

Ilıman bölgelerde düşük kirlilik yüküne sahip atıksuların havasız arıtımı

Çiğdem YANGIN GÖMEÇ*, Veysel EROĞLU

İTÜ İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Etkili hacimleri 6.45 litre olan iki adet Yukarı Akışlı Çamur Yataklı (YAÇY) reaktör, evsel atıksu karakterindeki sentetik su beslenerek, sürekli sistemler olarak çalıştırılmıştır. Mezofilik YAÇY reaktör $35\pm 2.0^\circ\text{C}$ 'de çalıştırılırken psikrofilik (soğuk seven) reaktör başlangıçta oda sıcaklığında çalıştırılmış, daha sonra sıcaklık adım adım $10\pm 2.0^\circ\text{C}$ 'e düşürülmüştür. $10\pm 1.0^\circ\text{C}$ ve $35\pm 2.0^\circ\text{C}$ 'de, 12 saat hidrolik bekleme süresinde sırasıyla %82 ve %92 civarında KOİ giderimleri gözlenmiştir. Biyogaz üretimleri, $\geq 16^\circ\text{C}$ 'de her iki reaktörde hemen aynı gözlenmiş, sıcaklık $10\pm 1.0^\circ\text{C}$ 'e düşürüldükten sonra belirgin bir azalma göstermiştir. Psikrofilik reaktör verimi daha düşük ölçülse bile, düşük kirlilik yükündeki atıksuların havasız arıtımı başarılı şekilde gerçekleştirilmiş, ilave ısıtma ihtiyacı göstermeyerek daha ekonomik arıtım sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Düşük maliyetli arıtım, düşük kirlilikte atıksular, psikrofilik, YAÇY reaktör.

Anaerobic treatment of low strength wastewaters at temperate regions

Abstract

In this study, two identical lab-scale Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) reactors with an effective volume of 6.45 l were used and operated as continuous systems for about 12 months. The mesophilic UASB reactor was operated at $35\pm 2.0^\circ\text{C}$ whereas the psychrophilic UASB reactor was operated at room temperature at the start-up and reduced to around $10\pm 2.0^\circ\text{C}$ step by step. In the study, synthetic wastewater characterizing domestic sewage was fed to both reactors. Results indicated around 82% COD removal at $10\pm 1.0^\circ\text{C}$ at a hydraulic retention time of around 12 h while at the same hydraulic retention time total COD removal could be observed around 92% at $35\pm 2.0^\circ\text{C}$. The total biogas productions were observed about the same amount at temperatures above 16°C in both reactors. However, when the temperature in the psychrophilic UASB reactor was reduced to $10\pm 1.0^\circ\text{C}$, total biogas production decreased significantly. pH values in the effluent of the mesophilic UASB reactor were measured slightly higher than the pH values in the effluent of the psychrophilic UASB reactor. Although average COD removals at the psychrophilic UASB reactor was observed lower than the mesophilic UASB reactor, anaerobic treatment of low strength wastewaters could be well established and more feasible system due to no heating requirement could be achieved successfully.

Keywords: Low-cost treatment, low strength wastewater, psychrophilic, UASB reactor.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Çiğdem Yangın GÖMEÇ. cyangin@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 76.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "A comparative evaluation of anaerobic treatment of low strength wastewaters at mesophilic and psychrophilic temperatures" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 04.07.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 05.09.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Düşük kirlilik yüküne sahip evsel atıksuların havasız arıtımları, havalı arıtma sistemlerine kıyasla, daha düşük çamur oluşumu, daha düşük enerji kaynağına ihtiyaç göstermeleri ve daha düşük işletme maliyetleri açısından avantajlara sahiptir (Angenent vd., 2001). Organik kirlilik yükleri 1500 mg/l KOİ değerinden düşük olan atıksular, düşük kirlilikte atıksular olarak adlandırılırlar ve bu atıksular basit kısa zincirli yağ asitleri, alkoller, karbohidratlar gibi biyolojik olarak ayrışabilen maddeleri içerirler. Bu atıksular ayrıca proteinler, askıda katı madde, yağlar veya uzun zincirli yağ asitleri de içermektedirler (Rebac, 1998). Evsel atıksuların havasız arıtımında en uygun sistem yukarı akışlı çamur yataklı (YAÇY) reaktörlerdir. Bu reaktörler, düşük ilk yatırım ve işletme maliyetlerine ihtiyaç gösteren basit sistemler olup, çeşitli endüstriyel atıksuların arıtılmalarında yıllardır başarıyla uygulanmaktadır (Elmitwalli, 2000). Evsel atıksuların havasız arıtılmalarında %70'den fazla toplam KOİ giderimleri gözlenmiştir (Rebac, 1998). Son yıllarda her türlü sıcaklık şartlarında gerçekleştirilen çalışmalar, eğer uygun proses tasarımı seçilirse, havasız arıtma uygulamalarında sıcaklığın kısıtlayıcı bir faktör olmadığını savunmaktadır (van Lier vd., 1997a). Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalarda, havasız atıksu arıtımının 10 kg/m³ değerinden büyük yükleme hızlarında, 10°C sıcaklıklarda ve 1.5 saat gibi düşük hidrolik bekleme sürelerinde (θ) bile uygulanabilir olduğu belirtilmiştir (Lettinga, 1996). Patel ve Madamwar (2002), organizmaların istenilen sıcaklık değerlerine adaptasyonu sonucunda, reaktörlerin psikrofilik ve termofilik şartlarda işletilebileceklerini belirtmişlerdir. Böylece, ılık ve soğuk sıcaklıklarda deşarj edilen atıksuların havasız arıtımı ilgi çekici bir alternatif olmaktadır (Lettinga vd., 2001). Yüksek hızlı havasız sistemler genellikle sıcaklık aralığı 25-40°C olan durumlarda uygulanmaktadır. 5-20°C gibi daha düşük sıcaklık aralıklarında işletilmeleri durumunda, konvansiyonel yüksek hızlı reaktörler çeşitli adaptasyon aşamalarına ihtiyaç duyarlar. Metanojenik biyokütle ile atıksuyun başarılı bir şekilde karışımı, yukarı akış hızının artırılması ile gerçekleştirilir (van Lier vd., 1997b). Evsel

atıksuyun sıcaklığı 35°C değerinden düşük olduğu için, bu atıksuların mezofilik havasız arıtımları sırasında dışarıdan ısıtılmaları gerekmektedir. Fakat, havasız arıtmanın düşük sıcaklıklarda (10-20°C) işletmelere izin vermesi, arıtma maliyetleri ve enerji ihtiyaçlarını belirgin bir şekilde düşürmektedir (Langenhoff ve Stuckey, 2000).

