



Optimization of anaerobic co-digestion of sewage sludge with fruit and vegetable wastes (FVW): Methane production potential, process performance and stabilized sludge quality

Fatmanur Sarıkaya¹, Dilek Erdirencelebi*¹

Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Environmental Engineering, 42250 Selcuklu Konya, Turkey

Highlights:

- Optimization of OLR in co-digestion and biodegradability of FVW and sewage sludge fractions
- Higher contribution to methane yield and biodegradability but limited loading degree with VW
- Decreased dewaterability in co-digestion but feasibility for soil application.

Keywords:

- Sewage sludge
- Primary sludge
- Secondary sludge
- Anaerobic co-digestion
- Fruit and vegetable waste

Article Info:

Research Article
Received: 21.03.2021
Accepted: 11.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.900772

Correspondence:

Author: Dilek Erdirencelebi
e-mail:
derdirencelebi@ktun.edu.tr
phone: +90 332 205 1529

Graphical/Tabular Abstract

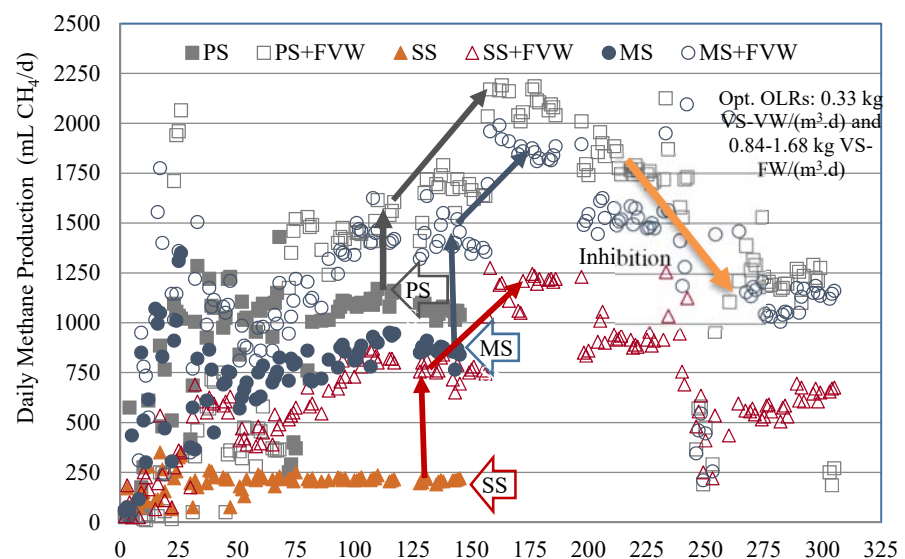


Figure A. Increased daily methane productions during OLR optimization in co-digestion of PS, SS and MS (arrows showing methane increases with FVW addition)

Purpose: Co-digestion performance and stabilized sludge quality were investigated in separate/parallel and mixed sludge anaerobic digestion systems with optimization of fruit and vegetable wastes' (FVW) organic loading rate (OLR) in a long-term study (300 d).

Theory and Methods:

The study was conducted in semi-continuous lab-scale reactors for the digestion of primary (PS), secondary (SS) and mixed sludge (MS) fractions at OLRs of 1.65, 0.40 and 1.0 kg VS/m³.day, respectively, 20 day of hydraulic retention time (HRT) and 35°C with 0.33-1.68 g VS-FVW/m³.d OLR range.

Results:

Optimum OLR values determined were obtained at % 51, 209 and 84% (w:w) respectively for fruit waste (FW), vegetable waste (VW) and fruit+vegetable waste (FVW), resulting in increases at 12, 25-55 and 0% and 50-75, 250-300 and 44-66% in methane yield and daily methane production, respectively.

Conclusion:

Co-digestion was beneficial at low OLRs on both separate and mixed sludge digestion in municipal wastewater treatment plants in increasing methane recovery while stabilized sludge worsened in dewatering ability. Enhancement on the stabilized sludge quality as regard to electrical conductivity and nutrient content was obtained only in SS co-digestion as it gained a suitable level for soil application through higher conversion to microbial biomass.



Meyve ve sebze atıkları ile anaerobik çoklu arıtma çamuru çürütme optimizasyonu (MSA): Metan üretim potansiyeli, proses performansı ve stabilize çamur kalitesi

Fatmanur Sarıkaya^{ID}, Dilek Erdirencelebi*^{ID}

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 42250 Selçuklu Konya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- MSA ve arıtma çamuru çürütmesinde organik yükleme optimizasyonu ve çıkış kalitesi
- Sebze atıkları ile daha yüksek metana dönüşüm ve ayrışabilirlik fakat kısıtlı yükleme derecesi
- Çoklu çürütme ile azalan susuzlaşma kabiliyeti ve toprak uygulamasına uygunluk

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.03.2021

Kabul: 11.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.900772

Anahtar Kelimeler:

Arıtma çamuru, birincil çamur, ikincil çamur, Anaerobik birlikte sindirme, Meyve ve sebze atıkları

ÖZ

Pazaryeri atıklarının anaerobik çoklu çürütmesi, laboratuvar ölçekli yarı-sürekli biyoreaktörlerde üç farklı arıtma çamuru fraksiyonu (primer (PÇ), sekonder (SÇ) ve karışık çamur (KÇ)) için sırasıyla 1,65, 0,40 ve 1,0 kg UKM/m³.gün organik yükleme hızlarında (OYH) ve 35°C sıcaklıkta yürütülmüştür. Meyve atığı (MA), sebze atığı (SA) veya meyve+sebze atıkları (MSA) farklı bileşim ve oranlarda beslenerek ilavenin performans ve stabilize çıkış çamur kalitesine etkisi değerlendirilmiştir. MA ve SA ilavesi için optimum OYH'ları sırasıyla 0,84 ve 0,33-0,44 g UKM/L.gün ve ağırlıkça ilave oranları PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla %51, 209 ve 84 olarak elde edilmiştir. PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla günlük metan üretiminde %50-75, 250-300 ve 44-66 artış elde edilmiştir. MA'nın artan yüklemesinde metan dönüşümünde ve hidroliz derecesinde azalma oluşurken, SA'nın artan OYH'nda toksik etki gerçekleşmiş ve PÇ çoklu çürütmesinde metanojen aktivitesi üzerinde kalıcı etki oluşmuştur. MA ayrışması pH'ya asitlenme yönünde etki etmiştir. Mevcut kentsel anaerobik çamur çürütücülerinde hem ayrı hem de birleşik sistemler için çoklu besiyeri olarak MA ve SA ilavesinin düşük yükleme hızlarında metan eldesine olumlu yönde etkisi elde edilirken stabilize çamurların susuzlaşma kabiliyetinde düşüş gerçekleşmiş, diğer yandan özellikle besin kısıtlılığı ile işleyen SÇ çürütmesinde ayrışabilirliği ve biyokütleyi artırma yönünde fayda sağlanarak toprakta uygulamalara uygun stabilize çamur üretilmiştir.

Optimization of anaerobic co-digestion of sewage sludge with fruit and vegetable wastes (FVW): Methane production potential, process performance and stabilized sludge quality

H I G H L I G H T S

- Optimization of OLR in co-digestion and biodegradability of FVW and sewage sludge fractions
- Higher contribution to methane yield and biodegradability but limited loading degree with VW
- Decreased dewaterability in co-digestion but feasibility for soil application

Article Info

Research Article

Received: 21.03.2021

Accepted: 11.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.900772

Keywords:

Sewage sludge, Primary sludge, Secondary sludge, Anaerobic co-digestion, Fruit and vegetable waste

ABSTRACT

Anaerobic co-digestion performance and stabilized sludge quality were investigated with fruit and vegetable wastes in semi-continuous lab-scale reactors for primary (PS), secondary (SS) and mixed sludge (MS) fractions at organic loading rates (OLRs) of 1.65, 0.40 and 1.0 kg VS/m³.day, respectively, at 35°C. Fruit waste (FW), vegetable waste (VW) or fruit+vegetable waste (FVW) fractions were added as co-substrates at different OLR combinations. Optimum OLR values were 0.84, 0.33-0.44 and 1.18 g VS/L.day at %51, 209 and 84% (w:w) respectively for FW, VW and FVW, resulting in increases at 50-75, 250-300 ve 44-66% in daily methane production. Increase in OLRs led to decrease in methane yield and hydrolysis degree in the FW receiving digester whereas a toxic effect took place in VW feeding, especially on methanation with an irreversible pattern in PS co-digestion. VW exhibited a higher biodegradability than FW with a higher methane yield while pH was lowered in FW co-digestion. The results showed that co-digestion at low OLRs was beneficial in obtaining higher methane recovery while stabilized sludge worsened in dewatering ability. Stabilized SS gained a suitable level of electrical conductivity and nutrient content for soil application through higher conversion to microbial biomass.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : fatmanursarikaya.94@gmail.com, *derdirencelebi@ktun.edu.tr /

Tel: +90 332 205 1529

1494

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve hızlı nüfus artışıyla birlikte dünya çapında enerji tüketiminin artması, kaynakların azalmasına, fosil yakıtlarının büyük oranda kullanılmasına ve sera etkisini artırarak çevre sorunlarına neden olmaktadır. Gelişmiş dünya ülkeleri enerjide sürekliliği sağlamak ve zararlı emisyonları önemli ölçüde azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Endüstriyel gelişimin gerektirdiği enerji talebini karşılamak ve yaşam koşullarını yükseltmenin yolu sürdürülebilir kalkınma araçlarını kullanmaktan geçmektedir. Türkiye, birçok enerji kaynağına sahip olmasına rağmen enerji ithalatçısı bir ülkedir ve dışa bağımlılığın artması önemli siyasi ve ekonomik sorunlara neden olmaktadır [1]. Enerji bağımlılığını önlemek için kullanılabilecek yenilenebilir enerji kaynakları ile enerjiye dönüşüm potansiyeline sahiptir. Fosil yakıtlara kıyasla hava emisyonlarını azalttığından ve giderek artan potansiyele sahip olduğundan, biyokütle, en umut verici alternatif enerji kaynaklarından biridir [1].

