

## Evsel Katı Atıkların Anaerobik Ortamda Ön Çökeltme Çamuru ile Çürütülmesi

**E. DEMİREKLER**

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü,  
06531, Ankara-TURKEY*

**G. K. ANDERSON**

*Department of Civil Engineering,  
University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, Newcastle  
Upon Tyne, NE1 7RU-UK*

Geliş Tarihi 03.09.1999

### Özet

Bu çalışmanın amacı, farklı oranlarda karıştırılmış evsel katı atık (EKA) ve ön çökeltme çamuru (ÖÇÇ) ile beslenen üç laboratuvar ölçekli yarı kesikli anaerobik çürütücünün start-up aşamasındaki performans ve kararlılıklarının karşılaştırılmasıdır. Bu üç çürütücüye farklı oranlarda EKA:ÖÇÇ eklenmiştir. ÖÇÇ eklenmesi sistem kararlılığını ve özgül gaz üretim hızı (ÖGÜH) açısından performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Aşının çalışmakta olan bir anaerobik çürütücünden alınması, hızlı bir başlangıç süreci yaşanmasını sağlamıştır. Çürütücüler yüksek organik yüklerle ( $5,2 \text{ kg UKM m}^{-3} \text{ gün}^{-1}$ ,  $3,9 \text{ kg UKM m}^{-3} \text{ gün}^{-1}$  ve  $3,2 \text{ kg UKM m}^{-3} \text{ gün}^{-1}$ ) çalıştırılmaya başlanmasına rağmen hiçbirinde başarısız sonuç alınmamıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Evsel Katı Atık, Anaerobik Çürütme, Kararlılık, Ön Çökeltme Çamuru, Verim

## Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste With Primary Sewage Sludge Addition

### Abstract

The aim of this study was to investigate the effects of the addition of primary sewage sludge (PSS) on the performances and stabilities of three laboratory-scale semi-batch anaerobic digesters, operated at  $35^\circ\text{C}$ , treating municipal solid waste (MSW) during the start-up period. Different MSW:PSS ratios were used in the feeds of the three digesters. The addition of PSS significantly increased the stability of the system and the process performance in terms of specific gas production rate (SGPR). The use of inoculum from an operating anaerobic digester enabled a quick start-up. Even though the digesters were started up with high organic loading rates ( $5.2 \text{ kg UKM m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ,  $3.9 \text{ kg UKM m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ , and  $3.2 \text{ kg UKM m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ), there were no indications of failure in any of the digesters.

**Key Words:** Municipal solid waste anaerobic digestion, stability, primary sewage sludge, performance

## Giriş

Getirdiği arıtma avantajları, çevrenin korunması açısından sağladığı faydalar ve enerji kazanımı nedeniyle, evsel katı atıkların (EKA) yönetiminde anaerobik çürütme yöntemine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Anaerobik çürütme yöntemiyle, EKA'ların organik kısmı kararlı hale gelmekte, atık hacmi azalmakta ve metan gazı üretilmektedir. Geçmiş yıllarda, EKA'ların anaerobik çürütülmesinin optimizasyonu için çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Büyük ölçekli EKA çürütme tesisleri ve deneylerinin tasarımı sırasında dikkatle ele alınması gereken hususlardan biri çürütücünün dengeye ulaşması için gereken süredir. Başarılı bir start-up prosedüründe sistem çabucak dengeye ulaşabilmelidir. Çürütücünün beslenmesine, asetat

ve metan oluşumu fazlarını engelleyen uçucu yağ asitleri (UYA) gibi ara ürünlerin oluşması önlenerek şekilde başlanmalıdır. Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli çürütücülerin çalışmaya başlatılması EKA işlemekte olan bir anaerobik çürütücüden alınan aşıyla yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, başlangıç aşaması sırasında ön çökeltme çamuru (ÖÇÇ) eklenmesinin EKA'ların organik kısmının anaerobik çürütülmesi üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