Birincil fermentasyon bakterileri, ikincil fermentasyon bakterileri ve iki çeşit metanojen olmak üzere dört farklı mikroorganizma grubu havasız arıtma sırasında organik maddeyi metan ve karbon dioksit'e ayrıştırırlar. Bunlar arasında metan arkeleri enerji metabolizmalarının içsel bir kısmı olarak metan üretirler. Havasız reaktörlerde metanojenler yüksek miktarlarda bulunurlar ve Arke (Archaea) grubuna bağlıdırlar. Metan arkeleri çoğu havasız ortamlarda besi maddesi temini açısından diğer organizmalara bağımlıdır. Asetat kullanan metan arkeleri Methanosarcina ve Methanosaeta türlerinden oluşmaktadır. Genellikle, yüksek hızlı havasız çamur yataklı reaktörlerde bulunan granüller Methanosarcina türleri yerine Methanosaeta türlerinden oluşmaktadır (Raskin vd., 1994). Adaptasyon süresinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için, işletmeye alma döneminde mikroorganizma topluluklarının izlenmesinin çok faydalı olduğu düşünülmektedir. Son yıllarda 16S rRNA/rDNA bazlı moleküler metotlar sayesinde, havasız reaktörlerde bulunan mikroorganizma topluluklarının tanımlanması oldukça kolay ve mümkün bir hale gelmiştir (Raskin vd., 1994). Bu sebeple, bu tarz izleme ve tanımlama yöntemleri havasız arıtma sistemlerinin kontrolü için gün geçtikçe artan bir öneme sahip olmaktadır. Havasız reaktörlerde bulunan metan arkeleri son yıllardaki çalışmalar ile geniş olarak incelenmiş olsa bile, bu arkelerin psikrofilik sıcaklıklara adaptasyonları sırasındaki durumları hakkındaki bilgiler hala sınırlıdır.

Bu çalışmanın amacı evsel atıksu gibi düşük kirlilik yüküne sahip atıksuların düşük sıcaklık şartlarında yüksek hızlı yukarı akışlı çamur yataklı (YAÇY) reaktör ile havasız arıtılabilirliklerinin değerlendirilmesi ve ilave ısıtma ihtiyacı göstermemesinden dolayı işletme maliyeti açı-

sından daha ekonomik bir alternatifin incelenmesidir. Çalışmada bir adet mezofilik YAÇY reaktör (R1) ($35\pm 2.0^{\circ}\text{C}$) ile, başlangıçta mezofilik altı ($16-26\pm 2.0^{\circ}\text{C}$) sıcaklık değerlerinde, daha sonra psikrofilik ($<16\pm 2.0^{\circ}\text{C}$) sıcaklık değerlerinde işletilmiş ikinci bir adet YAÇY reaktör (R2) kullanılmıştır. Her iki reaktör aynı tasarım kriterlerine sahiptir. YAÇY reaktörler, evsel atıksuyu karakterize eden sentetik atıksu ile beslenmiştir. Her iki reaktörde tüm işletme şartları sabit tutularak, R2’de sadece sıcaklık değeri değiştirilmiştir. Aynı aşı çamuru ile aşılanan R1 ve R2’nin performansları ve ihtiva ettikleri metanojenik popülasyon türleri, konvansiyonel izleme parametreleri yanında Floresan in-situ hibridizasyon (FISH) tekniği kullanılarak mukayeseli olarak araştırılmıştır.

Materyal ve metot

Etkili hacimleri 6.45 l olan iki adet laboratuvar ölçekli YAÇY reaktör sürekli sistemler olarak işletilmiştir. Reaktörler 1 m yükseklikte ve 90 mm çapında pleksicam kolonlardan oluşmaktadır. Reaktörlerin üst kısımlarına özel gaz-sıvı-katı ayırıcılar yerleştirilmiştir. Çalışma süresince reaktörlerden biri mezofilik şartlarda (R1) ($35^{\circ}\text{C}\pm 2.0^{\circ}\text{C}$) (Şekil 1a) çalıştırılmıştır. Diğer reaktör ise (R2), işletmeye alma süresinde mezofilik altı şartlarda ($16-26^{\circ}\text{C}$) çalıştırılmış ve çalışmanın bitimine doğru reaktör içerisindeki sıcaklık kademeli olarak yaklaşık $10^{\circ}\text{C}\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ’e düşürülmüştür. Reaktörün çevresini saran hortumların, içerisinden soğutulmuş çeşme suyu sürekli olarak devirdaim yapılarak $10^{\circ}\text{C}\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ gibi düşük sıcaklıklar sağlanarak psikrofilik ortam oluşturulmuştur (Şekil 1b). Bu reaktörün mezofilik altı şartlarda çalıştırılması sırasında, reaktör içerisinde sıcaklık yazın $21.5-26^{\circ}\text{C}$ aralığında iken, kışın bu değer 16°C ’e kadar düşmüştür. Daha sonra, içerisinden soğuk su geçirilerek R2 içerisindeki sıcaklık, mezofilik altı şartlardan psikrofilik şartlara düşürülmüştür. Her iki reaktör, İstanbul’da bulunan Paşabahçe Tekel Rakı Fabrikası’nın mezofilik YAÇY reaktöründen alınan granül çamur ile (%20) aşılanmıştır. Aşı çamurunun UAKM/AKM oranı %91 olarak hesaplanmış ve işletmeye alma döneminde reaktörlerin beher hacimleri (litre) başına 21.16 g UAKM olacak şekilde aşı ilave edilmiş-

