$$

Anaerobik arıtmada normal pH değerlerinde karbonat (CO_3^{2-}) önemli değildir ve bu sebeple (2.7) ve (2.12) denklemleri dikkate alınmamaktadırlar.

Alkalinite suyun asitleri nötralize edebilme kapasitesidir ve $mg/lCaCO_3$ cinsinden ifade edilmektedir. Toplam Alkalinite bikarbonat konsantrasyonuna eşittir ve bikarbonat alkalinitesi olarak da bilinir.

$$\frac{alkalinite(bikarb)}{50.000} = [HCO_3^-] \quad (2.14)$$

(2.11) denkleminin her iki tarafının logaritması alınıp $pH = -\log(H^+)$ ve $pK_{a,1} = -\log K_{a,1}$ ifadeleri kullanılırsa (2.15) denklemi ele edilir:

$$pH = pK_{a,1} + \log \frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} \quad (2.15)$$

(2.15) denklemi içerisine (2.10) ve (2.14) denklemleri yerleştirilirse aşağıdaki (2.16) denklemi elde edilir:

$$pH = pK_{a,1} + \log \frac{\frac{Alkalinite(bikarb)}{50.000}}{\frac{[CO_2(g)]}{K_H}} \quad (2.16)$$

Organik azotun serbest bırakılması ile ortamda NH_3 oluşur ve oluşan bu amonyak sudan bir proton alarak suya OH^- 'ı serbest bırakır (alkalinite olarak bilinir): $H_2O +$

$\text{NH}_3 = \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$. Suya alkalinite eklenmesindeki asıl yol, organik maddenin parçalanması sonucu amonyumun ortama serbest bırakılmasıdır.

Anaerobik arıtma sırasında oluşabilecek en önemli tehlikelerden biri de organik maddenin parçalanması sonucu alkalinitenin yok edilmesi tehlikesidir. Alkalinitenin yok edilmesi, kompleks organik moleküllerin organik asitlere fermentasyonu ile gerçekleşebilmektedir. Ancak uçucu asitler zayıf asit olduğundan dolayı ($\text{pK}_a > 2$) sadece bikarbonat türlerini bozabilmekte, toplam alkaliniteyi ise çok fazla etkileyememektedirler. Dolayısıyla uçucu asit konsantrasyonundaki herhangi bir artış, ölçülen toplam alkalinitenin aniden düşmesine sebep olmamaktadır (McCarty, 2001).

2.3.3. Nütrient gereksinimi

Evsel atıksuda ve çamur arıtma tesislerinde mikroorganizmaların büyümesi için gerekli olan tüm nütrientler mevcuttur. Ancak kimyasal endüstrilerin atıksuları başta olmak üzere diğer endüstrilerin atıksularında mikroorganizmaların büyümesi için gerekli olan nütrientler yeterli miktarda bulunmamaktadır. Büyüme için gerekli olan inorganik nütrientlerin en önemlileri azot ve fosfordur. Bu nütrientlerin büyüme için gerekli olan miktarı, stokiyometrik denklemlerden elde edilen net biyolojik büyüme ile elde edilebilmektedir. Azot hücrenin ağırlıkça %12'sini fosfor ise %2'sini temsil etmektedir. Anaerobik arıtmada denitrifikasyon ile nitrat ve nitrit yok olduğundan dolayı azot, indirgenmiş formlarında (NH_3 veya organik amino-azotu) olmalıdır. Bununla birlikte, azotun hız sınırlayıcı nütrient olmaması için büyümede gerekli olan miktarından biraz fazlası (50 mg/l olması yeterlidir) ortamda bulunmalıdır. Metanojenler azot ve fosforla birlikte kükürde de ihtiyaç duymaktadırlar. Kükürdün büyüme için gerekli olan miktarı fosfor ile aynıdır ya da fosfordan biraz daha fazla miktarda olabilmektedir (McCarty, 2001).

Anaerobik sistemlerde gerekli olan diğer elementler iz metalleridir. Bu metaller, metanojenesisde kilit enzimlerin aktivasyonu için gerekmektedir. Anaerobik arıtma prosesi için gerekli olan tüm elementler Tablo 2.3'de verilmektedir.

Tablo 2.3 : Anaerobik arıtmada nütrient gereksinimi

Element	Gereken miktar mg/g KOİ	İstenen fazla konsantrasyon, mg/l	Eklenecek maddenin tipik formu
Makronütrientler			
Azot	5-15	50	NH ₃ , NH ₄ Cl, NH ₄ HCO ₃
Fosfor	0,8-2,5	10	NaH ₂ PO ₄
Kükürt	1-3	5	MgSO ₄ .7H ₂ O
Mikronütrientler			
Demir	0,03	10	FeCl ₂ .4H ₂ O
Kobalt	0,003	0,02	CoCl ₂ .2H ₂ O
Nikel	0,004	0,02	NiCl ₂ .6H ₂ O
Çinko	0,02	0,02	ZnCl ₂
Bakır	0,004	0,02	CuCl ₂ .2H ₂ O
Manganez	0,004	0,02	MnCl ₂ .4H ₂ O
Molibden	0,004	0,05	NaMoO ₄ .2H ₂ O
Selenyum	0,004	0,08	Na ₂ SeO ₃
Tungsten	0,004	0,02	NaWO ₄ .2H ₂ O
Bor	0,004	0,02	H ₃ BO ₃
Genel Katyonlar			
Sodyum		100-200	NaCl, NaHCO ₃
Potasyum		200-400	KCl
Kalsiyum		100-200	CaCl ₂ .2H ₂ O
Magnezyum		75-250	MgCl ₂

2.3.4. İnhibitör maddeler

Tüm biyolojik arıtma tiplerinde bazı maddeler toksisiteye sebep olmaktadır. Toksikite, anaerobik arıtmada aerobik arıtmadan daha büyük problemler oluşturmaktadır. Anaerobik arıtmada arıtılan organik maddenin konsantrasyonu çok yüksek olduğundan dolayı inhibitör maddelerin konsantrasyonları da yüksek olmaktadır. Bununla birlikte anaerobik mikroorganizmaların spesifik büyüme hızları çok düşüktür. Düşük büyüme hızı demek ekonomik olarak kabul edilen biyolojik güvenlik faktörünün düşük olması demektir. Dolayısıyla bu durum anaerobik prosesleri risk altına almaktadır.

Toksikite göreceli bir kavramdır. Bir çok madde düşük konsantrasyonlarda arıtma üzerinde olumlu etkiler oluşturmalarına rağmen, bu maddelerin yüksek konsantrasyonları inhibisyona sebep olmaktadır.

Toksik materyallerin atıksudan uzaklaştırılması için önerilen bir yöntem atıksuyun seyreltilmesidir. Seyreltme pahalı bir yöntemdir çünkü seyreltme ile uygun arıtma verimini sağlayabilmek için daha büyük reaktörlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Toksisite genel olarak mikroorganizmalar tarafından kolaylıkla alınabilen çözünmüş formdaki maddeler tarafından oluşturulur. İnhibitör maddelerin konsantrasyonları çöktürme ya da kuvvetli kompleks oluşturma gibi yöntemler kullanılarak azaltılabilirse reaktör içerisinde inhibisyon önlenmiş olacaktır. Bu bakımdan, bakır çinko gibi ağır metaller sülfür ilavesi ile çözünmeyen çökeltiler oluşturularak ortamdan uzaklaştırılabilmektedirler (McCarty, 2001).

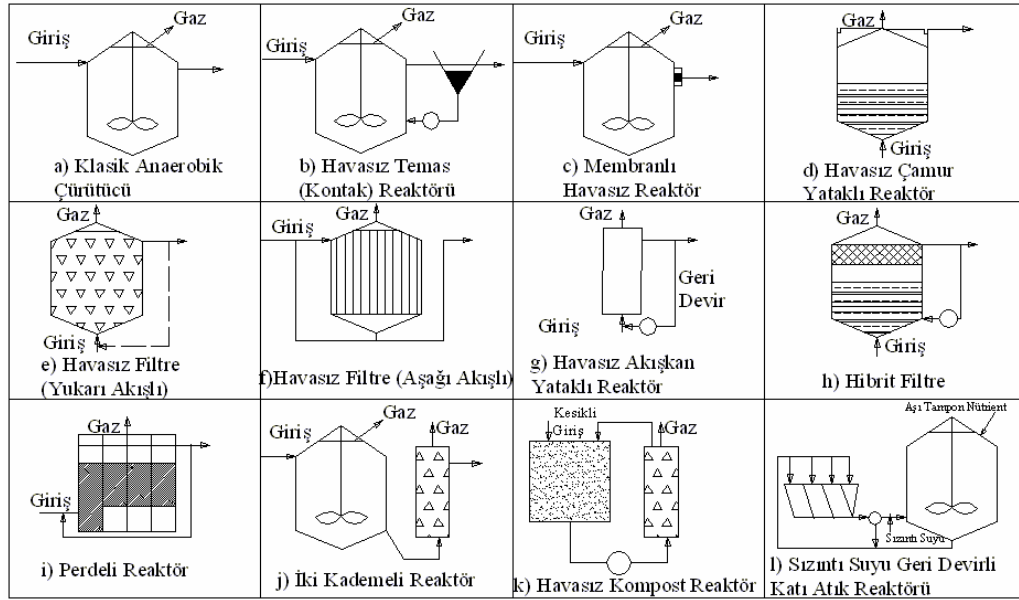
2.4. Havasız arıtma sistemleri

Hacimsel organik yükün olabildiğince artırılarak, havasız reaktör hacminin küçültülmesi ve karşılaşılan problemlerin giderilmesi maksadı ile çeşitli havasız arıtma sistemleri geliştirilmiştir. Havasız arıtma alanında uygulanmakta olan başlıca reaktör tipleri Şekil 2.2’de, organik yük ve KOİ giderme verimleri bakımından genel mukayeseleri ise Tablo 2.4’de verilmiştir. Bu sistemlerin temel karakteristikleri detaya inilmeksizin aşağıda verilmiştir (Öztürk, 1999).

Tablo 2.4 : Havasız arıtma sistemlerinin, organik yük ve verim bakımından mukayesesi

Reaktör tipi	Organik yük kg KOİ/m ³ -gün	KOİ giderme verimi (%)
Havasız temas reaktörü (HTR)	1-6 (3-5)*	80-95
Havasız filtre (HF)	1-18 (7-10)	80-95
Havasız akışkan yataklı reaktör (HAYR)	1-60 (15-30)	80-90
Havasız çamur yatağı (HÇYR)	5-15 (10-15)	85-95
Membranlı havasız reaktör (MHR)	1-30 (15)	85-95

* Parantez içindeki rakamlar, kurulu tesislerdeki uygulanmış yüklerdir.



Şekil 2.2 : Havasız reaktör tipleri

2.4.1. Klasik havasız çamur çürütücü

Tam karışım ve geri devirsiz bir reaktördür (Şekil 2.2.a). Çamur yaşı, hidrolik bekleme süresine eşittir. Yavaş çoğalan metan bakterilerinin yıkanmasının önlenmesi için çamur yaşının 10 günden az olmaması gerekir. Pratikte bu süre 15-20 gün alınır. Hacminin çok büyük olması ve çıkıştaki askıda katı madde konsantrasyonunun yüksek oluşu gibi mahzurları dolayısıyla, klasik havasız çürütücü arıtma çamurlarının çürütülmesi dışında endüstriyel atıksu arıtımında pek kullanılmamaktadır.

2.4.2. Havasız temas reaktörü

Bu prosesin klasik havasız çürütücüden yegane farkı çöktürme tankı ve geri devir düzeni ilave edilmiş olmasıdır (Şekil 2.2.b). Bu suretle çamur yaşı artırılarak sistemin arıtma veriminin yükseltilmesi ve hacminin azaltılması sağlanmaktadır. Bu sistemin uygulamadaki en mühim sorunu anaerobik çamurların çöktürülmesindeki zorluklardır. Sistemdeki askıda katı madde cinsinden çamur konsantrasyonunun 12.000 mg/l'yi aşması halinde çökelmede ciddi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple maksimum organik yükün günde 5 kg KOİ/m³'ü aşmaması gerekmektedir.

2.4.3. Havasız filtre

Havasız filtre, içerisinde kırma taş veya plastik dolgu maddesi bulunan ve tabandan beslenen düşey akışlı bir anaerobik reaktördür (Şekil 2.2.e-f). Dolgu malzemesi bakterilerin tutunması için büyük bir yüzey sağlar. Havasız filtrelerdeki mevcut biyokütlenin yaklaşık %60'ını filtre malzemesinin boşluklarında biriken biyokütle oluşturmaktadır ve organik madde giderimi ekseriyetle bu mikroorganizmalar tarafından giderilmektedir. Çeşitli inhibitörler karşısında biyokütle kaybı sınırlı olup, sistemin yeni durumlara intibakı kolay olabilmektedir. Ancak sistemde biyofilm oluşumu uzun zaman almakta, yüksek miktarda askıda katı madde içeren sularda çabucak tıkanıklık meydana gelmektedir. Sistemin diğer bir dezavantajı ise sentetik dolgu malzemesinin pahalı oluşudur.

2.4.4. Havasız akışkan yataklı reaktör

Biyokütle akışkan haldeki 0,1-0,6 mm çaplı kum, antrasit, aktif karbon gibi ince tanecikli yatak malzemesi yüzeyinde tutunur (Şekil 2.2.g). Akışkan haldeki yatak malzemesinin özgül yüzeyi 2000-5000 m²/m³ gibi yüksek değerlere, biyokütle konsantrasyonları da 30.000 mg/l'nin üzerine çıkabilmektedir. Çok yüksek organik yükler (40-60 kg KOİ/m³-gün) uygulanabilen ve hidrolik bekletme süresi 1,5-3 saate indirilebilen bu sistemin en büyük mahzuru, yatağı akışkan halde tutmak için yaptırılan geri devir sebebiyle terfi maliyetinin bir miktar yüksek olmasıdır.

2.4.5. Havasız çamur yataklı reaktör

Havasız filtrelerdeki sentetik filtre malzemesinin pahalılığı ile askıdaki katı maddelerle tıkanma, büyük debilerdeki aşırı yük ve biyokütle kaybı gibi mahzurları taşımayan ve içerisinde yatak malzemesi bulunmayan bir sistemdir (Şekil 2.2.d). Arıtma, reaktörün alt kısmındaki çamur yatağı ile bunun üst kesimindeki çamur örtüsüne gerçekleştirilmektedir. Beslenen atığın organik madde muhtevasına bağlı olarak, kuvvetli atıklarda çamur yatağı, seyreltik atıklarda ise çamur örtüsü arıtmada ağırlıklı rol oynamaktadırlar. Evsel atıksularda da uygun olan bu sistemle 40.000 mg/l'nin üzerinde biyokütle konsantrasyonuna ulaşılabilir.

Ağır aktif granüler çamur yatağına sahip olması sayesinde bekletme süresinin 3-4 saat gibi değerler alması halinde dahi biyokütle kaybı olmaksızın sistem

işletilebilmektedir. Yüksek verim ve basitliği sebebiyle dünyada en yaygın uygulama alanı bulan sistemdir.

2.4.6. Havasız çamur yataklı filtre

Havasız çamur yataklı filtre, alt kısım havasız çamur yatağı üst kısmı ise havasız filtre olarak teşkil edilen bir reaktördür (Şekil 2.2.h). Filtre kısmının hacmi toplam hacmin %50-70'i arasında değişir. Bu kısımdaki dolgu yüksekliği de 2 m'den az tutulmamalıdır. But tip reaktörlerde arıtmanın çok büyük bir kısmı alt kısımdaki havasız çamur yatağında gerçekleştirilir. Üstteki filtre ise genellikle adeta bir lamelli çökeltici gibi katı/sıvı ayrımını sağlar ve reaktörden biyokütle kaçışını azaltır. Ancak, dolgu malzemesi içinden geçen biyogaz türbülansa sebep olmakta bu sebeple çökeltme beklenen seviyede gerçekleşmemektedir. Bu yüzden dolgu kısmının reaktör dışında teşkil edilmesinin daha faydalı olacağı belirtilmektedir. Bu halde havasız çamur yataklı reaktör çıkışında teşkil edilecek bir yukarı akışlı havasız filtrede ayrıca hidrolik bekletme süresinin 2 saat olması yeterlidir. Havasız çamur yataklı filtrenin 5-10 kg KOİ/m³-gün'lük organik yüklerde başarıyla çalışan bir çok kurulu örneği bulunmaktadır.

2.4.7. Membranlı havasız reaktör

Ana kısmı tam karışım anaerobik bir reaktörden oluşan bu sistemde katı madde ayrımında çökeltme yerine bir ultrafiltrasyon birimi kullanılmaktadır (Şekil 2.2.c). Ultrafiltrasyon birikimindeki gözenekli sentetik membran üzerinden akarken suyu alınan biyokütle hemen sisteme geri döndürülmekte ve böylece çamur yaşı istenildiği kadar arttırılabilmektedir. Genelde KOİ değeri 10.000 mg/l'nin üzerindeki çok konsantre ve debisi nispeten küçük endüstriyel atıklar için uygun olan bu tür sistemlerle, aşı çamuruna fazlaca bağımlı olmaksızın 1-2 hafta sonunda 10-15 kg KOİ/m³-gün'lük organik yüklemelere ulaşılabilmektedir.

2.4.8. Havasız ardışık kesikli reaktör

Havasız ardışık kesikli reaktörde; doldurma, arıtma, çökeltme ve boşaltma devrelerini ihtiva eden kesikli bir işletme uygulanır. Reaktör hacmi, sürekli beslenen reaktörlere göre bir miktar büyük tutularak mükemmel çökeltme özelliği olan granüler biyokütle ile yüksek verimde havasız arıtma sağlanabilir. Çökeltme süresi tipik olarak 30 dak. civarındadır. Havasız ardışık kesikli reaktörde uçucu asit konsantrasyonu genelde

çok düşüktür. Bunun en önemli sebebi, sistemde düşük Ks seviyesinde çoğalabilen metan bakterilerinin selektif olarak gelişmesidir. Havasız ardışık kesikli reaktörler önemli uygulama potansiyeli olan ve işletilmesi kolay bir sistem olarak görülmektedir.

2.4.9. Havasız kompost reaktörleri

Havasız kompost reaktörleri katı madde oranı %20-35 olan organik katı atık ve/veya arıtma tesisi çamurlarının mezofilik veya termofilik işletme şartlarında havasız olarak kompostlaştırıldığı sistemlerdir (Şekil 2.2.k). Özellikle son 10 yıldan bu yana organik kısmı ayrı toplanan evsel katı atıklar ile arıtma çamurları ve zirai atıkların karışımıyla oluşturulan organik katı atıkların 3-4 haftalık hidrolik bekleme süresi sonunda zirai gübre değeri yüksek kompost haline dönüştürülmesi mümkün olmaktadır. Bu sistemde elde edilen kompost, bakteriyolojik emniyet açısından n az 2 haftalık bir havalı kompostlaştırmaya tabi tutularak olgunlaştırıldıktan sonra kullanılmaktadır.

2.4.10. İki kademeli havasız arıtma sistemleri

Havasız arıtma sistemleri, asit ve metan üretiminin tek bir reaktörde meydana geldiği Tek Kademeli Reaktör şeklinde uygulanmak yerine bu iki safhanın, ayrıldığı 2 kademeli, (asit reaktörü – metan reaktörü), reaktörler tarzında da kullanılabilmekte olup son yıllardaki eğilim bu ikinci yöndedir. Faz ayırımına gitmek suretiyle havasız arıtmada organik yükün %50'ye yakın oranda arttırılması mümkündür. Asit reaktörünün metan reaktörü ile aynı tip bir sistem olması da gerekmez. Böyle bir uygulama ile toplam hacimde de %30-40 oranında bir küçülme sağlanabilmektedir. Tam karışımli bir havasız tank veya derin havasız lagün rahatlıkla asit reaktörü olarak kullanılabilir (Şekil 2.2.j). Havasız reaktörlerin tek veya iki kademeli işletme hallerinin karşılaştırılması Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5 : Tek ve iki kademeli işletmenin karşılaştırılması

	Tek Kademeli	İki Kademeli
Avantajları	- Daha az yatırım maliyeti - İşletme ve kontrol kolaylığı	- Daha hızlı işletmeye alma - Prosesin daha kararlı olması - Arıtma veriminin daha yüksek oluşu - Katı organik maddelerin daha iyi parçalanması
Dezavantajları	- Daha uzun sürede işletmeye alma - Daha kararsız proses - Organik yük değişimlerine daha hassas oluşu	- Daha yüksek yatırım maliyeti - Kontrolün daha zor oluşu - Dikkatli pH kontrolü gerekliliği

Günümüzde yaygın olarak kullanılan 3 ana sistem olan havasız çamur yataklı reaktör (HÇYR), havasız filtre (HF) ve havasız akışkan yataklı reaktörün (HAYR) proses davranışları bakımından karşılaştırılması Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6 : Yaygın kullanılan havasız arıtma sistemlerinin karşılaştırılması

Karakteristik Davranış	HÇYR	HF	HAYR
İşletmeye alma	-	-	-
Biyokütle (çamur) gelişimi	++	+	++
Sıvı fazın karışımı	-	+(+)	++
Hidrolik şoklara karşı koyma	-	++	++
Organik şoklara karşı koyma	+	+	+
Askıda katılara duyarsızlık	-	+	++
Tıkanmaya duyarsızlık	++	-	++
Biyokütle yüzme riski	-	+	+
Reaktörün kontrol ihtiyacı	+	+	-

-: yetersiz, +: iyi, ++: çok iyi

Arıtma uygulamaları esnasında bu üç sistemde yaşanan en önemli işletme sorunları Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7 : HÇYR, HF ve HAYR sistemlerinin başlıca işletme sorunları

HÇYR	HF	HAYR
- Yatak genişlemesinin kontrol güçlüğü - Değişken giriş suyu özelliklerine bağlı proses stabilitesi sorunu - Şok yüklerde biyokütle kaybı - İnert (inorganik) katı madde birikimi - Biyokütle yüzmesi (kaçması)	- Giriş akımını uniform dağıtma zorluğu - Yatakta tıkanma ve kanlanma riski - Filtrenin periyodik olarak geri yıkanma gereği - İnert katı madde birikimi - Çıkışta AKM ayırma (çökme) ihtiyacı	- Yatak genleşmesini kontrol güçlüğü - Giriş akımını uniform dağıtma zorluğu - Biyopartikül kaçıışı - Akışkanlaşma özelliklerinin değişkenliği - Biyofilm kopması - Vanalarda arıza - Sürekli geri devir mecburiyeti

2.5. Havasız arıtmanın kinetiği

2.5.1. Giriş

Havasız proseslerin kinetik modellenmesinde, tam karışımlıdan piston akımlıya kadar pek çok reaktör tipi söz konusu olduğundan hidrolik özelliklerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Havasız arıtma gibi hız sınırlayıcı adımı olan kompleks bir prosesin kinetiğinin incelenmesi ve modellenmesinde, mikrobiyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin büyük önem taşımasının nedeni, reaktörün hidroliği hakkında teorik bilgilerden yada iz maddeleriyle yapılan çalışmalardan yeterince bilgi edinilememesi olarak özetlenebilir.

2.5.2. Monod yaklaşımı

Büyümeyi sınırlandırıcı besin maddesi konsantrasyonu ile bakterilerin özgül çoğalma hızı arasında ilişki Monod tarafından,

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot S_1}{K_s + S_1} \quad (2.17)$$

ifadesi ile verilmektedir (Ubay, 1993). Burada;

μ : Bakterilerin özgül çoğalma hızı

X : Mikroorganizma konsantrasyonu

S_1 : Büyümeyi sınırlandırıcı besin maddesi konsantrasyonu

K_s : Yarı hız sabiti

μ_m : Maksimum özgül çoğalma hızı

K : Birim mikroorganizma kütlesi başına maksimum besin maddesi kullanım hızı

Y : Mikroorganizma dönüşüm değeri

$$Y = \frac{dX / dt}{dS / dt} = \frac{\mu_m}{K} \quad (2.18)$$

Monod ifadesi kullanılarak mikroorganizma ve besin maddesi kütle korunumu yukarı akışlı bir reaktör için aşağıdaki şekilde yazılabilir. Mikroorganizma kütle korunumu;

$$V \cdot dX / dt = X \cdot Q - K_d \cdot X \cdot V - Q_w \cdot X_w - (Q - Q_w) \cdot X_e \quad (2.19)$$

olarak verilmektedir. Burada;

V : Reaktör hacmi

X : Reaktördeki mikroorganizma konsantrasyonu

K_d : İçsel solunum katsayısı

Q_w : Sistemden uzaklaştırılan fazla çamur debisi

X_w : Fazla çamurdaki mikroorganizma konsantrasyonu

X_e : Çıkıştaki uçucu katı madde konsantrasyonu

göstermektedir.

Kararlı halde elde edilen sonuç ifadesi,

Kararlı hal: $dx/dt = 0$

$$\mu = \frac{1}{\theta_c} + K_d \quad (2.20)$$

dir. (2.17) ve (2.20) ifadeleri yeniden düzenlenirse aşağıdaki hali alır.

$$\frac{X \cdot \theta}{S_0 - S_1} = \frac{K_s}{K} \cdot \frac{1}{S_1} + \frac{1}{K} \quad (2.21)$$

Burada;

Θ : Hidrolik bekletme süresi; $((V/Q) = \Theta)$

Θ_c : Çamur yaşı; $((X \cdot V/Q \cdot X_e + Q_w \cdot X_w)) = \Theta_c)$

dir.

Besi maddesi korunumu ise,

$$V \cdot \frac{dS_1}{dt} = Q \cdot S_0 \cdot \frac{\mu \cdot X \cdot V}{Y} - (Q - Q_w) \cdot S_1 - Q_w \cdot S_1 \quad (2.22)$$

olup, kararlı halde elde edilen sonuç ifadesi,

$$\mu = \frac{Q \cdot Y \cdot (S_0 - S_1)}{X \cdot V} \quad (2.23)$$

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{S_0 - S_1}{X \cdot \theta} - K_d \quad (2.24)$$

şeklindedir.

2.5.3. Substrat inhibisyon kinetiği

Substrat inhibisyonu ile ilgili yapılan çalışmalar, iyonlaşmamış uçucu asitlerin ayrışma sürecinde hız sınırlayıcı adımı oluşturduğu ve bu maddelerin düşük yada yüksek konsantrasyonlarda inhibisyona neden olduğunu göstermiştir. Monod denklemi, uçucu asitler gibi yüksek konsantrasyonlarda büyümeyi sınırlayıcı ve organizmayı inhibe eden maddeler için geçerli değildir. Bu yüzden inhibisyon etkisini de içeren bir eşitlik teklif edilmiştir (Ubay, 1993).

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + K_s / S + S / K_i} \quad (2.25)$$

Burada;

S : İyonize olmamış uçucu asit konsantrasyonunu (M/L³)

K_i : İnhibisyon katsayısını

göstermektedir.

2.6. Arıtma çamurlarının çürütülmesi

2.6.1. Havasız anaerobik çamur çürütme süreci

Atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkan ham (birincil) ve biyolojik fazla çamurlar havasız ortamda çürütülürler. Havasız çürüme süreci anaerobik bakterilerce gerçekleştirilir. Organik çamurların havasız ayrışma süreci başlıca üç safhada gerçekleştirilir: Hidroliz, Asit Üretimi ve Metan Üretimi.

Hidroliz safhasında çözünmemiş yapıdaki kompleks organik maddeler hücre dışı enzimler vasıtası ile daha basit yapıda organik maddelere dönüştürülür. İkinci safhada, karbonhidrat, yağlar ve proteinlerden oluşan organik maddeler asit bakterilerince uçucu yağ asitlerine dönüştürülür. Metan üretimi safhasında metan bakterilerince ikinci safhanın son ürünü olan asetik asidin parçalanması veya karbondioksit ile hidrojenin sentezi yoluyla metan ve karbondioksit üretilir.

Havasız çürütme işleminden geçen evsel arıtma tesisi çamurları kararlı, kokusuz, patojen organizma konsantrasyonu düşük ve araziye serilebilecek özelliktedir. Havasız çamur çürütme yönteminin başlıca mahzurları, yüksek ilk yatırım maliyeti, işletme güçlükleri ve çıkış suyu kirlilik yükünün fazla oluşudur. Havasız arıtma süreci esas itibarıyla pH, atığın bileşimi ve sıcaklığa bağlıdır. Yüksek organik yüklerde metan üretimi durur, anaerobik reaktörlerde asit birikimi olur ve çıkan gazda CO₂ yüzdesi artar. İyi işletilen çamur çürütücülerde pH=6,7 – 7,4, uçucu asit konsantrasyonu 1000 Hac/l'den ve CO₂ yüzdesi %35'den azdır. Metan bakterileri mezofilik ve termofilik sıcaklık kademelerinde oldukça aktiftirler.

2.6.2. Çamur çürütücü tipleri

Havasız çamur çürütücüler başlıca iki tiptir: düşük hızlı ve yüksek hızlı çürütücüler. Düşük hızlı çürütücülerde ısıtma ve karıştırma uygulanmaz. Hidrolik bekleme süresi yörenin iklimine bağlı olarak 30-60 gün arasında değişir. Yüksek hızlı çürütücülerde ise havasız ayrışma sürecini hızlandırmak gayesi ile ısıtma ve karıştırma uygulanır. Bu tip çürütücüler genellikle seri bağlı 2 reaktör tarzında tertip edilir. İkinci reaktör sıvı/katı ayırımını (çökeltme) gerçekleştirir ve çamur yaşının kontrolüne imkan verir.

2.6.3. Proses tasarımı ve kontrolü

Mezofilik havasız çamur çürütücülerin tasarım ve işletmesinde göz önünde tutulacak en önemli kontrol parametreleri çürütücü hacmi, ısıtma ve sıcaklık kontrolü, karıştırma, gaz üretimi ve kullanımı, reaktör kapak tipi, çıkış suyu kalitesi ve çürümüş çamurların özellikleridir.

2.6.4. Çürütücü hacmi

Çürütme süresi, düşük hızlı (ısıtmasız) çürütücülerde 30-60 gün, yüksek hızlı çürütücülerde ise 10-20 gün alınır.

Çürütücü tasarımında esas alınan hacimsel çamur yükleri, diğer tasarım kriterleri ile birlikte Tablo 2.8'de verilmiştir. Çürütücü hacmi, eşdeğer nüfus başına 120 g KM/gün olarak da alınabilir. Havasız çürütme esnasında organik katıların hacmi azalır ve belli miktar çürümüş su arıtma tesisi başına verilir. Böylece çürütücülerde kalan çamurun hacmi üstel olarak azalır. Gerekli çürütücü hacmi;

$$V = \left(Q_x - \frac{2}{3} (Q_g - Q_c) \right) \cdot \theta \quad (2.26)$$

ifadesiyle hesaplanabilir (Öztürk, 1999). Burada;

V: Çürütücü hacmi (m³)

Q_g: Giren karışık çamur (m³/gün)

Q_c: Çekilen (atılan) çürümüş çamur (m³/gün)

Θ: Çürüme süresi (gün)

dür.

Tablo 2.8 : Çamur çürütücüler için tasarım kriterleri

Parametre		Düşük Hızlı	Yüksek Hızlı
Hacim Kriterleri	Çamur yaşı (gün)	30-60	10-20
	Çamur yükü (kg UKM/m ³ -gün)	0,64-1,60	2,40-6,41
	Ham çamur (ilk çürütme çamuru(m ³ /N))	0,03-0,04	0,02-0,03
	Ham + aktif çamur (m ³ /N)	0,06-0,08	0,02-0,04
	Ham + damlatmalı filtre çamuru (m ³ /N)	0,08-0,14	0,02-0,04
	Beslenen ham + aktif çamur (%KM)	2-4	4-6
	Atılacak ham + aktif çamur (%KM)	4-6	4-6

2.6.4.1. Isıtma ve sıcaklık kontrolü

Havasız çamur çürütme sürecinin optimum şartlarda sürdürülebilmesi için, mezofilik ve termofilik çürütücülerdeki sıcaklıklar sırasıyla 35 °C ve 55 °C civarında tutulmalıdır. Bu yüzden reaktör sıcaklığının belli bir değerde muhafazası için beslenen çamur ve reaktör muhtevasının ısıtılması gerekir. Sağlanan toplam ısı çürütücülerdeki ısı kayıplarını karşılamalıdır. Çamur çürütücüler, duvar, çatı, temel, boru vb. kısımlardan ısı kaybederler. Isıtma sisteminin tasarımı için gerekli ısı kaybı hesapları yapılmalıdır. Çürütücülerin ısıtılması için dahili ısı değiştiriciler, buhar enjeksiyonu ve harici ısı değiştiriciler kullanılabilir. Bunların kısa bir değerlendirmesi aşağıda yapılmıştır:

Dahili ısı değiştiriciler: Bu tür ısı değiştiriciler daha çok eski dönemlerde kullanılmıştır. Isıtıcı yüzeyinin çamur ile kaplanması dolayısıyla ısı transferi kapasitesi önemli ölçüde sınırlanmaktadır. Isıtıcı borular üzerindeki eklemeyi önlemek için borularda dolaşan suyun sıcaklığı 45-55 °C olmalıdır.

