

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YEMEKHANE ATIKLARININ
ANAEROBİK ARITMA KİNETİĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ümit BALABAN
(501061720)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.10.2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 10.04.2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Emine UBAY ÇOKGÖR (İTÜ)
Prof. Dr. Ferhan ÇEÇEN (BÜ)**

NİSAN 2009

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesi ve yönlendirilmesindeki değerli katkıları, çalışmam boyunca gösterdiği ilgi ve desteği sebebiyle danışman hocam Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam boyunca sürekli değerli bilgilerine başvurduğum, desteğini, ilgisini, arkadaşlığını ve dostluğunu esirgemeyen hocam Araş. Gör. Dr. Mahmut ALTINBAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Çiğdem YANGIN GÖMEÇ, Yard. Doç. Dr. Nevin ÖZGÜR YAĞCI ve Yard. Doç. Dr. Özlem KARAHAN'a teşekkürlerimi sunarım. Bilgilerini, dostluklarını ve arkadaşlıklarını esirgemeyen Araş. Gör. Recep Kaan DERELİ ve Araş. Gör. Mustafa Evren ERŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, desteklerini hissettiren çalışma arkadaşlarım ve değerli dostlarım Arda GÜLAY, Ahmet Burak BAŞPINAR ve Elif Banu GENÇSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteklerini sürekli hissettiren değerli arkadaşlarım Elis GÜNEŞ, İnci KARAKAYA, Kübra ERİÇYEL ve Aslı ÖZABALI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olarak sevgisini, desteğini ve anlayışını sürekli hissettiren sözlüm Seray YAVUZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her zaman yanımda olan, bana inanan, güvenen ve destekleyen AİLEME içten teşekkür ederim.

Bu Tez, “Evsel Atıksular ve Organik Katı Atıkların Birlikte Arıtımı Yoluyla Yenilenebilir Enerji (Biyometan) Geri Kazanım Teknolojilerinin Araştırılması Projesi”, Proje No: 105G024 kapsamında TÜBİTAK Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projeleri Destekleme Programı (1007) tarafından desteklenmiştir.

Ekim 2008

Ümit BALABAN

Çevre Mühendisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Anlam ve Önemi.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
2. ANAEROBİK ARITMANIN TEMELLERİ	5
2.1. Anaerobik Çürütmenin Mikrobiyolojisi	6
2.1.1. Hidroliz	6
2.1.2. Asit Üretimi.....	7
2.1.3. Metan Üretimi	7
2.1.4. Anaerobik Mikroorganizmalar Arasındaki İlişkiler.....	8
2.2. Hız Kısıtlayan Kademe Yaklaşımı	8
2.3. Anaerobik Arıtmada Proses Kinetiği.....	9
2.3.1. Hidroliz Kinetiği	9
2.3.2. Asit Üretimi Kinetiği.....	9
2.3.3. Metan Üretimi Kinetiği.....	10
3. ORGANİK KATI ATIKLARIN ANAEROBİK ARITIMI	13
3.1. Organik Katı Atık Karakterizasyonu.....	14
3.1.1. Mekanik Ayırma ile Elde Edilen Organik Katı Atıklar (MA-OKA) ...	15
3.1.2. Ayırık Toplama ile Elde Edilen Organik Katı Atıklar (AT-OKA)	16
3.1.3. Kaynağında Ayırma (İkili Toplama) ile Elde Edilen Organik Katı Atıklar (KA-OKA).....	17
3.2. Katı Atık Toplama Yönteminin Biyogaz Üretim Potansiyeline Etkisi	18
3.3. Organik Katı Atıkların Anaerobik Çürütülmesinde Kullanılan Reaktör Tipleri	19
3.3.1. Tek Kademeli Sistemler	20
3.3.1.1. Tek Kademeli Islak Sistemler	20
3.3.1.2. Tek Kademeli Kuru Sistemler	21
3.3.2. Çift Kademeli Sistemler	23
3.3.2.1. Çift Kademeli Geri Devirsiz Sistemler.....	23
3.3.2.2. Çift Kademeli Geri Devirli Sistemler.....	25
3.3.3. Kesikli Sistemler (Doldur-Boşalt)	26
4. MATERYAL ve METOD	31
4.1. Aşı Karakterizasyonu	31
4.2. Atık Karakterizasyonu.....	33
4.3. Deneysel Düzenek.....	33
4.4. Reaktörlerin İzlenmesi.....	37
4.5. Analitik Yöntemler	38

5. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	39
5.1. Hidroliz ve Fermentasyon	39
5.1.1. pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon	39
5.1.2. pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon.....	48
5.2. Çürütme	57
6. KİNETİK VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	69
6.1. Hidroliz Kinetiği.....	69
6.1.1. pH Kontrolsüz Hidroliz.....	69
6.1.2. pH Kontrollü Hidroliz	70
6.2. Asit Üretimi Kinetiği.....	72
6.3. Metan Üretimi Kinetiği	72
6.4. İçsel Solunum Kinetiği.....	72
7. SONUÇ ve ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	135

KISALTMALAR

AT-OKA	: Ayrı Toplanmış Organik Katı Atık
C	: Karbon
COD	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
Ç.KOİ	: Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı
FID	: Alev İyonlaşma Dedektörü
GC	: Gaz Kromotograf
HÇYR	: Havasız Çamur Yataklı Reaktör
İK	: İnorganik Karbon
KA-OKA	: Kaynağında Ayrılmış Organik Katı Atık
KM	: Katı Madde
MA-OKA	: Mekanik ayrılmış Organik Katı Atık
N	: Azot
P	: Fosfor
RDF	: Refuse Derived Fuel
T.KOİ	: Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TVS	: Toplam Uçucu Katı Madde
T.UYA	: Toplam Uçucu Yağ Asitleri
TCD	: Isıl İletkenlik Dedektörü
TKM	: Toplam Katı Madde
TKN	: Toplam Kjeldal Azotu
TKOİ	: Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TOK	: Toplam Organik Karbon
Toplam-P	: Toplam Fosfor
TP	: Toplam Fosfor
TUKM	: Toplam Uçucu Katı Madde
UAKM	: Uçucu Askıda Katı Madde
UASB	: Havasız Çamur Yataklı Reaktör
UKM	: Uçucu Katı Madde
UYA	: Uçucu Yağ Asitleri
VFA	: Uçucu Yağ Asitleri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları	6
Çizelge 3.1 : Türkiye’de başlıca büyükşehirler için evsel katı atık bileşimi	13
Çizelge 3.2 : Kompleks bir mekanik ayırma tesisinde mekanik ayırma ile ayrılan organik katı atığın kimyasal ve fiziksel özellikleri	15
Çizelge 3.3 : İtalya’nın Milano şehrine bağlı 24 belediyede ayırık toplanan organik katı atığın ayrılma derecesi	16
Çizelge 3.4 : Ayırık toplama ile elde edilen organik katı atığın karakteristiği	16
Çizelge 3.5 : Kantinlerden ayırık toplama ile elde edilen organik katı atığın karakteristiği	17
Çizelge 3.6 : Hal ve marketlerden ayırık toplama ile elde edilen organik katı atıkların karakteristiği	17
Çizelge 3.7 : Farklı çalışmalarda kaynağında ayırma ile elde edilen organik katı atığın karakteristiği	18
Çizelge 3.8 : Üç farklı organik katı atık türünden elde edilebilecek maksimum metan ve biyogaz verimi	18
Çizelge 3.9 : Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtılmasında kullanılan proseslerin karşılaştırılması	29
Çizelge 4.1 : pH kontrollü ve pH kontrolsüz şartlarda yürütülen hidroliz ve fermentasyon çalışmalarında kullanılan aşırı çamurlarının karakterizasyonu	32
Çizelge 4.2 : pH kontrollü çürütme çalışmasında kullanılan aşırı çamurlarının karakterizasyonu	32
Çizelge 4.3 : pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda substrat karakterizasyonu	33
Çizelge 4.4 : pH kontrollü çürütmede substrat karakterizasyonu	33
Çizelge 4.5 : pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda substrat karakterizasyonu	33
Çizelge 4.6 : Anaerobik ortam çözeltisinin bileşimi	35
Çizelge 4.7 : Reaktörlerden numune alma sıklıkları	37
Çizelge 5.1 : pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda giderilen TUKM ile üretilen gaz miktarı ilişkisi	48
Çizelge 5.2 : pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda giderilen TUKM ile üretilen gaz miktarı ilişkisi	57
Çizelge 5.3 : Çürütmede giderilen TUKM ile üretilen gaz miktarı ilişkisi	67
Çizelge 6.1 : pH kontrolsüz hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar	70
Çizelge 6.2 : pH kontrollü hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar	72
Çizelge 6.3 : Fermentasyon ve Çürütme kademelerinde gözlenen ölüm hızları	73
Çizelge B.1 : pH kontrolsüz hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar	106
Çizelge B.2 : pH kontrollü hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar	110

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Anaerobik arıtmanın adımları	5
Şekil 3.1	: Entegre atık yönetimi akım diyagramı	14
Şekil 3.2	: Kompleks bir mekanik ayırma tesisinin akım şeması	15
Şekil 3.3	: Organik katı atıkların anaerobik arıtımında kullanılan başlıca prosesler	19
Şekil 3.4	: Tek kademeli ıslak sistemler için tipik bir tasarım (Waasa Prosesi).....	21
Şekil 3.5	: Tek kademeli kuru sistemlerde kullanılan farklı çürütücü tasarımları...	22
Şekil 3.6	: İki kademeli geri devirsiz “ıslak-ıslak” Schwarting-Uhde prosesinin akım şeması (Mata-Alvarez, 2003)	24
Şekil 3.7	: İki kademeli “ıslak-ıslak” şeklinde tasarlanmış olan BTA prosesinin akım şeması	26
Şekil 3.8	: Farklı kesikli sistemlerde uygulanan farklı süzöntü suyu geri devri tasarımları.....	27
Şekil 4.1	: Hidroliz ve fermentasyon kademelerinin gerçekleştirildiği deneysel düzenekten bir görünüm.....	36
Şekil 4.2	: Çürütme kademesinin gerçekleştirildiği deneysel düzenekten bir görünüm	36
Şekil 5.1	: 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH’ın zamanla değişimi	39
Şekil 5.2	: 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	40
Şekil 5.3	: 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH’ın zamanla değişimi	41
Şekil 5.4	: 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	41
Şekil 5.5	: 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%2,5) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH’ın zamanla değişimi.....	42
Şekil 5.6	: 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%2,5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	43
Şekil 5.7	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%5) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH’ın zamanla değişimi.....	44
Şekil 5.8	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	44
Şekil 5.9	: %2,5’lik KM’de gözlenen eklenik gaz üretimi	45
Şekil 5.10	: %2,5’lik KM’de gözlenen gaz üretiminin bileşimi	45
Şekil 5.11	: %5’lik KM’de gözlenen eklenik gaz üretimi	46
Şekil 5.12	: %5’lik KM’de gözlenen gaz üretiminin bileşimi	46
Şekil 5.13	: %2,5’lik KM’de başlangıçta ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri	47
Şekil 5.14	: %5’lik KM’de başlangıçta ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri	47
Şekil 5.15	: 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH’ın zamanla değişimi	48

Şekil 5.16 :	27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	49
Şekil 5.17 :	07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi.....	50
Şekil 5.18 :	07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	50
Şekil 5.19 :	07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an şahit (%1,5) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi.....	51
Şekil 5.20 :	07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an şahit (%1,5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	52
Şekil 5.21 :	08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an şahit (%2,5) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi.....	52
Şekil 5.22 :	08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an şahit (%2,5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	53
Şekil 5.23 :	%1,5'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi	54
Şekil 5.24 :	%1,5'lik KM'de gözlenen gaz üretiminin bileşimi	54
Şekil 5.25 :	%2,5'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi	55
Şekil 5.26 :	%2,5'lik KM'de gözlenen gaz üretiminin bileşimi	55
Şekil 5.27 :	%1,5'lik KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri	56
Şekil 5.28 :	%2,5'lik KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri	56
Şekil 5.29 :	27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi	58
Şekil 5.30 :	27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	58
Şekil 5.31 :	07.01.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi	59
Şekil 5.32 :	07.01.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	60
Şekil 5.33 :	07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an şahit (%2) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi.....	61
Şekil 5.34 :	07.01.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an şahit (%2) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	61
Şekil 5.35 :	08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an şahit (%4) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi.....	62
Şekil 5.36 :	08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an şahit (%4) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi.....	62
Şekil 5.37 :	%2'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi	63
Şekil 5.38 :	%2'lik KM'de 21. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi.....	63
Şekil 5.39 :	%2'lik KM'de 39. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi.....	64
Şekil 5.40 :	%4'lük KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi	65
Şekil 5.41 :	%4'lük KM'de 21. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi.....	65
Şekil 5.42 :	%4'lük KM'de 39. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi.....	66
Şekil 5.43 :	%2'lik KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri	66
Şekil 5.44 :	%4'lük KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri	67
Şekil 6.1 :	%2,5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması	69
Şekil 6.2 :	%5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması	70
Şekil 6.3 :	%1,5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması	71
Şekil 6.4 :	%2,5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması	71
Şekil A.1 :	07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi.....	85

Şekil A.2	: 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	86
Şekil A.3	: 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	87
Şekil A.4	: 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	87
Şekil A.5	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	88
Şekil A.6	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	89
Şekil A.7	: 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	90
Şekil A.8	: 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	90
Şekil A.9	: 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	91
Şekil A.10	: 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	91
Şekil A.11	: 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	92
Şekil A.12	: 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	93
Şekil A.13	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	94
Şekil A.14	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	94
Şekil A.15	: 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	95
Şekil A.16	: 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	95
Şekil A.17	: 07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	97
Şekil A.18	: 07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	97
Şekil A.19	: 12.12.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	98
Şekil A.20	: 12.12.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	99
Şekil A.21	: 08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	100
Şekil A.22	: 08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	100
Şekil A.23	: 20.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değışimi	102
Şekil A.24	: 20.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi.....	102
Şekil B.1	: 27.09.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde k'nın hesaplanması.....	103
Şekil B.2	: 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde k'nın hesaplanması	104

Şekil B.3	: 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	104
Şekil B.4	: 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	105
Şekil B.5	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	105
Şekil B.6	: 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	106
Şekil B.7	: 27.09.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	107
Şekil B.8	: 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	107
Şekil B.9	: 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	108
Şekil B.10	: 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	108
Şekil B.11	: 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	109
Şekil B.12	: 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması	109

SEMBOL LİSTESİ

A	: Toplam asetat konsantrasyonu (g/L)
A_c	: İyonlaşmış asetat konsantrasyonu (g/L)
A_u	: İyonlaşmamış asetat konsantrasyonu (g/L)
H⁺	: Hidrojen iyonu konsantrasyonu (g/L)
k	: Hidroliz hızı sabiti (gün ⁻¹)
K_a	: Asetatın çözünürlük katsayısı (1.728×10^{-5})
k_d	: ölüm hızı sabiti (gün ⁻¹)
K_{da}	: Asit üreten bakterilerin ölüm hızı (gün ⁻¹)
K_{dm}	: Metan üreten arkelerin ölüm hızı (gün ⁻¹)
K_{ia}	: İyonlaşmamış asetatın inhibisyon katsayısı (g/L)
K_{iam}	: İyonlaşmamış amonyağın inhibisyon katsayısı (g/L)
K_{im}	: Asetatın metan dönüşümü üzerindeki inhibisyon sabiti (g/L)
K_{ixm}	: İyonlaşmamış asetatın inhibisyon katsayısı (g/L)
K_m	: Metan üreten arkelerin yarı doyumluk sabiti (g/L)
K_{sa}	: Asit üreten bakterilerin yarı doyumluk sabiti (g/L)
K_{sm}	: Metan üreten arkelerin yarı doyumluk sabiti (g/L)
μ_a	: Asit üreten bakterinin özgül çoğalma hızı (gün ⁻¹)
μ_{amax}	: Asit üreten bakterinin maksimum özgül çoğalma hızı (gün ⁻¹)
μ_m	: Metan üreten arkelerin özgül çoğalma hızı (gün ⁻¹)
μ_{mmax}	: Metan üreten arkelerin maksimum özgül çoğalma hızı (gün ⁻¹)
NH_{3(u)}	: İyonlaşmamış amonyak konsantrasyonu (g/L)
S	: Çözünmüş substrat konsantrasyonu (g/L)
S_a	: Çözünmüş substrat konsantrasyonu (g/L)
t	: Zaman (gün)
V_{mmax}	: Günlük azami metan dönüşüm hızı (0°C ve 1 atm'de hacim olarak) gram arke başına (L/g.gün)
Y_a	: S _a 'ın parçalanma sabiti $\left(\frac{g(X_h)}{g(S_a)}\right)$
Y_m	: A'nın parçalanma sabiti $\left(\frac{g(X_m)}{g(A)}\right)$
Y_{va}	: A'nın dönüşüm katsayısı $\left(\frac{g(X_a)}{g(A)}\right)$
Y_{vh}	: S _a için dönüşüm katsayısı $\left(\frac{g(X_a)}{g(S_a)}\right)$
X_a	: Asit üreten biyokütle (g/L)
X_m	: Metan üreten biyokütle (g/L)

YEMEKHANE ATIKLARININ ANAEROBİK ARITMA KİNETİĞİ

ÖZET

Son yıllarda, katı atık yönetimi çevre mühendisliği alanında en çok ilgi çeken konulardan biri haline gelmiştir. Birçok ülke için düzenli depolama, alan sıkıntısı, kontrol edilemeyen gaz emisyonları ve sızıntı suyu nedeniyle sürdürülebilir bir atık yönetim metodu olmaktan çıkmaktadır. Düzenli depolama yerine, çevresel etkileri daha kolay kontrol edilebilen diğer alternatif yöntemler (kompostlaştırma, anaerobik çürütme, yakma v.b.) de yaygın olarak kullanılmaya yolundadır. Organik katı atıkların anaerobik şartlar altında biyolojik olarak arıtılması sayesinde atığın organik madde içeriği azaltılmakta, besi maddeleri geri kazanılmakta, elde edilen son ürün toprak şartlandırıcı olarak kullanılmakta ve üretilen biyogaz da enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışma, kentsel nitelikli organik katı atık üretimi içerisinde önemli bir yeri olan yemekhane atıklarının, anaerobik şartlarda çift kademeli olarak arıtılmasını ve bu süreçte gözlenen proses kinetiklerinin deneysel olarak belirlenmesini kapsamaktadır. Yemekhane atıklarının anaerobik şartlarda arıtılması 37°C mezofilik sabit sıcaklık odasında üç aşamada yürütülmüştür. Çalışmanın birinci aşaması olan pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda, Biyometan Pilot Tesisinin fermentör ünitesinden alınan anaerobik aşı çamurları ile İTÜ Ayazağa Kampüsü öğrenci yemekhanesinden alınan organik katı atıklar sırasıyla 20:80 karışım oranında ve %2,5 ile %5 katı maddeli olarak hazırlanmış ve çalışma pH'a müdahale edilmeden yürütülmüştür. Çalışmanın ikinci aşaması olan pH kontrollü çürütmede, Biyometan Pilot Tesisinin çürütme ünitesinden alınan anaerobik aşı çamurları ile çalışmanın birinci aşaması olan pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda elde edilen ürünler sırasıyla 40:60 karışım oranında ve %2 ile %4 katı maddeli olarak hazırlanmış ve çalışma pH'a müdahale edilerek pH=7,0-7,5 aralığında yürütülmüştür. Çalışmanın üçüncü aşaması olan pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda, Biyometan Pilot Tesisinin fermentör ünitesinden alınan anaerobik aşı çamurları ile İTÜ Ayazağa Kampüsü öğrenci yemekhanesinden alınan organik katı atıklar sırasıyla 20:80 karışım oranında ve %1,5 ile %2,5 katı maddeli olarak hazırlanmış ve çalışma pH'a müdahale edilerek pH=5,0-5,5 aralığında yürütülmüştür.

Hidroliz ve fermentasyon kademesinde katı madde konsantrasyonu arttıkça Ç.KOI artış oranı, Ç.KOI'nin UYA'ya dönüşüm oranı ve giderilen TUKM başına üretilen gaz oranları artmaktadır. pH kontrollü olarak yürütülen hidroliz ve fermentasyon kademesinde, pH kontrolsüz olarak yürütülen hidroliz ve fermentasyon kademesine göre gözlenen dönüşüm oranları çok daha yüksek olmaktadır. pH kontrollü olarak gerçekleştirilen çürütme kademesinde katı madde konsantrasyonu arttıkça Ç.KOI artış oranı ve Ç.KOI'nin UYA'ya dönüşüm oranı değişmemiş, giderilen TUKM başına üretilen gaz oranları ise azalmıştır. İki kademeli anaerobik arıtmanın proses kinetiğini yansıtan değerler ise yüksek substrat yüklemesi yüzünden literatürde gözlenen değerlerin altında kalmıştır.

ANAEROBIC DIGESTION KINETICS OF FOOD WASTES

SUMMARY

In last years, solid waste management become one of the mostly interested subject in the environmental engineering area. For a lot of countries landfills are no more sustainable waste management methods, because of difficulties in suitable area finding, uncontrollable gas emissions and leachate. Instead of landfills, other alternative methods (compost, anaerobic digestion, incineration, etc) are preferable because of simplicity in control of their environmental impacts. Thus, biological treatment of organic fraction of municipal solid waste under anaerobic conditions, organic matter content of waste is decreased, nutrients are recovered, end product is used as compost, produced biogas is considered as energy source.

This study consist of two-stage anaerobic digestion of food wastes that have a major part in generation of organic fraction of municipal solid waste and determine the kinetic coefficients of two-stage process that monitored experimentally. Anaerobic digestion of food wastes carried out in three stages in a mesophilic constant temperature room at 37°C. Hydrolysis and fermentation without pH control is the first stage of this study. Anaerobic inoculum sludges collected from the fermentation reactor of biomethane pilot scale plant and organic solid wastes collected from students cafeteria of ITU Ayazaga Campus was mixed with a ratio of 20:80 respectively, with ultimate TS content of 2,5% and 5%, and study was carried out without pH control. Digestion with pH control is the second stage of this study. Anaerobic inoculum sludges collected from the digestion reactor of biomethane pilot scale plant and products that obtained from the hydrolysis and fermentation without pH control (first stage of study) was mixed with a ratio of 40:60 respectively, with ultimate TS content of 2% and 4%, and study was carried out with pH control between 7,0 and 7,5. Hydrolysis and fermentation with pH control is the third stage of this study. Anaerobic inoculum sludges collected from the fermentation reactor of biomethane pilot scale plant and organic solid wastes collected from students cafeteria of ITU Ayazaga Campus was mixed with a ratio of 20:80 respectively, with ultimate TS content of 1,5% and 2,5%, and study was carried out with pH control between 5,0 and 5,5.

Increase of total solid concentration in hydrolysis and fermentation stage, results in increase of soluble COD ratio, increase of VFA transformation ratio of soluble COD, and increase of gas produced ratio per TVS removed. Observed yields of hydrolysis and fermentation stage with pH control according to hydrolysis and fermentation stage without pH control is too much. Increase of total solid concentration in digestion with pH control, results in not increase of soluble COD ratio, not increase of VFA transformation ratio of soluble COD, and decrease of gas produced ratio per TVS removed. Because of observed high substrate loading, process kinetics of two-stage anaerobic digestion was below from the literature values.

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Anlam ve Önemi

Son yıllarda, katı atık yönetimi çevre mühendisliği alanında en çok ilgi çeken konulardan biri haline gelmiştir. Birçok ülke için düzenli depolama, alan sıkıntısı, kontrol edilemeyen gaz emisyonları ve sızıntı suyu nedeniyle sürdürülebilir bir atık yönetim metodu olmaktan çıkmaktadır. Düzenli depolama yerine, çevresel etkileri daha kolay kontrol edilebilen diğer alternatif yöntemler (kompostlaştırma, anaerobik çürütme, yakma v.b.) de yaygın olarak kullanılmaya yolundadır. Organik katı atıkların anaerobik şartlar altında biyolojik olarak arıtılması sayesinde atığın organik madde içeriği azaltılmakta, besi maddeleri geri kazanılmakta, elde edilen son ürün toprak şartlandırıcı olarak kullanılmakta ve üretilen biyogaz da enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir.

Bilindiği üzere Avrupa Birliği Katı Atık Düzenli Depolama Yönergesi (99/31/EC) uyarınca AB üyesi ve aday ülkelerde, 1995 yılı ülke toplam organik katı atık miktarları baz alınarak, katı atık düzenli depolama alanlarında bertaraf edilecek biyolojik olarak ayrışabilir organik katı atık miktarlarının 2010, 2013 ve 2020 yıllarına kadar sırasıyla %25, %50 ve %65 oranında azaltılması öngörülmektedir. 2005 yılında AB ile üyelik müzakerelerine başlayan ülkemiz için de, halen tamama yakını katı atık düzenli depolama alanlarına gönderilen evsel katı atıklar içerisindeki organik katı atıkların ayrılarak kompost ve/veya biyometan üretimi söz konusu kotaların sağlanması bakımından büyük önem taşımaktadır.

Kyoto Protokolü'nde ülkeler sera gazı emisyonlarının azaltılması ve organik atıklardan yenilenebilir enerji (biyometan) üretiminin desteklenmesi yönünde karar almışlardır. Kyoto Protokolü'nde ülkelerin 2010 yılına kadar toplam enerji üretimlerinin %10'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından (rüzgar, biyometan, etanol, hidrojen) sağlamaları öngörülmüştür. Zirveden sonra Avrupa'daki birçok ülke organik atıklardan biyometan üretimini teşvik etmek amacıyla, biyogazdan üretilen elektriğin kW-sa başına 0,10 €'dan daha yüksek teşvik uygulamakta olup, ayrıca

takriben %50'lere varan oranlarda yatırım hibesi sağlamaktadır. Bu çerçevede, AB genelinde 2010 yılına kadar birlik ülkelerinin toplam enerji üretimlerinin %12,5'inin yenilenebilir enerji kaynaklarından temini hedeflenmiştir. Bu kapsamda, organik katı atıkların anaerobik şartlar altında çürütülerek hidrojen veya metan üretiminin sağlanması çok cazip bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

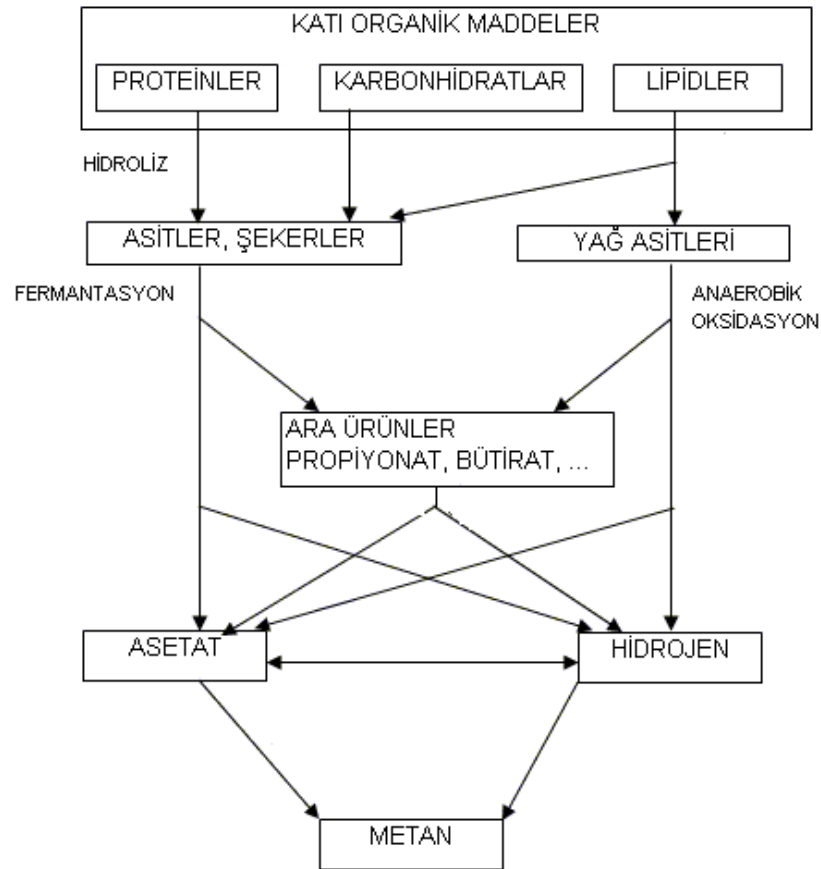
Bu çalışmanın amacı, kentsel nitelikli organik katı atık üretimi içerisinde önemli bir yeri olan yemekhane atıklarının anaerobik şartlarda arıtılması esnasındaki proses kinetiğini yansıtan verilerin elde edilmesidir. Bu amaçla kullanılacak anaerobik aşı çamurları, “Evsel Atıksular ve Organik Katı Atıkların Birlikte Arıtımı Yoluyla Yenilenebilir Enerji (Biyometan) Geri Kazanım Teknolojilerinin Araştırılması Projesi” kapsamında kurulmuş bulunan Biyometan Pilot Tesisi'nin İTÜ öğrenci yemekhanesinden alınan yemek, sebze ve meyve atıkları ile beslendiği Ekim 2007 - Şubat 2008 döneminde aylık olarak fermentör ve çürütücü ünitelerinden alınmıştır. Organik katı atık ise İTÜ Ayazağa Kampüsü öğrenci yemekhanesinden alınan yemek, sebze ve meyve atıkları karışımından sağlanmıştır.

Bu çalışma pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyon, pH kontrollü çürütme ile pH kontrollü hidroliz ve fermentasyon olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın birinci kısmı olan pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda, Biyometan Pilot Tesisinin fermentör ünitesinden alınan anaerobik aşı çamurları ile İTÜ Ayazağa Kampüsü öğrenci yemekhanesinden alınan organik katı atıklar sırasıyla 20:80 karışım oranında ve %2,5 ile %5 katı madde konsantrasyonlarında 1,175 L hacimli serum şişelerinde hazırlanmış ve çalışma pH'a müdahale edilmeden yürütülmüştür. Çalışmanın ikinci kısmı olan pH kontrollü çürütmede, Biyometan Pilot Tesisinin çürütme ünitesinden alınan anaerobik aşı çamurları ile çalışmanın birinci kısmı olan pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyon kısmında elde edilen ürünler sırasıyla 40:60 karışım oranında ve %2 ile %4 katı madde konsantrasyonlarında 1,175 L hacimli serum şişelerinde hazırlanmış ve çalışma pH'a müdahale edilerek pH=7,0-7,5 aralığında yürütülmüştür. Çalışmanın üçüncü kısmı olan pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda, Biyometan Pilot Tesisinin fermentör ünitesinden alınan anaerobik aşı çamurları ile İTÜ Ayazağa Kampüsü öğrenci yemekhanesinden alınan organik katı atıklar sırasıyla 20:80 karışım oranında ve %1,5 ile %2,5 katı madde

konsantrasyonlarında 1,175 L hacimli serum şişelerinde hazırlanmış ve çalışma pH'a müdahale edilerek pH=5,0-5,5 aralığında yürütülmüştür. Çalışmanın tamamı 37°C'lik mezofilik şartlarda yürütülmüştür.

2. ANAEROBİK ARITMANIN TEMELLERİ

Anaerobik çürütme, organik maddelerin havasız ortamda ayrışması esnasında gerçekleşen çok adımlı biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan biyolojik bir prosestir (Şekil 2.1). Bu prosesin ilk adımında polisakkarit, karbonhidrat, protein, lipid gibi polimerik yapıdaki kompleks organik maddeler hücre dışı enzimler tarafından daha küçük boyutta ve hücre zarından geçebilecek şekildeki çözünebilir ürünlere dönüştürülmektedir. Nispeten basit ve çözünebilir yapıdaki bu bileşikler fermentasyon veya anaerobik oksidasyonla kısa zincirli yağ asitleri, alkoller, karbondioksit, hidrojen ve amonyağa dönüştürülmektedir. Asetat dışındaki kısa zincirli yağ asitleri ise asetat, hidrojen ve karbondioksite dönüştürülmektedir. Prosesin son safhasında asetatın parçalanması veya H_2 ile CO_2 'nin sentezi yoluyla CH_4 üretimi gerçekleştirilmektedir (Ubay, 1993).



Şekil 2.1 : Anaerobik arıtmanın adımları

2.1. Anaerobik Çürütmenin Mikrobiyolojisi

Anaerobik çürütme farklı mikroorganizma gruplarının birlikte yardımlaşarak rol aldığı, oldukça kompleks bir biyokimyasal süreçtir. Bununla birlikte genelde başlıca iki grup mikroorganizmanın, asit bakterileri ve metan arkeleri, esas görevi üstlendiği bilinmektedir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları

Asit bakterileri	Bütirik ve propiyonik asit üretenler
	Asetik asit üretenler
Metan arkeleri	Asetik asit kullananlar
	Hidrojen kullananlar

2.1.1. Hidroliz

Anaerobik çürütmede ilk adım, hücre zarından geçemeyecek büyüklükte polimerik yapıdaki organik maddelerin (partiküler ve çözünmüş polimerler) enzimatik hidrolizle hücre zarından geçebilecek ve mikroorganizmalarca kullanılacak daha basit yapıdaki çözünmüş ürünlere dönüştürülmesidir. Hidroliz, hücre dışı enzimlerce gerçekleştirilen oldukça yavaş bir süreçtir. Reaksiyon hızını etkileyen en önemli faktörler ise pH, sıcaklık, hidroliz ara ürünlerinin ortamda birikmesi ve organik maddenin partikül boyut dağılımıdır (**Mata-Alvarez, 2003**).

Karbonhidratlar, proteinler ve lipidler olmak üzere, kimyasal bileşimleri açısından üç tür kompleks organik madde bileşeni vardır.

Karbonhidratların hidrolizi ile ilgili mevcut veriler otobur hayvan dışkılarından elde edilen saf kültürler yardımıyla selülozun hidrolizi çalışmalarından elde edilmiştir. Selülozun hidroliz ürünü, sellobioz ve glikozdur. Hemiselüloz ise pentoz, hekzoz ve üronik aside hidroliz olmaktadır.

Proteinler, proteaz olarak adlandırılan hücre dışı enzimlerle hidroliz edilmektedir. Protein hidrolizinin sonucu olarak üretilen amino asitler; uçucu yağ asitleri, karbondioksit, hidrojen, amonyum ve indirgenmiş kükürde (S^{2-}) fermente olmaktadır.

Lipidler, lipaz olarak adlandırılan enzim ile parçalanıp uzun zincirli yağ asitleri, glaktoz ve gliserol oluşturulmaktadır (**Öztürk, 2007**).

2.1.2. Asit Üretimi

Anaerobik çürütmede ikinci adım, hidroliz ürünlerinin asetik asit veya reaktördeki işletme şartlarının kararlı olmaması halinde, asetik asit yanında propiyonik, butirik, izobutirik, valerik ve izovalerik asit gibi iki karbonludan yüksek yağ asitlerine dönüştürülmesidir. Fermentasyon veya asit üreten bakteriler, organik polimerlerin hidrolizinde ardından da açığa çıkan oligomer ve monomerler gibi hidroliz ürünlerinin uçucu yağ asitleri, solventler, H_2 ve CO_2 'ye dönüştürülmesinde rol almaktadır. Bazı asit üreten bakteri türleri (asetojenler) karbonhidratları kullanarak asetik asit üretmektedir. Uzun zincirli yağ asitleri ve uçucu yağ asitleri zorunlu hidrojen üreten asetojen bakteriler tarafından asetat, CO_2 ve H_2 'ye dönüştürülmektedir. Termodinamik sebeplerle asetik asit üreten bakteriler sadece H_2 kullanan mikroorganizma alt grupları ile birlikte yaşamaktadır.

Asit üretim hızı metan üretim hızına göre daha büyük olduğu için, çözünmüş organik madde konsantrasyonundaki ani artış, asit üretiminin artması sonucu sistemde asit birikimine yol açmaktadır. Böyle bir durum bir sonraki adım olan metan üretiminde inhibisyona sebep olabilmektedir (Öztürk, 2007).

2.1.3. Metan Üretimi

Metan üretimi yavaş bir süreçtir ve anaerobik çürütmede genellikle hız sınırlayıcı kademe olarak kabul edilmektedir. Metan, asetik asitin parçalanması ve/veya H_2 ile CO_2 'nin sentezi sonucu üretilmektedir. Anaerobik reaktörlerde üretilen metanın yaklaşık olarak %30'u H_2 ve CO_2 'den, %70'i ise asetik asitin parçalanmasından oluşmaktadır. H_2 ve CO_2 'den metan üreten arkeler, asetik asit kullanan arkelere oranla çok daha hızlı çoğalmaktadır. Dolayısıyla ortamda yeterli H_2 ve CO_2 bulunduğu sürece, bu yolla CH_4 üretimi devam etmektedir.

Metan arkeleri, fizyolojik yapıları gereği en etkili şekilde pH = 6,7-8,0 aralığında faaliyet göstermektedir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda asetatın metana doğrudan dönüşümünü sağlayan arkelerden *Methanosaeta* ve *Methanosarcina* cinslerinin sorumlu olduğu bilinmektedir. *Methanosaeta* cinsleri çubuksu mikroorganizmalar olup sadece asetik asiti karbon ve enerji kaynağı olarak kullanmaktadır. *Methanosarcina* cinsleri ise yuvarlak şekilli olup asetat, metanol, metilaminler ve bazen hidrojeni kullanarak kümeler halinde çoğalmaktadır. Asetat konsantrasyonunun 60 mg/L'nin üzerinde olması durumunda *Methanosarcina*

cinsleri, altında olması durumunda ise *Methanosaeta* cinsleri asetat kullanımında faaliyet göstermektedir.

Anaerobik çürütmede hidrojen kullanarak çoğalan arkelerin faaliyeti nihai ürün olan metanın oluşması açısından oldukça önemlidir. Bu arkeler sayesinde H_2 konsantrasyonu sürekli düşük seviyelerde tutularak, sistemdeki diğer mikroorganizmaların yaşamları sağlanmaktadır. Biyolojik elektron alıcıları olarak da anılan bu arkeler asetat kullananlara göre fenotipik olarak daha dağınık bir yapı sergilemektedir. *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanosprillum* ve *Methanococcus* cinsleri anaerobik çürütme sürecinde görülen en yaygın arkelerdir (Öztürk, 2007).

2.1.4. Anaerobik Mikroorganizmalar Arasındaki İlişkiler

Anaerobik çürütme alanındaki mevcut bilgiler, üç grup bakterinin birlikte çalışması gerektiğini ortaya koymaktadır. Asetat kullanan metan arkeleri, fermentasyon bakterileri ile ortak çalışarak asetik asit konsantrasyonu ve pH'ı kontrol etmektedir. Asetat kullanan metan arkelerinin çoğalma hızları nispeten yavaş (minimum ikilenme zamanları 2-3 gün, $T=35^{\circ}C$), buna karşılık fermentasyon bakterilerinin çoğalma hızları ise oldukça hızlıdır (minimum ikilenme zamanları 2-3 saat, $T=35^{\circ}C$). Dolayısıyla organik yükün artması durumunda asit üretimi istenen şekilde gerçekleşebildiği halde, metan üretimi aynı hızla gerçekleşmemekte ve reaktörde aşırı uçucu asit birikimi ile karşılaşılabilir.

2.2. Hız Kısıtlayan Kademe Yaklaşımı

Anaerobik çürütme sisteminde bir dizi simbiyotik proses oluşması ve kademelerden birinin diğerlerinden daha yavaş olması nedeniyle en yavaş kademe hız kısıtlayıcı olmaktadır. Anaerobik çürütmede hangi kademenin hız kısıtlayan kademe olduğu substratın yapısına, proses konfigürasyonuna, sıcaklığa ve organik yüke bağlıdır. Asılı haldeki polimerik organik partiküller için hidroliz kademesi, aromatik bileşikler için fermentasyon kademesi, buna karşılık propiyonat için ise sintrofik asetojenesis kademesi hız belirleyen kademe olmaktadır.

2.3. Anaerobik Arıtmada Proses Kinetiği

2.3.1. Hidroliz Kinetiği

Hidroliz prosesinde, biyolojik olarak parçalanabilen karmaşık yapıdaki organik substrat hidrolitik bakteriler tarafından hidroliz edilerek çözünmüş substrata dönüştürülmektedir. Çözünmüş substrat konsantrasyonunun zamanla değişimi (2.1) denklemi ile 1. Mertebe reaksiyon olarak ifade edilmektedir.

$$\frac{dS}{dt} = kS \quad (2.1)$$

S : Çözünmüş substrat konsantrasyonu, g/L

k : Hidroliz hızı sabiti, gün⁻¹

t : Zaman, gün

2.3.2. Asit Üretimi Kinetiği

Asit üretimi prosesinde, çözünmüş substrat asit üreten bakteriler tarafından karbondioksit ve organik asitleri üretmek için metabolize edilmektedir. Daha sonra, uzun zincirli organik asitler asit üreten bakteriler tarafından asetata dönüştürülmektedir. Çözünmüş substrat konsantrasyonunun zamanla değişimi (2.2) denklemi ile ifade edilmektedir (Liu ve diğ., 2007).

$$\frac{dS_a}{dt} = \frac{\mu_h X_h}{Y_{vh}} - \frac{\mu_a X_a}{Y_a} \quad (2.2)$$

X_a : Asit üreten biyokütle, g/L

μ_a : Asit üreten bakterinin özgül çoğalma hızı, gün⁻¹

S_a : Çözünmüş substrat konsantrasyonu, g/L

Y_a : S_a'ın parçalanma sabiti $\left(\frac{g(X_h)}{g(S_a)}\right)$

Y_{vh} : S_a için dönüşüm katsayısı $\left(\frac{g(X_a)}{g(S_a)}\right)$

Asit üreten biyokütlenin zamanla değişimi (2.3) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\frac{dX_a}{dt} = \mu_a X_a - K_{da} X_a \quad (2.3)$$

K_{da} : Asit üreten bakterilerin ölüm hızı, gün⁻¹

pH değişimlerine karşı duyarlı olan asit üreten bakteriler iyonize olmamış asetattan etkilenebilmektedir. Bu nedenle, asit üreten bakterilerin çoğalma hızı inhibisyon katsayısı ile birlikte Monod tipi denkleme uyarlanarak (2.4) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\mu_a = \frac{\mu_{amax}}{1 + \frac{K_{sa}}{s_a} + \frac{A_u}{K_{ia}}} \quad (2.4)$$

μ_{amax} : Asit üreten bakterinin maksimum özgül çoğalma hızı, gün⁻¹

K_{sa} : Asit üreten bakterilerin yarı doygunluk sabiti, g/L

A_u : İyonlaşmamış asetat konsantrasyonu, g/L

K_{ia} : İyonlaşmamış asetatin inhibisyon katsayısı, g/L

2.3.3. Metan Üretimi Kinetiği

Metan üretimi prosesinde, asetiklastik metan arkeleri ve hidrojen kullanan metan arkeleri olmak üzere başlıca iki tür arke metan üretimini gerçekleştirmektedir. Asetiklastik metan arkeleri asetatu, metan ve karbondioksite metabolize etmektedir. Hidrojen kullanan arkeler ise, karbondioksit ve hidrojeni tüketerek metana dönüştürmektedir. İki tür arkenin deneysel ortamda birbirinden ayrılması zor olduğundan dolayı, iki farklı arke türü tek bir adlandırmada metan üreten arke olarak birleştirilmiştir. Asetat konsantrasyonunun zamanla değişimi (2.5) denklemi ile ifade edilmektedir (Liu ve diğ., 2007).