tir. Ham evsel atıksuyun karakterizasyonu zamanla farklılık gösterebileceği için; debi, kirletici konsantrasyonları ve bileşenlerindeki büyük salınımlar R1 ve R2 reaktörlerinin kıyaslanabilmesi açısından zorluk çıkarabileceği düşünülmüştür. Bu sebeple bu çalışmada, reaktörler evsel atıksuyu karakterize eden sentetik bir atıksu ile beslenmiştir. Sentetik atıksu Uluslararası Standartlama Kurumu (ISO) tarafından önerilen bileşikler ile hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan sentetik atıksuyun KOİ konsantrasyonu 300 mg/l olarak ölçüldüğü için, bu konsantrasyon zayıf evsel atıksuyu temsil etmektedir. Özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde çöp sızıntı sularının kanalizasyona belirli miktarlarda ilave edilmesinden dolayı, İstanbul’daki evsel atıksu orta sınıf kirliliktedir. Bu sebeple ISO tarafından verilen bileşikler iki katı miktarlarda kullanılarak sentetik atıksuda KOİ konsantrasyonu 600 mg/L’e yükseltilmiştir. Böylece R1 ve R2 reaktörleri orta sınıf evsel atıksuyu karakterize eden atıksu ile beslenmiştir.

FISH üç adımda gerçekleştirilmiştir; fikzasyon, hibridizasyon ve mikroskop ile tanımlama. Fikzasyonda, her iki reaktörden alınan çamur numuneleri bir gece boyunca %4’lük paraformaldehitfosfat tampon tuz çözeltisinde ve $+4^{\circ}\text{C}$ ’de bekletilmiştir. Jelatin ile kaplı slaytlar üzerine konulan 4 µl numune hava ile kurutulduktan sonra uygun hibridizasyon çözeltisi ile 46°C ’de 2 saat hibridize edilmiştir. Daha sonra slaytlar yıkama tampon çözeltisi ile durulanmıştır. 4,6-diamidino-2-phenylindole (DAPI) ilave edilen yıkama çözeltisinde tüm DNA’nın ortaya çıkabilmesi için slaytlar karanlıkta 10 dakika 48°C ’de bekletilmiştir. Detaylı bilgi Gomec vd. (2004)’de verilmiştir. Çift distile su ile durulanan slaytlar, hava ile kurutulduktan sonra Olympus BX50 tipi mikroskop ile türler tanımlanmıştır. Dijital resimler dijital kamera ile çekilmiştir.

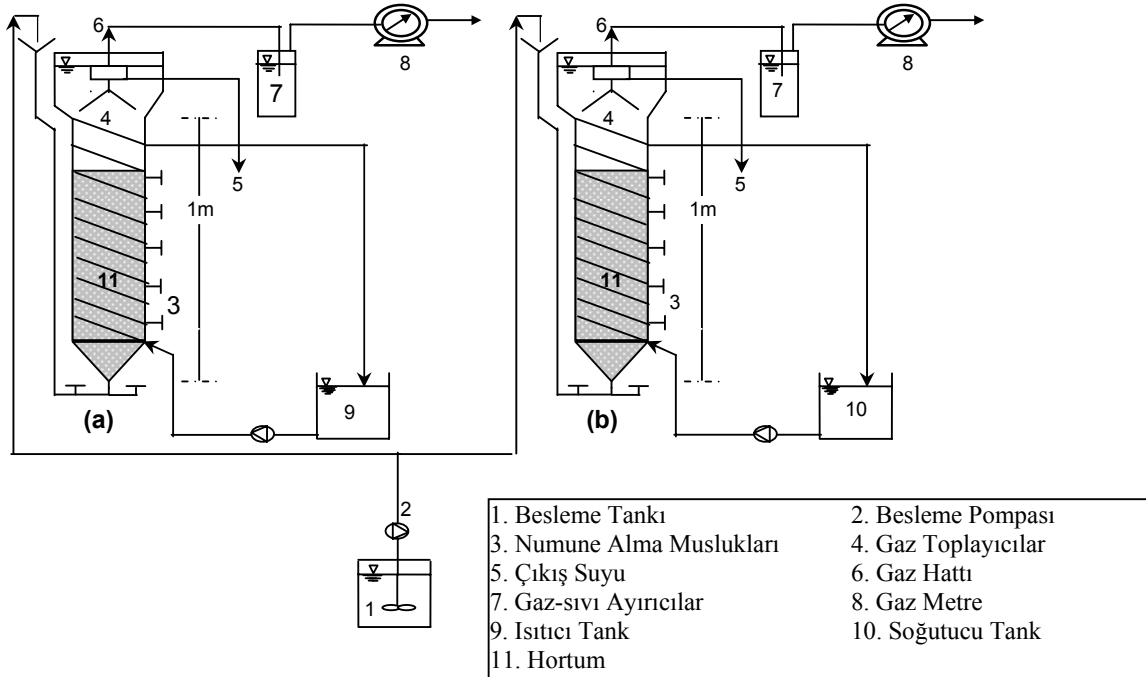
Deneysel çalışmalar

İşletmeye alma döneminde her iki reaktör ortalama hidrolik bekleme süresi (Θ) 1.2 gün değerinde çalıştırılmıştır. Bu sürede mezofilik altı sıcaklıkta çalıştırılan YAÇY reaktöründeki ortalama sıcaklık ($22^{\circ}\text{C}\pm 2.0^{\circ}\text{C}$) olarak ölçülmüştür. Daha sonra $\Theta=0.89$ gün değerine inilmiştir. Yaz