Buhar enjeksiyonlu ısıtma: Çürütücü içine buhar pompalanarak ısıtma sağlanır. En önemli üstünlüğü, ayrı bir ısı değiştirici kullanılmayıştır.

Harici ısı değiştiriciler: Çamur çürütücülerde ısıtma maksadıyla genellikle 3 tip ısı değiştirici kullanılır: Su banyolu, caket borulu ve spiral borulu. Tıkanma problemi olmayan spiral borulu ısı değiştiriciler daha pahalı olmalarına rağmen tercih edilmektedir. Sıcak su veya buhar çoğu kere çürütücü gazıyla ısıtılan bir kazandan sağlanır. Bu tip kazanlarda yakılan gazın ısı değerinin %80'i geri kazanılabilir.

2.6.4.2. Çürütücü çatısı (kapağı)

Çamur çürütücü çatısı sabit veya yüzer tipte olabilir.

Sabit çatılı çürütücüler daha ucuzdur ve tankta sabit bir su seviyesini muhafaza etmek üzere tasarlanırlar. Çürümüş çamurun aniden deşarjı sonunda sık sık tanka dışarıdan hava girer ve çürütücü gazını patlayıcı bir karışım haline getirir. Çürütücü gazı havada hacimsel olarak %5-20 oranına ulaştığında patlama riski söz konusudur. Ayrıca çürütücüdeki sıvı seviyesinin yükselmesi halinde de sistem hasar görebilir.

Yüzer çatılı çürütücüler daha pahalı ancak çamur besleme ve boşaltma faaliyetlerinden etkilenmeyen, gazın tehlike riskini azaltan ve kalıcı köpük oluşumunun kontrol edildiği tesislerdir. Genelde 2 tip yüzer kapak tasarımı vardır: Kubbe şeklinde ve yüzer kafes çatı şeklinde. Her iki tip çatıda çürütücü sıvısı üzerinde doğrudan yüzer ve 2~3 m'lik bir düşey hareket serbestliğine sahiptir.

2.6.4.3. Çürütücülerin karıştırılması

Çamur çürütücülerin optimum verimle işletilebilmesi için yeterince karıştırılması gerekir. Karıştırma ile,

- Çamur ile aktif mikroorganizma biyokütlesinin iyice teması
- Çürütücü muhteviyatının homojenliği
- Çürütücüde açığa çıkan metabolik ürünlerin ve beslenen çamurdaki toksik kimyasalların seyreltilmesi
- Üst kısımda köpük oluşumunun önlenmesi

sağlanır.

Çürütücülerin karıştırılmasında, harici çamur sirkülasyon pompaları, dahili mekanik karıştırıcılar ve dahili basınçlı gazla karıştırma teknikleri uygulanabilir.

2.6.4.4. Gaz üretimi ve kullanımı

Çamur çürütme süreci esnasında üretilen biyogaz önemli bir enerji kaynağıdır. Çürütücü gazı %60-70 CH₄, %25-30 CO₂ ve az miktarda H₂, N₂, H₂S ve diğer gazlar ihtiva eder. Bu gazın ısı değeri 21.000 – 25.000 kJ/m³, yoğunluğu ise havanınkinin %86'sıdır. Çürütücü gazı, ısıtma ve motorların tahrikinde kullanılır. Üretilen biyogaz içindeki CH₄ miktarı, havasız arıtmanın kinetiğinden hareketle aşağıdaki ifadeler yardımıyla hesaplanabilir:

Çürütücüde oluşan aktif biyokütle miktarı, P_x:

$$P_x = \frac{Y \cdot Q \cdot E \cdot S_0 \cdot 10^{-3}}{1 + k_d \cdot \theta_c} \quad (2.27)$$

olmak üzere oluşan CH₄ miktarı ise,

$$Q_{CH_4} = 0,35 \cdot \{E \cdot Q \cdot S_0 \cdot 10^{-3} - 1,42 \cdot P_x\} \quad (2.28)$$

dır. Burada;

P_x: Çürütücüde üretilen net biyokütle (kg KM/gün)

Y: Biyokütleyle dönüşüm oranı (evsel atıksu arıtma tesisi çamurlarında Y=0,04 – 0,1 mg KM/mg BOİ kullanılan)

E: Çamur çürütme verimi (0,6-0,9)

Q: Çamur debisi (m³/gün)

S₀: Beslenen çamurun BOİ_u değeri (g/m³)

k_d: İçsel solunum hız sabiti (evsel AAT çamuru için, 0,02-0,04 gün⁻¹)

θ_c: Çamur yaşı (gün)

Q_{CH₄}: Üretilen metan (m³/gün)

0,35: 1 kg BOİ_u'nın CH₄ değeri

1,42: 1 kg UKM'nin BOİ_u değeri

Bununla birlikte çürütücüler ilk beslendiği an skatole, indole, merkaptanlar ve hidrojen sülfür gibi çeşitli sayılarda azot ve sülfür maddelerini içeren aşırı kokulu gazlar üretirler ve çürütücü başlangıç aşamasının ilk fazları sırasında, gazın çoğu CO₂ ve H₂S'dir. Bu bileşim yanmaz ve bu yüzden genellikle atmosfere sızar. Metan formasyonu başlayıp, metan içeriği yaklaşık %60'a ulaştığı zaman gaz yanmaya hazır demektir. Sistemde metan üretimi baskın olmalı ve %65-70 metan ve %30-35 CO₂ hacimlerinde gaz üretmelidir. Çürütücü gazının metan içeriği %50 ise gaz yanabilme özelliğine sahiptir ancak metan içeriği %62'e ulaşana kadar yakıt olarak kullanılmaz. Çürütücüden elde edilen gaz, ısınma yada çürütücülerin ısıtılması amaçlı kullanılabilir (Atilla, 2002).

2.6.4.5. Çürümüş çamur suyu özellikleri

Çürütücü suyu kalitesi, çürütücünün tek veya iki kademeli oluşu, karıştırma durumu ve katı maddelerin ne oranda ayrıldığı v.b. parametrelere göre değişir. Bu sıvı atıksu arıtma tesisine geri döndürülür ve arıtma tesisine önemli oranda ilave kirlilik yükü verir. Yoğunlaştırılmış ham çamur ve biyolojik aktif çamur karışımının çürütüldüğü bir çürütücünün tipik çıkış suyu özellikleri Tablo 2.9'da verilmiştir (Öztürk, 1999).

Tablo 2.9 : Havasız çamur çürütücü çıkış suyu özellikleri

Parametre	Konsantrasyon (mg/l)
Toplam katı madde	3.000-15.000
BOİ ₅	1.000-10.000
KOİ	3.000-30.000
NH ₄	400-1.000
Toplam P	300-1.000

2.6.4.6. Çamur stabilizasyon derecesi ve süzülebilirliği

Çamur çürütücü hacmi 37 °C'lik bir sıcaklık ve 20 günlük çürüme süresine göre boyutlandırılır. Çürüme süresi, belli bir sıcaklıkta %90 stabilizasyon için gerekli süre olarak alınır. Çürütme süresi arttıkça çamurun stabilizasyon derecesi de artar.

Arıtma tesisi çamurlarının stabilizasyon derecesi, çürümüş çamurun BOİ₅/KOİ oranı yerine UKM ve yağ gres muhtevaları izlenmek suretiyle de izlenebilir. Bu aynı zamanda çamurun suyunu daha çabuk bırakması, yani kapiler emme süresinin ya da özgül direncin azalması sonucunu doğurur.

2.6.5. İşletmeye alma ve proses kontrolü

2.6.5.1. İşletmeye alma

Çürütücüye en yakın ve benzer bir çamur çürütme tesisinden aşı ilave edilmelidir. Genellikle çürütücü hacminin %10~20 oranında aşı çamuru sağlanır. Aşı çamurunun doldurulmasını takiben normal çamur beslemesinin %20-25'i oranında ham çamur beslemesine başlanılır. Rekatör, pH, yaz üretimi ve uçucu asit seviyesi izlenerek beslenen debi artırılır. Bu dönemde gerekli pH ve tampon alkalinitenin temini için kireç veya NaOH ilavesi yapılır. Genelde 30 gün sonunda işletmeye alma dönemi sona erer ve arıtma tesisinin günlük çamurunun tamamı çürütücüye verebilecek seviyeye ulaşır. Çamur çürütücülerin işletmeye alınmasında izlenecek adımlar aşağıda toplu olarak verilmiştir.

- (1) Çürütücü hacminin %10~20'si miktarında aşı çamuru, başka bir kurulu çürütücüden temin edilerek çürütme tankına boşaltılır.
- (2) Çürütücünün kalan hacmi evsel atıksu ile doldurulur.
- (3) Çürütücü iyice karıştırılıp ısıtıldıktan sonra, normal günlük besleme debisinin %20-25'ine eşit bir miktarda çamur beslemesi başlatılır ve debi tedricen artırılır.
- (4) Beslenen çamur debisi (kg UKM/gün), UKM, Toplam Uçucu Asit/Alkalinite ve pH, sıcaklık, gaz debisi ve CO₂ oranı izlenir.
- (5) TUA/Alkalinite $\geq 0,8$ ve pH $<6,5$ ise kireç veya Na₂CO₃ ile müdahale edilir.
- (6) Çamur yükü < 1 kg UKM/m³-gün tutulduğu takdirde 30-40 gün sonra oldukça kararlı işletme şartlarına ulaşır.

2.6.5.2. Optimum çevre şartları

Havasız arıtmayı gerçekleştiren mikroorganizma topluluğunun kapasitesinden azami yararlanabilmek için reaktörde optimum çevre şartlarının sağlanması gerekir. Tablo 2.10'da anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartları verilmektedir.

Tablo 2.10 : Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre şartları

Parametre	Optimum Şartlar
Arıtılan atığın bileşimi	Karbon, temel (N,P) ve iz elementler bakımından dengeli olmalı, O ₂ , NO ₃ , H ₂ O ₂ , SO ₄ gibi oksitleyici maddeler, toksik ve inhibitör elementler ihtiva etmemeli.
KOİ/N/P	300/5/1
pH	6,5-8,2
Sıcaklık	25-40 (35-37) °C ~50-60 (55) °C
Alkalinite	1000 – 4000 (2000) mg/l CaCO ₃
Toplam Uçucu Asit	<1000-1500 mg/l Asetik asit olarak
Toplam Uçucu Asit/Alkalinite	<0,1

Havasız bir reaktörün bozulmaya başladığı, uçucu asit konsantrasyonunun ani artışı ile kendini belli eder. Uçucu asit artışının nedeni ise şok yükler, besi maddesi eksikliği ve sisteme inhibitör maddelerin karışması olabilir. Uçucu asitlerin en az problemlisi asetik asit en çok problemlisi ise propiyonattır. Sistem alıştırılsa bile 3000 mg/l'nin üzerindeki propiyonik asit konsantrasyonlarında metan bakterileri belli ölçüde inhibe olmaktadır.

Havasız şartlarda sülfat ve kükürdün diğer okside olmuş bileşikleri kolayca (H₂S ve HS⁻) indirgenirler. Mikrobiyolojik faaliyetler sonucu katyonik yapılarına bağlı olarak çözünabilir veya çözünemez forma getirilebilirler. Etal sülfidlerin çoğu gibi tuzlar çözünmez forma getirilebilirlerse sistem üzerindeki etkileri ihmal edilebilir. Demir ilavesi ile çözültiden S⁻² iyonları giderilerek sülfid inhibisyonu belli ölçüde kontrol altına alınabilir (Ubay, 1993).

Mikrobiyolojik faaliyetleri durduran ya da yavaşlatan zararlı maddelerin işletmeye alma esnasında da dikkatlice kontrolü gereklidir.

2.6.5.3. Köpük oluşumu ve kontrolü

Fazla miktarda gaz çıkışı çürütücülerde kaçınılmaz olarak kalıcı köpük tabakasına yol açabilir. Belirli bir sebebi olmaksızın çürütücü sıvısı üzerindeki köpük tabakası kalınlığı artarak gaz depolama tankı yüzer kapağı kenarlarından dışa kaçabilir ve hatta gaz borularına kaçabilir. Hidrolik kalış süresinin 10 günden küçük olduğu hallerde de köpük sorunu yaşanmaktadır. Çürütücü üst kısmındaki kararlı köpük

tabakasını ortadan kaldırmak üzere mekanik karıştırma ve bu kısma köpük söndürücülü su püskürtme gibi tedbirlere başvurulmaktadır. Köpük, çürütme tankının iyi bir şekilde işletilmesini engelleyecek derinlikte birikmeye başlar ve biriken köpük miktarı daha da artarak gaz borusunun içine girer ve gaz çıkışını engeller. Bu konuyla ilgili detaylı bir çalışma yapılmamasına rağmen, köpük genelde, gaz üretiminin kuvvetli olduğu dönemlerde ((a) işletmeye alma dönemlerinde, (b) inhibisyona uğramış reaktörü inhibisyona neden olan etkenlerden arındırdıktan sonraki dönemlerde, (c) reaktör yükünün hızlı bir şekilde artırılması dönemlerinde) baş gösterir. Bazı araştırmacılara göre köpük, yağların enzimatik hidrolizi ile reaktör içerisinde oluşan ve doğal sabunlar olarak da bilinen uzun zincirli yağ asitlerinin reaktörde birikmesi sonucu oluşmaktadır. Böyle bir durumla karşılaşıldığında köpüğün ortadan kalkması için yapılacak tek şey reaktörün birkaç gün ham çamur ilave edilmeden dinlenmeye alınmasıdır (Mosey ve Foulkes, 1984).

2.6.5.4. İnhibitör ve zehirli maddeler

Çamur çürütücülerin organik maddeleri ayrıştırma verimleri, sisteme beslenen çamur içindeki çeşitli inhibitör maddeler sebebiyle belli ölçüde değişim gösterebilir. Çamur çürütme sürecini belirgin oranda inhibe eden ve pratikte sık rastlanan inhibitör maddelerin zehirlilik eşikleri Tablo 2.11’de verilmiştir (Mosey ve Foulkes, 1984)

Tablo 2.11 : Katı madde oranı %4,5 olan evsel atıksu arıtma tesisi çamurunun çürütüldüğü bir çürütücü için inhibitör madde zehirlilik sınır konsantrasyonları

Madde	Zehirlilik eşiği (mg/l)
Anyonik deterjanlar	900
Metilen klorür, CH ₂ CL ₂	1000
Kloroform, CHCL ₃	0,5-1,0
Karbon tetra klorür, CCL ₄	2-10
1,1,1-trikloroetan	2,25
Monoklorobenzen	900
Ortodiklorobenzen	900
Peradiklorobenzen	1300*
Pentakloro fenol	1-2
Siyanür	3-30**
Zn	590***
Ni	530***
Pb	1800***
Cd	1000***
Cu	850***

* atıksu arıtma tesisi girişindeki konsantrasyon

** başlangıçta çok zehirli ancak zamanla anaerobik bakteriler alışabilir

*** zehirlilik etkisi metal sülfürü oluşumuna bağlı olarak değişir.

2.7. Anaerobik çamur çürütme konusundaki önemli bazı çalışmalar

Zeeman ve diğ. (1997), bu çalışma ile daha yüksek reaktör yüklemelerini mümkün kılabilmek amacıyla yukarı akışlı anaerobik katıları gideren reaktörlerde (UASR) AKM ve yağ giderimini sağlamaya çalışmışlardır. Bilindiği gibi yüksek miktarda AKM ve yağ içeren kompleks atıksuların, tek adımlı anaerobik atıksu arıtma sistemlerinde arıtımının uygulanması, bu bileşenlerin çamur yatağında birikmesi ile sınırlandırılmaktadır. Bu birikme çamur bekletme süresini ve çamurun metanojenik aktivitesini azaltmaktadır. Bu sebeple çalışmada ham çamur, aktif çamur ve süt ürünleri atıksuları UASR reaktöründe ön arıtmaya tabi tutulmuşlardır. Ham çamurun 17 °C'de 3 saat hidrolik bekletme süresinde arıtımı sonucunda KOİ %65 oranında çamur yatağında tutulmuş, KOİ'si 2 g/l olan atık aktif çamur ise 20 °C'de ve 9,6 saat hidrolik bekletme süresinde arıtıma tabi tutulduğunda askıda katı maddeden kaynaklanan KOİ'nin %98'i giderilebilmiştir. Her iki durumda da kompleks atıksu, %6-7 oranında asidifikasyona uğramıştır. Süt ürünleri atıksuyu ise genellikle çözünmüş ve koloidal KOİ'ye sahiptir. Yağlar, protein bir membran tarafından çevrelenmiştir ve bu proteinler pH<4,6'da çökelmektedirler. 20 °C'de ve 4,5 saat hidrolik bekletme süresinde atıksuda bulunan laktozun %57'si asidifiye olmakta ve bunun sonucunda pH 4'e düşüp %98 yağ giderimi gerçekleşmektedir. Sonuç olarak UASR reaktörleri, yağlar ve askıda katı maddeden kaynaklanan KOİ için çok yüksek giderim verimlerine sahiptir ancak tutulan KOİ kısmi olarak hidroliz olabilmektedir. Oluşan çamur ise termofilik veya mezofilik şartlarda metan gazı üretimi amacıyla çürütülebilmektedir.

Elmitwalli ve diğ. (1999), evsel atıksu çamurunun düşük sıcaklıkta yukarı akışlı anaerobik çamur reaktöründe ve anaerobik hibrit reaktöründe arıtımı üzerine çalışmışlardır ve 13 °C sıcaklıkta ortalama 0,73 mm çapa sahip küçük çamur granülleri içeren 2 anaerobik hibrit reaktörde (AH) ve bir UASB reaktöründe (her biri 3,84 litre hacme sahip) çamurun arıtımını araştırmışlardır. AH reaktörlerde kullanılan ortam, dikey poliüretan köpük levhalarından oluşturulmuştur. Reaktörler 8 saatlik hidrolik bekletme süresinde işletilmiştir. Küçük çamur granüllerinin kullanımı ve reaktörlerin düşük yukarı akış hızında işletilmesi (1,8 m/gün) UASB reaktörleri için askıda KOİ giderim verimlerini arttırmıştır. Bununla birlikte UASB ile karşılaştırıldığında AH reaktörlerde levhaların kullanılması ile askıda KOİ giderim verimlerinin anlamlı derecede arttığı görülmüştür ve ön çökeltme tabi tutulmuş

çamur için %87'e ulaşmıştır. Ham çamur yerine ön çökeltme tabi tutulmuş çamurun AH reaktörlerde arıtımı koloidal ve çözünmüş KOİ giderim verimlerini sırasıyla %13 ve %12 oranlarında arttırmıştır. Bununla birlikte UASB reaktörleri içinse koloidal KOİ giderimi %13 oranında artmıştır. Ön çökeltme tabi tutulmuş çamur için kararlı hale ulaşıldığında, AH reaktörlerde toplam KOİ giderimi %64'e ulaşmıştır ki bu rakam UASB reaktörlerindeki toplam KOİ gideriminden %4 fazladır. Dolayısıyla, evsel çamurun düşük sıcaklıklardaki anaerobik arıtımı, ön çökeltme tabi tutulmuş çamurun küçük çamur granülleri içeren yüzeysel AH reaktörlerde arıtılması ile gerçekleşebilmektedir.

Müller ve diğ. (1998), anaerobik çürütmenin iyileştirilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışma ile aşağıdaki konular sırasıyla incelenmiştir:

- Fazla çamurun mekanik olarak disintegrasyonu,
- Disintegrasyona uğratılmış fazla çamurun parçalanması,
- Anaerobik çamurların ozonlanması,
- Disintegrasyona uğratılmış ya da ozonlanmış anaerobik çamurların çürütülmesi,
- Disintegrasyona uğratılmış ve çürütülmüş çamurların susuzlaştırılması

Çalışmada hücrelerin mekanik olarak disintegrasyonu, disintegrasyonun etki derecesi ve çürüme parametrelerinin anaerobik prosesler üzerine olan etkisi 4 farklı metot kullanılarak incelenmiştir. En iyi sonuçlar karıştırılmalı küre öğütücü ve yüksek basınç homojenizörü ile elde edilmiştir. Özellikle sabit yatak reaktörleri kullanıldığında (hareketsizleştirilmiş mikroorganizmalar) disintegrasyon sonucu parçalanma hızlanmakta ve çürüme süresi kısalmaktadır. Böylece çamur bekletme süresi 4 günden az olan ve yüksek çamur yükleme hızlarına sahip anaerobik prosesler uygulanabilir olmaktadır. Bu uygulamalar ile gereken çürütücü hacmi azaltılmış olup inşaat maliyetleri düşmektedir. Çürütülmüş çamurun ozonlanmasını takiben yapılan mekanik disintegrasyon ile inert organik bileşiklerin biyolojik olarak parçalanabilirliği iyileşmekte ve ikinci bir anaerobik proses sonucunda çürütülmüş çamur daha yüksek verimle parçalanabilmektedir. Diğer yandan partiküler madde yapısını bozmak, polimer madde ihtiyacını arttırmakta ve susuzlaştırma çalışmalarında hiçbir iyileşme görülmemektedir. Havalandırma tanklarına geri

döndürülen çamur suyu, daha kirli bir yapıya sahiptir ve anerobik çürümenin daha iyi gerçekleşebilmesi için gerekli olan amonyak konsantrasyonunu arttırmaktadır.

Oropeza ve diğ. (2001), biri mezofilik diğeri ise termofilik şartlarda işletilen 5 litre hacminde, yumurta biçimli 2 reaktör kullanarak patojen mikroorganizmaların ve parazitlerin giderimini karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Her iki reaktör işletmeye alma aşamasında anaerobik arıtma tesisinden alınan arıtılmış çamur ile ve stabilizasyon aşamasında ise evsel atıksuyu arıtan aktif çamur tesisinden alınan arıtılmış çamur ile doldurulmuştur. Sonuçlar anaerobik termofilik çamur çürütücülerin mezofilik çürütücülere göre patojenleri ve parazitleri gidermedeki veriminin çok yüksek olduğunu göstermiştir. Anaerobik termofilik çürütme, EPA (1996)'nın "Sınıf A" tipi biyo-katılar için olan standartları ile uyumaktadır. Dolayısıyla, biyolojik çamurun termofilik anaerobik çürütümünün Sınıf A biyo-katıların üretimi için uygun teknoloji olduğu anlaşılmıştır ve bu katılar tarımda sınırlamalar olmadan kullanılabilecektir.

Wu ve diğ. (2001), anaerobik çamur üst suyuna $Mg(OH)_2$ uygulanmasının, nütrient giderimi ve çamur çürütmenin iyileştirilmesi üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla çamur çürütme verimini iyileştirmek ve anaerobik çamur üst suyundan fosforu gidermek amacıyla magnezyum hidroksit ($Mg(OH)_2$) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada anaerobik çamur çürütümü üzerine magnezyum hidroksitin etkisi araştırılmıştır. İkinci aşamada ise anaerobik çamur üst suyundan nütrientlerin giderimi için $Mg(OH)_2$ 'nin kullanımı incelenmiştir. Anaerobik çamur çürütümü için her biri 32 litre hacimli 2 adet pilot ölçekli reaktör kullanılmıştır. Nütrient giderimi içinse hem laboratuvar ölçekli hem de pilot ölçekli ekipmanlar kullanılmıştır. Sıcaklık 35 ± 1 °C'de tutulmuştur. 2 deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir ve her 2 çalışmada da 300 mg/l $Mg(OH)_2$ dozlaması yapılmıştır. Sonuçta $Mg(OH)_2$ ilavesi yapılan çürütücü kontrol reaktörüne göre daha yüksek verimle TKM, UAKM, Toplam KOİ ve süzölmüş KOİ giderimi gerçekleştirmiştir. $Mg(OH)_2$ eklenmesi ile çamur üst suyundaki amonyak azotu ve fosfat konsantrasyonu kontrol reaktörüne göre çok daha düşük konsantrasyonlara ulaşmıştır. Böylece reaktörün başına dönecek olan su daha az konsantrasyonda nütrient içerecektir. Normal durumda çamur çürütülmesi sonucunda çamurun susuzlaştırılması zorlaşmakta iken, $Mg(OH)_2$ ilavesi ile çamurun çürütülmesinden önce veya sonra çamurun susuzlaştırılması üzerine herhangi bir etki olmadığı ve

çamur susuzlaştırmanın iyileştiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte $Mg(OH)_2$ eklenen reaktörde kontrol reaktörüne göre daha yüksek hızlarda gaz üretimi gerçekleşmiştir. Sonuç olarak laboratuvar ölçekli ve pilot ölçekli çalışmalar sonunda anaerobik çamur üst fazına $Mg(OH)_2$ eklenmesi ile yüksek konsantrasyonlarda fosfor gideriminin gerçekleşeceği kanıtlanmış olmuştur. Gereken reaksiyon zamanı ise başlangıç fosfor konsantrasyonu ve $Mg(OH)_2$ dozajına bağlıdır.

Yangin Gomec ve Speece (2003), evsel birincil çamurun anaerobik çözünürlüğü üzerine pH'ın etkisini incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Çalışmada kullanılan evsel birincil çamur ve aktif çamur Whites Creek Atıksu Arıtma Tesisi'nden alınmıştır. Birincil çamurun katı madde içeriği %4.3, UAKM/TKM oranı %63 civarında olup pH'ı 5,9'dur. Aktif çamurun ise UAKM/TKM oranı %86 olup pH'ı 6,7'dir.

Çalışma esnasında 2 litre kapasiteli kesikli olarak işletilen anaerobik reaktörler kullanılmıştır. Çürütme işlemi 20 gün boyunca 35 °C'de sabit bir sıcaklık odasında gerçekleştirilmiştir. Anaerobik reaktörlerden ikisi birincil çamur ile diğer ikisi ise aktif çamurla beslenmiş ve reaktörlerde sürekli karışım sağlanmıştır. Tüm reaktörlerde pH, pH probu ile sürekli olarak ölçülmüş ve pH kontrollü reaktörlerde pH 6,5'a sabitlenirken, pH kontrolsüz reaktörlerde pH'ın değişkenliğine izin verilmiştir.

Birincil çamur ile beslenen pH kontrolsüz reaktörlerde TKM ve UAKM giderimi sırasıyla %25 ve %32 iken, pH kontrollü reaktörlerde TKM giderimi %26 ve UAKM giderimi %43 olarak gözlenmiştir. pH kontrol edilmediği durumda gerçekleşen TKM ve UAKM giderimi beklendiğinden daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise pH'ın kontrol edilmediği reaktörlerde pH'ın amino asit fermentasyonundan salınan amonyak tamponlaması yüzünden 5,5'un altına düşmemesindendir.

Aktif çamur ile beslenen pH kontrolsüz reaktörlerde TKM ve UAKM giderimi sırasıyla %44 ve %55'dir. Buna karşın pH kontrollü reaktörlerde TKM ve UAKM giderimi sırasıyla %57 ve %72'dir. pH kontrolsüz reaktörlerle pH kontrollü reaktörler karşılaştırıldığında pH kontrollü olan reaktörlerde giderim daha yüksektir.

Birincil çamur ile beslenen pH kontrolsüz reaktörlerde 5 güne kadar UAKM giderilmesine karşılık uçucu yağ asitleri (UYA) ve çözünmüş KOİ oluşmuştur. Üretilen UYA genel olarak asetat ve propiyonattır. pH kontrollü reaktörlerde de 5 güne kadar UAKM giderimine karşın UYA ve çözünmüş KOİ oluşmuştur. 5 gün

sonunda UYA'nın azalması ile birlikte metanojenik safha başlamıştır. pH kontrollü reaktörlerde asidojen safha daha kısa olup metanojen safha önemli rol oynamaktadır. Çözünmüş KOİ 5 gün sonunda metana dönüşmektedir. İlk adımda sürekli karışımli anaerobik reaktörler kullanılması ile bir sonraki reaktördeki metanojen safhasının kolaylaştırılmış olduğu anlaşılmıştır. pH kontrolsüz reaktörlerde hidroliz ve asidojenesis safhalarının tamamlanması için uzun bekletme sürelerine ihtiyaç olduğu görülmüştür.

Aktif çamur ile beslenen pH kontrollü ve kontrolsüz reaktörlerde UYA konsantrasyonları herhangi bir asidojenesis veya metanojenesis safha göstermemiştir ve UAKM giderimleri UYA üretimleri ile sonuçlanmamıştır. pH kontrollü reaktörlerde UAKM giderimi sırasındaki çözünmüş KOİ üretimi UYA olarak ölçülememiştir. Deneysel çalışmalarda bulunan UYA'ler asetik asit ve propiyonik asittir. İso-bütirik asit ve bütirik asit görülmemiştir. pH kontrolsüz reaktörlerde ise TKM ve UAKM giderimi olmasına rağmen çözünmüş KOİ'de anlamlı bir yükselme görülmemiştir. Tek adımlı anaerobik çürütücülerde aktif çamurun çürütülmesi için yüksek çamur bekletme süreleri gerekmektedir. Çünkü aktif çamur çok yüksek konsantrasyonda AKM'e sahip sulu bir çözeltidir. pH kontrolsüz reaktörlerde pH işletme sonunda 4 civarına düşmüştür ve düşük pH'lar asit üreten bakteriler üzerinde inhibisyona sebep olmaktadır. Sonuçlar pH kontrolünün anaerobik parçalanmayı hızlandırmakta olduğunu göstermektedir.

Angelidaki ve diğ. (2004), lineer alkil benzen sülfonat (LAS) eklenen çamurun anaerobik parçalanmasını tek adımlı sürekli karışımli reaktörde ve iki adımlı reaktör sisteminde (ilk adım CSTR ve ikinci adım yukarı akışli anaerobik çamur yatağı (UASB)) incelemişlerdir. LAS'ın anaerobik giderimi sadece ikinci adım arıtmada görülmüştür. LAS'ın UASB reaktörlerindeki giderimi yaklaşık olarak %80 civarındadır ve bunun yarısı absorpsiyonla diğer yarısı ise biyolojik giderimle gerçekleşmektedir. Kesikli olarak gerçekleştirilen deneylerde 50 mg/l'nin üstünde olan LAS konsantrasyonlarının anaerobik proses mikrobiyal grupları için inhibitör etkisi olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple başlangıçta düşük LAS konsantrasyonları iyi bir LAS giderimi için önceden olması gereken bir durumdur. Sonuç olarak anaerobik proseslerdeki aktif mikroorganizmanın inhibisyonunu engelleyecek kadar düşük LAS konsantrasyonları olduğunda UASB reaktörlerde LAS'ın anaerobik olarak parçalanması mümkündür.