Ülkemizde nüfusun ve atıksu arıtma tesislerinin (AAT) artmasıyla birlikte, tesislerden çıkan arıtma çamurları (AÇ) miktarı da artış göstermektedir. AÇ, biyokütle kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir ve enerji elde etmek için anaerobik çürütme yönteminin kullanılması, en verimli enerji geri kazanım sürecidir [2]. Anaerobik çamur çürütme prosesi, AÇ'nin stabilizasyonu için küresel olarak kullanılan en yaygın yöntemdir. AAT'lerde çürütücülerin işletimi genellikle maksimum biyogaz üretimi elde etmek için optimize edilmemiştir, çünkü ana hedef çamur stabilizasyonu ile organik madde içeriğinde ve hacminde azalmadır [3]. AAT'lerinde AÇ'lerinin tasarım yoğunluğuna ulaşamamaları ve düşük C:N içeriği, çamur çürütücü hacimlerinin efektif kullanımını kısıtlamaktadır. Mevcut kapasiteden yararlanmak için, AÇ'lerle birlikte tamamlayıcı özelliklere sahip çoklu besiyeri çürütülmesi araştırılan ve gerçek ölçekli uygulamaya da geçen bir seçenektir [3, 4]. Çoklu besiyeri anaerobik çürütme, biyolojik olarak bozunabilir iki veya daha fazla atığın karıştırılarak elde edilen karışımın birlikte anaerobik çürütülmesi olarak tanımlanabilir. Bu sayede gelişmiş bir besin dengesi ve yüksek C:N oranı sağlanarak, seyrelme yoluyla toksik maddelere bağlı inhibitör etkilerin hafifletilmesine ve metan üretiminde artışa katkı sağlanır [5, 6]. Farklı biyokütle/organik atık ile çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme performansını araştırılan çalışmalarda çoğunlukla yüksek yükleme veya karışım oranları kullanılarak metan üretiminde artış elde edilmeye çalışılmaktadır [7, 8]. Bu çalışmalarda tek parametre üzerinde artış proses optimizasyonu anlamına gelmemektedir çünkü uçucu katı madde (UKM) giderimi ve giderilen UKM biriminde spesifik metan üretimi (SMÜ) izlenmeden çoklu çürütmedeki gerçek proses verimi ortaya konamaz [9, 10]. SMÜ'de gerçekleşen artış ayrışabilirlikteki artışı da gösterecektir ve SMÜ'de azalmaya neden olan yükleme seviyeleri çürütücülerde UKM birikimi yani stabilize çamur içeriğindeki organik maddeyi artırarak faydalı kullanıma ve uzaklaştırma problemlerine neden olacaktır. Çoklu

çürütme çalışmalarında reaktörde UKM birikimi ve stabilize çamur kalitesi (UKM konsantrasyonu, susuzlaşma özelliği ve iletkenlik) gibi prosese ait tüm parametrelerin üzerindeki etkilerin de ortaya konması gerekmektedir.

Kentsel ortamda oluşan başlıca organik katı atıklar meyve ve sebze atıklarıdır (MSA). MSA marketlerde, pazarlarda ve sebze-meyve hallerinde önemli miktarda açığa çıkar. MSA, yüksek nem içeriğine sahiptir, biyolojik olarak parçalanabilir ve biyogaz üretimi için potansiyel bir substrattır [11, 12]. AÇ düşük C:N oranına sahiptir ve bu nedenle, çoklu besiyeri ile anaerobik çamur çürütülmesinde sistemin içerisine karbon açısından zengin gıda atıklarının eklenmesi, optimum C/N oranını sağlarken biyogaz üretimini artırır [13]. MSA yüksek karbonhidrat ve düşük alkalinite içerikleri ile yüksek biyolojik ayrışabilirlik özelliğine sahip tek başına anaerobik proses performansında problem veya maliyet yaratacak yapıda iken çoklu AÇ çürütmesi için pH dengeleyici katkı olarak da oldukça uygun bir ko-substrattır [4]. Günümüzde mevcut kentsel AAT'lerin birçoğunda çamur çürütücü reaktörler bulunmaktadır ve biyogaz üretimine katkısı bakımından organik atıkların birlikte çürütme yaklaşımı ile organik atık ve AÇ gibi iki büyük atık akım birleştirilerek ilave yatırıma gerek kalmadan enerjiye dönüşüm sağlanmaktadır. AÇ ile MSA'nın çoklu çürütülmesi sürecinde farklı ara ürün, substrat veya olası toksisite oluşumuna karşılık prosesin organik yükleme veya karışım oranı bazında optimizasyon ihtiyacı bulunmaktadır.

Bu çalışmada AÇ'nun mevcut ve ayrık anaerobik çürütme prosesinde MSA ile çoklu stabilizasyon performansı incelenmiştir. MSA'lar farklı ayrışabilirlik özelliklerine sahip primer (PÇ), sekonder (SÇ) ve karışık (KÇ) çamur yanında ikincil besiyeri olarak yarı-sürekli anaerobik çürütücülere farklı oranlarda beslenmiş ve proses performans ve fizibilitesi araştırılmıştır. Çoklu besiyeri anaerobik stabilizasyon optimizasyonu mevcut durumdaki karışık ve potansiyel ayrık çamur çürütme modelleri kapsamında hem proses için hem de çıkış/stabilize çamur kalitesinin belirlenmesi açısından ele alınmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Hammaddelerin Karakterizasyonu (Characterization of Raw Materials)

Bu çalışmada, AÇ fraksiyonları ile pazaryeri atıkları kullanılmıştır: Konya Kentsel AAT ön çöktürme ünitesinden PÇ ile biyolojik arıtım ünitesi geri devir hattından SÇ numuneleri temin edilerek %60:40'lık (w:w) PÇ:SÇ karışımından KÇ hazırlanmıştır. MSA Konya'da çeşitli pazar yerlerinden Aralık ayında toplanması nedeniyle çoğunlukla kış sebze/meyvelerini içermiştir. MSA tane boyutu <0,2 mm olacak şekilde öğütülmüş, sebze ve meyve ayrı karıştırılarak homojen hale getirilmiş ve -18(-) 20°C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. AÇ +4°C'de muhafaza edilmiştir. Ham çamur fraksiyonları (PÇ, SÇ ve KÇ) ve homojen sebze ve meyve atıklarının (SA ve MA) karakteristiği Tablo 1'de, MSA'nın içeriği ve karışım numunesindeki % bileşen miktarı Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1. Ham çamur numuneleri ile SMA karakterizasyonu (Characterization of raw sludge samples and FVW)

Parametre	Ham Çamur		MSA	
	PÇ	SÇ	SA	MA
TKM (mg/L)	11 000-30 800	8 500 - 23 000	61 120	144 270
UKM (mg/L)	7 000-20 000	5 000-15 000	54 620	139 890
pH	6,26-7,02	6,41-7,20	---	---
İletkenlik (mS/cm)	3,89	2,84	---	---

Tablo 2. SA ve MA'nın % bileşen miktarları (Contents in percentage of VW and FW)

Sebzeler	Kütlesi (kg)	Atık Karışım		Kütlesi (kg)	Atık Karışım	
		Numunesindeki Bileşen Miktarı (%)	Meyveler		Numunesindeki Bileşen Miktarı (%)	
Patates	0,424	12,1	Elma	0,540	15,4	
Soğan	0,288	8,2	Portakal	0,492	14,1	
Domates	0,364	10,4	Mandalina	0,452	12,9	
Salatalık	0,248	7,1	Limon	0,308	8,8	
Biber	0,124	3,5	Ayva	0,154	4,4	
Havuç	0,272	7,8	Armut	0,300	8,6	
Turp	0,176	5,0	Greyfurt	0,228	6,5	
Karnabahar	0,204	5,8	Kivi	0,188	5,4	
Brokoli Yaprağı	0,218	6,2	Muz	0,196	5,6	
Marul	0,174	5,0	Nar	0,528	15,1	
Pırasa	0,058	1,7	Cennet Hurması	0,114	3,3	
Ispanak	0,064	1,8	<i>TOPLAM</i>	<i>3,5</i>	<i>100</i>	
Yeşil Soğan	0,044	1,3				
Maydanoz	0,012	0,3				
Lahana	0,190	5,4				
Kara Lahana	0,078	2,2				
Patlıcan	0,258	7,4				
Bal Kabağı	0,304	8,7				
<i>TOPLAM</i>	<i>3,5</i>	<i>100</i>				

2.2. Reaktör Düzenegi ve Çalışma Koşulları (Reactor Set Up and Operating Conditions)

Çoklu anaerobik çürütme çalışması, toplam 2000 mL hacimli laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde, adaptasyon döneminde 1500 ve kararlı hal döneminde 1000 mL aktif hacimde, üç farklı çamur fraksiyonu PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 1,65, 0,40 ve 1,00 kg UKM/m³.gün sabit organik yükleme hızlarında (OYH), 7 farklı işletim şartında (MSA, SA veya MA ilaveli), 20 gün hidrolik bekleme süresinde (HBS), mezofilik (35°C) sıcaklıkta ve yarı-sürekli beslemeli olarak kontrol reaktörleri ile paralel yürütülmüştür. Reaktörlere beslenen MSA ve OHY'nın içeriğinde ağırlıkça SA:MA=0.40 oranı korunmuş ve OYH kademeli olarak iki katına arttırılmıştır. Artan OYH, üç çamur fraksiyonu için % UKM bazında miktarları, isimlendirme ve uygulanan işletim süreleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Reaktörler besleme sonrası günde iki kez elle çalkalanarak ilk 6 ay inkübasyonda kısıtlı karışım modunda, daha sonra çoklu çürütme yapılan reaktörler, 3 manyetik karıştırıcı üzerine yerleştirilmiş camdan yapılmış ısıtmalı su banyosu sistemi içerisine alınarak 150 rpm'de sürekli karışımli olarak çalıştırılmıştır.

2.3. Analitik Yöntemler (Analytical Methods)

AÇ+MSA ve sadece AÇ beslenen kontrol reaktörleri günlük metan üretimi, çıkış/stabilize çamur numunelerinde pH, EC, TKM, UKM, uçucu yağ asitleri (UYA) ve bikarbonat (HCO₃⁻) parametreleri ile günlük olarak izlenmiştir. Günlük metan üretimi (GMÜ) üretilen biyogaz 0,1 N NaOH çözeltisinden geçirilerek, alkali sıvı-gaz yer değiştirme metodu ile (2720 A-B) doğrudan ölçülmüştür [14]. Spesifik metan üretimi (SMÜ) değerleri (mL metan/g UKM_{beslenen}.gün), tüm reaktörlerde GMÜ hacminin (mL) her bir çamur fraksiyonu için reaktörlere günlük beslenen biyokütleyle (g UKM_{beslenen}) bölünmesiyle elde edilmiştir. Belirli faz dönemleri sonunda stabilize çamurlarda susuzlaşma özelliği, toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) içeriği belirlenmiştir. pH izlemesi Hach Lange Multi Parametre ve EC WTW iletkenlik ölçer cihazları ile belirlenmiştir. TKM (2540.B), UKM (2540.E) ve susuzlaşma özelliği filtreleme testi (2710 H) (Time-to-filter) standart metotları ile belirlenmiştir [14]. UYA ve HCO₃⁻ konsantrasyonları, Anderson ve Yang (1992)'ın 2 noktalı titrasyon metodu ile belirlenmiştir [15]. Stabilize çamurda TN ve TP analizleri Faz 3, 4 ve Faz 2'de yürütülmüştür. TN Koroleff Sindirimi (Peroksodisülfat) ve

2,6 Dimetilfenol ile Fotometrik Saptama (Hach Lange LCK 338) ve TP (Fosformolibden Mavisi Metodu Hach Lange LCK 350) kullanılarak spektrofotometrik yöntemle belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Çürütücülerin Performansı ve Proses Kararlılığı (Digesters' Performance and Process Stability)

Reaktörlere çoklu besiyer ilavesinin yapıldığı her bir faz grafik üzerinde belirtilerek sistemin kısıtlı karıştırılmadan sürekli karışımli moda geçtiği gün kesikli çizgi ile gösterilmiştir. 148. çalışma gününde kararlı ve stabil hale gelen kontrol reaktörlerinde analiz ve ölçümler sonlandırılmıştır.