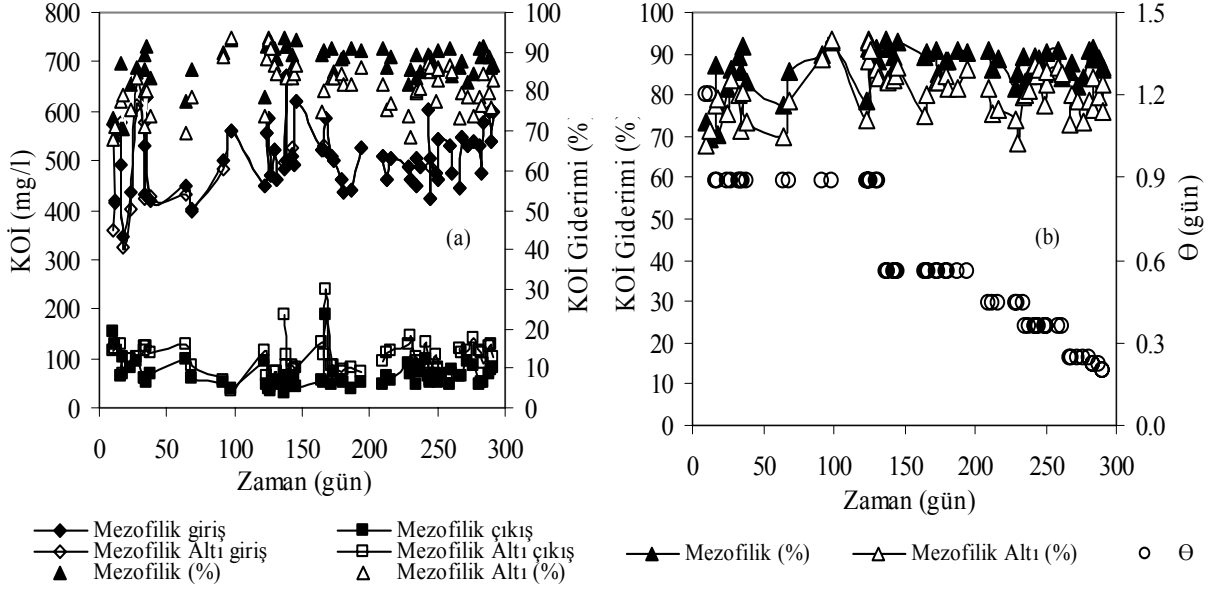
aylarında oda sıcaklığındaki önlenemeyen yükselişten dolayı, giriş KOİ konsantrasyonlarında ilk aylarda büyük salınım gözlenmiştir (Şekil 2a). Bu sebeple besleme tankı içerisindeki sentetik evsel atıksuyun karakterizasyonunun stabil (dengeli) olması için, tank içerisindeki suyu 4°C'de tutacak şekilde soğutucu ilave edilmiş ve giriş konsantrasyonundaki salınımlar büyük ölçüde önlenmiştir (Şekil 2a). Ortalama toplam KOİ giderimleri mezofilik reaktör için %71 ve mezofilik altı reaktör için (22±2°C) ise %69 ($\theta=1.2$ gün) olarak gözlenmiştir. 0.89 gün olan hidrolik bekleme süresinde ortalama toplam KOİ giderimleri mezofilik reaktör için %91, mezofilik altı reaktör için (26±2°C) ise %87 olarak bulunmuştur (Şekil 2b). Sabit KOİ giderim verimlerinin bulunmasından sonra, R1 ve R2'deki hidrolik bekleme süresi 0.56 gün değerine düşürülmüştür. Bu bekleme süresinde, toplam KOİ giderimleri mezofilik reaktör için %90, mezofilik altı reaktör için (26±2°C) ise %83 olarak bulunmuştur (Şekil 2a). Sonuçlar azalan bekleme sürelerinde, mezofilik reaktördeki ortalama toplam KOİ gideriminde hemen hiç değişim göstermemiş, fakat mezofilik altı sıcaklıkta çalışan reaktördeki ortalama toplam KOİ gideriminde bir miktar azalma göstermiştir. Bu-

nun sebebi, mezofilik altı sıcaklıkta çalışan YAÇY reaktörün içerisindeki sıcaklık değerinin yaz koşullarından sonbahar koşullarına geçilmesinden dolayı 20.5±2°C değerine düşmesi olarak yorumlanabilir. Daha sonra her iki reaktör 0.23 gün gibi düşük hidrolik bekleme süresinde işletilmiştir. Bu bekleme süresinde, toplam KOİ giderimleri mezofilik reaktör için %86, mezofilik altı reaktör için (16±2°C) ise %78 olarak bulunmuştur (Şekil 2b). Mezofilik altı sıcaklıkta çalışan reaktördeki ortalama toplam KOİ giderimindeki azalma, reaktör içerisindeki sıcaklık değerinin 16±2°C değerine düşmesi olarak yorumlanabilir. Her ne kadar mezofilik reaktörde mezofilik altı sıcaklıkta çalışan reaktöre kıyasla daha yüksek ortalama toplam KOİ giderimi gözlenirse de, sonuçlar mezofilik altı sıcaklıkta çalışan reaktörün düşük θ değerlerinde bile, düşük sıcaklık değerlerine iyi bir şekilde uyum sağlayabildiğini göstermiştir.

Mezofilik altı sıcaklıklarda işletilen YAÇY reaktörünün performansının izlendiği çalışma tamamlandıktan sonra, reaktör içerisindeki sıcaklık 10±1°C değerine düşürülerek reaktör 0.52 gün ortalama hidrolik bekleme süresinde psikrofilik şartlarda çalıştırılmıştır. İlk hafta, reaktörde



Şekil 1. (a) Mezofilik YÇYR (b) Psikrofilik YAÇYR



Şekil 2. Mezofilik ve mezofilik altı YAÇYR'de (a) toplam KOİ konsantrasyonları (b) azalan θ değerlerinde toplam KOİ giderimleri