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\mu_a X_a}{Y_{va}} - \frac{\mu_m X_m}{Y_m} \quad (2.5)$$

X_m : Metan üreten biyokütle, g/L

μ_a : Metan üreten arkelerin özgül çoğalma hızı, gün⁻¹

A : Toplam asetat konsantrasyonu, g/L

Y_m : A'nın parçalanma sabiti $\left(\frac{g(X_m)}{g(A)}\right)$

Y_{va} : A'nın dönüşüm katsayısı $\left(\frac{g(X_a)}{g(A)}\right)$

İyonlaşma dengesi (2.6) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$A = A_u + A_c \quad (2.6)$$

A_c : İyonlaşmış asetat konsantrasyonu, g/L

A_u : İyonlaşmamış asetat konsantrasyonu, g/L

İyonize olmuş asetat konsantrasyonu (2.7) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$A_u = \frac{A_c \times H^+}{K_a} \quad (2.7)$$

H^+ : Hidrojen iyonu konsantrasyonu, g/L

K_a : Asetatın çözünürlük katsayısı (1.728×10^{-5})

Metan üreten biyokütlenin zamanla değişimi (2.8) denklemi ile ifade edilmiştir.

$$\frac{dX_m}{dt} = \mu_m X_m - K_{dm} X_m \quad (2.8)$$

K_{dm} : Metan üreten arkelerin ölüm hızı, gün⁻¹

Metan üreten arkeler iyonize olmamış asetattan etkilendikleri gibi, iyonize olmamış amonyaktan da etkilenmektedirler. Bu nedenle, metan üreten arkelerin çoğalma hızları iki farklı inhibitör faktörüyle Monod tipi denkleme uyarlanarak (2.9) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\mu_m = \frac{\mu_{mmax}}{1 + \frac{K_{sm}}{A_u} + \frac{A_u}{K_{ixm}} + \frac{NH_3(u)}{K_{iam}}} \quad (2.9)$$

μ_{mmax} : Metan üreten arkelerin maksimum özgül çoğalma hızı, gün⁻¹

K_{sm} : Metan üreten arkelerin yarı doygunluk sabiti, g/L

K_{ixm} : İyonlaşmamış asetatın inhibisyon katsayısı, g/L

$NH_{3(u)}$: İyonlaşmamış amonyak konsantrasyonu, g/L

K_{iam} : İyonlaşmamış amonyanın inhibisyon katsayısı, g/L

Metan dönüşümünün zamanla değişimi (2.10) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\frac{dCH_4}{dt} = V_{mmax} X_m \left(\frac{A_u}{A_u + K_m} \right) \left(\frac{K_{im}}{K_{im} + A_u} \right) \quad (2.10)$$

V_{mmax} : Günlük azami metan dönüşüm hızı (0°C ve 1 atm'de hacim olarak) gram arke başına, L/g.gün

K_m : Metan üreten arkelerin yarı doygunluk sabiti, g/L

K_{im} : Asetatın metan dönüşümü üzerindeki inhibisyon sabiti, g/L

Metan dönüşümü ile pH arasındaki ilişki (2.11) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\frac{dCH_4}{dt} = V_{max} X_m \left(\frac{Ac^{-1} \times 10^{-pH}}{Ac^{-1} \times 10^{-pH} + K_a K_m} \right) \left(\frac{K_{im} K_a}{K_{im} K_a + Ac^{-1} \times 10^{-pH}} \right) \quad (2.11)$$

3. ORGANİK KATI ATIKLARIN ANAEROBİK ARITIMI

Katı atıklardan kaynaklanan kirlilik ve oluşacak potansiyel risklerin boyutunun her geçen gün artması, doğal kaynakların azalması, ekonomik ve sosyal etkenlerin de katkısıyla, katı atık yönetimi giderek önem kazanmakta ve karmaşık bir hal almaktadır. Günümüzde, Türkiye’de günde yaklaşık 60.000 ton evsel katı atık oluşmaktadır (**Öztürk, 2007**). Evsel katı atıkların tipik madde grupları bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

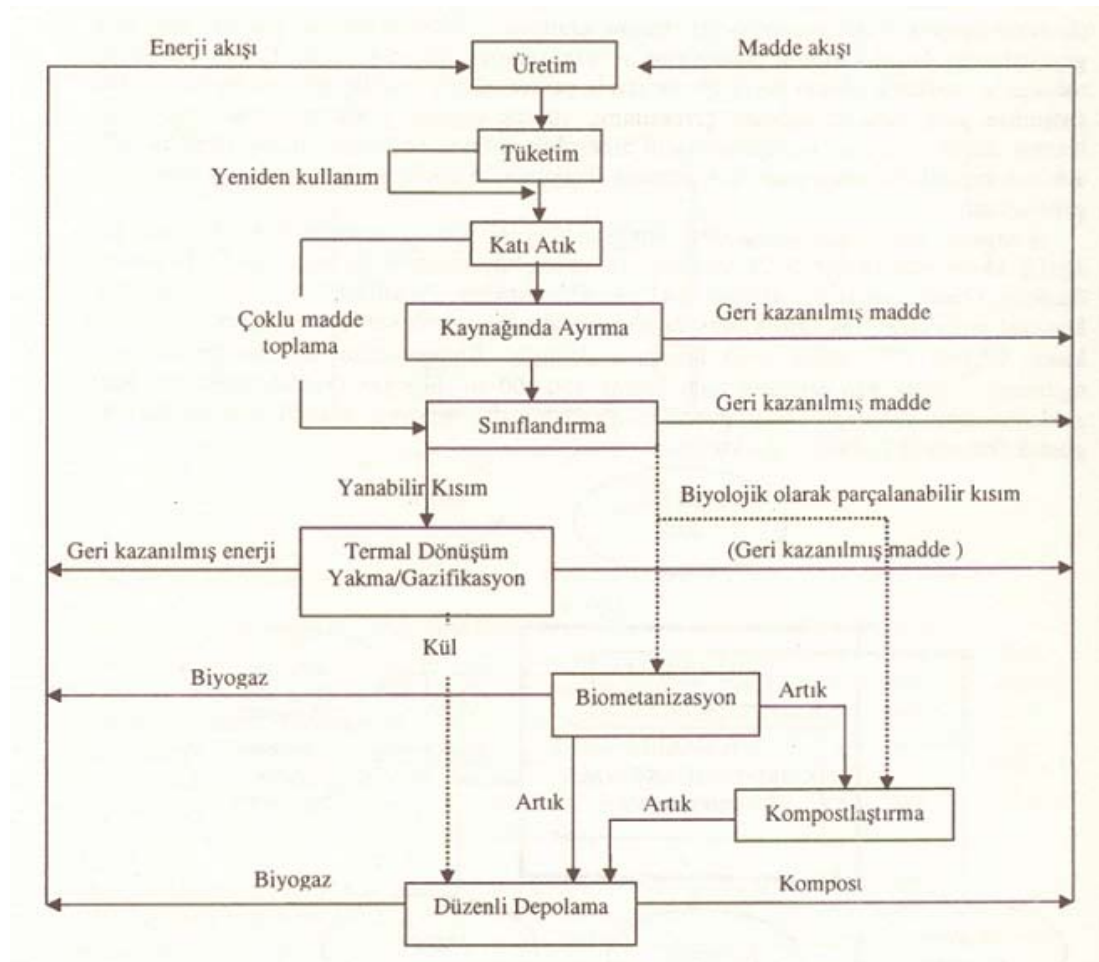
Çizelge 3.1 : Türkiye’de başlıca büyükşehirler için evsel katı atık bileşimi (% , ağırlık) (**Öztürk, 2007**)

Atık Bileşenleri	İstanbul	Bursa	İzmir	Adana
Organik	43	53,1	46	64,4
Geri dönüştürülebilir	33,9	36,4	31	25,2
Kağıt/Karton	7,8	18,4	12	14,8
Plastik	14,2	11,6	12	5,92
Metal	5,8	3	3	1,4
Cam	6,2	3,4	4	3,08
Diğer	23,1	10,5	23	11,4

Oluşan atık miktarı hızla artmasına rağmen, mevcut düzenli depolama alanları ve yakma tesislerinin kapasitesi giderek azalmaktadır. Birçok Avrupa ülkesi için düzenli depolama, alan sıkıntısı ve kontrol edilemeyen gaz emisyonları ile sızıntı suyu sorunu yüzünden kabul edilebilir bir atık yönetim metodu olmaktan çıkmıştır. Bu nedenle, sürdürülebilirlik açısından da büyük öneme sahip kompost ve geri kazanım uygulamaları 1980’lerin sonundan itibaren giderek önem kazanmaktadır (**Öztürk, 2007**).

Katı atığın, bir atık akımı olarak görülmesi yerine birçok ürünün geri kazanılabileceği değerli bir kaynak olarak düşünülmesi, atık oluşumundan nihai bertarafa kadar bütün kademeleri içine alan entegre bir katı atık yönetiminin unsurlarını ve bunların birbirleri ile ilişkilerinin çok iyi bilinmesini zorunlu

kılmaktadır (**Öztürk, 2007**). Entegre bir katı atık yönetim şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



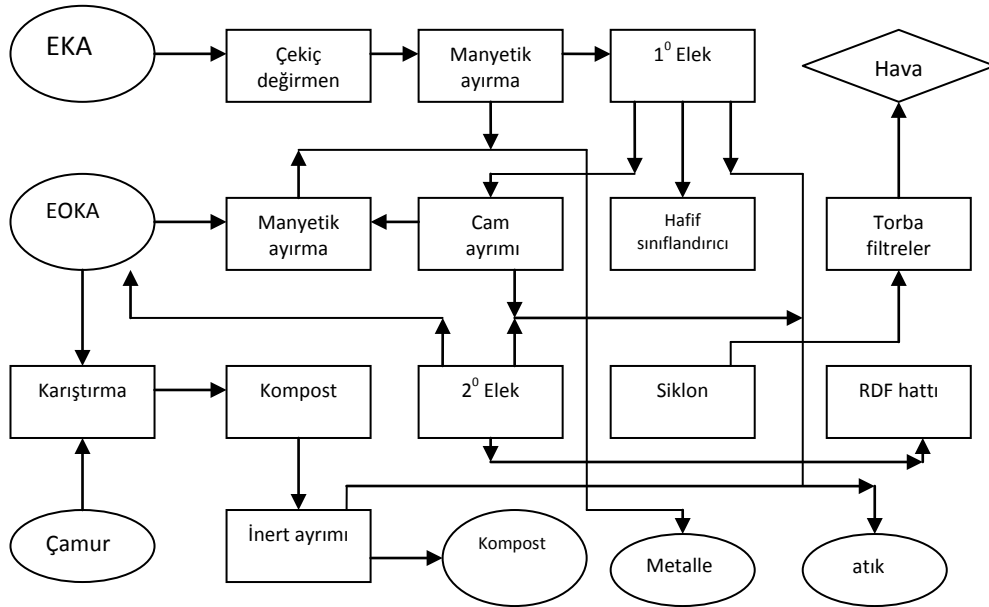
Şekil 3.1 : Entegre atık yönetimi akım diyagramı

3.1. Organik Katı Atık Karakterizasyonu

Organik katı atıkların arıtımında, atıkların toplanma yöntemi ilk arıtma kademesini teşkil etmektedir. Halkın organik katı atık bileşenlerini kaynağında ayırma eğilimi, organik katı atık karakterini belirleyen en önemli faktördür. Kaynağında ayırma, organik katı atık kalitesi açısından çok büyük öneme sahiptir. Organik katı atıklar, karışık toplanmış atıktan mekanik ayırma, ayrı toplama ve kaynağında ayırma olmak üzere üç farklı şekilde toplanmaktadır. Bu toplama yöntemlerinden her biri ile toplanan atığın bileşimi ve biyolojik olarak arıtılabilirliği farklı olmaktadır (**Mata-Alvarez, 2003**).

3.1.1. Mekanik Ayırma ile Elde Edilen Organik Katı Atıklar (MA-OKA)

Karışık toplanmış katı atıktan özel olarak tasarlanmış mekanik ayırma tesislerinde işlenerek elde edilen organik katı atıklardır. Mekanik ayırma, biyolojik arıtma sistemlerinde kullanılmak üzere ihtiyaç duyulan organik atıkların elde edilmesinde kullanılan ilk ayırma yöntemidir. Mekanik ayırma, iyi kalitede organik atık ve yüksek kalorifik değerde ham madde “RDF (Refuse Derived Fuel)” elde etmek amacıyla son 20 yıllık süreçte bir geri kazanım metodu olarak da yaygın olarak kullanılmıştır. Mekanik ayırma ile elde edilen organik katı atığın kalitesi, mekanik ayırma tesisinde uygulanan ayırma yöntemlerine ve gelen atığın karakterine bağlı olarak değişmektedir (Mata-Alvarez, 2003). Kompleks bir mekanik ayırma tesisinin akım şeması Şekil 3.2’de, bu tür bir tesiste ayrılan organik katı atığın özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Kompleks bir mekanik ayırma tesisinin akım şeması

Çizelge 3.2 : Kompleks bir mekanik ayırma tesisinde mekanik ayırma ile ayrılan organik katı atığın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Parametre	Ortalama	Maksimum	Minimum	Numune sayısı	Standart Sapma
TKM (g/kg)	763	952	513,1	210	81,3
TUKM (%TKM)	43,9	57,4	29,1	210	5,4
TKOİ (%TKM)	59,6	90,4	23,3	41	17,4
TOK (%TKM)	19,3	34,4	7,5	187	5,3
İK (%TKM)	1,3	2,7	0,3	187	0,5
TKN (%TKM)	2,2	3,4	1,2	59	0,5
P (%TKM)	0,11	0,22	0,05	59	0,03

Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi mekanik ayırma ile elde edilen organik katı atık, yüksek TKM içeriği ile karakterize edilmektedir. Bunun nedeni, karışık toplanmış katı atığın içerisinde bulunan ve bu ayırma yöntemi ile tamamen giderilemeyen inert kısımdır. TUKM açısından bakıldığında ise, ortalama TUKM değerinin TKM’nin %50’sinin altında olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, TKM içerisinde bulunan yüksek inert kısımdır.

3.1.2. Ayırık Toplama ile Elde Edilen Organik Katı Atıklar (AT-OKA)

Bu tür atıklar market, kantin, lokanta, yemekhane, pazar yeri ve hallerden ayrı olarak toplanarak elde edilen organik katı atıklardır. Farklı kaynaklardan ayrı olarak toplanan organik katı atıkların kuru madde oranı içerisinde bulunan yemek atıkları, sebze, meyve ve bahçe atıklarının miktarına göre değişiklik göstermektedir. Ayırık toplama ile elde edilen organik katı atık, yüksek ayırma derecesi ile karakterize edilmektedir (Mata-Alvarez, 2003).

Cecchi ve arkadaşları (1997) tarafından İtalya’nın Milano şehrine bağlı 24 belediyenin katılımıyla gerçekleştirilen bir çalışmada ayırık toplanan organik katı atığın karakteristiğini yansıtan veriler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : İtalya’nın Milano şehrine bağlı 24 belediyede ayırık toplanan organik katı atığın ayrılma derecesi (Cecchi ve diğ., 1997)

Belediyelerin büyüklüğü (Nüfus, kişi)			Kompostlaştırılmayan atık (%)			Kompostlaştırılabilen atık (%)		
Ortalama	Min.	Maks.	Ortalama	Min.	Maks.	Ortalama	Min.	Maks.
24304	3808	119187	2,2	0,3	5,0	97,8	93,0	99,7

Çizelge 3.3’te görüldüğü gibi ayırık toplama ile elde edilen organik katı atığın kompostlaştırılmayan kısmı, toplanan tüm atığın maksimum %5’i kadar olmaktadır. Ayırık toplama ile elde edilen organik katı atıkların karakteristiği Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Ayırık toplama ile elde edilen organik katı atığın karakteristiği (Mata-Alvarez, 2003)

Referans	TKM (%)	TUKM (%TKM)	N (%TKM)	P (%TKM)
De Baere, 2000	31	70	-	-
Kubler ve diğ., 1999	29	63	2,2-3,4	0,4-0,6
CİTEC, 2000	17-25	70-90	-	-

Kantinlerden ayırık toplama ile elde edilen organik katı atıkların karakteristiği Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Kantinlerden ayrık toplama ile elde edilen organik katı atığın karakteristiği (Cecchi ve diğ., 1997)

Parametre	Aralık	Tipik değer
TKM (%)	21,4-27,4	25,6
TUKM (%TKM)	91,3-99,7	96,5
TKOİ (gO ₂ /gTKM)	1,2-1,3	1,2
TKN (%TKM)	2,6-3,7	3,2
Toplam-P (%TKM)	0,13-0,28	0,2

Çizelge 3.5’de görüldüğü gibi kantinlerden ayrık toplama ile elde edilen organik katı atıklar, atığın kuru madde içeriğini arttıran ekmek ve katı gıda atıkları bakımından oldukça zengin olduğundan TKM içerikleri %21,4-27,4 aralığında değişmektedir.

Hal ve marketlerden ayrık toplama ile elde edilen organik katı atıkların karakteristiği Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Hal ve marketlerden ayrık toplama ile elde edilen organik katı atıkların karakteristiği (Pavan ve diğ., 2000)

Parametre	Ortalama	Maks.	Min.	Numune adedi	Standart sapma
TKM (g/kg)	81,8	132,7	54,4	96	15,7
TUKM (%TKM)	81,9	92,0	78,2	96	11,3
TKOİ (gO ₂ /gTKM)	1,0	1,5	0,7	32	18,1
TKN (%TKM)	2,1	3,3	1,4	23	0,5
Toplam-P (%TKM)	2,8	3,3	1,3	23	0,5

Çizelge 3.6’da görüldüğü gibi hal ve marketlerden ayrık toplama ile elde edilen organik katı atıklar, atığın kuru madde içeriğini azaltan su içeriği bakımından oldukça zengin karakterde olduğundan TKM içerikleri %5,4-13,2 aralığında değişmektedir.

Ayrık toplama ile elde edilen organik katı atığın kuru madde oranı, farklı ayrı toplama alanlarından gelen atıkların içerisinde bulunan mutfak, sebze ve meyve atıklarının oranlarına bağlı olarak değişmektedir.

3.1.3. Kaynağında Ayırma (İkili Toplama) ile Elde Edilen Organik Katı Atıklar (KA-OKA)

Katı atıkların oluştukları yerlerden biri olan evlerde, ayrı kaplarda toplanması ile elde edilen organik katı atıklardır. Evlerde kaynağında ayırma ile toplanan organik katı atıkların kuru madde oranı içerisinde bulunan yemek atıkları, ekmek, sebze ve meyve atıklarının miktarına göre değişiklik göstermektedir. Kaynağında ayırma yöntemi ile toplanan organik katı atıkların karakteristiği Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Farklı çalışmalarda kaynağında ayırma ile elde edilen organik katı atığın karakteristiği (Mata-Alvarez, 2003)

Parametre	Cecchi ve diğ., 1989	Sans ve diğ., 1995
TKM (g/kg)	200	163,9
TUKM (%TKM)	88	90
TKOİ (gO ₂ /gTKM)	1,1	1,1
TKN (%TKM)	3,2	2,1
TP (%TKM)	0,4	2,6

Çizelge 3.7’de görüldüğü gibi kaynağında ayırma ile elde edilen organik katı atıkların TKM içeriği %16-20 arasında değişmektedir. TUKM değeri de TKM’nin %88-90’ı kadar olmaktadır.

3.2. Katı Atık Toplama Yönteminin Biyogaz Üretim Potansiyeline Etkisi

Katı atık toplama stratejisi anaerobik arıtmada üretilebilecek biyogaz potansiyelini ve atığa uygulanacak nihai bertaraf yöntemini belirleyen en önemli unsurdur. Kaynağında ayrılmış ve ayrık toplanmış organik katı atıklar için biyogaz üretim verimi ve elde edilebilecek kompost kalitesi genellikle yüksek olmaktadır. Diğer taraftan, inert madde içeriği daha yüksek olan mekanik olarak ayrılmış organik katı atık için biyogaz üretim verimi daha düşük olup, düzenli depolamaya veya yakma işlemine, kaynağında ayrılmış ve ayrık toplanmış organik katı atığa oranla daha fazla kalıntı madde gönderilmesi söz konusudur. Farklı toplama yöntemleriyle elde edilen organik katı atıkların teorik metan potansiyelleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Üretilen biyogazın metan içeriği %55 olarak kabul edilmektedir (Öztürk, 2007).

Çizelge 3.8 : Üç farklı organik katı atık türünden elde edilebilecek maksimum metan ve biyogaz verimi (Öztürk, 2007)

Substrat	Maks. metan potansiyeli B ₀ (m ³ CH ₄ /kgTUKM)	Maks. biyogaz potansiyeli G ₀ (m ³ /kgTUKM)
MA-OKA	0,16-0,37	0,29-0,66
AT-OKA	0,45-0,49	0,81-0,89
KA-OKA	0,37-0,40	0,67-0,72

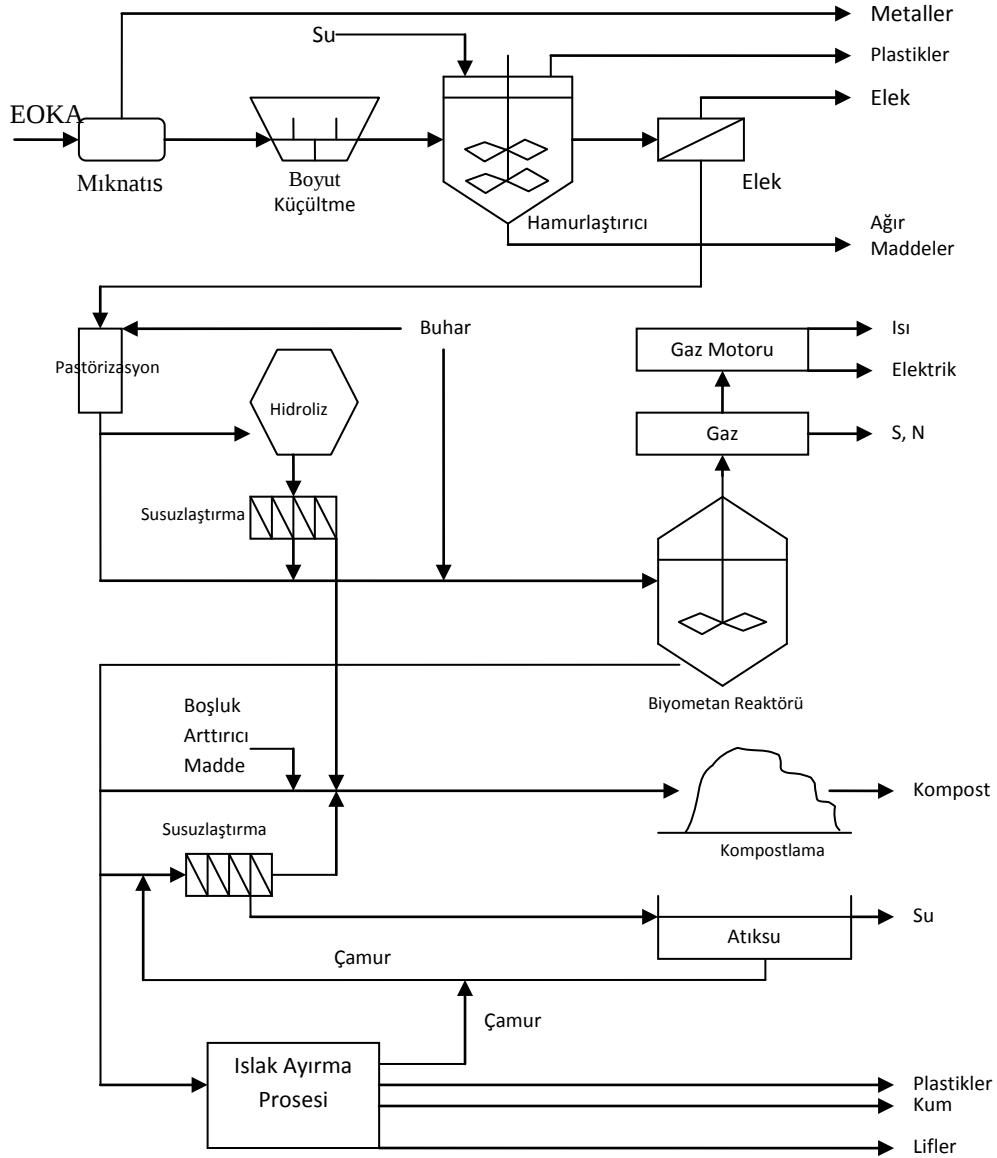
MA-OKA: Mekanik ayırma ile elde edilen organik katı atıklar

AT-OKA: Ayrık toplama ile elde edilen organik katı atıklar

KA-OKA: Kaynağında ayırma ile elde edilen organik katı atıklar

3.3. Organik Katı Atıkların Anaerobik Çürütülmesinde Kullanılan Reaktör Tipleri

Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtıldığı tesisler, birçok prosesin birleşiminden oluşmaktadır (Şekil 3.3). Organik atıktan elde edilebilecek ürünlerin miktar ve kalitesini, genellikle atığın bileşimi ve yapısı belirlese de, anaerobik reaktörün tasarımı da ürünlerin miktar ve kalitesini etkileyen önemli faktörlerden



Şekil 3.3 : Organik katı atıkların anaerobik arıtımında kullanılan başlıca prosesler (Öztürk, 2007)

biridir. Anaerobik reaktör tasarımı, organik atığa uygulanması gereken ön ve son arıtma ihtiyaçlarını da belirlemektedir. Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtıldıkları reaktörler uygulanan kademe sayısına (tek ve çift kademeli sistemler),

sıcaklıklarına (mezofilik ve termofilik sistemler) göre sınıflandırılmaktadırlar (Öztürk, 2007).

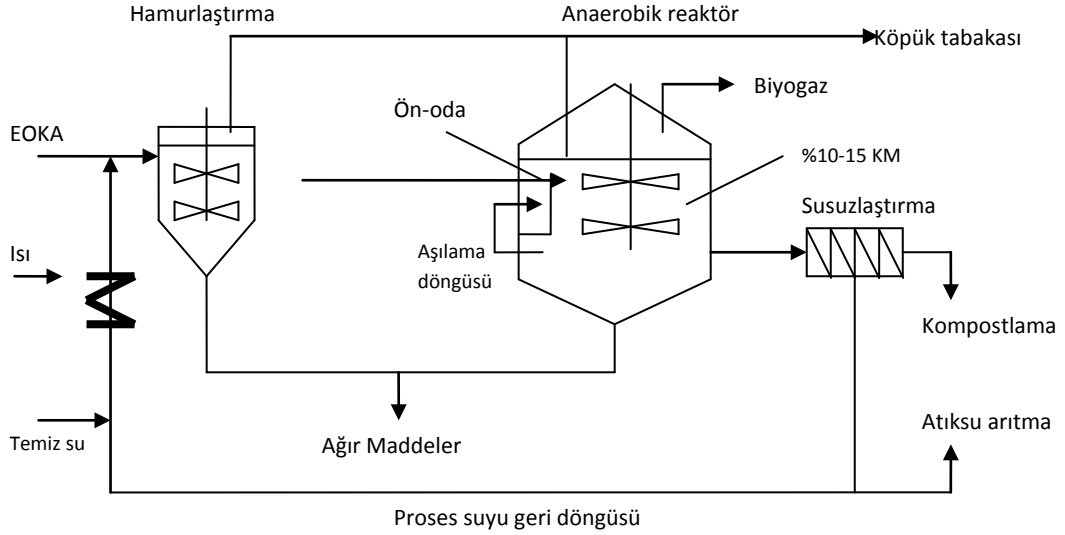
3.3.1. Tek Kademeli Sistemler

Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtılması, ardı ardına gerçekleşen ve birbirlerini tamamlayan biyokimyasal reaksiyonlar ile sağlanmaktadır. Biyokimyasal reaksiyonlar kabaca, birinci adımda (hidroliz, çözülme ve asitleştirme) ve ikinci adımda (asetat, hidrojen ve karbondioksit'in metana dönüştürülmesi) gerçekleşenler olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Tek kademeli sistemlerde, tüm biyokimyasal reaksiyonlar eş zamanlı olarak tek bir reaktörün içerisinde gerçekleşmektedirler (Mata-Alvarez, 2003).

Organik katı atıkların ve biyo atıkların anaerobik olarak arıtılması amacıyla Avrupa'da kurulmuş bulunan tesislerin yaklaşık olarak %90'ı tek kademeli sistemlerden oluşmaktadır (De Baere, 1999). Tek kademeli sistemler işletme koşullarına göre "Islak tek kademeli sistemler" ve "Kuru tek kademeli sistemler" olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

3.3.1.1. Tek Kademeli Islak Sistemler

Tek kademeli ıslak sistemler, atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurların anaerobik stabilizasyonunda yıllardır kullanılan arıtma teknolojisine olan benzerliğinden dolayı cazip gelmektedir. Organik katı atıkların kıvamı, tam karışımli bir reaktörde arıtılabilmeleri için yoğunlaştırılmış çamur kıvamına getirilmelidir. Bu amaçla, organik katı atıklar tesiste oluşan proses suyunun tekrar geri devrettirilmesi yada temiz su ilavesi ile katı madde içeriği %15'in altında olacak şekilde seyreltilmektedir. Bu alandaki ilk gerçek ölçekli tesis, Finlandiya'nın Waasa şehrinde 1989 yılında kurulmuştur (Mata-Alvarez, 2003). Tek kademeli ıslak sistemler için tipik bir dizayn örneği Şekil 3.4'te verilmiştir.



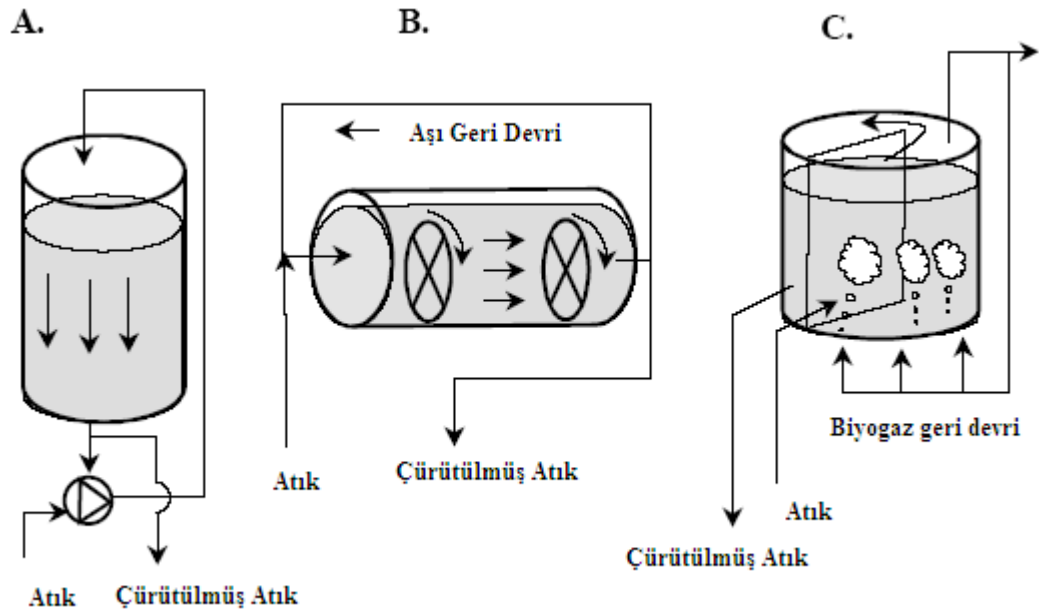
Şekil 3.4 : Tek kademeli ıslak sistemler için tipik bir tasarım (Waasa Prosesi)

Tek kademeli ıslak sistemlerde hem atık akımının gerekli kıvamda olması hem de içerisinde kaba bileşenlerin olmaması için karmaşık bir ön arıtmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Atık akımında bulunan kirleticilerin hem hedeflenen oranda uzaklaştırılması hem de biyolojik olarak parçalanabilen kısmın olabildiğince fazla miktarda akımın içerisinde tutulması amacıyla elek, hamurlaştırıcı, tambur sıkıştırıcı, kırıcı ve yüzdürücü ünitelerinden oluşan karmaşık bir ön arıtma tesisine ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu ön arıtma adımları kaçınılmaz olarak %10-15'lik uçucu katı madde kaybına neden olmaktadır (Farneti ve diğ., 1999).

3.3.1.2. Tek Kademeli Kuru Sistemler

Tek kademeli kuru sistemlerde organik katı atıklar çürütülürken reaktör içerisindeki katı madde içeriği %20-40 arasında değişmektedir. Dolayısıyla, %50'den fazla katı madde içeriği olan substratlar dışında seyreltme suyuna ihtiyaç duyulmamaktadır. Atığın yüksek katı madde içeriği gibi fiziksel karakteristiklerinin farklı olması nedeniyle işleme şekli, uygulanacak ön arıtma ve karıştırma adımları tek kademeli ıslak sistemlerde uygulanan şekilden farklı olmaktadır (Mata-Alvarez, 2003).

Organik katı atıkların taşınması ve işlenmesinde taşıyıcı bantlar, burgulu pompalar ve özellikle yüksek viskoziteli akımları iletmek amacıyla tasarlanmış güçlü pompalar kullanılmaktadır. Organik katı atıkların reaktöre beslenmesinden önce uygulanması gereken tek ön arıtma döner elekler ve öğütücülerle 40 mm'den büyük safsızlıkların giderilmesidir (De Baere ve Boelens, 1999).



Şekil 3.5 : Tek kademeli kuru sistemlerde kullanılan farklı çürütücü tasarımları (A: Dranco prosesi, B: Kompogas ve BRV prosesi, C: Valorga prosesi) (Mata-Alvarez, 2003)

Tek kademeli kuru sistemlerde, organik katı atıklar reaktör içerisinde yüksek viskozitelerinden dolayı Şekil 3.5'te gösterildiği gibi piston akım şeklinde hareket etmektedirler.

Dranco prosesinde, reaktörün alt kısmından çıkışa ulaşan çürütülmüş organik katı atık ile taze organik katı atık karıştırılarak (6 birim çürütülmüş atık için 1 birim taze atık) reaktörün üst kısmına pompa yardımıyla geri devrettirilmekte ve bu şekilde reaktörün karışması sağlanmaktadır. Bu proses, katı madde içeriği %20-50 aralığında değişen organik katı atıkların anaerobik olarak çürütülmesinde kullanılmaktadır. Kompogas prosesi de, Dranco prosesine benzer bir şekilde ancak düşey eksen yerine yatay eksende yerleştirilmiş bir silindirik reaktörde gerçekleşmektedir. Yatay eksende piston akım şeklindeki hareket reaktör içerisine yerleştirilmiş olan ve yavaşça dönebilen karıştırıcılarla sağlanmaktadır. Organik katı atık karışımının homojen dağılımı, karışım içerisinde bulunabilecek ağır partiküllerin askıda kalmaları da reaktör içerisine yerleştirilmiş olan karıştırıcılarla sağlanmaktadır. Bu proses, katı madde içeriği %23 civarında olan organik katı atıkların anaerobik olarak çürütülmesinde kullanılmaktadır. Daha düşük katı madde içeriklerinde organik katı atık akımı içerisinde bulunan kum ve cam gibi ağır partiküller batarak reaktör içerisinde madde birikimine neden olmaktadır. Daha yüksek katı madde içeriklerinde

ise reaktör içerisinde yatay akımı zorlayıcı direnç kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Valorga prosesinde, piston akım dairesel olarak silindirik bir reaktör içerisinde yatay düzlemde gerçekleşir. Karıştırma işlemi ise, reaktörün tabanında kurulu bulunan enjeksiyon ağından yüksek basınçtaki biyogazın 15'er dakikalık aralıklarla enjekte edilmesiyle sağlanmaktadır. Reaktör içerisindeki katı madde oranını istenilen düzeyde tutmak için proses suyu geri devrettirilerek giriş akımı seyreltilmektedir. Bu proses katı madde içeriği %30 civarında olan organik katı atıkların anaerobik çürütülmesinde kullanılmaktadır (Mata-Alvarez, 2003).

3.3.2. Çift Kademeli Sistemler

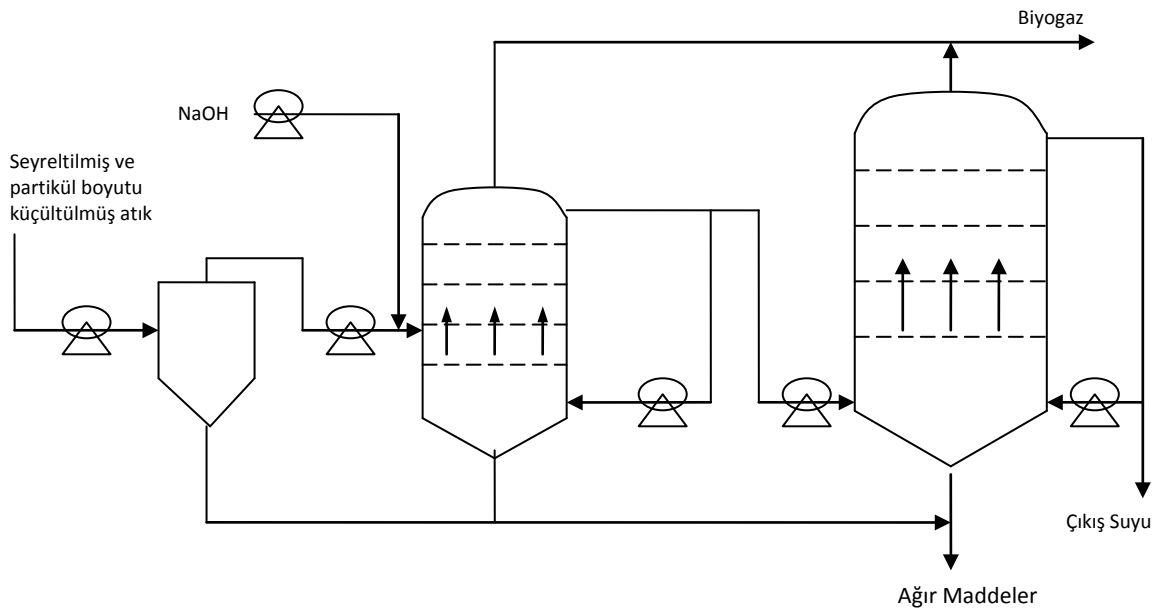
Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtılması, ardı ardına gerçekleşen ve birbirlerini tamamlayan biyokimyasal reaksiyonlar ile sağlanmaktadır. İki ve daha fazla kademeli sistemlerde organik katı atıktan biyogaz elde edilene kadar gerçekleşen tüm biyokimyasal reaksiyonlar aynı optimum çevresel şartlar altında gerçekleşmek zorunda değildir. Bu reaksiyonların, ayrı olarak farklı kademelerde yada reaktörlerde optimize edilmesi ile toplam reaksiyon hızı ve biyogaz dönüşüm oranı arttırılabilmektedir (Ghosh ve diğ., 1999). Tipik olarak çift kademeli sistemlerin kullanımında, selülozun hidrolizinin hız sınırlayıcı adım olduğu birinci kademede çözülme ve asitleştirme reaksiyonları, yavaş mikrobiyal büyümenin hız kısıtlayıcı adım olduğu ikinci kademede ise asetojenesis ve metanojenesis reaksiyonları gerçekleşmektedir (Liu ve Ghosh, 1997). Çift kademeli sistemler işletme şekline göre “Çift kademeli geri devirsiz sistemler” ve “çift kademeli geri devirli sistemler” olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

3.3.2.1. Çift Kademeli Geri Devirsiz Sistemler

Özellikle laboratuvar araştırmalarında kullanılan en basit iki kademeli sistem tasarımı tam karışımli iki reaktörün birbiri ardına seri bağlanması ile oluşturulmaktadır (Pavan ve diğ., 1999). Her bir reaktörün teknik özelliği daha önceki kısımlarda bahsedilen “Tek kademeli ıslak sistemler” dekine benzetilmektedir. Birinci reaktöre beslenecek olan atıklar öğütülmekte ve içeriğindeki katı madde miktarı %10 olacak şekilde proses suyu ilavesi ile seyreltilmektedir. Bir başka tasarım şekli ise, “ıslak-ıslak” ya da “kuru-kuru” kombinasyonunda çalışan piston akımlı iki reaktörün birbiri ardına seri bağlanması ile oluşturulmaktadır (Mata-Alvarez, 2003). Schwarding-Uhde prosesinde, kaynağında ayrılmış organik katı atık

öğütülmekte ve içeriğindeki katı madde miktarı %12 olacak şekilde seyreltilmektedir. Bu şekilde hazırlanan atık, yukarı akışlı ve içerisinde ardı ardına yerleştirilmiş delikli plakaların olduğu bir reaktöre beslenmektedir (

Şekil 3.6). Pompalarla zaman ayarlı olarak gerçekleştirilen atımlarla hem yukarı yönlü üniform akış sağlanmakta hem de sıvı kolonunda hızlı yükselişler oluşturularak yerel bölgelerinde kısa sürede karışımı sağlanmaktadır (**Trösch ve Niemann, 1999**). Oluşturulan atımlarla biyogazda yukarıya doğru itilmektedir. Bu tasarımda, reaktör içerisinde hareketli parçalar olmadan yeterli karışım ve piston akım şartları sağlanabilmektedir.



Şekil 3.6 : İki kademeli geri devirsiz “ıslak-ıslak” Schwarting-Uhde prosesinin akım şeması (Mata-Alvarez, 2003)

BRV prosesinde, kaynağında ayrılmış organik katı atık içeriğindeki katı madde miktarı %34 olacak şekilde ayarlanmaktadır. Atık aerobik şartlarda işletilen yukarı yönlü bir reaktörden geçirilerek kısmi hidrolize uğratılmakta ve atığın yaklaşık olarak %2’si burada kaybedilmektedir. Hidroliz adımının mikro-aerobik şartlarda yürütülmesinin nedeni solunum ile kaybedilen KOİ miktarının, yüksek miktarda çözülme ile telafi edilen çözünmüş KOİ miktarından daha fazla olmasına rağmen, ilerleyen süreçte anaerobik şartlar altında yürütülmüş bir hidroliz adımından çok daha fazla çözünmüş KOİ elde edilecek olmasıdır (**Wellinger ve diğ., 1999**). İlk kademede atıklar aerobik şartlarda çalıştırılan hidroliz reaktöründe 2 gün bekletilmekte, ardından ikinci kademede yatay akışlı ve piston akımlı şekilde

çalıştırılan metan üreten reaktöre %22'lik katı madde içeriğinde alınarak 55 °C sıcaklıkta 25 gün boyunca bekletilmektedir (**Mata-Alvarez, 2003**).