3. KOİ BİLEŞENLERİ VE İNERT KOİ

3.1. KOİ'nin bileşenlere ayrılması

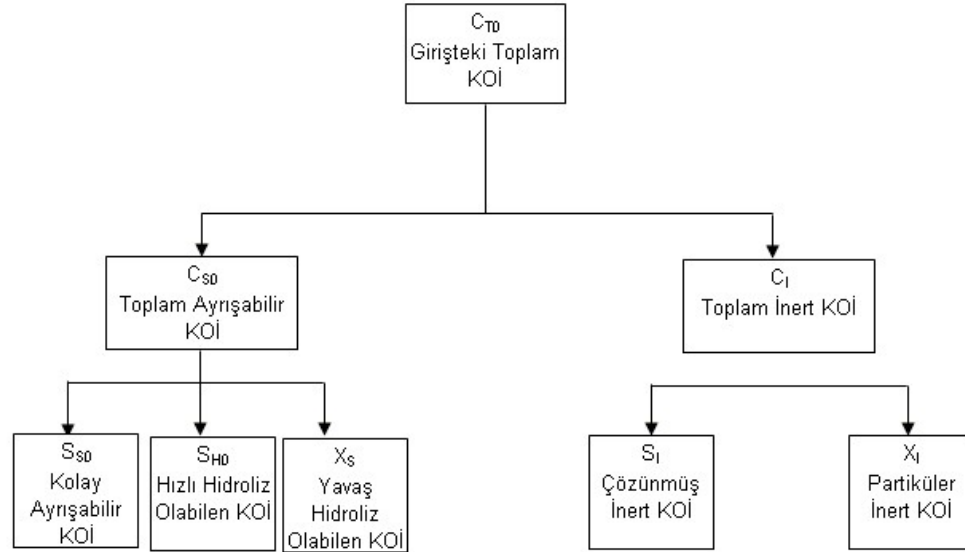
Aktif çamur sistemlerinde substratın biyolojik ayrışması sonucunda ortama, bir miktar biyolojik açıdan ayrışamayan inert ürünler bırakılmaktadır. Bu sebeple inert KOİ, giriş suyunda bulunabileceği gibi biyolojik ayrışma esnasında kalıcı mikrobiyal ürünlerden de meydana gelebilir.

Organik karbonu karakterize eden KOİ parametresi, biyolojik ayrışabilme özelliklerindeki farklılıklara bağlı olarak farklı tiplerden oluşur. Bu anlamda, toplam giriş KOİ'si (C_{T0}) iki ana bileşene sahiptir; biyolojik olarak ayrışamayan ya da inert KOİ (C_{I0}) ve toplam biyolojik olarak ayrışabilen KOİ (C_{S0}).

İnert KOİ, çözünmüş inert KOİ (S_I) ve partiküler inert KOİ (X_I) olarak ikiye ayrılabilir. Çözünmüş inert KOİ, reaktördeki biyokimyasal reaksiyonlardan etkilenmeksizin sistemden girdiği gibi çıkarken, partiküler inert KOİ, aktif çamur tarafından bünyesine alınır ve birikime uğrar, atılan çamur ile sistemi terk eder (Aydın, 2002).

Biyolojik ayrışabilir KOİ iki önemli bileşen ile tanımlanmıştır: Kolay ayrışabilir KOİ (S_{S0}) ve yavaş ayrışabilir KOİ (X_{S0}). Bu iki bileşen farklı biyolojik ayrışma hızlarına sahiptir.

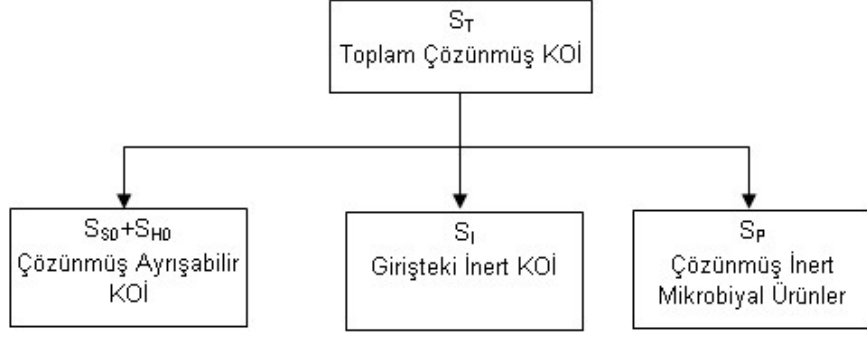
Biyolojik olarak yavaş ayrışabilen kısmın temel özelliği, hücre duvarından geçememesi ve adsorpsiyonları için hücre dışı hidrolize ihtiyaç duymasındır. Hidroliz, biyolojik olarak yavaş olarak ayrışabilen organik maddelerin kullanım hızından dolayı hız sınırlayıcı adımı oluşturmaktadır. Atıksudaki farklı maddeler için önemli değişiklikler gösterdiğinden, hidroliz hızının tek bir değeri için, bu bileşenin karakterize edilmesi güç olmaktadır. Bu sebeple bu bileşen ile ilgili bir diğer yaklaşım hızlı hidroliz olabilen KOİ (S_{H0}) ve yavaş hidroliz olabilen KOİ (X_{S0}) şeklindedir. Atıksularda bulunan KOİ bileşenleri ile ilgili bileşenler Şekil 3.1'de verilmektedir.



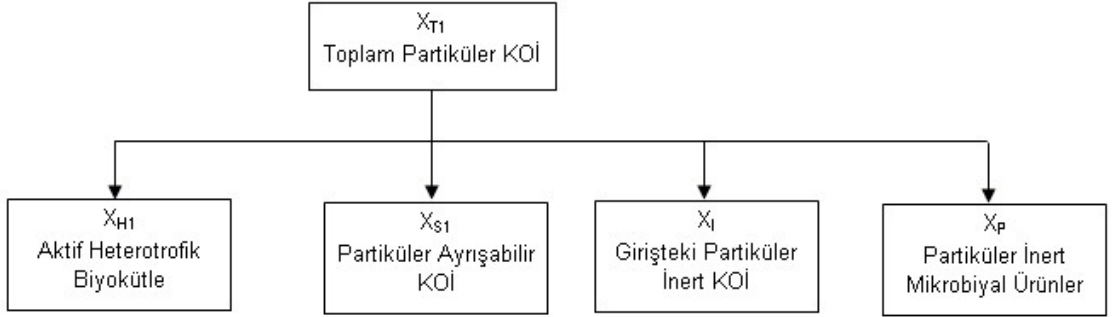
Şekil 3.1 : Atıksuda KOİ bileşenleri dağılımı (Aydın, 2002)

Biyolojik arıtmada çıkış akımında, giriş atıksuyundan daha farklı bir KOİ yapısı görülür. Çözünmüş KOİ (S_{T0}), atıksudan kaynaklanan ve sisteme girdiği gibi çıkan biyolojik olarak ayrışmayan kısmı (S_I), biyolojik oksidasyondan kalan az miktarda biyolojik olarak ayrışabilir KOİ ve metabolik olarak oluşan kalıcı çözünmüş KOİ (S_P)'yi kapsar. Sonuç olarak çıkış akımı genellikle atıksudan daha fazla çözünebilir inert KOİ içerir (Aydın, 2002).

Benzer olarak partiküler KOİ, çıkış akımında 4 bileşene sahiptir. Başlıca bileşen, karbon ve enerji kaynağı olarak biyolojik ayrışabilir KOİ'yi kullanan reaktör içinde tutulan aktif biyokütle (X_H)'dir. Diğer bileşen hidroliz ve sonrasında kullanımdan kalan partiküler yavaş ayrışan biyolojik ayrışabilir organiklerin küçük bir kısmı olan X_S 'dir. Çıkış akımı ayrıca, çamur tarafından tutulan ve reaktörde biriken giriş akımında mevcut partiküler inert KOİ'yi de (X_I) içerir. Dördüncü bileşen, içsel solunum veya ölüm fazı sırasında, mikrobiyal metabolik aktivite sonucu oluşan partiküler inert organik ürün olan X_P 'dir. Çıkış akımındaki KOİ bileşenleri dağılımı Şekil 3.2'de verilmiştir.



(a) Çözünmüş KOİ bileşenleri



(b) Partiküler KOİ bileşenleri

Şekil 3.2 : Çıkış akımındaki KOİ bileşenleri dağılımı (Aydın, 2002)

3.2. İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla yapılmış önemli bazı çalışmalar

Yılmaz ve Ozturk (1995), fermantasyon endüstrilerinden kaynaklanan atıksuların inert çözünmüş KOİ'sini belirlemişlerdir. Bu amaçla; ham proses atıksuyu, anaerobik ön arıtma tesisi atıksuyu ve evsel ve yıkama atıksuları karışımını içeren maya endüstrisi atıksuları için bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmişler ve sonuçta maya endüstrisi ham atıksuyu için inert KOİ oranını (S_I/S_0) 0,1 olarak belirlemişlerdir.

Çalışmada kullanılan atıksuyun KOİ'si 10.000 – 30.000 mg/l arasında, pH'ı ise 5 – 7,4 arasında değişmektedir. Bu atıksu ilk adımda anaerobik arıtmaya tabi tutulmuş ve oluşan anerobik arıtma çıkışı aerobik arıtma tesisine verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda 2 litre hacimli silindirik kesikli reaktörler kullanılmıştır. Kesikli olarak çalışan bu reaktörlerde yeterli derecede havalandırma yapılmıştır.

Reaktörler için gerekli olan aşı maya endüstrisi (Pakmaya) atıksuyunu arıtan ikinci adım tam ölçekli aktif çamur arıtma tesisinden alınmıştır ve %50 glikoz ve %50 atıksu karışımına aklime edilmiştir. pH 7-7,1 civarına ayarlanmıştır. Analizler için 15-25 ml kadar numune reaktörlerden çekilmiş ve buharlaşma ile oluşan su kayıpları distile su ile takviye edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda maya endüstrisi ham atıksuyu için giriş inert KOİ oranı (S_I/S_0) 0,1 olarak belirlenmiştir. İlk adımdaki anaerobik arıtma tesisi çıkışı için başlangıç inert KOİ oranı ise 0,2 ile 0,3 arasında değişmektedir. Aerobik arıtmadan önce gerçekleştirilen amonyak sıyırmasının ise S_I/S_0 değeri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Mevcut aerobik arıtma tesisinin giriş atıksuyunu simüle eden çıkış atıksuyu için S_I/S_0 değerleri 0,18 ile 0,48 arasında değişmektedir. Aralığın bu denli büyük olmasının sebebi mevcut tam ölçekli anaerobik arıtma tesisindeki işletme şartlarından kaynaklanmaktadır.

Germirli ve diğ. (1991), endüstriyel atıksuların başlangıç inert çözünmüş KOİ'sini belirlemeye çalışmışlardır. Bunun için 2 farklı yöntem karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Uygulanan metotlar KOİ değeri 1000 ile 9300 mg/l arasında değişen 5 farklı endüstride (kağıt endüstrisi, et işleme endüstrisi, antibiyotik endüstrisi, tekstil ve süt ürünleri endüstrisi) denenmiştir. Uygulanan metotlardan ilkinde, başlangıçtaki giriş KOİ konsantrasyonu (S_{S0}) ile deneysel çalışmalar sonunda KOİ'nin ulaştığı en düşük değerler arasında lineer bir ilişki belirlenmiştir. Başlangıçta işletmeye alma, çözünmüş inert KOİ'ye sahip atıksu ile yapılmıştır. Daha sonraki işletmeye alma dönemlerinde çözünmüş inert KOİ değeri sıfır olan glikoz kullanılmıştır. Böylece mikrobiyal ürünlerin oluşumunun önemi irdelenmiştir. Uygulanan ikinci metot birinci metoda göre daha basit bir yapıya sahiptir. Bu yöntemde birbirine paralel olarak çalışan 2 adet kesikli reaktör içerisine başlangıç KOİ'si aynı olacak şekilde atıksu ve glikoz beslemesi yapılmıştır. Sonuçta aşağıdaki denklemleri kullanarak (S_{I0})_{atıksu} belirlenmiştir. Bu yöntemde her iki sistemin başlangıç KOİ değerinin eşit olması gerekmektedir.

$$(S_{I0})_{atıksu} = (S_{I0} + S_{Rt})_{atıksu} - (S_{Rt})_{glikoz}$$

$$(S_{Rt})_{atıksu} \approx (S_{Rt})_{glikoz}$$

Sonuç olarak her bir endüstrinin atıksularının inert KOİ değeri, her iki metodun uygulanması ile belirlenmiştir. İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kullanılan ikinci

metot daha basit olmasına karşın hatalara yatkındır. Çünkü antibiyotik endüstrisi atıksuyunda olduğu gibi yüksek KOİ konsantrasyonuna sahip atıksularda aklımasyon ve substrat inhibisyonu problemleri oluşmaktadır. Bu sebeple ikinci yöntem hataya açık bir yöntemdir.

Germirli ve diğ. (1993), inert KOİ içeriklerini belirlemek amacıyla sitrik asit tesisi çıkış atıksuyunu ve peynir altı suyu atıksuyunu incelemişlerdir. Çalışmanın amacı kuvvetli atıksuya sahip 2 tesisin inert KOİ bileşenlerini belirlemek ve bu bileşenler üzerine iki adımlı biyolojik arıtmanın etkilerini gözlemlemektir. Bu açıdan çözünmüş ve partiküler kalıntı KOİ'yi deneysel olarak belirlemek amacıyla önerilen yeni bir metot uygulanmıştır. Temel olarak birbirine paralel olarak çalışan iki havalandırmalı kesikli reaktör kullanılmıştır. Reaktörlerden biri filtre edilmemiş atıksu ile diğeri ise filtre edilmiş atıksu ile doldurulmuştur ve biyolojik aktivitenin son bulunduğu ana kadar toplam ve çözünmüş KOİ değerleri kayıt edilmiştir. Bu metot, sitrik asit atıksuları ile peynir altı suyuna uygulanmıştır. Bu tesislerin her biri iki adımlı arıtmaya sahiptir. Buna göre atıksular önce anaerobik biyolojik arıtmadan, daha sonra ise aerobik biyolojik arıtmadan geçmektedirler. Peynir altı atıksuyunun anaerobik tesise giriş KOİ değeri 60.000 mg/l olup anaerobik tesisten çıkıştaki KOİ değeri 2750 mg/l'dir. Bunun 1010 mg/l'si ise çözünmüş KOİ'dir. Sitrik asit üretimi yapan tesisin atıksu arıtma tesisine giren atıksuyunun toplam KOİ'si 31.030 mg/l olup çözünmüş KOİ'si 29.265 mg/l'dir. Anaerobik arıtma tesisi çıkış akımında ulaşılan toplam KOİ değeri 3330 mg/l olup çözünmüş KOİ değeri ise 2395 mg/l'dir. Peynir altı suyu atıksuyu KOİ'si tamamen çözünmüş yapıya sahip olduğundan inert KOİ değerini belirlemek için sadece glikoz testine tabi tutulmuştur. Peynir altı suyu atıksuyu, KOİ'si 9420 mg/l olacak şekilde seyreltilerek reaktörlerden birine, aynı KOİ konsantrasyonuna sahip glikoz ise reaktörlerden diğesine doldurularak deneysel çalışma başlatılmış ve testler 380 saat boyunca devam etmiştir. Her bir reaktör 258 ± 2 mg/l KOİ değerinde stabilize hale gelmiştir. Benzer uygulama anaerobik arıtma tesisi çıkış suyunda gerçekleştirilmiştir ve sonuçta S_I 256 mg/l, S_P 135 mg/l ve X_I ise 28 mg/l olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte sitrik asit üreten tesisin atıksuyu da tamamen çözünmüş KOİ'ye sahip olduğundan dolayı inert KOİ değerini belirlemek için peynir altı suyu atıksuyuna uygulanan prosedür bu tesisin atıksuyuna da uygulanmıştır. Reaktörlerde çözünmüş KOİ değeri 3380 mg/l olacak şekilde ayarlanmış ve deneysel çalışmalar 28 gün boyunca devam etmiştir. Reaktörler

$S_f=215$ mg/l civarında stabilize olmuştur. Yine benzer uygulama sitrik asit üreten tesisin anaerobik arıtma tesisi çıkış suyuna uygulanmıştır. Toplam KOİ'si 2945 mg/l olacak şekilde atıksu ve glikoz reaktörleri doldurulmuş ve sonuçta S_f 804 mg/l, S_p 404 mg/l ve X_f ise 228 mg/l olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre peynir altı atıksuyunun başlangıç inert KOİ değerine sahip olmadığı, tek adımlı aerobik arıtma ile 1640 mg/l inert KOİ üretebileceği ve 2 adımlı arıtma ile bu inert KOİ seviyesinin 390 mg/l'e düşebileceği anlaşılmıştır. Benzer sonuçlar sitrik asit tesisi çıkış suyunda da görülmüştür. İlk adım anaerobik arıtmada çözünmüş kalıntı KOİ değeri büyük bir düşüş göstermekte, ikinci adım arıtma da ise partiküler kalıntı KOİ 230 mg/l'e düşmektedir.

Germirli ve diğ. (1998), aktif çamur prosesini modellemek amacıyla 4 farklı tekstil atıksuyunun ayrıntılı bir değerlendirmesini yapmışlardır. Atıksularda konvansiyonel karakterizasyon yanında KOİ bileşenleri ve respirometrik analizlerle temel kinetik ve stokiyometrik katsayıları belirlemişlerdir. Aktif çamurun dizaynı ve kinetik yorumlaması amacıyla içsel solunuma dayanan çoklu bileşen modelini uygulamışlardır.

Deneyssel olarak kolay ayrışabilir KOİ (S_s), yavaş ayrışabilir çözünmüş KOİ (S_H), yavaş ayrışabilir partiküler KOİ (X_s), başlangıçtaki inert çözünmüş KOİ (S_f), başlangıçtaki inert partiküler KOİ (X_f), partiküler inert organik ürünler (X_p) ve çözünmüş inert organik ürünler (S_p) belirlenmiştir. Bunların yanında respirometrik analizlerle Y_H ve b_H belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarla heterotroflar için maksimum spesifik büyüme hızı 3,6-5,3 gün⁻¹ arasında, Y_H ise 0,67 g KOİ/g KOİ olarak bulunmuştur. Yarı doygunluk sabiti olan K_s 5-25 mg/l aralığında, b_H ise 0,12-0,18 gün⁻¹ aralığında belirlenmiştir. Ayrıca her bir tesis için belirlenen inert KOİ değerleri birbirinden farklı değerlere sahiptir. Çalışma sonucunda tekstil atıksularının biyolojik arıtılabilirliğinin değerlendirilebilmesi için kinetik ve stokiyometrik katsayılarla birlikte KOİ bileşenlerinin de önceden belirlenmiş olması gerektiği ve atıksuların beklenen çıkış suyu kalitesinin toplam organik madde miktarı ve konvansiyonel dizayn parametrelerinden çok KOİ bileşenleri ve proses kinetiği ile alakalı olduğu anlaşılmıştır.

Ince ve diğ. (1998), bira endüstrisi atıksuyunun çözünmüş formdaki inert KOİ içeriğini anaerobik çürütmeye dayanan iki ayrı yöntemi (karşılaştırma metodu ve

çoğalma metodu) kullanarak belirlemişler ve her iki metotla belirlenen bu değerleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır.

Karşılaştırma metoduna göre birbirine paralel olarak işletilen ve başlangıç KOİ değeri aynı olan 2 kesikli reaktör kurulmuştur. Bu reaktörlerden biri süzölmüş atıksu ile diğeri ise glikoz ile beslenmiştir. Çoğalma metoduna göre başlangıç çözönmüş KOİ konsantrasyonu bir reaktörde diğetine göre fazla olan 4 kesikli reaktör kurulmuştur. Reaktörlerden biri substrat olarak sadece atıksu ile beslenmiştir. Diğeri reaktörler ise birinci reaktör ile aynı konsantrasyona sahip olan atıksuya farklı miktarlarda glikoz ilaveleri yapılarak işletilmeye başlanmıştır.

Karşılaştırma metodunda 4 kesikli reaktör kullanılmıştır. Reaktörlerden ikisi KOİ'si 1000 mg/l ve 2000 mg/l'e seyreltilmiş bira endüstrisi atıksuyu ile doldurulurken diğeri ikisi KOİ'si 1000 ve 2000 mg/l'e ayarlanmış glikoz çözöltisi ile doldurulmuştur. Her bir reaktöre 40 mg/l UAKM olacak şekilde aş ilavesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda toplam üretilen UYA'leri test periyodunun sonunda metanojenik bakteriler tarafından tamamen tüketilmiştir. Başlangıç KOİ konsantrasyonu eşit olan her bir reaktör çiftinde KOİ konsantrasyonları deneysel çalışmalar sonucunda aynı KOİ değetine düşmüştür. Bu sonuç, bira endüstrisi atıksuyunun inert KOİ içermediğini göstermektedir ve Y_p değeri ise 0,041 olarak hesaplanmıştır.

Bununla birlikte çoğalma metoduna göre 4 anaerobik kesikli reaktör kullanılmıştır. Reaktörlerden birine başlangıç KOİ'si 875 mg/l olacak şekilde seyreltilmiş bira endüstrisi atıksuyu konulmuştur. Diğeri 3 reaktöre aynı oranda seyreltilmiş bira endüstrisi atıksuyu ile birlikte toplam süzölmüş KOİ konsantrasyonu 1190, 1510 ve 1805 mg/l olacak şekilde glikoz ilaveleri yapılmıştır. Her bir reaktöre 30 mg/l UAKM olacak şekilde aş ilavesi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda UYA'nin tüm reaktörlerde test periyodu sonunda tamamen parçalandığı ve reaktörlerin her birinde ulaşılan son KOİ değerinin birbirinden farklı olduğu görölmüştür. Ulaşılan nihai KOİ değerlerine karşılık başlangıç çözönmüş KOİ grafiğı çizilmiştir. Buna bağılı olarak $S_1 = 6,6$ mg/l olarak bulunmuştur ve bu değer ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Aynı zamanda Y_p değeri ise 0,04 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak bira endüstrisi atıksuyunun inert KOİ değerini belirlemek amacıyla uygulanan her iki metodun birbiri ile uyumlu olduğu ve çözönmüş inert KOİ değerinin sıfıra yakın olduğu kanıtlanmıştır.

Germirli ve diğ. (1999), biyolojik arıtma uygulanan iki farklı tekstil tesisinin (akrilik elyaf üretimi yapan tesis ve iplik boyama tesisi) atıksu karakterizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Deneysel çalışmalar ile her iki atıksuyun kinetik ve stokiyometrik özelliklerinin, hidroliz hızının çok düşük olması dışında, evsel atıksu çamuru ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada biyolojik arıtılabilirlik üzerine yapılan deneysel çalışmalarla detaylı bir KOİ bileşeni ve temel kinetik ve stokiyometrik katsayıların respirometrik ölçümlerle belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Kinetik yorumlar elde edebilmek ve aktif çamur prosesini dizayn edebilmek amacıyla çoklu bileşen içsel solunum modeli kullanılmıştır.

Akrilik elyaf üretimi yapan tesisin atıksuyu biyolojik arıtmadan önce H_2O_2 ile kısmi kimyasal oksidasyona tabi tutulmuştur ve KOİ içeriği 700 mg/l'e düşürülmüştür. İplik boyama tesisi atıksuyunun inert KOİ bileşenleri (X_H ve S_H) literatürde önerilen deneysel prosedüre göre (Germirli ve diğ., 1993) belirlenmiştir. İnert KOİ testinde 2 adet 3 litre hacimli havalandırmalı kesikli reaktörler kullanılmıştır. Reaktörlerden biri filtre edilmemiş atıksu ile diğeri ise filtre edilmiş atıksu ile uygun bir başlangıç KOİ değerine seyreltilerek doldurulmuştur. Diğ. yandan akrilik elyaf üretimi yapan tesisin atıksuyu kısmi kimyasal arıtmadan geçtikten sonra KOİ'sinin sadece çözünmüş KOİ'den oluştuğu anlaşılmıştır ve çözünmüş inert KOİ bileşenini belirlemek üzere literatürde verilen diğ. bir prosedür (Germirli ve diğ., 1991) uygulanmıştır. Bu prosedüre göre yine 3 litre hacimli 2 adet havalandırmalı kesikli reaktörler kullanılmıştır. Reaktörlerden biri filtre edilmiş atıksu ile diğeri ise glikoz ile beslenmiştir. Deneyler KOİ'nin sabit bir plato oluşturduğu gözlenene kadar devam etmiştir.

Respirometrik prosedür ile belirlenmesi hedeflenen temel kinetik ve stokiyometrik katsayılar kolay parçalanabilir KOİ (S_S), maksimum heterotrofik büyüme hızı (μ_H) ve heterotrofik dönüşüm katsayısıdır (Y_H). Bunun için 1 l'lik kesikli reaktörler atıksu numuneleri ile beslenmiştir ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu 6-8 mg/l aralığında kalacak şekilde havalandırma yapılmıştır.

KOİ bileşenine bakıldığında pamuk örme kumaş boyama tesislerinin atıksuyundaki toplam kalıntı KOİ bileşeni %9 olarak bulunmuş ve bunun %7'sini çözünmüş KOİ bileşeninin oluşturduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak akrilik elyaf ve iplik boyama tesislerinin atıksuyunun biyolojik arıtma ile daha uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

Stokiyometrik ve kinetik bileşenler ile ilgili deneysel sonuçlara göre belirlenen katsayıların evsel arıtma çamuru ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Ancak her iki atıksu için kolay parçalanabilir KOİ'nin hidrolizi çok düşük bir hızla gerçekleşmektedir.

Kapasgil Ince ve diğ. (2000) bira atıksuyunu arıtan 120 litre hacimli tam karışimli pilot ölçekli çapraz akımlı ultrafiltrasyon membran anaerobik reaktör (CUMAR) sistemindeki inert KOİ üretimini incelemiştir. Çalışma süresince kullanılan atıksu yerel bir bira endüstrisinden temin edilmiştir. Ham atıksuyun KOİ/N/P oranı 400/0,7/0,4'tür ve CUMAR sisteminin işletimi süresince giriş suyunda KOİ/N/P oranı 400/5/1 civarında tutulmuştur. Alkalinitenin ise 1000-3000 mg/l aralığında kalması sağlanmıştır. İşletmeye alma aşamasında CUMAR sitemi içerisindeki anaerobik temas reaktörü 2500 mg/l KOİ içeren bira endüstrisi atıksuyu ile beslenmiştir. İşletmeye alma periyodundan sonra CUMAR sistemi kararlı hal işletmesi durumuna tabi tutulmuştur. Buna göre anaerobik reaktörde biyokütle tarafından üretilen kalıntı biyolojik olarak parçalanamayan KOİ'nin belirlenmesi amacıyla sistem çok geniş aralıkta değişen hidrolik bekletme süresi ve organik yüklerde işletilmiştir. 15 aydan fazla işletildikten sonra, maksimum organik yük 28,5 kg/m³-gün ve F/M oranı 0,55 kg KOİ/kg UAKM-gün olarak bulunmuştur. Bu noktada sistemin performansı çok iyidir (%97 KOİ ve %100 BOİ giderim verimleri). Daha önceki yapılan çalışmalarla bira atıksuyunun pratikte inert KOİ içermediği kanıtlanmıştır. Dolayısıyla çıkış suyundaki inert çözünmüş KOİ, anaerobik reaktör içerisindeki biyokütle tarafından oluşturulmaktadır. Çıkış KOİ konsantrasyonlarındaki önemli artışlar CUMAR sisteminin işletimi sırasında çamur bekletme süresinin 100 günün altına düşmesi ile görülmüştür. İnert KOİ bileşenlerinin belirlenmesi amacıyla çoğalma ve karşılaştırma metodları uygulanmıştır ve sonuçta bira endüstrisi atıksuyunun ihmal edilebilir seviyede inert çözünmüş KOİ içerdiği anlaşılmıştır. Çıkış akımındaki inert KOİ bileşenleri metabolik ürünlerdir ve bu çözünmüş mikrobiyal ürünler reaktör içerisindeki işletme şartlarına bağlı olarak değişen miktarlarda üretilmektedirler. Sonuçlardan, KOİ olarak ölçülen çözünmüş mikrobiyal ürünlerin giriş KOİ'sinin ortalama %2.2'si olduğu hesaplanmıştır. Çıktaki bu mikrobiyal ürünler daha uzun işletme sürelerinde de giderilememiştir.

Sötemann ve diğ. (2005a), atıksu çamur besi maddesini; toplam partiküler KOİ, toplam partiküler KOİ'nin biyolojik olarak parçalanamayan partiküler bileşeni ($f_{PS,up}$) ve CHON içeriği (ör. $C_XH_YO_ZN_A$ içerisindeki X, Y, Z ve A gibi) bakımından karakterize etmişlerdir. Bu yaklaşım ile çamur; KOİ, C ve N kütle dengeleri yaklaşımıyla uygun olan ölçülebilir parametreler açısından karakterize edilebilmektedir. Böylece biyolojik prosesler ve zayıf asit baz kimyası arasındaki etkileşim stabil kararlı hal işletmeleri için doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Kararlı hal modelleri, en düşük proses kinetik hızına dayanmaktadır ve bu proses kinetik hızı, sistem diyazını ve işletme parametreleri ile ilişkilidir.

Farklı $f_{PS,up}$ (biyolojik olarak parçalanamayan partiküler bileşen) değerleri için KOİ giderimleri veya gaz üretimleri incelendiğinde teorik olarak tahmin edilen değerlerle deneysel olarak ölçülen değerler arasında çok fazla bir fark olmadığı görülmüştür. Farklı çamur tipleri için farklı hidroliz hız sabitleri bulunmuştur. Buna göre birincil çamurun daha hızlı hidrolize uğradığı ve birincil + humus çamuru karışımına göre ($f_{PS,up}=0,36$) daha düşük miktarda biyolojik olarak parçalanamayan bileşenine sahip olduğu gözlemlenmiştir ($f_{PS,up}=0,33$). Modelin hidroliz kısmından bilinen KOİ giderimi ile deneysel hataları da dikkate alarak (C ve N kütle dengesinden gelen hatalar gibi) modelin stokiyometri ve zayıf asit baz kimyası ile ilgili kısımları; gaz kompozisyonunu, üretilen amonyak ve alkaliniteyi ve çürütücü pH'ını, birincil ve humus çamuru kompozisyonu için tahmin etmeyi kolaylaştırmıştır. Dolayısıyla, birincil çamuru arıtan anaerobik çürütücüler, birincil + humus çamur karışımını arıtan çamur çürütücülere göre daha düşük bekletme sürelerinde daha yüksek KOİ veya uçucu askıda katı madde giderimi sağlamaktadırlar. Çamurun biyolojik olarak parçalanamayan bileşenini ($f_{PS,up}$) belirlemek için uzun bekletme süreleri (>60 gün) gerekirken, en uygun hidroliz hız denklemini elde etmek için ise daha kısa (<15 gün) bekletme sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çamur kompozisyonu, art arda gelen biyolojik proseslerin stokiyometrisi ve giren uçucu yağ asitlerinin tüketimi, çürütücünün gaz kompozisyonu ve pH'ı hakkında bilgi verir.

İyonize olmuş ve iyonize olmamış asetat türleri arasındaki ayrım giriş pH'ı ile belirlenir. Genel olarak giriş pH'ı ne kadar yüksekse, iyonlaşmış asetat türlerinin bileşeni o kadar yüksek olmakta, daha fazla alkalinite üretilmekte ve dolayısıyla çürütücü pH'ı da yüksek olmaktadır.

Üretilen toplam CO_2 , gaz halindeki CO_2 ve çözünmüş CO_2 'nin toplamıdır ve genellikle bikarbonat formunda bulunur. HCO_3^- içerisinde bulunan toplam CO_2 'nin oranı şunlara bağlıdır: (i) hidroliz olabilir organiklerin parçalanması sonucu serbest bırakılan amonyak çözünmüş CO_2 'den bir proton alıp NH_4^+ ve HCO_3^- 'e dönüşmesi (ii) çürütücüde tüketilen ve çürütücüye giren iyonlaşmış asetat türlerinin konsantrasyonu. Üretilen gaz halindeki CO_2 ve CH_4 , CO_2 'in kısmi basıncını belirler. Çürütücünün pH'ı ise üretilen HCO_3^- konsantrasyonu ve CO_2 'in kısmi basıncını ile tanımlanır.

Birincil çamurun kompozisyonunun $\text{C}_{3,5}\text{H}_7\text{O}_2\text{N}_{0,196}$ olduğu tahmin edilmektedir (Sötemann ve diğ., 2005a).

Deneyisel verilerdeki hataların payı göz önünde bulundurulduğunda kararlı hal modelinin deneyisel verilerle çok yakın bir biçimde uyum sağladığı belirlenmiştir.