3.1.1. PÇ çürütme performansı (Primary sludge (PS) digestion performance)

Şekil 1-4'de, çalışma süresi boyunca PÇ+MSA ve kontrol çürütücüler için elde edilen performans verileri, SMÜ, GMÜ, reaktör/çıkış UKM konsantrasyonu ve giderim verimi, pH, UYA ve HCO₃⁻ değişimi olarak sunulmuştur. Çalışma boyunca kontrol reaktöründen elde edilen kararlı hal

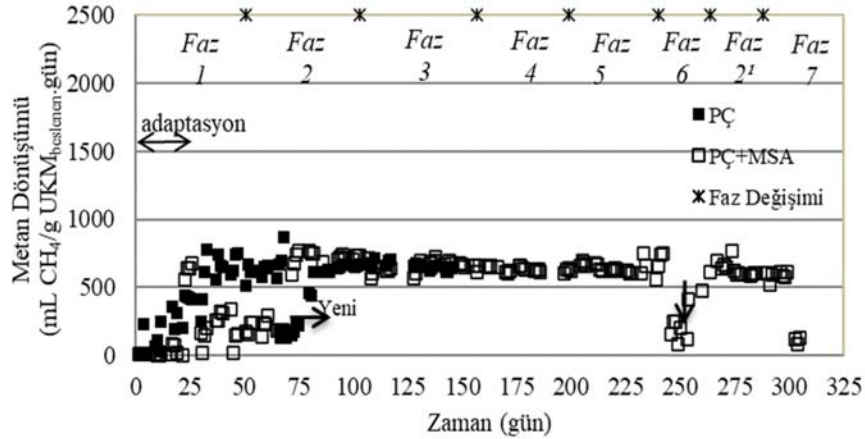
ortalama SMÜ değeri 650(±100) mL CH₄/(g UKM_{beslenen.gün}) ve GMÜ 1080(±120) mL CH₄/gün seviyelerinde gerçekleşmiştir (Şekil 1-2). Adaptasyon döneminde PÇ+MSA reaktöründe oluşan düşük performanstan dolayı kontrol reaktörü PÇ+MSA reaktörüne dönüştürülerek çalışma devam ettirilmiştir (siyah ok).

Farklı içerik ve miktarlarda MSA ilavesi ile çoklu-çürütme sürecinde elde edilen SMÜ değerleri kontrol reaktörü ile kıyaslandığında, en yüksek verim %4,5-7 artış olarak 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'ndaki Faz 2 işletiminde %20 SA ilave oranında 730(±50) mL CH₄/(g UKM_{beslenen.gün}) olarak elde edilirken, diğer fazlarda elde edilen verim kontrol reaktörü ile eşdeğer seviyede gerçekleşmiştir (Şekil 1). Bu sonuç, uygulanan MSA yüklemeleri ile PÇ'un metana dönüşüm seviyelerinde kalındığına işaret etmiştir. Gomez ve d.'nin çalışmasında PÇ ile MSA atıklarının anaerobik çürütülmesinde elde edilen 600-900 mL CH₄/(g UKM_{beslenen.gün}) aralığındaki SMÜ ile uyumlu gerçekleşmiştir [16]. Bununla birlikte en yüksek GMÜ en yüksek MA ilavesinin uygulandığı (1,68 g UKM-MA/L.gün ve %102 ilave oranı) Faz 4 işletiminde 2100±90 mL/gün değerinde kontrole oranla 1.9 kat seviyesinde elde edilirken aynı OYH'nin yarı değerinde (Faz 3) %51 ilave oranında 1.55 kat olarak gerçekleşmiştir (Şekil 2).

Tablo 3. Yarı sürekli anaerobik çoklu çamur çürütme süreçlerinin isimlendirilmesi ve işletim özellikleri
(Identification and operational characteristics of the semi-continuous anaerobic digestion periods)

Deney Dönemleri	Besiyer	OYH _{MSA} (gUKM/L.gün)	MSA:AÇ (w:w)			İşletim Süresi (gün)			Karışım Özelliği
			PÇ	SÇ	KÇ	PÇ	SÇ	KÇ	
Faz 1	MSA	0,59 ¹	0,36	1,46	0,58	30	30	30	Kısıtlı
Faz 1	MSA	0,59	0,36	1,46	0,58	20	20	20	Kısıtlı
Faz 2	SA	0,33	0,20	0,82	0,33	58	36	36	Kısıtlı
Faz 3	MA	0,84	0,51	2,09	0,84	49	71	71	Sürekli
Faz 4	MA	1,68	1,02	4,19	1,67	41	41	41	Sürekli
Faz 5	MSA	1,17*	0,71	2,92	1,16	42	42	42	Sürekli
Faz 6	SA	0,66	0,40	1,64	0,66	10	10	10	Sürekli
Faz K.	-	-	-	-	-	14	14	14	Sürekli
Faz 2 ¹	SA	0,33	0,20	0,82	0,33	24	24	24	Sürekli
Faz 7	SA	0,44	0,27	1,10	0,44	17	17	17	Sürekli

¹ 0,17 (SA)+0,42 (MA) *0,33 (SA)+0,84 (MA)

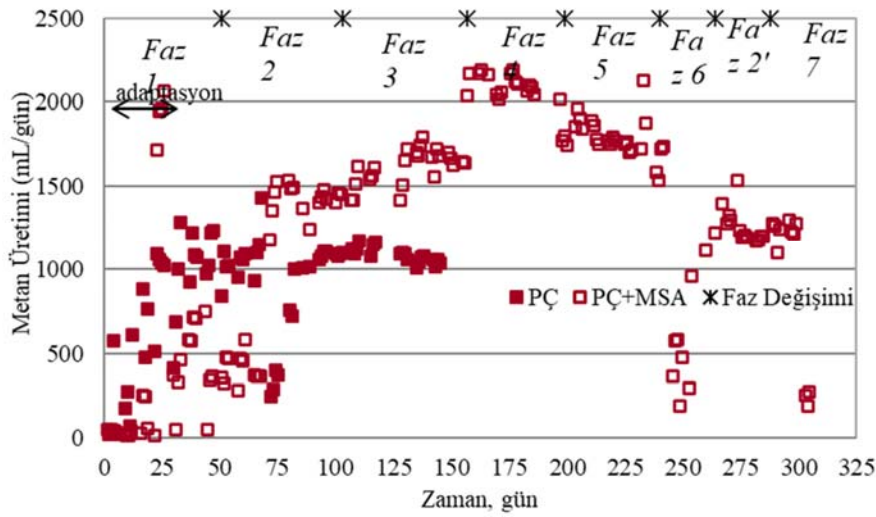


Şekil 1. PÇ reaktörlerinde spesifik metan üretimi (specific methane production in PS digesters)

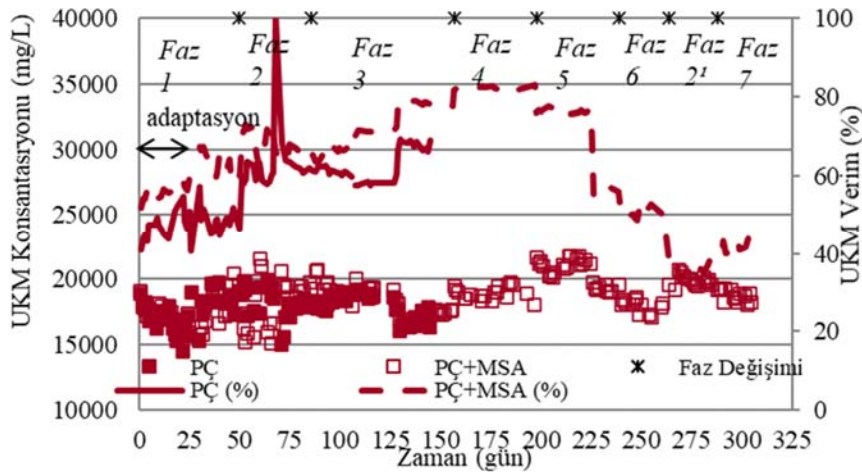
Çoklu çürütmede SA, MA ve MSA için sırasıyla %36, 64-90 ve 64 seviyelerinde GMÜ artışı elde edilmiştir. Artan MA yüklemesinde metana dönüşümde kısıtlılık gözlenmiştir ki optimum yüklemenin aşıldığı durumlarda reaktörde UKM birikiminin oluşacağı sonucu ortaya çıkmaktadır. Metan üretim hacmindeki artışa rağmen SMÜ'nin düşük kalması, MA'nın yüksek UKM içeriğinin efektif olarak metana çevrilemediğini göstermiştir. SA ile OYH artışında (Faz 6) ise toksik etki gözlenmiş, besleme 14 gün durdurulduktan sonra Faz 2 yüklemesine dönülmüştür fakat takibinde SMÜ ve GMÜ'nün düşük gerçekleşmesi biyokütle canlılığında (özellikle metanojenler) önemli bir azalma meydana geldiğini göstermiştir. Optimum OYH seviyeleri, UKM giderim veriminin azalmayacağı en yüksek SMÜ sağlayan işletimler olarak SA, MA ve MSA ilaveleri için sırasıyla 0,33 g UKM/L.gün (Faz 2 - %36 GMÜ artışı), 0,84 g UKM/L.gün (Faz 5 - %64 GMÜ artışı), 0,33, 0,84 ve 1,17 g UKM/L.gün (Faz 5 - %64 GMÜ artışı) olarak belirlenmiştir. UKM giderim verimi bütün fazlarda benzer seviyede (%64(+/-2)) gerçekleşmiştir (Şekil 3). Çoklu-çürütme uygulamasında

MSA ilavesinin çürütücüde UKM seviyesinde artışa neden olduğu gözlenmiş (17500(+/-500) mg/L kontrol ve 18500-21000 mg/L MSA) fakat aynı giderim veriminin korunması, PÇ hidroliz hızı ile uyumlu seyrettiğini göstermiştir. MA ilavesinde artış ile en yüksek UKM konsantrasyon seviyelerinin elde edilmesi, metana dönüşümdeki kısıtlılığı göstermiştir. Faz 6 sürecinde gerçekleşen toksisite durumunda reaktör beslemesi bir süre durdurulmuş ve Faz 21 düşük SA yüklemesi ile devam edildiğinde reaktör UKM'sinde önemli düşüş gerçekleşmiştir.