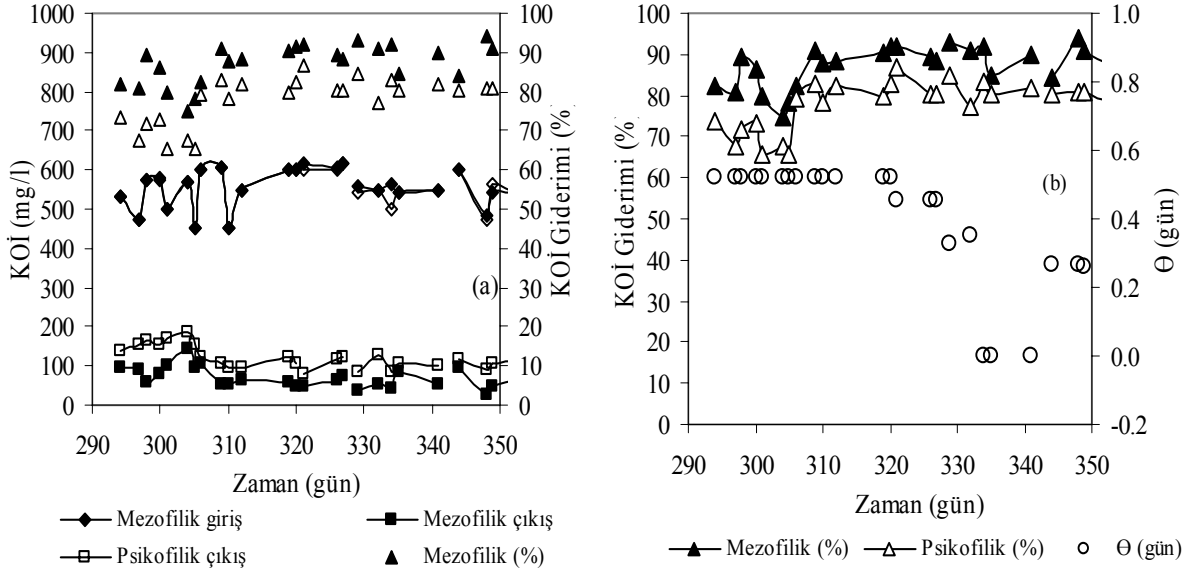
gözlenen ortalama toplam KOİ gideriminde belirgin ölçüde bir düşüş gözlenirse de, diğer haftalarda giderim artarak mikroroganizmaların düşük sıcaklıklara adapte olabildikleri izlenmiştir (Şekil 3a-b). Psikrofilik reaktörde ilk haftada %68 değerine kadar düşen ortalama KOİ giderimi, iki hafta içerisinde 0.52 gün hidrolik bekleme süresinde %82 değerine yükselmiştir. Aynı bekleme süresinde mezofilik YAÇY reaktörde %92 değerinde oldukça yüksek ortalama KOİ giderimi elde edilmiştir.

Biyogaz üretimi

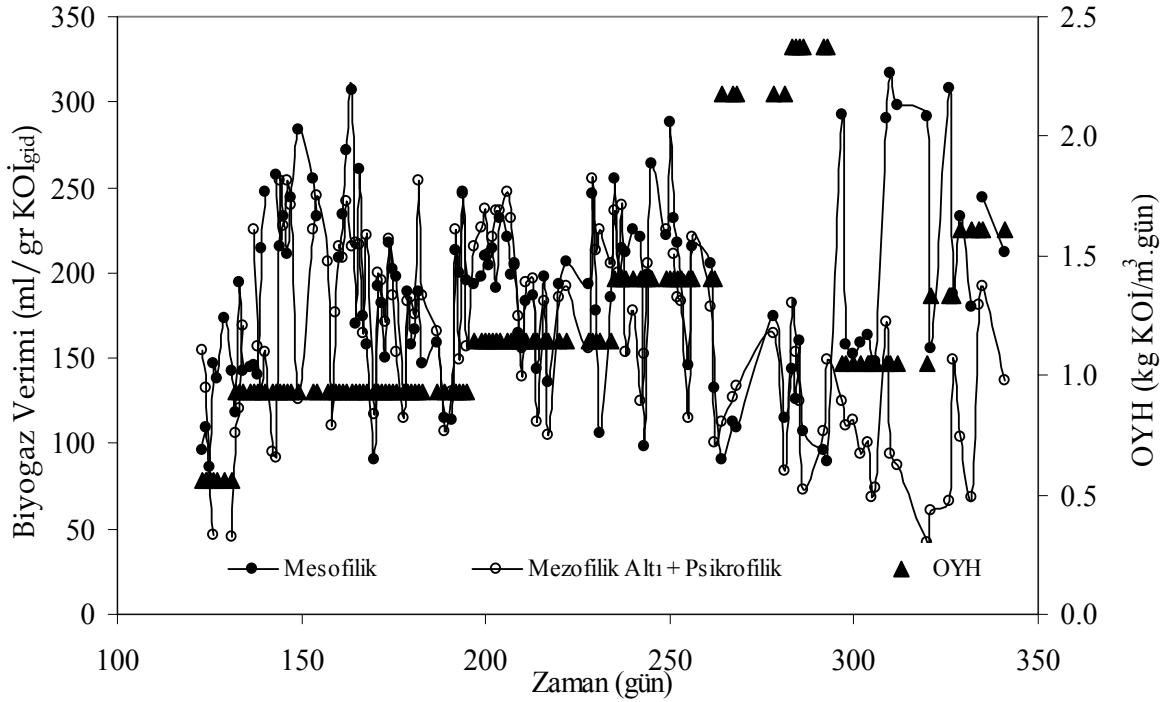
Çalışmanın başlangıç zamanlarında, yaklaşık dört ay süresince, R1 ve R2'den üretilen toplam biyogaz verimli bir şekilde ölçülememiştir. Daha sonra her iki reaktörden üretilen biyogaz, özel gaz toplama balonları içerisine ayrı ayrı toplanmıştır. Balonlar içerisinde toplanan biyogaz, gaz metre aletine sıkılarak R1 ve R2 için günlük üretilen biyogaz hacmi hesaplanarak, giderilen kg KOİ başına üretilen toplam biyogaz hacimleri (biyogaz verimleri) artan organik yüklemeler hızlarında (OYH) hesaplanabilmiştir (Şekil 4). Üretilen biyogaz hacimleri farklı sıcaklık değerlerinde ölçüldüğü için, değerler ideal gaz denklemi kullanılarak standart koşullara çevrilmiştir.