Atıksu çamurları için kararlı hal anaerobik çürütme modeli geliştirilmiştir ve bu model art arda gelen 3 kısımdan oluşmaktadır. (i) kinetik kısım: verilen bir bekletme süresinde giriş KOİ'sinin hidrolize uğrayan/tüketilen miktarı, gaz üretimi ve çıkış KOİ konsantrasyonları kinetik kısım ile hesaplanabilir, (ii) stokiyometri kısmı: tüketilen KOİ ve hidrolize olmuş KOİ'nin CHON kompozisyonundan; gaz kompozisyonu (ya da CO_2 'nin kısmi basıncı), serbest bırakılan amonyak ve üretilen alkalinite hesaplanabilir, (iii) karbonat sistemi zayıf asit baz kimyasal modeli: CO_2 'nin kısmi basıncından ve üretilen alkaliniteden çürütücünün pH'ı hesaplanabilir. Bu modele göre verilen bir KOİ giderimi için karbondioksitin kısmi basıncının, üretilen alkalitenin ve dolayısıyla çürütücünün pH'ının tamamen giren çamurun kompozisyonu ($\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{N}_A$ içerisindeki X,Y,Z ve A gibi) ve giren iyonlaşmamış uçucu yağ asitlerinin konsantrasyonları ile belirlendiği görülmektedir. Deneyisel hata dikkate alındığında (C ve N kütle denge hataları gibi) kararlı hal modelinin 7-20 gün bekletme süresinde gözlemlenen birincil ve humus çamur çürütücüsü performanslarını çok iyi tahmin ettiği sonucuna varılmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalar sonucu elde edilen endüstriyel atıksuların inert çözünmüş KOİ bileşenleri toplu olarak Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 : Endüstriyel atıksuların inert çözünmüş KOİ bileşenleri (Yılmaz ve Ozturk, 1995)

Endüstri	Çözünmüş KOİ S_o (mg/l)	İnert Çözünmüş KOİ S_i (mg/l)	S_i/S_o
Kağıt endüstrisi	3340	196	0,06
Et işleme tesisi	1990	110	0,06
Süt ve süt ürünleri	1570	0	-
Antibiyotikler	9300	2500	0,27
Tekstil endüstrisi	1000	190	0,19
Dokuma kumaş	1176	90	0,08
Örme kumaş	800	88	0,11
Peynir altı suyu (ham)	60000	0	-
Peynir altı suyu (Anaerobik ön arıtmaya tabi tutulmuş)	1020	256	0,25
Sitrik asit (ham)	29300	1870	0,06
Sitrik asit (Anaerobik ön arıtmaya tabi tutulmuş)	2025	804	0,4
Fermantasyon Endüstrisi Proses Çıkışı (Çöktürülmüş)	2810	155	0,06
Fermantasyon Endüstrisi Anaerobik Arıtma Çıkışı (Çöktürülmüş)	3090	620	0,20
Fermantasyon Endüstrisi Anaerobik Arıtma Çıkışı (Filtre Edilmiş)	3090	510	0,17
Ekmek mayası (ham)	2270	30	0,13
Ekmek mayası (Anaerobik ön arıtmaya tabi tutulmuş)	2380	800	0,34
Ekmek mayası (Amonyak sıyırmasından sonraki Aerobik Giriş)	2435	730	0,30

4. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN PLANLANMASI, KULLANILAN DÜZENEKLER VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Çalışmalarda kullanılan çamur, Ek A'da ayrıntılı olarak anlatılan Kayseri KASKİ Atıksu Arıtma Tesis'i'nin birincil çöktürme tankından çıkan çamurun yoğunlaştırıldığı birincil yoğunlaştırma havuzundan (birincil çamur) alınmıştır.

Deneysel çalışmalarla, arıtma tesisinin birincil yoğunlaştırma havuzundan alınan çamurun anaerobik kinetik katsayılarının ve inert KOİ bileşeninin bulunması ve bulunan değerlerin daha önce yapılmış kinetik modellerle karşılaştırılarak yorumlanması hedeflenmiştir.

4.1. Atık karakterizasyonu

4.1.1. Anaerobik çamur çürütme için sisteme beslenen birincil çamur karakterizasyonu

Kayseri atıksu arıtma tesisinin ön çökeltim tankından alınan birincil çamurun karakterizasyonu Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 : Sisteme beslenen birincil çamur karakterizasyonu

Parametre	Birim	15.03.2006 tarihinde gelen birincil çamur	01.04.2006 tarihinde gelen birincil çamur	19.05.2006 tarihinde gelen birincil çamur	Ortalama Değerler
TKM	g/l	70	125	90	95
TUKM	g/l	40	45	50	45
AKM	g/l	65	120	85	90
UAKM	g/l	40	45	50	45
NH ₃	mg/l	375	320	200	300
Süzülmüş NH ₃	mg/l	360	280	190	280
TKN	mg/l	2100	2885	2170	2330
Süzülmüş TKN	mg/l	390	310	200	300
pH	-	5,40	5,30	5,40	5,40
Alkalinite	mg/l CaCO ₃	9250	1720	1020	1370
Toplam Fosfor	mg/l	1415	700	960	830
Süzülmüş Toplam Fosfor	mg/l	155	140	150	145
Toplam KOİ	mg/l	64930	97760	73350	71245
Süzülmüş KOİ	mg/l	7120	7870	5470	6670

4.1.2. Aşı çamurunun karakterizasyonu

Reaktörler içerisinde gerçekleşen mikrobiyal faaliyetlerin hızlandırılması amacıyla aşı çamuru, Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi çürütücü çıkışından temin edilmiştir. Aşı çamurunun karakterizasyonu ise Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 : Sisteme ilave edilen aşı çamuru karakterizasyonu

Parametre	Birim	15.03.2006 tarihinde gelen aşı çamuru değerleri	09.05.2006 tarihinde gelen aşı çamuru değerleri
AKM	g/l	22,8	26,40
UAKM	g/l	10,7	10,0
Alkalinite	mg/l CaCO ₃	4040	4000
KOİ	mg/l	19850	27560
Süzüntüde KOİ	mg/l	-	430
pH	-	-	7,40

4.2. Deneysel çalışma planı

Laboratuarda gerçekleştirilen deneysel çalışma ile, birincil çamurun karakterizasyonu yapılarak sonuçlar başlangıç için gerekli ön tahminlerde kullanılmıştır. Çalışmada Kayseri atıksu arıtma tesisinden sağlanan birincil çamur kullanılmıştır. Anaerobik kinetik katsayıları belirlemek için toplam 6 adet 2 litre hacimli reaktör, inert KOİ’yi belirlemek içinse toplam 3 adet 3 litre hacimli reaktör kullanılmıştır.

İnert KOİ’nin ve anaerobik kinetik katsayıların belirlenmesi amacıyla izlenen parametreler ve bu parametrelerin izleme sıklıkları sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.3 : İnert KOİ’nin belirlenmesi amacıyla izlenen parametreler ve izleme sıklıkları

Parametre	Birim	Deneysel Çalışma Planı
pH	-	sürekli
Sıcaklık	⁰ C	sürekli
Toplam KOİ	mg/l	İlk 2 haftada 3 ölçüm/hafta, daha sonraki zamanlarda 1 ölçüm/hafta
Süzülmüş KOİ	mg/l	İlk 2 haftada 3 ölçüm/hafta, daha sonraki zamanlarda 1 ölçüm/hafta

Tablo 4.4 : Kinetik katsayıların belirlenmesi amacıyla izlenen parametreler ve izleme sıklıkları

Parametre	Birim	Deneysel Çalışma Planı
pH	-	sürekli
Sıcaklık	⁰ C	sürekli
Gaz Hacmi	ml	sürekli
Alkalinite	mg/l CaCO ₃	1 ölçüm/hafta
Toplam KOİ	mg/l	1 ölçüm/hafta
TKM-TUKM	g/l	1 ölçüm/hafta

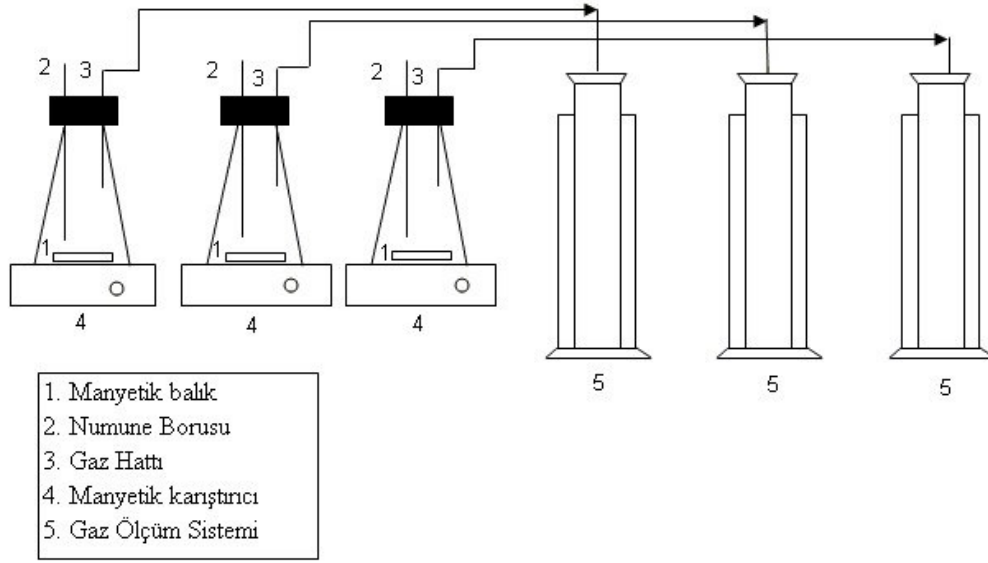
Konvansiyonel parametreleri belirlemek amacıyla yapılan tüm analizler, Standart Metotlarda belirtildiği gibi gerçekleştirilmiştir (Standard Methods, 1995).

4.3. Deney düzenekleri

4.3.1. Anaerobik bozunma kinetiği katsayılarının belirlenmesi amacıyla kurulan anaerobik reaktörler

Anaerobik kinetik katsayılarının belirlenmesi amacıyla yapılan çamur çürütme işlemi 2 litrelik 6 adet laboratuvar ölçekli şilifli erlenden oluşan cam reaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan şilifli erlenlerin kapaklarının üzerinde gazın toplanabilmesi için 1 adet gaz toplama borusu ve sisteme çamur beslemek ve sistemden çamur çekmek için bir adet numune alma borusu mevcuttur.

Çamur çürümesi esnasında oluşan biyogaz mezürler vasıtasıyla ölçülmüştür. Oluşan gaz miktarının ölçülmesi amacıyla iç içe geçirilmiş 2 mezür (dıştaki mezür 2 l, içteki mezür 1 l hacimli), reaktörlerin gaz toplama borusuna bağlanmıştır. Sistemde oluşan biyogazın etkisiyle içteki 1 l'lik mezür yukarıya doğru kalkmakta ve böylece sistemde oluşan gaz hacmi mezür üzerinden günlük olarak okunmaktadır. Sistemde karıştırma işlemi manyetik karıştırıcılar vasıtasıyla sağlanmıştır. Çalışmaların tamamı 35±2 ⁰C sıcaklığına sabitlenmiş bir sabit sıcaklık odası içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1), (Şekil 4.2).



Şekil 4.1 : Çamur çürütme sistemi



Şekil 4.2 : Çamur çürütme sistemi

4.3.2. İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kurulan anaerobik reaktörler

İnert KOİ değerinin belirlenmesi amacıyla 3 l'lik 3 adet laboratuvar ölçekli cam reaktör kullanılmış ve ağızlarının torna ile konikleştirilmiş lastik kapaklarla kapatılarak hava geçirmemesi temin edilmiştir. Lastik kapaklar üzerinde 3 adet delik

açılarak borulara numune alma, gaz çıkışı ve azot gazı girişi için kullanılacak hortumlar geçirilmiştir. Homojen karışımı sağlamak için manyetik karıştırıcılar kullanılmıştır. Reaktörler havasız çalışma açısından sıcaklığın 35 ± 2 °C’de tutulduğu bir sabit sıcaklık odası içerisine yerleştirilmiştir. Deneysel düzeneğe ait bir görüntü Şekil 4.3’de verilmektedir.



Şekil 4.3 : Havasız şartlarda inert KOİ bileşenlerinin deneysel olarak bulunduğu çalışma düzeneği

4.4. Birincil çamurda anaerobik kinetik katsayıları ve inert KOİ değerini belirlemek amacıyla uygulanan yöntemler

4.4.1. Anaerobik kinetik katsayıların belirlenmesi

Evsel atıksu arıtma tesislerinin ön çöktürme havuzlarında oluşan birincil çamurun anaerobik çürüme kinetik katsayıları olan μ_m , k , K_s , k_d ve Y değerleri laboratuvar ölçekli arıtılabilirlik çalışması sonucunda belirlenmeye çalışılmıştır. Bu maksatla, birincil çamur, 10 ile 30 gün arasında değişen farklı çamur yaşlarında ($\Theta_c = 10, 12, 15, 20, 25, 30$) yarı kesikli olarak çalışan model reaktörlere beslenerek anaerobik

koşullar altında çürütülmeye çalışılmıştır. Anaerobik kinetik katsayıları belirlemek amacıyla, 3 litre hacmindeki 6 adet laboratuvar ölçekli reaktör kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda gereken aşı çamuru Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik çamur çürütme tankı çıkışından temin edilmiştir ve her bir reaktöre toplamda 2000 mg UAKM olacak şekilde aşı çamuru eklenmiş (reaktör hacminin yaklaşık %10'una denk gelen miktarda) ve kapakları takılarak reaktör içine azot gazı verilmek suretiyle içeride kalabilecek oksijen reaktör dışına süpürülmüştür.

Bununla birlikte başlangıçta her bir reaktör içerisindeki çamurun pH'ı 7 olacak şekilde NaOH ile pH ayarlaması yapılmıştır. Her bir reaktörden çekilen numunelerde pH günlük olarak izlenmiştir. Çamur bekletme süresi 10 ve 12 gün olan reaktörler dışındaki tüm reaktörlerde pH, anaerobik arıtma için uygun pH değerleri olan 6,5-8,2 aralığında kalmıştır. Buna rağmen çamur yaşı 10 ve 12 gün olan reaktörlerde pH'ta düşüşler gözlemlenmiştir ve bu reaktörlerdeki pH'ı uygun aralığa getirmek için her iki sisteme aralıklı olarak NaOH ilavesi yapılmıştır. Ancak pH, NaOH ile uygun aralığa getirilemediği için her 2 sisteme NaHCO_3 ilaveleri yapılarak pH 7'e tamponlanmaya çalışılmıştır. Her bir reaktörden çekilen numunelerden 25'er ml alınarak 30 dakika santrifüjlenmiş ve santrifüj sonunda oluşan üst su kaba filtreden geçirilerek alkalinite deneyi gerçekleştirilmiştir. KOİ deneyi, numuneler 1/200 oranında seyreltilerek gerçekleştirilmiş ve reaktörlerin her birinde toplam KOİ parametresi izlenmiştir. TKM ve TUKM deneyleri porselen krozeler kullanılarak 25 ml'lik hacimlerde gerçekleştirilmiştir. Çamur çürümesi esnasında oluşan biyogaz ise mezürler vasıtasıyla ölçülmüştür.

Her bir sistemde gaz çıkışı görülene kadar sistemden ne çamur çekilmiş ne de sisteme çamur beslemesi yapılmıştır. Gaz çıkışları görüldüğü anda her bir sistemden $\Theta_c = V/Q$ formülüne uygun olarak gerekli debide, sistem tam karışım halinde iken çamur çekilmiş ve yine her bir sisteme çekilen çamur debisi kadar çamur beslemesi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte besleme sırasında çürütücülerin içine hava kaçmasını önlemek amacıyla reaktörlerden azot gazı geçirilerek içeri giren hava, reaktörün içinden dışarı süpürülmüştür.

Bu çalışma ile her bir çürütücünün karalı hal koşullarına ulaşması beklenmiştir. Her bir sistemin kararlı hale gelmesi ile sistemden çıkan arıtılmış çamurun KOİ değeri ve toplam uçucu katı madde (TUKM) değerleri göz önünde bulundurularak

anaerobik kinetik katsayıların belirlenmesi hedeflenmiştir. Ancak laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda her biri farklı çamur bekletme süresine sahip olan çamur çürütücüler kararlı hal koşullarına ulaşamamıştır. Bu sebeple çamur çürütücülerin kararlı hal koşullarında ulaşması gereken KOİ değerleri, daha önce bu konuda yapılmış olan ve birincil çamur için kinetik katsayılarında verildiği kararlı hal kinetik modeli kullanılarak belirlenmiştir. Laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilen birincil çamurun karakterizasyon değerleri kararlı hal modeline uygulanmıştır. Kararlı hal kinetik modeli ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.4.3 , 4.4.3.1 ve 4.4.3.2’de verilmiştir.

4.4.2. İnert KOİ değerinin belirlenmesi

İnert KOİ değerinin belirlenmesi amacıyla 3 l’lik 3 adet laboratuvar ölçekli cam reaktör kullanılmıştır. Kesikli olarak işletilen reaktörlerden birincisine birincil çamur, diğerine birincil çamurun süzölmüşü ve sonuncusuna ise süzölmüş birincil çamura eşdeğer konsantrasyonda KOİ içeren glikoz beslemesi yapılmıştır.

Deneysel çalışmada gereken anaerobik aşı çamuru Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik çamur çürütme tankı çıkışından temin edilmiştir. Her bir reaktöre 3 litrede toplam 1000 mg UAKM olacak şekilde aşı çamuru eklenmiş ve kapakları takılarak reaktörler içerisine azot gazı verilmek suretiyle içeride kalabilecek oksijen dışarı süpürölmüştür. Reaktörlerin işletilmesine, deneysel izleme çalışmasının başlatılmasından, KOİ gideriminde platolaşmanın netleştiği güne kadar tekrar besleme yapılmaksızın devam ettirilmesi hedeflenmiştir.

Sistemi işletmeye almadan önce birincil çamur, toplam KOİ konsantrasyonu 2000 mg/l olacak şekilde seyreltilerek birincil çamur reaktörü içerisine beslenmiştir. İkinci reaktörün beslenmesi amacıyla birincil çamur 30 dakika boyunca santriföjlenmiş ve oluşan üst faz Millipore marka 0,45 µm filtre kağıdından süzölmüştür. Süzölen çamur, KOİ’si 2000 mg/l olacak şekilde seyreltilerek ikinci reaktöre beslenmiştir. Reaktörlerden sonuncusuna ise yine KOİ’si 2000 mg/l olacak şekilde glikoz beslemesi yapılmıştır. Reaktörlerin başlangıçtaki KOİ değerleri aşı ile birlikte 2600 mg/l civarına yükselmiştir. Aşıdan gelebilecek inert kısmı belirleyebilmek açısından bir başka reaktöre diğer 3 reaktöre konulan aşuya eşdeğer miktarda aşı konulup başlangıçtaki toplam ve süzölmüş KOİ değeri ölçölmüştür. Buna göre reaktörlere konulan aşının toplam KOİ değeri 604 mg/l ve süzölmüş KOİ değeri 42 mg/l olarak

konulup başlangıçtaki toplam ve süzölmüş KOİ değeri ölçölmüştür. Buna göre reaktörlere konulan aşının toplam KOİ değeri 182 mg/l ve süzölmüş KOİ değeri 41 mg/l olarak belirlenmiştir. Deney sonunda aşının nihai toplam ve süzölmüş KOİ değeri tekrar ölçölüp hesaplamalarda aşından gelebilecek inert kısmın göz önünde bulundurulması hedeflenmiştir.

Yapılan çalışmalar ile birincil çamurun inert KOİ bileşenlerini belirlemek amacıyla kurulan yeni reaktörlerde de KOİ giderimi görölememiştir. Bu sebeple, Bölüm 4.4.3 , 4.4.3.1 ve 4.4.3.2’de ayrıntılı bir şekilde anlatılan kararlı hal modelinde belirlenmiş olan birincil çamurun biyolojik olarak parçalanamayan bileşeni bu çalışmada esas alınmıştır.

4.4.3. Atıksu çamurlarının anaerobik çürütümü için kararlı hal modeli

Sötemann ve diğ. (2005b), atıksu çamurunun anaerobik çürümesinin kinetik modelini oluşturmuşlardır. Bu modelin temelini KOİ, N ve C kütle dengeleri oluşturmaktadır. Model içerisinde atıksu çamuru; toplam KOİ, partiküler biyolojik olarak parçalanamayan KOİ bileşeni ($f_{PS,up}$), kısa zincirli yağ asitleri (SCFA) ve CHON içeriğı ($C_XH_YO_ZN_A$ içerisindeki X, Y, Z ve A) bakımından karakterize edilmiştir. Yapılan çalışma ile kompleks yapıya sahip olan bu dinamik simölasyon model, kararlı hale basitleştirilmiştir.

Kararlı hal modelleri en düşük proses kinetik hızına dayanmaktadır (Sötemann ve diğ., 2005b). Sistemin tüm davranışı en düşük proses kinetik hızı tarafından yönetilir. Dolayısıyla kararlı hal modelleri, sistem dizaynı ve işletme parametrelerini (reaktör hacmi, geri devir oranı, bekletme süresi, gaz üretimi ve üretilen gazın kompozisyonu, KOİ giderimi gibi) basit bir şekilde tahmin etmeye imkan vermektedir.

Organik maddelerin anaerobik çürütümünde 4 farklı mikroorganizma grubu rol alır:

- (a) Asidojenler: Kompleks organik maddeleri kısa zincirli yağ asitlerine (SCFA), asetik ve propiyonik aside (HAc, HPr), karbondioksit (CO_2) ve hidrojene (H_2) dönüştüren mikroorganizma grubu
- (b) Asetojenler: Propiyonik asiti (HPr) asetik asite (HAc) ve hidrojene (H_2) dönüştüren grup
- (c) Asetoklastik metanojenler: Asetik asidi (HAc) karbondioksit (CO_2) ve metana (CH_4) dönüştüren grup

- (d) Hidrojenotrofik metanojenler: Hidrojen (H_2) ve karbondioksidi (CO_2) metan ve suya (H_2O) dönüştüren grup

Hidroliz/asidojenesis prosesi asidojen gruplar tarafından yürütülmektedir ve bu proses sistem içerisindeki en yavaş prostestir. Bu proste yüksek konsantrasyonda kısa zincirli yağ asitleri (SCFA) oluşumu gerçekleşir ve ortam koşullarında kararsızlıkların olması durumunda (sıcaklığın ani düşüşü, şok yükleme, girişte metanojen mikroorganizmaları inhibe edecek maddelerin bulunması) pH'da düşüşler görülür. Bu sebeple kararlı hal modeli, hidroliz proses kinetiğini ele almaktadır.

Oluşturulan kararlı hal anaerobik çürütücü modeli şu 3 maddeyi göz önünde tutmaktadır:

- (1) Hidroliz/asidojenesis proseslerinin kinetiği
- (2) Hidroliz/asidojenesis sonucu oluşan ürünlerin çürütücü son ürünlerine stokiyometrik dönüşümü
- (3) Son ürünlerin çürütücü pH'ına olan etkisi (zayıf asit-baz kimyası)

Sötemann ve diğ. (2005b), bu proses için 4 kinetik denklemi göz önünde bulundurmuşlardır:

- (1) Kalıntı biyolojik olarak parçalanabilir partiküler organik madde konsantrasyonlarını göz önünde bulunduran (S_{bp}) birinci dereceden kinetik
- (2) S_{bp} ve asidojen biyokütle konsantrasyonunu (Z_{AD}) göz önünde bulunduran birinci dereceden kinetik
- (3) Monod kinetiği
- (4) Doygunluk (yada Contois) kinetiği

Bu kinetik denklemlerden ilki, anaerobik çürütmede atıksu çamurunun hidroliz/asidojenesis proseslerini tanımlamakta iken ikincisi, anaerobik biyolojik fosfor giderim sistemlerinde biyolojik olarak kolay parçalanabilir organiklerin kısa zincirli yağ asitlerine dönüşümünü modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Diğer ikisi ise aktif çamur modellerinde kolay parçalanabilir organiklerle, partiküler halde yavaş parçalanabilir organiklerin tüketimi içindir.

4.4.3.1. Kararlı hal modeli – hidroliz kinetiği

V hacmine sahip bir çürütücü içerisinde giriş debisinin Q olduğunu düşünüldüğünde, hidrolik bekletme süresi yada çamur yaşı $\Theta_c=V/Q$ olarak ifade edilebilmektedir.

Sisteme giren çamurun partiküler biyolojik olarak parçalanabilir kısmı (S_{bpi}) ve partiküler biyolojik olarak parçalanamayan kısmı (S_{upi}) denklem (4.1) ve (4.2)'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$S_{bpi} = (1 - f_{PS'up}) \cdot S_{ti} - S_{bsai} \quad (4.1)$$

$$S_{upi} = f_{PS'up} \cdot S_{ti} \quad (4.2)$$

Burada;

S_{ti} : Birincil çamurun toplam partiküler KOİ konsantrasyonu (mg KOİ/l)

S_{bsai} : Girişteki UYA (Uçucu Yağ Asidi) konsantrasyonu (mg KOİ/l)

S_{upi} : Sisteme giren çamurun partiküler biyolojik olarak parçalanamayan kısmı (mg KOİ/l)

$f_{PS'up}$: Birincil çamurdaki biyolojik olarak parçalanamayan bileşen (0,338)

olarak verilmektedir.

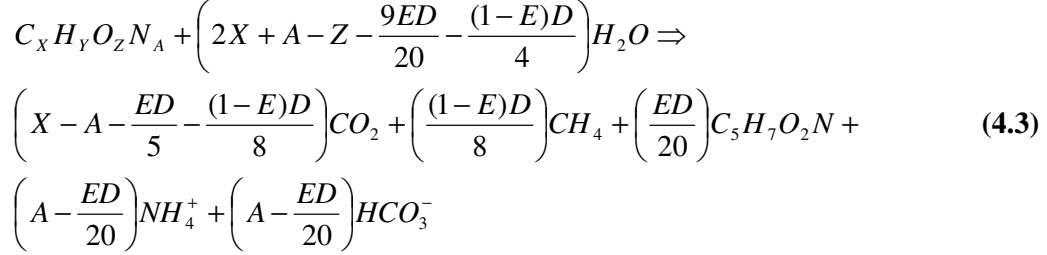
Kararlı hal modelinde kullanılan tüm kinetik denklemler Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6 : Kararlı hal modeli anaerobik çürütücü kinetik denklemleri (Sötemann ve diğ., 2005b)

Hidroliz Kinetik Denklemleri	Birinci Dereceden S_{bp} 'ye Bağlı Kinetik İfadeler	Birinci Dereceden S_{bp} & Z_{AD} 'ye Bağlı Kinetik İfadeler	Monod Kinetiği	Doygunluk Kinetiği
Hidroliz hızı; r_h g KOİ/l.gün	$r_h = K_h \cdot S_{bp}$	$r_h = K_H \cdot S_{bp} \cdot Z_{AD}$	$r_h = \frac{K_m \cdot S_{bp}}{(K_s + S_{bp})} \cdot Z_{AD}$	$r_h = \frac{K_M \cdot (S_{bp} / Z_{AD})}{[K_S + (S_{bp} / Z_{AD})]} \cdot Z_{AD}$
Kalıntı biyolojik olarak parçalanabilir KOİ konsantrasyonu, g KOİ/l. S_{bp}	$S_{bp} = \frac{S_{bpi}}{\left\{1 + K_h \cdot \theta_c \cdot \frac{[1 + b_{AD} \cdot \theta_c \cdot (1 - Y_{AD})]}{(1 + b_{AD} \cdot \theta_c)}\right\}}$	$S_{bp} = \frac{1/\theta_c + b_{AD}}{Y_{AD} \cdot K_H}$	$S_{bp} = \frac{K_s \cdot (1/\theta_c + b_{AD})}{Y_{AD} \cdot K_m - (1/\theta_c + b_{AD})}$	$S_{bp} = \frac{S_{bpi}}{\left\{1 + \frac{[Y_{AD} \cdot K_M - (1/\theta_c + b_{AD})][1 + b_{AD} \cdot \theta_c \cdot (1 - Y_{AD})]}{Y_{AD} \cdot K_S \cdot (1/\theta_c + b_{AD})}\right\}}$
Asidojen biyokütle konsantrasyonu, Z_{AD} g KOİ/l	$Z_{AD} = \frac{Y_{AD} \cdot (S_{bpi} - S_{bp})}{[1 + b_{AD} \cdot \theta_c \cdot (1 - Y_{AD})]}$			
Biyolojik olarak parçalanamayan KOİ konsantrasyonu, S_{up} gKOİ/l	$S_{up} = S_{upi}$			
Metan üretimi konsantrasyonu, S_m gKOİ/l	$S_m = (1 - Y_{AD}) \cdot \theta_c \cdot r_h$			
Kinetik sabitler (O'Rourke, 1967 verileri)	$K_h = 2,474$ (1/gün)	$K_H = 1,714$ (l/g KOİ biyokütle.gün)	$K_m = 2,004$ (g KOİ organik / (g KOİ biyokütle.gün) $K_s = 0,355$ g KOİ/l	$K_M = 2,047004$ (g KOİ organik / (g KOİ biyokütle.gün) $K_S = 0,263$ (g KOİ/l)
KOİ dengesi	$S_{ti} = S_{te} + S_m = S_{bp} + Z_{AD} + S_{up} + S_m$ $S_{te} = S_{bp} + Z_{AD} + S_{up}$			

4.4.3.2. Kararlı hal modeli – stokiyometrik yaklaşım

Ampirik kompozisyonu $C_XH_YO_ZN_A$ olan organik atık ile beslenen anaerobik çürütme sistemleri için genel stokiyometrik denklem aşağıdaki gibi verilmektedir (Mc Carty, 1974).



Burada;

$$D = 4X + Y - 2Z - 3A \quad (4.4)$$

$$E = \frac{Z_{AD}}{S_{bpi} - S_{bp}} = \frac{Y_{AD}}{[1 + b_{AD}R(1 - Y_{AD})]} \quad (4.5)$$

E: Çamur kütleline dönüştürülen giderilmiş KOİ bileşeni olarak verilmektedir.

KOİ değeri ise g KOİ/mol olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$KOİ = 8(Y + 2(2X - Z) - 3A) \quad (4.6)$$

Bununla birlikte,

MM = $12X + Y + 16Z + 14A$ g kuru ağırlık/mol veya g UYA/mol olarak ifade edilmiştir.

Giriş UYA konsantrasyonları asetat türleri olarak verilmektedir. Buna göre hesaplandığında asetatın MM değeri 60 g/mol ve KOİ değeri 64 g KOİ/mol olmaktadır. İyonlaşmış ve iyonlaşmamış asetat türlerinin metanojenler tarafından tüketimini gösteren stokiyometrik denklemler denklem (4.7) ve (4.8) ile gösterilmiştir.



Tüm bunlara ek olarak birincil çamur kompozisyonu $C_{3,5}H_7O_2N_{0,196}$ olarak tahmin edilmiştir (Sötemann ve diğ., 2005b).

5. KARARLI HAL MODELİNİN UYGULANMASI

Yapılan tüm laboratuvar çalışmaları sonucunda, birincil çamur için belirlenmesi hedeflenen anaerobik bozunma kinetiği katsayıları ve inert KOİ bileşenleri elde edilememiştir. Bu sebeple laboratuvar ölçekli çalışmalar sonucu birincil çamur için elde edilen karakterizasyon değerleri, Bölüm 4.4.3 , 4.4.3.1 ve 4.4.3.2’de ayrıntılı olarak anlatılan ve Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından yapılmış olan kararlı hal kinetik modeli içerisine yerleştirilmiş ve her bir reaktörün kararlı hale gelmesi durumunda ulaşacağı son KOİ değeri belirlenmiştir.

Laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilen bulgular ise Ek B’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

5.1. Kararlı hal modeli – hidroliz kinetiğinin uygulanması

Laboratuvar ölçekli yapılan deneysel çalışmalarda sisteme verilen çamurun KOİ konsantrasyonu sabit tutulmaya çalışılmış ve laboratuvara getirilen çamurun KOİ değeri ne olursa olsun, KOİ konsantrasyonu 65 g KOİ/l civarına seyreltilerek çalışılmıştır. Çamur bekletme süresi 10 ile 30 gün arasında değişen tam karışımli mezofilik anaerobik çürütücülerde ölçülen deneysel sonuçlar Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Çamur bekletme süresi 10 ile 30 gün arasında değişen tam karışımli mezofilik anaerobik çürütücülerde ölçülen giriş ve çıkış konsantrasyonları

Çamur yaşı (gün)	10	12	15	20	25	30
Giriş debisi, l/gün	0,2	0,167	0,133	0,1	0,08	0,067
Giriş KOİ kons., g COD/l	60,62	60,62	60,62	60,62	60,62	60,62
Giriş UYA kons., g KOİ/l*	1,871	1,871	1,871	1,871	1,871	1,871
Giriş TKN, mg N/l	2330	2330	2330	2330	2330	2330
Giriş NH ₃ , mg N/l	300	300	300	300	300	300
Giriş Alkalinitesi, mg/l CaCO ₃	1370	1370	1370	1370	1370	1370
Girişteki pH Değeri	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40
Ölçülen çürütücü pH değeri	6,40	6,60	7,20	7,00	7,40	7,30

* Giriş UYA konsantrasyonu 1,871 g KOİ/l olarak kabul edilmiştir.