3.3.2.2. Çift Kademeli Geri Devirli Sistemler

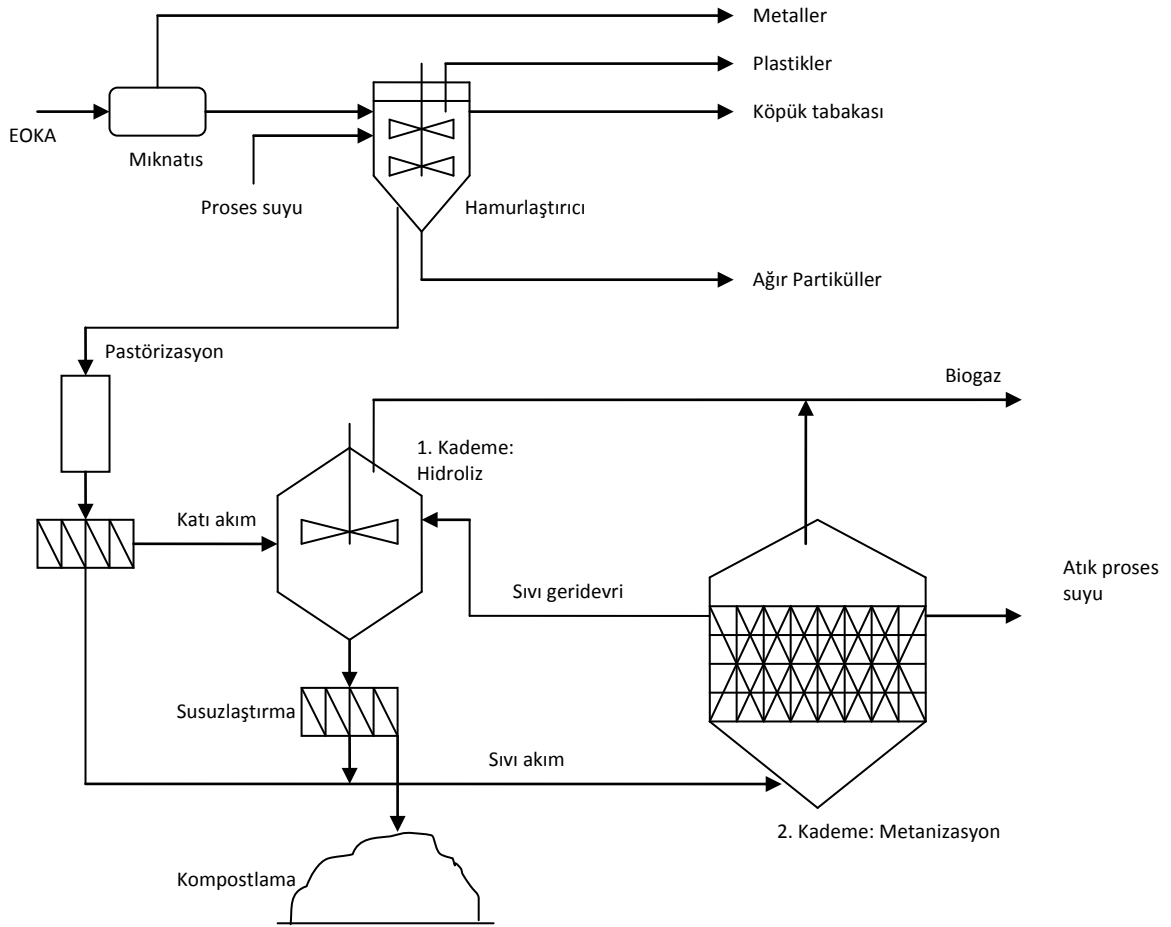
İkinci kademede reaksiyon hızlarının artması, şok yüklemelere ya da inhibe edici bileşiklere karşı sistemin direnç kazanabilmesi için yavaş büyüyen metan üreten mikroorganizmaların yüksek hücre yoğunluğuna ulaştırılması amaçlanmıştır. Bu hedefe ulaşmak için iki basit yöntem vardır (**Mata-Alvarez, 2003**).

Birinci yöntem ikinci kademede çamur yaşının hidrolik bekletme süresinden daha büyük olmasını sağlamak suretiyle, metanojenlerin konsantrasyonunun arttırılması ile birlikte metan üreten reaktörün katı madde içeriğinin de arttırılmasıdır. Bu işlem, kullanılacak temas reaktörene içsel bir çöktürme entegre edilerek ya da reaktörün çıkış akımının membran filtreden geçirilmesiyle tutulacak konsantre çamurun reaktöre geri devrettirilmesi ile sağlanabilmektedir. Sisteme geri devrettirilecek çamurun aktif biyokütleyi temsil edebilmesi için bileşiminin %5-15'inden daha fazlasının inorganik katı maddelerden oluşmaması gerekmektedir. Bu nedenle bu tasarım şekli sadece hızlı hidroliz olabilen mutfak ve market atıkları için efektif olabilmektedir (**Madokoro ve diğ, 1999**).

İkinci yöntem ikinci kademede biyofilm oluşumuna imkan verecek destek maddesi kullanılarak, metanojenlerin konsantrasyonunun arttırılması ile birlikte yüksek çamur yoğunluklarına ve çamur yaşlarına ulaşılabilir. Bu tasarımın en önemli kısıdı, ikinci kademeye beslenmesi gereken atığın askıda katı madde içeriğinin az olması gerekliliğidir. Bu nedenle, birinci kademede uygulanan hidroliz adımından sonra atıkta bulunan fazla askıda katı maddeler uzaklaştırılmaktadır (**Mata-Alvarez, 2003**).

BTA prosesinde, pastörizasyon işleminden çıkan katı madde içeriği %10 olan organik katı atık susuzlaştırılmakta ve süzüntü suyu direk metanojen reaktörüne gönderilmektedir (Şekil 3.7). Susuzlaştırma prosesinden gelen çamur keki proses suyu ilavesi ile tam karışımli bir reaktörde ve mezofilik şartlar altında 2-3 günlük hidrolik bekletme süresi boyunca hidroliz edilmektedir. Hidroliz reaktörünün akımı tekrar susuzlaştırılmakta ve süzüntü suyu metan üreten reaktöre beslenmektedir. Metan üreten reaktör biyofilm oluşumuna imkan verecek destek maddesi kullanılarak

tasarlandığından dolayı sadece süzöntü suyu ile beslenmektedir (Kübler ve Wild, 1992).



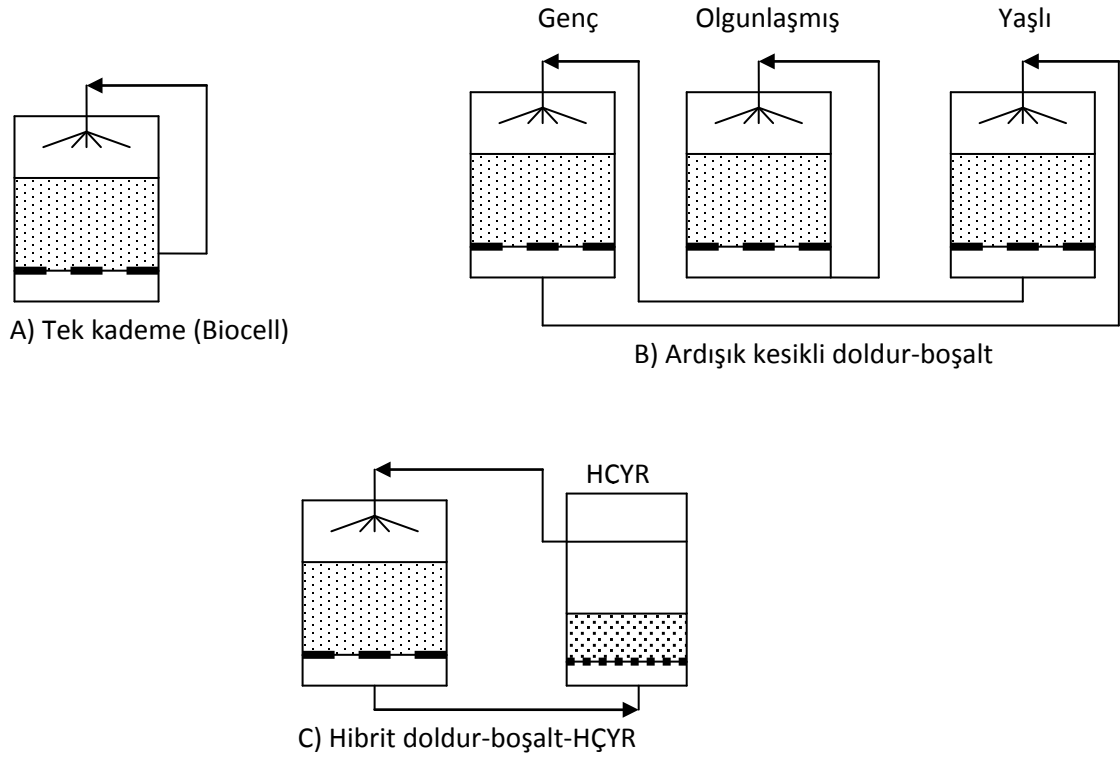
Şekil 3.7 : İki kademeli “ıslak-ıslak” şeklinde tasarlanmış olan BTA prosesinin akım şeması

Biopercolat prosesinde, hidroliz kademesi “kuru” ve mikro-aerobik şartlar altında kendi eksenini etrafında yavaşça dönen üzeri delikli büyük tamburlar içerisinde gerçekleştirilmekte ve çözölmeyi arttırmak için tamburların deliklerinden sızan süzöntü suyu atık üzerine sürekli olarak devrettirilmektedir (Edelmann ve diğ., 1999). Oluşan süzöntü suyu destek malzemesiyle doldurulmuş piston akımlı anaerobik filtreye beslenmektedir. İlk kademenin havalı, ikinci kademenin ise biyofilm büyüme şeklinde tasarlanmış olması nedeniyle sistem toplam 7 gün gibi düşük bekletme sürelerinde çalışabilmektedir (Garcia ve Schalk, 1999).

3.3.3. Kesikli Sistemler (Doldur-Boşalt)

Kesikli sistemlerde çürütücüler aşı ilaveli ya da ilavesiz olarak katı madde içeriği %30-40 olan taze organik katı atıkla bir kez doldurulmakta ve tüm çürütme

adımlarının ardı ardına “kuru” şartlarda gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Kesikli sistemler, katı atık düzenli depolama alanlarına benzer şekilde çalışmalarına rağmen iki temel nedenden dolayı 50-100 kat daha fazla biyogaz üretebilme potansiyeline sahiptirler. Bunlardan ilki, süzüntü suyu sürekli olarak reaktörün üzerine devrettirilerek aşının, besi maddelerinin ve asitlerin yayılmasıyla birlikte organik katı atıkta çözüme arttırılmakta ve kısmi karışımlarda sağlanmaktadır. İkincisi ise, kesikli sistemler katı atık düzenli depolama alanlarına göre daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılmaktadır. Kesikli sistemlerde, asitleştirme ve metanizasyon safhalarının yerleşimleri kendine özel olan tanınmış üç farklı tasarım (Şekil 3.8) mevcuttur (Mata-Alvarez, 2003).



Şekil 3.8 : Farklı kesikli sistemlerde uygulanan farklı süzüntü suyu geri devri tasarımları

Biocell tek kademe kesikli sisteminde, süzüntü suyu üretildiği reaktörün üzerine geri devrettirilmektedir. Hollanda’nın Lelystad şehrinde kurulmuş gerçek ölçekli bir tesiste yıllık 35000 ton kaynağında ayrılmış organik katı atık bu yöntemle arıtılmaktadır (ten Brummeler, 1999).

Ardışık kesikli sistemde, yeni doldurulmuş genç reaktörün yüksek miktarda organik asitler içeren süzüntü suyu metan üreten safhanın sürdüğü yaşlı reaktörün üzerine

geri devrettirilmektedir. Yaşlı reaktörün organik asitlerden yoksun ve pH'ı tamponlayan bikarbonatlarla zengin olan süzöntü suyu ise genç reaktörün üzerine devrettirilmektedir. Bu şekildeki bir uygulama ile hem genç ve yaşlı reaktör arasında çapraz aşılama yapılmakta hem de taze atıkların aşı ile karışması sağlanmaktadır. Olgunlaşan reaktörde ise kendi süzöntü suyu kendi üzerine geri devrettirilmektedir **(Mata-Alvarez, 2003)**.

Hibrit kesikli sistemde, metan üreten safhanın gerçekleştiği olgunlaşmış reaktörün yerini UASB reaktörü almaktadır.

Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtılmasında kullanılan proseslerin karşılaştırılması Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 : Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtılmasında kullanılan proseslerin karşılaştırılması (Öztürk, 2007)

Reaktör	Kriter	Avantajlar	Dezavantajlar
Tek Kademeli Islak Tip	Teknik	• Klasik çamur çürütme prosesine benzer (%8-15 KM)	• Kısa devreler • Yüzen ve çöken fazlar • Mekanik ekipmanda aşınma • Komple ön arıtma ihtiyacı
	Biyolojik	• İnhibitörler eklenen temiz su ile seyreltilirler	• Reaktör muhtevası tam karışımli olduğundan şok yüklere karşı hassasiyet • Atılan inert ve plastikler nedeniyle uçucu madde kaybı • Düşük organik yükleme ($\approx 3-5 \text{ kg UKM/m}^3 \cdot \text{gün}$)
	Ekonomik ve Çevresel	• Atığı iletmede kullanılan ekipmanlar ucuzdur	• Fazla su tüketimi ($\approx 1 \text{ m}^3$ musluk suyu/ton katı atık) • Susuzlaştırma ekipmanı gerekmektedir • Oluşan atıksuyun arıtılması gerekmektedir • Büyük reaktör hacimleri • Komplike ön arıtma ihtiyacı • Büyük hacimleri ısıtmak için gereken yüksek enerji ihtiyacı
Tek Kademeli Kuru Tip	Teknik	• Reaktörün içerisinde hareketli parça yoktur • İnert ve plastiklerin ayrılmasına gerek yoktur • Kısa devre oluşmaz	• Islak atıklar ($\text{KM} < \%20$) tek başlarına arılamazlar
	Biyolojik	• Ön-arıtmada UKM kaybı daha azdır • Yüksek organik yükleme hızı ($\approx 10-15 \text{ kg UKM/m}^3 \cdot \text{gün}$) • İnhibitörler reaktör içerisine daha az yayılırlar	• İnhibitörleri temiz suyla seyreltme imkanı yoktur
	Ekonomik ve Çevresel	• Daha ucuz ön-arıtma • Daha küçük reaktörler • Tam hijyenizasyon • Çok az su kullanımı • Daha az ısıtma ihtiyacı	• Daha dayanıklı ve daha pahalı atık iletme malzemeleri

Çizelge 3.9 : Organik katı atıkların anaerobik olarak arıtılmasında kullanılan proseslerin karşılaştırılması (devamı)

İki Kademeli	Teknik	• Değişik tasarımların yapılabilmesine uygunluk	• Karmaşık proses • İşletme zorlukları
	Biyolojik	• Selüloz içeriği az olan kolay ayrışan (mutfak atıkları) atıklar için çok uygundur • C/N<20 olan atıkların arıtımı için en uygun tasarım • Kolay hidrolize olabilen substratlar için kararlı proses verimi • Organik yüklemdeki değişimlerden daha az etkilenir • Çamur yaşı düşük sistemlerde organik yükleme $\approx 6-8 \text{ kg UKM/m}^3.\text{gün}$ • Çamur yaşı yüksek sistemlerde organik yükleme $\approx 10-15 \text{ kg UKM/m}^3.\text{gün}$	• Katı kısım metan reaktörüne gönderilmediğinde düşük metan üretimi
	Ekonomik ve Çevresel	• Son üründe (kompost) daha az ağır metal içeriği (katı kısım metan reaktörüne beslenmediğinde)	• Daha yüksek ilk yatırım ve işletme maliyeti
Doldur-Boşalt	Teknik	• Basit tasarım • Düşük teknoloji • Safsızlıklardan etkilenmez	• Tıkanma problemleri • Boşluk arttırıcı madde gereksinimi • Reaktörler boşaltılırken patlama riski
	Biyolojik	• Çok sayıda reaktör kullanıldığından oldukça güvenilir bir prosestir	• Kanallanmalar nedeniyle düşük biyogaz verimi • Düşük organik yükleme $\approx 3-5 \text{ kg UKM/m}^3.\text{gün}$
	Ekonomik ve Çevresel	• Düşük ilk yatırım maliyeti, gelişmekte olan ülkeler için uygun • Düşük su tüketimi	• Geniş alan ihtiyacı

4. MATERYAL ve METOD

Yemekhane atıklarının anaerobik arıtımı çalışması üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci kısımda pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyon, ikinci kısımda pH kontrollü çürütme, üçüncü kısımda da pH kontrollü hidroliz ve fermentasyon gerçekleştirilmiştir. Birinci kısımdaki hidroliz ve fermentasyon sürecinde, çalışma pH'a müdahale edilmeden yürütülmüştür. İkinci kısımdaki çürütme sürecinde, pH'a müdahale edilerek çalışma pH=7,0-7,5 aralığında yürütülmüştür. Üçüncü kısımdaki hidroliz ve fermentasyon sürecinde, pH'a müdahale edilerek çalışma pH=5,0-5,5 aralığında yürütülmüştür. Çalışmanın tüm kısımları 37°C'lik mezofilik sıcaklıkta şartlarda gerçekleştirilmiştir.

4.1. Aşı Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan anaerobik aşı çamurları, Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projelerini Destekleme Programı (1007 Programı) kapsamında bulunan 105G024 numaralı Tübitak projesi olan “Evsel Atıksular ve Organik Katı Atıkların Birlikte Arıtımı Yoluyla Yenilenebilir Enerji (Biyometan) Geri Kazanım Teknolojilerinin Araştırılması Projesi” kapsamında kurulmuş bulunan Biyometan Pilot Tesisi'nden sağlanmıştır. Aşı çamurları, Biyometan Pilot Tesisi'nin İTÜ öğrenci yemekhanesinden alınan yemek, sebze ve meyve atıkları ile beslendiği Ekim 2007 - Şubat 2008 döneminde aylık olarak fermentör ve çürütücü ünitelerinden alınmıştır.

Çalışmanın birinci kısmı olan pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyon ile çalışmanın üçüncü kısmı olan pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda kullanılan aşı çamurlarının karakterizasyonu Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmı olan pH kontrollü çürütmede kullanılan aşı çamurlarının karakterizasyonu da Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : pH kontrollü ve pH kontrolsüz şartlarda yürütülen hidroliz ve fermentasyon çalışmalarında kullanılan aşı çamurlarının karakterizasyonu

Aşı		AKM (g/L)	UAKM (g/L)	UAKM/AKM	T.KOİ (g/L)	Ç.KOİ (g/L)	TKN (g/L)	TP (g/L)	pH	Alkalinite (gCaCO ₃ /L)
Tarih	Alındığı Yer									
27.09.2007	Çürütücü	2,55	1,06	0,42	9,86	0,36	0,67	0,10	8,17	2,56
07.11.2007	Fermentör	0,69	0,61	0,88	25,18	15,55	0,32	0,08	4,32	-
12.12.2007	Fermentör	0,65	0,61	0,94	32,76	25,83	1,14	0,38	3,80	-
07.01.2008	Fermentör	3,07	2,94	0,96	54,80	20,85	1,28	0,18	3,42	-
08.02.2008	Fermentör	7,51	7,39	0,98	177,64	46,52	2,34	0,09	4,46	-
20.02.2008	Fermentör	5,56	5,43	0,98	121,14	41,30	2,44	0,17	3,77	-

Çizelge 4.2 : pH kontrollü çürütme çalışmasında kullanılan aşı çamurlarının karakterizasyonu

Aşı		AKM (g/L)	UAKM (g/L)	UAKM/AKM	T.KOİ (g/L)	Ç.KOİ (g/L)	TKN (g/L)	TP (g/L)	pH	Alkalinite (gCaCO ₃ /L)
Tarih	Alındığı Yer									
27.09.2007	Çürütücü	2,55	1,06	0,42	9,86	0,36	0,67	0,10	8,17	2,56
07.11.2007	Çürütücü	3,75	1,64	0,44	15,04	0,40	1,18	0,37	8,08	3,07
12.12.2007	Çürütücü	0,93	0,53	0,57	8,31	0,52	0,97	0,18	7,88	3,83
07.01.2008	Çürütücü	0,75	0,54	0,72	8,29	0,50	1,17	0,13	8,06	3,47
08.02.2008	Çürütücü	0,71	0,61	0,86	15,14	0,57	1,53	0,18	8,28	6,60

4.2. Atık Karakterizasyonu

Hidroliz ve fermentasyon çalışmalarında substrat olarak kullanılan organik atık, İTÜ Ayazağa Kampüsü öğrenci yemekhanesinden alınan yemek, sebze ve meyve atıkları karışımından sağlanmıştır. pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda kullanılan substratın karakterizasyonu Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda substrat karakterizasyonu

Substrat		TKM (%)	TUKM (%)	TUKM/TKM	T.KOİ (g/L)	Ç.KOİ (g/L)
Tarihi	Türü					
12.06.2008	Yemekhane atığı	26,10	25,05	0,96	235,27	66,58

pH kontrollü çürütme kısmında substrat olarak, pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyon kısmında elde edilen ürünler kullanılmıştır. pH kontrollü çürütmede kullanılan substratın karakterizasyonu Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : pH kontrollü çürütmede substrat karakterizasyonu

Substrat		TKM (%)	TUKM (%)	TUKM/TKM	T.KOİ (g/L)	Ç.KOİ (g/L)
Tarihi	Kaynağı					
27.09.2007	Çürütücü	2,01	1,49	0,74	27,20	7,42
07.11.2007	Fermentör	1,91	1,63	0,85	26,89	8,94
12.12.2007	Fermentör	1,86	1,61	0,86	21,90	9,30
07.01.2008	Fermentör	3,97	3,63	0,92	51,62	21,03
08.02.2008	Fermentör	3,44	3,05	0,89	44,59	19,06
20.02.2008	Fermentör	4,10	3,78	0,92	48,84	24,02

pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda kullanılan substratın karakterizasyonu Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda substrat karakterizasyonu

Substrat		TKM (%)	TUKM (%)	TUKM/TKM	T.KOİ (g/L)	Ç.KOİ (g/L)
Tarihi	Türü					
30.10.2008	Yemekhane atığı	58,26	55,0	0,94	285,77	77,98

4.3. Deneysel Düzenek

Deneysel düzenek, kullanılabilir iç hacmi 1,175 L olan serum şişeleri ile oluşturulmuştur. Altı farklı aşı çamuru ile her bir aşı çamuru için 3 tekrar ve 2 farklı katı madde oranı için de 1'er şahit olmak üzere toplam 20 adet serum şişesi kullanılmıştır.

Çalışmanın birinci kısmı olan pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda besleme, pilot tesisteki işletme koşullarına paralel olarak %2,5 ve %5'lik katı maddeli, aşı çamuru ve yemekhane atığı sırasıyla 20:80 karışım oranı olacak şekilde yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmı olan pH kontrollü çürütmede besleme, pilot tesisteki işletme koşullarına paralel olarak %2 ve %4'lük katı maddeli, aşı çamuru ve çalışmanın birinci kısmında elde edilen ürün sırasıyla 40:60 karışım oranı olacak şekilde yapılmıştır.

Çalışmanın üçüncü kısmı olan pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda besleme, pilot tesisteki işletme koşullarına paralel olarak %1,5 ve %2,5'lik katı maddeli, aşı çamuru ve yemekhane atığı sırasıyla 20:80 karışım oranı olacak şekilde yapılmıştır.

Anaerobik ortam çözeltisi hazırlanırken, Çizelge 4.6'da verilen çözelti (I)'den 15ml/1L, çözelti (II)'den 15ml/1L, tuz ve vitamin çözeltisinden 12,5ml/L, Asit Stok Çözeltisi (I)'den 1ml/1L, Alkali Stok Çözeltisi (II)'den 1ml/1L ve resazurin'den 1ml/L olacak şekilde çözelti miktarları distile suya ilave edilerek başlanmıştır. Hazırlanan karışım içerisindeki oksijenin uzaklaştırılması için ocakta kaynatılmıştır. Kaynatma işlemi, kaynama başladıktan 5-10 saniye sonra sonlandırılmıştır. Kaynatma sonrası çözelti, içerisinde azot geçirilerek soğutulmuş ve serum şişelerine doldurulmuştur. Katı madde oranlarını sağlayacak miktarlarda aşı çamuru ve substrat içerisinde anaerobik ortam çözeltisi bulunan şişelere ilave edilmiştir. Çizelge 4.6'da verilen bikarbonat çözeltisinden her serum şişesine 25 ml ilave edilerek karışımlar tamamlanmıştır. Serum şişelerindeki karışımların pH'ları ölçülerek, pH değerleri hedeflenen çalışma aralığının dışında olanlar asit/baz ilavesi ile istenilen pH aralığına getirilmiştir. Son olarak serum şişeleri sızdırmazlığı sağlayacak bütül kauçuk tapalar ve alüminyum kapaklar ile kapatılarak basınçlandırma işlemine hazırlanmıştır. Kapatılan serum şişeleri içerisinde 1,7 atm N₂-CO₂ gaz karışımı olacak şekilde doldur-boşalt ekipmanı (GR Instruments B.V., Hollanda) ile içerisindeki oksijen tamamen uzaklaştırılacak şekilde basınçlandırılmıştır. Basınçlandırma işleminden sonra her serum şişesinde anaerobik şartların tamamen sağlanabilmesi için Çizelge 4.6'da verilen indirgeyici ajandan (Na₂S.9H₂O) 2'şer ml şırınga yardımıyla ilave edilmiştir.

Çizelge 4.6 : Anaerobik ortam çözeltisinin bileşimi

Bileşikler		Konsantrasyon, mg/L	Bileşikler	Konsantrasyon, mg/L
Besi Elementleri	Çözelti (I)		Asit Stok Çözeltisi (I)	
	KH ₂ PO ₄	408	HCl	1,800
	Çözelti (II)		H ₃ BO ₃	0,062
	Na ₂ HPO ₄ .2H ₂ O	534	MnCl ₂	0,061
	Tuz Çözeltisi		FeCl ₂	0,944
	NH ₄ Cl	360	CoCl ₂	0,065
	NaCl	360	NiCl ₂	0,013
	MgCl ₂ .6H ₂ O	120	ZnCl ₂	0,068
	CaCl ₂ .2H ₂ O	132	CuCl ₂	0,050
	Bikarbonat Çözeltisi		AlCl ₃	0,050
	NaHCO ₃	4000	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0,050
Vitaminler			Alkali Stok Çözeltisi (II)	
Biotin		0,02	NaOH	0,400
Nicotinamid		0,20	Na ₂ SeO ₃	0,017
p-Aminobenzoic asit		0,10	Na ₂ WO ₄	0,029
Thiamin (Vitamin B1)		0,20	Na ₂ MoO ₄	0,021
Panthotenic asit		0,10	İndirgeyici Ajan	
Pyridoxamine		0,50	Na ₂ S.9H ₂ O	240
Cyanocobalamine (Vitamin B12)		0,10	Anaerobik Kontrol Ajanı	
Riboflavine		0,10	Resazurin	5



Şekil 4.1 : Hidroliz ve fermentasyon kademelerinin gerçekleştirildiği deneysel düzenden bir görünüm



Şekil 4.2 : Çürütme kademesinin gerçekleştirildiği deneysel düzenden bir görünüm

Tüm bu işlemlerden sonra serum şişeleri 37°C'lik sıcak odaya konmuştur. Serum şişeleri sıcak odada 1-1,5 saat ön ısıtmaya tabi tutularak sıcak ortama alıştırılmıştır. Bu süre sonunda serum şişelerinin basınçları basınçölçer aracılığıyla ölçülmüştür. Başlangıç basınçları olarak ön ısıtma işlemi sonundaki basınç değerleri kabul edilerek inkübasyona başlanmıştır.

4.4. Reaktörlerin İzlenmesi

pH kontrolsüz ve pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda reaktörler (serum şişeleri) 37°C'lik sabit sıcaklık odasında 1 hafta boyunca izlenmiştir. pH kontrollü çürütmede ise reaktörler 37°C'lik sabit sıcaklık odasında 39 gün boyunca izlenmiştir. Çalışma boyunca uygulanan numune alma sıklıkları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Numune alma işleminden önce tüm şişelerin basınçları, 5 mbar hassaslıktaki basınçölçer (Lutron PM-9107, Manometer, 7000mBar×5mBar) ile ölçülmüştür. Basınç ölçme işleminin ardından serum şişelerinden geniş uçlu şırınga yardımıyla 10'ar ml numune alınmıştır. Alınan numuneler 15'er ml'lik falkon tüplerine aktarılmış ve -20°C'lik derin dondurucuda analiz için saklanmıştır.

Çizelge 4.7 : Reaktörlerden numune alma sıklıkları

Numune alma sıklığı	I. Kısım	II. Kısım	III. Kısım
3 Numune/gün	0-4. gün	-	0-2. gün
2 Numune/gün	4-6. gün	-	2-6. gün
1 Numune/gün	6-7. gün	1-7. gün	6-7. gün
1 Numune/2 gün	-	7-13. gün	-
1 Numune/3 gün	-	13-19. gün	-

Çalışmanın birinci kısmı olan pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyon, ikinci kısmı olan pH kontrollü çürütme ile çalışmanın üçüncü kısmı olan pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda alınan numunelerin tümünde pH ölçümü ile Ç.KOİ ve UYA analizleri yapılmıştır. T.KOİ, TKM ve TUKM analizleri sadece başlangıç ve bitiş numunelerinde yapılmıştır.

pH kontrolsüz ve pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda 1 haftalık izleme süresi sonunda serum şişelerinde oluşan gazın bileşimi analiz edilmiştir. pH kontrollü çürütme kısmında ise 21. gün sonunda ve izlemenin sonlandırıldığı 39. gün sonunda serum şişelerinde oluşan gazın bileşimi analiz edilmiştir.

4.5. Analitik Yöntemler

Ölçümü ve analizi yapılan parametreler Toplam ve çözünmüş KOİ, toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM), uçucu yağ asitleri (UYA), pH, oluşan gaz miktarı ve bileşimidir. T.KOİ, TKM, TUKM ile pH su ve atıksu analizleri için kullanılan Standart Yöntemlere göre analiz edilmiştir (**Standart Methods for the Examination of Water & Wastewater, 2005**). Çözünmüş KOİ ve UYA analizi için alınan numuneler 15000 rpm’de 15 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonrası elde edilen üst faz Millipore PVDF filtre (0,45 µm) ile süzülerek çözünmüş KOİ analizleri yapılmıştır. Millipore PVDF filtre (0,45 µm) ile süzülen üst faz, Millipore PVDF filtre (0,22 µm) ile de süzülerek UYA analizinde kullanılmıştır. UYA analizi yapılacak olan numuneler 2 mL’lik küçük şişelerde (GC için Agilent vial), 1,8 mL numune üzerine eklenen 0,2 mL 10 N H₃PO₄ ile birlikte hazırlanmış ve +4°C soğutucuda saklanmıştır.

UYA konsantrasyonları alev iyonlaşma dedektörü (FID) ve Innowax (silikon merkezli polimerler, polisiloksanlar, polietilen glikoller ve katı adsorbanlar) ile doldurulmuş kapiler kolon donanımlı gaz kromatograf (Agilent 6890N, ABD) ile saptanmıştır. Gaz kromatografıta enjeksiyon giriş ve dedektör sıcaklıkları sırasıyla 230°C ve 250°C’dir. Fırın sıcaklığı ilk 5 dakikada 100°C, sonraki 5 dakikada 160°C’ye yükselmekte olup 3 dakika sonrada 230°C’de sabitlenmektedir. Taşıyıcı gaz olarak 25 ml/dakika debide helyum kullanılmaktadır. İlaveten, 40 ml/dakika debide hidrojen gazı da kullanılmaktadır. Oluşan biyogazın metan, karbondioksit ve hidrojen bileşimi ise ısıl iletkenlik dedektörü (TCD) donanımlı gaz kromatograf (Perichrom PR2100, Fransa) ile saptanmıştır. Taşıyıcı gaz olarak ise helyum ve azot kullanılmaktadır. pH ölçümleri, Thermo Orion 4 Star pH metre ile ölçülmüştür.

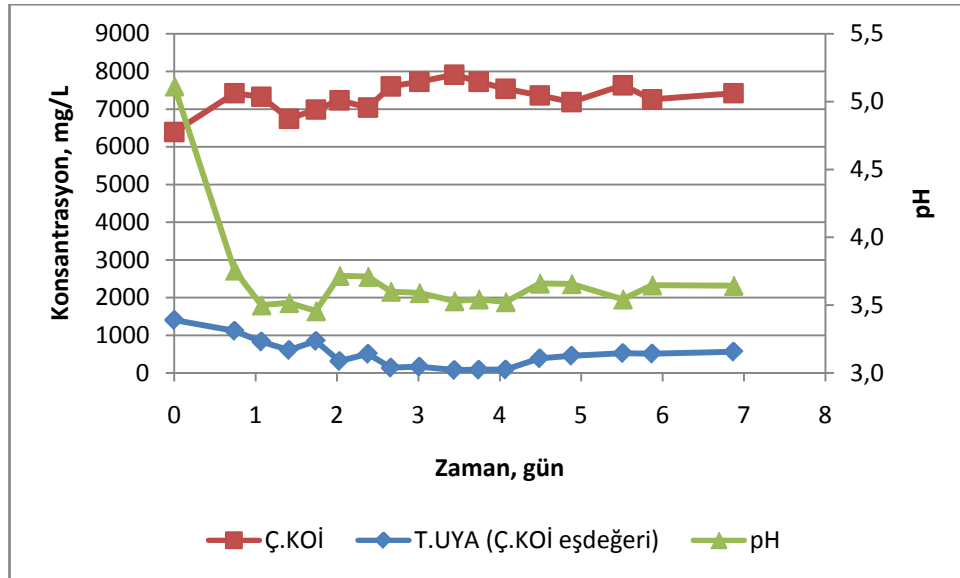
5. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Hidroliz ve Fermentasyon

Hidroliz ve Fermentasyon kademesi, pH kontrolsüz olarak %2,5 ve %5'lik katı madde konsantrasyonlarında, pH kontrollü olarak da %1,5 ve %2,5'lik katı madde konsantrasyonlarında olmak üzere iki farklı şekilde yürütülmüştür.

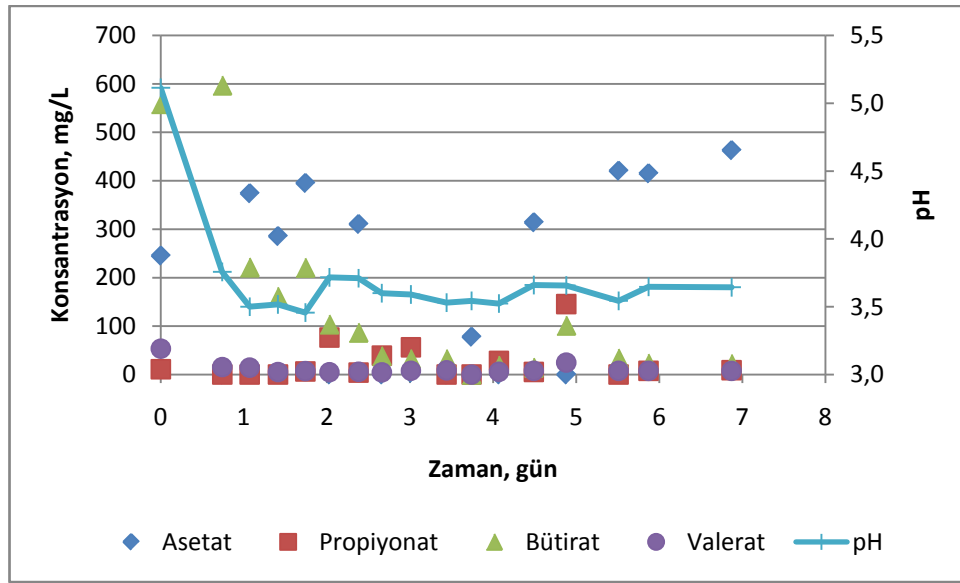
5.1.1. pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon

27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılansarak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimleri Şekil 5.1'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.2'de verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $3,69 \pm 0,38$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH'a rağmen, Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren gözlenen %24'lük artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOİ üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,22 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,07 \pm 0,06$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde



Şekil 5.1 : 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılansarak reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi

baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %92'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıca oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOI içindeki UYA oranının ortalama $0,07 \pm 0,06$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (Traverso ve diğ., 2000).

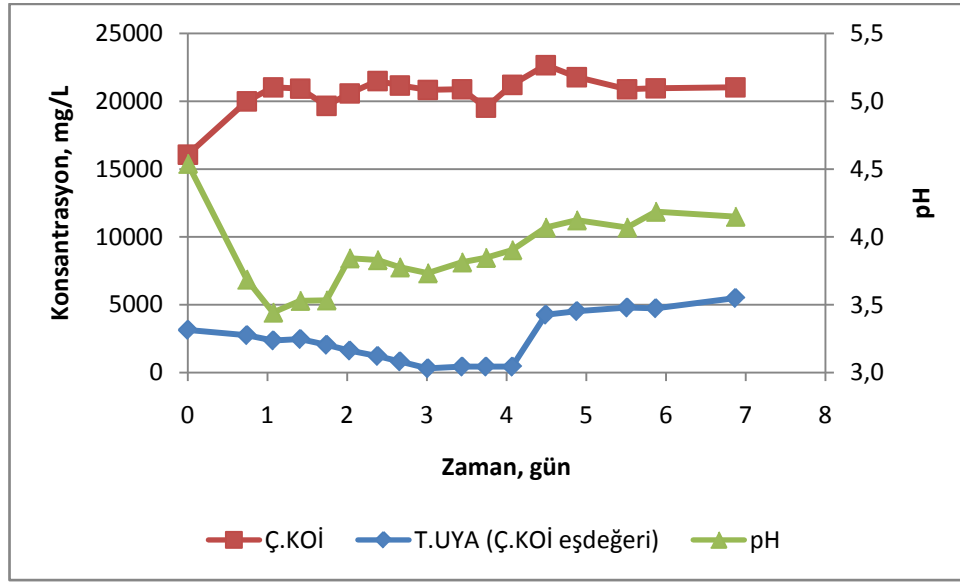


Şekil 5.2 : 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因 reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

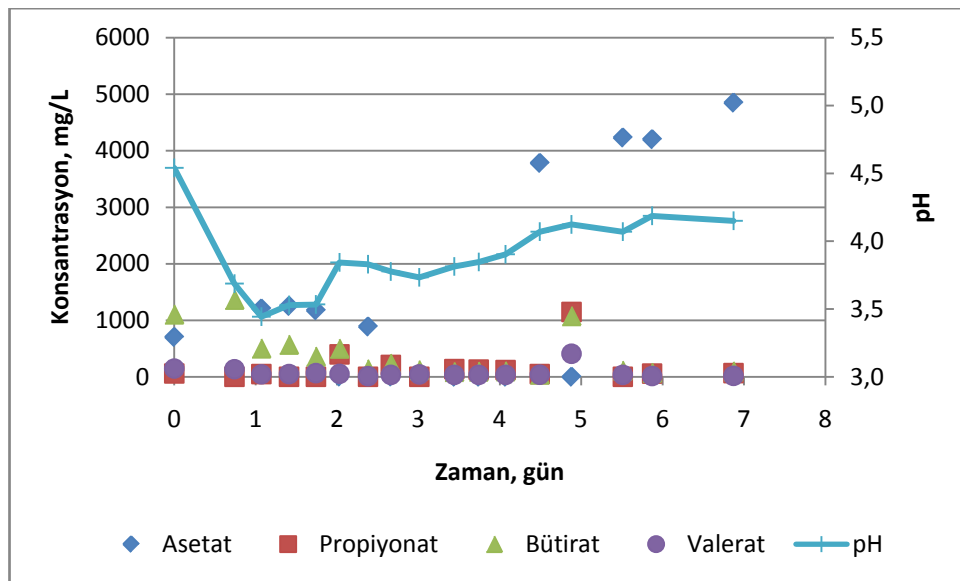
07.11.2007 ve 12.12.2007 tarihlerinde alınan fermentör çamurları ile aşıl原因 olarak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Ek A (Şekil A.1 ve Şekil A.3), UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Ek A (Şekil A.2 ve Şekil A.4)'da verilmiştir.

07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因 olarak %5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil 5.3'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.4'te verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $3,89 \pm 0,28$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH'a rağmen, Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %41'lik artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta

Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,20 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,12 \pm 0,08$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %96'lık oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOİ'de başlangıca oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOİ içindeki UYA oranının



Şekil 5.3 : 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi

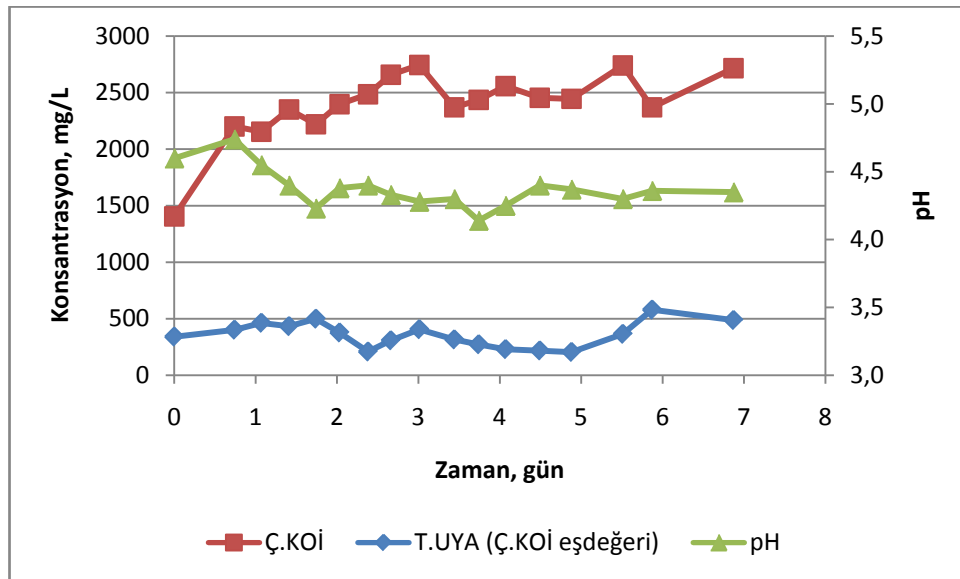


Şekil 5.4 : 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

ortalama $0,12 \pm 0,08$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (Traverso ve diğ., 2000).

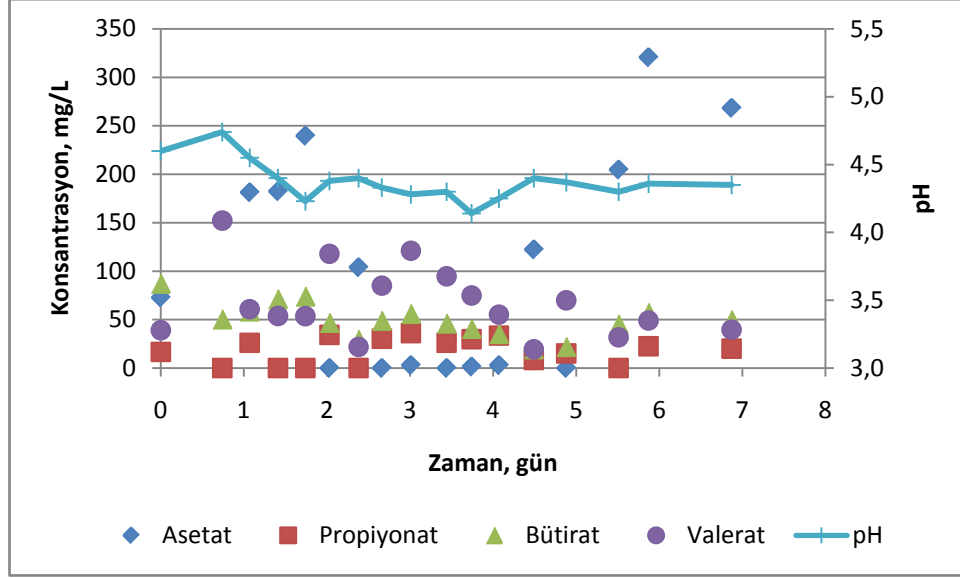
08.02.2008 ve 20.02.2008 tarihlerinde alınan fermentör çamurları ile aşılanarak %5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Ek A (Şekil A.5 ve Şekil A.7), UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Ek A (Şekil A.6 ve Şekil A.8)'da verilmiştir.