pH değerleri kontrol PÇ ve çoklu çürütmede 7.4'ün üzerinde yakın ve alkali seviyelerde gerçekleşmiştir (Şekil 4). PÇ içeriğindeki proteinli maddelerin anaerobik parçalanması ile bazik serbest NH₃ açığa çıkmakta ve ortama alkalinite katkısı gerçekleşirken pH'da yukarı yönlü hareket oluşmaktadır. MSA ilavesinde bu pH dengesinde belirgin bir etkileşim olmazken sadece MA ile çürütme fazlarında pH'da düşük seviyeli azalma gerçekleşmiştir. MA yapısında daha yüksek seviyede bulunan basit şeker içeriği asitlenmeyi



Şekil 2. PÇ reaktörlerinde günlük metan üretimi (daily methane production in PS digesters)



Şekil 3. PÇ reaktörlerinde UKM konsantrasyonu ve giderim verimi (VS concentration and removal degree in PS digesters)

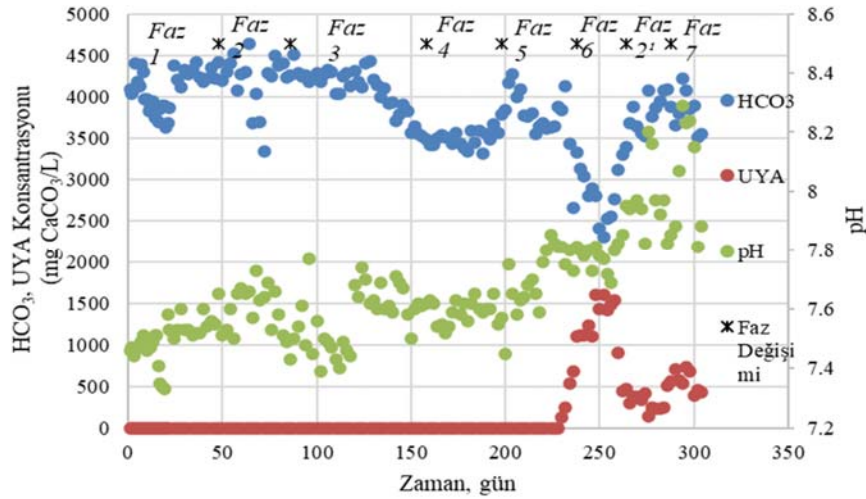
teşvik eder [17]. PÇ çürütmesinde de optimum aralıkta kısıtlı seviyede pH dengelenmesi gerçekleşmektedir [18]. Faz 6'da pH'nın aşırı artışı yüksek SA yüklemesi şartında gerçekleşmiş ve beslemenin kesilmesi ile (Faz K Tablo 3) pH 8.0'in altına düşmüş ve Faz 2'de devam eden düşük SA beslemesi sürecinde önceki kararlı seviyelerine göre yüksek seyretmiştir. Bu bulgulara göre SA'nın anaerobik çürütmede MA'ya zıt olarak alkalinite artırıcı etkisi bulunmaktadır ve Faz 6'da oluşan toksisite yüksek pH'da artan serbest NH_3 etkisine bağlanabilir.

MSA ilavesi sürecinde toksisite görülen Faz 6'ya kadar ara ürün UYA'nın sıfır (0) seviyesinde gerçekleşmesi, metanojen aktivitesinin normal seyrettiğini ve oluşan toksisitenin özellikle metanojenler üzerinde etkili olduğunu göstermiştir (Şekil 4). Bu işletiminde meydana gelen toksik etki ile UYA konsantrasyonunun 1600 mg CaCO_3/L seviyesine artışı, sistemdeki yüksek HCO_3^- ile tamponlanmış fakat takibinde Faz 2'de (düşük OYH) azalan UYA seviyesi Faz 7'de artan OYH ile tekrar yükselerek metanojenler üzerindeki negatif etkinin devam ettiğini göstermiştir.

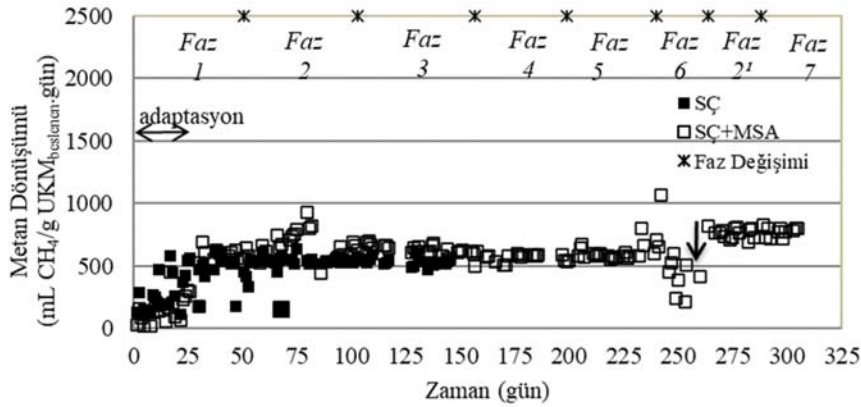
Sonuç olarak PÇ'la çürütme optimizasyonunda SA ilavesinin toksisite oluşumu ve MA'nın daha düşük metana çevrim nedeniyle uygulanacak OYH'ını kısıtladığı ve SA'nın kontrole yakın SMÜ değerleri ile PÇ'a benzer hidroliz ve metanlaşma hızları gösterdiği belirlenmiştir.

3.1.2. SÇ çürütme performansı (Secondary sludge (SS) digestion performance)

Çalışma boyunca SÇ çürütmesi için performans verileri kontrol reaktörü ile paralel olarak Şekil 5-8'de sunulmuştur. Kontrol reaktöründen elde edilen SMÜ ve GMÜ değerleri sırasıyla $500(\pm 120)$ mL $\text{CH}_4/(\text{g UKM}_{\text{beslenen}} \cdot \text{gün})$ ve $205(\pm 80)$ mL $\text{CH}_4/\text{gün}$ olarak gerçekleşmiş ve oldukça kararlı bir performans elde edilmiştir (Şekil 5-6). Çoklu çürütme reaktöründe SÇ UKM içeriğinin düşük olması nedeniyle MSA'nın ağırlıkça oranı, 0,82-4,19 kat aralığında gerçekleşmiştir. Kontrol reaktörüne göre elde edilen SMÜ artışları, SA, MA ve SMA için sırasıyla %60, 20-35 ve 12 olarak gerçekleşirken en yüksek seviyede performans $775(\pm 55)$ mL $\text{CH}_4/(\text{g UKM}_{\text{beslenen}} \cdot \text{gün})$ ile 0,33 ve 0,44 g



Şekil 4. PÇ reaktörlerinde pH, HCO_3^- ve UYA değişimi (pH, HCO_3^- and VFA change in the PS digesters)

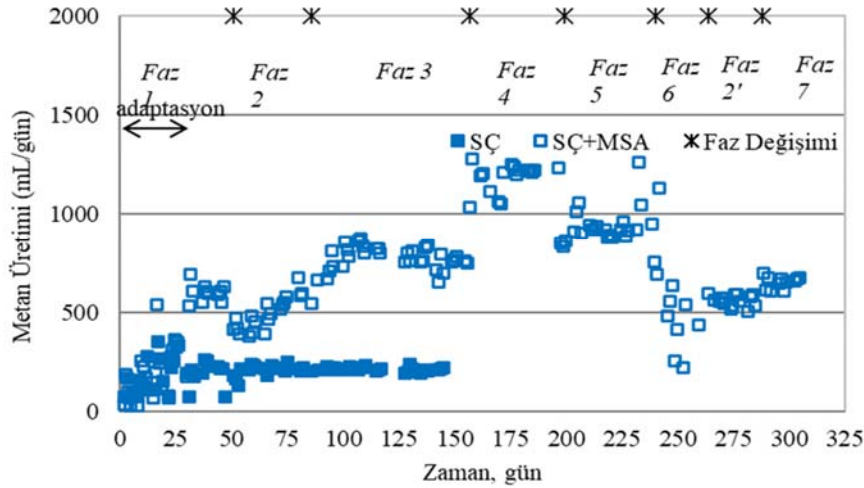


Şekil 5. SÇ reaktörlerinde spesifik metan üretimi (specific methane production in SS digesters)

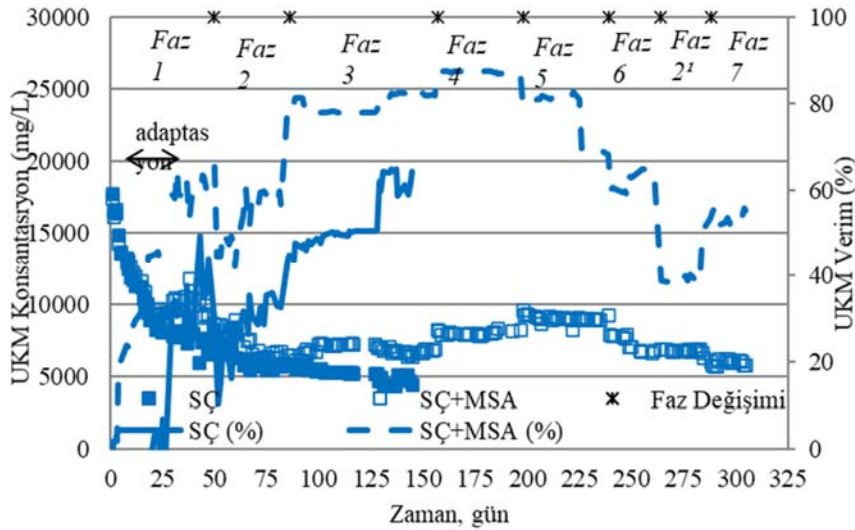
UKM-SA/L.gün OYH değerlerinde Faz 2¹ ve 7 dönemlerinde gerçekleşmiştir. Faz 6'da yüksek OYH ile SA yüklemesinin PÇ çoklu çürütmesine benzer bir toksik etki oluşturması, bu atık türünün uygulamasındaki kısıtlılığı desteklemiş fakat metanlaşma üzerinde benzer bir kalıcı etki oluşturmamıştır. MA ile çürütme döneminde Faz 3 ve 4'te 0,84 ve 1,68 g UKM-MA/L.gün yüksek OYH'lerde SMÜ azalma göstermiş, 3'den 4'e 2 kat OYH artışı döneminde %10 azalma gerçekleşmiştir. MA'nın yüksek organik içeriğine rağmen metanlaşma reaksiyonlarında kısıtlılık olduğu gözlenmiştir (Şekil 5).