Reaktör çıkışındaki KOİ konsantrasyonları dengeye ulaşamadığından dolayı Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından yapılan çalışmada birincil çamur için belirlenmiş olan kinetik katsayılar ile birlikte laboratuvar ölçekli çalışmalar sonucu birincil çamur için belirlenmiş olan karakterizasyon değerleri kullanılarak (Tablo 5.1) çamur bekletme süresi 10 gün ile 30 gün arasında değişen reaktörlerin çıkış KOİ konsantrasyonları proses kinetik denklemlerinin her birisi (Tablo 4.6) ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Buna ek olarak kararlı hal - stokiyometrik denklemleri kullanılarak her bir reaktörün çıkışındaki amonyak konsantrasyonları, alkaliniteleri ve üretilen metan konsantrasyonları da tahmini olarak belirlenmiştir. Birincil çamurun anaerobik çürütümü kinetik katsayıları Tablo 5.2’de verilmiştir. Bununla birlikte birinci dereceden S_{bp} ’ye bağlı kinetik denklemleri kullanılarak hesaplanan değerler Tablo 5.3’de, birinci dereceden S_{bp} ve Z_{AD} ’ye bağlı kinetik denklemleri kullanılarak hesaplanan değerler Tablo 5.4’de, monod kinetiği ile hesaplanan değerler Tablo 5.5’de ve doyumluk kinetiği kullanılarak hesaplanan ifadeler ise Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.2: Birincil çamurun anaerobik çürütülmesinde stabilizasyon prosesi için esas alınan kinetik katsayılar

Parametre	Değer	Birim
$f_{ps'up}$	0,338	-
Y_{AD}	0,113	g KOİ/g KOİ
b_{AD}	0,041	1/gün
K_m	2,004	g organik/g biyokütle.gün
K_s	0,355	g organik/l
K_M	2,047	g organik/g biyokütle.gün
K_S	0,263	g organik/l
K_h	2,474	1/gün
K_H	1,714	l/g KOİ Z_{AD} .gün

Tablo 5.3 : Birinci dereceden S_{bp} 'ye bağı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar

Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_h/Z_{AD}	S_{bp}/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp} /g KOİ Z_{AD} .gün		%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
10	60,62	25,068	0,0828646	20,490	38,259	1,535	36,725	3,797	3,043	1,248	0,504	58,65	33,68	13,33
12	60,62	24,691	0,0786687	20,490	38,259	1,293	36,966	3,200	2,908	1,100	0,445	59,27	34,06	13,47
15	60,62	24,258	0,0731153	20,490	38,259	1,048	37,212	2,592	2,721	0,953	0,385	59,98	34,49	13,64
20	60,62	23,738	0,0654185	20,490	38,259	0,798	37,462	1,974	2,451	0,805	0,326	60,84	35,01	13,83
25	60,62	23,361	0,0591879	20,490	38,259	0,645	37,614	1,596	2,226	0,717	0,290	61,46	35,39	13,97
30	60,62	23,070	0,0540409	20,490	38,259	0,542	37,717	1,341	2,038	0,658	0,266	61,94	35,68	14,08

Tablo 5.4 : Birinci dereceden S_{bp} & Z_{AD} 'ye bağı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar

Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_h/Z_{AD}	S_{bp}/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp} /g KOİ Z_{AD} .gün		%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
10	60,62	24,328	0,0828646	20,490	38,259	0,728	37,531	3,881	3,110	1,248	0,234	59,87	34,42	13,61
12	60,62	24,091	0,0786687	20,490	38,259	0,642	37,617	3,256	2,959	1,100	0,217	60,26	34,66	13,70
15	60,62	23,802	0,0731153	20,490	38,259	0,556	37,704	2,627	2,757	0,953	0,202	60,74	34,95	13,81
20	60,62	23,432	0,0654185	20,490	38,259	0,470	37,790	1,991	2,472	0,805	0,190	61,35	35,32	13,95
25	60,62	23,148	0,0591879	20,490	38,259	0,418	37,841	1,605	2,240	0,717	0,187	61,82	35,60	14,05
30	60,62	22,920	0,0540409	20,490	38,259	0,384	37,876	1,346	2,047	0,658	0,188	62,19	35,83	14,14

Tablo 5.5 : Monod kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar

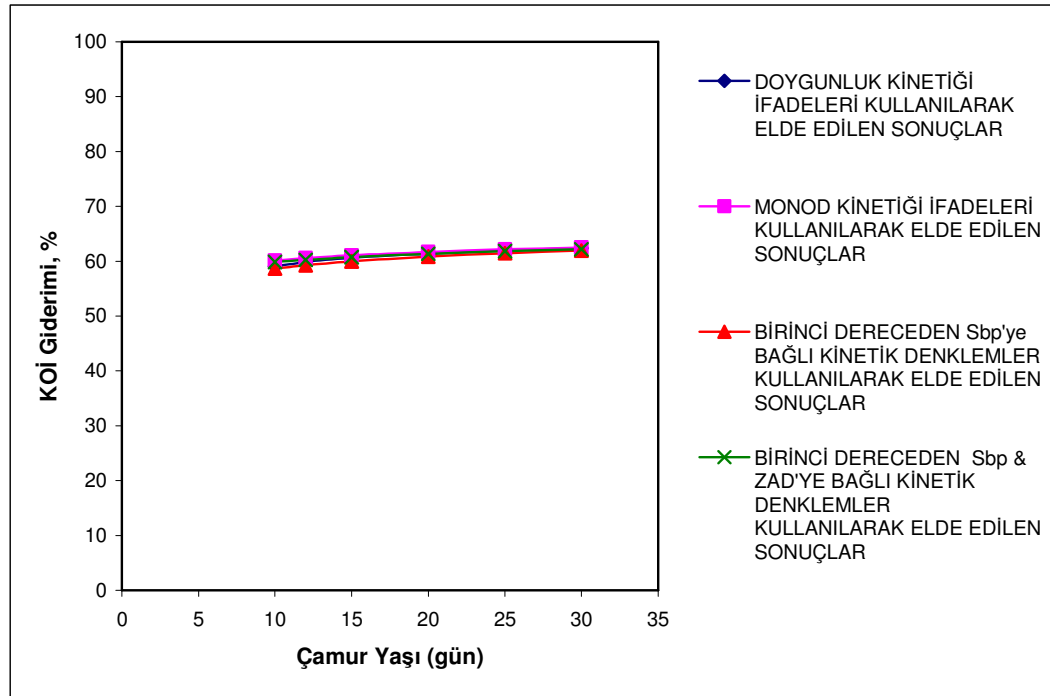
Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_b/Z_{AD}	S_{bp}/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp}/g KOİ $Z_{AD} \cdot gün$		%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
10	60,62	24,197	0,0828646	20,490	38,259	0,586	37,674	3,895	3,122	1,248	0,188	60,1	34,55	13,66
12	60,62	23,898	0,0786687	20,490	38,259	0,432	37,827	3,274	2,976	1,100	0,145	60,6	34,85	13,77
15	60,62	23,585	0,0731153	20,490	38,259	0,322	37,938	2,643	2,774	0,953	0,116	61,1	35,16	13,89
20	60,62	23,215	0,0654185	20,490	38,259	0,238	38,021	2,003	2,487	0,805	0,096	61,7	35,53	14,03
25	60,62	22,940	0,0591879	20,490	38,259	0,198	38,062	1,615	2,253	0,717	0,088	62,2	35,81	14,13
30	60,62	22,721	0,0540409	20,490	38,259	0,173	38,086	1,354	2,058	0,658	0,084	62,5	36,03	14,21

Tablo 5.6 : Doygunluk kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar

Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_b/Z_{AD}	S_{bp}/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp}/g KOİ $Z_{AD} \cdot gün$		%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
10	60,62	24,815	0,0828646	20,490	38,259	1,259	37,000	3,826	3,066	1,248	0,411	59,07	33,93	13,43
12	60,62	24,327	0,0786687	20,490	38,259	0,898	37,361	3,234	2,939	1,100	0,306	59,87	34,42	13,61
15	60,62	23,871	0,0731153	20,490	38,259	0,630	37,629	2,621	2,751	0,953	0,229	60,62	34,88	13,78
20	60,62	23,387	0,0654185	20,490	38,259	0,422	37,837	1,993	2,475	0,805	0,171	61,42	35,36	13,96
25	60,62	23,053	0,0591879	20,490	38,259	0,318	37,941	1,610	2,246	0,717	0,142	61,97	35,70	14,09
30	60,62	22,799	0,0540409	20,490	38,259	0,256	38,004	1,351	2,054	0,658	0,125	62,39	35,95	14,18

Tablo 5.3, Tablo 5.4, Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'dan görüldüğü gibi her bir kinetik ifade kullanılarak belirlenen KOİ giderim verimleri incelendiğinde KOİ giderim verimlerinin birbirine çok yakın olduğu ve her bir kinetik ifade ile elde edilen KOİ giderim verimlerinin çamur yaşı arttıkça arttığı görülmüştür. Bu durum olması istenen bir durumdur.

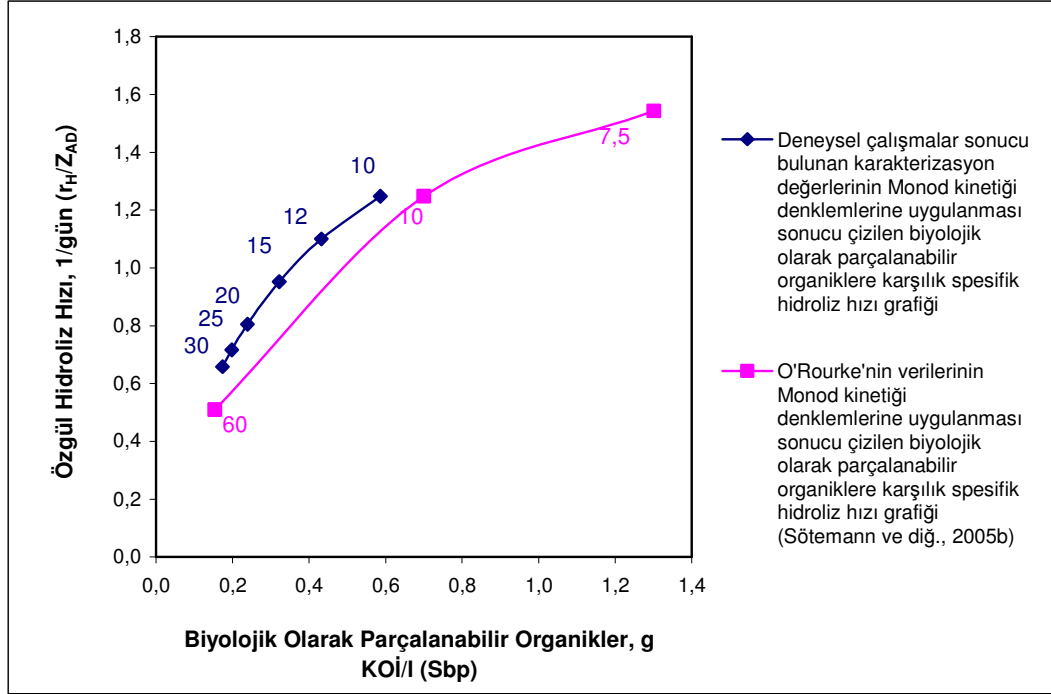
Tablo 5.3, Tablo 5.4, Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da hesaplanan KOİ giderim verimlerini birbiri ile karşılaştırabilmek için çamur yaşına karşılık KOİ giderim verimleri grafiği Excel programı yardımıyla çizdirilmiştir. Buna göre her bir kinetik ifade ile elde edilen KOİ giderim verimleri birbirleriyle tutarlıdır ve birbirine çok yakın değerler almıştır. Laboratuvar ölçekli yapılan çalışmalar sonucu belirlenen karakterizyon değerlerinin farklı kinetik ifadelere uygulanması ile bulunan KOİ giderim verimleri Şekil 5.1'de verilmektedir.



Şekil 5.1: Laboratuvar ölçekli yapılan çalışmalar sonucu birincil çamur için belirlenen karakterizyon değerlerinin farklı kinetik ifadelere uygulanması ile elde edilen KOİ giderim verimlerinin karşılaştırılması

Bununla birlikte laboratuvar çalışmaları ile belirlenen birincil çamurun konsantrasyon değerleri Monod kinetiği denklemleri içerisine girilmiş ve Monod kinetiğine uygun olarak hesaplanan değerler, O'Rourke'nin yaptığı çalışma sonucu bulduğu değerler

ile karşılaştırılmıştır (Sötemann ve diğ., 2005b). Bulunan değerler biyolojik olarak parçalanabilir organiklere karşılık özgül hidroliz hızı grafiği çizilerek değerlendirilmiştir (Şekil 5.2). Her iki çalışma sonucu bulunan değerler karşılaştırıldığında düşük çamur yaşına sahip olan reaktörlerde hidroliz hızının daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5.2 : Biyolojik olarak parçalanabilir organiklere karşılık özgül hidroliz hızı grafiği

Daha önce yapılmış çalışmalarla belirlenmiş olan kinetik katsayıların Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi birincil çamuru için belirlenmiş olan karakterizasyon değerleri ile birlikte Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından yapılmış olan kararlı hal kinetik modeline uygulanması sonucunda farklı kinetik ifadelerle elde edilen KOİ giderim verimlerinin birbiri ile uyumlu olduğu ve birbirine çok yakın değerler aldığı görülmüştür. Bunun yanında KOİ giderim veriminin beklendiği gibi çamur yaşı arttıkça arttığı da yapılan hesaplamalarla kanıtlanmıştır. Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi birincil çamuru için belirlenmiş olan karakterizasyon değerleri Monod kinetiği formülleri içerisine uygulanmış ve biyolojik olarak parçalanabilir organiklere karşılık gelen (S_{bp}) özgül hidroliz hızı (r_H/Z_{AD}) grafiği çizilmiştir. Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi birincil çamuru için çizilen bu grafik O'Rourke'un 1967 yılında çizmiş olduğu grafik ile karşılaştırılmıştır. Birincil çamur için çizdirilen bu grafik O'Rourke'un

izmiş olduğu grafikte karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlar vermiştir. Buna göre çamur yaşı azaldıkça özgül hidroliz hızının arttığı kanıtlanmış olmuştur.

Yapılan hesaplamalar ile laboratuvar ölçekli yapılan deneysel çalışmaların beklendiği gibi olması durumunda belirlenmesi hedeflenen kinetik katsayıların Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından belirlenen hidroliz kinetiği katsayılarından çok farklı olmayacağı anlaşılmıştır.

Bununla birlikte kararlı hal - stokiyometrik denklemleri kullanılarak her bir reaktörün çıkışındaki amonyak konsantrasyonları, alkalinite ve üretilen metan konsantrasyonları da tahmini edilmiştir.

5.2. Kararlı hal modeli – stokiyometrik denklemlerin uygulanması

Bölüm 4.4.3.2’de verilen bilgiler kullanılarak çamur yaşı 10, 12, 15, 20, 25 ve 30 gün olan reaktrlerin her birisi için birincil çamurun anaerobik parçalanmasını gösteren stokiyometrik denklemler ayrı ayrı elde edilmiş ve stokiyometrik denklemler vasıtasıyla elde edilen değerler ile anaerobik çürüme modelinin kinetik kısmı ile hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır.

Çamur yaşı 10 gün olan reaktör için stokiyometrik denklemin elde edilmesi:

$\Theta_c=10$ gün için birincil çamurun tamamen çürümesini temsil eden stokiyometrik denklem aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

Birincil amur kompozisyonu $C_{3,5}H_7O_2N_{0,196}$ olarak tahmin edildiğinden birincil çamur için KOİ değer (4.6) denklemine uygulanarak aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$KOİ = 8.(7 + 2(2 \times 3,5 - 2) - 3 \times 0,196) = 131,3 \text{ g KOİ/mol}$$

Giderilen hidroliz olabilen KOİ konsantrasyonu ise;

$\Delta S_{bp}/131,3 = 37,674/131,3 = 0,2869 \text{ mol/l}$ olarak hesaplanır ($C_{3,5}H_7O_2N_{0,196}$ ’nın katsayısı).

(4.5) denklemindeki ifadeler yerine konulduğuunda çamur kütlesine dönüştürülen giderilmiş KOİ bileşeni “E” elde edilir.

$$E = \frac{0,113}{[1 + 0,041 \times 10(1 - 0,113)]} = 0,083$$

(4.4) denklemindeki ifadeler yerine konulduğunda ise D katsayısı elde edilir.

$$D = (4 \times 3,5) + 7 - (2 \times 2) - (3 \times 0,196) = 16,4 \text{ olarak hesaplanır.}$$

(4.3) denklemine göre H₂O'nun katsayısı:

$$\left(2X + A - Z - \frac{9ED}{20} - \frac{(1-E)D}{4} \right) =$$

$$\left(2.(3,5) + 0,196 - 2 - \frac{9.0,0828646.16,412}{20} - \frac{(1-0,0828646).16,12}{4} \right) = 0,82$$

(4.3) denklemine göre CO₂'nin katsayısı:

$$\left(X - A - \frac{ED}{5} - \frac{(1-E)D}{8} \right) =$$

$$\left(3,5 - 0,196 - \frac{0,0828646.16,412}{5} - \frac{(1-0,0828646).16,412}{8} \right) = 1,15$$

(4.3) denklemine göre CH₄'ün katsayısı:

$$\left(\frac{(1-E)D}{8} \right) = \left(\frac{(1-0,0828646).16,412}{8} \right) = 1,88$$

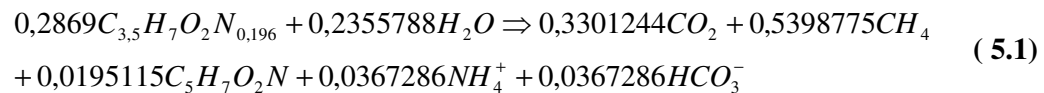
(4.3) denklemine göre C₅H₇O₂N'in katsayısı:

$$\left(\frac{ED}{20} \right) = \left(\frac{0,0828646.16,412}{20} \right) = 0,068$$

(4.3) denklemine göre NH₄⁺ ve HCO₃⁻'nin katsayısı:

$$\left(A - \frac{ED}{20} \right) = \left(0,196 - \frac{0,0828646.16,412}{20} \right) = 0,128$$

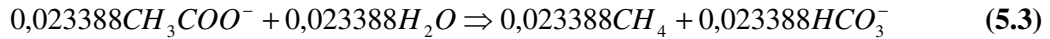
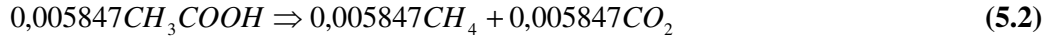
Hesaplanan tüm katsayılar C_{3,5}H₇O₂N_{0,196}'nın katsayısı ile çarpıldığında (5.1) denklemi elde edilir.



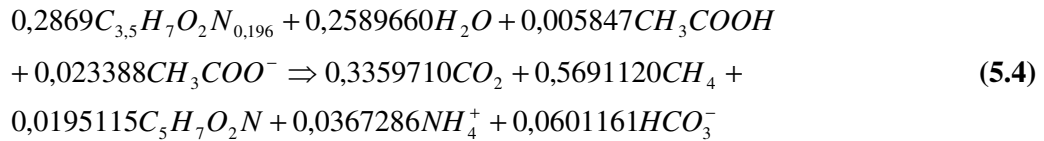
Bununla birlikte iyonlaşmış ve iyonlaşmamış asetat türlerinin metanojenler tarafından tüketimini gösteren stokiyometrik denklemlerin bileşenlerinin katsayıları Tablo 5.7’de verilmiştir. Toplam UYA konsantrasyonunun %20’si iyonlaşmamış CH_3COOH konsantrasyonu, %80’i ise iyonlaşmış CH_3COOH konsantrasyonunu temsil etmektedir. Buna göre iyonlaşmamış CH_3COOH konsantrasyonu $(1,871 \times 0,20) \text{ g KOİ/l} / 64 \text{ g KOİ/mol} = 0,005847 \text{ mol/l}$, iyonlaşmış CH_3COOH konsantrasyonu ise $(1,871 \times 0,80) \text{ g KOİ/l} / 64 \text{ g KOİ/mol} = 0,023388 \text{ mol/l}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler (4.7) ve (4.8) denklemlerine yerleştirildiğinde (5.2) ve (5.3) no’lu denklemler elde edilir.

Tablo 5.7 : İyonlaşmış ve iyonlaşmamış uçucu yağ asitlerinin toplam stokiyometrik denkleme getireceği katsayılar

Bileşen	Birim	Değer
Giriş UYA konsantrasyonu	g KOİ / l	1,871
İyonlaşmamış CH_3COOH kons. (%20)	g KOİ / l	0,3742
İyonlaşmış CH_3COO^- kons. (%80)	g KOİ / l	1,4968
İyonlaşmamış CH_3COOH kons. (%20)	mol/l	0,005847
İyonlaşmış CH_3COO^- kons. (%80)	mol/l	0,023388



(5.1), (5.2) ve (5.3) denklemleri taraf tarafa toplanırsa çamur yaşı 10 gün olan reaktör içerisindeki birincil çamurun çürümesini temsil eden toplam stokiyometrik denklem ((5.4) denklemi) elde edilir.



(5.4) denklemine göre 0,0195115 mol/l biyokütle oluşmuştur.

Buna göre $0,0195115 \times 160 \text{ g KOİ/mol} = 3,122 \text{ g KOİ/l}$ olarak bulunmakta ve bu değer anaerobik çürüme modelinin monod kinetik ifadeleri ile hesaplanan Z_{AD} değeri

ile eşit çıkmaktadır (Tablo 5.5). Bununla birlikte (5.4) denklemine göre 0,3359710 mol CO₂, 0,5691120 mol CH₄ üretimi gerçekleşmiştir.

Toplam üretilen gaz hacmi ise;

$$0,3359710 + 0,5691120 = 0,9051 \text{ mol/l' dir.}$$

20 °C ve 1 atm basınç altında 24 l gaz/mol olduğundan;

$$0,3359710 \times 24 = 8,063 \text{ l CO}_2/\text{l giriş debisi}$$

$$0,5691120 \times 24 = 13,66 \text{ l CH}_4/\text{l giriş debisi}$$

$$0,9051 \times 24 = 21,722 \text{ l toplam gaz/l giriş debisi}$$

Buradan Tablo 5.5’de verilen anaerobik çürüme modelinin monod kinetik ifadeleri kullanılarak hesaplanan metan üretiminin stokiyometrik denklemle hesaplanan metan üretimine eşit olduğu görülmektedir.

CO₂ gazının kompozisyonu (mol bileşeni ya da kısmi basınç olarak P_{CO2});

$$8,063 / 21,722 = 0,371 \text{ olarak bulunur.}$$

(5.4) denklemine göre 0,0367286 mol/l amonyak, 0,0601161 mol/l bikarbonat alkalinitesi üretilmiştir.

Buna göre reaktör içerisinde;

$$0,0367286 \times 14000 = 514 \text{ mg NH}_3\text{-N/l}$$

$$0,0601161 \times 50000 = 3006 \text{ mg/l CaCO}_3 \text{ üretimi gerçekleşmiştir.}$$

Üretilen bu amonyak ve alkalinite değerleri başlangıçtaki ham çamurun giriş değerlerine eklendiğinde çıkıştaki NH₃ ve alkalinite değerleri tahmini olarak bulunmuştur. Buna göre;

$$514 + 298 = 812 \text{ mg NH}_3\text{-N/l olarak,}$$

$$1370 + 3006 = 4376 \text{ mg/l CaCO}_3 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Çamur yaşı 10 ve 30 gün arasında değişen tüm reaktörlerdeki birincil çamurun anaerobik parçalanmasını temsil eden stokiyometrik denklemleri oluşturan her bir

bileşenin katsayısı Excel programında hesaplanmıştır. Katsayılar adım adım hesaplanmıştır. Öncelikle $C_{3,5}H_7O_2N_{0,196}$ 'nın katsayısı dikkate alınmadan (4.3) denkleminde verilmiş olan katsayılar hesaplanmıştır (Tablo 5.8). Daha sonra Tablo 5.8'de hesaplanan tüm katsayılar $C_{3,5}H_7O_2N_{0,196}$ 'nın katsayısı olan $\Delta S_{bp}/131,3$ ile çarpılarak (4.3) denkleminin asıl katsayıları hesaplanmıştır (Tablo 5.9). Tablo 5.9'da elde edilmiş olan katsayılar (5.2) ve (5.3) denklemlerinin katsayıları ile taraf tarafa toplandığında Tablo 5.10'da verilmiş olan katsayılar elde edilmiştir. Bu katsayılar toplam denklemin katsayılarını vermektedir. Tablo 5.10'daki katsayılar kullanılarak çamur yaşı 12 ile 30 gün arasında değişen çürütücüler için stokiyometrik denklemler yazılmıştır.

Tablo 5.8 : Birincil çamurun çürütmesini temsil eden genel stokiyometrik denklem bileşenlerinin çamur yaşı 10 ile 30 gün arasında değişen reaktörler için hesaplanan katsayıları

Θ_c gün	E	D	H ₂ O'nun Katsayısı	CO ₂ 'nin Katsayısı	CH ₄ 'ün Katsayısı	C ₅ H ₇ O ₂ N'in Katsayısı	NH ₄ ⁺ 'nın Katsayısı	HCO ₃ 'ün Katsayısı
10	0,0828646	16,412	0,8210052	1,1505019	1,8815032	0,0679987	0,1280013	0,1280013
12	0,0786687	16,412	0,8347779	1,1556667	1,8901112	0,0645555	0,1314445	0,1314445
15	0,0731153	16,412	0,8530065	1,1625024	1,9015040	0,0599984	0,1360016	0,1360016
20	0,0654185	16,412	0,8782703	1,1719764	1,9172939	0,0536824	0,1423176	0,1423176
25	0,0591879	16,412	0,8987217	1,1796457	1,9300761	0,0485696	0,1474304	0,1474304
30	0,0540409	16,412	0,9156162	1,1859811	1,9406352	0,0443459	0,1516541	0,1516541

Tablo 5.8'deki katsayılar C_{3,5}H₇O₂N_{0,196}'nın katsayısı olan $\Delta S_{bp}/131,3$ ile çarpılarak Tablo 5.9'daki denklem katsayıları elde edilmiştir.

Tablo 5.9 : Birincil çamurun çürütmesini temsil eden genel stokiyometrik denklem bileşenlerinin katsayılarının $\Delta S_{bp}/131,3$ ile çarpılması sonucu çamur yaşı 10 ile 30 gün arasında değişen reaktörler için hesaplanan katsayılar

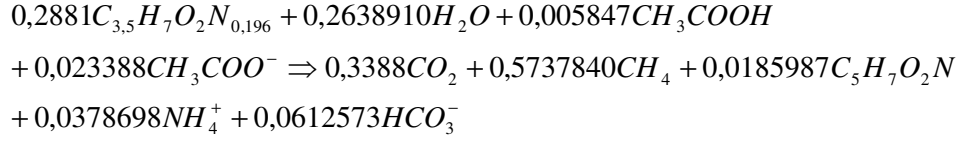
Θ_c gün	ΔS_{bp} g/l	Giderilen Hidroliz Olabilen KOİ konsantrasyonu (C _{3,5} H ₇ O ₂ N _{0,196} 'nın katsayısı)= $\Delta S_{bp}/131,3$ mol/l	E	D	H ₂ O'nun Katsayısı	CO ₂ 'nin Katsayısı	CH ₄ 'ün Katsayısı	C ₅ H ₇ O ₂ N'in Katsayısı	NH ₄ ⁺ 'nın Katsayısı	HCO ₃ 'ün Katsayısı
10	37,674	0,2869	0,0828646	16,412	0,2355788	0,3301244	0,5398775	0,0195115	0,0367286	0,0367286
12	37,827	0,2881	0,0786687	16,412	0,2405035	0,3329531	0,5445500	0,0185987	0,0378698	0,0378698
15	37,938	0,2890	0,0731153	16,412	0,2464764	0,3359053	0,5494399	0,0173365	0,0392977	0,0392977
20	38,021	0,2896	0,0654185	16,412	0,2543315	0,3393836	0,5552144	0,0155455	0,0412127	0,0412127
25	38,062	0,2899	0,0591879	16,412	0,2605346	0,3419729	0,5595186	0,0140801	0,0427393	0,0427393
30	38,086	0,2901	0,0540409	16,412	0,2655996	0,3440263	0,5629344	0,0128638	0,0439914	0,0439914

(5.1), (5.2) ve (5.3) denklemleri taraf tarafa toplandığında Tablo 5.10'da verilen toplam denklem katsayıları elde edilir.

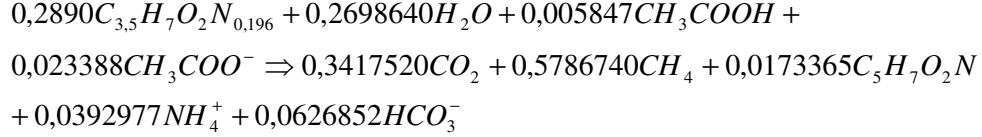
Tablo 5.10 : Çamur yaşı 10, 12, 15, 20, 25 ve 30 gün olan reaktörlerdeki birincil çamurun anaerobik parçalanmasını temsil eden toplam stokiyometrik denklem bileşenlerinin katsayıları

Θ_c	ΔS_{bp}	Giderilen Hidroliz Olabilen KOİ konsantrasyonu ($C_{3,5}H_7O_2N_{0,196}$ 'nın katsayısı) = $\Delta S_{bp}/131,3$	E	D	H_2O	CO_2	CH_4	$C_3H_7O_2N$ 'in Katsayısı	NH_4^+ 'nın Katsayısı	HCO_3^-
gün	g/l	mol/l								
10	37,674	0,2869	0,0828646	16,412	0,2589660	0,3359710	0,5691120	0,0195115	0,0367286	0,0601161
12	37,827	0,2881	0,0786687	16,412	0,2638910	0,3388000	0,5737840	0,0185987	0,0378698	0,0612573
15	37,938	0,2890	0,0731153	16,412	0,2698640	0,3417520	0,5786740	0,0173365	0,0392977	0,0626852
20	38,021	0,2896	0,0654185	16,412	0,2777190	0,3452310	0,5844490	0,0155455	0,0412127	0,0646002
25	38,062	0,2899	0,0591879	16,412	0,2839220	0,3478200	0,5887530	0,0140801	0,0427393	0,0661268
30	38,086	0,2901	0,0540409	16,412	0,2889870	0,3498730	0,5921690	0,0128638	0,0439914	0,0673789

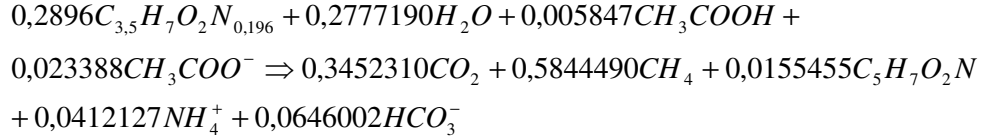
Buna göre $\Theta_c=12$ gün için;



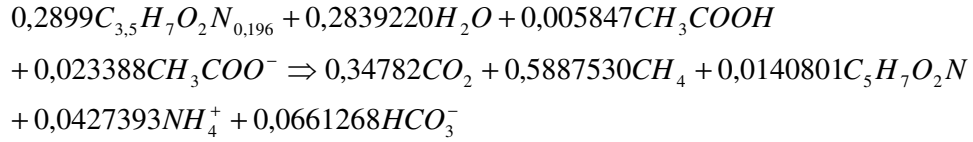
$\Theta_c=15$ gün için;



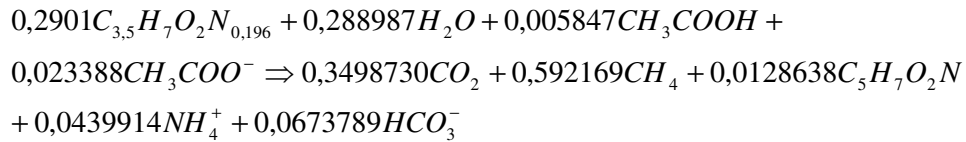
$\Theta_c=20$ gün için;



$\Theta_c=25$ gün için;



$\Theta_c=30$ gün için;



stokiyometrik denklemleri elde edilir.