## Materyal ve Metod

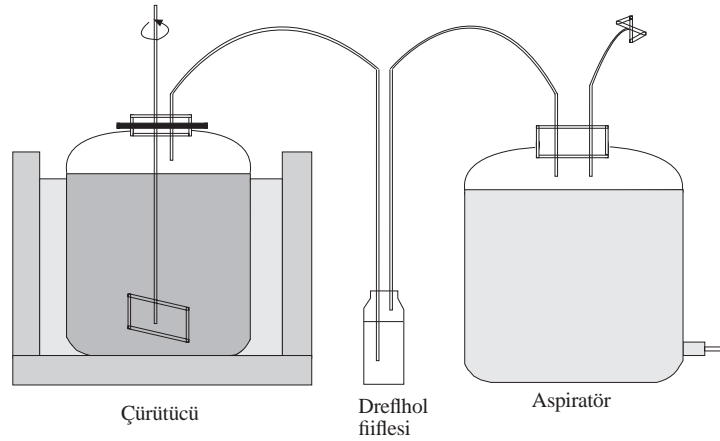
Çalışma sırasında kullanılan laboratuvar ölçekli anaerobik çürütücülerle ilgili bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Deney düzeneği ve gaz toplama sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Deneylerde kullanılan anaerobik çürütücülerin özellikleri

|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| Reaktör cinsi                | : Tam karışımli reaktör     |
| Çürütücü sayısı              | : 3                         |
| Karıştırıcı                  | : Dikey mekanik karıştırıcı |
| Çalışma hacmi (litre)        | : 5 litre/reaktör           |
| Çalışma sıcaklığı            | : 35°C                      |
| Besleme yöntemi              | : Yarı kesikli              |
| Hidrolik bekleme süresi      | : 20 gün                    |
| Katı parçacık bekleme süresi | : 20 gün                    |

Reaktörlerin start-up aşamasında kullanılan aşı, İskoçya'da Ayrshire bölgesinde yer alan Irvine Şehrindeki bir pilot EKA çürütücüsünden getirilmiştir. Aşı içinde bulunan organik maddelerin

tüketilmesi amacıyla, çalışma başlangıcından önce, aşı çürütücülere konup gaz üretimi sıfıra inene kadar sistem 35°C'de besleme yapılmadan çalıştırılmıştır.



**Şekil 1.** Deney düzeneği

%87'si organik maddelerden oluşan ve parça büyüklüğü 10 mm'den küçük olan EKA'lar Cunnigham DANO Pulverisation Tesisinden getirilmiştir. ÖÇÇ ise Hexham Atıksu Arıtma Tesisi'nden haf-talık olarak getirilmiş ve besinin hazırlanmasına kadar +4°C'de saklanmıştır. Deneylerde kullanılan

EKA ve ÖÇÇ'ndan alınan 30'ar örnek üzerinde yapılan analizlerin ortalaması ile elde edilen kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. ÖÇÇ'ndaki organik madde, toplam yağ asitleri, toplam azot ve toplam fosfor miktarının EKA'dakinden çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

**Tablo 2.** Deneylerde kullanılan EKA ve ÖÇÇ'nun kimyasal özellikleri

| Parametre   | EKA  | ÖÇÇ |
|---|------|-----|
| Toplam katı madde (% yaş ağırlık)                     | 51   | 6,5 |
| Ayarlanmış toplam katı madde (% yaş ağırlık)          | 20   | -   |
| Uçucu katı madde (% TKM)                              | 49   | 70  |
| Toplam yağ asitleri (mg g <sup>-1</sup> kuru ağırlık) | 14,8 | 71  |
| TKN (mg g <sup>-1</sup> kuru ağırlık)                 | 4,6  | 34  |
| Toplam fosfor (mg g <sup>-1</sup> kuru ağırlık)       | 0,7  | 9,2 |