En yüksek GMÜ en yüksek MA yüklemesi ile (1,68 g UKM-MA/L.gün) Faz 4 işletiminde 1195(±80) mL/gün değerinde elde edilmiştir (Şekil 6). Faz 3'ten 4'e 2 kat OYH artışında GMÜ artışı 1.5 kat artarken SMÜ'de düşüşün gerçekleşmesi, hidroliz veya metanlaşma hızının dolayısıyla optimum OYH değerinin aşıldığını göstermiştir. Çoklu çürütme ile elde edilen GMÜ artışları SA, MA ve SMA için sırasıyla %164-

190, 280-470 ve 320 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Çoklu çürütmede elde edilen SMÜ değişimine paralel ve doğru orantılı olarak reaktörlerde UKM konsantrasyonu ve gideriminde benzer değişim gerçekleşmiştir (Şekil 7). MA'nın yüksek yüklemesinde SMÜ azalırken UKM konsantrasyonu yükselmiş ve giderim verimi azalmıştır. SA'nın ilavesinde kontrolde göre %20'lik UKM artışı gerçekleşirken MA ilavesinde artış %40-90 aralığına ulaşmış ve buna bağlı olarak UKM giderim verimi kontrol reaktörü ile kıyaslandığında tüm işletimlerde daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir. Tüm faz işletimleri arasında en iyi UKM giderim verimi %46 ile 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'ndaki Faz 2'de gerçekleşmiştir. SÇ'un düşük ve kısıtlı ayrışabilirliğe sahip organik içerikli yapıda olması ve MSA ilavesi ile yüksek içerikte besleme yapılması sonucu reaktörde artan UKM seviyesi, uygulanan bütün OYH'larında MSA'nın parçalanması için gerçekleşen hidroliz hızlarının düşük olduğunu göstermiştir. Benzer bir çalışmada, 2,46-2,51 g UKM-MSA/L.gün gibi oldukça



Şekil 6. SÇ reaktörlerinde günlük metan üretimi (daily methane production in SS digesters)



Şekil 7. SÇ reaktörlerinde UKM konsantrasyonu ve giderim verimi (VS concentration and removal degree in SS digesters)

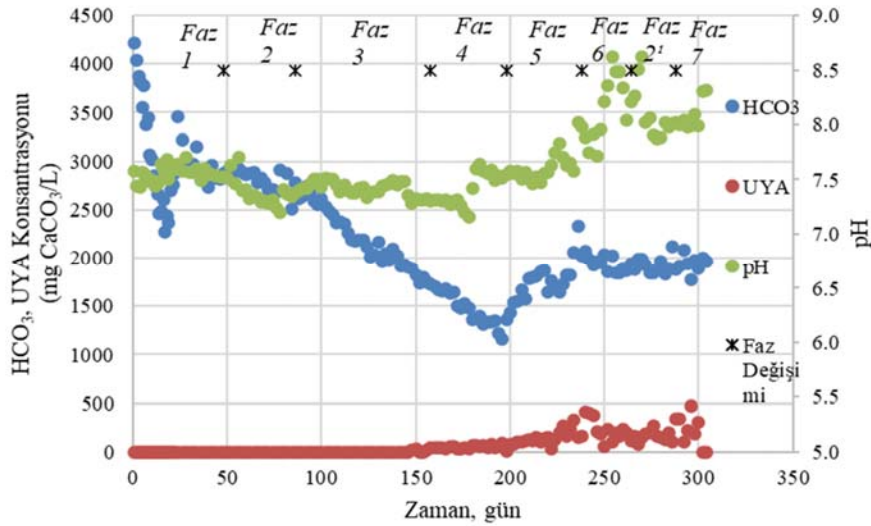
yüksek OYH ile besleme sonucu SMÜ 610 mL CH₄/g UKM_{beslenen.gün} ve UKM giderim verimi %85.4 olarak SMÜ için benzer fakat UKM giderimi için oldukça yüksek bir değer elde edilmiş ve aradaki fark atık içeriğindeki farklılığa bağlanmıştır [19].

SÇ'un çürütmesinde PÇ'a nazaran daha yüksek pH seviyesinin gerçekleşmesi, SÇ'un bileşimindeki yüksek proteinin (mikrobiyal hücreler) parçalanması ve PÇ'un bileşiminde asitlenmeye neden olan maddelerin (ör. yağ-gres) varlığına işaret etmiştir (Şekil 8). Çoklu çürütme reaktöründe pH'nın kontrole göre daha asidik seviyede (7,20-7,82) gerçekleşmesi, SA ve MA yapılarının karbonhidrat ağırlıklı olmasının sonucudur. Gerçekleşen aralık metan arkeleri için optimum aralıktadır [18]. Faz 6'da 8,15-8,60 seviyesine yükselme ile meydana gelen toksik etki, PÇ çürütmesine göre çok düşük seviyelerde olsa da 3 gün'lük UYA artışı ile gözlenmiştir (Şekil 8). Metanojenlerin üzerindeki negatif etki oldukça kısıtlı süre boyunca geri dönüşür karakterde gerçekleşmiştir. UKM gibi bikarbonatın da PÇ çürütmesine göre düşük seviyede

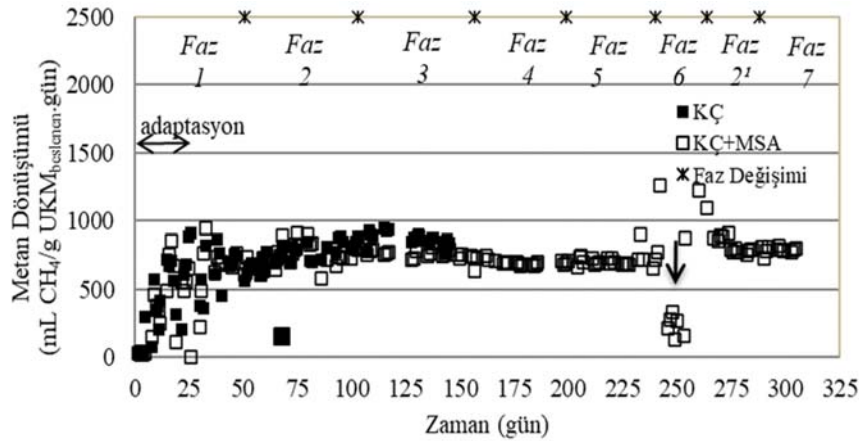
gerçekleşmesi SÇ'un yapısındaki kısıtlı sayıda ve miktardaki ayrışabilir organik madde varlığını desteklemiştir.

3.1.3. KÇ Çürütme Performansı (Mixed sludge (MS) digestion performance)

Mevcut kentsel AAT'lerde birleşik sistem arıtma çamuru stabilizasyonu olarak uygulanan KÇ çürütmesinde SMÜ performansı diğer reaktörlere göre en geniş aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 9). Çoklu çürütmede kontrol ile kıyaslandığında SMÜ'nün çoğunlukla kararlı fakat düşük seviyede kaldığı gözlenmiştir. Çalışma boyunca kontrol KÇ reaktöründen elde edilen SMÜ değeri 790(±200) mL CH₄/(g UKM_{beslenen.gün}) ve GMÜ 760(±190) mL CH₄/gün olarak geniş bir salınımda gerçekleşmiştir (Şekil 9-10). Çoklu çürütücünün tüm faz işletimleri arasında en yüksek verim SA'nın 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'ı ile Faz 7'de maksimum SMÜ 720(±40) mL CH₄/(g UKM_{beslenen.gün}) olarak elde edilmiştir (Şekil 9). Faz 6'da diğer çürütücülerle benzer şekilde oluşan toksisite hem SMÜ'ni hem de GMÜ'ni olumsuz etkilemiş, fakat yürütülen süreçte anaerobik performans Faz 2'de eski seviyesine dönmüştür. Çoklu



Şekil 8. SÇ reaktörlerinde pH, HCO₃⁻ ve UYA değişimi (pH, HCO₃⁻ and VFA change in the SS digesters)

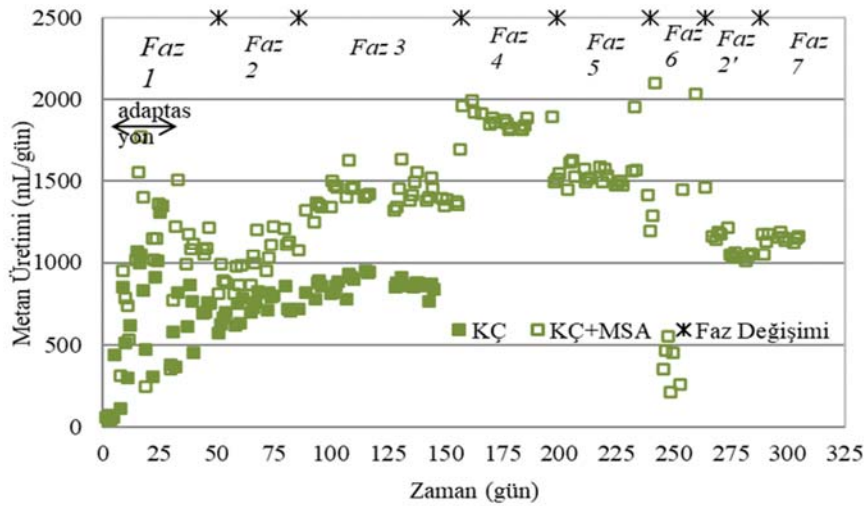


Şekil 9. KÇ reaktörlerinde spesifik metan üretimi (specific methane production in MS digesters)