Tüm stokiyometrik denklemler göz önünde bulundurularak biyokütle miktarı, üretilen CO_2 , CH_4 ve toplam gaz miktarı, CO_2 'nin kısmi basıncı, reaktör çıkışındaki amonyak ve alkalinite konsantrasyonları hesaplanarak Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11: Reaktör çıkışındaki tahmini konsantrasyonlar

Θ_c	Biyokütle miktarı	CO ₂ Üretimi	CH ₄ Üretimi	Toplam Gaz Üretimi	P _{CO2}	Üretilen NH ₃ -N Konsantrasyonu	Çıkıştaki Tahmini NH ₃ -N Konsantrasyonu	Alkalinite	Çıkıştaki Tahmini Alkalinite
gün	g KOİ/l	1 CO ₂ /l giriş debisi	1 CH ₄ /l giriş debisi	1 toplam gaz/l giriş debisi		mg/l	mg/l	mg/l CaCO ₃	mg/l CaCO ₃
10	3,122	8,063	13,66	21,722	0,371	514	812	3006	4376
12	2,976	8,131	13,77	21,902	0,371	530	828	3063	4433
15	2,774	8,202	13,89	22,090	0,371	550	848	3134	4504
20	2,487	8,286	14,03	22,312	0,371	577	875	3230	4600
25	2,253	8,348	14,13	22,478	0,371	598	896	3306	4676
30	2,058	8,397	14,21	22,609	0,371	616	914	3369	4739

Kararlı hal stokiyometrik denklemleri kullanılarak hesaplanan biyokütle ve metan gazı miktarları, Tablo 5.5’de verilen anaerobik çürüme kararlı hal modelinin Monod kinetik denklemleri ile hesaplanan biyokütle ve metan gazı miktarları ile karşılaştırıldığında aynı değerlere sahip olduğu görülmektedir. Hem model ile yapılan hesaplamalar hem de stokiyometrik denklemlerle yapılan hesaplamalar birbirini doğrulamaktadır. Dolayısıyla Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından belirlenmiş olan kinetik katsayılar Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi birincil çamuru için uygulandığında da doğru sonuçlar vermektedir. Buradan deneysel çalışmalar sonucu kararlı hale ulaşılması durumunda belirlenmiş olacak olan katsayıların hesaplamalarda kullanılan katsayılardan farklı olmayacağı anlaşılmaktadır.

5.3. Kararlı hal modelinin Kayseri atıksu arıtma tesisine uygulanması

Kararlı hal modelinin doğruluğunu belirleyebilmek amacıyla yapılan tüm hesaplamalar bir kez de Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi’nin gerçek verileri kullanılarak yapılmıştır.

Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi çamur çürütme tankının çamur bekletme süresi 22,5 gün olduğundan tüm hesaplamalar çamur yaşı 22,5 güne göre tekrar yapılmış ve sonuçta kararlı hal kinetik denklemleri ile bulunan biyokütle miktarı ve metan miktarı kararlı hal stokiyometrik denklemleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca stokiyometrik denklemleri kullanarak reaktör çıkışındaki alkalinite, metan üretimi ve amonyak konsantrasyon değerleri belirlenmiş ve atıksu arıtma tesisinden elde edilen gerçek verilerle karşılaştırılmıştır.

Hesaplamalarda kullanılacak olan tesise ait 5 günlük çürütücü giriş ve çıkış KOİ konsantrasyonları ve bu değerlerin ortalamaları Tablo 5.12’de verilmiştir.

Tablo 5.12 : Kayseri atıksu arıtma tesisine ait 5 günlük çamur çürütücü giriş, çıkış ve ortalama KOİ değerleri

Tarih	05.01.2006	06.01.2006	24.01.2006	25.01.2006	26.01.2006	Ortalama
Çürütücü Giriş KOİ (mg/l)	51.500	74.727	76.080	81.500	110.600	78.880
Çürütücü Çıkış KOİ (mg/l)	33.700	34.656	26.900	27.700	22.650	29.120

Çürütücüye giren ve çürütücüden çıkan akımlardaki ortalama KOİ değerleri kararlı hal kinetik denklemleri içerisinde yerleştirilmiş ve tüm kinetik ifadeler için KOİ giderim verimleri belirlenmiştir. Buna göre hesaplanan ifadeler Tablo 5.13, Tablo 5.14, Tablo 5.15 ve Tablo 5.16’da verilmiştir.

Tablo 5.13 : Birinci dereceden S_{bp} 'ye bağlı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar

Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_b/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp}/g KOİ $Z_{AD} \cdot gün$	%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
22,5	78,88	30,671	0,0621474	26,661	50,348	0,939	49,409	2,322	3,071	0,756	61,12	46,34	18,08

Tablo 5.14 : Birinci dereceden S_{bp} & Z_{AD} 'ye bağlı kinetik denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar

Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_b/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp}/g KOİ $Z_{AD} \cdot gün$	%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
22,5	78,88	30,204	0,0621474	26,661	50,348	0,441	49,906	2,345	3,102	0,756	61,71	46,80	18,25

Tablo 5.15 : Monod kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar

Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_b/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp}/g KOİ $Z_{AD} \cdot gün$	%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
22,5	78,88	29,992	0,0621474	26,661	50,348	0,215	50,132	2,356	3,116	0,756	62,0	47,02	18,33

Tablo 5.16 : Doygunluk kinetiği denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar

Θ_c	S_{ti}	S_{te}	E	S_{upi}	S_{bpi}	S_{bp}	ΔS_{bp}	r_h	Z_{AD}	r_b/Z_{AD}	KOİ Giderimi	S_m	Q_m
gün	g/l	g/l		g/l	g/l	g/l	g/l	g/l.gün	g/l	g KOİ S_{bp}/g KOİ $Z_{AD} \cdot gün$	%	g KOİ / l	l metan/l giriş debisi
22,5	78,88	30,238	0,0621474	26,661	50,348	0,477	49,870	2,344	3,099	0,756	61,67	46,77	18,24

Kinetik ifadeleri kullanarak yapılan hesaplamalar sonucunda her bir kinetik denklemle bulunan KOİ giderim verimi birbirine çok yakın değerler almıştır. Bununla birlikte tesisin çürütücü çıkışındaki ortalama KOİ konsantrasyon değeri olan 29.120 mg/l KOİ kararlı hal kinetik ifadeleri ile hesaplanan tahmini çıkış KOİ konsantrasyon değerleri ile hemen hemen aynıdır. Dolayısıyla kararlı hal kinetik modelinde birincil çamur için belirlenmiş olan kinetik katsayılar, mevcut arıtma tesislerinin çürütücüleri için doğru tahminler yapmamıza olanak vermektedir.

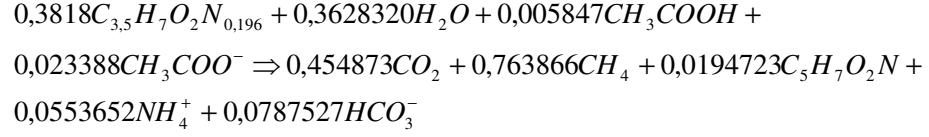
Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi çürütücü havuzu için uygulanan kararlı hal kinetik denklemleri ile hesaplanan biyokütle miktarı ve metan gazı üretimi değerlerinin doğruluğunu karşılaştırabilmek amacıyla arıtma tesisinin çürütücü tankı için kararlı hal-stokiyometrik denklemleri de uygulanmıştır. Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi birincil çamur çürütümünü temsil eden stokiyometrik denklemin katsayıları Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.17 : Kayseri atıksu arıtma tesisi birincil çamur çürütümünü temsil eden stokiyometrik denkleminin katsayıları

Θ_c	ΔS_{bp}	Giderilen Hidroliz Olabilen KOİ konsantrasyonu ($C_{3,5}H_7O_2N_{0,196}$ 'nın katsayısı) = $\Delta S_{bp}/131,3$	E	D	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	C ₅ H ₇ O ₂ N'in Katsayısı	NH ₄ ⁺ 'nin Katsayısı	HCO ₃ ⁻
gün	g/l	mol/l								
22,5	50,132	0,3818	0,0621474	16,412	0,3628320	0,4548730	0,7638660	0,0194723	0,0553652	0,0787527

Buna göre çamur yaşı 22,5 gün olan çamur çürütme tankı için elde edilen stokiyometrik denklem aşağıda verilmiştir.

$\Theta_c=22,5$ gün için;



Arıtma tesisinin çürütücü tankı çamuru için elde edilen stokiyometrik denklem göz önünde bulundurularak biyokütle miktarı, üretilen CO_2 , CH_4 ve toplam gaz miktarı, CO_2 'nin kısmi basıncı, reaktör çıkışındaki amonyak ve alkalinite konsantrasyonları hesaplanmıştır ve Tablo 5.18'de verilmiştir.

Tablo 5.18 : Kayseri atıksu arıtma tesisi çürütücü çıkışında tahmin edilen kirletici konsantrasyonları

Θ_c	Biyokütle miktarı	CO ₂ Üretimi	CH ₄ Üretimi	Toplam Gaz Üretimi	P _{CO2}	Üretilen NH ₃ -N Konsantrasyonu	Çıkıştaki Tahmini NH ₃ -N Konsantrasyonu	Alkalinite	Çıkıştaki Tahmini Alkalinite
gün	g KOİ/l	1 CO ₂ /l giriş debisi	1 CH ₄ /l giriş debisi	1 toplam gaz/l giriş debisi		mg/l	mg/l	mg/l CaCO ₃	mg/l CaCO ₃
22,5	3,116	10,917	18,33	29,250	0,373	775	929	3938	5308

Yapılan hesaplamalara göre 22,5 gün çamur bekletme süresine sahip olan atıksu arıtma tesisinin çamur çürütücü tankı için kararlı hal kinetik denklemleri ile elde edilen asidojen biyokütle konsantrasyonu ve metan üretimi değerleri (Tablo 5.15) kararlı hal stokiyometrik modeli ile elde edilen değerlerle aynıdır. Dolayısıyla modelin her iki bileşeni de birbiri ile uyumludur ve doğru sonuçlar vermektedir.

Bununla birlikte tesisin çürütücü çıkışındaki 92 günlük metan üretimi ve alkalinite değerleri ve bu değerlerin ortalamaları Ek C’de verilmektedir. 92 günlük ortalama tesis verilerine bakıldığında ortalama metan üretimi 18,22 l CH₄/l giriş debisi’dir. Bu değer, kararlı hal kinetik modeli ile bulunan metan debisi (18,33 l CH₄/l giriş debisi) ile hemen hemen aynıdır. Yine 92 günlük verilerin alkalinite değerlerinin ortalaması alındığında alkalinite 4003 mg/l CaCO₃ olarak bulunmuştur. Kararlı hal modeli uygulanarak çürütücü çıkışında elde edilen alkalinite değeri (5308 mg/l CaCO₃), tesisin 92 günlük ortalama alkalinite değeri ile karşılaştırıldığında değerler arasında çok yüksek bir fark olmadığı ve modelin arıtma tesisi verilerini de sağladığı görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Anaerobik kinetik katsayıların belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda her bir reaktöre beslenen çamurun tek bir stoktan alınamaması ve başlangıçta reaktörlerdeki karışımın sürekliliğinin sağlanamaması gibi sebeplerden dolayı reaktörler kararlı hale ulaşamamıştır. Laboratuarda yapılan deneyler sonucunda KOİ, TKM ve TUKM parametrelerinde beklenen giderimler gerçekleşmemiş ve biyogaz üretim miktarlarında dalgalanmalar görülmüştür.

Bununla birlikte inert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kurulan reaktörlerde KOİ gideriminin beklendiği gibi gerçekleşmemesi sonucu sistemde nütrient maddelerin eksik olduğu anlaşılmış her bir reaktöre 26. gün nütrient ilavesi yapılmıştır. Nütrient ilavesi ile birlikte KOİ parametresinde düşüşler gözlemlenmiştir. Bu sebeple yapılan çalışmanın daha güvenilir olması açısından inert KOİ bileşenlerinin belirlenmesi amacıyla reaktörler yeniden kurulmuştur. İkinci kez yapılan inert KOİ bileşenlerinin belirlenmesi çalışmasında ise nütrient ilavesi başlangıçta gerçekleştirilmesine rağmen KOİ giderimi düşünüldüğü gibi gerçekleşmemiştir. Reaktörler içerisine beslenen çamur ve glikozun yaklaşık 1/32,5 oranında seyreltilmesi sonucunda bu denli seyreltik bir atığa alışık olmayan mikroorganizma, besi maddesine akline olamamış ve beklenen KOİ giderimlerini gerçekleştirememiştir. Bu sebeple birincil çamurun biyolojik olarak parçalanamayan kısmının oranı için Sötemann ve diğ., (2005b) tarafından kabul edilmiş olan değer esas alınmıştır.

Yapılan laboratuvar çalışmalarından istenilen sonuçlara ulaşılamamıştır. Bunun üzerine laboratuarda birincil çamur için elde edilen karakterizasyon değerleri daha önce Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından yapılmış olan kararlı hal kinetik modeline girilerek, Sötemann ve diğ. (2005b)'nin çalışmaları ile elde edilmiş olan kinetik katsayılarla mezofilik şartlar için kararlı hal simülasyonları yapılmıştır.

Buna göre, çamur bekletme süresi 10 ile 30 gün arasında değişen reaktörlerin çıkışındaki KOİ konsantrasyonları; Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından yapılan

kararlı hal model çalışmasında birincil çamur için belirlenmiş olan kinetik katsayılar kullanılarak proses kinetik denklemlerinin her birisi ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Her bir kinetik ifade ile hesaplanan KOİ giderim verimi %60 civarında değişmiş ve birbirine çok yakın değerler almıştır. Ayrıca KOİ giderim verimi beklenildiği gibi çamur yaşının artması ile artmıştır.

Bununla birlikte laboratuvar çalışmaları ile belirlenen birincil çamurun konsantrasyon değerleri Monod kinetiği denklemleri içerisine girilmiş ve hesaplanan değerler ile O'Rourke'nin 1967 yılında yapmış olduğu çalışma sonucu bulduğu değerler aynı grafik üzerinde gösterilerek karşılaştırılmıştır (Sötemann ve diğ., 2005b). Buna göre her iki çalışma ile düşük çamur yaşına sahip çürütücülerde hidroliz hızının daha yüksek olduğu doğrulanmıştır.

Stokiyometrik denklemler kullanılarak yapılan hesaplamalar kinetik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Örneğin çamur yaşı 10 gün olan reaktör içerisindeki asidojen mikroorganizma konsantrasyonu hem sitokiyometrik denklemlerle hem de kararlı hal modeli Monod kinetiği denklemleri ile hesaplandığında 3,122 g KOİ/l olarak, metan gazı konsantrasyonu ise 13,66 l metan/l giriş debisi olarak bulunmuştur. Tüm hesaplamalar çamur yaşı 12, 15, 20, 25 ve 30 gün olan reaktörler için de tekrarlanmıştır. Buna göre çamur yaşı ne olursa olsun stokiyometrik denklemlerle hesaplanan biyokütle ve metan gazı konsantrasyonları, kararlı hal modeli Monod kinetiği ifadeleri ile hesaplanan biyokütle ve metan gazı konsantrasyonlarına eşittir. Böylece stokiyometrik denklemlerden hesaplanan asidojen biyokütle miktarı ve reaktörde oluşması beklenen metan gazı konsantrasyonunun, Monod kinetiği ifadeleri ile bulunan asidojen biyokütle miktarı ve metan gazı konsantrasyonuna eşit olduğu kanıtlanmıştır.

Kayseri Atıksu Arıtma Tesis'i'nin çamur çürütme tankı çıkış konsantrasyonlarını kararlı hal kinetik modeline göre hesaplanan çürütücü çıkış konsantrasyonları ile karşılaştırmak amacıyla birincil çamur için daha önce Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından belirlenmiş olan kinetik katsayılarla birlikte arıtma tesisi çürütücü giriş çamurunun karakterizasyon değerleri kararlı hal kinetik modeli içerisinde kullanılmıştır. Kayseri Atıksu Arıtma Tesis'i çürütücü tankına uygulanan kararlı hal kinetik denklemleri ile hesaplanan biyokütle miktarı (3,116 g KOİ/l) ve metan gazı üretimi değerleri (18,33 l metan/l giriş debisi), stokiyometrik denklemlerle hesaplanan biyokütle miktarı ve metan gazı üretimi değerlerine eşittir. Buna ek

olarak tesisin çürütücü tankı çıkışındaki 92 günlük metan üretimi verilerinin ortalama değeri olan 18,22 l metan/l giriş debisi, kararlı hal kinetik modeli ile tahmin edilen metan üretimi değeri olan 18,33 l metan/l giriş debisi ile uyumuştur. Kararlı hal modeli uygulanarak çürütücü çıkışında elde edilen alkalinite değeri ise (5910 mg/l CaCO_3), tesisin 92 günlük alkalinite verilerinin ortalama değeri ile karşılaştırıldığında (4003 mg/l CaCO_3) değerler arasında çok yüksek bir fark olmadığı ve modelin arıtma tesisi verilerini de sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi çamur çürütücü tankı ortalama giriş KOİ konsantrasyonları kararlı hal modeli kinetik denklemleri içerisine yerleştirildiğinde modele göre tahmini olarak elde edilen çürütücü çıkışındaki KOİ konsantrasyonları 29000 ile 30000 mg/l KOİ arasında değişmekte olup bu değerler tesisin çürütücü çıkışındaki 5 günlük KOİ verilerinin ortalama konsantrasyonunu (29120 mg/l KOİ) sağlamıştır. Dolayısıyla kararlı hal kinetik modelinde birincil çamur için belirlenmiş olan kinetik katsayılar, mevcut arıtma tesislerinin çürütücüleri için doğru tahminler yapmamıza olanak vermektedir.

Tüm yapılan çalışmalar Sötemann ve diğ. (2005b) tarafından belirlenen kinetik katsayıların birincil çamur için anlamlı sonuçlar verdiğini ve laboratuvar koşullarında yapılmış olan çalışmaların istenildiği gibi olması durumunda elde edilecek olan katsayıların bu çalışmada kullanılan katsayılardan çok farklı olmayacağını göstermektedir.

Sonuç olarak bu çalışma ile elde edilmesi hedeflenen kinetik katsayıların Sötemann ve diğ. (2005b)'nin çalışmaları ile elde edilen kinetik katsayılarla aynı olduğu söylenebilir.

6.2. Öneriler

Yapılan çalışmada, sisteme beslenen çamur karakterizasyonunun günden güne değişmesi sebebiyle aşı çamurunun beklemiş çamura aklime olması zaman almıştır. Dolayısıyla bu tip bir çalışmanın laboratuvara günlük olarak getirilen birincil çamur ile yapılması yada çalışmanın atıksu arıtma tesisi içinde yapılması daha uygun olacaktır. Böylece mikroorganizma alışık olduğu bir besi maddesi ile karşılaşacak ve çürüme işlemi daha hızlı gerçekleşecektir.

Bununla birlikte böyle bir çalışmaya başlamadan önce aşı çamurunun aktivitesini belirlemek amacıyla metanojenik aktivite testleri yapılmalı ve mikroorganizmanın türü belirlenmelidir. Böylece anaerobik çamur çürütmede etkin olan mikroorganizma türünün laboratuara getirilen aşı çamurunda mevcut olup olmadığı belirlenmiş olacaktır. Reaktörlerde daha etkin bir çürümenin gerçekleşebilmesi için başlangıçta reaktörün tamamı çürütülmüş çamur (aşı çamuru) ile doldurulmalı ve ilk 20 gün süresince çürütücüler için uygun olan F/M oranının %20'sini geçmeyecek bir hızla ham çamur beslemesi yapılmalıdır. Mümkünse ham çamur 24 saat boyunca üniform bir hızla reaktöre beslenmelidir. 20 günün sonunda çürütücüler için uygun olan F/M oranını sağlamak için besi miktarı arttırılmalıdır. Ayrıca reaktörlerin işletilmesi sırasında oluşan gazın bileşimi de belirlenmelidir.

İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla yapılmış olan çalışma karıştırmanın etkin bir biçimde gerçekleştirilmesi için daha küçük hacimli reaktörler kullanılarak uygulanmalıdır. Reaktörler içerisine ilave edilen aşı çamuru miktarı arttırılmalı ve birincil çamur seyreltilmeden sisteme ilave edilmelidir. Buna ilaveten ikinci bir reaktöre aynı aşı miktarını içerecek ve birincil çamurun toplam KOİ konsantrasyonuna eşit olacak biçimde glikoz beslemesi yapılmalıdır. Aşıdan gelecek inert kısmı belirleyebilmek amacıyla da diğer reaktörlere konulan aşı miktarına eşit miktarda aşı, bir başka reaktöre konularak başlangıçtaki ve sondaki toplam ve süzölmüş KOİ değerleri belirlenmelidir.

Bu çalışma aynı zamanda termofilik şartlar içinde tekrarlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Angelidaki, I., Toräng, L., Waul, C. M., Schmidt, J.E.,** 2004. Anaerobic Bioprocessing of Sewage Sludge, Focusing on Degradation of Linear Alkylbenzene Sulfonates (LAS), *Wat. Sci. Tech.*, **49**, No.10, 115-122.
- Atilla, B.,** 2002. Biyolojik Arıtma Çamurlarının Anaerobik Çürütülmesi ve Üst Suyun MAP Çöktürmesi ile Arıtımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, A.F.,** 2005. Afyon Alkaloidleri Endüstrisi Atıksularının Biyolojik Prosesler ve Fenton Oksidasyonu ile İleri Arıtımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Elmitwalli, T.A., Zandvoort, M. H., Zeeman, G, Bruning, H., Lettinga, G.,** 1999. Low Temperature Treatment of Domestic Sewage in Upflow Anaerobic Sludge Blanket and Anaerobic Hybrid Reactors, *Wat. Sci. Tech.*, **39**, No.5, 177-185.
- Germirli, F., Orhon, D., Artan, N.,** 1991. Assessment of the Initial Inert Soluble COD in Industrial Wastewaters, *Wat. Sci. Tech.*, **23**, Kyoto, 1077-1086.
- Germirli, F., Orhon, D., Artan, N., Ubay, E., Görgün, E.,** 1993. Effect of Two-Stage Treatment on the Biological Treatability of Strong Industrial Wastes, *Wat. Sci. Tech.*, **28**, No.2, 145-154.
- Germirli Babuna, F., Orhon, D., Ubay Çokgör, E., Insel, G., Yapraklı, B.,** 1998. Modeling of Activated Sludge for Textile Wastewaters, *Wat. Sci. Tech.*, **38**, No.4-5, 9-17.
- Germirli Babuna, F., Soyhan, B., Eremektar, G., Orhon, D.** 1999. Evaluation of Treatability for Two Textile Mill Effluents, *Wat. Sci. Tech.*, **40**, No.1, 145-152.
- Ince, O., Germirli Babuna, F., Kasapgil, B., Anderson, G. K.,** 1998. Experimental Determination of the Inert Soluble COD Fraction of a Brewery Wastewater Under Anaerobic Conditions, *Env. Tech.*, **19**, 437-442.

- Kasapgil Ince, B., Ince, O., Sallis, P. J., Anderson, G. K.,** 2000. Inert COD Production in a Membrane Anaerobic Reactor Treating Brewery Wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, **34**, No.16, 3943-3948.
- Lyberatos, G., Skiadas, I. V.,** 1999. Modeling of Anaerobic Digestion – A Review, *Global Nest: the Int. J.*, **1**, No. 2, 63-76.
- McCarty, P. and Rittmann, B. E.,** 2001. Environmental Biotechnology, The McGraw Hill-Companies, New York.
- Mosey, F.E., and Foulkes, M.,** 1984. Control of the Anaerobic Digestion Process in Sewage Sludge Stabilization and Disinfection, Ed. A.M.Bruce.
- Müller, J., Lehne, G., Schwedes, J., Battenberg, S., Näveke, R., Kopp, J., Dichtl, N., Scheminski, A., Krull, R., Hempel, D. C.,** 1998. Disintegration of Sewage Sludges and Influence of Anaerobic Digestion, *Wat. Sci. Tech.*, **38**, No.8-9, 425-433.
- Oropeza, M. R., Cabirol, N., Ortega, S., Castro Ortiz, L. P., Noyola, A.,** 2001. Removal of Fecal Indicator Organisms and Parasites (Fecal Coliforms and Helminth Eggs) from Municipal Biological Sludge by Anaerobic Mezophilic and Termophilic Digestion, *Wat. Sci. Tech.*, **44**, No.4, 97-101.
- Öztürk, İ.,** 1999. Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,** 1995. *19th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation*, Washington DC, USA.
- Sötemann, S.W., Ristow, N.E., Wentzel M.C., Ekama, G.A.,** 2005a. Characterization of Sewage Sludge with a Mass Balance Based Steady State Model for Anaerobic Digestion, *The First International Workshop on the IWA Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1)*, Lyngby, Denmark, September 2-4, 177-184.
- Sötemann, S.W., Ristow, N.E., Wentzel M.C., Ekama, G.A.,** 2005b. A Steady State Model for Anaerobic Digestion of Sewage Sludges, *Water SA*, **31**, No. 4, 511-528
- Ubay, G.,** 1983. Evsel Atıksuların Havasız Biyolojik Arıtımı Üzerine Bir Araştırma, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Wu, Q., Bishop, P. L., Keener, T. C., Stallard, J., Stile, L.,** 2001. Sludge Digestion Enhancement and Nutrient Removal From Anaerobic Supernatant by $\text{Mg}(\text{OH})_2$ Application, *Wat. Sci. Tech.*, **44**, No.1, 161-166.
- Yangin Gomec, C., Speece, R. E.,** 2003. The Role of pH in the Organic Material Solubilization of Domestic Sludge in Anaerobic Digestion, *Wat. Sci. Tech.*, **48**, No.3, 143-150.
- Yilmaz, G, Ozturk, I.,** 1995. The Effect of Anaerobic Pre-Treatment on the Inert Soluble COD of Fermentation Industry Effluents, *Wat. Sci. Tech.*, **32**, No.12, 35-42.
- Zeeman, G., Sanders, W. T. M., Wang, K. Y., Lettinga, G.** 1997. Anaerobic Treatment of Complex Wastewater and Waste Activated Sludge – Application of an Upflow Anaerobic Solid Removal (UASR) Reactor for the Removal and Pre-Hydrolysis of Suspended COD, *Wat. Sci. Tech.*, **35**, No.10, 121-128.

EKLER

EK A. KAYSERİ EVSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ

Atıksu arıtma tesisi 134.055 m²'si çamur depolama alanı olmak üzere toplam 369.490 m² saha üzerine kurulmuştur.

Birinci aşamada 800.000 nüfus eşdeğerine ve 110.000 m³/gün averaj kuru hava atıksu debisine hizmet eden tesis, ikinci aşamayla birlikte 1.400.000 nüfus eşdeğeri ve 182.500 m³/gün averaj kuru hava atıksu debisine hizmet verebilecektir.

Atıksu arıtma tesisinde karbonun yanı sıra azot ve fosfor da giderilmektedir.

Tesisin ön çökeltme çamuru çürütülmekte ve çürütülmüş çamurdan çıkan gaz, ısı ve elektrik enerjisi olarak tesis içinde kullanılmaktadır.

Tesisten çıkan arıtılmış su Karasu Deresi'ne verilmektedir.

Atıksu arıtma tesisi dizayn giriş ve çıkış değerleri Tablo A. 1'de hidrolik yükleri ise Tablo A. 2'de verilmektedir.

Tablo A. 1 : Atıksu arıtma tesisi dizayn giriş ve çıkış değerleri

Parametre	Tesis Girişi		Tesis Çıkışı		Verim
	kg/gün	mg/l	kg/gün	mg/l	%
BOİ ₅	42.000	381,8	2.200	20	95
NH ₄ -N	6.000	54,5	1.100	10	82
NO ₃ -N	0	0	550	5	
AKM	51.340	466,7	2.200	20	96
TP	1.905	17,3	220	2	88

Tablo A. 2 : Atıksu arıtma tesisi dizayn hidrolik yükleri

Debi değerleri	Birim	1. Aşama	2. Aşama
Averaj Kuru Hava Debisi	m ³ /gün	110.000	183.000
Yağışlı Hava Debisi	m ³ /gün	215.000	360.000

A.1. Proses üniteleri ve tanımları

A.1.1. Giriş Pompa İstasyonu

Atıksu, 3000 mm çapındaki kanalizasyon borusuyla tesis giriş kanalına bağlanmıştır. Giriş kanalında dalgıç pompaları korumak amacıyla 90 mm çubuk aralığına sahip mekanik temizlemeli kaba ızgaralar mevcuttur.

Tesise atıksuyun alınabilmesi için giriş kanalındaki seviyeden kontrol edilen dalgıç pompalar kullanılmaktadır. Tesiste giriş terfi istasyonundan başka ara terfi istasyonu yoktur ve çamur kısımları hariç üniteler arası geçiş cazibeyle yapılmaktadır. Tesis içerisinde atıksu hattında değişik çapta yüksek yoğunluklu polietilen borular kullanılmıştır.

A.1.2. Izgara binası

Bu ünite 2+1 (2025 için 3+1) ızgara kanalı yer almaktadır. Her bir kanalda 1 adet mekanik temizlemeli ızgara ve 1 adet mekanik temizlemeli basamaklı ince ızgara bulunmaktadır. Izgara konveyörü ve presi bu binada bulunmaktadır. Izgara temizliği su seviyesi farkı ile kontrol edilmektedir. Izgara atıkları, burgulu konveyör ile sıkıştırma işleminin yapıldığı ızgara presine verilmektedir. Preslenen atıklar konteynirlarda depolanmakta ve sahadan uzaklaştırılmaktadır.

A.1.3. Havalandırmalı kum ve yağ tutucu

Atıksu içindeki kum ve yağın ayrılarak, mekanik ekipmanlara zarar vermesini önlemek amacıyla atıksu arıtma tesisine 4 adet (2025 için 6) havalandırmalı kum ve yağ tutucu yer almaktadır. Kum ve yağ tutucu tankında çubuk difüzörlerden verilen hava yardımıyla organik maddeler çökmeden ileriki arıtma ünitelerine geçmekte ve sadece yüksek çökelme hızına sahip mineral katıların çökmesi sağlanmaktadır. Verilen hava aynı zamanda yağ ve gresin yüzey sıyrıcı vasıtasıyla toplanmasını da sağlamaktadır.

A.1.4. Giriş debi ölçüm kanalı

Havalandırmalı kum ve yağ tutucudan çıkan atıksu, giriş venturi kanalından geçmektedir. Venturi kanalında debi ölçümünün yanında, kompozit numune cihazı, pH, sıcaklık ve iletkenlik ölçüm cihazları yer almaktadır.

A.1.5. Ön çökeltme tankları

Atıksudaki askıda katı maddenin kısmi olarak giderilmesi için 2 (2025 için 4 adet) adet ön çökeltme tankı yer almaktadır. Bu tanklar 32,7 m çapında dairesel tanklar olarak inşa edilmiş olup merkezi giriş yapısı, döner sıyırıcı köprüsü ve çıkış savakları bulunmaktadır. Çöken çamur merkezdeki çamur konisinden pompa istasyonuna cazibeyle iletilmektedir. Ön çökeltme tankı çıkış suyu da cazibeyle biyolojik fosfor giderim tankına aktarılmaktadır.

A.1.6 Selektör/biyolojik fosfor giderim tankı

Ön çökeltme tankı çıkış suyu, dağıtım yapısı vasıtasıyla selektör tanka cazibeyle iletilmektedir.

Geri devir çamuru pompa istasyonundan gelen çamur, selektör tankı girişine verilmektedir. Biyolojik fosfor giderim tankı girişindeki atıksu, çamur hatlarıyla karışmaktadır. Bundan dolayı giriş yapısına bir dalgıç mikser yerleştirilmiştir.

Daha sonra atıksu, içinde 4 adet dalgıç mikser bulunan selektör tanka iletilmektedir. Prosesin anaerobik ortamda gerçekleşmesi için havalandırma yoktur.