Reaktörlerin hacimlerinin küçük olmasından dolayı, besleme 3-5 günlük döngülerle yapılmıştır. Her reaktörde kullanılan besi EKA:ÖÇÇ oranlarıyla tanımlanmıştır. Çürütücü I yalnızca EKA ile beslenirken, Çürütücü II ve Çürütücü III besle-lerindeki ÖÇÇ miktarı sırasıyla %20 ve %40 (Toplam katı madde (TKM) baz alınarak) olmuştur. Ek-lenecek EKA ve ÖÇÇ miktarları Tablo 3'de verilen ve besleme öncesi yapılan TKM ve uçucu katı madde (UKM) analizleri sonuçlarına göre belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre ortalama %49 olan EKA

nem oranı su eklenerek % 80'e çıkarılmıştır. Daha sonra önceden belirlenen 100:0, 80:20 ve 60:40 EKA:ÖÇÇ oranları gerekli miktarda EKA ve ÖÇÇ tartılıp, plastik kaplarda karıştırılmak suretiyle elde edilmiştir. Her reaktöre eklenen EKA ve ÖÇÇ mik-tarları Tablo 3'de verilmiştir. Beslemelerden önce, her çürütücüden, eklenecek besi hacmi kadar çamur alınıp, bunun yerine besi konulmuştur. Besleme işleminde sonra çürütücülerin hava geçirmeyen ka-pakları kapatılarak operasyona başlanmıştır.

**Tablo 3.** Çürütücülerdeki besleme koşulları

| Kriter  | Çürütücü I | Çürütücü II | Çürütücü III |
|---|------------|-------------|--------------|
| EKA:ÖÇÇ   | 100:0      | 80:20       | 60:40        |
| Eklenen EKA (kg m <sup>-3</sup> g-1)            | 53,1       | 30,0        | 16,8         |
| Eklenen ÖÇÇ (kg m <sup>-3</sup> g-1)            | 0,0        | 22,0        | 34,0         |
| TKM (% yaş ağırlık)                             | 20,0       | 17,0        | 14,0         |
| UKM (% TKM)                                     | 49,0       | 53,0        | 57,0         |
| pH  | 6,5        | 5,2         | 5,0          |
| Alkalinite (g l <sup>-1</sup> )                 | 7,8        | 5,5         | 4,8          |
| OYH (kg UKM m <sup>-3</sup> gün <sup>-1</sup> ) | 5,2        | 3,9         | 3,2          |

Çürütücülerin çalışmalarının kontrolü için düzenli olarak, gaz, besi, çürütücü çamuru ve atık analizleri yapılmıştır. Gaz oluşum hızı ve kom-pozisyonu (metan, karbon dioksit, azot ve oksijen) günlük olarak ölçülmüştür. EKA ve ÖÇÇ'nda bu-lunan toplam azot ve fosfor düzeyleri çürütücüler çalıştırılmaya başlamadan önce yapılmıştır. Besi kompozisyonundaki değişimin takip edilebilmesi için besi olarak kullanılan EKA ve ÖÇÇ'ndaki