Sonuçlar hidrolik bekleme süresi azaldıkça her iki reaktörde üretilen günlük toplam gaz miktarlarında artma göstermiştir. Mezofilik altı sıcaklıklarda çalışan YAÇY reaktöründe üretilen ortalama biyogaz hacimleri, mezofilik YAÇY reaktörde üretilen ortalama biyogaz hacimlerine kıyasla çok az bir miktar daha düşük ölçülmüştür. Fakat bu fark kayda değer değildir. Diğer taraftan, mezofilik altı sıcaklıkta çalışan reaktör içerisindeki sıcaklık psikrofilik sıcaklık değerine düşürüldükten sonra, üretilen günlük ortalama biyogaz hacimlerinde ciddi oranda bir azalma gözlenerek, mezofilik reaktöre kıyasla çok düşük biyogaz üretimleri ve biyogaz verimleri ölçülmüştür.

Çalışmanın ilerleyen zamanlarında psikrofilik reaktörde biyogaz verimi değerinde artma eğilimi gözlenirse de, mezofilik reaktöre kıyasla günlük biyogaz verimi sürekli çok daha az olarak ölçülmüştür. Bunun yanında, her iki reaktörde bulunan gaz hattından zaman zaman biyogaz numuneleri alınarak toplam biyogaz içerisindeki metan ve karbon dioksit oranları ölçülmüştür. Sonuçlar, psikrofilik sıcaklıkta çalışan YAÇY reaktörde üretilen biyogaz içerisinde daha düşük karbon dioksit oranları göstermiştir. Gazların çözünürlüğü sıcaklık azaldıkça arttığı



Şekil 3. Mezofilik ve psikrofilik YAÇYR'de (a) toplam KOİ konsantrasyonları (b) azalan θ değerlerinde toplam KOİ giderimleri



Şekil 4. Sentetik evsel atıksuyun arıtıldığı YAÇY reaktörlerde biyogaz verimleri

için, çıkış suyunda daha fazla karbon dioksit çözümlenerek üretilen biyogaz içerisindeki karbondioksit içeriğini azaltmaktadır.

FISH sonuçları

Metanojenleri (ARC915) temsil eden arke hücrelerinin sentetik evsel atıksuyun arıtıldığı R1 ve R2'nin en alt musluklarından alınan çamur

numunelerinde baskın oldukları FISH sonuçları ile gözlenmiştir. Önceki çalışmalarda aşı çamurundaki baskın olan tür FISH tekniği ile incelenmiştir. MX825 (*Methanosaeta* türleri) ve MS821 (*Methanosarcina* türleri) spesifik oligonükleotid problemleri kullanılmış, ve *Methanosaeta* (MX825) türlerinin aşı çamurunda baskın olan metanojen türler oldukları gözlenmiştir (Gomec vd., 2004). Aynı şekilde, aşı çamurunda baskın olan *Methanosaeta* türlerinin R1 ve R2 reaktörlerinden alınan çamur numunelerinde de baskın metanojen arkeleri oldukları belirlenmiştir (Şekil 5a-f). Başlangıçta mezofilik çamurda bulunan *Methanosaeta* türlerinin, oldukça düşük sıcaklıklarda da baskınlığını koruması, mikroorganizmaların psikrofilik şartlara uyum sağlayabilmesiyle açıklanabilir. Ayrıca, R1 ve R2'den alınan çamur numunelerinde belirgin miktarda *Methanosarcina* türleri de gözlenmiştir. Bu türler R2'de R1'e kıyasla daha yoğun olarak belirlenmiştir.

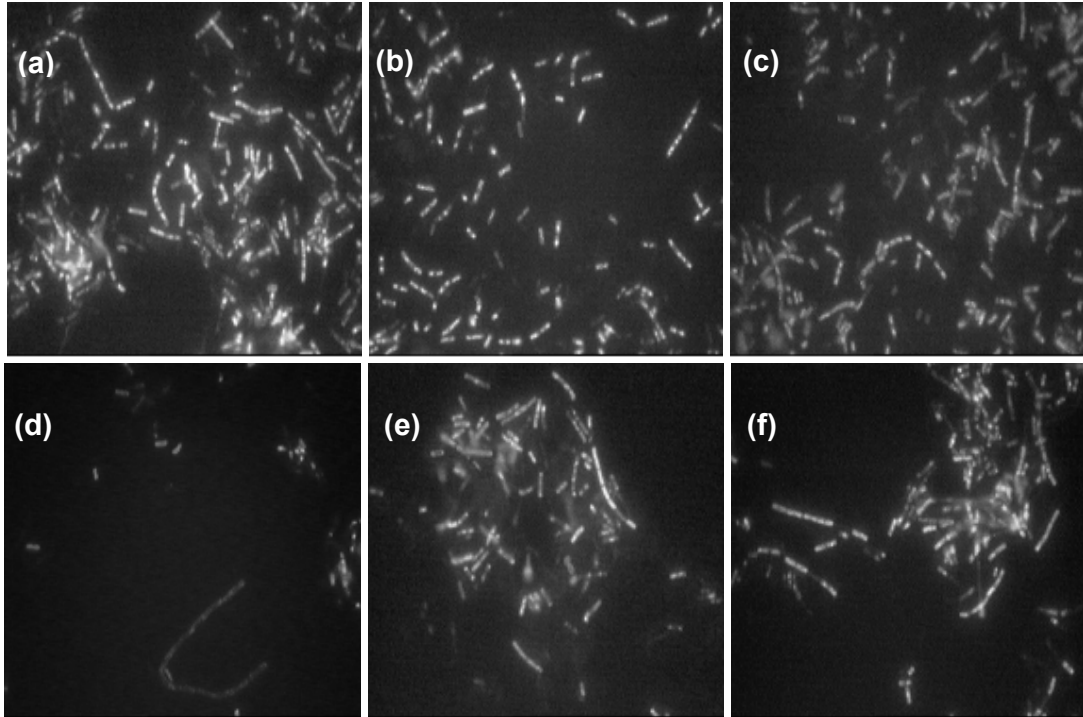
YAÇY reaktörlerde pH ve alkalinite değişimleri

