

DERLEME MAKALE

Kentsel Atıksu Arıtma Tesislerinin İyileştirilmesine Yönelik Güncel Yaklaşım ve Uygulamalar

Dilek ERDİRENÇELEBİ

Yazışma yazarı:

Dilek ERDİRENÇELEBİ,
derdirencelebi@ktun.edu.trKonya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Müh. Böl., 42250, Selçuklu, Konya
0000-0003-0268-3549

Referans:

Erdirençelebi, D, (2022), Kentsel Atıksu Arıtma Tesislerinin İyileştirilmesine Yönelik Güncel Yaklaşım ve Uygulamalar, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(2) 109-116,

Makale Gönderimi : 1 MART 2022
Online Kabul : 17 MAYIS 2022
Online Basım :

Özet Kentsel atıksu arıtma tesislerinin (AAT) hizmet ettiği nüfus arttıkça işletim maliyetlerinde ve çıkış suyu kalitesinde iyileştirmelerin gerekliliği, araştırmacıları optimizasyon çalışmalarına yöneltmiştir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik birçok işlem ve prosesin yer aldığı AAT’de verimliliğin artırılmasının yanı sıra alıcı ortam kalitesinin korunması veya geri kazanım için birçok kirletici türünün etkin şekilde dönüşümü ve su ortamından uzaklaştırılması dikkate alınmaktadır. Bu süreçler yüksek maliyet gerektirmektedir ve sürdürülebilir atıksu yönetimi için su ve faydalı madde kazanımı optimize edilirken enerji ve kimyasal sarfiyatının azaltılmasını sağlayacak yöntemler geliştirilmektedir. Bu çalışmada kentsel AAT’lerde arıtım verimini, arıtma ve maliyetleri azaltma yönünde ana hat biyolojik arıtım, yan akım biyolojik azot arıtımı ve çamur hattı işletimi üzerinde araştırılan ve uygulanan yöntemler derlenmiştir. Uygulanabilirlik açısından en gerçekçi verilerin sunulması amaçlanmış ve bu kapsamda ağırlıklı olarak pilot ve gerçek ölçekli uygulamalar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma, aktif çamur, anaerobik, işletim, optimizasyon.

Current Approaches and Implementations towards Upgrading of Municipal Wastewater Treatment Plants

Abstract As the population serviced by wastewater treatment plants (WWTPs) has increased, the necessity of improvements in operating costs and effluent quality has led researchers to optimization studies. In WWTPs which includes many physical, chemical, and biological processes and processes, efficiency is increased, as well as effective conversion and removal of many types of pollutants are taken into account to maintain or restore the quality of the receiving water bodies. These processes require high costs and methods are being developed to ensure that energy and chemical consumption are reduced while optimizing the recovery of water and useful substances for sustainable wastewater management. In this study, the methods investigated and applied on main line biological treatment, side stream biological nitrogen treatment and sludge line operation in order to increase treatment efficiency and reduce costs in municipal WWTPs have been compiled. It is aimed to present the most realistic data in terms of applicability, and in this context, mainly pilot and real-scale applications have been reviewed.

Keywords: Wastewater treatment, activated sludge, anaerobic, operation, optimization.