07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılanan şahit reaktöründe %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil 5.5'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.6'da verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $4,38 \pm 0,14$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH'a rağmen, Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren gözlenen %95'lik artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOİ üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,24 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,15 \pm 0,06$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %71'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını



Şekil 5.5 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılanan şahit (%2,5) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi

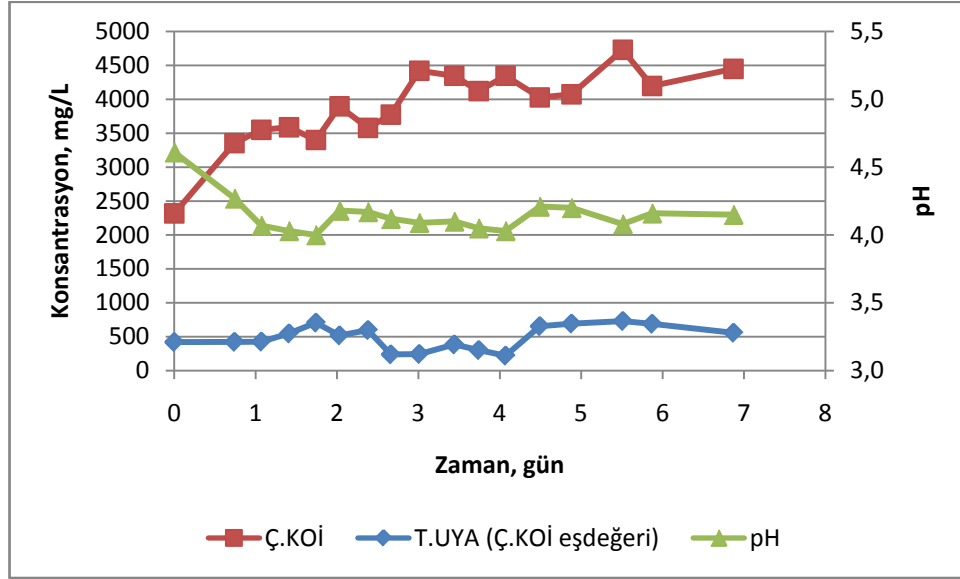
göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOİ’de başlangıca oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOİ içindeki UYA oranının ortalama $0,15 \pm 0,06$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (Traverso ve diğ., 2000).



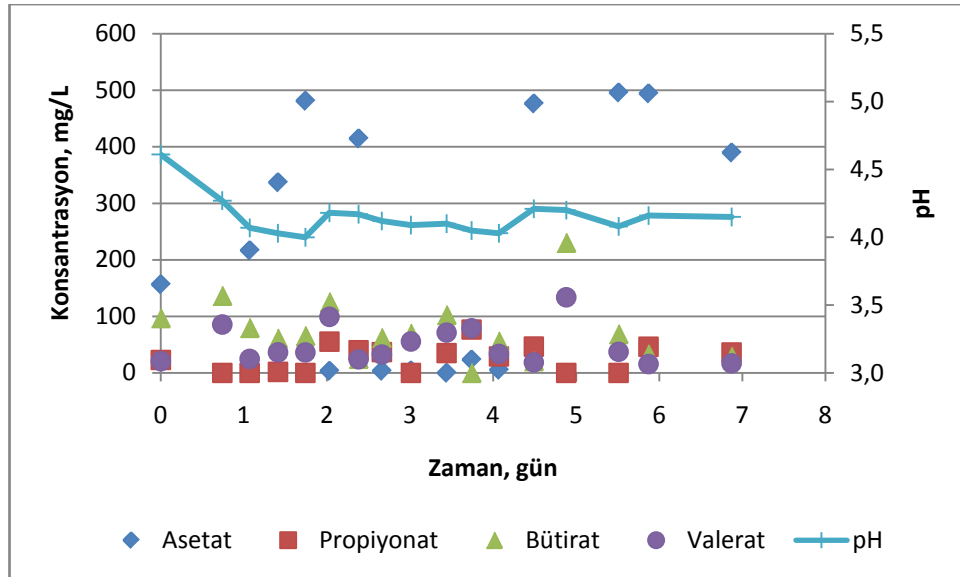
Şekil 5.6 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%2,5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit reaktöründe %5’lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH’ın zamanla değişimleri Şekil 5.7’de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.8’de verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $4,15 \pm 0,14$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH’a rağmen, Ç.KOİ’de başlangıçtan itibaren gözlenen %104’lük artış, partiküler KOİ’nin hidrolizi ile Ç.KOİ üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,18 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,13 \pm 0,05$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, asetat ve bütirat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %83’lük oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOİ’de başlangıca oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOİ içindeki

UYA oranının ortalama $0,13 \pm 0,05$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (Traverso ve diğ., 2000).



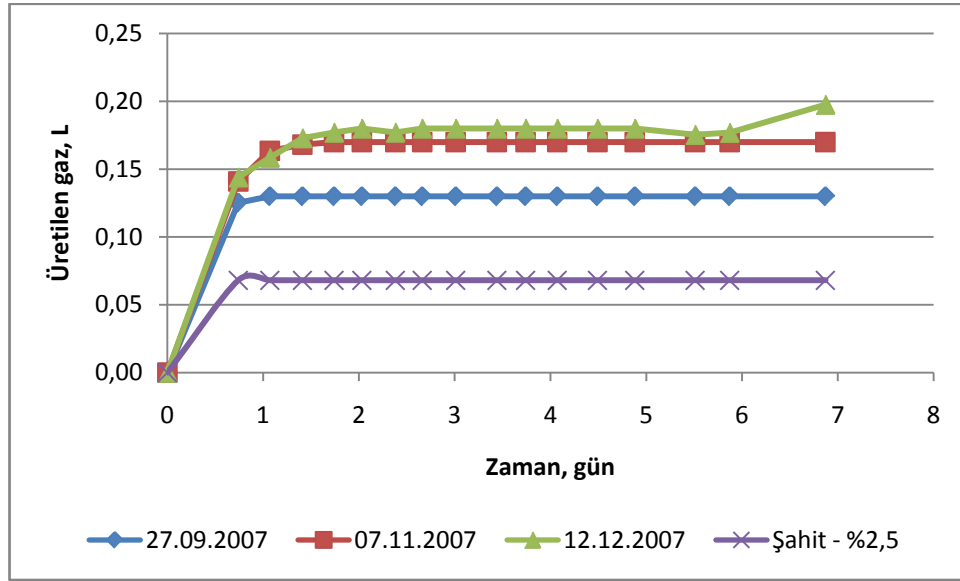
Şekil 5.7 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%5) reaktöründe Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi



Şekil 5.8 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

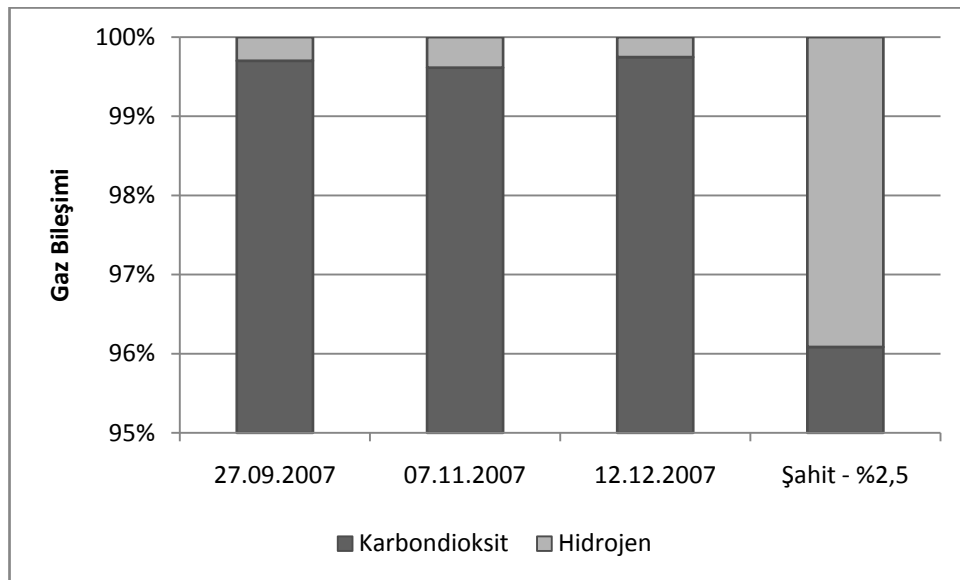
%2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen eklenik gaz üretimi Şekil 5.9'da, üretilen gazın bileşimi ise Şekil 5.10'da verilmiştir. Hidroliz ve fermentasyon kademesinde reaktörlerde 0,07-0,20 L arasında gaz üretilmiştir. Şekil 5.9'da eklenik gaz üretimleri verilen

reaktörlerde, düşük aşı aktivitesi ve aşırı yüklenme nedeniyle muhtemel substrat inhibisyonu yaşanmıştır. Bu nedenle, gaz üretiminde artış gözlenmeyen noktalar düzleştirilerek nihai gaz üretimine ulaşıldığı kabul edilmiştir.



Şekil 5.9 : %2,5'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi

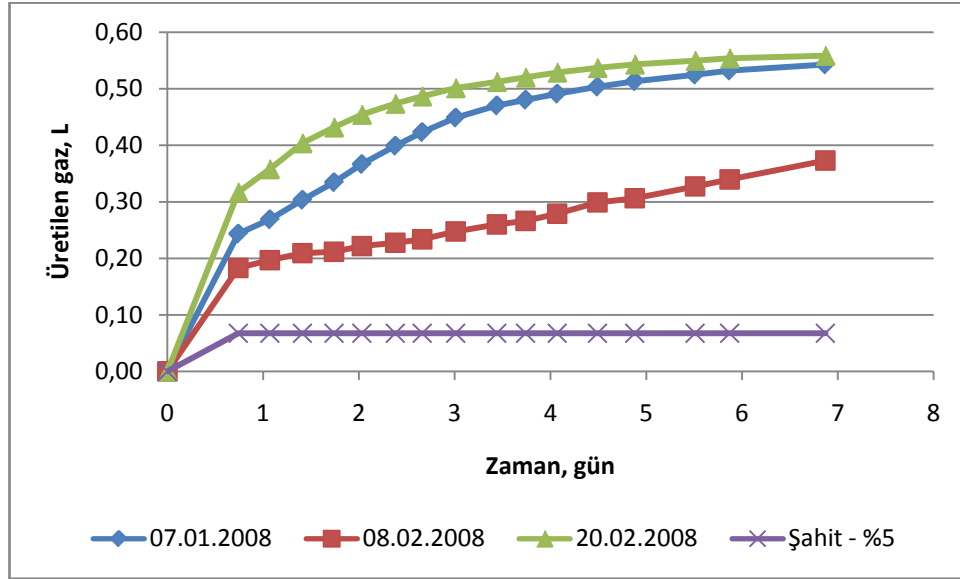
Üretilen gazların bileşimi ise, %0,25-3,92 H_2 ve %96,08-99,75 CO_2 'den oluşmaktadır.



Şekil 5.10 : %2,5'lik KM'de gözlenen gaz üretiminin bileşimi

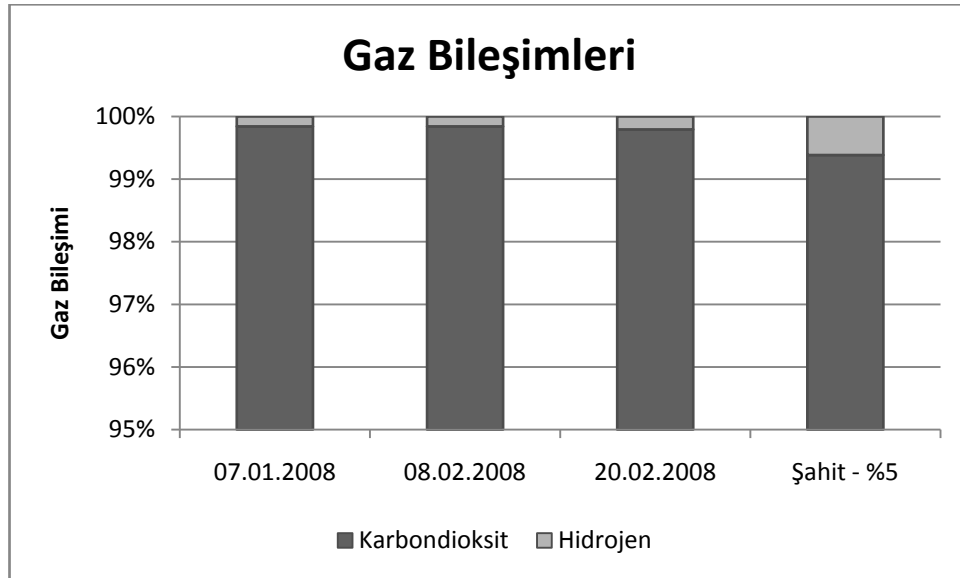
%5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen eklenik gaz üretimi Şekil 5.11'de, üretilen gazın bileşimi ise Şekil 5.12'de verilmiştir. Hidroliz ve fermentasyon kademesinde reaktörlerde 0,07-0,56 L arasında gaz üretilmiştir. Şekil 5.11'de eklenik gaz üretimi verilen şahit

reaktöründe, gaz üretiminde artış gözlenmeyen noktalar düzleştirilerek nihai gaz üretimine ulaşıldığı kabul edilmiştir.



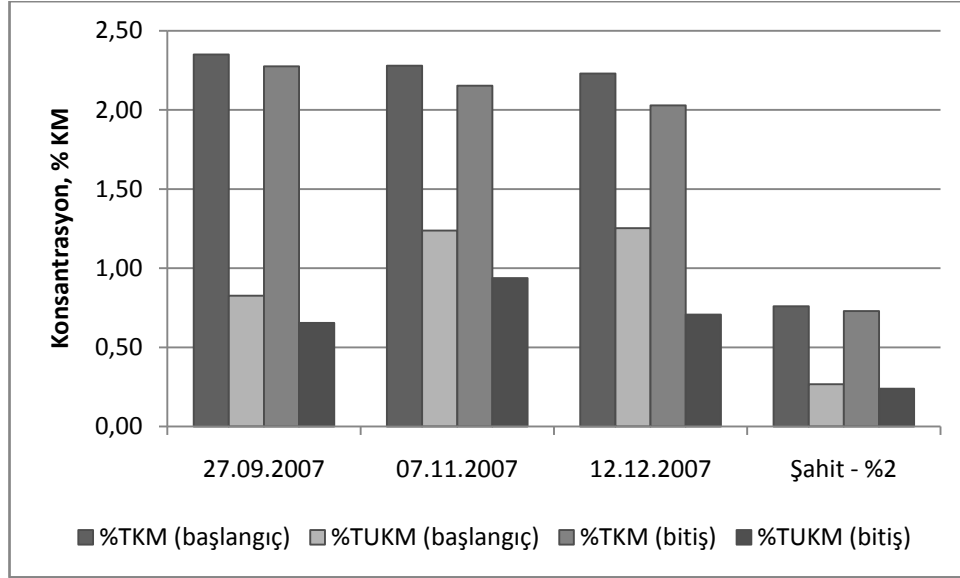
Şekil 5.11 : %5'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi

Üretilen gazların bileşimi ise, %0,16-0,61 H_2 ve %99,39-99,84 CO_2 'den oluşmaktadır.



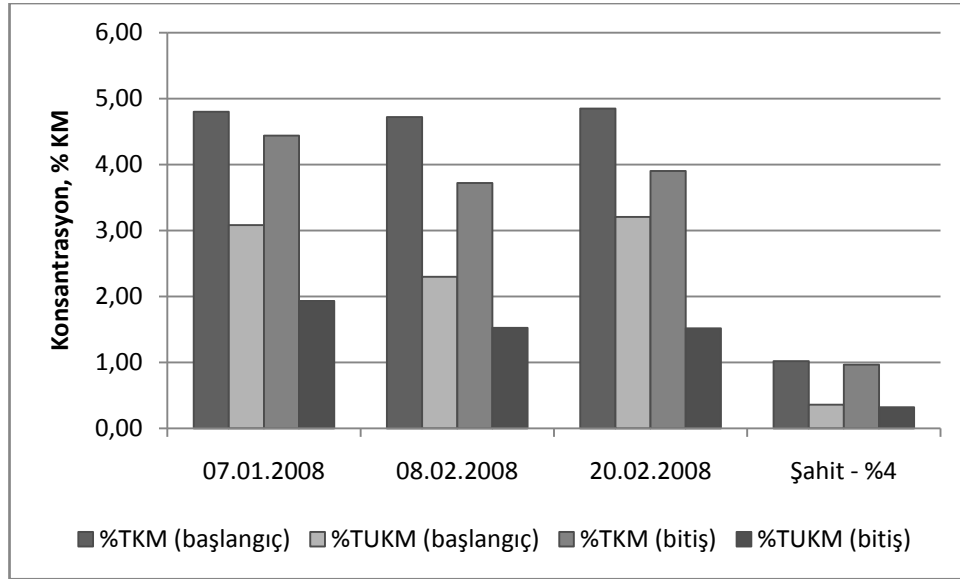
Şekil 5.12 : %5'lik KM'de gözlenen gaz üretiminin bileşimi

%2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde başlangıçta ve bitişte gözlenen TKM ile TUKM yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13 : %2,5'lik KM'de başlangıçta ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri

%5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde başlangıçta ve bitişte gözlenen TKM ile TUKM yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14 : %5'lik KM'de başlangıçta ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri

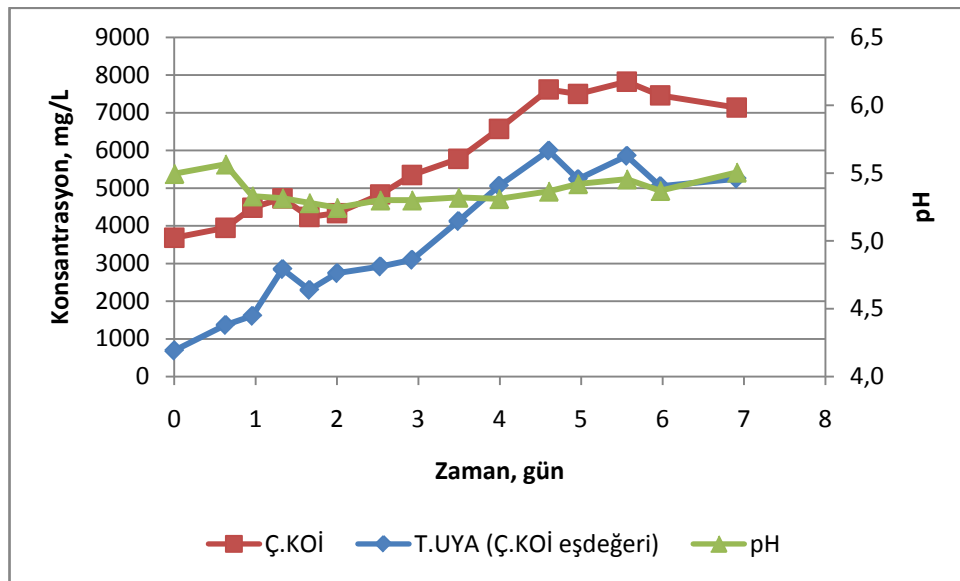
Hem %2,5 hem de %5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde giderilen birim TUKM başına üretilen birim litre gaz miktarları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyonda giderilen TUKM ile üretilen gaz miktarı ilişkisi

Reaktör	KM, %	Giderilen TUKM, gr	Üretilen Gaz, L	L _{üretilen gaz / gr TUKM_{giderilen}}
27.09.2007	2,5	1,23	0,12	0,098
07.11.2007		2,00	0,14	0,070
12.12.2007		2,53	0,20	0,079
07.11.2008	5,0	5,43	0,54	0,099
08.02.2008		3,92	0,37	0,094
20.02.2008		6,74	0,56	0,083

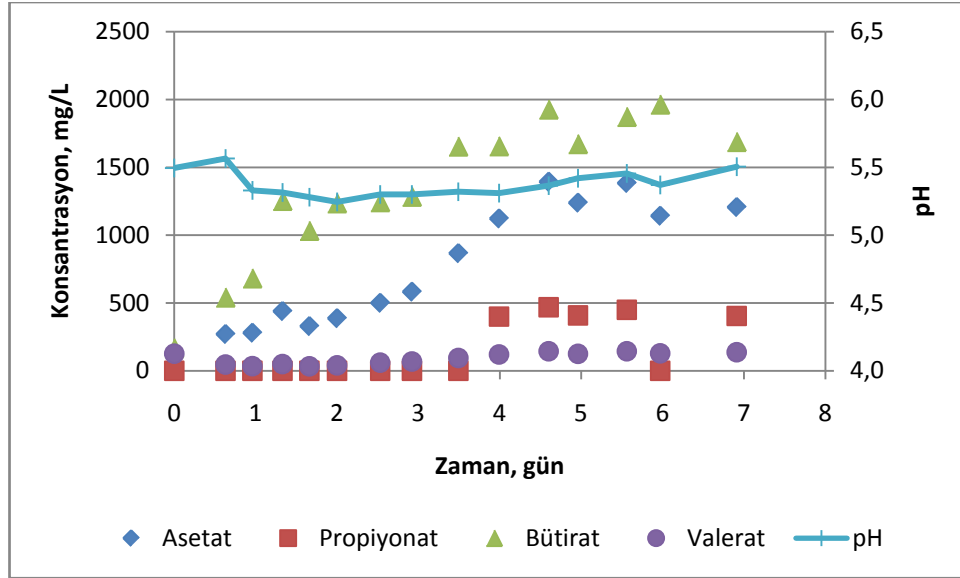
5.1.2. pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon

27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılansarak %1,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimleri Şekil 5.15'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.16'da verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,37 \pm 0,09$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren gözlenen %112'lik artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOİ üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,19 iken, hidroliz ve fermentasyon süresince $0,60 \pm 0,18$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat, valerat ve asetat iken propiyonat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde bütiratın %49'luk, asetatın da %35'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve



Şekil 5.15 : 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılansarak reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi

karbondioksite oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıca oranla gözlenen artış ile Ç.KOI içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.

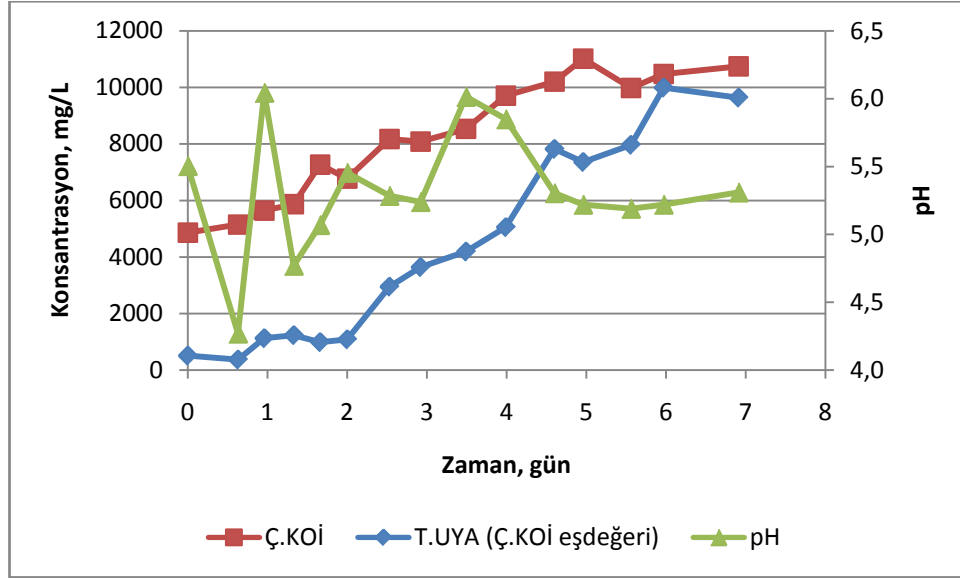


Şekil 5.16 : 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

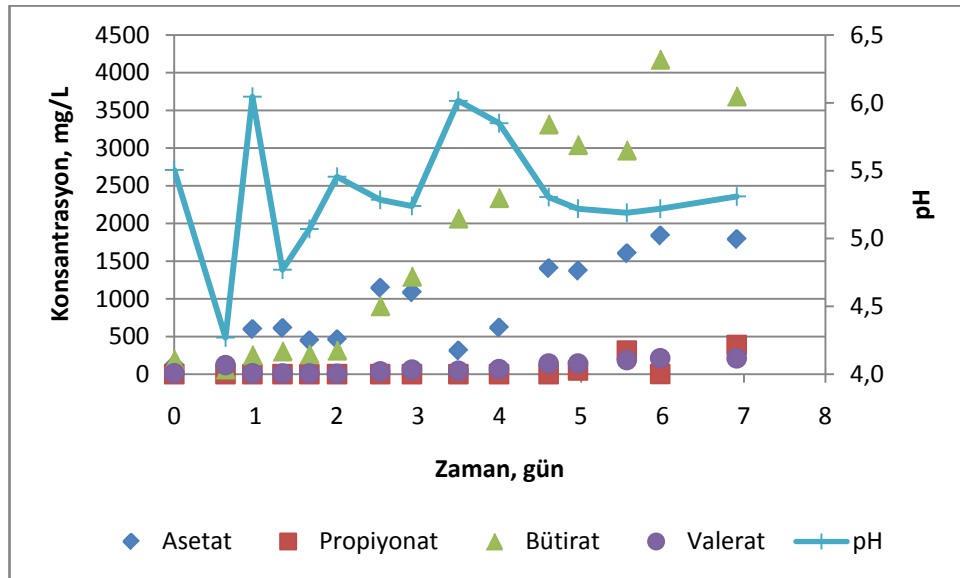
07.11.2007 ve 12.12.2007 tarihlerinde alınan fermentör çamurları ile aşıl原因arak %1,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Ek A (Şekil A.9 ve Şekil A.11), UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Ek A (Şekil A.10 ve Şekil A.12)'da verilmiştir.

07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因arak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil 5.17'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.18'de verilmiştir. Reaktörde fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,32 \pm 0,45$ aralığında kalmıştır. Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %127'lik artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,10 iken, fermentasyon süresince $0,45 \pm 0,31$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde bütiratın %61'lik, asetatın da %29'luk oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik

bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksite oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıca oranla gözlenen artış ile Ç.KOI içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5.17 : 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi

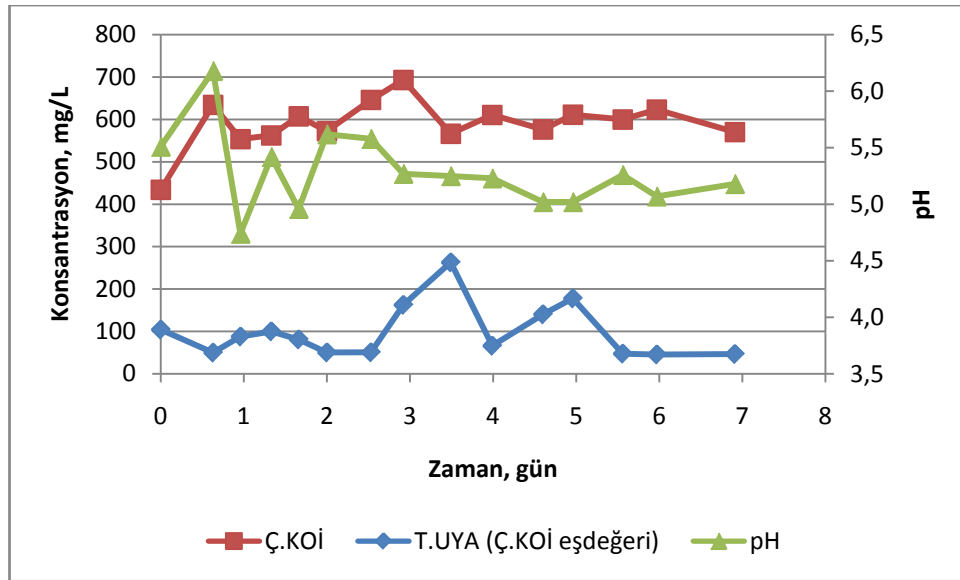


Şekil 5.18 : 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

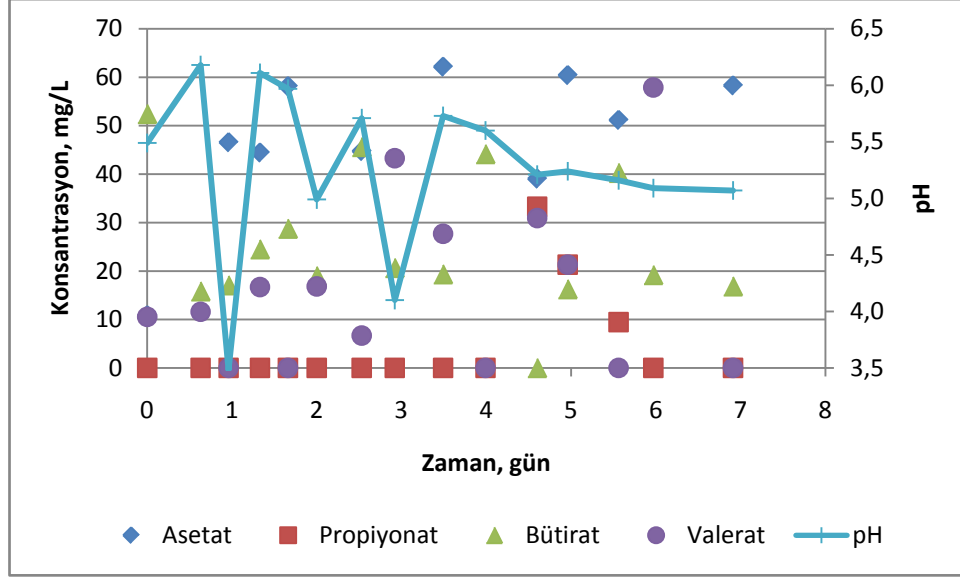
08.02.2008 ve 20.02.2008 tarihlerinde alınan fermentör çamurları ile aşıl原因arak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon

kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Ek A (Şekil A.13 ve Şekil A.15), UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Ek A (Şekil A.14 ve Şekil A.16)'da verilmiştir.

07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit reaktöründe %1,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil 5.19'da, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.20'de verilmiştir. Reaktörde fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,29 \pm 0,35$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren gözlenen %60'lık artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOİ üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,24 iken, fermentasyon süresince $0,17 \pm 0,11$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat, asetat ve valerat iken propiyonat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %78'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOİ'de başlangıca oranla gözlenen artış ile Ç.KOİ içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.

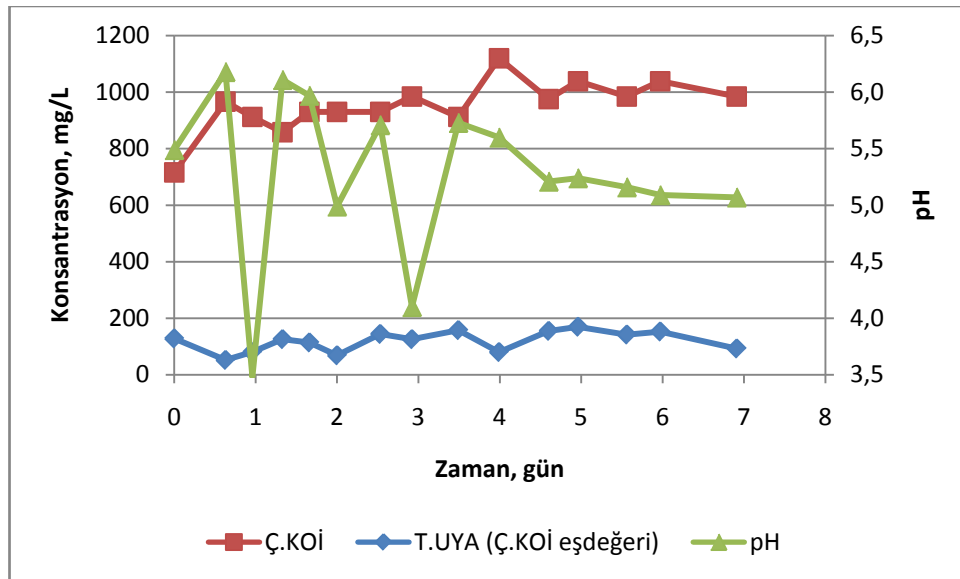


Şekil 5.19 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%1,5) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi



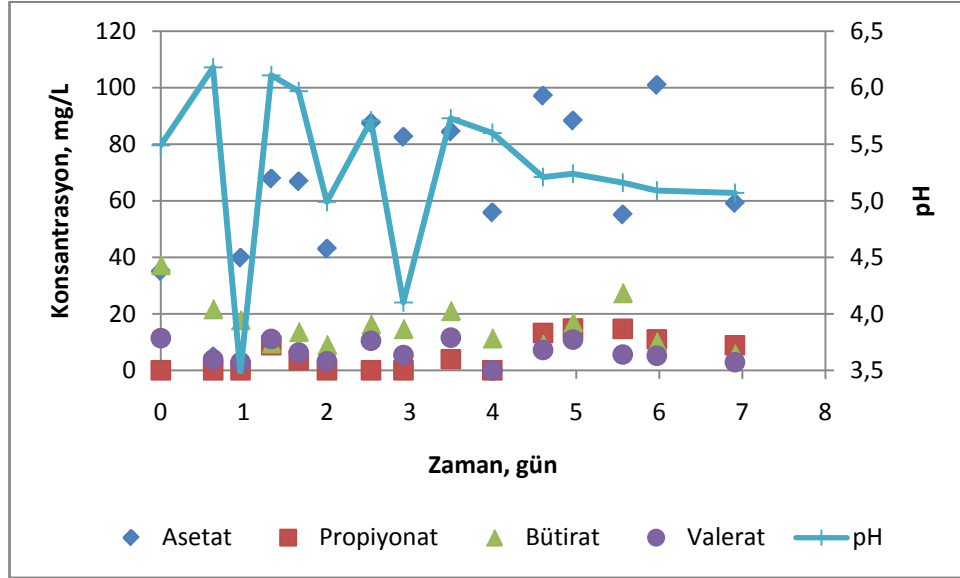
Şekil 5.20 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%1,5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit reaktöründe %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil 5.21'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.22'de verilmiştir. Reaktörde fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,28 \pm 0,72$ aralığında kalmıştır. Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %56'lık artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,18 iken, fermentasyon süresince $0,13 \pm 0,04$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında



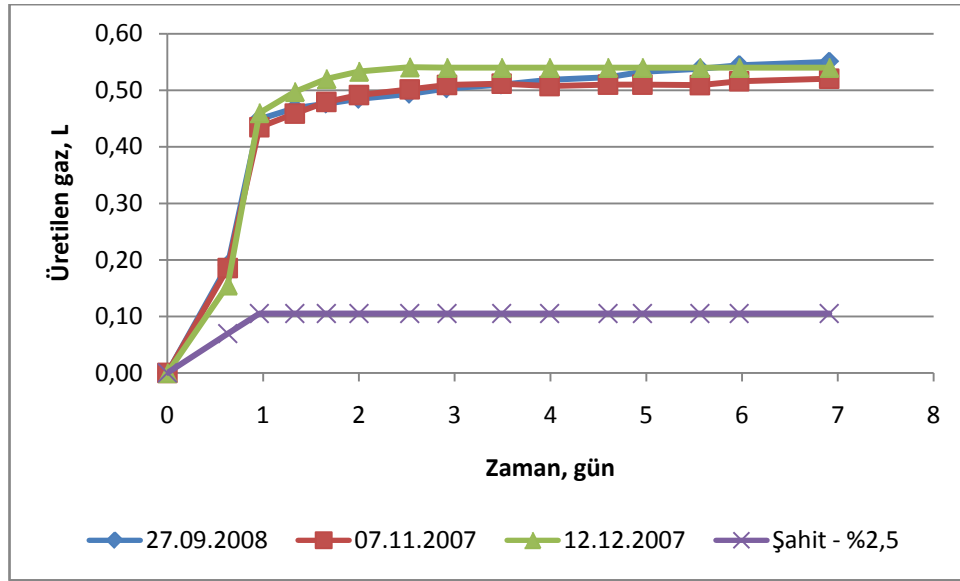
Şekil 5.21 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%2,5) reaktöründe Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi

reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın da %72'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıça oranla gözlenen artış ile Ç.KOI içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.

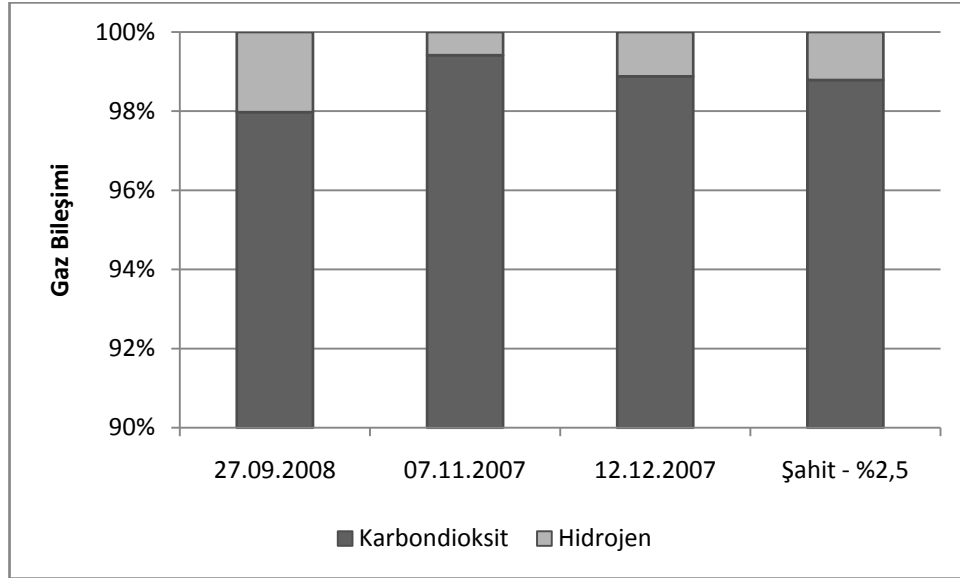


Şekil 5.22 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana şahit (%2,5) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

%1,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen eklenik gaz üretimi Şekil 5.23'te, üretilen gazın bileşimi ise Şekil 5.24'te verilmiştir. Şekil 5.23'te eklenik gaz üretimi verilen şahit reaktöründe, gaz üretiminde artış gözlenmeyen noktalar düzleştirilerek nihai gaz üretimine ulaşıldığı kabul edilmiştir. Hidroliz ve fermentasyon kademesinde reaktörlerde 0,11-0,55 L arasında gaz üretilmiştir. Üretilen gazların bileşimi ise %0,59-2,03 H₂ ve %97,88-99,39 CO₂'den oluşmaktadır.

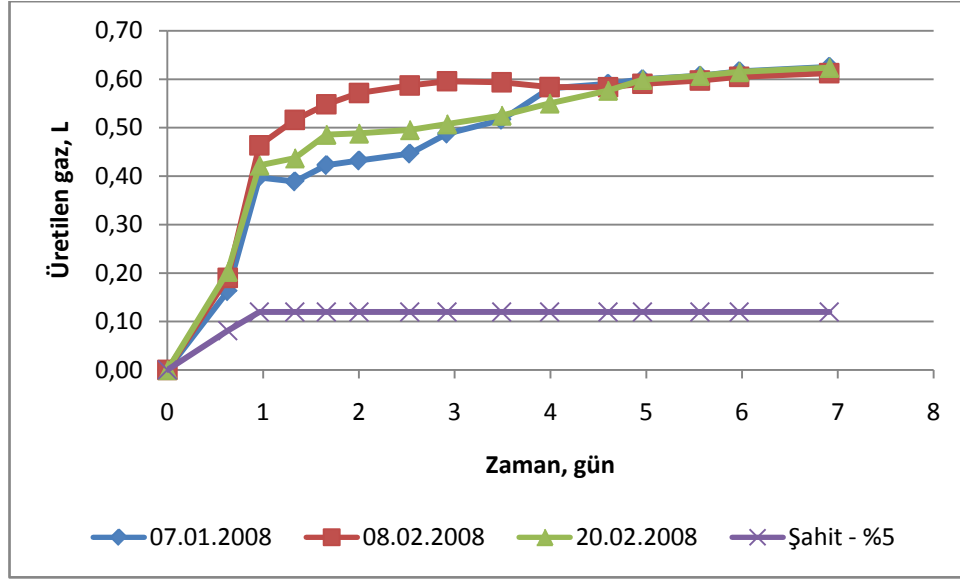


Şekil 5.23 : %1,5'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi

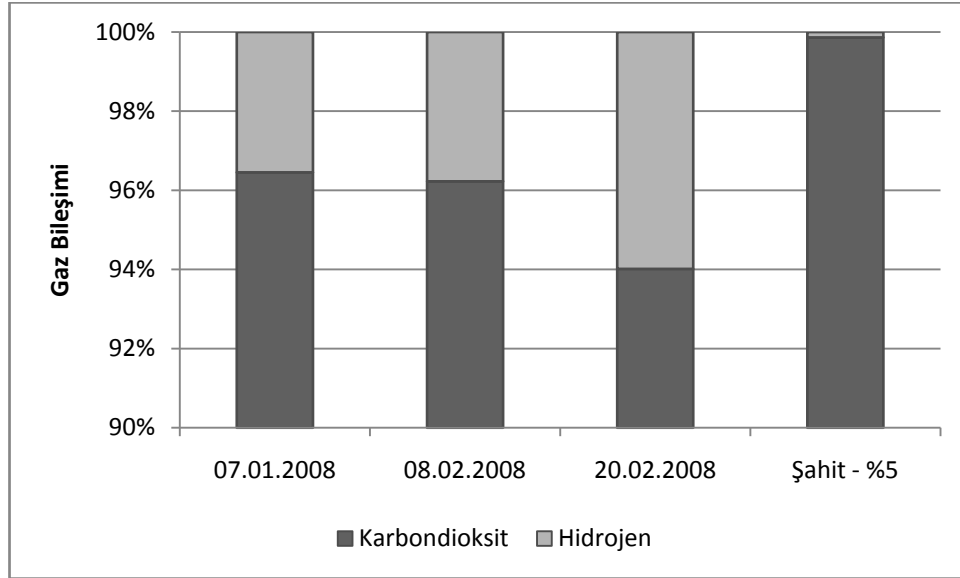


Şekil 5.24 : %1,5'lik KM'de gözlenen gaz üretiminin bileşimi

%2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen eklenik gaz üretimi Şekil 5.25'te, üretilen gazın bileşimi ise Şekil 5.26'da verilmiştir. Hidroliz ve fermentasyon kademesinde reaktörlerde 0,12-0,63 L arasında gaz üretilmiştir. Şekil 5.25'te eklenik gaz üretimi verilen şahit reaktöründe, gaz üretiminde artış gözlenmeyen noktalar düzleştirilerek nihai gaz üretimine ulaşıldığı kabul edilmiştir. Üretilen gazların bileşimi ise %0,14-5,99 H₂ ve %94,01-99,86 CO₂'den oluşmaktadır.