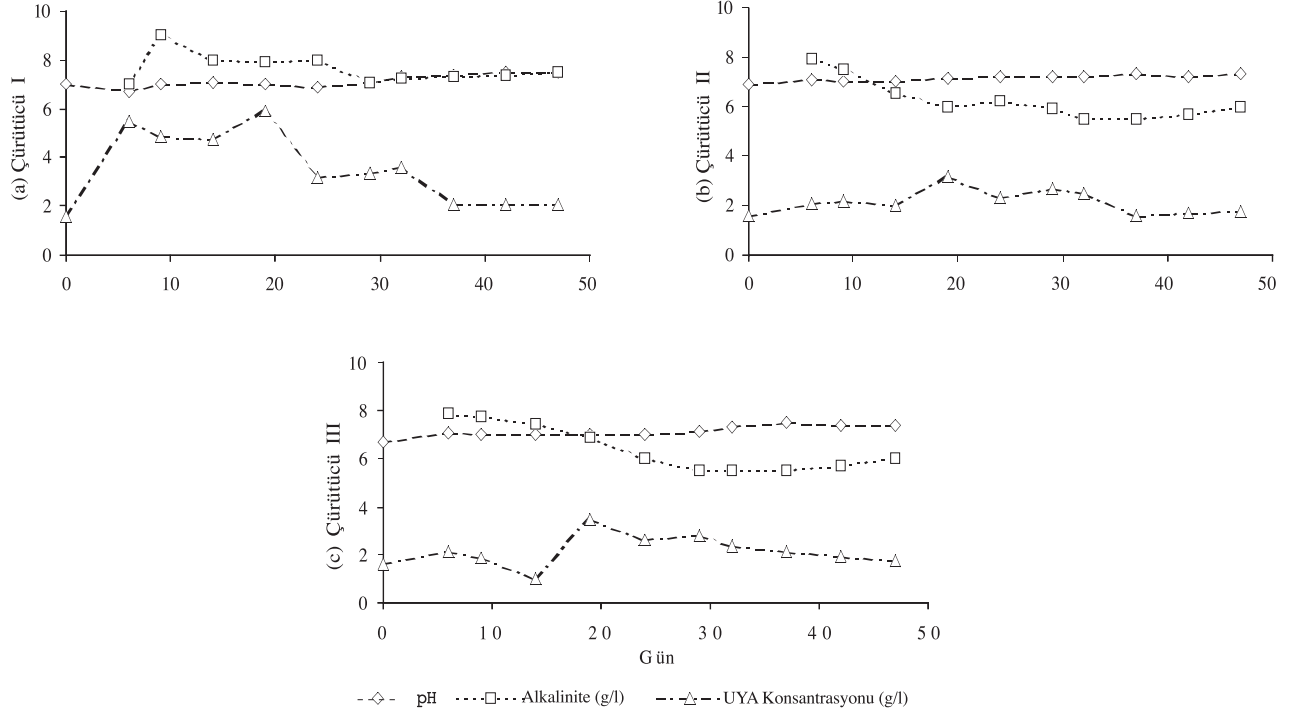
TKM, UKM ve UYA miktarları her 3-5 günde bir ölçülmüştür. Çürütücü çamurunda da her besleme-den sonra pH, alkalinite, UYA konsantrasyonu, TKM ve UKM ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler Stan-dard Methods (1989)'da belirtilen yöntemlere göre yapılmış olup, ayrıntıları daha önceki çalışmalarda verilmiştir (Demirekler ve Anderson, 1998)

## Deney Sonuçları ve Tartışılması

Kullanılan aşının Irvine'deki EKA çürütücüsünden alınmış olması nedeniyle, aklimatizasyon için bir süreye gerek olmamıştır. Böyle bir aşı kullanmanın çabuk bir başlangıç aşaması için uygulanabilirliğinin denenmesi amacıyla, çürütücüler literatürde belirtilenlerden daha yüksek organik yüklerle çalıştırılmaya başlatılmıştır. Çürütücü I, Çürütücü II ve Çürütücü III'e uygulanan organik yükleme hızları (OYH) sırasıyla 5,2 kg UKM  $m^{-3}gün^{-1}$ , 3,9 kg UKM  $m^{-3}gün^{-1}$ , ve 3,2 kg UKM

$m^{-3}gün^{-1}$  olmuştur. Literatürde verilen başlangıç OYH'ları ise 0,3 ile 1,3 kg UKM  $m^{-3}gün^{-1}$  arasında değişmekte ve bunlar zaman içinde aşamalı olarak arttırılmaktadır (Schmidell ve Craveiro, 1986; Klein ve Rump, 1987; Stenstrom ve diğerleri, 1983).

Çürütücüler, kararlılık ve performans açısından incelenmiştir. Reaktör kararlılığı göstergesi olarak pH, alkalinite ve UYA konsantrasyonu kullanılırken, performans göstergesi olarak gaz üretim hızı (GÜH), özgül gaz üretim hızı (ÖGÜH) ve gazın metan içeriği alınmıştır.