1. Giriş

Artan şehirleşme ile birlikte oluşan atıksuların toplanıp bertarafına kadar uzanan süreçte, kentsel atıksu arıtma tesislerinin (AAT) performansının önemi artarak devam etmektedir. Atıksu arıtımının gerektirdiği yüksek maliyetler pompalama, havalandırma ve çamur bertaraf işlemlerinde yoğunlaşmaktadır. Günümüzde izgara, kum tutucu, ön çöktürme ve biyolojik (aktif çamur) arıtım ünitelerinden oluşan ana hat ve çamur yoğunlaştırma, çamur stabilizasyonu ve susuzlaştırma üniteleri ile geri devir akımlarından oluşan çamur hattı akım şemasından oluşan kentsel AAT'lerde iyileştirme yönünde yapılan araştırmalar; ana hat biyolojik arıtmıda oluşan fazla biyolojik çamurun azaltımı ile çamur bertaraf maliyetlerinin ve oluşan stabilize çamur miktarının azaltılması, ana hatta aerobik yerine anaerobik arıtımla havalandırma ihtiyacının en aza indirilmesi, yan akımda biyolojik azot giderimi ile çıkış suyunda azot konsantrasyonunun minimize edilmesi, çamur hattında ayırık/paralel anaerobik çamur çürütme ile proses veriminin artırılması konularında yürütülmekte ve gerçek ölçekte uygulanmaktadır. Mekanik ve kimyasal metotların etkinliğinin yanında düşük maliyetleri nedeniyle biyolojik yöntemler ağırlık kazansa da her yöntem için uygun işletim detayları öne çıkmaktadır. Bu derleme çalışmasında kentsel AAT ana hat, yan akım ve çamur hattında maliyet azaltıcı ve verim artırıcı yönde uygulama potansiyeli bulunan teknik ve yaklaşımlar laboratuvar, pilot ve gerçek ölçekli olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

2. Biyolojik Arıtım İyileştirmeleri

2.1 Aktif çamur sistemleri

Kentsel AAT'lerde aktif çamur prosesinde oluşan atık biyolojik çamur, ikincil çamur (İÇ) olarak adlandırılmakta ve stabilizasyonu ile bertarafında ekonomik, çevresel ve yasal zorunluluklara göre önemli maliyetler ortaya çıkmaktadır. Aktif çamur proseslerinin uygulandığı kentsel AAT işletiminde İÇ'nin yüksek debilerde ve seyreltik seviyelerde oluşmasının yanı sıra ana hatta uygulanan yüksek çamur yaşı ile çamur çürütücülerde anaerobik ayrışmaya oldukça dirençli bir yapı ortaya çıkmaktadır (Henze vd., 2008). İÇ oluşumunu azaltmak üzere uygulanan teknikler; mikrobiyal içsel solunumlu kriptik büyüme, eşleşmeyen metabolizma, onarım-bakım metabolizması ve bakteri tüketen organizmaların kullanımı üzerine gelişmektedir (Wei vd., 2003). Tekniklerin gerçek ölçekli uygulanması ve yaygınlaşmasında ekonomik ölçülerde uygunluk ve çevreye olan etkilerin yanı sıra biyolojik arıtım verimi ve çıkış suyu kalitesine etkilerinin de analizi önem arz etmektedir.

Dünya genelinde aktif çamur prosesi, evsel ve endüstriyel atıksuların biyolojik arıtımında en yaygın olarak kullanılan procestir (Wei vd., 2003). Atıksulardaki organik maddenin yüksek verimle CO₂, su ve canlı biyokütle çevriminde yüksek miktarda havalandırma enerji ihtiyacının yanı sıra bertarafı gereken atık bakteri akımı (ayrıştırılan organik maddenin yarısı) ortaya çıkmaktadır (Tchobanoglous vd., 2003). Bu atık çamurun oldukça seyreltik ve biyo-ayrışmaya dirençli bakteri ve hücre dışı polimerik yapılardan oluşması nedeniyle AAT çamur hattında çeşitli problemler ve düşük verimli işlemler gerçekleşmektedir (Henze vd., 2008; Erdirencelebi ve Kucukhemek, 2015). Çamur stabilizasyon ve bertarafındaki maliyetler toplam AAT işletim maliyetlerinin yaklaşık %50-60'ını oluşturmaktadır (E.P.A., 2008). Oluşan fazla biyolojik çamurun ana hat akımında azaltılmasının yanında geri devir çamur hattında (yan akım) fiziksel, kimyasal veya kombine farklı yöntemlerle azaltılması mümkün olmaktadır. Bakteri hücresi parçalanmasında kullanılan teknikler ultrasonikasyon, yüksek basınçlı homojenleştirme, orta veya yüksek sıcaklıkta termal işlem, asidik veya bazik termal işlemler, ozonlama, klorlama ve peroksidasyon gibi ileri oksidasyon işlemleri olarak sayılabilir (Foladori ve diğ., 2010b). Etkin hücre parçalanması için karşılaştırıldığında ultrasonikasyon ve yüksek