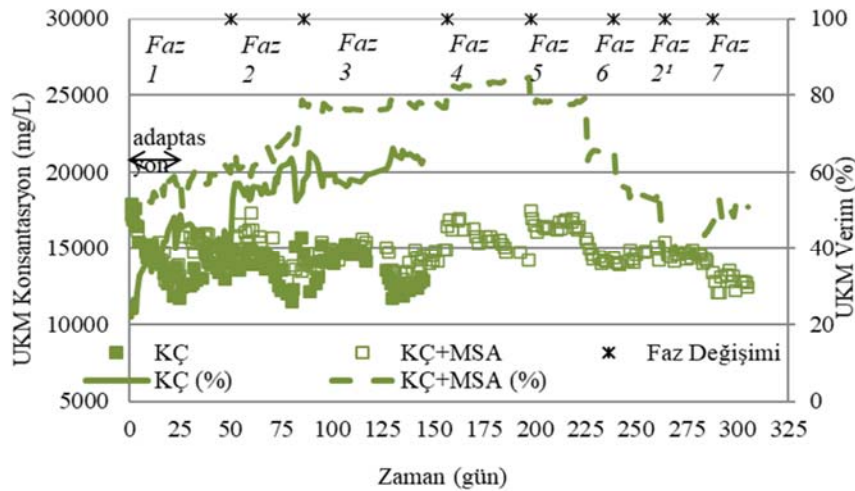
çürütücüde GMÜ değerleri kontrole göre (Faz 6 hariç) SA, MA ve SMA için sırasıyla %23-30, 64-122 ve 75 artış ile gerçekleşirken en yüksek GMÜ 1855±40 mL/gün olarak 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda Faz 4 işletiminde MA ile elde edilmiştir (Şekil 10). Sosnowski ve d.'nin KÇ'nin 3,084 g UKM/L.gün OYH'nda MSA ile mezofilik şartlarda anaerobik çürütme çalışmasında SMÜ değeri 532 mL CH₄/(g UKM_{beslenen}.gün) olarak oldukça düşük seviyede elde edilmiştir [20]. Çoklu çürütme çalışmalarında elde edilen geniş performans aralığının, farklı atık bileşimlerinden kaynaklanması beklenen bir sonuçtur. Aynı pazar yerinden zamana bağlı olarak farklı atık bileşimlerinin oluşması doğaldır; sadece mevsimsel ölçekte değil, daha kısa süreli tür ve miktar değişimleri gerçekleşmektedir. Metanlaşma verilerine göre yüzde ağırlık ve OYH bazında düşük (zamana yayılmış) seviyelerin uygulanması anaerobik çürütücülerin kararlı performansını pozitif yönde etkileyecektir. KÇ çürütmesinde UKM konsantrasyonu seviyesi ve değişimi, PÇ ile SÇ çürütmesi arasındaki seviyelerde kahrken çoklu çürütmede en yüksek artış

diğerlerine benzer şekilde en yüksek MA yüklemesinde (Faz 4 ve 1,68 g UKM-MA/L.gün) 16400(±550) mg/L olarak gerçekleşmiştir (Şekil 11). Buna karşılık maksimum UKM giderim verimi ise 0,33 g UKM-SA/L OYH'ndaki Faz 2'de %60(±3) olarak gerçekleşmiştir. İlave organik maddeden dolayı özellikle MA ve MSA ilavesinde daha yüksek UKM konsantrasyonu ve daha düşük değerlerde UKM giderim verimi gözlenmiş ve diğer çürütücülerle benzer şekilde MA'dan kaynaklanan kısıtlı hidroliz hızı burada da gözlenmiştir.

pH değerleri MA veya SA tipine göre farklı fakat kontrol KÇ'ye göre daha düşük pH seviyelerinde (7,25-7,96) optimum bir aralıkta değişim göstermiştir (Şekil 12) [18]. Düşük pH seviyeleri özellikle MA ilavesinde gerçekleşmiştir. Asitlenme etkisinin UYA oluşumundan ziyade CO₂ oluşumu ile gerçekleştiği, toksik etkiye kadarki sıfır UYA konsantrasyonu ile anlaşılabilir. İlave organik maddenin tampon güç yani HCO₃⁻ üzerindeki azaltıcı etkisi oldukça kısıtlı seviyede kalmıştır. Diğer reaktörlere benzer



Şekil 10. KÇ reaktörlerinde günlük metan üretimi (daily methane production in MS digesters)



Şekil 11. KÇ reaktörlerinde UKM konsantrasyonu ve giderim verimi (VS concentration and removal degree in MS digesters)

şekilde Faz 6 işletiminde reaktörde oluşan toksik etki, UYA'nın PÇ ile SÇ çürütmeleri arasında bir değere yükselmesi ve PÇ'ye benzer şekilde kalıcı olmasıyla sonuçlanmış ve ham PÇ içeriğinden gelen maddelerin yüksek SA yüklemesi ile sinerjik etki oluşturduğunu dektelemiştir. UYA'nın artışı ve sıfırlanmaması özellikle metanojenler üzerinde toksik etki oluştuğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, çoklu çürütmeye bütün çürütücülerde en yüksek metana dönüşüm ve UKM giderimi düşük OYH'ında SA ile elde edilirken en yüksek GMÜ, MA ilavesinde fakat kısıtlı ayrışabilirlik nedeniyle giderilemeyen ve artan UKM seviyeleri ile birlikte oluşmuştur. Yüksek SA yüklemesi ile karşılaşılan toksik etki, PÇ reaktöründe daha etkili olmuştur, bu da PÇ'un yapısındaki madde ve/veya ara ürünlerle ilişkilendirilmiştir. PÇ'un ham organik içeriğinin anaerobik mikroorganizmalar üzerinde negatif etki gösterebilecek maddeler içermesi ve yüksek ayrışabilirliğine rağmen hassas bir dengede prosesin gerçekleşmesi mümkündür. Toksik etki altında UYA'da gerçekleşen yüksek seviye ve metan üretiminin eski seviyesine dönmemesi, özellikle metanojenler üzerinde canlılık kaybına neden olan sinerjik bir etki olarak değerlendirilebilir. SÇ reaktöründe çok düşük

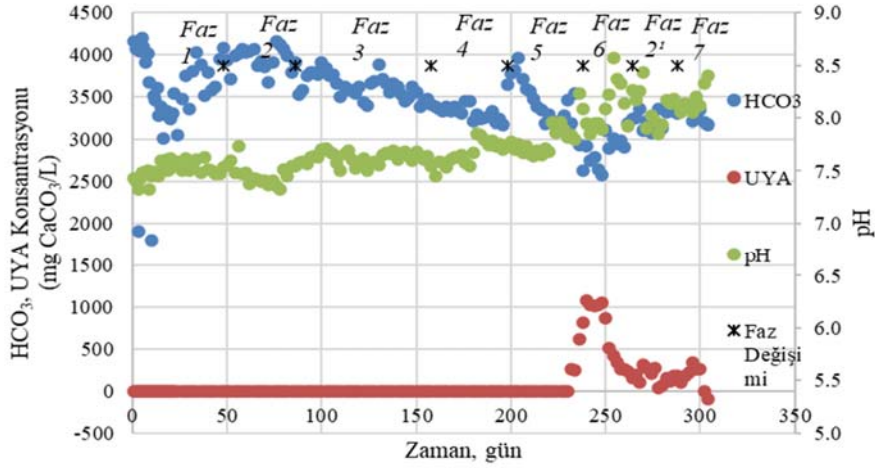
seviyede gerçekleşen toksik etki, SÇ içeriğindeki kısıtlı tür ve ayrışabilirlikteki organik içeriğe bağlanabilir ve PÇ içeriğinde bulunan maddeler ve/veya parçalanması ile oluşan ara ürünlerin sinerjik etkisini desteklediği kabul edilebilir.

3.2. Çıkış/Stabilize Çamur Kalitesi (Effluent/Stabilized Sludge Quality)

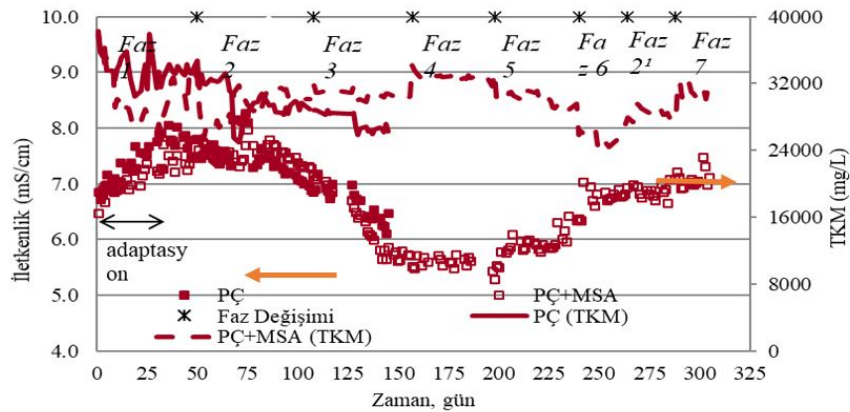
Günlük alınan çıkış çamur numunelerinde iletkenlik ve TKM analizleri ile belirli dönemlerde alınan stabilize çamur numunelerinde TN, TP ve susuzlaştırma analizleri yapılarak çıkış/stabilize çamur kalitesi kontrol reaktörleri ile paralel olarak izlenmiştir.

3.2.1. İletkenlik - TKM değişimi (Conductivity - TSM change)

Reaktörlerdeki iletkenlik-TKM değişimleri PÇ, SÇ ve KÇ için kontrolleri ile birlikte Şekil 13-15'de gösterilmiştir. Hidroliz basamağının performansının belirlenmesi bakımından TKM değişimine karşılık iletkenlik parametresindeki değişim izlenmiş ve değerlendirilmiştir. Kontrol reaktörlerinde iletkenlik değişimi PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 6,8-8,2, 4,9-6,0 ve 6,1-7,1 mS/cm aralıklarında



Şekil 12. KÇ reaktörlerinde pH, HCO₃⁻ ve UYA değişimi (pH, HCO₃⁻ and VFA change in the MS digesters)



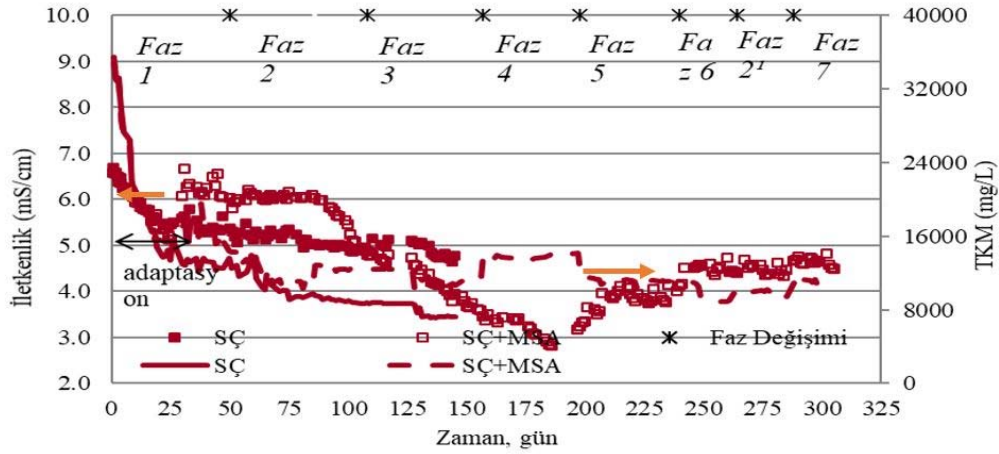
Şekil 13. PÇ reaktörlerinde iletkenlik ve TKM değişimi (Conductivity and TS changes of the PS digesters)