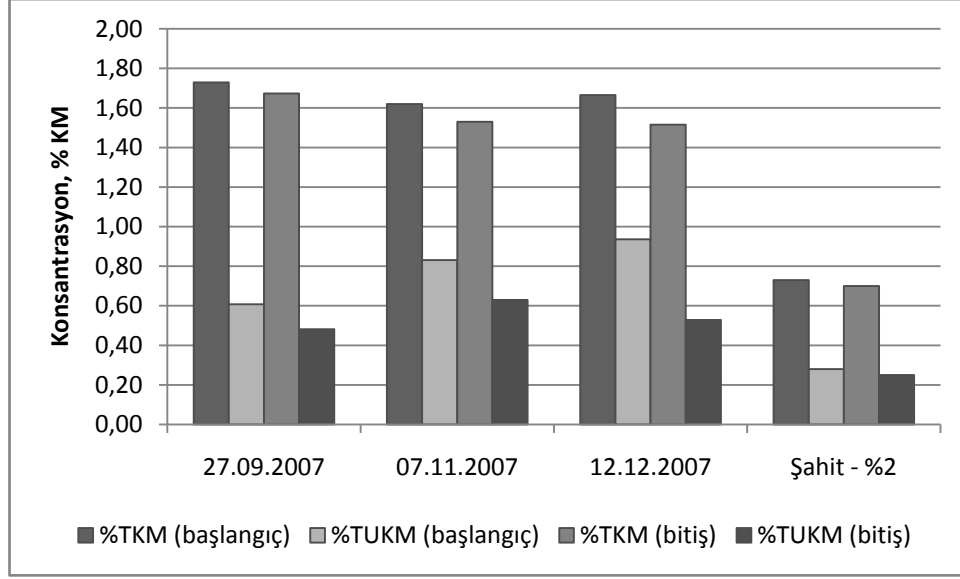


Şekil 5.25 : %2,5'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi



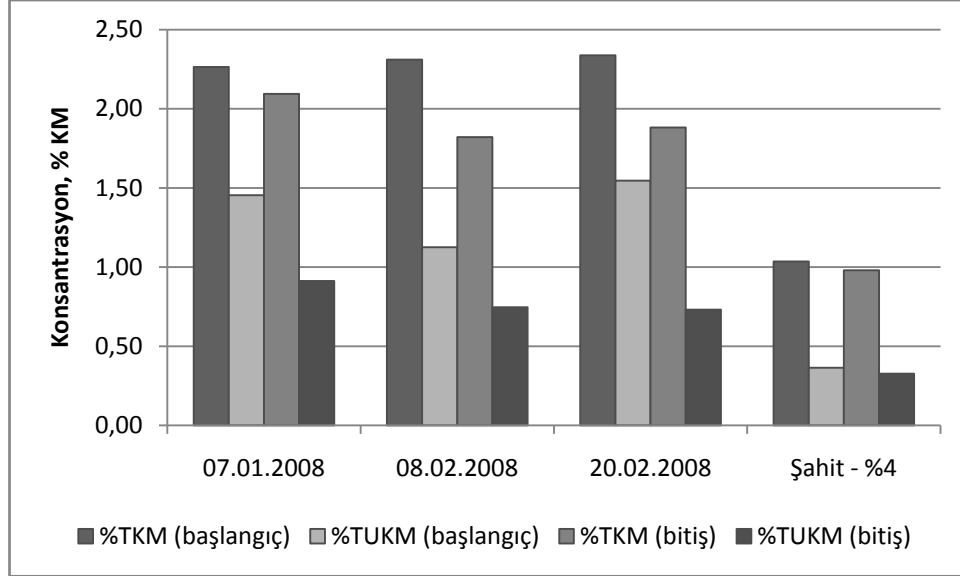
Şekil 5.26 : %2,5'lik KM'de gözlenen gaz üretiminin bileşimi

%1,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde başlangıçta ve bitişte gözlenen TKM ile TUKM yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5.27 : %1,5'lik KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri

%2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde başlangıçta ve bitişte gözlenen TKM ile TUKM yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.28 : %2,5'lik KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri

Hem %1,5 hem de %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde giderilen birim TUKM başına üretilen birim litre gaz miktarları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : pH kontrollü hidroliz ve fermentasyonda giderilen TUKM ile üretilen gaz miktarı ilişkisi

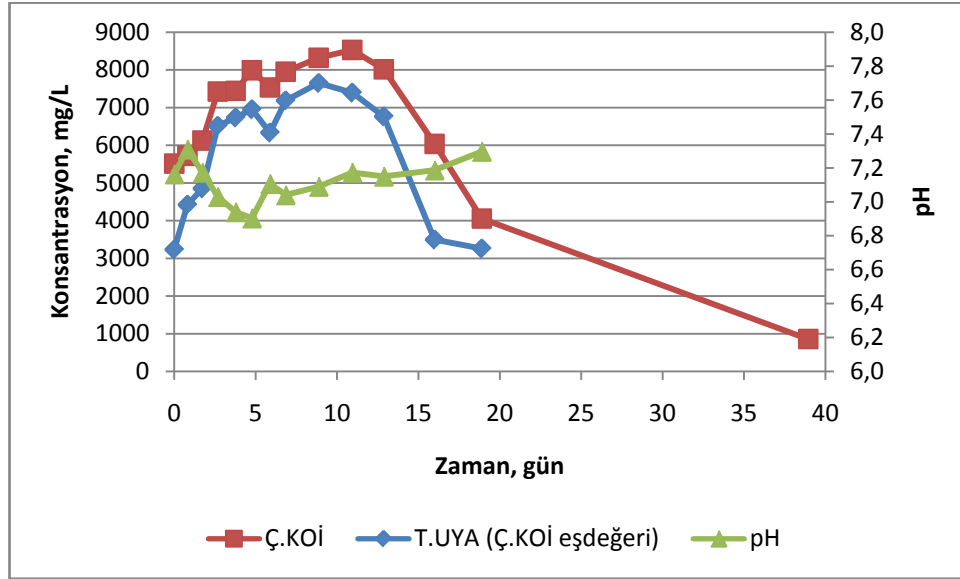
Reaktör	KM, %	Giderilen TUKM, gr	Üretilen Gaz, L	L _{üretilen gaz / gr TUKM_{giderilen}}
27.09.2007	1,5	0,90	0,55	0,611
07.11.2007		1,28	0,52	0,406
12.12.2007		1,89	0,52	0,275
07.11.2008	2,5	2,72	0,63	0,232
08.02.2008		1,99	0,61	0,307
20.02.2008		3,47	0,62	0,179

5.2. Çürütme

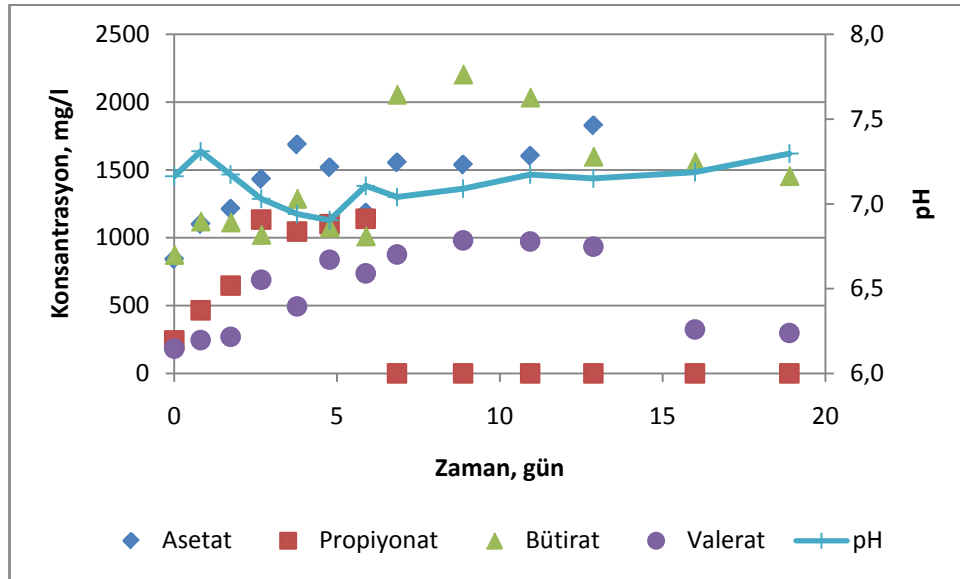
Çürütme kademesi, %2 ve %4'lük katı madde konsantrasyonlarında pH kontrollü olarak yürütülmüştür.

27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因arak %2'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil 5.29'da, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.30'da verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $7,12 \pm 0,12$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,59 iken, çürütme süresince $0,81 \pm 0,11$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren 11. gün sonuna kadar görülen %55'lik artış, T.UYA'da da başlangıçtan itibaren 9. gün sonuna kadar görülen %137'lik artış bir önceki adımda düşük pH nedeniyle yeterli verimde tamamlanamayan hidroliz ve fermentasyon reaksiyonlarının (Şekil 5.1) çürütme kademesinde gerçekleşmeye devam ettiğini göstermektedir. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 13. gün sonunda ise reaktörde asetatın %42'lik, bütiratın da %37'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksite oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). 14-19. günler arasında asetatın tamamen tüketilmesi ile bütiratın baskın hale gelmesi de asetat kullanarak metan üreten arkelerin faaliyetlerini göstermektedir. 11. gün sonuna kadar reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından fazla olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde birikim görülmektedir. 12. günden itibaren ise reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından az olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde azalış görülmektedir. T.UYA'da 10-19.

günler arasında görülen %58’lik azalış, Ç.KOI’de de 12. günden itibaren görülen %90’lık azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir.



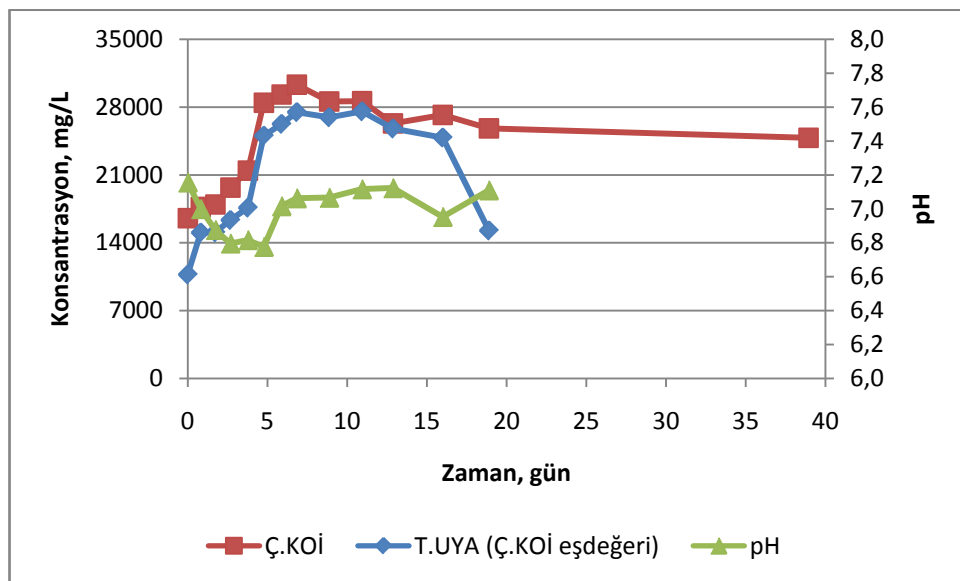
Şekil 5.29 : 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH’nın zamanla değişimi



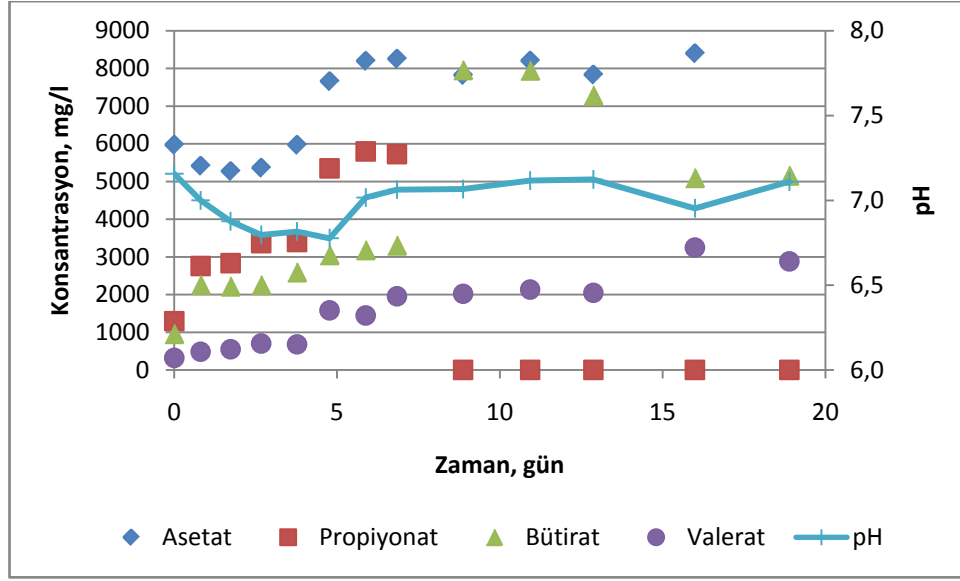
Şekil 5.30 : 27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

07.11.2007 ve 12.12.2007 tarihlerinde alınan çürütme çamurları ile aşıl原因arak %2’lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH’nın zamanla değişimleri Ek A (Şekil A.17 ve Şekil A.19), UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Ek A (Şekil A.18 ve Şekil A.20)’da verilmiştir.

07.01.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılanarak %4'lük katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimleri Şekil 5.31'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.32'de verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $6,99 \pm 0,13$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,65 iken, çürütme süresince $0,85 \pm 0,11$ aralığında kalmıştır. Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren 7. gün sonuna kadar görülen %83'lük artış, T.UYA'da da başlangıçtan itibaren 11. gün sonuna kadar görülen %157'lik artış bir önceki adımda düşük pH nedeniyle yeterli verimde tamamlanamayan hidroliz ve fermentasyon reaksiyonlarının (Şekil 5.3) çürütme kademesinde gerçekleşmeye devam ettiğini göstermektedir. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, asetat ve propiyonat iken bütirat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 16. gün sonunda ise reaktörde asetatın %50'lik, bütiratın da %30'luk oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). 17-19. günler arasında asetatın tamamen tüketilmesi ile bütiratın baskın hale gelmesi de asetat kullanarak metan üreten arkelerin faaliyetlerini göstermektedir. 11. gün sonuna kadar reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından fazla olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde birikim görülmektedir. 12. günden itibaren ise reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından az



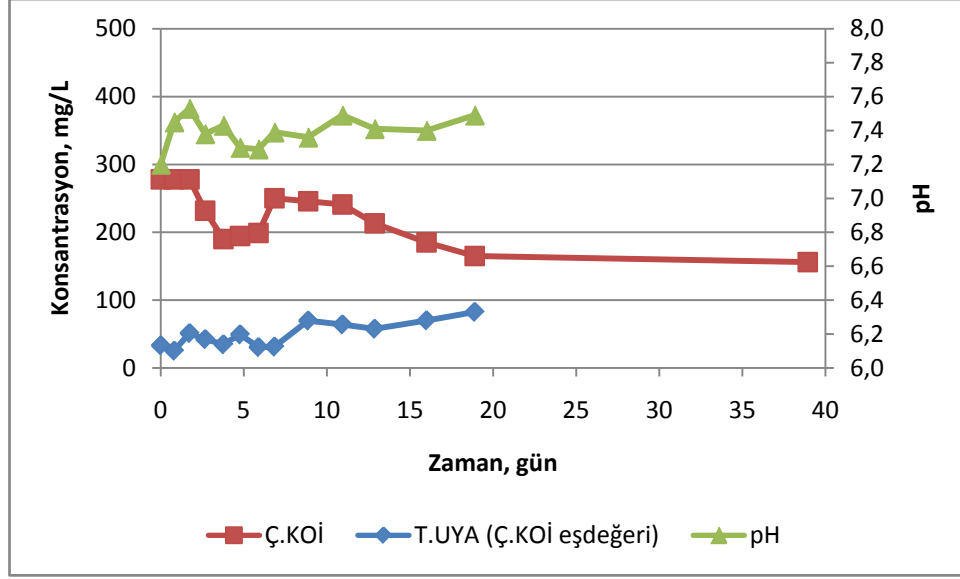
Şekil 5.31 : 07.01.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılanan reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi



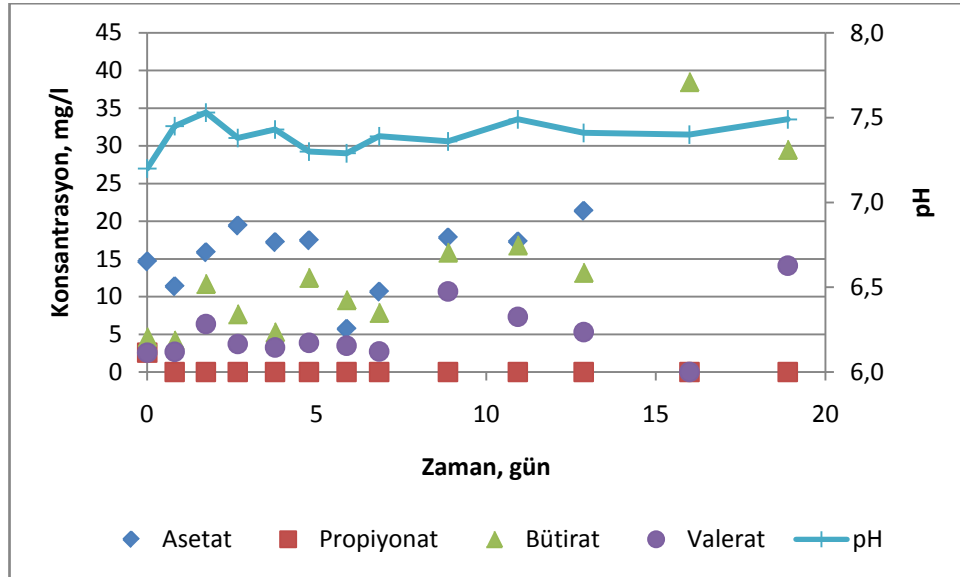
Şekil 5.32 : 07.01.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde azalış görülmektedir. T.UYA’da 12-19. günler arasında görülen %61’lik azalış, Ç.KOİ’de de 8. günden itibaren görülen %45’lik azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir. Çürütme kademesinin sonlandırılmasında Ç.KOİ konsantrasyonunun 24840 mg/L seviyesinde olması, gaz üretiminin (Şekil 5.40) de düşük kalmasıyla birlikte reaktörde substrat inhibisyonunun yaşandığı görülmektedir.

07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana şahit reaktöründe %2’lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH’ın zamanla değişimleri Şekil 5.33’te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.34’te verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $7,39 \pm 0,09$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,12 iken, çürütme süresince $0,23 \pm 0,12$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ’de çürütme boyunca görülen %44’lük azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir.

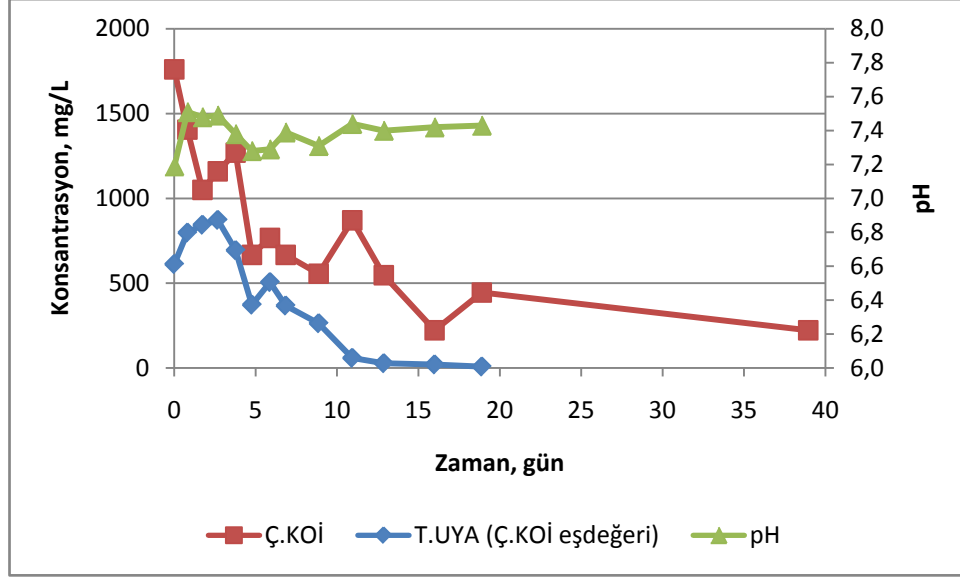


Şekil 5.33 : 07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana şahit (%2) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'n zamanla değişimi

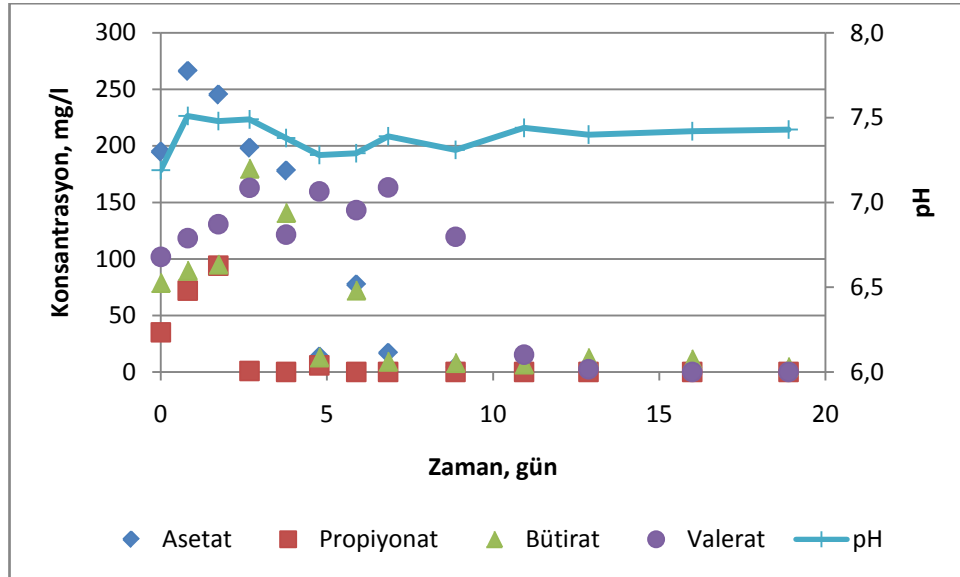


Şekil 5.34 : 07.01.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana şahit (%2) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana şahit reaktöründe %4'lük katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'n zamanla değişimleri Şekil 5.35'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil 5.36'da verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $7,39 \pm 0,09$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,35 iken, çürütme süresince $0,42 \pm 0,28$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de çürütme boyunca görülen %87'lik azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir.



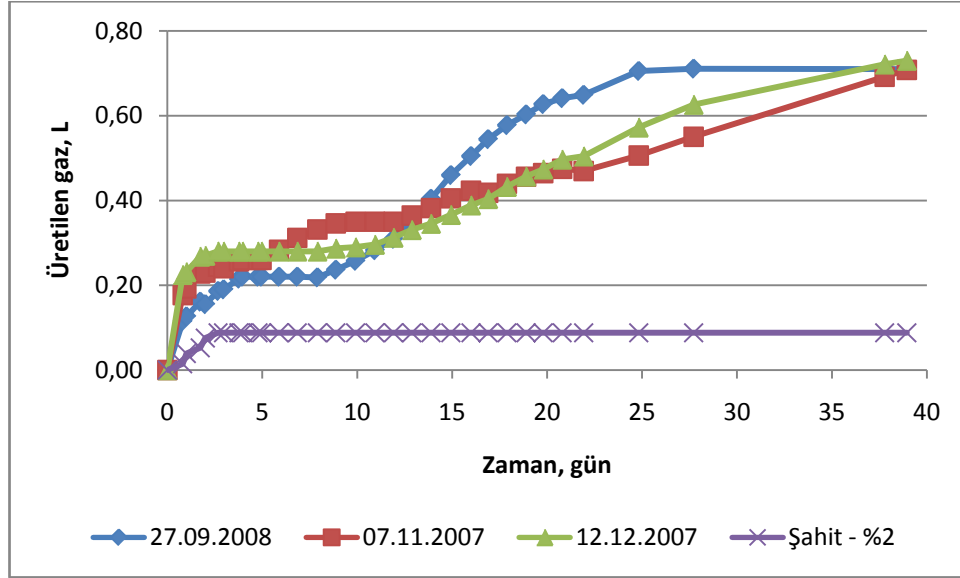
Şekil 5.35 : 08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılanaan şahit (%4) reaktöründe Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'n zamanla değışimi



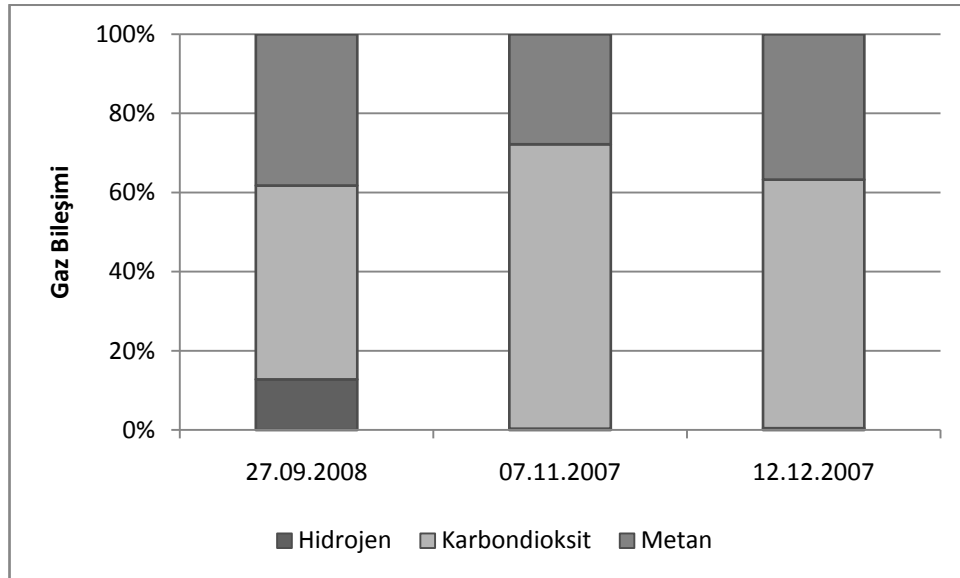
Şekil 5.36 : 08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılanaan şahit (%4) reaktöründe UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi

%2'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen eklenik gaz üretimi Şekil 5.37'de, üretilen gazın 21. gün sonundaki bileşimi Şekil 5.38'de, 39. gün sonundaki bileşimi ise Şekil 5.39'da verilmiştir. Çürütme kademesinde reaktörlerde 0,09-0,73 L arasında gaz üretilmiştir. Üretilen gazların bileşimi 21. gün sonunda %0,32-12,77 H₂, %49,01-71,89 CO₂ ve %27,79-38,21 CH₄'ten oluşmaktadır. 21. gün sonundaki gaz bileşimine bakıldığında, 27.09.2007 reaktöründe %12,77 H₂ bulunmaktadır. Diğer reaktörlerde ihmal edilebilir düzeyde H₂ bulunmaktadır. Bu durum, reaktörlerde nihai ürün olan metanın oluşması

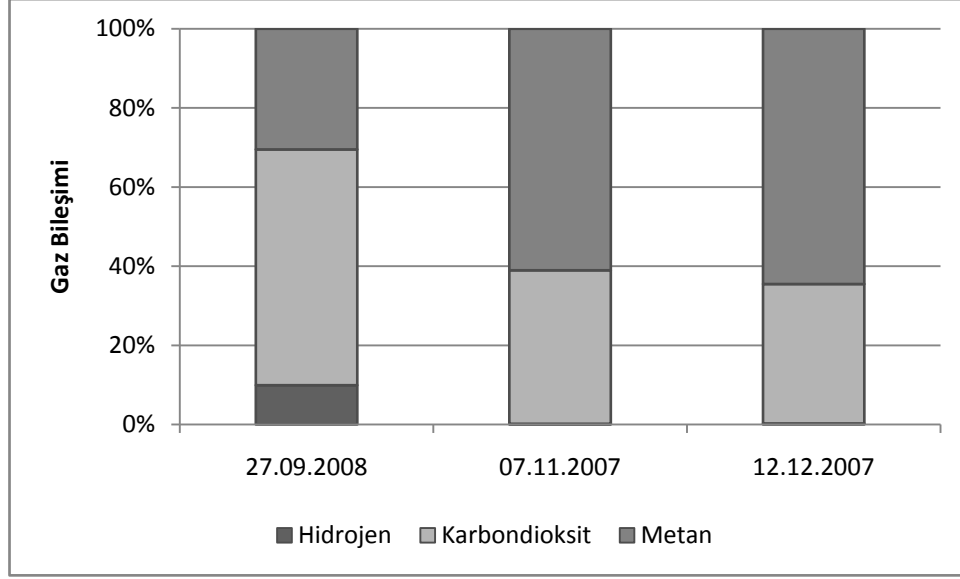
açısından oldukça önemli olan hidrojen kullanarak çoğalan arkelerin faaliyetinin yeterli olduğunu göstermektedir. Üretilen gazların bileşimi 39. gün sonunda %0,19-9,92 H₂, %35,21-59,57 CO₂ ve %30,51-64,52 CH₄'ten oluşmaktadır. 39. gün sonundaki gaz bileşimine bakıldığında, tüm reaktörlerde H₂ oranı azalmış, CO₂ ve CH₄ oranları da artmıştır.



Şekil 5.37 : %2'lik KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi

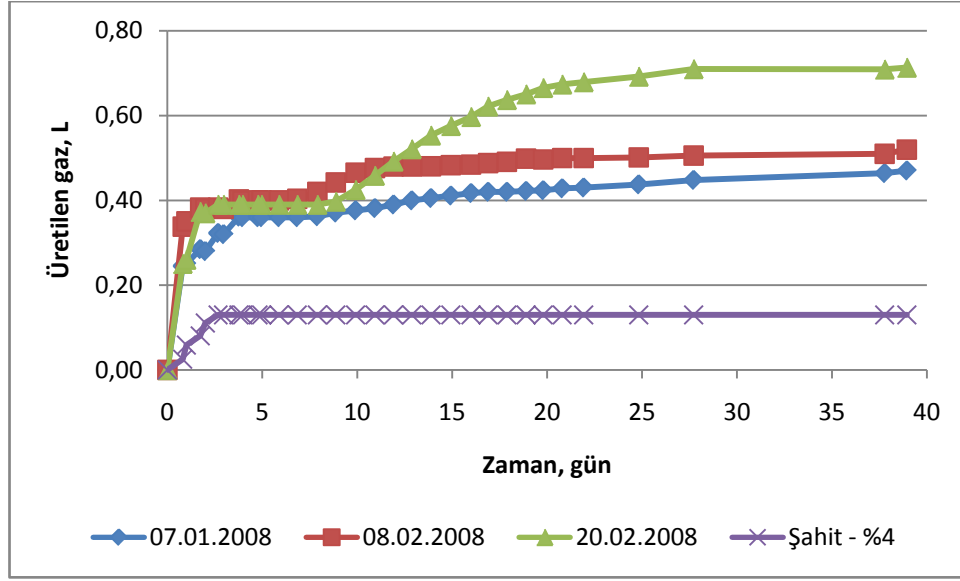


Şekil 5.38 : %2'lik KM'de 21. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi

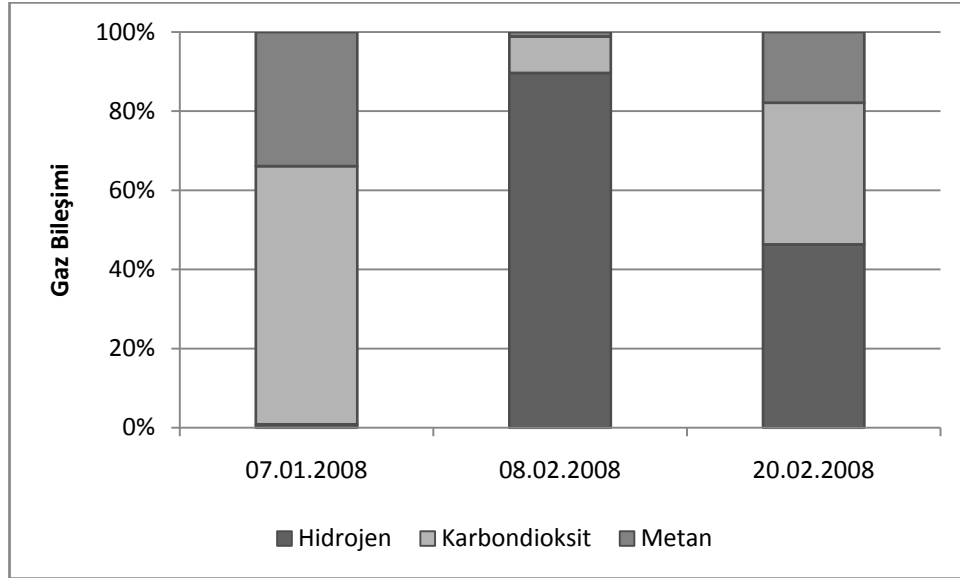


Şekil 5.39 : %2'lik KM'de 39. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi

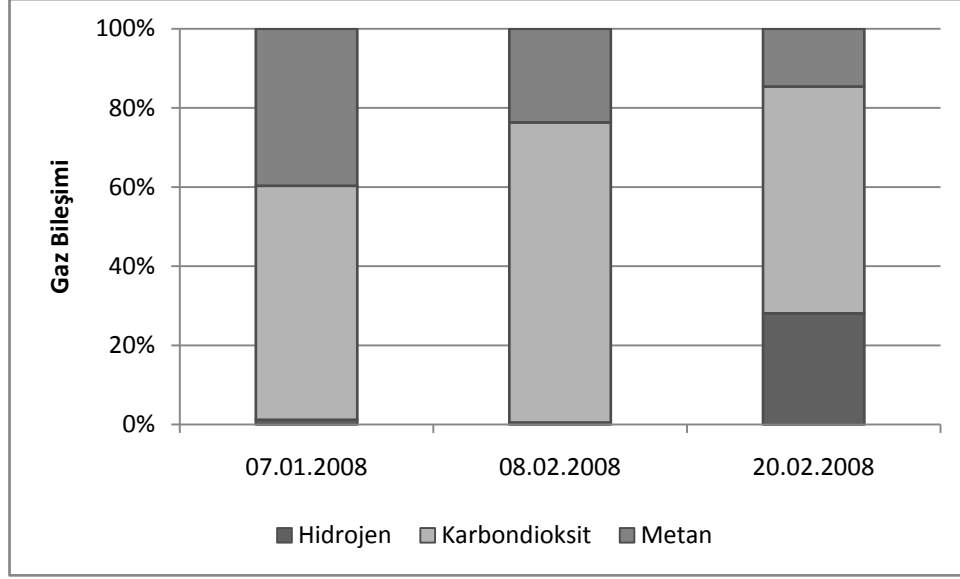
%4'lük katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen eklenik gaz üretimi Şekil 5.40'ta, üretilen gazın 21. gün sonundaki bileşimi Şekil 5.41'de, 39. gün sonundaki bileşimi ise Şekil 5.42'de verilmiştir. Çürütme kademesinde reaktörlerde 0,13-0,71 L arasında gaz üretilmiştir. 07.01.2008 ve 08.02.2008 reaktörlerinde düşük aşırı aktivitesi ve aşırı yüklenme nedeniyle muhtemel substrat inhibisyonu gözlenmiştir. Üretilen gazların bileşimi 21. gün sonunda %0,88-89,65 H₂, %9,20-65,22 CO₂ ve %1,15-33,91 CH₄'ten oluşmaktadır. 21. gün sonundaki gaz bileşimine bakıldığında, 07.01.2008 reaktörü hariç diğer reaktörlerde oldukça fazla oranda H₂ bulunmaktadır. Bu durum, reaktörlerde nihai ürün olan metanın oluşması açısından oldukça önemli olan hidrojen kullanarak çoğalan arkelerin faaliyetinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Üretilen gazların bileşimi 39. gün sonunda %0,52-28,07 H₂, %57,34-75,83 CO₂ ve %14,60-39,67 CH₄'ten oluşmaktadır. 39. gün sonundaki gaz bileşimine bakıldığında, 20.02.2008 reaktörü hariç tüm reaktörlerde H₂ oranı oldukça azalmış, CO₂ ve CH₄ oranları da artmıştır. Bu durum, reaktörlerde nihai ürün olan metanın oluşması açısından oldukça önemli olan hidrojen kullanarak çoğalan arkelerin faaliyetinin yeterli düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5.40 : %4'lük KM'de gözlenen eklenik gaz üretimi

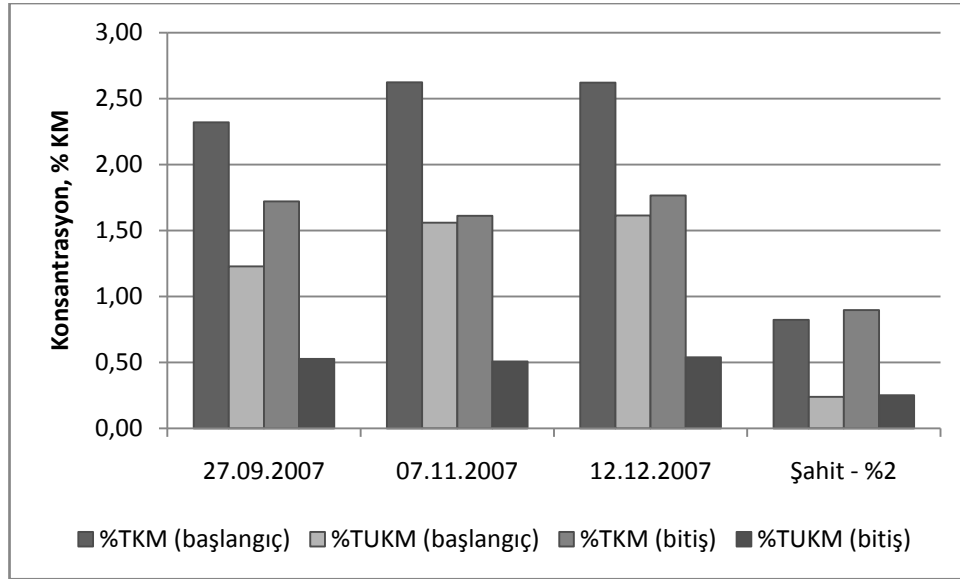


Şekil 5.41 : %4'lük KM'de 21. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi



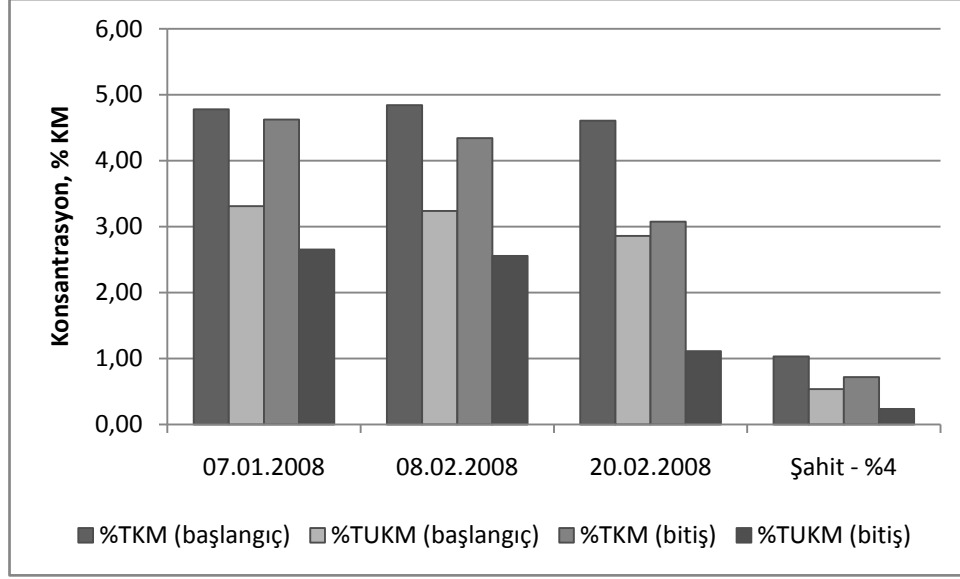
Şekil 5.42 : %4'lük KM'de 39. gün sonunda gözlenen gaz üretiminin bileşimi

%2'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen fermentasyon kademesinde başlangıçta ve bitişte gözlenen TKM ile TUKM yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 5.43'te verilmiştir.



Şekil 5.43 : %2'lik KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri

%4'lük katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen fermentasyon kademesinde başlangıçta ve bitişte gözlenen TKM ile TUKM yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 5.44'te verilmiştir.



Şekil 5.44 : %4'lük KM'de başlangıç ve bitişteki TKM ile TUKM yüzdeleri

Hem %2 hem de %4'lük katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen fermentasyon kademesinde giderilen birim TUKM başına üretilen birim litre gaz miktarları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Çürütmede giderilen TUKM ile üretilen gaz miktarı ilişkisi

Reaktör	KM, %	Giderilen TUKM, gr	Üretilen Gaz, L	$\frac{L_{\text{üretilen gaz}}}{\text{gr TUKM}_{\text{giderilen}}}$
27.09.2007	2,0	2,23	0,70	0,314
07.11.2007		2,95	0,71	0,241
12.12.2007		3,14	0,73	0,232
07.11.2008	4,0	3,50	0,47	0,134
08.02.2008		3,36	0,52	0,155
20.02.2008		5,97	0,71	0,119

6. KINETİK VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Hidroliz Kinetiği

Denklem (2.1) düzenlenerek, (6.1) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{dS}{S} = k \cdot dt \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)'in integrali alınarak, (6.2) denklemi elde edilmektedir.

$$S = S_0 e^{k \cdot t} \quad (6.2)$$

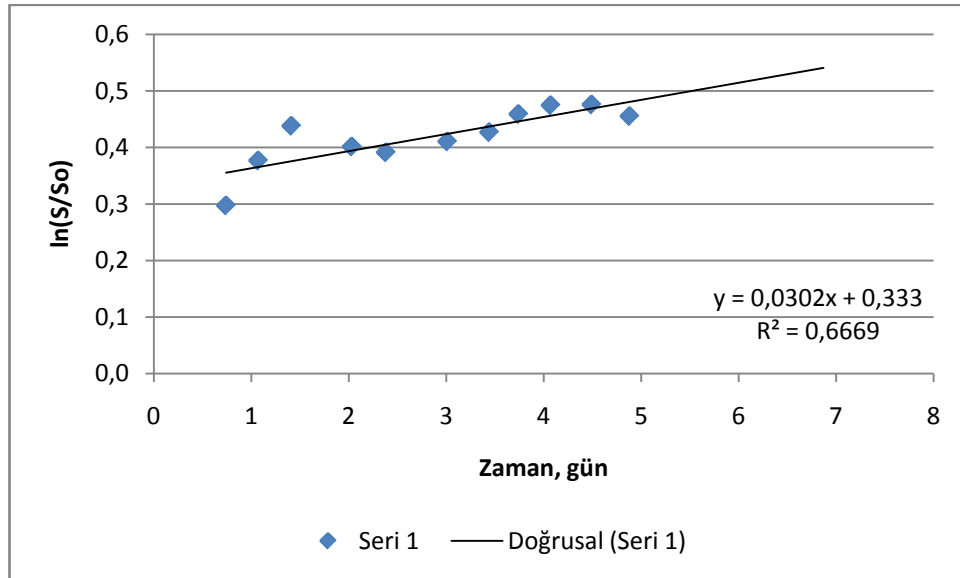
Denklem (6.2)'nin ln'i alınarak, (6.3) denklemi elde edilmektedir.

$$\ln\left(\frac{S}{S_0}\right) = kt \quad (6.3)$$

$\ln(S/S_0)$, t'ye karşı grafiğe geçirilerek, bir doğru elde edilmektedir. Bu doğrunun eğiminden k hesaplanmaktadır.