basınçlı homejenleştirme ile hücre bütünlüğü üzerinde orta dereceli etkiler elde edilirken ancak yüksek spesifik enerji seviyelerinde etkin hücre parçalanması gerçekleşmiştir. Homojenleştirmede ultrasonikasyona göre daha düşük spesifik enerji seviyesinde güçlü kesme kuvveti elde edilmiştir. Termal işlem ise 45-55 °C gibi orta sıcaklıklarda bile etkin hücre duvarı parçalanması sağlarken 10 mg/L'nin altındaki dozlarda ozonlama ile yüksek oranda hücre bütünlüğü bozulması ile düşük oranda çözünürleşme gerçekleşmiştir. Daha yüksek dozlarda ozon, çözünürleşme ürünleri ve flok üzerine etkiye seçici davranmıştır. Spesifik enerji ihtiyacında ise en düşükten yükseğe maliyet; ozonlama, homojenleştirme, termal işlem ve ultrasonikasyon şeklinde sıralama ile elde edilmiştir.

Ozonlama gerçek ölçekli uygulamalara geçmiş başarılı bir yöntem olarak bakteri hücresini parçalayarak sonrasında biyolojik ayrışmaya uygun madde salınımına imkân vermektedir. Yasui ve Shibata tarafından geliştirilen proses, çamur geri devir hattında uygulanmakta ve askıda katıların parçalanması ile açığa çıkan organik substrat, sonraki biyolojik arıtım sürecinde tüketilmektedir (1994). Katıların çözünürleştirilmesinin yanında bir miktar çözünmüş organik madde de oksidasyona uğramaktadır. Optimum ozon dozlarında işletim sürecinde, gerçek ölçekli AAT havalandırma havuzlarında atık çamur ve inorganik madde birikimi oluşmamış ve klasik aktif çamur sistemine göre susuzlaştırma ve uzaklaştırma dâhil olarak daha düşük işletim maliyeti öngörülmüştür (Yasui vd., 1996; Sakai vd., 1997). Ozonlama ve biyolojik arıtımın kesikli ozonlama ile birleştirildiği gelişmiş model ile daha düşük ozon dozlarında çamur kabarmasını kontrol etmek mümkün olmuştur (Kamiya ve Hirotsuji, 1998). Lab-ölçekli reaktörde sentetik atıksu ile gerçekleştirilen çalışmada çamur oluşumu yarı yarıya azalmış ve çamur hacim indeksi iyileştirilmiştir.

Mikrodalga (MV) ve kimyasal ilavesi ile hibritleştirilmiş ilot ölçekli uygulamada çamur oluşumunda %38,6 oranında azalma ve 0,35 kg UAKM/kg KO_İtüketilen olarak Y_{obs} elde edilmiştir (Wang vd., 2015). Kullanılan kimyasallar içinde MV verimine katkı yapan H₂O₂ olmuştur. MV ve MV+ H₂O₂ için elde edilen KO_İ çözünürleşmesi sırasıyla %15,91 ve 19,35 olarak gerçekleşmiştir. Hibrit sistemli aktif çamur prosesinin toplam işletim maliyeti %13,64 daha düşük seviyede gerçekleşmiştir.