Mezofilik YAÇY reaktörün çıkışında ölçülen pH değerleri, mezofilik altı ve psikrofilik sıcak

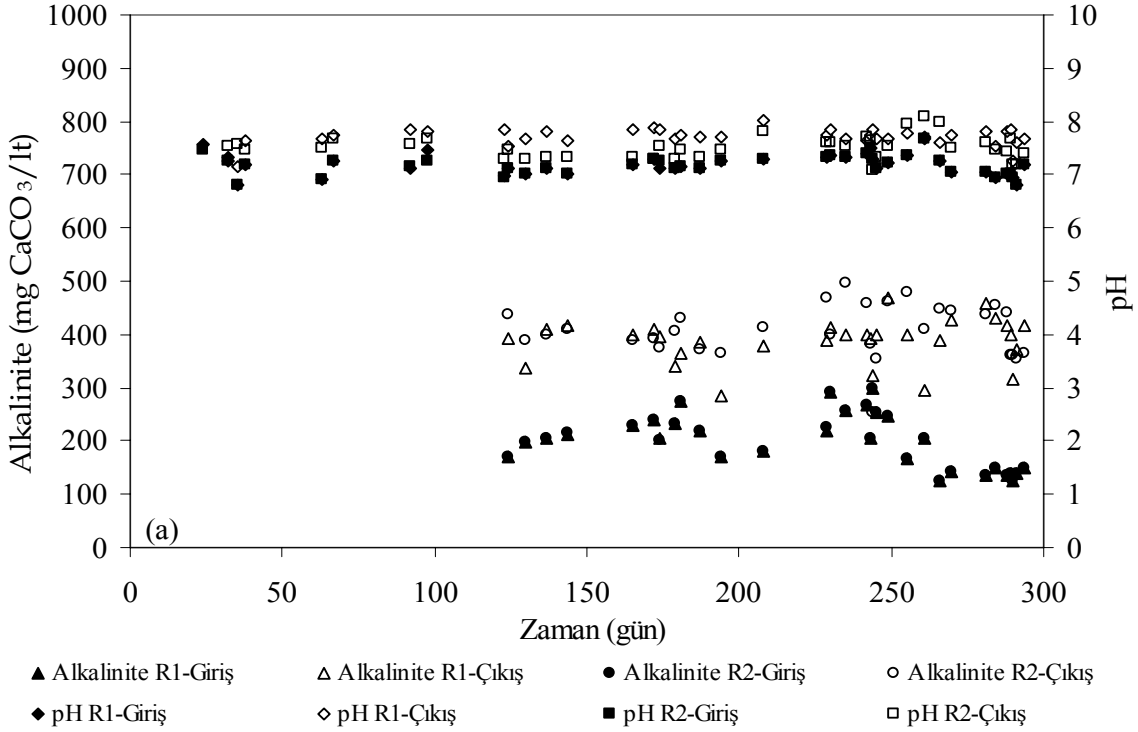
lıklarda işletilen YAÇY reaktöre kıyasla daha yüksek okunmuştur. Bunun sebebi, tekrar gazların çözünürlüğünün sıcaklık azaldıkça artması olarak yorumlanabilir. Mezofilik altı ve psikrofilik YAÇY reaktörün çıkış suyunda, mezofilik YAÇY reaktörün çıkış suyuna kıyasla, daha fazla karbon dioksit çözüldüğü için, suda çözülen karbon dioksit ortamdaki pH'ı düşürmektedir.

Havasız arıtma sistemlerinde alkalinite çok önemli bir rol oynadığından, her iki reaktörün giriş ve çıkışından rutin olarak alkalinite ölçümleri yapılmıştır.

Çalışma süresince, reaktör çıkışlarında ölçülen alkalinite ciddi anlamda problem oluşturabilecek değerlerde bulunmamıştır. Fakat, R2'deki sıcaklık mezofilik altı değerlerden psikrofilik sıcaklık değerine düşürüldükten sonra, R2 çıkışındaki alkalinite değerinde belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma daha sonra reaktörün düşük sıcaklıklara adaptasyonu sonucunda tekrar artma eğilimine geçmiştir. Sentetik evsel atıksuyun arıtıldığı mezofilik (R1) ve mezofilik altı (R2) YAÇY reaktörlerde pH ve alkalinitenin zamanla değişimi Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 5. FISH sonuçları, sentetik evsel atıksu ile beslenen YAÇY reaktörlerde *Methanosaeta*, (a) at 35 °C (HRT=0.21 d) (b) at 35 °C (HRT=0.52 d) (c) at 35 °C (HRT=0.26 d) (d) at 16 °C (HRT=0.21 d) (e) at 11 °C (HRT=0.52 d) (f) at 10 °C (HRT=0.26 d)



Şekil 6. Sentetik evsel atıksuyun arıtıldığı mezofilik (R1) ve mezofilik altı (R2) YAÇY reaktörlerinde pH ve alkalinitenin zamanla değişimi

Mezofilik altı sıcaklıkta çalışan YAÇY reaktör içerisindeki sıcaklık psikrofilik sıcaklık değerine düşürüldükten sonra, mezofilik YAÇY reaktörün çıkış suyuna kıyasla daha düşük pH ve alkalinite değerleri gözlenmiştir.