6.1.1. pH Kontrolsüz Hidroliz

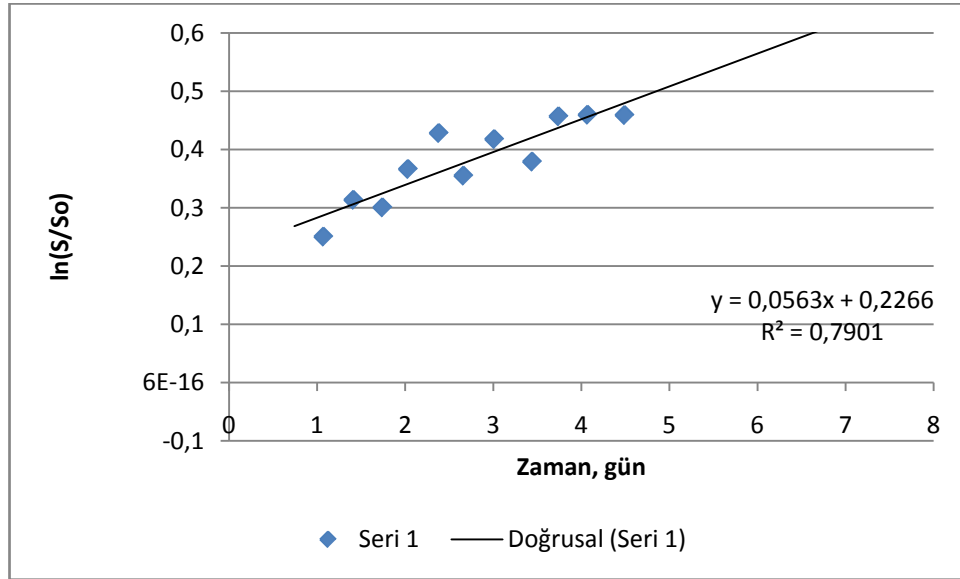
%2,5 katı madde konsantrasyonunda elde edilen hidroliz hızı sabiti (k) Şekil 6.1'de 27.09.2007, 07.11.2007 ve 12.12.2007 tarihli numunelerin ortalama değeri olarak



Şekil 6.1 : %2,5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması

verilmiştir. %2,5 katı madde konsantrasyonunda yürütülen çalışmanın reaktör bazındaki hidroliz hızı sabit (k)'leri Ek.B (Şekil B.1 - Şekil B.3)'de yer almaktadır.

%5 katı madde konsantrasyonunda elde edilen hidroliz hızı sabiti (k) Şekil 6.2'de 07.01.2008, 08.02.2008 ve 20.02.2008 tarihli numunelerin ortalama değeri olarak verilmiştir. %5 katı madde konsantrasyonunda yürütülen çalışmanın reaktör bazındaki hidroliz hızı sabit (k)'leri Ek.B (Şekil B.4 - Şekil B.6)'de yer almaktadır.



Şekil 6.2 : %5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması

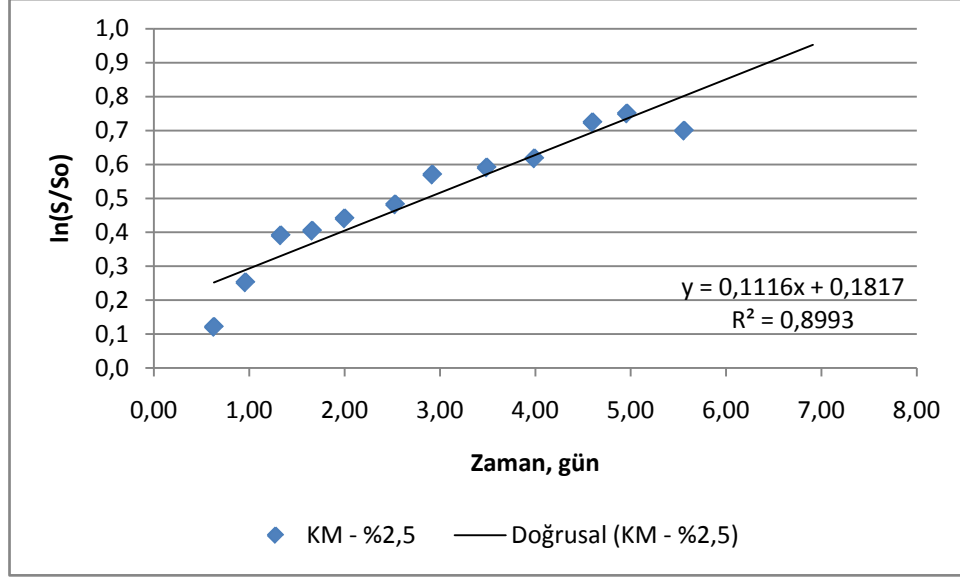
pH kontrolsüz hidrolizde gözlenen k katsayıları Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'den hesaplanarak Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : pH kontrolsüz hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar

% KM	Hidroliz hızı, k (gün ⁻¹)	Literatür (Vavilin ve diğ., 2008)
2,5	0,030	k: 0,34 - 0,55 gün ⁻¹ Yemek ve mutfak atıkları
5	0,056	

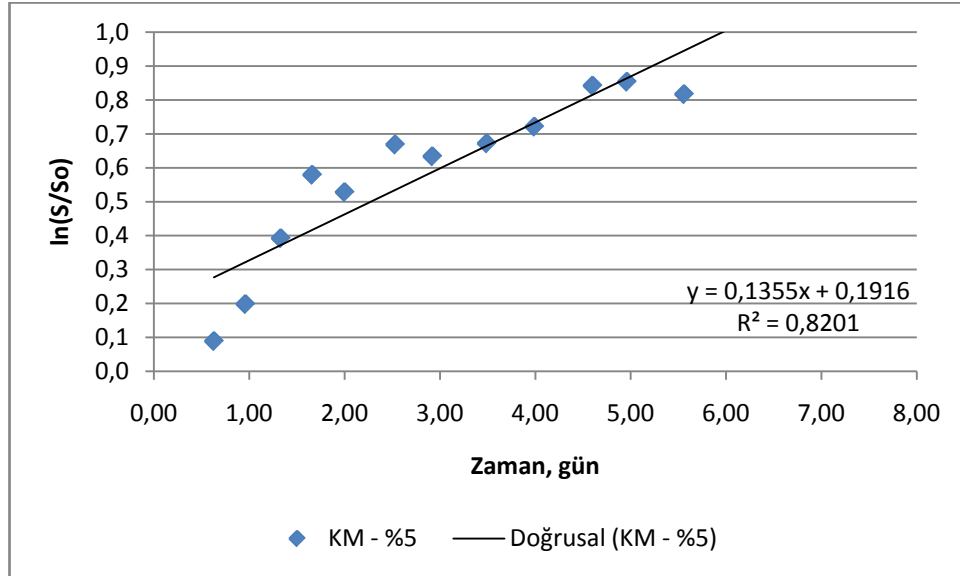
6.1.2. pH Kontrollü Hidroliz

%1,5 katı madde konsantrasyonunda elde edilen hidroliz hızı sabiti (k) Şekil 6.3'te 27.09.2007, 07.11.2007 ve 12.12.2007 tarihli numunelerin ortalama değeri olarak verilmiştir. %1,5 katı madde konsantrasyonunda yürütülen çalışmanın reaktör bazındaki hidroliz hızı sabit (k)'leri Ek.B (Şekil B.7 - Şekil B.9)'de yer almaktadır.



Şekil 6.3 : %1,5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması

%2,5 katı madde konsantrasyonunda elde edilen hidroliz hızı sabiti (k) Şekil 6.4'te 07.01.2008, 08.02.2008 ve 20.02.2008 tarihli numunelerin ortalama değeri olarak verilmiştir. %2,5 katı madde konsantrasyonunda yürütülen çalışmanın reaktör bazındaki hidroliz hızı sabit (k)'leri Ek.B (Şekil B.10 - Şekil B.12)'de yer almaktadır.



Şekil 6.4 : %2,5 katı madde konsantrasyonunda k'nın hesaplanması

pH kontrollü hidrolizde gözlenen k katsayıları Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'ten hesaplanarak Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : pH kontrollü hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar

% KM	Hidroliz hızı, k (gün ⁻¹)	Literatür (Vavilin ve diğ., 2008)
1,5	0,112	k: 0,34 - 0,55 gün ⁻¹ Yemek ve mutfak atıkları
2,5	0,136	

6.2. Asit Üretimi Kinetiği

Düşük aşı aktivitesi ve aşırı yüklenme nedeniyle reaktörlerde muhtemel substrat inhibisyonu yaşanmıştır. Bu nedenle asit üretimi kinetiğini yansıtan katsayılar çıkartılamamıştır. Karışık toplanmış organik katı atık için literatürde verilen μ_{amax} değerleri 0,5-6 gün⁻¹ iken K_{sa} değerleri de 0,03-0,15 g/L'dir.

6.3. Metan Üretimi Kinetiği

Düşük aşı aktivitesi ve aşırı yüklenme nedeniyle reaktörlerde muhtemel substrat inhibisyonu yaşanmıştır. Bu nedenle metan üretimi kinetiğini yansıtan katsayılar çıkartılamamıştır. Karışık toplanmış organik katı atık için literatürde verilen μ_{mmax} değerleri 0,1-1 gün⁻¹ iken K_{sm} değerleri de 0,0001-0,8 g/L'dir.

6.4. İçsel Solunum Kinetiği

Mikroorganizmaların içsel solunum (ölüm) hızı denklem (6.4) ile ifade edilmektedir.

$$\frac{dX}{dt} = -k_d X \quad (6.4)$$

k_d : ölüm hızı sabiti, gün⁻¹

Denklem (6.4) düzenlenerek, (6.5) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{dX}{X} = -k_d dt \quad (6.5)$$

Denklem (6.5)'nin integrali alınarak, (6.6) denklemi elde edilmektedir.

$$X = X_0 e^{-k_d t} \quad (6.6)$$

Denklem (6.6)'in ln'i alınarak, (6.7) denklemi elde edilmektedir.

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = -k_d t \quad (6.7)$$

pH kontrollü metanojenizasyonda gözlenen k_d katsayıları (6.7) denklemine göre hesaplanarak Çizelge 6.3'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 : Fermentasyon ve Çürütme kademelerinde gözlenen ölüm hızları

Kademe	Çalışma Türü	% KM	k_d (gün ⁻¹)
Fermentasyon	pH kontrolsüz	2,5	0,016
		5	0,016
	pH kontrollü	1,5	0,016
		2,5	0,016
Çürütme	pH kontrollü	2	0,015
		4	0,015

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

%2,5 ve %5'lik katı madde konsantrasyonlarında pH kontrolsüz olarak gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesi boyunca ortalama pH değerleri sırasıyla 3,65 ve 3,83 olarak gözlenmiştir. Ç.KOI'de gözlenen %50 (%2,5 KM) ve %56 (%5 KM)'lık artışla, düşük pH'a rağmen istenilen verimde olmasa da partiküler KOİ'nin hidroliz ile Ç.KOI'ye dönüştürüldüğü gözlenmiştir. Her iki KM oranında da Ç.KOI'de gözlenen artışa rağmen, Ç.KOI içerisindeki UYA oranı 0,11 (%2,5 KM) ve 0,15 (%5 KM)'te kaldığından dolayı, fermentasyon kademesi istenilen verimde gerçekleştirilememiş, UYA yerine etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin üretildiği gözlenmiştir. %2,5 ve %5'lik KM'de sırasıyla 0,15 L ve 0,49 L gaz üretilmiştir. Giderilen TUKM başına üretilen gaz miktarları ise 0,082 L (%2,5 KM) ve 0,092 L (%5 KM) olarak hesaplanmıştır. pH kontrolsüz olarak gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde, Ç.KOI artış oranı, Ç.KOI'nin UYA'ya dönüşüm oranı ve giderilen TUKM başına üretilen gaz oranları, çalışmanın yürütüldüğü her iki katı madde konsantrasyonunda da birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir.

%1,5 ve %2,5'lik katı madde konsantrasyonlarında pH kontrollü olarak gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesi boyunca ortalama pH değerleri sırasıyla 5,34 ve 5,29 olarak gözlenmiştir. Ç.KOI'de gözlenen %117 (%1,5 KM) ve %146 (%2,5 KM)'lık artışla, partiküler KOİ'nin hidroliz ile Ç.KOI'ye iyi bir verimde dönüştürüldüğü gözlenmiştir. Her iki KM oranında da Ç.KOI içerisindeki UYA oranı 0,72 (%1,5 KM) ve 0,47 (%2,5 KM)'ye yükseldiğinden dolayı, UYA üretilmiş ve fermentasyon kademesi istenilen verimde gerçekleştirilmiştir. %1,5 ve %2,5'lik KM'de sırasıyla 0,53 L ve 0,62 L gaz üretilmiştir. Giderilen TUKM başına üretilen gaz miktarları ise 0,431 L (%1,5 KM) ve 0,239 L (%2,5 KM) olarak hesaplanmıştır. pH kontrollü olarak gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde, Ç.KOI artış oranı, Ç.KOI'nin UYA'ya dönüşüm oranı ve giderilen TUKM başına üretilen gaz oranları, çalışmanın yürütüldüğü her iki katı madde konsantrasyonunda da birbirinden çok farklı sonuçlar vermiştir. Artan KM miktarı ile

birlikte, partiküler substratın çözünmüş substrata dönüşme oranı da artmıştır. Ancak artan çözünmüş substrat miktarı ile birlikte UYA üretimi ve gaz üretimi inhibe olarak azalmıştır.

pH kontrolsüz hidroliz ve fermentasyon kademesi ile pH kontrollü hidroliz ve fermentasyon kademesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; pH kontrollü olarak yürütülen çalışmada Ç.KOI artış oranı, Ç.KOI'nin UYA'ya dönüşüm oranı ve giderilen TUKM başına üretilen gaz oranları pH kontrolsüz olarak yürütülen çalışmaya göre çok daha yüksek olmaktadır. Hidroliz ve fermentasyon kademesi sonrasında, metan üretimi de isteniyorsa çalışmanın pH kontrollü olarak yürütülmesi daha avantajlı olacaktır. Ç.KOI içerisindeki UYA oranının yüksek olmasının, UYA içerisindeki asetat oranının da yüksek olmasının, bir sonraki safha olan metan üreten fazın verimini arttırması beklendiğinden dolayı, hidroliz ve fermentasyon kademesinin işletme pH aralığı asetat üretimine uygun olarak seçilmelidir.

%2 ve %4'lük katı madde konsantrasyonlarında pH kontrollü olarak gerçekleştirilen çürütme kademesi boyunca ortalama pH değerleri sırasıyla 7,08 ve 7,00 olarak gözlenmiştir. Ç.KOI'de gözlenen %69 (%2 KM) ve %69 (%4 KM)'lik artışla, bir önceki adımda düşük pH nedeniyle istenilen verimde gerçekleşemeyen hidroliz kademesinin gerçekleşmeye devam ettiği gözlenmiştir. Her iki KM oranında da Ç.KOI içerisindeki UYA oranı 0,83 (%2 KM) ve 0,80 (%4 KM)'e yükseldiğinden dolayı, bir önceki adımda düşük pH nedeniyle istenilen verimde gerçekleşemeyen fermentasyon kademesinin gerçekleşmeye devam ettiği gözlenmiştir. %2 ve %4'lük KM'de sırasıyla 0,71 L ve 0,57 L gaz üretilmiştir. Giderilen TUKM başına üretilen gaz miktarları ise 0,262 L (%2 KM) ve 0,136 L (%4 KM) olarak hesaplanmıştır. pH kontrollü olarak gerçekleştirilen çürütme kademesinde, Ç.KOI artış oranı ve Ç.KOI'nin UYA'ya dönüşüm oranı çalışmanın yürütüldüğü her iki katı madde konsantrasyonunda da birbirine çok yakın sonuçlar verirken, giderilen TUKM başına üretilen gaz oranları birbirinden çok farklı sonuçlar vermiştir. Artan KM miktarı ile birlikte, partiküler substratın çözünmüş substrata dönüşme oranı ile çözünmüş substratın UYA'ya dönüşüm oranı değişmemiştir. Artan KM miktarı ile birlikte, çözünmüş substrat azalma oranları ve giderilen TUKM başına üretilen gaz oranları farklı olmasına rağmen, azalan çözünmüş substrat miktarına karşılık üretilen gaz miktarı oranı aynı kalmaktadır.

Literatürde yemek ve mutfak atıkları için hidroliz hızı 0,34-0,55 gün⁻¹'dir. pH kontrolsüz ve pH kontrollü hidroliz için hesaplanan hidroliz hızı (k) ise sırasıyla 0,03-0,056 ve 0,112-0,136 gün⁻¹'dir. Asit üretimi kinetiği ve metan üretimi kinetiğini yansıtan katsayılar çıkartılamamıştır. Bunun nedeni, çalışmanın hidroliz ve fermentasyon kısımlarında uygulanmış olan Substrat/Aşı = 80/20 (TKM/TKM) ile çürütme kısmında uygulanmış olan Substrat/Aşı = 60/40 (TKM/TKM) oranları nedeniyle aşırı yüklenme ve düşük aşı aktivitesi nedeniyle muhtemel substrat inhibisyonu yaşanmıştır.

Literatürde kaynağında ayrılan organik katı atık için verilen aralık 0,3-0,4L CH₄/gTUKM_{giderilen}'dir. Üretilen metan miktarları %2 KM'de 0,136L CH₄/gTUKM_{giderilen} ve %4 KM'de 0,035L CH₄/gTUKM_{giderilen} olarak gerçekleşmiştir. Artan katı madde oranı ile birlikte üretilen metan miktarının da artması beklenirken, %4KM'de gerçekleştirilen çürütmede tüm reaktörlerde substrat inhibisyonunun gerçekleştiği görülmüştür. Metan dönüşüm miktarı literatür aralığının altında kalmıştır.

Daha düşük Substrat/Aşı oranlarında çalışmanın tekrarlanması ile substrat inhibisyonu etkisinin görülmesi, termofilik şartlarda çalışmanın tekrarlanması ile mezofilik şartlarla mukayese edilebilmesi, farklı sustrat türleri ile ortak arıtma (co-digestion) denemelerinin yapılması önerilmektedir. Ayrıca farklı aşılardan (granüler, yüksek UKM/TKM oranlı floküler aşı) etkisinin araştırılması, karanlık ortam fermentasyonu ile H₂ üretim potansiyelinin de araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Cecchi, F., Pavan, P. and Mata-Alvarez, J.,** 1997. Kinetic study of the thermophilic anaerobic digestion of the fresh and pre-composted mechanically selected organic fraction of MSW. *Journal of Environmental Sciences and Health* **A32**(1), 195-213.
- De Baere, L.,** 1999. Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the art. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **1**, pp. 290-299, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- De Baere, L. And Boelens, J.,** 1999. The treatment of greyand mixed solid waste by means of anaerobic digestion: future developopments. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **2**, pp. 302-305, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Edelmann, W., Joss, A. And Engeli H.,** 1999. Two-step anaerobic digestion of organic solid wastes. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **2**, pp. 150-153, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Farneti, A., Cozzolino, C., Bolzonella, D., Innocenti, L. and Cecchi, C.,** 1999. Semi-dry anaerobic digestion of OFMSW: the new full-scale plant of Verona (Italy). In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **2**, pp. 330-333, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Garcia, J.L. and Schalk, P.,** 1999. Biopercolat-procedure. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **2**, pp. 298-301, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Ghosh, S., Henry, M.P., Sajjad, A, Mensinger, M.C. and Arora, J.L.,** 1999. Pilot-scale gasification of MSW by high-rate and two-phase anaerobic digestion. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **1**, pp. 83-90, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Kim, J.K., Han, G.H., Oh, B.R., Chun, Y.N., Eom, C.Y. and Kim, S.W.,** 2007. Volumetric scale-up of a three stage fermentation system for food waste treatment. *Bioresource Technology*, **99**, 4394-4399.
- Kübler, H. and Wild, M.,** 1992. The BTA-process high rate biomethanization of biogenous solid wastes. In *Proc. Int. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Venice, 14-17 April, 1992* (Eds. F. Cecchi, J. Mata-Alvarez and F.G. Pohland), pp. 535-538, Int. Assoc. on Wat. Poll. Res. and Control.

- Liu, C.-F., Yuan, X.-Z., Zeng, G.-M., Li, W.-W. and Li, J.,** 2007. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, **99**, 882-888.
- Liu, T. and Ghosh, S.,** 1997. Phase separation during anaerobic fermentation of solid substrates in an innovative plug-flow reactor. In *Proc. 8th Int. Conf. on Anaerobic Dig., Sendai, May 25-29, 1997*, vol. **2**, pp. 17-24, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Madokoro, T., Ueno, M., Moro, M., Yamamoto, T. and Shibata, T.,** 1999. Anaerobic digestion system with micro-filtration membrane for kitchen refuse. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **2**, pp. 105-108, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Mata-Alvarez, J.,** 2003. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste, IWA Publishing, UK.
- Mora-Naranjo, N., Meima, J.A., Haarstrick, A. and Hempel, D.C.,** 2004. Modelling and experimental investigation of environmental influences on the acetate and methane formation in solid waste. *Waste Management*, **24**, 763-773.
- Öztürk, İ.,** 2007. Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, Su vakfi, İstanbul.
- Pavan, P., Battistoni, P., Cecchi, F. and Mata-Alvarez, J.,** 1999. Two-phase anaerobic digestion of source-sorted OFMSW: performance and kinetic study. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **1**, pp. 91-98, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Pavan, P., Battistoni, P., Mata-Alvarez, J. and Cecchi, F.,** 2000. Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. *Wat. Sci. Tech.* **41**(3), 64-72.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,** 2005. 21st edition, (Eds. A.D. Eaton, L.S. Clesceri, E.W. Rice and A.E. Greenberg) American Public Health Association, Washington DC, USA.
- ten Brummeler, E.,** 1999. Full scale experience with the Biocell-process. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **1**, pp. 308-314, Int. Assoc. on Wat. Qual.
- Traverso, P., Pavan, P., Bolzonella, D., Innocenti, L., Cecchi, F. and Mata-Alvarez, J.,** 2000. Acidogenic fermentation of source separated mixtures of vegetables and fruits wasted from supermarkets. *Biodegradation*, **11**, 407-414.
- Trösch, W. and Niemann, V.,** 1999. Biological waste treatment using the thermophilic schwarting-Uhde process. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **2**, pp. 338-341, Int. Assoc. on Wat. Qual.

- Ubay, G.**, 1993. Evsel Atıksuların Havasız Biyolojik Arıtımı Üzerine Bir Araştırma, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vavilin, V.A, Fernandez, B., Palatsi, J. and Flotats, X.**, 2008. Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*, **28**, 939-951.
- Wellinger, A., Widmer, C. and Schalk, P.**, 1999. Percolation - a new process to treat MSW. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, Barcelona, June 15-17, 1999* (Eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. **1**, pp. 315-322, Int. Assoc. on Wat. Qual.

EKLER

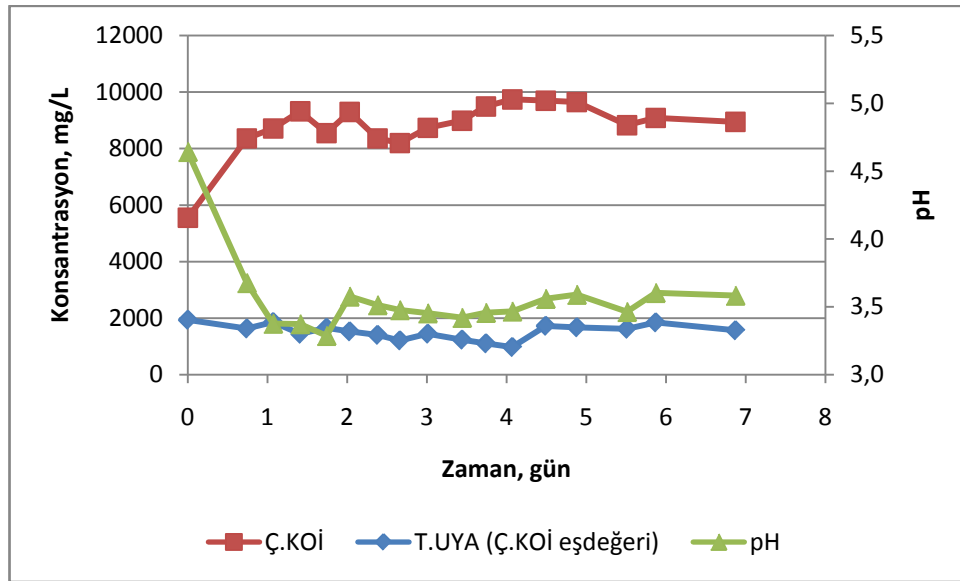
EK A. DENEYSEL VERİLER

A.1. Hidroliz ve Fermentasyon

Hidroliz ve Fermentasyon kademesi, pH kontrolsüz olarak %2,5 ve %5'lik katı madde konsantrasyonlarında, pH kontrollü olarak da %1,5 ve %2,5'lik katı madde konsantrasyonlarında olmak üzere iki farklı şekilde yürütülmüştür.

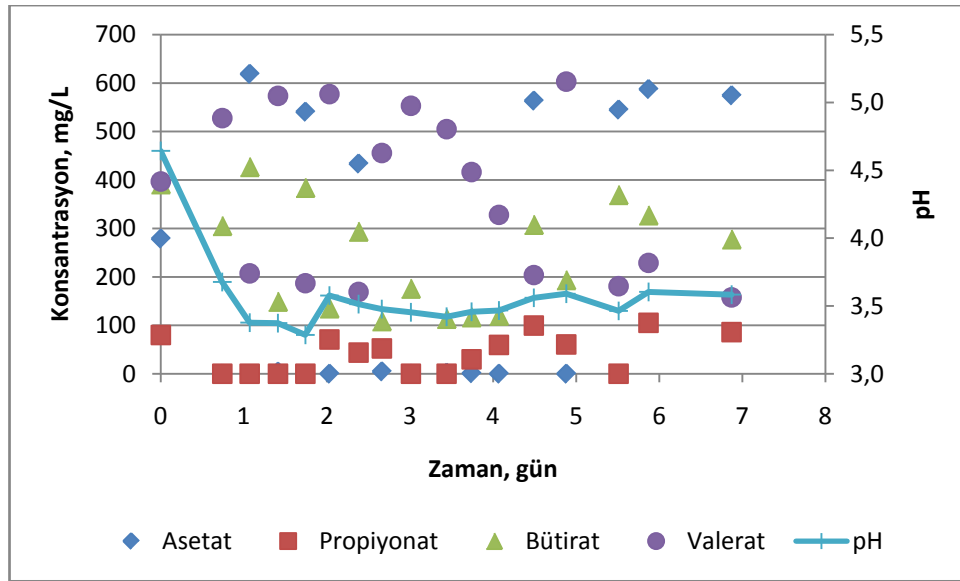
A.1.1. pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon

07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılansarak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimleri Şekil A.1'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.2'de verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $3,56 \pm 0,30$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH'a rağmen, Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %76'lık artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,35 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,18 \pm 0,05$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde



Şekil A.1 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılansarak reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi

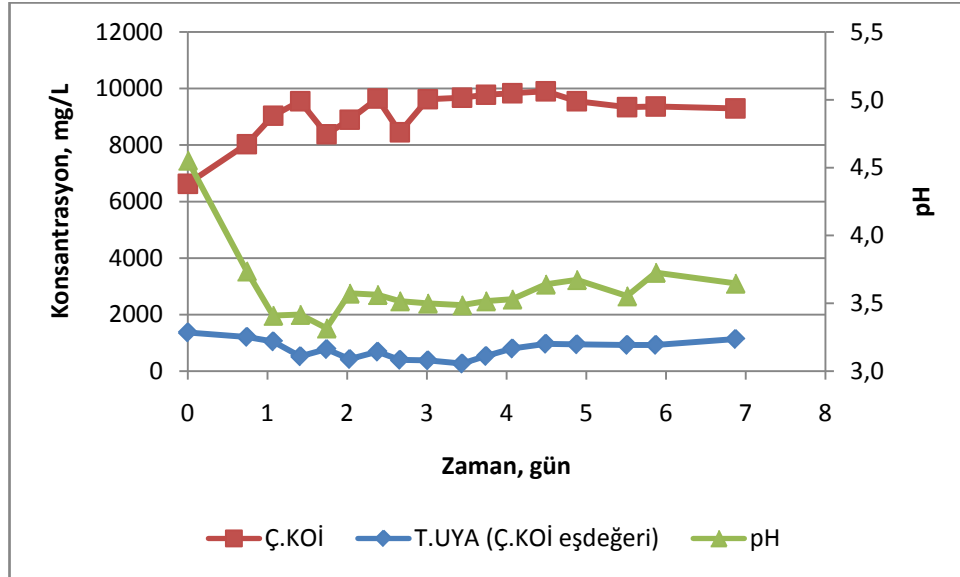
baskın olan UYA türleri, bütirat, valerat ve asetat iken propiyonat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %52'lik, bütiratin da %25'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksite oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOİ'de başlangıca oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOİ içindeki UYA oranının ortalama $0,18 \pm 0,05$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (Traverso ve diğ., 2000).



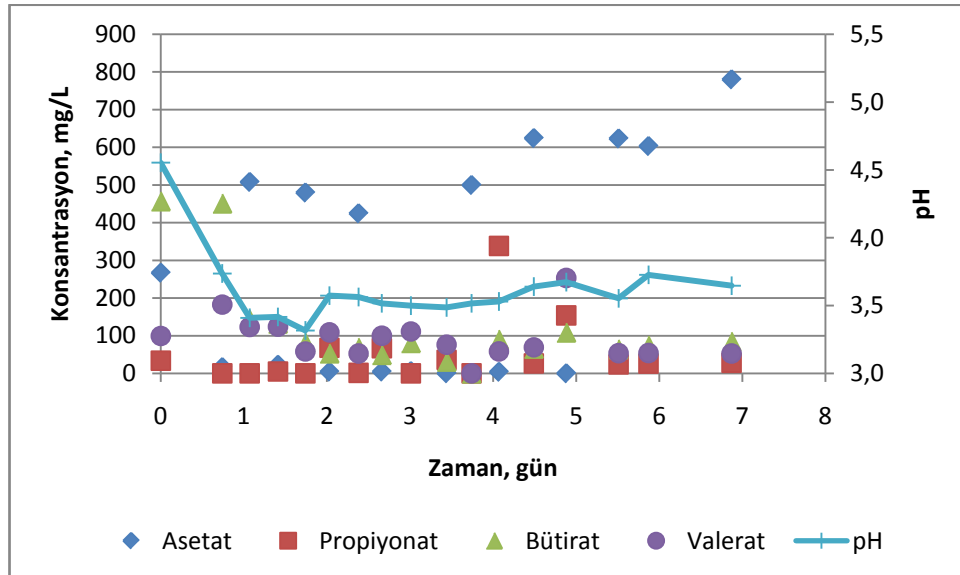
Şekil A.2 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因arak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.3'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.4'te verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $3,61 \pm 0,27$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH'a rağmen, Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren gözlenen %49'luk artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOİ üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,21 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,09 \pm 0,04$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %83'lük oranı ile baskın hale

gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıç oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOI içindeki UYA oranının ortalama $0,09 \pm 0,045$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (Traverso ve diğ., 2000).

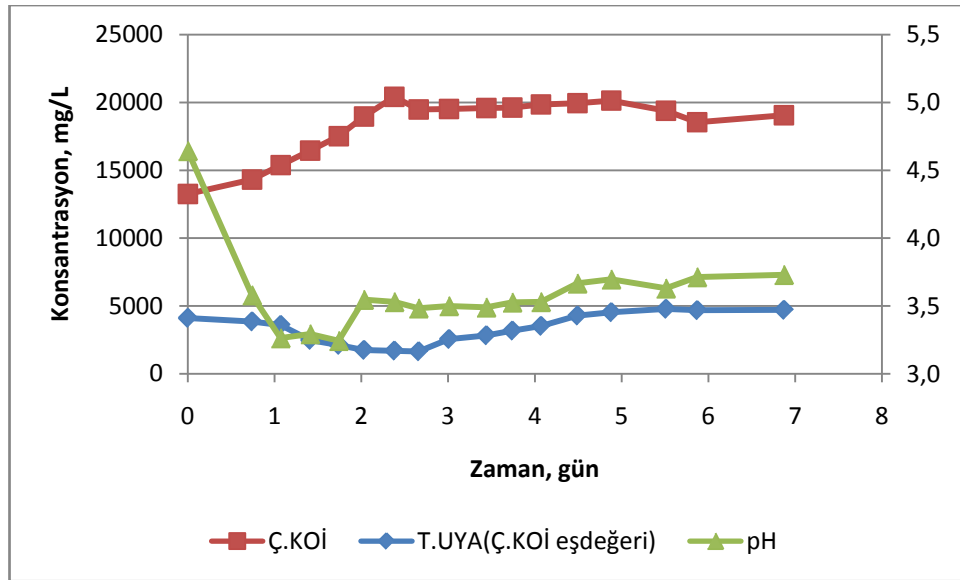


Şekil A.3 : 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi

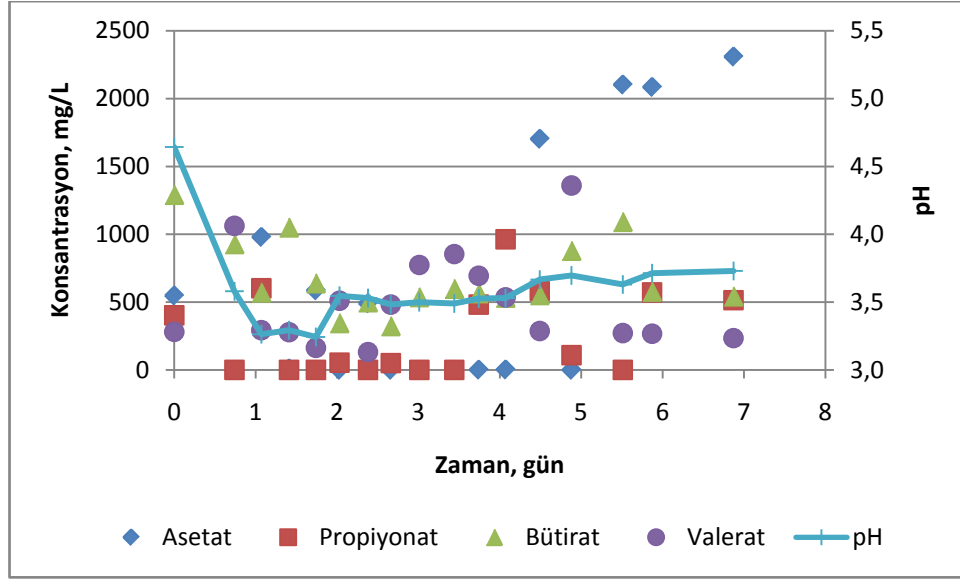


Şekil A.4 : 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılansarak %5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.5'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.6'da verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $3,59 \pm 0,31$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH'a rağmen, Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %54'lük artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,31 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,19 \pm 0,07$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %64'lük, bütiratın %15'lik, propiyonatın da %14'lük oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıca oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOI içindeki UYA oranının ortalama $0,19 \pm 0,07$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (Traverso ve diğ., 2000).

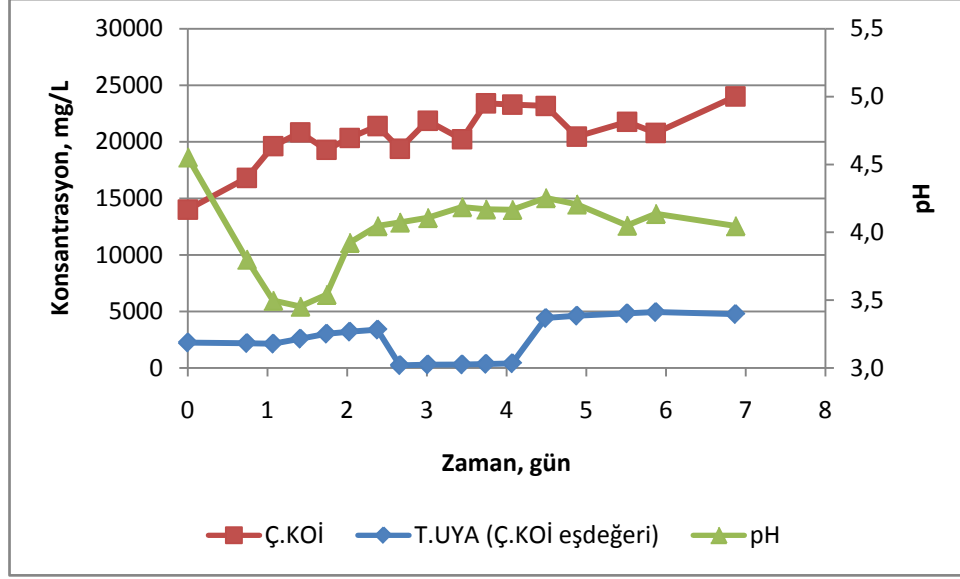


Şekil A.5 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılansarak reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi

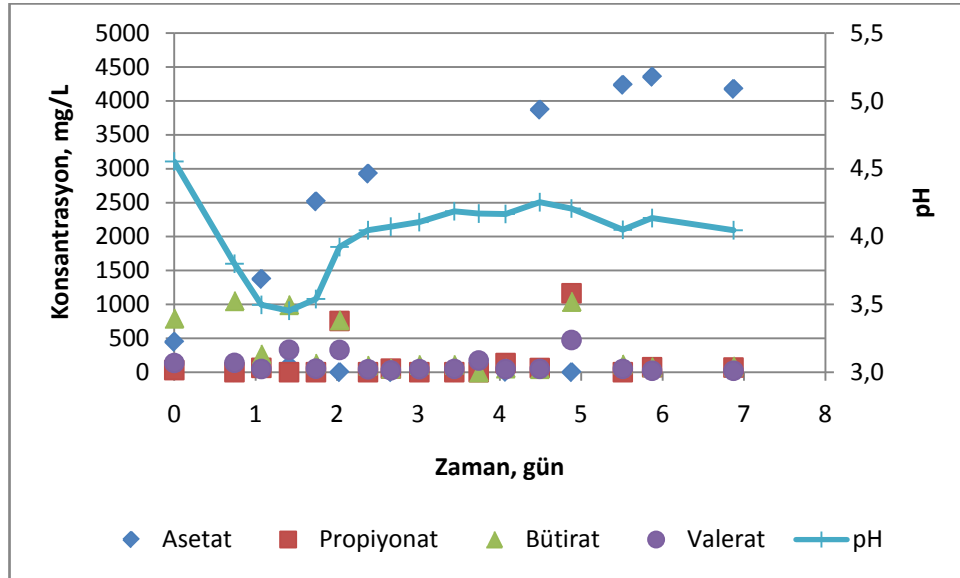


Şekil A.6 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因arak %5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.7'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.8'de verilmiştir. Reaktörde hidroliz ve fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $4,01 \pm 0,29$ aralığında kalmıştır. Reaktörde azalan pH'a rağmen, Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %72'lik artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,16 iken, azalan pH nedeniyle hidroliz ve fermentasyon süresince $0,13 \pm 0,08$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %96'lık oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (**Kim ve diğ., 2007**). Ç.KOI'de başlangıca oranla gözlenen artış miktarı hidroliz ve fermentasyon kademesinin gerçekleştiğini, ancak Ç.KOI içindeki UYA oranının ortalama $0,13 \pm 0,08$ aralığında kalması etanol, laktik asit vb. indirgenmiş ara ürünlerin UYA yerine üretildiğini göstermektedir (**Traverso ve diğ., 2000**).