**Şekil 2.** Çürütücü kararlılık parametrelerindeki değişimler (a) Çürütücü I (EKA:ÖÇÇ = 100:0), (b) Çürütücü II (EKA:ÖÇÇ = 80:20), (c) Çürütücü III (EKA:ÖÇÇ = 60:40)

Şekil 2'de de görüldüğü gibi çalışma süresince çürütücülerin hiçbirinde sistemin çökmesi gibi bir durum söz konusu olmamıştır. Ancak, çalışmanın ilk üç haftası boyunca en çok Çürütücü I'de olmak üzere, her üç çürütücüde de asidojen ve metonojen bakterilerin dengesizliğinden kaynaklanan kararsızlıklar gözlenmiştir.

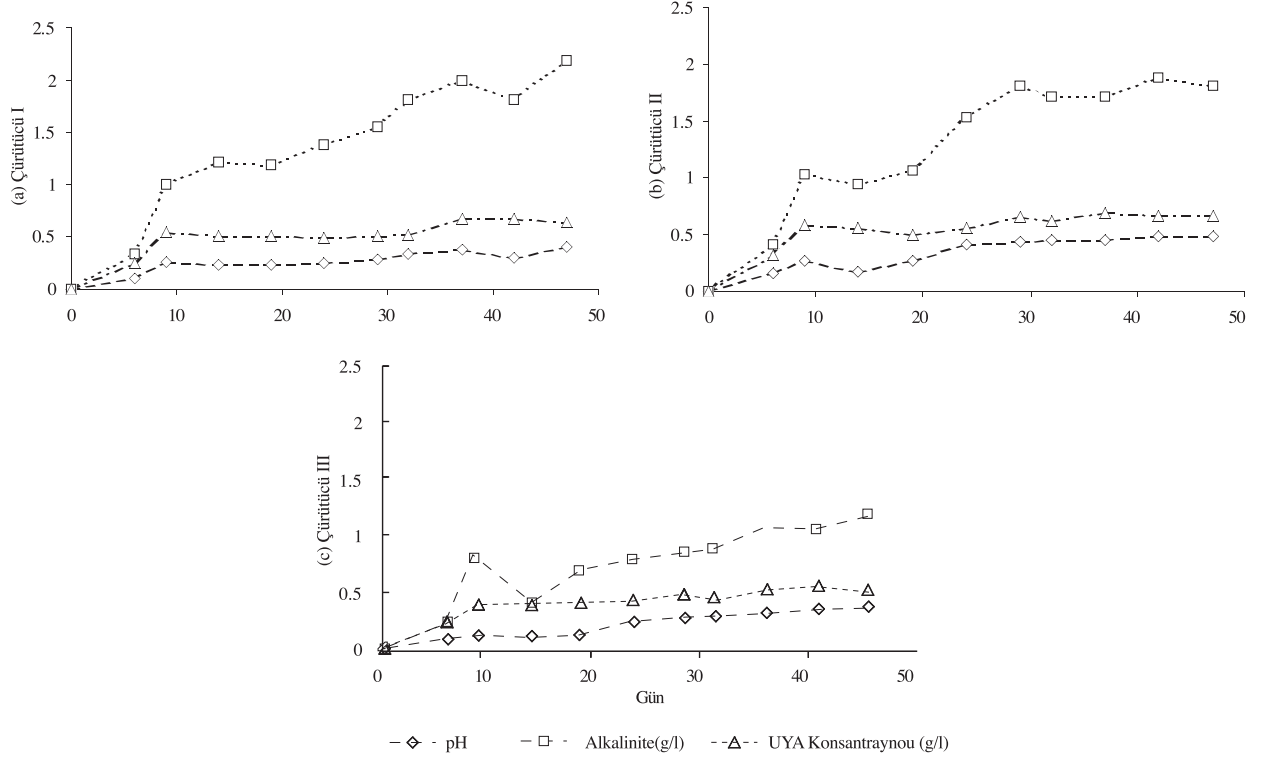
Çalışmanın ilk haftasında Çürütücü I'de UYA konsantrasyonunda büyük bir artış gözlenmiştir. UYA konsantrasyonu  $1,7 g l^{-1}$ 'den  $5,5 g l^{-1}$ 'ye yükselmiş ve bu da pH değerinin 6,7'ye kadar düşmesine neden olmuştur. Ancak reaktördeki yüksek alkalinite pH değerinin bir hafta içerisinde