Sonuçlar

Düşük sıcaklık değerlerinin düşük kirlilik yüküne sahip evsel karakterdeki sentetik atıksuyun yukarı akışlı havasız çamur yataklı reaktörde arıtılabilirliğine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar mezofilik ve psikrofilik sıcaklıklarda işletilen reaktörlerin havasız arıtımının benzer bir seyir izlediğini göstermiştir. YAÇY reaktörlerde yüksek arıtma verimleri bulunmuştur. Her ne kadar mezofilik reaktörde mezofilik altı ve daha sonra psikrofilik sıcaklıkta çalışan reaktöre kıyasla daha yüksek toplam KOİ giderimi gözlenirse de, düşük hidrolik bekleme sürelerinde bile psikrofilik YAÇY reaktörü çıkışından elde edilen toplam KOİ konsantrasyonları oldukça düşük ve tatmin edicidir. Reaktör içerisindeki sıcaklık

$10 \pm 2^\circ\text{C}$ değerine düşürüldüğünde ($\theta=0.52$ gün), toplam ortalama KOİ giderimi başlangıçta %66 değerine azalsa bile, çalışmanın ilerleyen zamanlarında KOİ gideriminde artış gözlenmiş ve mikroorganizmaların bu kadar düşük sıcaklık değerlerine adaptasyon göstererek bu sıcaklıkları tolere edebildikleri anlaşılmıştır. $10 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de psikrofilik reaktörde %82'lere çıkan ortalama toplam KOİ giderimi gözlenirken, mezofilik reaktörde elde edilen ortalama toplam KOİ giderimi %90 olarak bulunmuştur.

Mezofilik YAÇY reaktörde giderilen KOİ miktarı başına üretilen biyogaz değerleri, mezofilik altı sıcaklıkta çalışan YAÇY reaktöre kıyasla nispeten yüksek bulunmuştur. Diğer taraftan, mezofilik altı sıcaklıkta çalışan reaktör içerisindeki sıcaklık psikrofilik sıcaklık değerine düşürüldükten sonra, üretilen günlük ortalama biyogaz hacimlerinde ciddi oranda bir azalma gözlenmiştir. Düşük biyogaz üretimleri, sıcaklığın gaz üretimi üzerinde çok önemli etkisi olduğunu göstermektedir.

Çalışma süresince, reaktör çıkışlarında pH ve alkalinite sürekli olarak izlenmiş ve her iki parametre de çalışma süresince kararlı bir seyir izleyerek ciddi anlamda problem oluşturabilecek değerlerde gözlenmemiştir.

Düşük sıcaklıkların YAÇY reaktörlerin arıtma verimleri üzerindeki etkisinin değerlendirilebilmesi için metanojen türlerdeki değişim, 16S rRNA/DNA bazlı FISH tekniği kullanılarak incelenmiştir. Arke hücrelerinin tanımlanmasında ARC915 spesifik oligonükleotid probu kullanılmış ve FISH sonuçları, metanojenleri temsil eden arke hücrelerinin her iki reaktörde de baskın olduklarını göstermiştir. Ayrıca, aşı çamurunda baskın olan *Methanosaeta* türlerinin her iki reaktörden alınan çamur numunelerinde baskın metanojen arke hücreleri oldukları gözlenmiştir. Granüllerin psikrofilik sıcaklıklarda bile bozulmadan yapılarını korudukları gözlenmiştir. Sonuçlar, orijinalinde mezofilik *Methanosaeta* türleri içeren aşı çamuruyla aşılanan psikrofilik YAÇY reaktörünün düşük sıcaklık değerlerine iyi bir şekilde uyum sağladığını göstermiştir.

Düşük kirlilik yüküne sahip atıksuların arıtıldığı psikrofilik YAÇY reaktöründe yüksek arıtma verimlerinin gözlenmesi, özellikle ılıman iklime sahip yerleşim bölgelerinde ilave ısıtmaya ihtiyaç göstermemeleri sebebiyle ilgi çekici ve ekonomik bir ön-arıtma alternatifi olarak düşünülebilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sağladıkları finansal destek için İTÜ Araştırma Fonu'na (Proje No: 1826) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Angenent, L.T., Banik, C.G. ve Sung, S., (2001). anaerobic migrating blanket reactor treatment of low strength wastewater at low temperatures, *Water Environment Research*, **73**, 5, 567-574.
Elmitwalli, T.A., (2000). Anaerobic treatment of domestic sewage at low temperature, *PhD thesis*,

Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
Gomec C. Y, Calli, B., Mertoglu, B. ve Ozturk, I., (2004). Methanogenic community structures in UASBR treating low strength wastewater at psychrophilic temperatures, *Water and Environmental Management Series (WEMS)*, 299-306.
Langenhoff, A.A.M. ve Stuckey, D., (2000). Treatment of dilute wastewater using an anaerobic baffled reactor: Effect of low temperature, *Water Research*, **34**, 15, 3867-3875.
Lettinga, G., (1996). Sustainable integrated biological wastewater treatment, *Water Science and Technology*, **33**, 3, 85-98.
Lettinga, G., Rebac, S. ve Zeeman, G., (2001). Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment, *TRENDS in Biotechnology*, **19**, 9, 363-370.
Patel, H. ve Madamwar, D., (2002). Effects of temperatures and organic loading rates on biomethanation of acidic petrochemical wastewater using an anaerobic upflow fixed film reactor, *Bioresource Technology*, **82**, 65-71.
Raskin, L., Poulsen, L.K., Noguera, D.R., Rittmann, B.E. ve Stahl, D.A., (1994). Quantification of methanogenic groups in anaerobic biological reactors by oligonucleotide probe hybridization, *Applied and Environmental Microbiology*, **60**, 4, 1241-1248.
Rebac, S., (1998). Psychrophilic anaerobic treatment of low strength wastewaters, *PhD thesis*, Wageningen University Wageningen, The Netherlands.
Schmidt, J.E. ve Ahring, B.K., (1999). Immobilization patterns and dynamics of acetate utilizing methanogens immobilized in sterile granular sludge in upflow anaerobic sludge blanket reactors, *Applied and Environmental Microbiology*, **65**, 3, 1050-1054.
Van Lier, J.B., Rebac, S. ve Lettinga, G., (1997a). High-rate anaerobic wastewater treatment under psychrophilic and thermophilic conditions, *Water Science and Technology*, **35**, 10, 199-206.
Van Lier, J.B., Rebac, S., Lens, P., Van Bijnen, F., Elferink, S.J.W.H.O., Stams, A.J.M. ve Lettinga, G., (1997b). Anaerobic treatment of partly acidified wastewater in a two-stage expanded granular sludge bed (EGSB) system at 8°C, *Water Science and Technology*, **36**, 6-7, 317-324.