Fosforun biyolojik olarak giderimi için gerekli koşullar bu tankta gerçekleştirilmektedir. Anaerobik koşullarda mikroorganizmalar stres altına girmektedirler ve böylece hücre yapılarında orto-fosfat bırakmaya başlamaktadırlar. Daha sonra aktif mikroorganizmalar aerobik ortama tabi tutulduklarında biyolojik fosfor giderim tankında bıraktıkları fosfordan daha fazlasını bünyelerine geri almaktadırlar.

Çıkış savaklarından atıksu 4 hata ayrılıp havalandırma tanklarına beslenmektedirler. 2. aşama için tüm ekipmanları içeren bir adet daha selektör tank ve 8 adet daha havalandırma tankı yapılacaktır.

A.1.7. Havalandırma tankları

Selektör tank çıkış suyu dağıtım yapısı vasıtasıyla organik kirletici maddelerin ve azotun biyolojik olarak giderilmesi amacıyla 2x4 havalandırma tanklarına cazibeyle iletilmektedir.

Havalandırma tankları oksidasyon hendeği şeklinde inşa edilmiştir. Atıksuyun ve çamurun karışması ve çamurun çökmesinin engellenmesi için karıştırıcılar

bulunmaktadır. Havalandırılan kısımda 1 adet ve anoksik kısımda 1 adet olmak üzere 2 yerdeki oksijen ölçümüyle tanklara verilecek havanın kontrolü yapılmaktadır.

Çıkış suyu kalitesi için istenen nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesinden dolayı biyolojik arıtma için 25 günlük bir çamur yaşı seçilmiştir. Uzun havalandırma sayesinde tesis, debi değişikliklerine ve giriş suyu konsantrasyonundaki farklılıklara rağmen çıkış suyu kalitesini garanti etmektedir. Oksik kısım, hava dağıtım boruları ve ince kabarcıklı mambran difüzörleri içeren bir havalandırma sistemi ile donatılmıştır. Gerekli hava blower istasyonundan sağlanmaktadır.

A.1.8. Son çökeltme tankları

Aktif çamurun giderilmesi ve kısmi olarak tesise geri beslenmesi amacıyla 4 (2025 için 6 adet) son çökeltme tankı mevcuttur. Bu tanklar 59-40 m çaplı dairesel tank olarak inşa edilmiş olup merkezi giriş yapısı, döner sıyırıcı köprüsü ve çıkış savakları bulunmaktadır.

Çöken çamur merkezdeki çamur konisinden çamur pompa istasyonuna ayarlı vanalar aracılığıyla cazibeyle iletilmektedir. Dalgıç pompalar vasıtasıyla çamur kısmi olarak selektör tank giriş yapısına geri devir çamuru olarak iletilirken bir kısmı da fazla çamur olarak çamur susuzlaştırma ekipmanı öncesindeki karışım tankına verilmektedir.

A.1.9. Geri devir çamur pompa istasyonu

Son çökeltim tankında çökelen çamurlar konik çukurda toplanır ve motor tahrikli dalgıç pompalar kullanılarak kısmen karıştırma tankına kısmen de selektör tankı girişine verilir. Fazla çamur için 1+1 adet motor tahrikli dalgıç pompa (2025 için 2+1) ve geri devir çamuru için 2+1 adet (2025 için 3+1) monte edilmiştir.

A.1.10. Çıkış debi ölçüm kanalı

Son çökeltme tanklarından çıkan arıtılmış su, tesisten çıkan su miktarının belirlenmesi için çıkış venturi kanalından geçerek Karasu Nehri'ne ulaşmaktadır. Venturi kanalında ayrıca numune alma cihazı, pH, sıcaklık ve iletkenlik ölçüm cihazları da yer almaktadır.

A.1.11. Ön çamur yoğunlaştırıcı

Ön çamur pompa istasyonundan terfi ettirilen çamur, parçalayıcıdan geçtikten sonra ön yoğunlaştırma tankına verilmektedir. Burada çamur, havuza monte edilmiş olan karıştırıcı ile karıştırılarak yer çekimi kuvveti ile %4 katı maddeden %7 katı madde yoğunluğa ulaştırılmaktadır. Üstte kalan durgun su ise taşkın savağı yardımıyla bulanık su toplama tankına beslenmektedir.

A.1.12. Çamur çürütücü tankı ve çamur çürütme binası

Ön çamur yoğunlaştırıcıdan gelen çamur, ham çamur pompaları vasıtasıyla ısı eşanjörlerine basılmaktadır. Isı eşanjörü giriş borusunda ön çamur ile çürümüş devir daim çamuru karıştırılmakta ve ısı eşanjöründen çıkan çamur, çürütücü tanka pompalanmaktadır.

Çamur çürütüldükten sonra ikincil çamur yoğunlaştırıcıya aktarılmaktadır. Üretilen gaz, gaz depolama tankında depolanmakta ve elektrik ve ısı enerjisi üretmek üzere kullanılmaktadır.

Çamur çürütme, anaerobik bir fermentasyon prosesidir ve çürütücüye beslenen çamur (ön çamur ve yaş karışımı) yaklaşık 37-38 °C sıcaklığında oksijensiz bir ortamda çürütülmektedir. Proses sürecinde organik maddelerin (uçucu katılar) ayrıştırılması gerçekleştirilir.

Çürütme tankının ilgili ekipmanları; çamur karıştırıcısı, köpük bertaraf cihazı, çürümüş çamur çekme cihazı, acil durum taşkanı, köpük tahrip sistemi, gaz toplama kubbesi, fazla ve düşük gaz basıncı güvenlik cihazıdır.

A.1.13. Birleşik ısı ve güç üniteleri

Gaz, gaz depolama tankından yoğunlaşan suyun tekrar giderimi için seramik filtreye gider. Daha sonra enerji üretimi için CHP ünitesinde kullanılır. Bu ünitenin amacı, gazdan ısı ve elektrik enerjisi üretmektir. Üretilen enerji ile atıksu arıtma tesisinin elektrik enerji ihtiyacının %30'u, idari binada dahil olmak üzere ısı enerji ihtiyacının tamamı karşılanmaktadır.

A.1.14. Son çamur yoğunlaştırıcı

Çamur çürütücüden gelen çürütülmüş ön çamur ikincil çamur yoğunlaştırıcıya iletilmektedir. Çamur burada depolanarak yer çekimi ve monte edilmiş karıştırıcı yardımıyla %4,62 katı maddeye yoğunlaştırılmaktadır.

Üstte kalan durgun su, taşkın savağı yardımıyla bulanık su toplama tankına beslenmektedir. Yoğunlaştırıcı, çürütücü tankı ve susuzlaştırma sistemi arasında bir depo görevi görmekte ve yoğunlaştırılan çamur, ikincil çamur pompaları aracılığıyla susuzlaştırma sistemi karıştırma tankına pompalanmaktadır.

A.1.15. Gaz depolama tankı

Çürütücü tankında üretilen gaz, öncelikle boru hattıyla sıvı kirleticilerin ayrılması için kum filtresine verilmektedir. Gaz, kalitesine ve miktarına bağlı olarak, gaz depolama tankında depolanmakta yada gaz meşalesinde yakılmaktadır.

Gaz depolama tankı, çürütücü tanktaki biyogaz üretimi ile birleştirilmiş ısı ve güç (CHP) üniteleri arasında tampon görevi görmektedir.

A.1.16. Gaz meşalesi

Eğer depolanamayacak fazla biyogaz varsa, bu fazla gaz, gaz meşalesine gönderilmektedir. Aynı uygulama gaz kalitesinin CHP ünitesinde kullanılmaya uygun olmaması durumunda da geçerlidir. Örneğin çürütücü tankın işletmeye alınması sırasında biyogaz, gaz meşalesine gönderilmektedir.

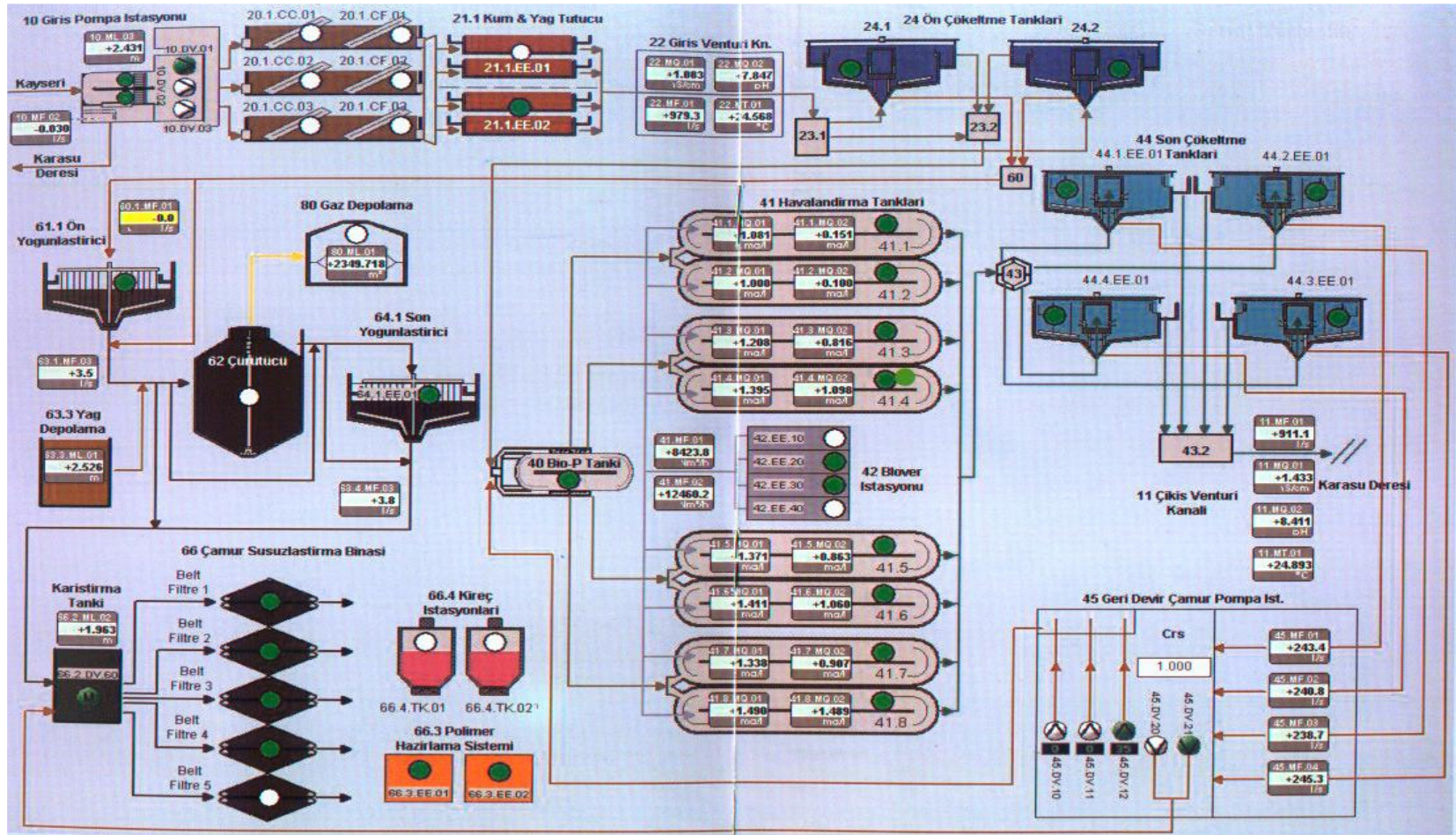
A.1.17. Çamur susuzlaştırma binası

İkincil çamur yoğunlaştırıcıda yoğunlaştırılan çamur ve biyolojik arıtmadan gelen fazla çamur, çamur susuzlaştırma öncesi karıştırma tankında karıştırılmaktadır. Karışım tankından çıkan çamur, çamur besleme pompaları vasıtasıyla her bir susuzlaştırma ünitelerine basılmaktadır.

Belt filtre pres, çamuru çamur besleme pompalarından almaktadır. Pompa basma tarafında çamura seyreltilmiş polimer eklenir ve karıştırılır. Daha sonra çamur, önce suyun yer çekimi ile ayrıldığı süzücü banda beslenir. Çamur keki çamur yüzeyinden sürekli olarak su akıtmaya neden olan yastık bloklar aracılığı ile sürekli olarak üst üste tekrar istiflenir. Yoğunlaştırılan çamur, sıyrıcı aracılığıyla süzücü banttan

boşaltılır ve daha sonra belt filtre prese beslenir. Filtre pres sayesinde çamur, %20 katı maddeye ulaştırılır ve kireç eklenmesi ile %35 katı maddeye de çıkartılabilir.

Kayseri evsel atıksu arıtma tesisine ait akım şeması Şekil A. 1’de verilmiştir.



Şekil A. 1 : Kayseri evsel atıksu arıtma tesisine ait akım şeması

EK B. DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

B.1. Anaerobik kinetik katsayıların belirlenmesi

Anaerobik kinetik katsayıların belirlenmesi amacıyla her bir reaktörden çekilen numunelerde toplam KOİ, TKM, TUKM ve alkalinite deneyleri yapılmıştır. Bununla birlikte her bir reaktördeki gaz üretimi ve pH değişimleri de günlük olarak izlenmiştir. Yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular grafiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

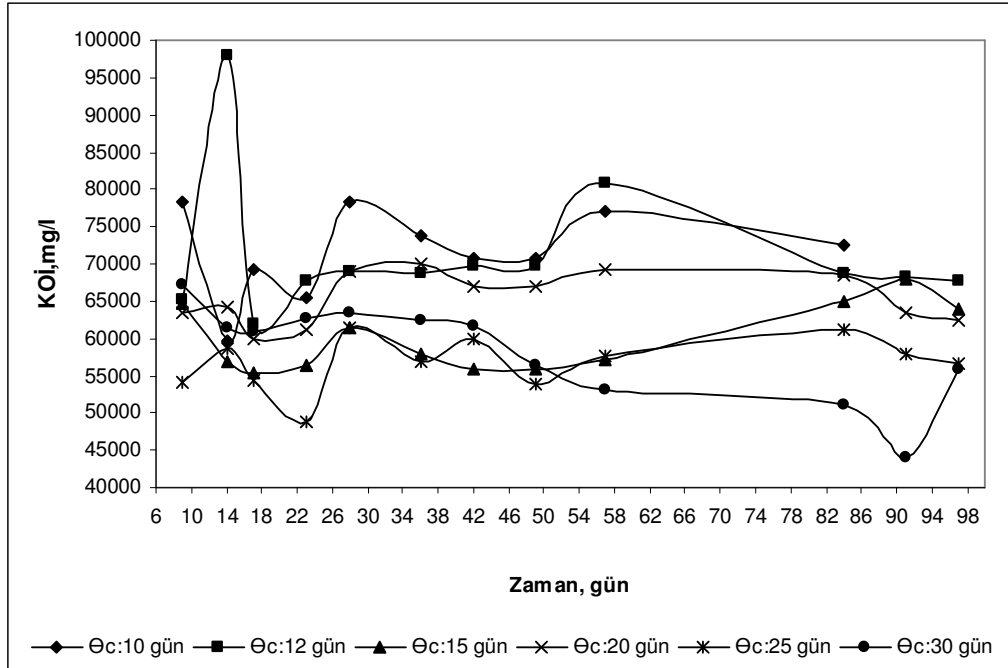
Şekil B.1'e bakıldığında ilk 23 gün boyunca yapılan KOİ deneylerine göre çamur bekletme süresi 10, 15, 20, 25 ve 30 gün olan reaktörlerin KOİ değerlerinde başlangıç KOİ değerlerine göre düşüşler görülmüştür. Çamur bekletme süresi 12 gün olan da ise herhangi bir düşüş görülmemiştir. Bunun sebebi sistemin henüz dengeye gelmemiş olmamasıdır. Sistemin dengeye gelememesi ise sistemden her gün çekilen ve sisteme her gün ilave edilen çamur miktarının çok fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Sisteme ilave edilen aşırı yükler sistemde aşırı asit üretimi sonucu pH'ın düşmesine ve metan bakterilerinin inhibe olmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla da KOİ giderimi görülememektedir. Çamur bekletme süresi 12 gün olan reaktörden 14. gün çekilen numunede yapılan deney sonuçlarına bakıldığında çekilen numunenin temsil edici olmadığı anlaşılmıştır. KOİ değerinin bu denli yüksek oluşu, numunenin karışımın gerçekleşmediği sırada çekilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan çalışmalarda her bir sisteme beslenen çamur 23. günden sonra değiştirilmiştir. Kayseri Atıksu Arıtma Tesisi birincil çamur yoğunlaştırma tankından alınarak laboratuara getirilen birincil çamur miktarı çalışmalar sırasında yetmediğinden dolayı sistem, yine aynı tesisten getirilen ikinci bir çamur ile beslenmeye devam edilmiştir. Ancak arıtma tesisinden getirilen ikinci çamurun KOİ değeri (97.760 mg/l) ilk getirilen çamurun KOİ değerinden (64.930 mg/l) çok yüksek olduğundan dolayı 23. günden sonra yapılan beslemelerde seyreltme uygulanmıştır.

Dolayısıyla Şekil B.1’den de görüldüğü gibi her bir sistemdeki KOİ değerinde 23. günden sonra bir artış olduğu ve daha sonra ise bu artışın yerini düşüşlerin izlediği gözlemlenmiştir. KOİ değerinde 23. günden sonraki artışlar yeni çamurun daha önce kullanılan çamura göre farklı bir karakterizasyona sahip olmasındandır. Dolayısıyla mikroorganizmanın bu yeni çamura aklime olabilmesi için belli bir sürenin geçmesi gerekmektedir. Bu sebeple KOİ parametresindeki değişimi 26. günden sonra yapılan KOİ deney sonuçlarına bakarak yorumlamanın daha uygun olduğu düşünülmüştür. Bununla birlikte 49. gün alınan numunelerde yapılan KOİ analizleri sonucunda çamur bekletme süresi 12 gün olan reaktör dışındaki tüm reaktörlerin KOİ değerleri, 26. günkü KOİ değerleri göz önünde bulundurularak incelendiğinde organik madde gideriminin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Çamur bekletme süresi 12 gün olan reaktörün KOİ değerinde ise herhangi bir düşüşün gerçekleşmemesi, karıştırıcının çalışmaması sonucu reaktörde karışımın sürekli sağlanamamasına bağlanabilir. 42. gün elde edilen verilerle 49. gün elde edilen veriler karşılaştırıldığında çamur bekletme süresi 25 ve 30 gün olan reaktörlerdeki KOİ gideriminin belirgin bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Bu durum, her iki sistemden çekilen ve her iki sisteme ilave edilen çamur miktarının az olması sonucu mikroorganizmanın bu miktarlardaki çamuru diğer sistemlerdekine göre daha kolay artıtabildiğinin bir göstergesidir. Buna karşın 57. gün yapılan deneysel ölçümler sonucunda çamur bekletme süresi 30 gün olan reaktörün dışındaki tüm reaktörlerde KOİ değerinde yükselmeler görülmüştür. Bu durum, çamur bekletme süresi 30 gün olan reaktör dışındaki tüm reaktörlerde karışımın 49. günden sonra sürekli olarak sağlanamamasına bağlanabilir. Karışımın sürekli sağlanamaması durumunda mikroorganizma besi ile temas edememekte bu sebeple KOİ giderimi gerçekleşmemektedir. Bununla birlikte sisteme beslenen çamur 84. gün tekrar değiştirilmiştir. Dolayısıyla her bir çürütücüye beslenen çamur karakterizasyonu tamamen değiştiğinden dolayı 84. gün yapılan KOİ deneylerinde KOİ giderimi görülememiştir. 91. gün çamur yaşı 12 ve 15 gün olan reaktörlerde giderim görülememesine rağmen diğer reaktörlerin KOİ değerlerinde düşüşler görülmüştür. Çamur yaşı 12 ve 15 gün olan reaktörlerde KOİ gideriminin görülememesi, her iki sistemden çekilen ve her iki sisteme ilave edilen çamur miktarının çok fazla olmasına bağlıdır. Dolayısıyla her iki sistem dengeye gelmekte zorlanmaktadır. Sistemlerin dengeye gelebilmesi ve KOİ giderimlerinde düşüşlerin görülebilmesi için daha uzun süreye ihtiyaç vardır. Buna mukabil, 97. gün yapılan analizler sonucu çamur yaşı 12

gün olan reaktörde KOİ giderim verimi %0,944 ve 15 gün olan reaktörde ise %6,01 olarak görülmüştür. Bu durum, daha sonraki günlerde çamur yaşı 12 ve 15 gün olan reaktörlerin KOİ değerinde düşüşlerin olabileceğinin işaretidir. Ancak aynı gün çamur yaşı 30 gün olan reaktörden çekilen numunede yapılan KOİ analizleri sonucunda %26,33'lük bir KOİ artışı görülmüştür. Bu durumun, numunenin reaktörden tam karışımın gerçekleşmediği sırada çekilmesinden yani deneysel hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

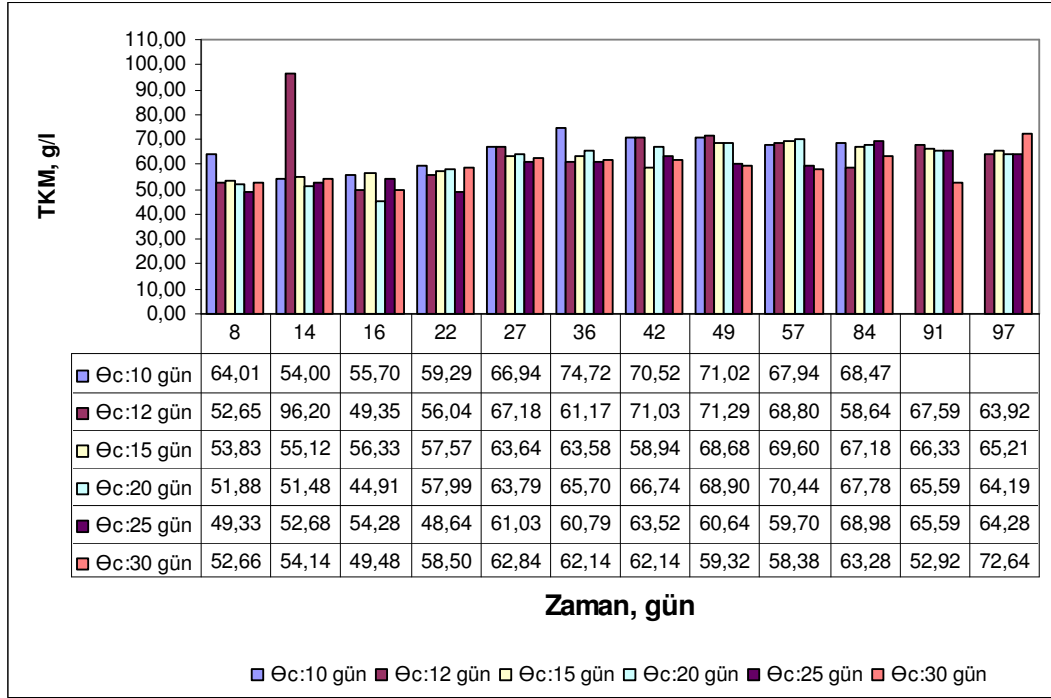
Yapılan çalışmalar sonucunda, çamur yaşı 10 gün olan reaktörün pH değerini 7 civarına tamponlamak amacıyla NaHCO_3 ilaveleri yapılmasına karşın pH değerinde sürekli düşüşlerin görülmesi ve dolayısıyla KOİ gideriminin görülememesi sebebiyle bu reaktör 91. gün iptal edilmiştir.



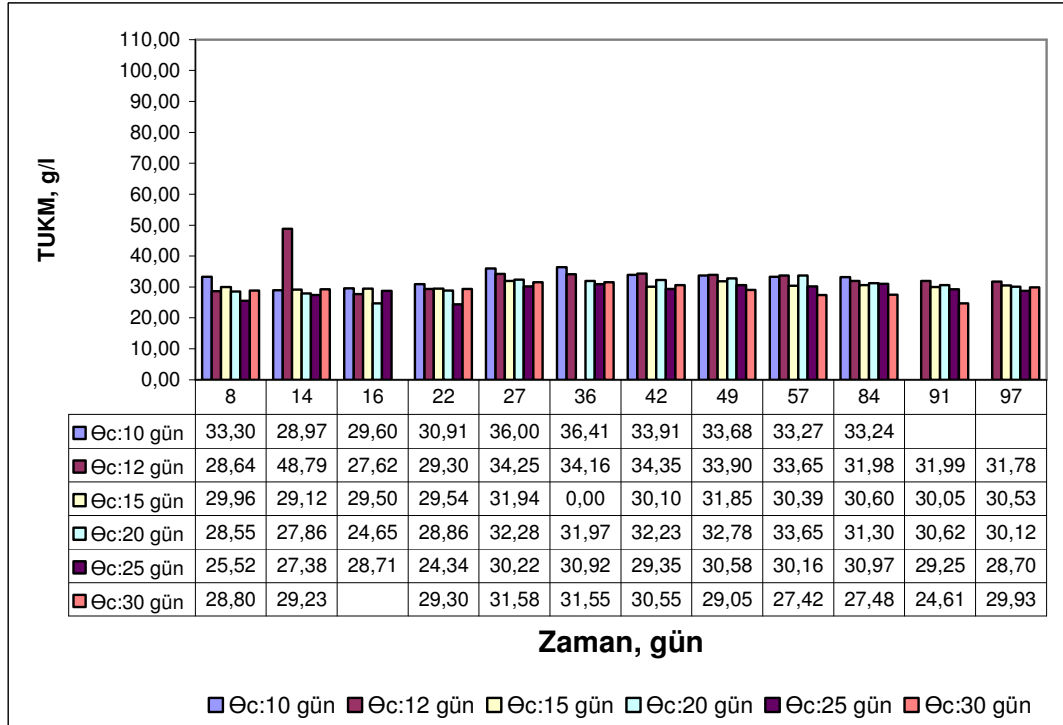
Şekil B.1: Anaerobik çamur çürütme reaktörlerinde KOİ'nin zamana bağlı değişimi. Reaktörlerin her birinden çekilen numunelerde yapılan toplam katı madde ve toplam uçucu katı maddelerindeki değişimler grafiksel olarak Şekil B.2 ve Şekil B.3'de verilmiştir. TKM ve TUKM grafikleri incelendiğinde KOİ parametresi ile paralellikler görülmektedir. KOİ parametresi düştüğünde TKM ve TUKM değerlerinde de düşüşler görülmüştür. Organik maddedeki giderim, TKM ve TUKM değerlerine de yansımaktadır.

Çamur bekletme süresi 12 gün olan reaktörden 14. gün çekilen numunede yapılan TKM ve TUKM deney sonuçlarına bakıldığında çekilen numunenin temsil edici olmadığı anlaşılmıştır. TKM ve TUKM değerinin bu denli yüksek oluşu, numunenin karışımın gerçekleşmediği sırada çekilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Reaktörlerden 27. gün çekilen numunelerde yapılan TKM ve TUKM deney sonuçlarından da görüldüğü gibi reaktörlerdeki TKM ve TUKM miktarlarında artışlar görülmüştür. Bunun sebebinin her bir sisteme beslenen çamurun 23. günden sonra değişmesi ve yeni beslenen çamurun önceki beslenen çamura göre çok daha farklı bir karakterizasyona sahip olmasıdır. Her bir sisteme beslenen çamurunun 84. günde tekrar değişmesi sebebiyle tüm sistemlerde gerçekleşen biyokimyasal olaylar da değişmiştir. Bu sebeple 84. günden sonraki TKM miktarlarındaki değişim incelendiğinde 91. günde çamur yaşı 12, 15, 20, 25 ve 30 gün olan reaktörlerde çok küçük giderimler gerçekleştiği buna karşın TUKM miktarlarında kayda değer bir giderimin gerçekleşmediği görülmüştür. TKM miktarında gerçekleşen bu giderim mikroorganizmanın 84. gün sisteme beslenmeye başlanan çamura aklime olmaya başladığını göstermektedir. Mevcut durumda giderim çok düşüktür çünkü mikroorganizma yeni çamura çok yavaş aklime olmaktadır. Bununla birlikte 97. günde yapılan TKM deney sonuçlarına bakıldığında çamur yaşı 12, 15, 20 ve 25 gün olan reaktörlerdeki TKM miktarları istikrarlı bir şekilde düşmekte iken çamur yaşı 30 gün olan reaktördeki TKM miktarında ani bir artış görülmüştür. Bu artışın sebebinin numunenin reaktörde tam karışımın gerçekleşmediği bir sırada çekilmiş olmasından yani deneysel hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü aynı gün yapılan KOİ deney sonuçlarına bakıldığında KOİ değerinin de aniden arttığı görülmektedir. Bununla birlikte çamur yaşı 12 ile 30 gün arasında değişen tüm reaktörlerin 84. günden sonraki TUKM miktarlarındaki değişim incelendiğinde TUKM miktarlarının 84. gün alınan numunedeki TUKM miktarından çok farklı olmadığı yani giderimin olmadığı görülmüştür. Bu durum, mikroorganizmanın 84. günden sonra sisteme beslenen yeni çamura çok yavaş bir şekilde aklime olmasındandır. Tüm bunlara ek olarak, 97. günde çamur yaşı 30 gün olan reaktörün TUKM miktarının arttığı ve bu artışın deneysel hatalardan kaynaklandığı bilinmektedir. TKM ve TUKM miktarlarındaki değişimler genel olarak incelendiğinde çamur yaşı 10 ile 30 gün arasında değişen sistemlerin dengeye gelmediği anlaşılmaktadır.