7,1'e yükselmesini sağlamıştır. Çürütücü II ve Çürütücü III'de gözlenen kararsızlık Çürütücü I'e göre çok daha az olmuştur. Üçüncü haftaya kadar bu iki çürütücüdeki UYA konsantrasyonu Çürütücü I'dekinden %50 daha az olmuştur. Üçüncü haftadan sonra Çürütücü I'deki UYA konsantrasyonu azalmış ancak çalışma boyunca diğer iki çürütücüdekenden ortalama %30 yüksek seğretmiştir. Çürütücü I ve Çürütücü II'de alkalinitelerde bir düşme eğilimi görülmektedir. Bunun nedeni, besi maddesindeki düşük alkalinite değeridir.

Çürütücü kararlılığı ve verimini etkileyebilecek parametreler düşünüldüğünde, bunlar içinde

çürütücüler arasında farklılık gösteren tek parametrenin besi maddesindeki ÖÇÇ:EKA oranı olduğu görülmektedir. UKM içeriği ÖÇÇ'nda EKA'a göre çok daha düşüktür ve bu nedenle, besiyi eklenen ÖÇÇ oranı arttıkça OYH düşmekte ve bu da prosesin kararlılığına yardımcı olmaktadır.

Çürütücü I'de gözlenen uzun adaptasyon süresinin, ÖÇÇ eklenmemesinden dolayı yüksek olan OYH'den kaynaklanıyor olması muhtemeldir. Diğer iki çürütücüde ise ÖÇÇ eklenmesi UKM derişimini düşürüp, mikro ve makro besin miktarını arttırarak adaptasyon süresini kısaltmıştır.



**Şekil 3.** Çürütücünün verimini etkileyen parametrelerin değişimleri (a) Çürütücü I (EKA:ÖÇÇ = 100:0), (b) Çürütücü II (EKA:ÖÇÇ = 80:20), (c) Çürütücü III (EKA:ÖÇÇ = 60:40)

Şekil 3 ortalama ÖGÜH, GÜH ve gazın metan içeriğini göstermektedir. Çürütüçüye eklenen birim UKM miktarı başına üretilen gaz miktarı olan ÖGÜH, Çürütücü II'de Çürütücü I ve Çürütücü III'dekinden daha yüksek olarak gözlenmiştir. En düşük ÖGÜH'na sahip olan Çürütücü I'den Çürütücü II'e göre %32, Çürütücü III'e göre ise %16 daha az ÖGÜH elde edilmiştir. Çürütücü I'in en düşük ÖGÜH'ye sahip olması da daha önce açıklanan sebeplerle yani ÖÇÇ eklenmesinin besideki kullanılabilir besin miktarını yükseltmesi ve OYH'nı optimum düzeye getirmesi ile açıklanabilir.

Şekil 3'de görüldüğü gibi ortalama GÜH uygulanan OYH ile doğru orantılı olarak artmaktadır. İlk dokuz günün sonunda, Çürütücü III'deki ortalama GÜH'nın Çürütücü I ve Çürütücü II'dekinden yaklaşık %30 az olduğu gözlenmiştir. En yüksek OYH'na sahip Çürütücü I'in en yüksek GÜH'na sahip olmamasının nedeninin, bu çürütücünün pH'ında gözlenen dalgalanmalar olabileceği düşünülmektedir. ÖÇÇ eklenmesinin üretilen gazın metan içeriğinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı gözlenmiştir.