Şekil A.7 : 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi

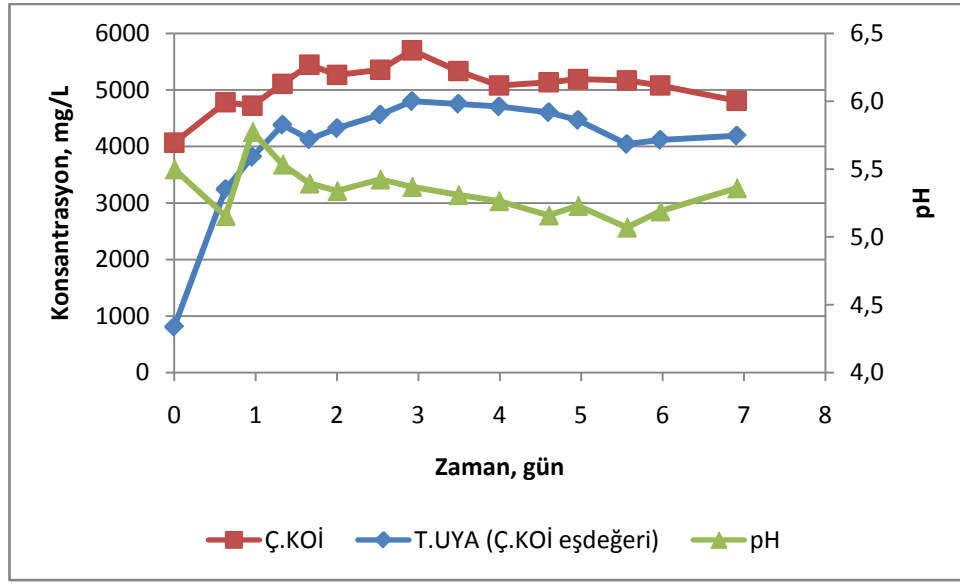


Şekil A.8 : 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

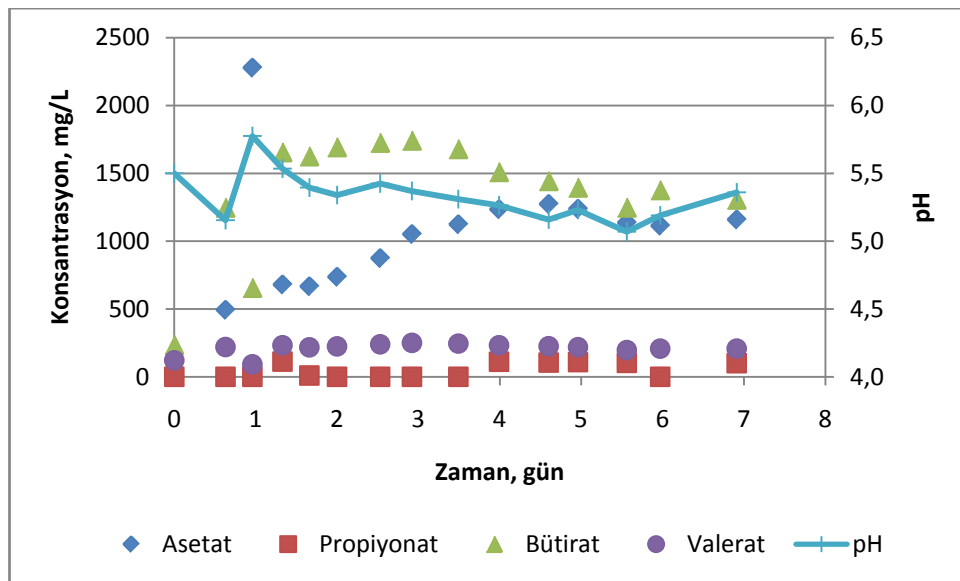
A.1.2. pH Kontrollü Fermentasyon

07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因arak %1,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimleri Şekil A.9'da, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.10'da verilmiştir. Reaktörde fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,34 \pm 0,18$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren gözlenen %40'lık artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi

ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,20 iken, fermentasyon süresince $0,79 \pm 0,17$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat, asetat ve valerat iken propiyonat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde bütiratın %47'lik, asetatın da %42'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksite oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıca oranla gözlenen artış ile Ç.KOI içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında



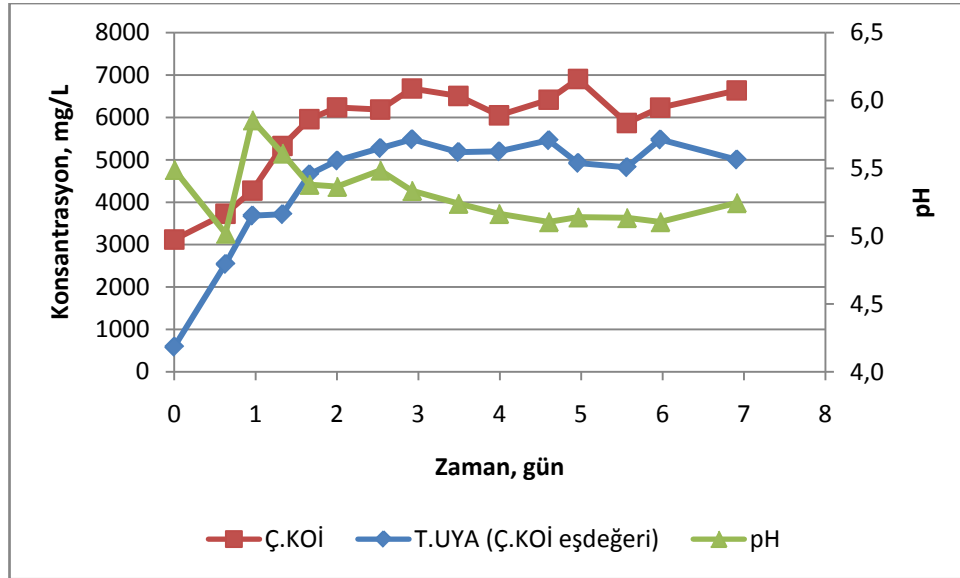
Şekil A.9 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi



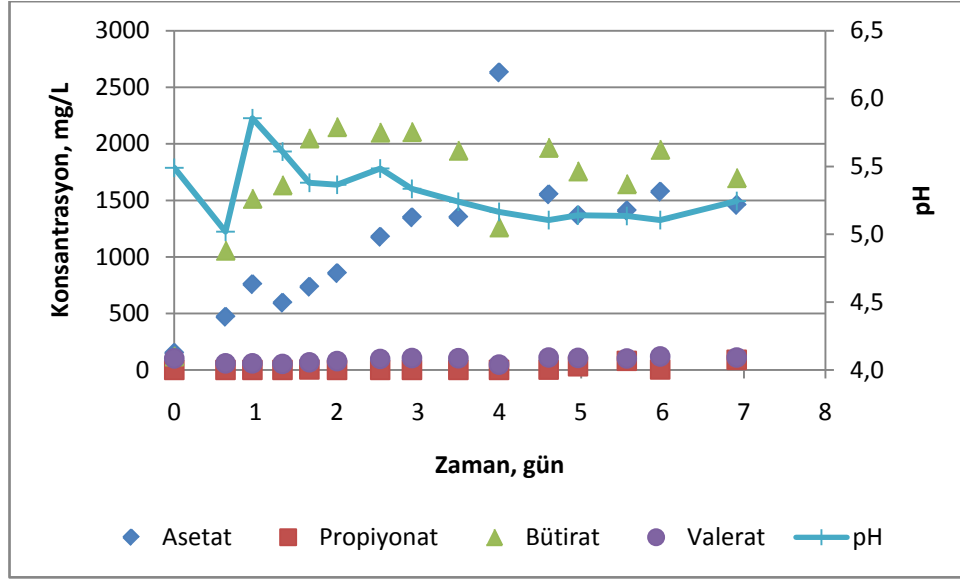
Şekil A.10 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.

12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılanaarak %1,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.11'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.12'de verilmiştir. Reaktörde fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,31 \pm 0,23$ aralığında kalmıştır. Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %121'lik artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,19 iken, fermentasyon süresince $0,76 \pm 0,17$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, asetat, bütirat ve valerat iken propiyonat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde bütiratın %51'lik, asetatın da %43'lük oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıca oranla gözlenen artış ile Ç.KOI içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.

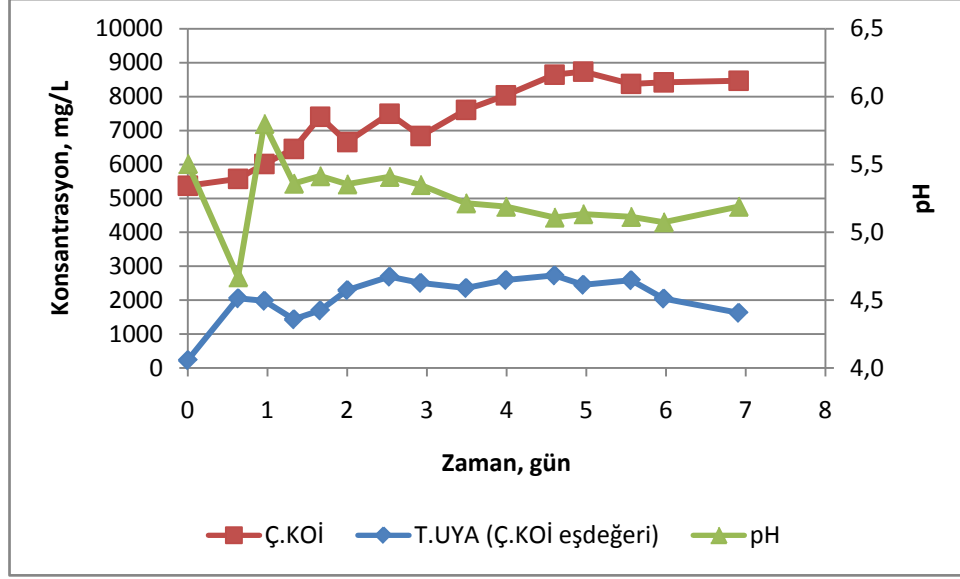


Şekil A.11 : 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi

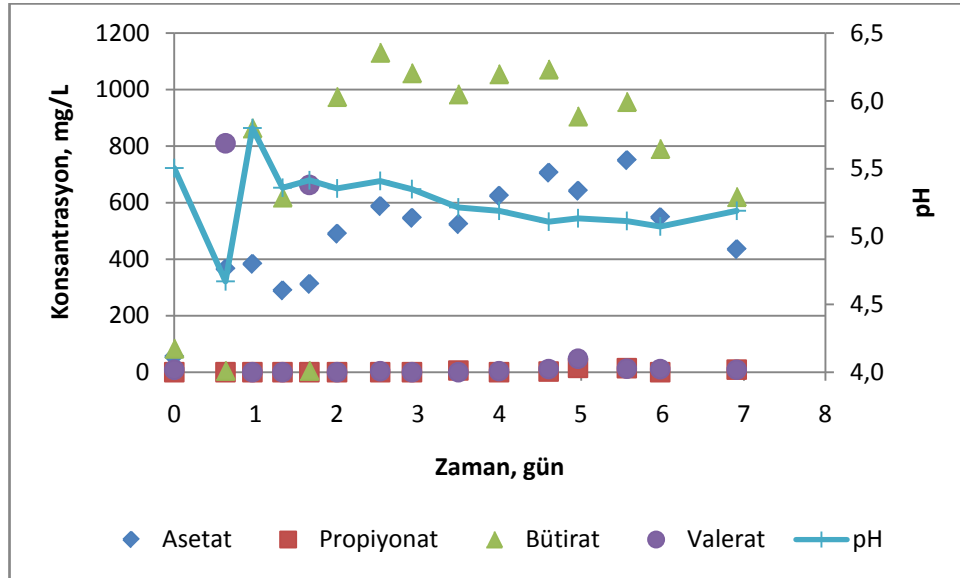


Şekil A.12 : 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因arak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.13'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.14'te verilmiştir. Reaktörde fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,26 \pm 0,25$ aralığında kalmıştır. Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %63'lük artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,04 iken, fermentasyon süresince $0,28 \pm 0,09$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde bütiratın %58'lik, asetatın da %41'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOI'de başlangıça oranla gözlenen artış ile Ç.KOI içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.



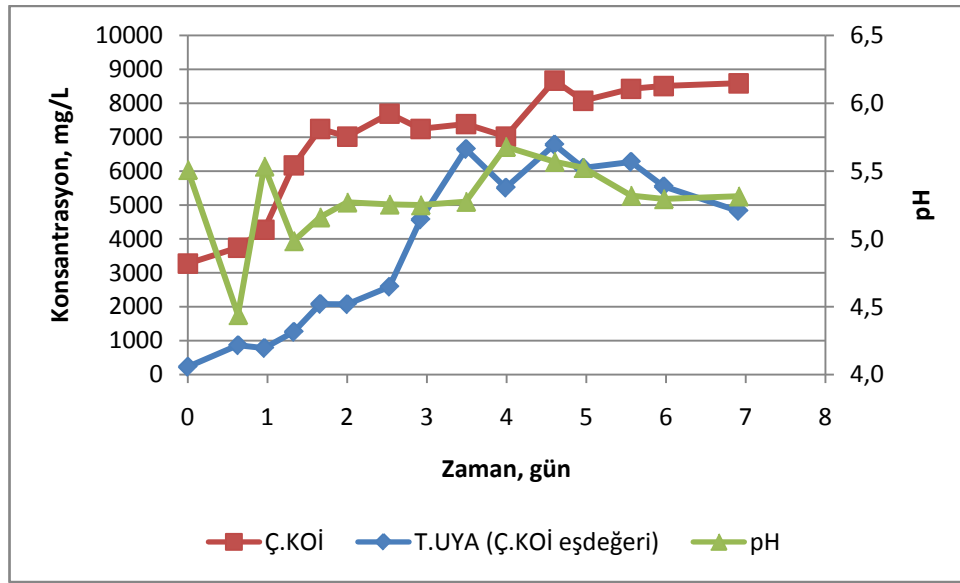
Şekil A.13 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi



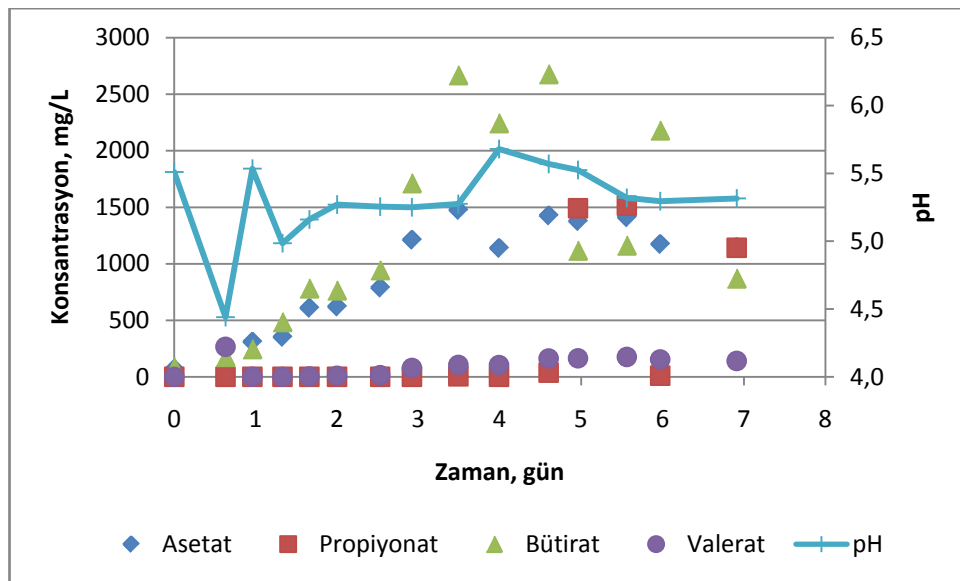
Şekil A.14 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因arak %2,5'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen hidroliz ve fermentasyon kademesinde gözlenen Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimleri Şekil A.15'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.16'da verilmiştir. Reaktörde fermentasyon süresince gözlenen ortalama pH $5,29 \pm 0,30$ aralığında kalmıştır. Ç.KOI'de başlangıçtan itibaren gözlenen %165'lik artış, partiküler KOİ'nin hidrolizi ile Ç.KOI üretimini göstermektedir. Başlangıçta Ç.KOI içindeki UYA oranı 0,07 iken, fermentasyon süresince $0,49 \pm 0,27$ aralığında kalmıştır. Başlangıç anında

reaktörde baskın olan UYA türleri, bütirat ve asetat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 7. gün sonunda ise reaktörde asetatın %35'lik, propiyonatın %35'lik, bütiratın da %26'lık oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). Ç.KOİ'de başlangıça oranla gözlenen artış ile Ç.KOİ içindeki indirgenmiş ara ürünlerin (UYA) oranında gözlenen artış hidroliz ve fermentasyon kademesinin istenilen verimde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil A.15 : 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi

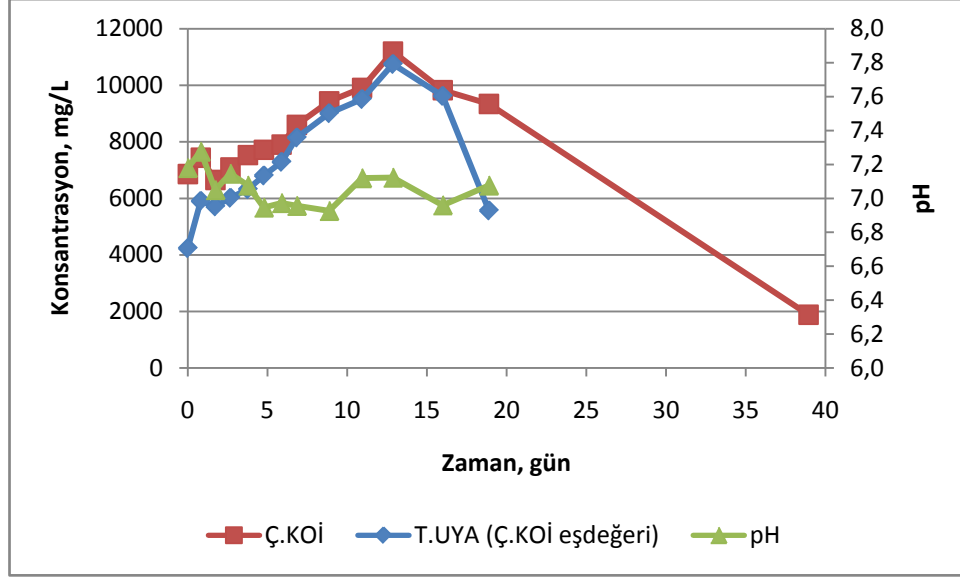


Şekil A.16 : 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

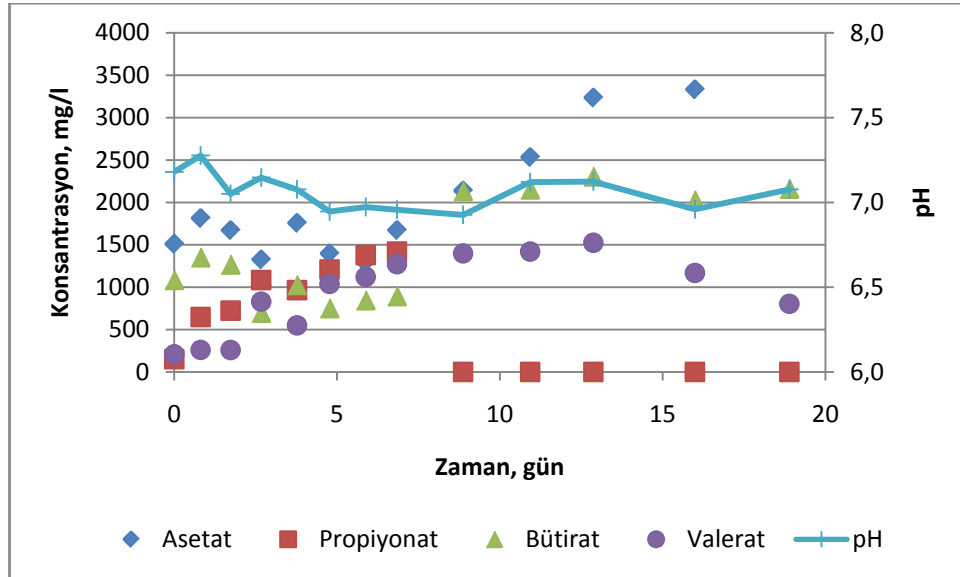
A.2. Çürütme

Çürütme kademesi, %2 ve %4'lük katı madde konsantrasyonlarında pH kontrollü olarak yürütülmüştür.

07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılanarak %2'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.17'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.18'de verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $7,06 \pm 0,11$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,62 iken, çürütme süresince $0,80 \pm 0,13$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren 13. gün sonuna kadar görülen %63'lük artış, T.UYA'da da başlangıçtan itibaren 13. gün sonuna kadar görülen %154'lük artış bir önceki adımda düşük pH nedeniyle yeterli verimde tamamlanamayan hidroliz ve fermentasyon reaksiyonlarının (Şekil A.1) çürütme kademesinde gerçekleşmeye devam ettiğini göstermektedir. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, asetat ve bütirat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 16. gün sonunda ise reaktörde asetatın %51'lik, bütiratın da %31'lik oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). 17-19. günler arasında asetatın tamamen tüketilmesi ile bütiratın baskın hale gelmesi de asetat kullanarak metan üreten arkelerin faaliyetlerini göstermektedir. 13. gün sonuna kadar reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından fazla olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde birikim görülmektedir. 14. günden itibaren ise reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından az olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde azalış görülmektedir. T.UYA'da 14-19. günler arasında görülen %61'lik azalış, Ç.KOİ'de de 14. günden itibaren görülen %83'lük azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir.



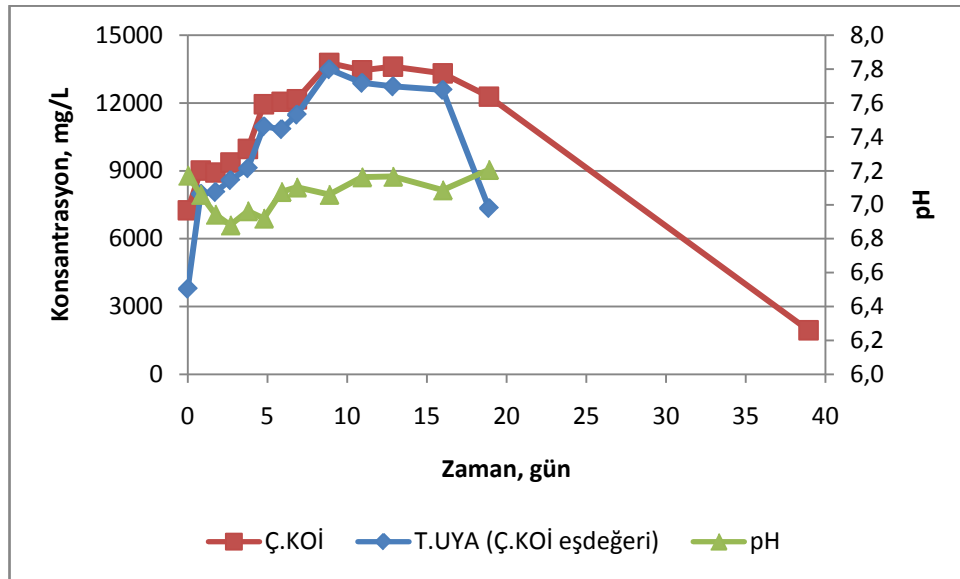
Şekil A.17 : 07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi



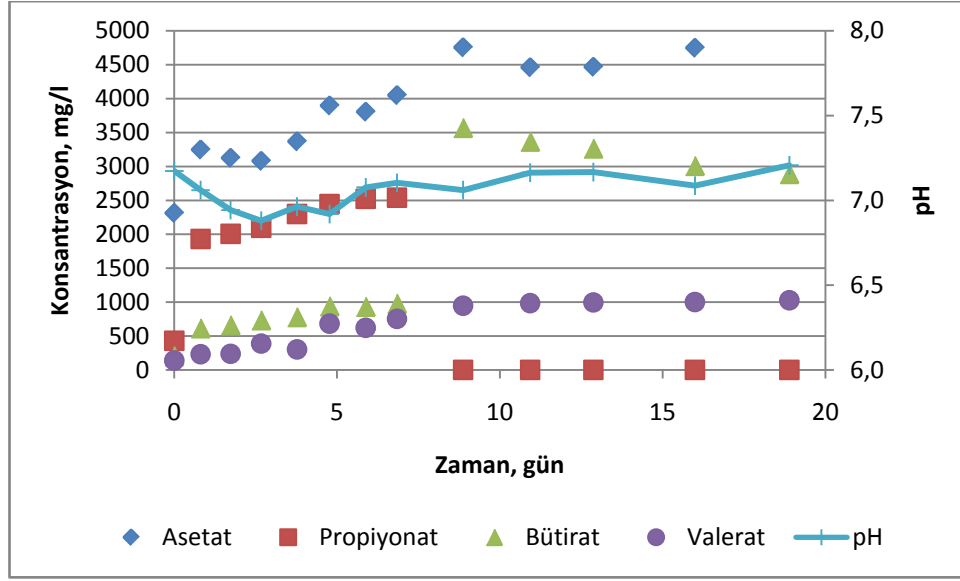
Şekil A.18 : 07.11.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

12.12.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因arak %2'lik katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimleri Şekil A.19'da, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.20'de verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $7,06 \pm 0,11$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,52 iken, çürütme süresince $0,87 \pm 0,14$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren 13. gün sonuna kadar görülen %90'lık artış, T.UYA'da da başlangıçtan itibaren 9. gün sonuna kadar görülen %257'lik artış bir önceki adımda

düşük pH nedeniyle yeterli verimde tamamlanamayan hidroliz ve fermentasyon reaksiyonlarının (Şekil A.3) çürütme kademesinde gerçekleşmeye devam ettiğini göstermektedir. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, asetat ve propiyonat iken bütirat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 16. gün sonunda ise reaktörde asetatın %54'lük, bütiratın da %34'lük oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksite oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). 17-19. günler arasında asetatın tamamen tüketilmesi ile bütiratın baskın hale gelmesi de asetat kullanarak metan üreten arkelerin faaliyetlerini göstermektedir. 13. gün sonuna kadar reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından fazla olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde birikim görülmektedir. 14. günden itibaren ise reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından az olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde azalış görülmektedir. T.UYA'da 10-19. günler arasında görülen %72'lik azalış, Ç.KOI'de de 14. günden itibaren görülen %86'lık azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir.



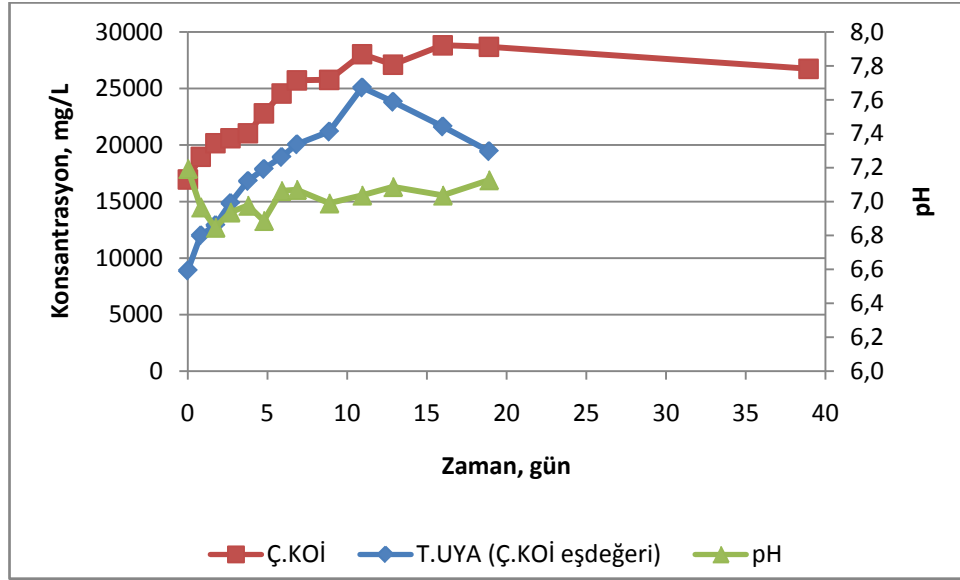
Şekil A.19 : 12.12.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılaman reaktörde Ç.KOI, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimi



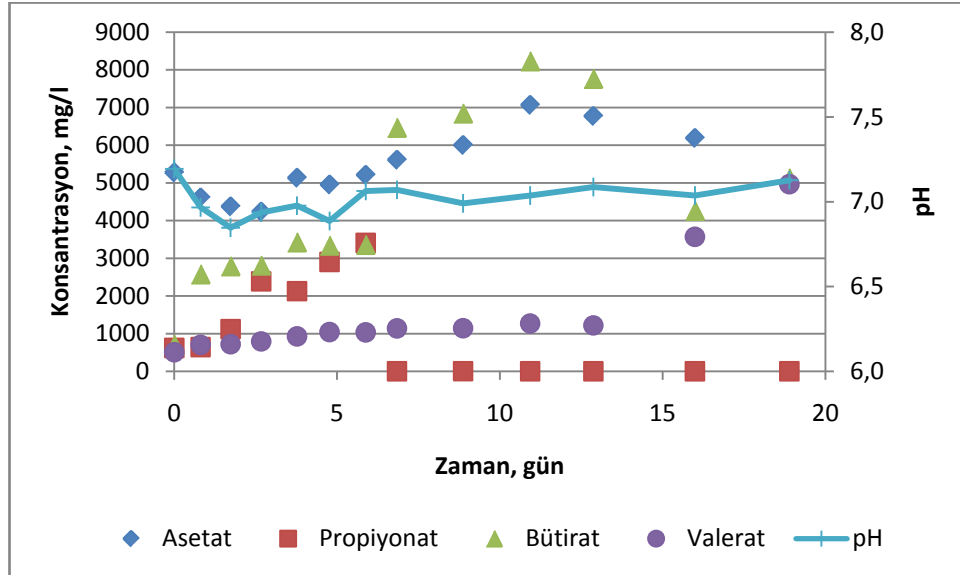
Şekil A.20 : 12.12.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因arak %4'lük katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.21'de, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.22'de verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $7,02 \pm 0,10$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı $0,52$ iken, çürütme süresince $0,74 \pm 0,10$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren 16. gün sonuna kadar görülen %70'lik artış, T.UYA'da da başlangıçtan itibaren 11. gün sonuna kadar görülen %182'lik artış bir önceki adımda düşük pH nedeniyle yeterli verimde tamamlanamayan hidroliz ve fermentasyon reaksiyonlarının (Şekil A.5) çürütme kademesinde gerçekleşmeye devam ettiğini göstermektedir. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, asetat ve bütirat iken propiyonat ve valerat ihmal edilebilir düzeydedir. 16. gün sonunda ise reaktörde asetatın %44'lük, bütiratın da %30'luk oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksit oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). 17-19. günler arasında asetatın tamamen tüketilmesi ile bütirat ve valeratın baskın hale gelmesi de asetat kullanarak metan üreten arkelerin faaliyetlerini göstermektedir. 16. gün sonuna kadar reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından fazla olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde birikim görülmektedir. 17. günden itibaren ise reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün

miktarından az olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde azalış görülmektedir. T.UYA’da 12-19. günler arasında görülen %65’lik azalış, Ç.KOİ’de de 17. günden itibaren görülen %41’lik azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir. Çürütme kademesinin sonlandırılmasında Ç.KOİ konsantrasyonunun 26740 mg/L seviyesinde olması, gaz üretiminin (Şekil 5.40) de düşük kalmasıyla birlikte reaktörde substrat inhibisyonunun yaşandığı görülmektedir.



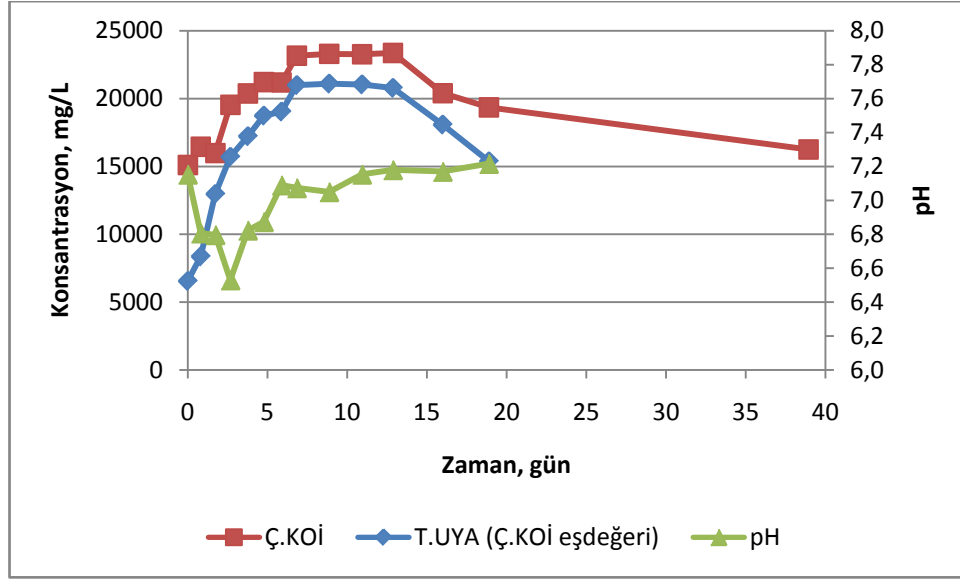
Şekil A.21 : 08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değişimi



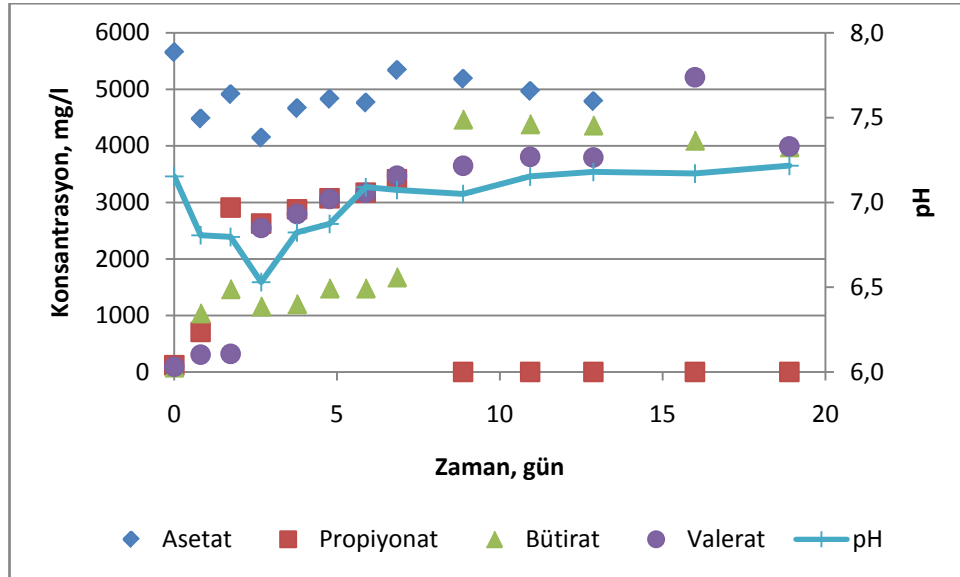
Şekil A.22 : 08.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimi

20.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因arak %4'lük katı madde konsantrasyonunda gerçekleştirilen çürütme kademesinde gözlenen Ç.KOİ, T.UYA

(KOİ) ve pH'ın zamanla değişimleri Şekil A.23'te, UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değişimleri de Şekil A.24'te verilmiştir. Reaktörde çürütme süresince gözlenen ortalama pH $6,99 \pm 0,21$ aralığında kalmıştır. Başlangıçta Ç.KOİ içindeki UYA oranı 0,43 iken, çürütme süresince $0,81 \pm 0,15$ aralığında kalmıştır. Ç.KOİ'de başlangıçtan itibaren 13. gün sonuna kadar görülen %55'lik artış, T.UYA'da da başlangıçtan itibaren 9. gün sonuna kadar görülen %222'lik artış bir önceki adımda düşük pH nedeniyle yeterli verimde tamamlanamayan hidroliz ve fermentasyon reaksiyonlarının (Şekil A.7) çürütme kademesinde gerçekleşmeye devam ettiğini göstermektedir. Başlangıç anında reaktörde baskın olan UYA türleri, asetat iken propiyonat, valerat ve bütirat ihmal edilebilir düzeydedir. 9. gün sonunda ise reaktörde asetatın %39'luk, bütiratın da %34'lük oranı ile baskın hale gelmesi, UYA türlerinin yavaş çoğalan asetojenik bakteriler tarafından asetat, moleküler hidrojen ve karbondioksite oksitlenmiş olduklarını göstermektedir (Kim ve diğ., 2007). 10-19. günler arasında asetatın tamamen tüketilmesi ile bütirat ve valeratın baskın hale gelmesi de asetat kullanarak metan üreten arkelerin faaliyetlerini göstermektedir. 13. gün sonuna kadar reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından fazla olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde birikim görülmektedir. 14. günden itibaren ise reaktörde hidroliz ve fermentasyon sürecinde üretilen ürün miktarı, çürütme sürecinde tüketilen ürün miktarından az olduğundan dolayı çözünmüş ürünlerde azalış görülmektedir. T.UYA'da 10-19. günler arasında görülen %35'lik azalış, Ç.KOİ'de de 14. günden itibaren görülen %35'lik azalış metan arkeleri aracılığıyla gaz üretimini göstermektedir. Çürütme kademesinin sonlandırılmasında Ç.KOİ konsantrasyonunun 16250 mg/L seviyesinde olması, gaz üretiminin (Şekil 5.40) de düşük kalmasıyla birlikte reaktörde substrat inhibisyonunun yaşandığı görülmektedir.



Şekil A.23 : 20.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana reaktörde Ç.KOİ, T.UYA (KOİ) ve pH'nın zamanla değışimi



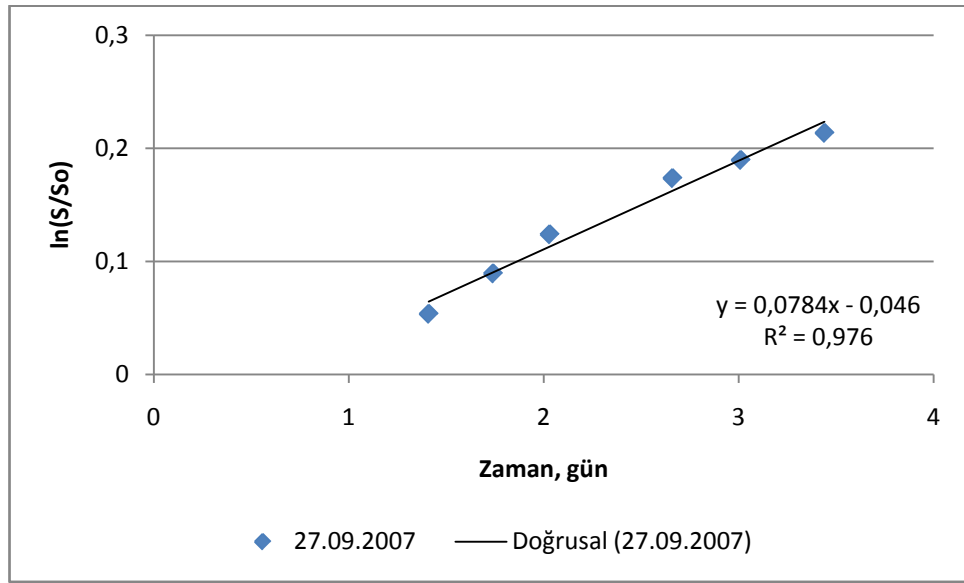
Şekil A.24 : 20.02.2008 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana reaktörde UYA bileşenlerinin pH ve zamanla değışimi

EK B. KİNETİK VERİLER

B.1. Hidroliz Kinetiği

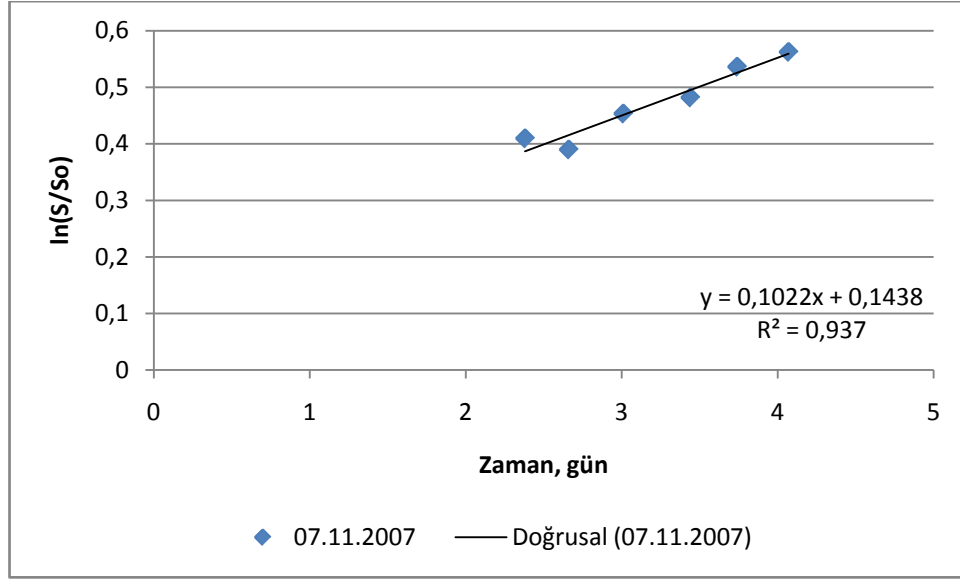
B.1.1. pH Kontrolsüz Hidroliz

27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşılana reaktörde %2,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.1'de verilmiştir.



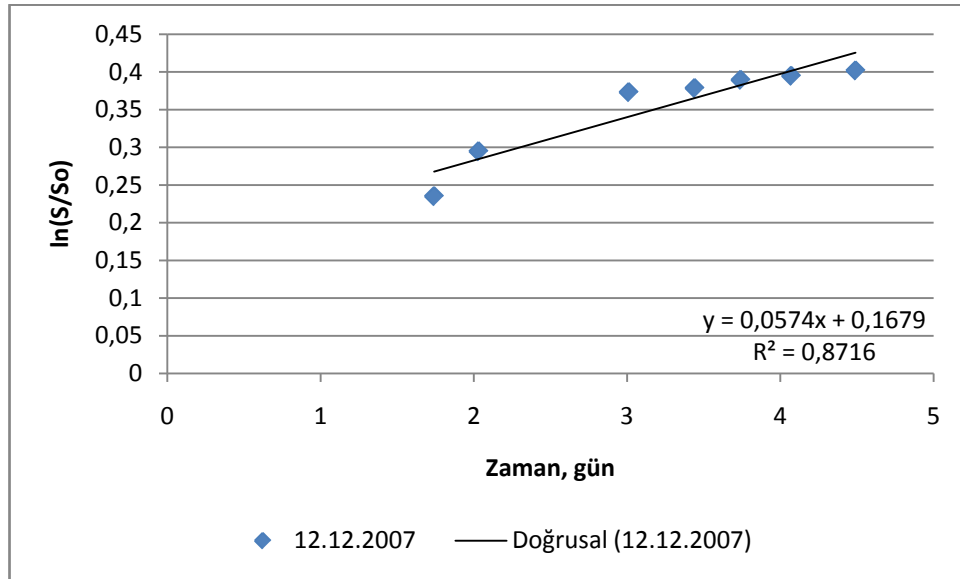
Şekil B.1 : 27.09.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması

07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %2,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.2'de verilmiştir.



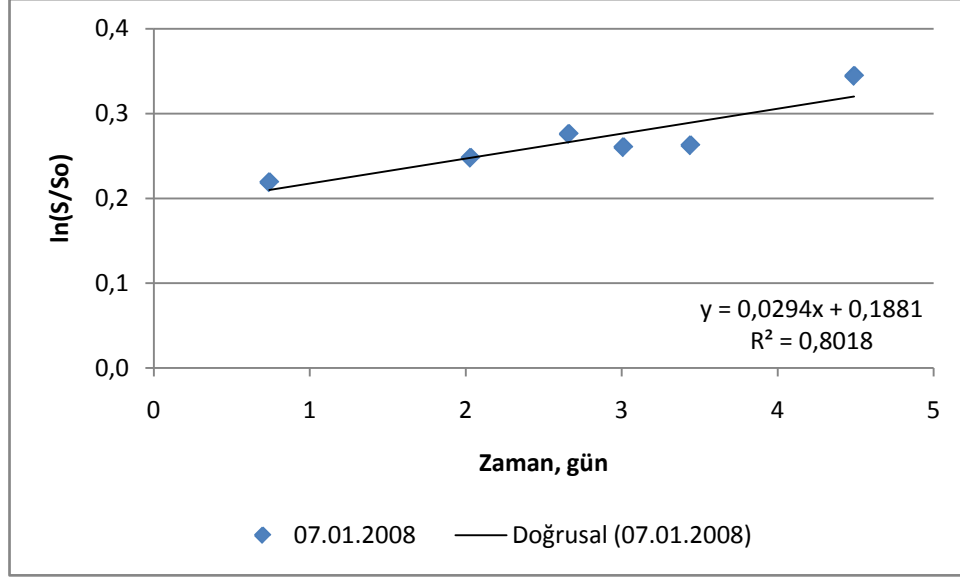
Şekil B.2 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k 'nın hesaplanması

12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %2,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.3'te verilmiştir.



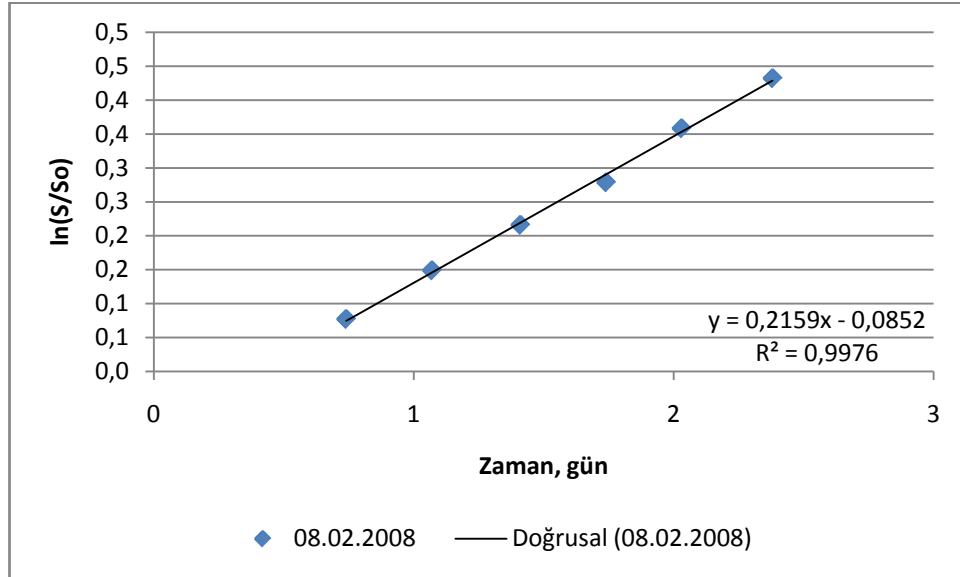
Şekil B.3 : 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k 'nın hesaplanması

07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.4'te verilmiştir.