SÇ<KÇ<PÇ şeklinde azalan sırada gerçekleşmiştir. PÇ ve KÇ için sabit OYH uygulamasına rağmen aynı TKM seviyesinde iletkenliğin azalması, yeni biyokütle sentezine bağlanmıştır. Sabit TKM ve iletkenlik seviyeleri sadece SÇ reaktöründe oluşmuştur ve mikrobiyal büyümenin kısıtlı kaldığını desteklemiştir. UKM seviyesinin de sabit ve düşük kalması SÇ'nin kısıtlı ayrışabilir yapısı nedeniyle gerçekleşmektedir ki bu dirençli yapıyı parçalayabilmek için gerçek ölçekte ticarileşmiş fiziksel ön işlem yöntemleri uygulanmaktadır [8]. MSA ilavesinde TKM artışına rağmen iletkenliğin azalması daha yüksek oranda gerçekleşmiş ve çoklu çürütmenin biyokütle artışı daha yüksek seviyede desteklediği belirlenmiştir. MSA ilave edilen reaktörlerdeki çıkış iletkenlik değerleri üç çamur fraksiyonu için de daha yüksek değerlerde gerçekleşirken, TKM konsantrasyonu özellikle MA ilavesinde artış göstermiştir. Çoklu SÇ çürütücüde ilk fazlarda ve KÇ'de kısa dönemli olarak iletkenliğin kontrol göre yüksek gerçekleşmesi, bir mikrobiyal bozunma+adaptasyon etkisi veya dönemi olarak değerlendirilebilir. Toksikite sürecinde iletkenliğin artması, mikrobiyal içsel solunum ve/veya engellenmiş sentez şartlarının gerçekleştiğini göstermiştir. İletkenlik

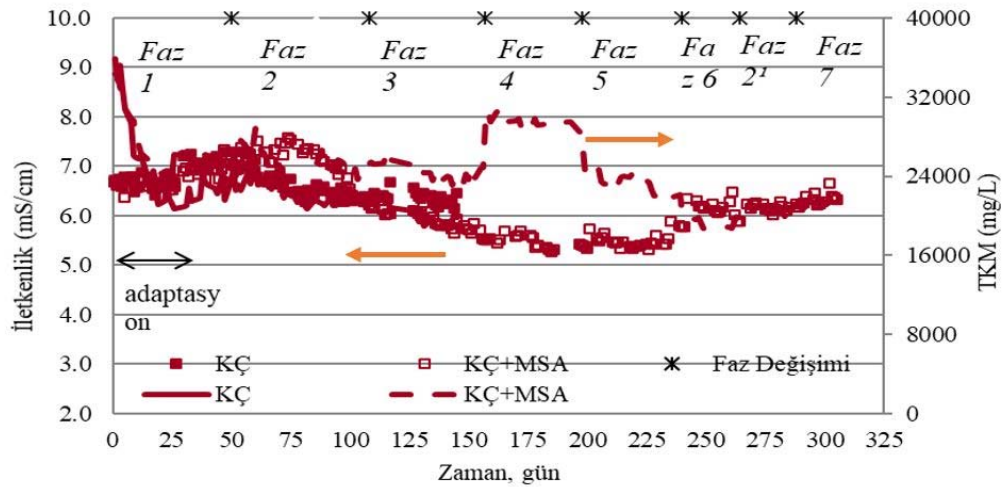
parametresi, çamur kalitesi bakımından tuzluluğun bir ölçüsüdür ve yüksek olması durumunda toprakta mikrobiyal aktiviteyi etkileyen önemli bir faktördür. Fazla tuzlu çamurun toprağa ilavesi, topraktaki nütrient döngüsünü azaltarak fitotoksisteye neden olabileceğinden arıtma çamurunun ancak $EC < 2$ mS/cm değerlerinde tuzluluk etkisinin ihmal edilebileceği ve 2-4 mS/cm aralığının ise sınırlı tarımsal uygulanabilirliği bulunmaktadır [21]. Tekli veya çoklu besiyerli çürümüş PÇ ve KÇ için tüm işletimlerde genel olarak 4-7.1 mS/cm aralığında gerçekleşen iletkenlik seviyesi mikrobiyal aktiviteyi etkileyeceğinden tarımda kullanıma uygunluk elde edilememiştir. Tarımsal uygulamaya uygun stabilize çamur sadece 1,68 g UKM/MA/L.gün OYH'nda MA beslemesi ile SÇ çürütmesinde (2-4 mS/cm) oluşmuştur (Şekil 14).

3.2.2. Susuzlaşma kabiliyeti ve nütrient içeriği (Dewatering ability and nutrient content)

Reaktörlerden kararlı hal şartlarında alınan stabilize çamur numuneleri üzerinde uygulanan susuzlaşma deneyinde elde edilen filtrelenme süreleri Tablo 4'de gösterilmektedir.



Şekil 14. SÇ reaktörlerindeki iletkenlik ve TKM değişimi (Conductivity and TS changes of the SS digesters)



Şekil 15. MÇ reaktörlerindeki iletkenlik ve TKM değişimi (Conductivity and TS changes of the SS digesters)

Tablo 4. Stabilize PÇ, SÇ ve KÇ'nin kontrol ve faz değişimlerine göre elde edilen susuzlaşma süreleri (Dewatering times of the stabilized PS, SS and MS for control and phase changes)

Susuzlaşma Süreleri (s)		İlave Besiyeri ile Faz Değişimleri				
Reaktör	Kontrol	0,84*	1,68*	1,17*	0,33*	0,44*
PÇ	366	676	471	454	561	412
SÇ	344	515	642	678	597	312
KÇ	291	487	336	390	335	376

*OYH (g UKM/L.gün)

Tablo 5. Stabilize çamur TN içeriği (N content of the stabilized sludge)

		Azot İçeriği (mg N/g TKM)					
		PÇ	SÇ	KÇ	PÇ-SMA	SÇ-SMA	KÇ-SMA
Faz 3	Süzüntü suyu	36	133	51	31	81	38
Faz 3	Çamur	48	178	68	42	114	52
Faz 4	Süzüntü suyu				25	34	24
Faz 4	Çamur				111	363	202
Faz 2'	Süzüntü suyu				25	34	24
Faz 2'	Çamur				110	285	90

Çoklu besiyeri ilavesiyle çürütme yapılan reaktörlerdeki susuzlaşma süreleri kontrol reaktörlerine göre daha yüksek gerçekleşmiştir. Susuzlaşma sürelerinin çamurun TKM-UKM seviyelerine bağlı olarak değişim gösterdiği bilinmektedir ve paralel ilişki tüm fraksiyonlarda gerçekleşmiştir. Hem kontrol hem de çoklu besiyeri ilavesiyle farklı işletimlerde en iyi susuzlaşma performansı stabilize KÇ için gerçekleşmiştir. PÇ ile SÇ'un farklı özelliklerinin susuzlaşma kabiliyetinin dengelenmesinde veya optimize edilmesinde rol oynadığı muhtemeldir.

Çoklu besiyeri ile işletilen reaktörlerdeki TN ve TP değerleri kontrollere göre N için artış gösterirken P için stabilize PÇ ve KÇ'da benzer fakat SÇ'da düşük seviyede gerçekleşmiştir (Tablo 5-6). Elde edilen sonuçlara göre Faz 3 işletiminde kontrollerine kıyasla stabilize çamurlarda en düşük TN ve TP değerleri gerçekleşmiştir. Literatürde artma çamurları için bildirilen TN (37,3-78,1 mg TN/g TKM) ve TP aralıklarından (9-16 mg TP/g TKM) özellikle TP için SÇ'da daha yüksek seviyede değerler elde edilmiştir [22]. Yüksek değerler tesisin biyolojik arıtım prosesinin modifiye Bardenpho olması ile SÇ bünyesine daha yüksek miktarda N ve P geçmesine bağlanmıştır.

Tablo 6. Stabilize çamur TP içeriği

(TP content of the stabilized sludge)

		Fosfat İçeriği (mg P/g TKM)		
		PÇ-SMA	SÇ-SMA	KÇ-SMA
Faz 3	Çamur	9	23	10
Faz 4	Süzüntü suyu	1	10	2
Faz 4	Çamur	15	57	26
Faz 2'	Süzüntü suyu	1.6	6.8	2.6
Faz 2'	Çamur	16.4	55.2	19.4

3.3. Sonuçların Değerlendirilmesi (Evaluation of the Results)

PÇ, SÇ ve KÇ reaktörlerinden elde edilen sonuçlara göre, SA ilavesinin düşük OYH'ında (0,33-0,44 g UKM-SA/L.gün)

SMÜ verimi üzerinde MA ve MSA'ya göre daha etkili olduğu gözlenmiştir (Tablo 7). Ayrıca SA'nın hidroliz hızının da bu aralıkta gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrışabilirliğine karşın OYH artışında toksik etki nedeniyle sınırlama gerçekleşmiştir. En yüksek seviyede toksik etkinin PÇ çürütmesinde gerçekleşmesi PÇ içeriğinde ve/veya oluşan ara ürünlerle gerçekleşen sinejik etki olarak açıklanabilir. Ham organik+inorganik kirleticileri barındıran PÇ'nin ayrık ve çoklu çürütmesinin diğer SÇ ve KÇ'a göre daha yüksek riskler barındıracağı bir gerçektir. Önceki benzer çalışmalara göre düşük OYH seviyelerinde elde edilen metana çevrim oldukça yüksek seviyelerde gerçekleşerek ayrık ve birleşik çoklu çürütme sistemin özellikle ayrışabilirliği kısıtlı SÇ çürütmesinin verimini artırdığı ve stabilize çamur kalitesini iyileştirdiği gözlenmiştir.

Çoklu besiyer olarak kullanılan atıkların OYH'ları artırıldığında GMÜ'nin artmasına karşılık daha düşük seviyelerde SMÜ'nün elde edilmesi uygulanan atıklar için hidroliz hızının aşıldığını göstermiştir. Sonuç olarak UKM konsantrasyonundaki artış, giderilemeyen ve biriken organik içeriğe işaret etmiştir. Çoklu besiyerinin özellikle SÇ çürütmesinde sağladığı faydalar önemlidir; ayrışabilirliğin artışı hem biyolojik yolla sağlanmış hem de biyokütle sentezi artırılarak stabilize çamurun iletkenliği düşürülmüş ve tarımsal uygulamaya uygunluk elde edilmiştir. Ayrık sistem uygulamasında sağlanabilecek en yüksek fayda elde edilmiştir.