Şekil B.2 : Reaktörlerdeki TKM miktarlarının zamana bağlı değişimi

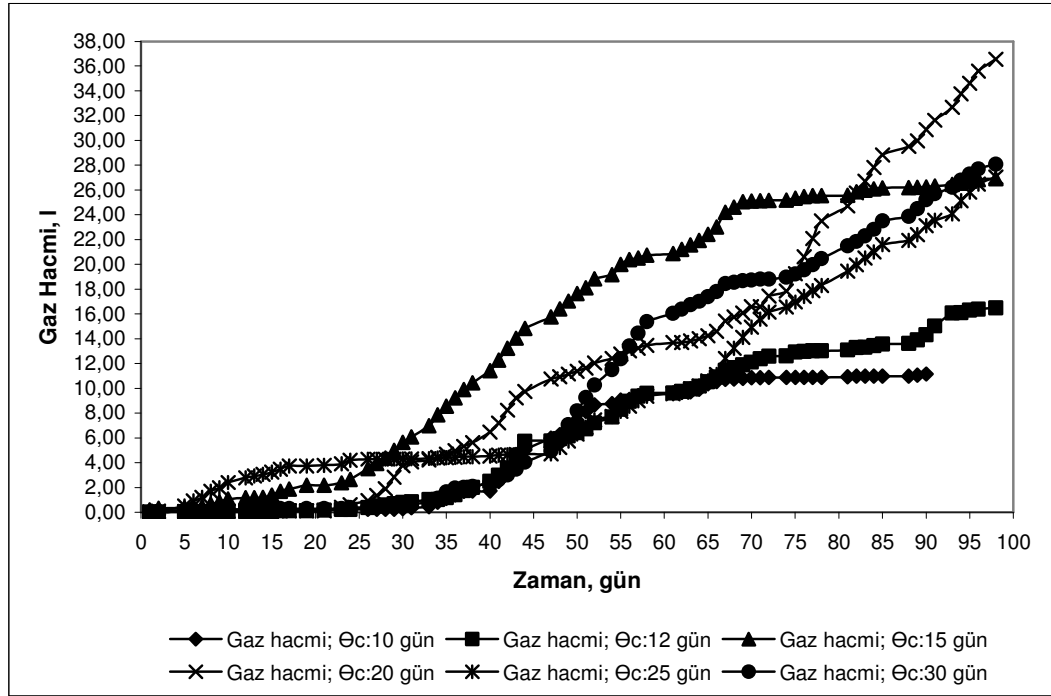


Şekil B.3 : Reaktörlerdeki TUKM miktarlarının zamana bağlı değişimi

Her bir reaktörde oluşan gaz hacimlerindeki kümülatif değişim Şekil B.4’de gösterildiği gibidir. Şekilden de görüldüğü gibi çamur bekletme süresi 10 ve 12 gün

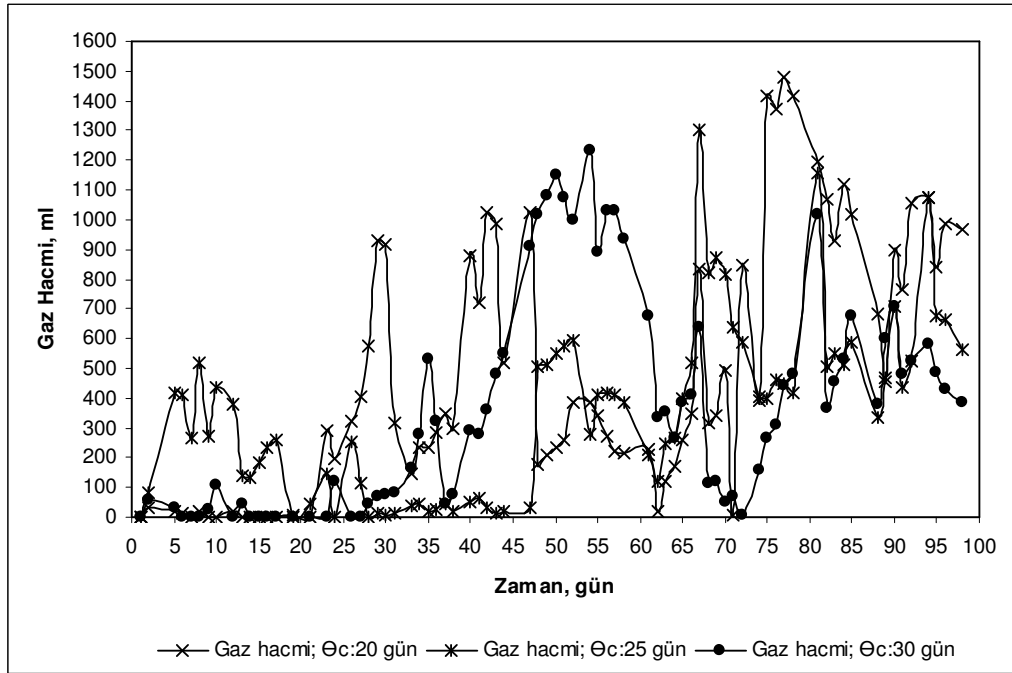
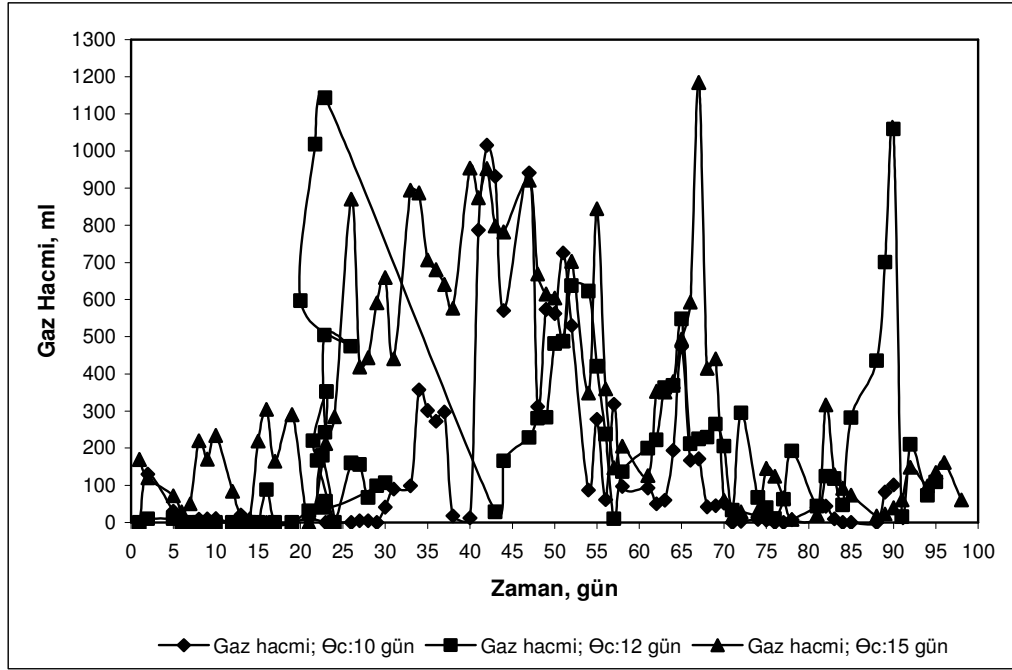
olan reaktörlerde ilk 36 gün gaz üretimi gerçekleşmemiştir. Biyogaz üretiminin gerçekleşmemesi pH parametresi ile yakından ilgilidir. İlk 36 gün boyunca her iki reaktörde pH, anaerobik mikroorganizmalar için uygun olan 6,5-8,2 aralığına getirilemediği için biyogaz üretimi gerçekleşmemiştir. Çamur yaşı 10 ve 12 gün olan reaktörlere yapılan çamur besleme miktarlarının fazla olması sebebiyle her iki sistemde aşırı asit üretimi gerçekleşmiş ve sonuçta da pH'da sürekli düşüşler meydana gelmiştir. pH parametresindeki bu düşüşler metan üreten bakterileri inhibe etmiş ve dolayısıyla da ilk 36 gün gaz üretimi gerçekleşmemiştir. Daha sonraki günlerde her iki sisteme pH'ı 7 civarına tamponlamak amacıyla NaHCO_3 ilaveleri yapılmış ve pH'da yükselmeler görülmesi ile birlikte gaz üretimi de gerçekleşmiştir. 36. günden sonra her iki reaktörde de 57. güne kadar gaz oluşumunda artışlar görülmüş, çamur bekletme süresi 12 gün olan reaktörde gaz oluşumundaki bu artışlar 57. günden sonra da devam etmesine rağmen çamur bekletme süresi 10 gün olan reaktörde gaz üretimi gerçekleşmemeye başlamıştır. Bunun sebebinin çamurun yetmemesi sonucu tekrar Kayseri'den çamur gelene kadar uzun süre beklenmesine ve reaktördeki karışımın sürekliliğinin sağlanamamasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu durumda pH parametresi tekrar düşmeye başlamış yapılan NaHCO_3 ilavelerine rağmen sistemin pH'ı dengeye getirilemediği için çamur yaşı 10 gün olan reaktör iptal edilmiştir.

Çamur yaşı 15, 20 ve 30 gün olan reaktörlerde gaz üretimi başlangıçtan itibaren sürekli bir artış göstermiştir. Çünkü bu reaktörlerden çekilen numunelerde pH değerleri anaerobik mikroorganizmaların yaşayabileceği pH aralığı içerisinde kalmıştır. Dolayısıyla metan üretimi gerçekleşmiştir. Buna mukabil çamur yaşı 25 gün olan reaktörde ilk 45 gün metan üretimi gerçekleşmemiştir. Ancak bu durumun daha sonra mezür sistemindeki kaçaklardan kaynaklandığı anlaşılmış ve gerekli önlemler alındıktan sonra metan üretimi görülmeye başlanmıştır.



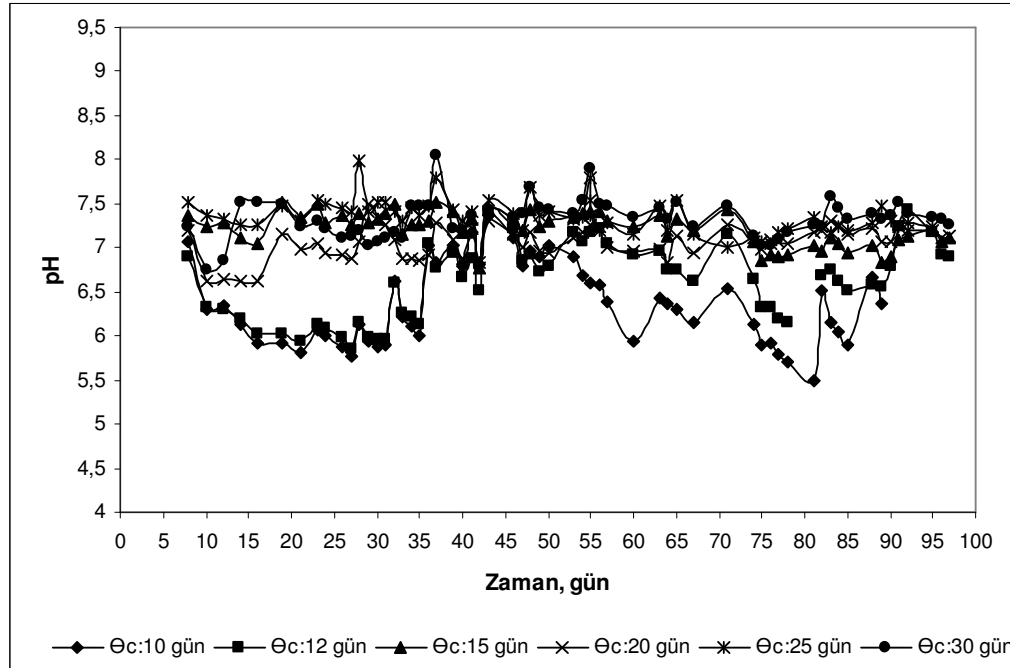
Şekil B.4: Reaktörlerde oluşan biyogaz hacminde zamana bağlı değişim

Bununla birlikte gaz miktarlarındaki günlük değişimlere bakıldığında sistemlerin kararlı hale ulaşmadığı açıkça görülmektedir. Her bir reaktörde üretilen gaz hacimlerinde dalgalanmalar olmakta ve üretilen gaz hacimleri her gün değişmektedir. Her bir reaktörde üretilen gaz miktarlarının günlük olarak değişimi Şekil B.5 ve Şekil B.6'da verilmiştir.



Her bir reaktörde pH başlangıçta 7'e NaOH ilavesi ile ayarlanmıştır. Şekil B.7'den de görüldüğü gibi çamur bekletme süresi 15, 20, 25 ve 30 gün olan reaktörlerde pH

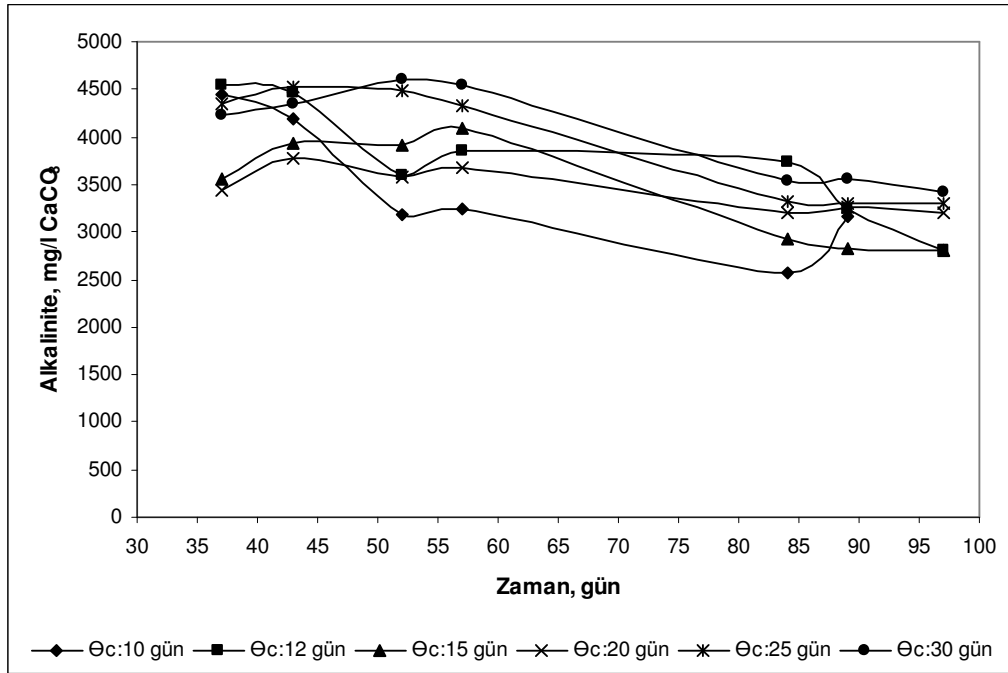
anaerobik arıtma için uygun pH değerleri olan 6,5 ile 8,2 aralığı içerisinde kalmıştır. Buna rağmen çamur yaşı 10 ve 12 gün olan reaktörlerde pH sürekli düşmüştür. Bu durum, günlük olarak sistemden çekilen ve sisteme ilave edilen çamur miktarının çok fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Şok yükler sistemde asit üretiminin artmasına sebep olmakta bu da pH’da düşüşler olarak kendini göstermektedir. Bu yüzden çamur yaşı 10 ve 12 gün olan reaktörlerde pH dengeye gelememekte ve her ikisinin pH’ında düşüşler görülmektedir. pH’ın düzeltilmesi amacıyla her iki sisteme aralıklarla NaOH ilavesi yapılmıştır. Ancak pH, NaOH ilaveleri ile istenilen aralığı getirilemediğinden dolayı pH’ı 7 civarına tamponlamak amacıyla NaHCO_3 ilavesi gerçekleştirilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 36. günden itibaren çamur yaşı 10 ve 12 gün olan reaktörlerin pH değerlerinde yükselmeler görülmeye başlanmış ve pH=7 civarında değişmeye başlamıştır. Ancak 57. günden sonra çamur yaşı 10 gün olan reaktörün pH’ı tekrar düşmeye başlamıştır. Bu durumu düzeltmek amacıyla reaktöre NaHCO_3 ilavesi yapılmasına rağmen pH’daki düşüşlerin önüne geçilememiş ve çamur yaşı 10 gün olan reaktör 91. günden sonra iptal edilmiştir.



Şekil B.7: Reaktörlerdeki pH'ın zamana bağlı değişimi

Her bir reaktörden çekilen numunelerde alkalinite deneyi yapılmıştır. Şekil B.8'den de görüldüğü gibi alkalinite değeri reaktörlerde 2500-4000 mg/l CaCO_3 arasında değişmektedir. Birincil çamur içerisinde çok fazla miktarda partiküler madde

bulunduğundan dolayı başlangıçta, ham çamurda yapılan alkalinite deneylerinin sağlıklı sonuçlar vermediği anlaşılmış ve alkalinite deneyi her bir reaktörden çekilen numunenin 30 dakika santrifüjlenmesinden sonra kaba filtreden süzülmesi ile elde edilen süzüntüde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, alkalinitenin reaktörlerin içerisinde olması gereken alkalinite değeri olan 1000-4000 mg/l CaCO_3 değerleri arasında olduğunu göstermektedir. Birincil çamurda başlangıçta elde edilen ortalama 1370 mg/l CaCO_3 değeri reaktörlerde oluşan anaerobik ayrışma sonucunda 2500-4000 mg/l CaCO_3 civarına yükselmiştir. Ancak her bir reaktördeki alkalinite değerlerinde 57. günden sonra bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüşün sebebi reaktörlere 57. günden 84. güne kadar çamur beslemesi yapılamamasından kaynaklanmaktadır. 84. günde reaktörlere tekrar besleme yapılmasını müteakiben yapılan alkalinite deney sonuçlarına bakıldığında alkalinite değerlerinin 3000-3500 mg/l CaCO_3 civarına yükseldiği görülmektedir. Anaerobik ortamda alkalinitenin yükselmesi ise beklenen bir durumdur.



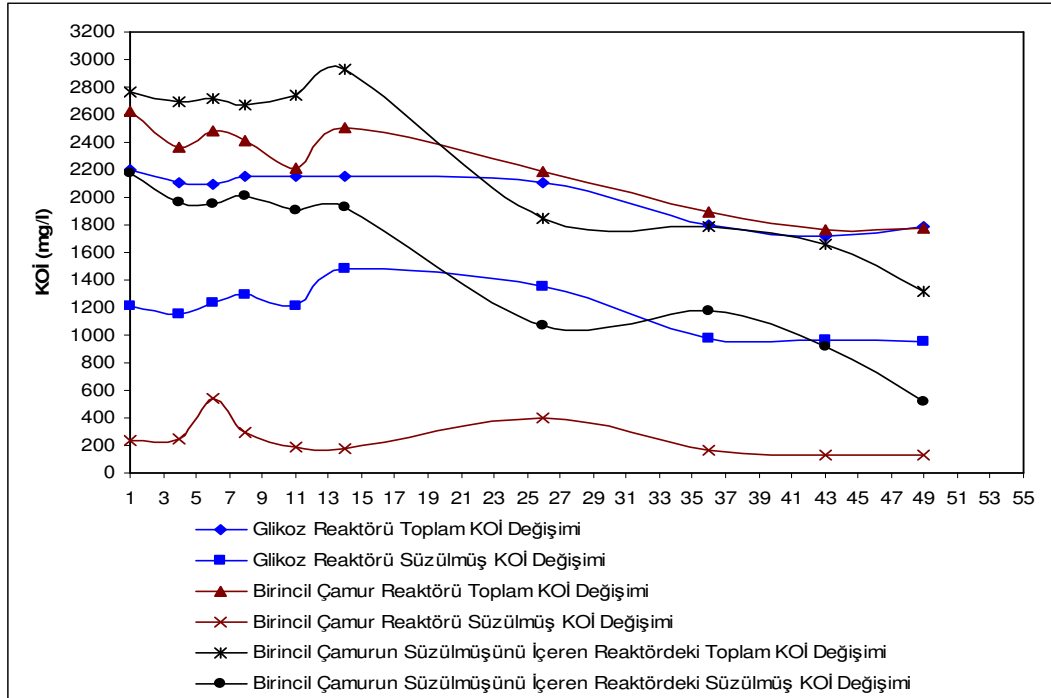
Şekil B.8: Reaktörlerdeki alkalinitenin zamana bağlı değişimi

B.2. Birincil çamurda inert KOİ değerlerinin belirlenmesi

3 reaktörün her birinden ilk 2 haftada, haftada 3 kez, daha sonraki haftalarda haftada 1 kez toplam ve çözünmüş KOİ deneyi yapılmıştır. Bununla birlikte çekilen numunelerde pH değerleri de izlenmiştir.

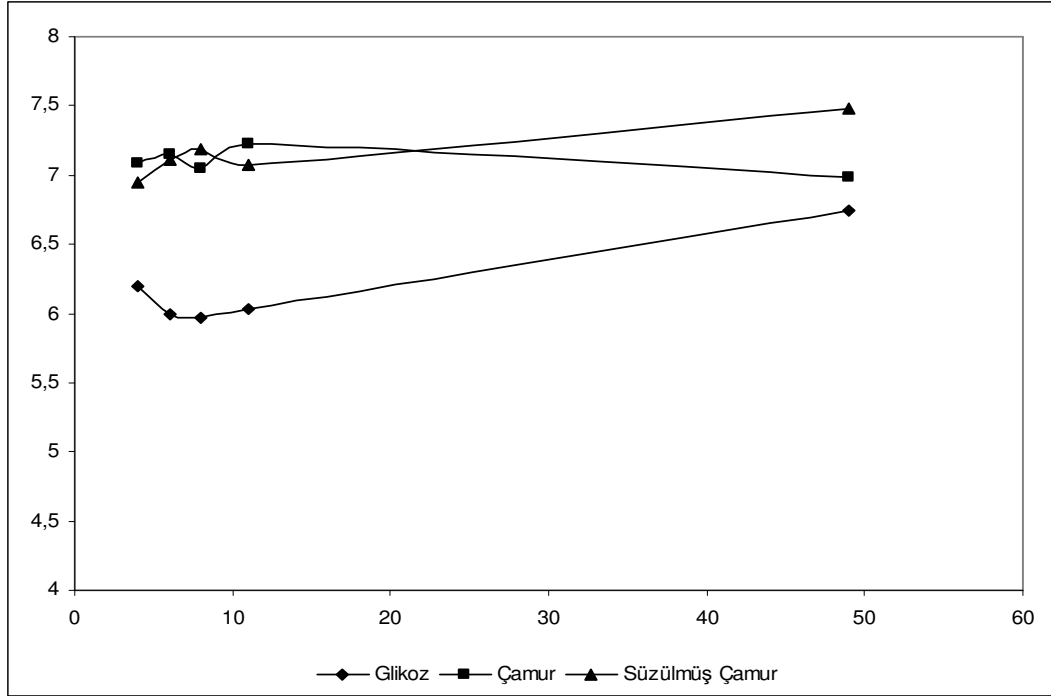
Buna göre her bir reaktördeki toplam ve süzölmüş KOİ değışimleri Şekil B.9'da verilmiştir. Başlangıçta birincil çamuru içeren reaktörün toplam KOİ değeri 2622 iken birincil çamurun süzölmüşünü içeren reaktörün toplam KOİ değeri 2763 mg/l'dir. Buna rağmen, numune çekme esnasında glikoz reaktörüne mezürlerden su girmesi sebebiyle KOİ değeri seyrelmiş ve 2201 mg/l olarak tespit edilmiştir.

Her bir reaktörden çekilen numunelerde herhangi bir giderimin görölememesi üzerine sistemde nütrient eksikliğinin olduğı anlaşıp her bir sisteme 26. gün nütrient ilavesi yapılmıştır. Her bir sisteme ilave edilen nütrient madde miktarları Tablo 4.5'de verilmiştir. Nütrient ilavesi ile birlikte toplam ve süzölmüş KOİ'de giderim görölmeye başlanmıştır. Ancak bu giderim birincil çamur ve glikoz reaktörlerinde 43. güne kadar sürmüş 49. günde bu reaktörlerde KOİ giderimi gerçekleşmemeye başlamıştır. Bu durum, mikroorganizmanın besi maddesine aklime olamamasından kaynaklanmaktadır. Çünkü reaktör içersine beslenen çamur ve glikoz yaklaşık 1/25 oranında seyreltilerek beslenmiştir. Halbuki her bir sisteme ilave edilen aş bu kadar seyreltik bir atığa aklime değildir. Aşının aklime olduğı besinin KOİ değeri yaklaşık 65.000 mg/l civarında olduğundan herhangi bir giderim gözlenememiştir.



Şekil B.9: İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kurulan reaktörlerdeki toplam ve süzölmüş KOİ'nin zamana bağlı değişimi

Ayrıca her bir reaktörden alınan numunelerde pH izlenmiştir. Şekil B.10'dan da görüldüğü gibi pH'da olumsuz yönde bir değişim görülmemektedir. Sadece glikoz reaktörünün pH değeri başlangıçta 6 civarında seyretmekte iken 49. gün alınan numunede pH'ın 6,74'e yükseldiği ve anaerobik arıtma için uygun pH aralığına düştüğü görülmektedir. Glikoz reaktöründe pH değerinin düşmesi ise sistemde başlangıçta asit üretiminin çok olmasına bağlanabilir. Sisteme zamanla herhangi bir besin ilavesinin yapılmaması sebebiyle sistem kendi kendini toparlamış asit üretimi safhası yerini metan üretimi safhasına bırakmıştır. Dolayısıyla pH artmaya başlamıştır.



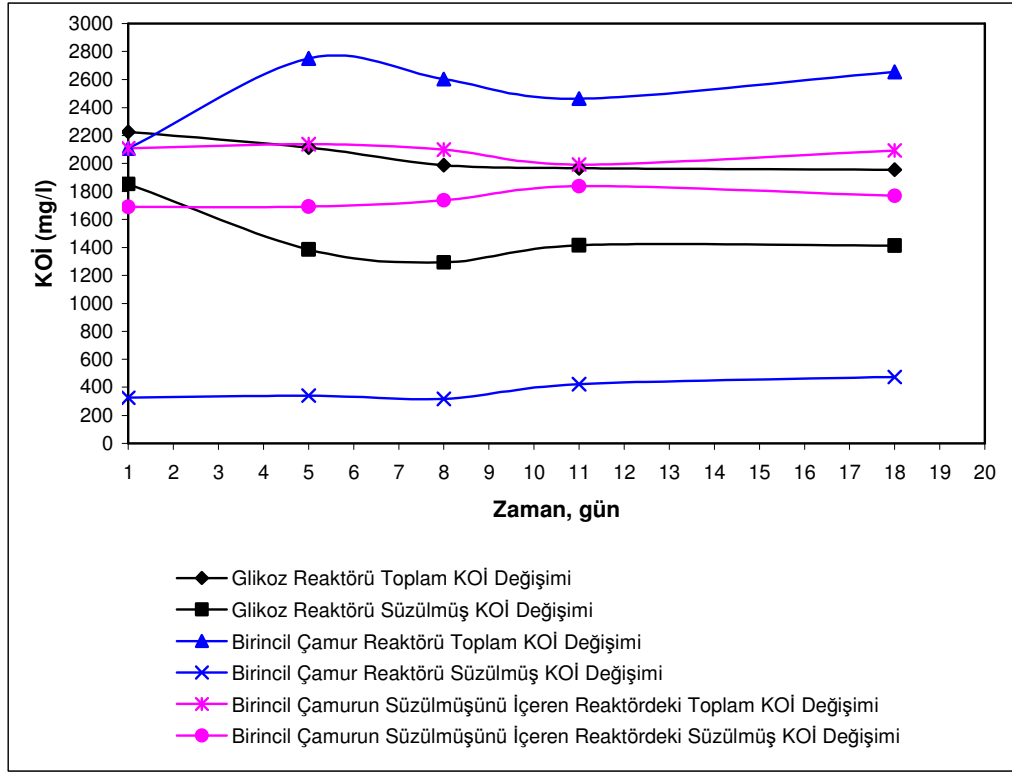
Şekil B.10: Reaktörlerdeki pH değışiminin zamana bağılı değışimi

Yapılan çalışmada 49. gün sonunda daha doğru sonuçlara ulaşmak amacıyla reaktörlerin bu sefer başlangıçta nütrient ilavesi yapılarak kurulumu gerçekleştirilmiştir.

İkinci kez gerçekleştirilen inert KOİ bileşenlerinin belirlenmesi çalışmasında ise nütrient ilavesi başlangıçta yapılmıştır. Her bir reaktördeki toplam KOİ değeri 2100-2200 mg/l KOİ değeri getirilmiş ve reaktörler kesikli olarak 35 ± 2 °C’de işletilmiştir. Ancak yapılan ikinci çalışmada da KOİ giderimi düşünöldüğü gibi gerçekleşmemiştir.

Şekil B.11’den de göröldüğü gibi birincil çamur reaktöründe toplam ve süzölmüş KOİ değeri artıyormuş gibi görünmektedir. Ancak bu artışların deneysel hatalardan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Çünkü sistemde herhangi bir giderim gerçekleşmemiştir. Buna karşın glikoz reaktöründen alınan numunenin toplam ve süzölmüş KOİ değeri başlangıçta çok küçük bir düşüş olmasına rağmen 8. günden itibaren herhangi bir düşüş gözlemlenmemiştir. Birincil çamurun süzölmüşünü içeren reaktörden çekilen numunelerde yapılan toplam ve süzölmüş KOİ deney sonuçlarına bakıldığında ise birincil çamurun süzölmüşünü içeren reaktörde de herhangi bir KOİ giderimi görölmemiştir. Bu durum, mikroorganizmanın besı maddesine aklime

olamamasından kaynaklanmaktadır. Çünkü reaktör içerisine beslenen çamur ve glikoz yaklaşık 1/32,5 oranında seyreltilerek beslenmiştir. Her bir sisteme ilave edilen aşının bu denli seyreltik bir atığa alışık olmaması sebebiyle reaktörlerde KOİ giderimi görülmemiştir. Arıtmanın gerçekleşmesi için öncelikle mikroorganizmanın reaktör içerisindeki besi maddesine aklime olması gerekmektedir.



Şekil B.11: İnert KOİ'nin belirlenmesi amacıyla kurulan reaktörlerdeki toplam ve süzölmüş KOİ'nin zamana bağlı değişimi (İkinci çalışma)

EK C. KAYSERİ EVSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ ÇÜRÜTÜCÜ VERİLERİ

Tablo C.1: Kayseri atıksu arıtma tesisi çürütücü çıkışı alkalinite değerleri

Gün	Alkalinite (mg HCO ₃ /l)	Alkalinite (mg CaCO ₃ /l)
1	4493	3682
2	4484	3675
3	4748	3891
4	4374	3585
5	4431	3632
6	4575	3750
7	4655	3815
8	4559	3736
9	4606	3775
10	4880	4000
11	4692	3845
12	4880	4000
13	4667	3825
14	4786	3923
15	4758	3900
16	4880	4000
17	4735	3881
18	4692	3845
19	4741	3886
20	4914	4027
21	4784	3921
22	4755	3897
23	4812	3944
24	4817	3948
25	4531	3713
26	4748	3891
27	4687	3841
28	4880	4000
29	4706	3857
30	4816	3947
31	4755	3897
32	4697	3850
33	4816	3947
34	4911	4025
35	4880	4000
36	4762	3903
37	4536	3718
38	4761	3902
39	4567	3743
40	4758	3900
41	4758	3900
42	4764	3904

43	4819	3950
44	4819	3950
45	4912	4026
46	4789	3925
47	4514	3700
48	4999	4097
49	4914	4027
50	4974	4077
51	4700	3852
52	4996	4095
53	4848	3973
54	4851	3976
55	4941	4050
56	4786	3923
57	4940	4049
58	4791	3927
59	4819	3950
60	5025	4118
61	4969	4073
62	4850	3975
63	5185	4250
64	5443	4461
65	5059	4146
66	5309	4351
67	5216	4275
68	3972	3255
69	5094	4175
70	5059	4146
71	5185	4250
72	5033	4125
73	5178	4244
74	5224	4282
75	5151	4222
76	5155	4225
77	5354	4388
78	5297	4341
79	5349	4384
80	5193	4256
81	5169	4236
82	5255	4307
83	5169	4236
84	4943	4051
85	5233	4289
86	5233	4289
87	5033	4125
88	5094	4175
89	4880	4000
90	5265	4315
91	5210	4270
92	5033	4125
ORT	4883	4003

Tablo C.2 : Kayseri atıksu arıtma tesisi çürütücü çıkışı metan üretimi değerleri

Gün	Metan(m ³ /gün)	Metan (l CH ₄ /l debi)
1	5575	18,58
2	4543	15,14
3	5125	17,08
4	5325	17,75
5	4796	15,99
6	6143	20,48
7	5604	18,68
8	4754	15,85
9	5564	18,55
10	4964	16,55
11	5370	17,90
12	5492	18,31
13	5472	18,24
14	5790	19,30
15	5273	17,58
16	5368	17,89
17	5341	17,80
18	6128	20,43
19	6081	20,27
20	5750	19,17
21	6270	20,90
22	3577	11,92
23	4310	14,37
24	4747	15,82
25	6260	20,87
26	6050	20,17
27	6523	21,74
28	5960	19,87
29	5663	18,88
30	5642	18,81
31	4943	16,48
32	4984	16,61
33	6072	20,24
34	6512	21,71
35	4875	16,25
36	4624	15,41
37	3655	12,18
38	5069	16,90
39	4284	14,28
40	4656	15,52
41	4765	15,88
42	5014	16,71
43	5361	17,87
44	5729	19,10
45	5821	19,40
46	5977	19,92
47	6374	21,25
48	6146	20,49
49	5340	17,80

50	5145	17,15
51	5515	18,38
52	5332	17,77
53	5093	16,98
54	5017	16,72
55	5763	19,21
56	5433	18,11
57	5178	17,26
58	5420	18,07
59	5600	18,67
60	6294	20,98
61	6251	20,84
62	6318	21,06
63	6146	20,49
64	6111	20,37
65	5802	19,34
66	5878	19,59
67	5934	19,78
68	5887	19,62
69	5989	19,96
70	6033	20,11
71	5835	19,45
72	6069	20,23
73	5688	18,96
74	5849	19,50
75	5953	19,84
76	6062	20,21
77	5688	18,96
78	5766	19,22
79	5849	19,50
80	6607	22,02
81	6310	21,03
82	6627	22,09
83	7137	23,79
84	6842	22,81
85	5979	19,93
86	5546	18,49
87	4077	13,59
88	3713	12,38
89	3660	12,20
90	3358	11,19
91	3459	11,53
92	3116	10,39
ORT	5467	18,22

ÖZGEÇMİŞ

Serpil Gönüldinç, 06.10.1980 yılında İstanbul’da doğdu. Orta öğrenimini Kadir Has Lisesi’nde tamamladı. 1999 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği bölümünden 2003 yılında mezun oldu. Anaerobik arıtma alanındaki Lisans Bitirme Projesi çalışmasından 2 uluslararası makale yayınlandı. İki yıl Çevre Mühendisi olarak özel bir firmada çalıştı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.