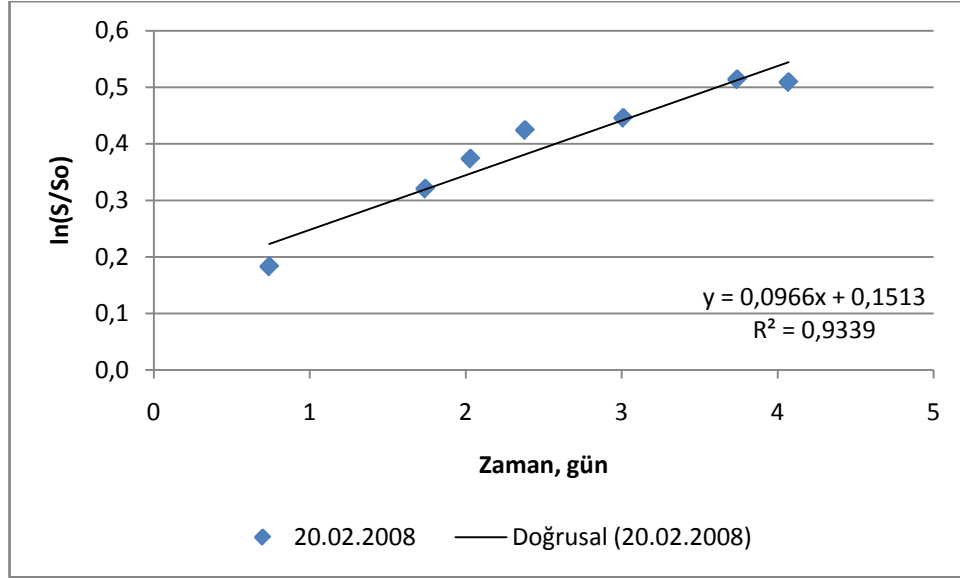
Şekil B.4 : 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k 'nın hesaplanması

08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.5'te verilmiştir.



Şekil B.5 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k 'nın hesaplanması

20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.6'da verilmiştir.



Şekil B.6 : 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşıl原因an reaktörde k 'nın hesaplanması

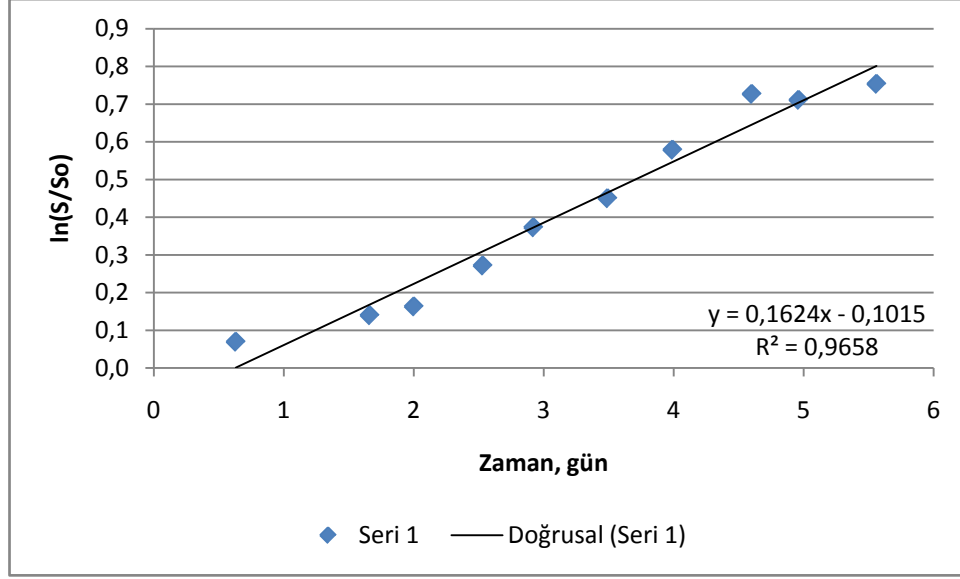
pH kontrolsüz hidrolizde gözlenen k katsayıları Şekil B.1 - Şekil B.6'dan hesaplanarak Çizelge B.1'de gösterilmiştir.

Çizelge B.1 : pH kontrolsüz hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar

Numune Tarihi	% KM	k (gün ⁻¹)	Numune Tarihi	% KM	k (gün ⁻¹)
27.09.2007	2,5	0,08	07.01.2008	5	0,03
07.11.2007		0,10	08.02.2008		0,22
12.12.2007		0,06	20.02.2008		0,15

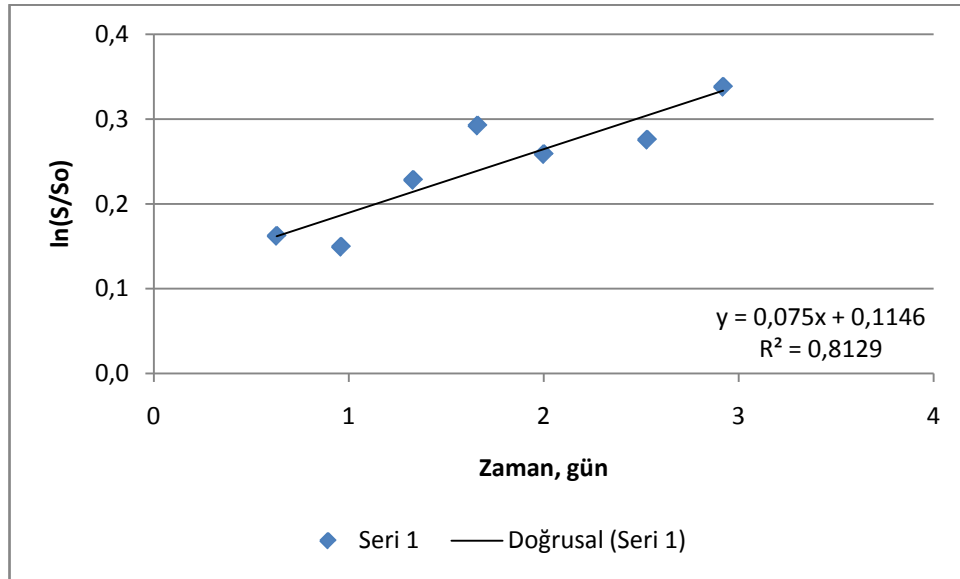
B.1.2. pH Kontrollü Hidroliz

27.09.2007 tarihinde alınan çürütme çamuru ile aşıl原因an reaktörde %1,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.7'de verilmiştir.



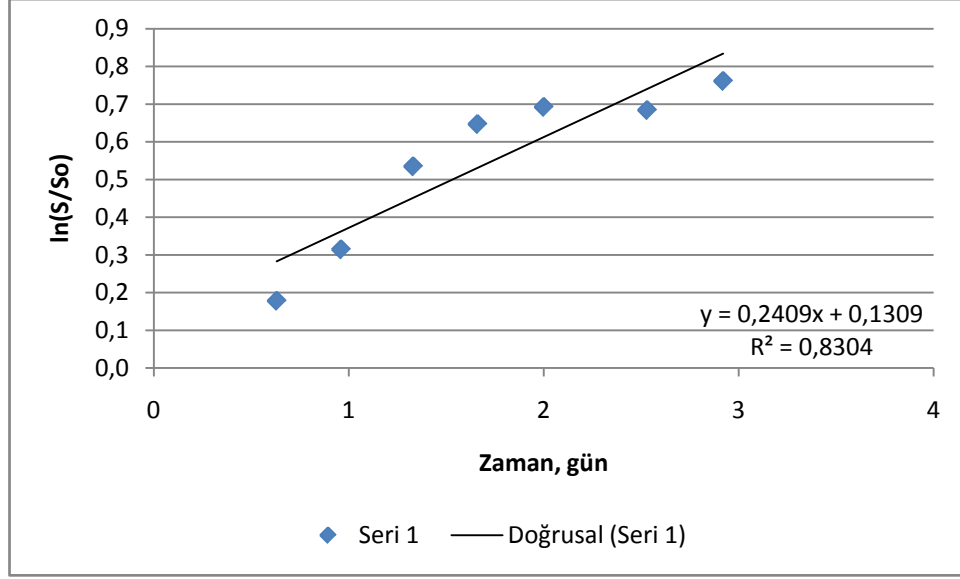
Şekil B.7 : 27.09.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k 'nın hesaplanması

07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %1,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.8'de verilmiştir.



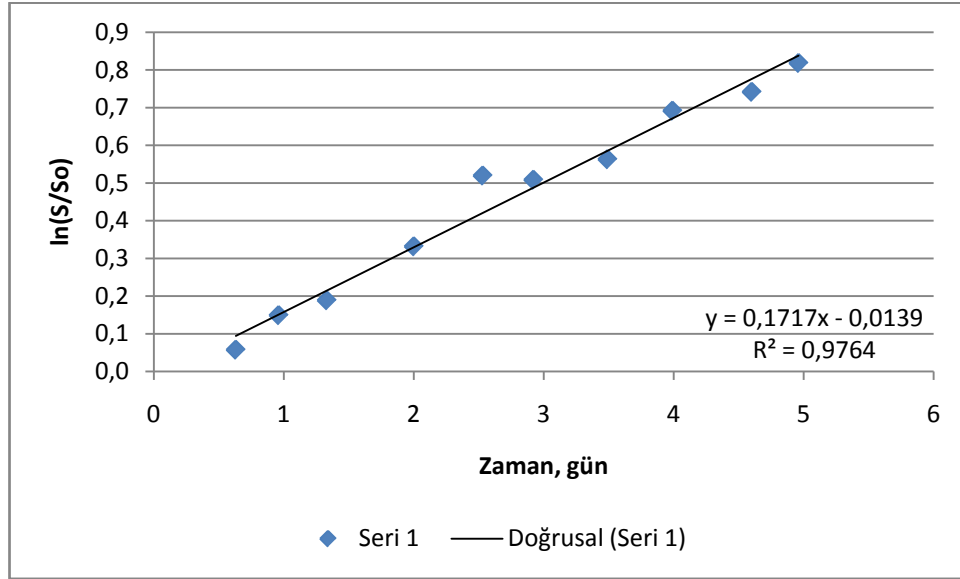
Şekil B.8 : 07.11.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k 'nın hesaplanması

12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %1,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.9'da verilmiştir.



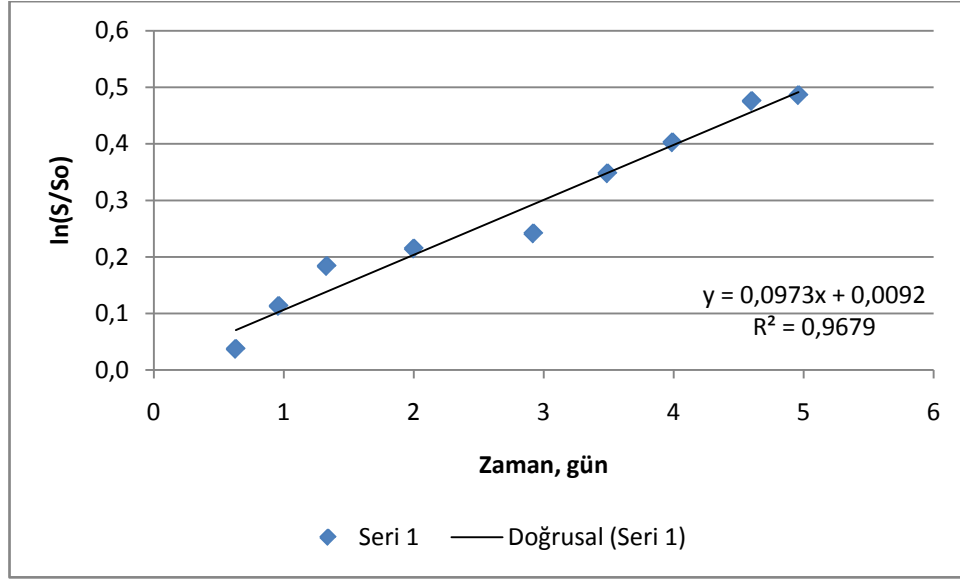
Şekil B.9 : 12.12.2007 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması

07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %2,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.10'da verilmiştir.



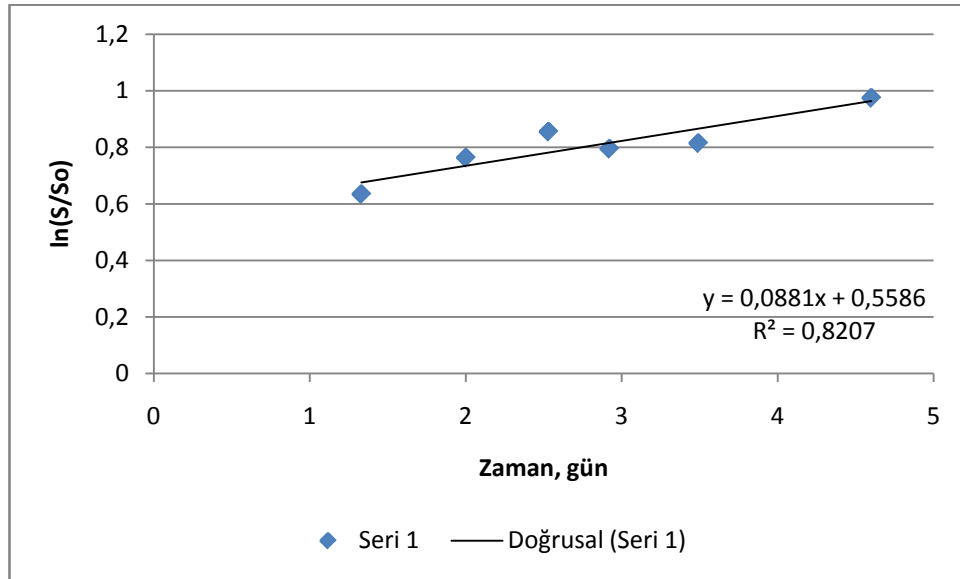
Şekil B.10 : 07.01.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k'nın hesaplanması

08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %2,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.11'de verilmiştir.



Şekil B.11 : 08.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k' 'nın hesaplanması

20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde %2,5'lik KM'de elde edilen k katsayısı Şekil B.12'de verilmiştir.



Şekil B.12 : 20.02.2008 tarihinde alınan fermentör çamuru ile aşılana reaktörde k 'nın hesaplanması

pH kontrollü hidrolizde gözlenen k katsayıları Şekil B.7 - Şekil B.12'den hesaplanarak Çizelge B.2'de gösterilmiştir.

Çizelge B.2 : pH kontrollü hidrolizde gözlenen kinetik katsayılar

Numune Tarihi	% KM	k (gün ⁻¹)	Numune Tarihi	% KM	k (gün ⁻¹)
27.09.2007	1,5	0,16	07.01.2008	2,5	0,17
07.11.2007		0,08	08.02.2008		0,10
12.12.2007		0,24	20.02.2008		0,09

EK C. DENEYSEL VERİ ÇIKTILARI

27.09.2007 - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	245	11	537	22	4	49	1403	6392	0,22	5,1
0,74	0	0	22	575	16	0	1117	7422	0,15	3,8
1,07	374	0	8	213	10	5	831	7329	0,11	3,5
1,41	286	0	7	154	5	0	608	6743	0,09	3,5
1,74	395	6	2	218	7	0	847	6989	0,12	3,5
2,03	0	76	7	97	5	0	314	7235	0,04	3,7
2,38	311	4	7	79	6	0	507	7042	0,07	3,7
2,66	0	39	5	33	5	0	138	7604	0,02	3,6
3,01	3	56	9	23	8	0	164	7727	0,02	3,6
3,44	0	0	9	24	9	0	76	7914	0,01	3,5
3,74	78	0	0	0	0	0	83	7727	0,01	3,5
4,07	0	28	6	13	6	0	89	7540	0,01	3,5
4,49	314	5	3	12	8	0	385	7364	0,05	3,7
4,88	0	146	25	76	25	0	455	7188	0,06	3,7
5,51	420	0	8	25	8	0	525	7633	0,07	3,5
5,87	415	8	19	4	8	0	512	7259	0,07	3,6
6,87	463	9	19	3	8	0	563	7422	0,08	3,6

07.11.2007 - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	279	80	0	391	242	155	1940	5549	0,35	4,6
0,74	0	0	97	208	331	197	1631	8359	0,20	3,7
1,07	619	0	104	323	0	207	1859	8710	0,21	3,4
1,41	4	0	103	46	362	212	1446	9319	0,16	3,4
1,74	541	0	91	293	0	187	1656	8546	0,19	3,3
2,03	0	71	104	31	363	215	1531	9296	0,16	3,6
2,38	434	44	40	254	2	167	1407	8359	0,17	3,5
2,66	5	52	84	25	288	168	1211	8195	0,15	3,5
3,01	0	0	112	64	347	206	1448	8734	0,17	3,5
3,44	2	0	95	19	320	185	1239	8986	0,14	3,4
3,74	1	30	94	23	323	94	1108	9489	0,12	3,5
4,07	0	60	94	26	325	3	978	9740	0,10	3,5
4,49	564	100	5	303	9	194	1727	9694	0,18	3,6
4,88	0	61	167	27	603	0	1674	9647	0,17	3,6
5,51	545	0	87	282	2	179	1621	8827	0,18	3,5
5,87	588	105	16	311	29	200	1848	9085	0,20	3,6
6,87	575	86	25	252	0	158	1569	8944	0,18	3,6

12.12.2007 - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	267	34	0	457	51	49	1369	6626	0,21	4,6
0,74	16	0	44	408	93	89	1210	8031	0,15	3,7
1,07	508	0	27	115	64	60	1052	9038	0,12	3,4
1,41	23	5	30	102	65	59	525	9553	0,05	3,4
1,74	480	0	26	55	3	55	779	8382	0,09	3,3
2,03	4	68	26	28	57	52	426	8898	0,05	3,6
2,38	425	1	22	46	6	47	687	9647	0,07	3,6
2,66	4	67	24	25	53	47	399	8453	0,05	3,5
3,01	6	0	27	54	58	53	380	9623	0,04	3,5
3,44	0	36	19	12	40	36	267	9676	0,03	3,5
3,74	500	0	0	0	0	0	533	9782	0,05	3,5
4,07	4	338	65	25	52	6	799	9834	0,08	3,5
4,49	624	26	5	61	6	63	966	9904	0,10	3,6
4,88	0	154	56	53	133	120	947	9553	0,10	3,7
5,51	623	24	13	51	3	50	927	9342	0,10	3,6
5,87	603	26	24	50	4	50	927	9366	0,10	3,7
6,87	780	28	35	49	4	49	1135	9296	0,12	3,6

07.01.2008 - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	703	59	0	1105	23	124	3147	16062	0,20	4,5
0,74	0	0	105	1260	108	27	2759	19996	0,14	3,7
1,07	1207	48	0	504	25	21	2370	21026	0,11	3,4
1,41	1252	0	44	527	37	12	2473	20933	0,12	3,5
1,74	1176	0	41	320	34	33	2048	19668	0,10	3,5
2,03	3	396	49	452	28	26	1623	20581	0,08	3,8
2,38	889	0	17	121	8	4	1224	21495	0,06	3,8
2,66	4	210	46	191	24	12	825	21167	0,04	3,8
3,01	3	0	65	57	28	15	315	20839	0,02	3,7
3,44	0	136	53	37	24	12	443	20886	0,02	3,8
3,74	0	129	54	42	24	12	442	19528	0,02	3,8
4,07	0	121	55	47	23	12	440	21214	0,02	3,9
4,49	3783	48	4	39	23	16	4266	22665	0,19	4,1
4,88	0	1147	616	461	275	136	4529	21776	0,21	4,1
5,51	4233	0	52	60	24	12	4791	20886	0,23	4,1
5,87	4203	57	54	21	4	12	4738	20956	0,23	4,2
6,87	4850	65	78	22	7	12	5493	21026	0,26	4,2

08.02.2008 - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	548	402	898	393	73	208	4114	13253	0,31	4,6
0,74	0	0	659	269	730	333	3854	14318	0,27	3,6
1,07	980	602	0	572	6	287	3595	15383	0,23	3,3
1,41	10	0	518	532	14	265	2490	16449	0,15	3,3
1,74	586	0	319	320	4	159	2121	17514	0,12	3,2
2,03	0	54	317	29	350	161	1752	18966	0,09	3,5
2,38	491	0	247	252	6	126	1700	20418	0,08	3,5
2,66	0	50	300	24	331	152	1648	19481	0,08	3,5
3,01	0	0	491	46	533	241	2556	19516	0,13	3,5
3,44	0	0	553	46	588	266	2831	19586	0,14	3,5
3,74	1	482	520	46	562	133	3177	19621	0,16	3,5
4,07	3	964	487	46	535	0	3523	19856	0,18	3,5
4,49	1703	583	2	550	5	283	4288	19949	0,21	3,7
4,88	0	109	834	44	934	426	4536	20137	0,23	3,7
5,51	2103	0	549	542	3	269	4784	19387	0,25	3,6
5,87	2085	572	43	534	4	264	4685	18544	0,25	3,7
6,87	2309	514	67	475	5	230	4707	19060	0,25	3,7

20.02.2008 - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	446	31	750	43	19	116	2243	14002	0,16	4,6
0,74	0	0	128	923	99	39	2192	16812	0,13	3,8
1,07	1374	64	0	265	30	18	2142	19621	0,11	3,5
1,41	99	0	399	594	205	125	2583	20839	0,12	3,5
1,74	2518	0	67	62	33	19	3025	19294	0,16	3,5
2,03	0	756	441	327	211	117	3207	20347	0,16	3,9
2,38	2928	0	57	42	28	14	3388	21401	0,16	4,0
2,66	0	54	35	20	17	10	237	19387	0,01	4,1
3,01	4	0	62	49	29	16	298	21869	0,01	4,1
3,44	0	0	66	45	31	17	300	20230	0,01	4,2
3,74	0	0	0	0	0	173	352	23415	0,02	4,2
4,07	4	134	59	0	44	0	404	23298	0,02	4,2
4,49	3871	61	6	44	28	20	4411	23180	0,19	4,3
4,88	0	1164	662	378	309	166	4620	20464	0,23	4,2
5,51	4237	0	67	50	31	17	4830	21776	0,22	4,1
5,87	4356	73	52	26	5	16	4940	20792	0,24	4,1
6,87	4177	69	65	23	7	14	4763	24023	0,20	4,0

07.11.2007 (%2,5 Şahit) - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	73	17	52	35	0	39	341	1405	0,24	4,6
0,74	0	0	29	21	77	75	402	2201	0,18	4,7
1,07	181	26	0	59	0	61	463	2154	0,21	4,6
1,41	182	0	22	50	2	52	434	2351	0,18	4,4
1,74	240	0	22	52	0	54	499	2220	0,22	4,2
2,03	0	34	25	22	61	57	377	2398	0,16	4,4
2,38	104	0	9	21	0	22	209	2485	0,08	4,4
2,66	0	30	31	18	85	0	308	2658	0,12	4,3
3,01	3	36	40	16	64	57	406	2744	0,15	4,3
3,44	0	26	34	12	49	46	316	2370	0,13	4,3
3,74	1	30	28	13	52	23	273	2435	0,11	4,1
4,07	3	33	22	13	55	0	230	2557	0,09	4,3
4,49	122	8	1	19	0	19	218	2454	0,09	4,4
4,88	0	15	15	7	36	34	205	2444	0,08	4,4
5,51	205	0	14	31	0	32	365	2740	0,13	4,3
5,87	321	22	10	47	1	48	580	2370	0,24	4,4
6,87	268	20	12	37	2	38	488	2716	0,18	4,4

08.02.2008 (%5 Şahit) - pH Kontrolsüz Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	157	23	83	14	9	12	420	2318	0,18	4,6
0,74	0	0	79	57	50	36	423	3353	0,13	4,3
1,07	217	0	25	55	15	10	426	3550	0,12	4,1
1,41	337	2	40	21	21	15	547	3587	0,15	4,0
1,74	481	0	41	25	21	15	706	3400	0,21	4,0
2,03	4	55	81	44	65	34	518	3896	0,13	4,2
2,38	415	40	5	20	4	20	597	3578	0,17	4,2
2,66	4	37	38	24	19	13	239	3774	0,06	4,1
3,01	4	0	55	14	27	28	244	4421	0,06	4,1
3,44	0	35	85	18	53	18	385	4346	0,09	4,1
3,74	23	77	0	0	79	0	302	4121	0,07	4,1
4,07	5	29	41	15	20	13	220	4346	0,05	4,0
4,49	476	47	0	21	3	16	654	4027	0,16	4,2
4,88	0	0	157	73	80	54	692	4074	0,17	4,2
5,51	496	0	43	25	22	15	730	4730	0,15	4,1
5,87	494	46	13	20	0	16	689	4196	0,16	4,2
6,87	390	36	14	15	5	11	557	4449	0,13	4,2

27.09.2007 - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	118	0	56	112	80	46	689	3683	0,19	5,5
0,63	271	0	81	461	2	44	1368	3947	0,35	5,6
0,96	280	0	67	616	2	32	1610	4480	0,36	5,3
1,33	440	0	200	1054	6	44	2852	4729	0,60	5,3
1,66	329	0	211	823	4	29	2298	4235	0,54	5,3
2,00	388	0	241	996	2	38	2744	4335	0,63	5,2
2,53	501	1	236	1009	7	53	2921	4832	0,60	5,3
2,92	583	0	239	1046	10	59	3098	5348	0,58	5,3
3,49	867	0	306	1349	16	78	4126	5777	0,71	5,3
3,99	1123	400	7	1650	23	97	5061	6571	0,77	5,3
4,60	1394	470	11	1917	30	114	5996	7619	0,79	5,4
4,96	1239	409	11	1662	28	98	5238	7500	0,70	5,4
5,56	1384	450	12	1862	33	111	5857	7825	0,75	5,5
5,97	1142	0	357	1607	30	99	5053	7461	0,68	5,4
6,91	1207	405	13	1676	33	105	5250	7138	0,74	5,5

07.11.2007 - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	124	0	58	179	0	122	811	4067	0,20	5,5
0,63	494	0	103	1145	2	218	3245	4783	0,68	5,2
0,96	2279	0	53	605	1	91	3814	4722	0,81	5,8
1,33	681	113	2	1655	3	230	4383	5109	0,86	5,5
1,66	667	9	98	1529	8	209	4126	5448	0,76	5,4
2,00	737	0	101	1593	3	221	4324	5267	0,82	5,3
2,53	875	0	105	1622	10	230	4563	5357	0,85	5,4
2,92	1052	0	111	1632	15	236	4802	5703	0,84	5,4
3,49	1125	0	108	1572	18	227	4755	5335	0,89	5,3
3,99	1235	111	8	1503	19	214	4707	5080	0,93	5,3
4,60	1274	105	4	1441	22	204	4605	5136	0,90	5,2
4,96	1239	108	11	1385	22	196	4469	5193	0,86	5,2
5,56	1137	103	9	1240	23	175	4043	5170	0,78	5,1
5,97	1114	0	91	1286	24	184	4117	5080	0,81	5,2
6,91	1160	100	11	1296	26	182	4191	4809	0,87	5,4

12.12.2007 - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	150	0	21	100	53	50	589	3120	0,19	5,5
0,63	469	0	24	1033	2	57	2542	3729	0,68	5,0
0,96	758	0	51	1465	2	57	3685	4275	0,86	5,9
1,33	594	0	49	1586	0	54	3716	5328	0,70	5,6
1,66	735	4	69	1981	4	64	4656	5960	0,78	5,4
2,00	856	0	74	2077	6	72	4983	6238	0,80	5,4
2,53	1177	0	81	2022	23	75	5277	6186	0,85	5,5
2,92	1349	0	86	2021	28	77	5485	6683	0,82	5,3
3,49	1351	0	80	1862	30	73	5184	6509	0,80	5,2
3,99	2631	0	264	999	15	32	5200	6051	0,86	5,2
4,60	1552	3	82	1886	37	73	5462	6419	0,85	5,1
4,96	1369	33	91	1668	38	69	4926	6909	0,71	5,1
5,56	1409	81	16	1630	37	65	4825	5870	0,82	5,1
5,97	1576	5	83	1868	45	75	5479	6231	0,88	5,1
6,91	1458	90	18	1681	42	68	5007	6638	0,75	5,2

07.01.2008 - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	121	0	45	149	7	6	507	4862	0,10	5,5
0,63	0	0	58	9	115	6	367	5148	0,07	4,3
0,96	598	0	67	188	4	7	1124	5643	0,20	6,0
1,33	612	0	56	250	3	7	1231	5870	0,21	4,8
1,66	449	0	38	229	6	5	984	7270	0,14	5,1
2,00	463	0	36	281	3	4	1083	6773	0,16	5,5
2,53	1146	0	94	811	20	18	2947	8173	0,36	5,3
2,92	1085	0	160	1137	27	34	3640	8083	0,45	5,2
3,49	314	0	189	1879	14	32	4189	8534	0,49	6,0
3,99	618	0	212	2128	19	50	5053	9708	0,52	5,9
4,60	1405	0	293	3024	41	102	7821	10205	0,77	5,3
4,96	1372	48	306	2737	42	100	7359	11018	0,67	5,2
5,56	1604	312	15	2956	47	141	7966	9979	0,80	5,2
5,97	1840	3	369	3807	63	149	9993	10476	0,95	5,2
6,91	1792	387	18	3670	62	149	9635	10747	0,90	5,3

08.02.2008 - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	55	0	0	84	0	9	229	5373	0,04	5,5
0,63	366	0	2	3	810	0	2052	5577	0,37	4,7
0,96	383	0	4	859	0	0	1979	6017	0,33	5,8
1,33	289	0	3	616	0	0	1434	6457	0,22	5,4
1,66	312	0	3	2	663	0	1695	7405	0,23	5,4
2,00	490	0	4	971	0	0	2295	6660	0,34	5,4
2,53	588	0	5	1126	3	0	2690	7496	0,36	5,4
2,92	546	0	5	1053	0	0	2507	6841	0,37	5,4
3,49	524	6	7	977	0	0	2357	7609	0,31	5,2
3,99	624	0	7	1048	4	0	2592	8038	0,32	5,2
4,60	706	2	11	1061	11	0	2728	8647	0,32	5,1
4,96	642	16	2	904	11	37	2452	8738	0,28	5,1
5,56	750	14	8	949	12	0	2587	8376	0,31	5,1
5,97	548	0	8	782	11	0	2045	8421	0,24	5,1
6,91	435	9	6	615	9	0	1624	8467	0,19	5,2

20.02.2008 - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	69	0	5	80	0	0	228	3271	0,07	5,5
0,63	0	0	11	166	257	9	864	3741	0,23	4,4
0,96	311	0	7	238	1	0	781	4271	0,18	5,5
1,33	353	0	9	476	0	0	1258	6168	0,20	5,0
1,66	610	0	14	769	3	0	2080	7243	0,29	5,2
2,00	622	0	13	752	8	2	2074	7017	0,30	5,3
2,53	790	0	105	839	12	3	2589	7694	0,34	5,3
2,92	1213	0	900	813	43	36	4569	7243	0,63	5,3
3,49	1476	4	1645	1024	24	82	6648	7387	0,90	5,3
3,99	1140	0	1316	928	12	93	5509	7017	0,79	5,7
4,60	1428	37	1571	1106	18	144	6780	8670	0,78	5,6
4,96	1378	1492	16	1100	16	148	6093	8074	0,75	5,5
5,56	1412	1515	18	1144	15	161	6271	8426	0,74	5,3
5,97	1175	11	1192	989	10	144	5547	8507	0,65	5,3
6,91	1149	1142	2	868	13	127	4823	8589	0,56	5,3

07.11.2007 (%1,5 Şahit) - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	11	0	3	49	0	11	104	434	0,24	5,5
0,63	0	0	4	12	12	0	50	634	0,08	6,2
0,96	47	0	0	17	0	0	88	554	0,16	4,7
1,33	44	0	1	24	1	16	100	562	0,18	5,4
1,66	58	0	7	21	0	0	81	607	0,13	5,0
2,00	0	0	10	9	17	0	50	572	0,09	5,6
2,53	45	0	29	17	0	7	50	646	0,08	5,6
2,92	0	0	12	9	43	0	162	693	0,23	5,3
3,49	62	0	10	9	21	7	263	566	0,46	5,3
3,99	0	0	22	22	0	0	66	611	0,11	5,2
4,60	39	33	0	0	31	0	140	576	0,24	5,0
4,96	60	21	4	12	21	0	178	611	0,29	5,0
5,56	51	9	0	40	0	0	47	600	0,08	5,3
5,97	0	0	3	16	15	43	45	623	0,07	5,1
6,91	58	0	0	17	0	0	46	570	0,08	5,2

08.02.2008 (%2,5 Şahit) - pH Kontrollü Hidroliz ve Fermentasyon Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,0	35	0	8	29	7	5	128	716	0,18	5,5
0,6	5	0	6	16	4	0	52	966	0,05	6,2
1,0	40	0	6	11	3	0	81	912	0,09	3,5
1,3	68	9	1	8	7	4	126	858	0,15	6,1
1,7	67	4	8	6	6	0	114	930	0,12	6,0
2,0	43	0	6	3	3	0	69	930	0,07	5,0
2,5	87	0	8	8	8	3	144	930	0,16	5,7
2,9	83	0	8	7	5	0	126	984	0,13	4,1
3,5	84	4	13	8	8	3	158	912	0,17	5,7
4,0	56	0	7	4	0	0	80	1120	0,07	5,6
4,6	97	13	2	8	7	0	155	975	0,16	5,2
5,0	88	15	6	11	6	5	170	1039	0,16	5,2
5,6	55	15	15	12	6	0	142	984	0,14	5,2
6,0	101	11	2	8	2	3	153	1039	0,15	5,1
6,9	59	9	0	6	3	0	93	984	0,09	5,1

27.09.2007 - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	842	244	44	831	49	134	3233	5515	0,59	7,2
0,81	1101	465	65	1057	88	159	4421	5723	0,77	7,3
1,73	1213	648	67	1048	97	174	4855	6125	0,79	7,2
2,67	1433	1134	73	950	115	576	6515	7426	0,88	7,0
3,77	1687	1046	84	1206	124	371	6735	7445	0,90	6,9
4,77	1519	1100	102	975	195	644	6954	7990	0,87	6,9
5,88	1185	1141	81	931	138	600	6337	7534	0,84	7,1
6,84	1555	0	1082	975	232	646	7188	7951	0,90	7,0
8,87	1539	0	1133	1073	296	685	7652	8322	0,92	7,1
10,93	1604	0	1252	784	299	674	7396	8531	0,87	7,2
12,87	1828	0	1249	351	293	642	6766	8017	0,84	7,2
15,99	0	0	1547	12	292	32	3496	6036	0,58	7,2
18,89	0	0	1438	18	278	21	3258	4055	0,80	7,3
38,94								857		

07.11.2007 - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	1511	150	29	1056	71	136	4235	6859	0,62	7,2
0,81	1815	648	49	1304	113	147	5906	7438	0,79	7,3
1,73	1673	724	52	1215	126	133	5712	6650	0,86	7,1
2,67	1327	1083	59	640	151	679	6017	7091	0,85	7,1
3,77	1759	965	61	965	147	403	6322	7531	0,84	7,1
4,77	1398	1209	87	666	222	816	6806	7716	0,88	6,9
5,88	1292	1378	87	759	219	903	7289	7902	0,92	7,0
6,84	1674	1420	110	784	295	975	8151	8597	0,95	7,0
8,87	2140	0	1351	783	355	1043	9013	9431	0,96	6,9
10,93	2535	0	1550	603	372	1047	9513	9909	0,96	7,1
12,87	3237	0	1685	622	410	1114	10753	11192	0,96	7,1
15,99	3334	0	1608	421	379	789	9624	9825	0,98	7,0
18,89	0	0	1965	197	433	370	5569	9338	0,60	7,1
38,94								1881	0,00	

12.12.2007 - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	2313	430	43	163	106	34	3779	7253	0,52	7,2
0,81	3248	1932	68	547	165	68	7982	9014	0,89	7,1
1,73	3126	2007	72	589	174	65	8059	8925	0,90	6,9
2,67	3081	2095	99	635	251	138	8586	9369	0,92	6,9
3,77	3369	2300	92	688	227	76	9113	9967	0,91	7,0
4,77	3898	2447	156	784	391	293	10963	11942	0,92	6,9
5,88	3806	2523	144	789	366	255	10841	12053	0,90	7,1
6,84	4051	2541	168	811	431	323	11485	12165	0,94	7,1
8,87	4756	0	2673	896	510	436	13493	13771	0,98	7,1
10,93	4462	0	2559	809	522	463	12889	13447	0,96	7,2
12,87	4468	0	2585	681	513	483	12735	13609	0,94	7,2
15,99	4749	0	2480	529	511	491	12580	13308	0,95	7,1
18,89	0	0	2486	405	523	504	7350	12281	0,60	7,2
38,94								1946		

07.01.2008 - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	5976	1295	161	795	298	22	10725	16545	0,65	7,2
0,81	5418	2759	211	2048	440	44	15049	17703	0,85	7,0
1,73	5277	2836	226	1990	508	41	15071	17958	0,84	6,9
2,67	5367	3363	243	2010	592	110	16344	19707	0,83	6,8
3,77	5975	3397	270	2323	631	49	17616	21457	0,82	6,8
4,77	7664	5351	391	2658	977	606	25046	28455	0,88	6,8
5,88	8202	5801	397	2783	982	464	26261	29303	0,90	7,0
6,84	8260	5728	448	2857	1120	835	27476	30323	0,91	7,1
8,87	7826	2	5190	2769	1081	940	26944	28581	0,94	7,1
10,93	8209	0	5257	2690	1118	1017	27559	28621	0,96	7,1
12,87	7839	0	4915	2372	1070	977	25784	26323	0,98	7,1
15,99	8405	0	5059	37	2228	1020	24853	27203	0,91	7,0
18,89	0	0	5095	66	1838	1045	15261	25813	0,59	7,1
38,94								24840		

08.02.2008 - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	5278	622	46	667	105	400	8895	16950	0,52	7,2
0,81	4613	643	196	2382	404	297	12008	18954	0,63	7,0
1,73	4377	1120	247	2546	472	247	12907	20159	0,64	6,8
2,67	4239	2388	274	2537	562	230	14863	20600	0,72	6,9
3,77	5137	2127	321	3105	638	288	16818	21040	0,80	7,0
4,77	4958	2905	361	2979	775	265	17879	22801	0,78	6,9
5,88	5214	3410	351	3009	758	276	18940	24562	0,77	7,1
6,84	5614	0	3149	3317	845	292	20064	25720	0,78	7,1
8,87	6006	2	3698	3147	866	278	21188	25767	0,82	7,0
10,93	7070	0	4739	3489	958	311	25089	28038	0,89	7,0
12,87	6775	0	4527	3237	927	290	23825	27111	0,88	7,1
15,99	6193	2	4214	49	3299	271	21640	28825	0,75	7,0
18,89	3	0	4653	474	3616	1352	19454	28686	0,68	7,1
38,94								26740		

20.02.2008 - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	5656	120	10	71	76	18	6556	15108	0,43	7,2
0,81	4483	707	113	926	280	26	8367	16452	0,51	6,8
1,73	4915	2908	115	1353	273	49	12969	15988	0,81	6,8
2,67	4146	2625	120	1042	293	2256	15705	19545	0,80	6,5
3,77	4668	2879	119	1083	287	2508	17223	20379	0,85	6,8
4,77	4831	3073	190	1290	483	2579	18740	21213	0,88	6,9
5,88	4766	3172	169	1311	415	2755	19039	21186	0,90	7,1
6,84	5342	3411	233	1443	616	2857	20991	23159	0,91	7,1
8,87	5187	0	3103	1366	641	3007	21097	23298	0,91	7,1
10,93	4972	0	3087	1298	675	3132	21040	23272	0,90	7,2
12,87	4791	0	3103	1261	667	3128	20783	23364	0,89	7,2
15,99	0	0	4079	16	1028	4187	18079	20398	0,89	7,2
18,89	0	0	3458	520	764	3228	15374	19352	0,79	7,2
38,94								16249		

07.11.2007 (%2 Şahit) - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	15	3	0	5	3	0	33	278	0,12	7,2
0,81	11	0	0	4	3	0	25	278	0,09	7,5
1,73	16	0	6	6	6	0	51	278	0,18	7,5
2,67	19	0	4	3	4	0	42	232	0,18	7,4
3,77	17	0	0	5	3	0	35	190	0,18	7,4
4,77	17	0	7	6	0	4	49	195	0,25	7,3
5,88	6	0	5	4	0	3	31	199	0,15	7,3
6,84	11	0	4	4	3	0	31	250	0,12	7,4
8,87	18	0	10	6	7	4	70	246	0,28	7,4
10,93	17	0	11	6	2	5	64	241	0,27	7,5
12,87	21	0	10	4	0	5	58	213	0,27	7,4
15,99	0	0	18	21	0	0	70	185	0,38	7,4
18,89	0	0	26	4	8	6	82	165	0,50	7,5
38,94								156		

08.02.2008 (%4 Şahit) - pH Kontrollü Çürütme Verileri

	VFA									
Zaman	Asetik	Propiyonik	Isobütirik	Bütirik	Isovalerik	Valerik	T.UYA	Ç.KOİ	T.UYA/Ç.KOİ	pH
gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	(KOİ)	mg/L		
0,00	195	35	22	57	56	46	612	1761	0,35	7,2
0,81	266	72	31	59	78	40	798	1406	0,57	7,5
1,73	245	94	36	59	92	39	844	1050	0,80	7,5
2,67	198	1	127	53	123	40	872	1160	0,75	7,5
3,77	178	0	90	51	88	33	694	1270	0,55	7,4
4,77	14	6	6	7	144	16	373	667	0,56	7,3
5,88	77	0	60	12	134	9	506	767	0,66	7,3
6,84	17	0	0	9	149	14	368	667	0,55	7,4
8,87	4	0	0	8	114	5	263	556	0,47	7,3
10,93	15	0	0	7	15	0	59	871	0,07	7,4
12,87	0	0	4	8	2	0	28	547	0,05	7,4
15,99	0	0	6	6	0	0	21	222	0,09	7,4
18,89	0	0	0	4	0	0	8	445	0,02	7,4
38,94								222		

ÖZGEÇMİŞ

Ümit Balaban, 16.11.1982’de Filibe (Bulgaristan)’de doğdu. Orta öğrenimini Bağcılar Orhan Gazi Lisesi’nde 2000 yılında tamamladı. Aynı yıl girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği bölümünden “Sulardan demirhidroksit filtreleri ile arsenik giderimi” konulu bitirme tezini tamamlayarak 2006 yılında mezun oldu. Aynı yıl girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.