Çoklu çürütmede SA ilavesi ortam pH'sına etki etmezken MA ilavesinin asidik yönde dengeleyici etki göstermesi içeriğinde daha yüksek seviyedeki şekerin asitlenmesi ile etkili olduğunu göstermiştir. Toksik etki altında birikim gösteren UYA nedeniyle düşen pH, her reaktör için yüksek bikarbonat seviyesi sayesinde nötr seviyenin üzerinde kalmıştır. Arıtma çamurlarının içeriğindeki yüksek protein oranı, anaerobik proseste alkalinite üreterek yüksek asitlenme eğiliminde olan atıkların birlikte çürütülmesi için

Tablo 7. Çalışmanın optimum sonuçlarının literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılması
(Comparison of the optimum results of the study to previous literature)

Çamur ve Atık Tipi	OYH (g UKM _{MSA} /L.gün)	Reaktör Tipi	Sıcaklık (°C)	HBS (gün)	SMÜ (mL CH ₄ /g UKM _{bes.gün})	UKM Verim (%)	Kaynak
KÇ:MSA	3,084	Yarı sürekli	36	17,3	532	23	[20]
KÇ:MSA	2,09	Kesikli	37	30	365,5±30	47	[23]
KÇ:MSA	1,46	Yarı sürekli	35±2	11	900	35	[24]
KÇ:SA	0,68	Kesikli	25	15	680	63-65	[25]
KÇ:MA	3	Yarı sürekli	37	20	300	110	[26]
PÇ:MSA	3,8	Yarı sürekli	35-37	37	600-800	58	[16]
SÇ:MSA	2,46-2,51	Kesikli	35	10	610	85,4	[19]
KÇ:MSA	0,585	Yarı sürekli	35	20	700±25	57	M. Ç.*
PÇ:MSA	1,17	Yarı sürekli	35	20	640±20	63	M. Ç.*
SÇ:MSA	1,17	Yarı sürekli	35	20	580±20	39	M. Ç.*
KÇ:SA	0,44	Yarı sürekli	35	20	790±20	62	M. Ç.*
PÇ:SA	0,33	Yarı sürekli	35	20	730±50	70	M. Ç.*
SÇ:SA	0,44	Yarı sürekli	35	20	760±40	46	M. Ç.*
KÇ:MA	0,84	Yarı sürekli	35	20	720±40	59	M. Ç.*
PÇ:MA	0,84	Yarı sürekli	35	20	650±20	60	M. Ç.*
SÇ:MA	0,84	Yarı sürekli	35	20	590±80	42	M. Ç.*

* M. Ç.: Mevcut Çalışma

uygun ortam sağlamaktadır. Toksik etkiye kadar sıfır UYA seviyesi ile gerçekleşen çoklu çürütme performansı, oluşan UYA'nın yüksek hızda metana tamamen dönüştürüldüğünü göstermiştir. Toksik etki altında birikimle oluşan UYA seviyesi de metanojenlerin normal işletimde yüksek verimle çalıştığı ortaya koymuştur. Toksik etkiyle birlikte oluşan yüksek pH seviyesi, arıtma çamuru kaynaklı yüksek protein içeriğinden hidroliz ve deaminasyon yoluyla oluşan yüksek amonyumun toksik serbest amonyak formuna dönüşmesi ile metanojenler üzerinde inhibisyona ve yüksek seviyeli UYA birikimine neden olması muhtemeldir [27, 28].

Literatürdeki arıtma çamurlarının MSA ilavesiyle çoklu anaerobik çürütme çalışmalarında uygulanan OYH ve HBS değerlerinin oldukça yüksek olduğu gözlenmektedir (Tablo 7). Mevcut çalışmada uygulanan OYH değerlerinin daha düşük seviyelerine göre elde edilen SMÜ seviyeleri (620-810 mL CH₄ /g UKM_{bes.gün}) ve UKM giderim verimleri daha yüksek gerçekleşmiştir. Ham çamur karakteristiği, MSA bileşimi ve ayrışabilirliğin çoklu besiyeri çürütmesinin önemli değişkenleri olmasının yanı sıra mevcut çalışmada uygulanan düşük OYH ve yüksek HBS işletiminin önceki çalışmalardaki yüksek OYH ve/veya düşük HBS uygulamasına göre daha yüksek performans verdiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Mevcut çalışma işletiminin MSA ayrışmasına daha uygun şartlar sağladığı verilerle desteklenmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

PÇ, SÇ ve KÇ fraksiyonlarının MSA, MA ve SA ile birlikte mezofilik şartlarda anaerobik stabilizasyonu incelenmiş, ayrı ve mevcut birleşik sistemdeki potansiyel sonuçları ile çoklu besiyeri ilavesinin anaerobik çürütme performansına ve stabilize çamurlara etkileri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- Çoklu çürütmede PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 650-750, 550-800 ve 720-900 mL CH₄/(g UKMekl.gün) aralığında SMÜ aralıklarında metana dönüşüm elde edilmiştir.
- Artan OYH seviyelerinde oluşan UKM birikimi ile MA ve SA ilavesi için optimum OYH'ları sırasıyla 0,84 ve 0,33-0,44 g UKM/L.gün ve ağırlıkça ilave oranları PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla %51, 209 ve 84 olarak elde edilmiştir.
- Optimum OYH'larında çoklu çürütme ile SMÜ'de PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla %12, 25-55 ve 0 ile günlük metan üretiminde %50-75, 250-300 ve 44-66 artış elde edilmiştir.
- MA'nın yüksek yüklemesinde optimum OYH'nin geçilmesi SMÜ'de azalma ve reaktör ve stabilize çamur UKM seviyesinde birikime neden olurken, SA'nın artan OYH'nda toksisite gerçekleşmiş ve PÇ çoklu çürütmesinde metanojen aktivitesi üzerinde kalıcı hasar oluşmuştur.
- SA, MA'ya kıyasla daha yüksek metana dönüşüm ile daha yüksek ayrışabilirlik özelliği göstermiştir. MA ayrışması pH'ya asitlenme yönünde pozitif etki etmiştir. Her iki atık tipi için de zamana ve bölgeye bağlı olarak önemli değişimler muhtemeldir. Elde edilen sonuçlar mevcut kentsel AAT'lerinde hem ayırık hem de birleşik çamur çürütme sistemlerinde çoklu besiyeri olarak MA ve SA ilavesinde düşük yükleme hızlarında metan eldesine olumlu yönde etki göstereceğini ortaya koymuştur.
- SA ve MA ilavesi stabilize çamurların susuzlaşma kabiliyetini düşürmüştür. Diğer yandan özellikle substrat kısıtlılığı ile düşük biyokütle seviyesinde işleyen SÇ çürütmesinde ayrışabilirliği ve biyokütleli artırma yönünde fayda sağlayarak tarımsal uygulamalara uygun stabilize çamur üretilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar olarak 191001013 Numaralı BAP kapsamında çalışmaya sağladığı destekten dolayı Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz. Deneilerin yürütülmesindeki yardımı için Hamza Aysan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gokcol, C., Dursun, B., Alboyaci, B., Sunan, E., Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey, *Energy Policy*, 37 (2), 424-431, 2009.
- Schnurer, A. ve Jarvis, A., *Microbiological handbook for biogas plants*. Swedish Waste Management U, 2010.
- Arhoun, B., Villen-Guzman, M., Gomez-Lahoz, C., Rodriguez-Maroto, J. M., Garcia-Herruzo, F., Vereda-Alonso, C., Anaerobic co-digestion of mixed sewage sludge and fruits and vegetable wholesale market waste: Composition and seasonality effect, *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100848, 2019.
- Nghiem, L.D., Koch, K., Bolzonella, D., Drewes, J. E., Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: bottlenecks and possibilities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 354-362, 2017.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X., Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485-1496, 2017.
- Angelidaki, I., L. Ellegaard, Ahring, B.K., Applications of the anaerobic digestion process, in *Biomethanation II*, Ed. B.K. Ahring, Springer, 1-33, 2003.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., Astals, S., Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling, *Critical Reviews in Biotechnology*, 31 (2), 99-111, 2011.
- Cao, Y., Pawłowski, A., Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3), 1657-1665, 2012.
- Prabhu, M.S., Mutnuri, S., Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste, *Waste Management & Research*, 34 (4), 307-315, 2016.
- Shi, S., Xu, G., Yu, H., Zhang, Z., Strategies of valorization of sludge from wastewater treatment, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93 (4), 936-944, 2018.
- Pramanik, S.K., Suja, F.B., Zain, S.M., Pramanik, B.K., The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraint, *Bioresource Technology Reports*, 100310, 2019.
- Ganesh, R., Torrijos, M., Sousbie, P., Lugardon, A., Steyer, J. P., Delgenes, J. P., Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: comparison of start-up, reactor stability and process performance, *Waste Management*, 34 (5), 875-885, 2014.
- Chakraborty, D., Karthikeyan, O. P., Selvam, A., Wong, J. W., Co-digestion of food waste and chemically enhanced primary treated sludge in a continuous stirred tank reactor, *Biomass and Bioenergy*, 111, 232-240, 2018.
- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), 21st Edition, Washington, A.B.D., 2005.
- Anderson, G., Yang, G., Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration, *Water Environment Research*, 64 (1), 53-59, 1992.
- Gomez, X., Cuetos, M., Cara, J., Moran, A., Garcia, A., Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate, *Renewable Energy*, 31 (12), 2017-2024, 2006.
- Scano, E.A., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V., Cocco, D., Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant, *Energy Conversion and Management*, 77, 22-30, 2014.
- Öztürk, İ., Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, Türkiye, 2007.
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Romdan, E.B., Rachdi, B., Hamdi, M., Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition, *Journal of Environmental Management*, 90 (5), 1844-1849, 2009.
- Sosnowski, P., Wiczorek, A., Ledakowicz, S., Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes, *Advances in Environmental Research*, 7 (3), 609-616, 2003.
- Wong, J., Li, K., Fang, M., Su, D., Toxicity evaluation of sewage sludges in Hong Kong. *Environment International*, 27 (5), 373-380, 2001.
- Rizk, M.C., R. Bergamasco, Tavares, C.R.G., Anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste and sewage sludge, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5 (1), CP6-U148, 2007.
- Cabbai, V., Ballico, M., Aneggi, E., Goi, D., BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge, *Waste Management*, 33 (7), 1626-1632, 2013.
- Di Maria, F., Sordi, A., Cirulli, G., Micale, C., Amount of energy recoverable from an existing sludge digester with the co-digestion with fruit and vegetable waste at reduced retention time, *Applied Energy*, 150, 9-14, 2015.
- Anhuradha, S., Vijayagopal, V., Radha, P., Ramanujam, R., Kinetic studies and anaerobic co-digestion of vegetable market waste and sewage sludge, *CLEAN–Soil, Air, Water*, 35 (2), 197-199, 2007.
- Fonoll, X., Astals, S., Dosta, J., Mata-Alvarez, J., Anaerobic co-digestion of sewage sludge and fruit

- wastes: evaluation of the transitory states when the co-substrate is changed, *Chemical Engineering Journal*, 262, 1268-1274, 2015.
27. Mu, L., Zhang, L, Li, A.M., Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production, *Science of The Total Environment*, 704, 135429, 2020.
28. Sun, C., Cao, W.X., Banks, C.J., Heaven, S., Liu, R.H., Biogas production from undiluted chicken manure and maize silage: a study of ammonia inhibition in high solids anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 218, 1215-1223, 2016.