**Tablo 4.** Literatürde yer alan çalışmalarda elde edilen sonuçlar

| Kaynak                         | Besideki EKA:ÖÇÇ | OYH (kg UKM m <sup>-3</sup> gün <sup>-1</sup> ) | GÜH (l l <sup>-1</sup> gün <sup>-1</sup> ) | ÖGÜH(l l <sup>-1</sup> gün) | Metan İçeriği (%) |
|--------------------------------|------------------|---|--|-----------------------------|-------------------|
| Diaz ve Trezek (1977)          | 100:0            | 1,12  | -  | 0,34                        | -                 |
| Diazve Trezek (1977)           | 80:20            | 1,12  | -  | 0,48                        | -                 |
| Diazve Trezek (1977)           | 60:40            | 1,12  | -  | 0,51                        | -                 |
| Stenstrom(1983)                | -                | 1,0-4,0   | -  | 0,44-0,19                   | 55-60             |
| Debaere ve Verstraete (1984)   | 100:0            | 1,0-5,0   | 0,9-2,4                                    | 0,5                         | 55-60             |
| Cecchi et al. (1986)           | 100:0            | 2,1   | 2  | -                           | 62                |
| Schmidell (1986)               | 80:20            | 1,6-8,0   | 0,62-3,1                                   | -                           | 60                |
| Klein and Rump (1987)          | 100:0            | 10  | 5  | 0,5                         | 54                |
| Pescod et al. (1987)           | 80:20            | 2-24  | -  | 0,5                         | 42                |
| Pescod et al. (1987)           | 90:10            | 2-24  | -  | 0,48                        | 61                |
| Cecchi et al. (1989)           | 80:20            | 3,9   | 2,59                                       | 0,66                        | 49                |
| hline Rich and Kayhanan (1994) | -                | 6,5   | 3,8-5,2                                    | 0,6-0,85                    | 48-52             |
| Mosey et al. (1994)            | 100:0            | 7,3   | 2,4  | 0,12                        | 47                |
| Clarke (1995)                  | 100:0            | 10  | 5  | 0,5                         | 55-65             |

Şekil 3'de verilen çalışma sonuçları ile Tablo 4'de özetlenen literatürde yer alan önceki çalışmaların sonuçları karşılaştırıldığında, çalışma boyunca gözlenen ÖGÜH, GÜH ve biyogaz metan içeriklerinin, literatürde verilen aralıklar içinde bulunduğu görülmektedir.

### Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı ÖÇÇ eklenmesinin EKA'ların anaerobik çürütülmesinin başlangıç aşaması üzerindeki etkilerinin saptanmasıdır. Çalışma sonunda edilen sonuçlar göstermiştir ki:

- ÖÇÇ eklenmesi EKA'ların anaerobik çürütülmesinin başlangıç aşamasında besideki UKM konsantrasyonunu azaltarak ve kullanılabilir besin miktarını arttırarak çürütücüdeki UYA konsantrasyonunu ve dengesizlikleri azaltabilir. Bu şekilde, çürütücülerin dengeye ulaşma süresi kısalmış olur.
- ÖÇÇ eklenmesi çürütücü performansı üzerinde olumlu etkilere neden olmaktadır.
- Bu çalışmada, en yüksek ÖGÜH beside 80:20 EKA:ÖÇÇ oranıyla elde edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da ÖÇÇ eklenmenin ÖGÜH üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlenmiş ve çeşitli çalışmalarda en yüksek ÖGÜH'nın EKA:ÖÇÇ oranının %8-20 olması durumunda elde edildiği belirtilmiştir (Diaz ve

Trezek, 1986; Poggi-Varaldo ve Oleszkiewicz, 1992; Rich ve Kayhanian,1994).

- Mevcut sonuçlar göstermiştir ki, EKA çürütücülerinde önceden aklimatize edilmiş aşu kullanma yoluyla, çürütücülerin start-up süreci çok kısa bir zaman almakta ve çürütücüler işleme başlamalarından itibaren 3,2 kg UKM m<sup>-3</sup> gün<sup>-1</sup> ve 5,2 kg UKM m<sup>-3</sup> gün<sup>-1</sup> arasında değişen yüksek OYH'ları ile çalışabilmektedirler.

### Teşekkür

Yazarlar, araştırmaya sağladıkları destekten dolayı Türk Eğitim Vakfı ve İngiliz Kültür Derneği'ne minnettardırlar.

### Kısaltmalar

|      |  |
|------|--|
| EKA  | : Eysel katı atık  |
| GÜH  | : Gaz üretim hızı (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ) |
| OYH  | : Organik yükleme hızı (kg UKM m <sup>-3</sup> gün <sup>-1</sup> )   |
| ÖÇÇ  | : Ön çökeltme çamuru   |
| ÖGÜH | : Özgül gaz üretim hızı (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> UKM)        |
| TKM  | : Toplam katı madde  |
| UKM  | : Uçucu katı madde   |
| UYA  | : Uçucu yağ asitleri   |

## Kaynaklar

- Cecchi F., Pavan P., Mata Alvarez J., Vallini G., "Co-composting research in Italy", *BioCycle*, 30, 68-71, 1989.
- Cecchi, F., Traverso, P.G., Censon P., Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: digester performance. *The Sci. Total Environ.*, 56, 183-197, 1986.
- Cecchi, F., Traverso, P.G., Perin, G., Vallini, G., Comparison of co-digestion performance of two differently collected organic fractions of municipal solid waste with sewage sludge. *Environ. Technol. Lett.*, 9, 391-400, 1988.
- Clarke T., Presteigne S., Wales P., High solids digester systems processing the separated organic fraction of municipal solid waste. *Methane Gen*, 1, 1-3, 1995.
- De Baere L., Verstraete W.P., High rate anaerobic composting with biogas recovery. *Biocycle*, 25, 30-31, 1984.
- Demirekler E., Anderson G.K., Effect of Sewage Sludge Addition on the Start-up of the Anaerobic Digestion of OFMSW, *Environmental Technology*, 19, 837-843, 1998.
- Diaz L.F., Trezek D.J., Biogasification of selected fraction of municipal solid waste. *Compost Sci*, 18, 8-12, 1977.
- Klein M., Rump H., Anaerobic digestion of solids -ex: OFOMSW. In: *Proceedings of Biomass of Energy and Industry 4th E.C. Conference*, Grassi G., Delmon B., Molle J.F., Zibetto H. (ed.), Elsevier App. Sci., London, pp.845-849, 1987.
- Mosey F., Collins L., Dunn R., Optimisation studies for the high solids anaerobic digestion of municipal solid waste. Report prepared for the Energy Technology Support Unit, UKAEA, pp 7-26, 1994.
- Pescod M.B., Anderson G.K., Hajipakkos C., Anaerobic digestion of solid waste. In: *Proceedings of Safewaste 87 Conference*, April 1987, Cambridge, 301-310, 1987.
- Poggi-Varaldo H.M., Oleszkiewicz J.A., Anaerobic co-composting of municipal solid waste and waste sludge at high total solids levels. *Environ. Technol.* 13, 409-421, 1992.
- Rich D., Kayhanian M., Anaerobic composting yields quality humus. *Biocycle*, 35, 82-87, 1994.
- Schmidell W., Craveiro A.M., Peres C.S., Hirata Y.S., Varella R.F., Anaerobic digestion of municipal solid waste. *Water Sci.Technol.*, 18, 163-175, 1986.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1989). 17th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Stenstrom M.K., Bhunia P.K., Abramson S.P., Anaerobic digestion of municipal solid waste. *J. Environ. Eng.*, 109, 1148-1158, 1983.
- Tchobanoglous G., Kayhanian M., Hardy S., Processing the organic fraction of municipal solid waste using the high solids anaerobic digestion/ aerobic composting process. In: *Proceedings of the International Conference on Asian Water Technology*, Singapore, p.13-22, 1994.