Maliyet bakımından avantaj sağlamak üzere, fiziksel ve kimyasal yöntemlerin yerine biyokimyasal yöntemlerle hücre bozunumu ve tüketimi elde etmenin çok yönlü olarak uygulamalarına geçilmiştir. Çamur geri devir hattına yerleştirilen anoksik veya anaerobik tank uygulamaları ile çamur akımının farklı oranlarda tanka beslenerek ana hat aktif çamur prosesi çamur oluşumunda azaltım amaçlanmıştır. Geri devirle taşınan biyokütle için açık ve içsel solunum şartları oluşturularak hücre parçalanması sonucu çözünmüş organik maddelerin açığa çıkması ve bir kısmının tekrar bakteri bünyesine alımı sağlanmaktadır. Açığa çıkan substratın bakteri tarafından yeni hücre üretimi (anabolizma) yerine diğer hücre aktivitelerine (katabolizma, ATP üretimi) harcanması için uygun mühendislik çözümleri uygulanmaktadır. Düşük oksijen veya substrat şartında bakteriler için anabolizmanın azalması katabolizmanın artması veya tek olarak sürdürülmesi için yan akım veya ana hat üzerinde farklı proses tipleri uygulanmaktadır. Geri devir çamur akımının tamamının anaerobik tankta hidrolize maruz bırakıldıktan sonra ana hat aktif çamura beslenmesi, oksik çöktürme-anaerobik proses (OSA) olarak Chudoba vd. tarafından önerilmiştir (1992). Çoğunlukla lab- ve pilot ölçekli sentetik atıksularla çalışılan bu sistemde fazla çamur oluşumunun %20-60 gibi geniş bir aralıkta azaltılabildiği gösterilmiştir (Novak vd., 2007; Foladori vd., 2010). CAS+OSA sistemine alternatif olarak membran biyoreaktör+OSA uygulaması geliştirilmiş ve yan akıma giden çamur konsantrasyonunun artırılması amaçlanmıştır (An ve Chen, 2008).

Anaerobik yan akım reaktörü (ASSR) uygulamasında ise çamur

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

geri devir akımının belirli bir oranı (yaklaşık %10) reaktöre alınır ve daha yüksek HBS (7-10 gün) uygulanır (Velho vd., 2016). Çamur üretiminde azalma üzerine etkinliği gözlenen parametreler; çamur yaşı, çamur akımına uygulanan oran ve aerobik-anaerobik dönüşümlü faz uygulaması olarak gözlenmiştir (Foladori vd., 2015). Gerçek ölçekli uygulamalarda OSA prosesinden ziyade ASSR uygulaması çamur geri devir akımının düşük bir oranına uygulanması bakımından daha kararlı ve ekonomik olurken çamur üretiminde azaltım sınırlı kalmaktadır.

Troiani ve d. 35 000 nüfus eşdeğerli ön-denitrifikasyonlu AAT'de yan akım reaktörü çalışmasında ardışık anoksik-oksik fazların uygulanması ile 0,49-0,51 kg TAKM/kg KOİ aralığından 0,39-0,44 kg TAKM/kg KOİ aralığına düşen dönüşüm (Y_{obs}) katsayısı elde etmişlerdir (2011). Aerobik çamur stabilizasyon tankının 10 gün'lük HBS ve ardışık ve eşit süreli (%50) oksik ve anoksik faz uygulaması ile yan akım reaktörüne dönüştürüldüğü çalışmada -300- (+)50 mV ORP aralığında şiddetli açıklık ve enerji eldesi şartları dönüşümlü olarak elde edilmiştir. Dönüşümlü şartlar mikrobiyomu aşırı ölüm oranından korurken enerji depolayan organizmalar için elverişli şartlar oluşturmuştur. Tesisin azot ve fosfor giderimleri artarken çıkış KOİ konsantrasyonu artmıştır. Bu sistemde yan akım reaktör çıkışı oksik tanka beslenirken fosfat depolayan organizmalar için uygun şartlar oluşturulmuştur.

Geri devir çamur hattı üzerine kurulan yan akım reaktörlerine çamur akımı farklı oranlarda beslenebilmektedir. Biyolojik nütrient giderimi gerçekleştiren bir UCT (University of Cape Town) AAT'sinde Coma vd. -150 mV ORP şartında işletilen pilot ölçekli yan akım anoksik reaktör ile %18 seviyesine kadar çamur üretiminde azalmayı (Y_{obs} : 0,329 g UAKM/g KOİ), %100'lük çamur akımı beslemeleri ile elde etmişlerdir (2013). Bu işletimde ana hattaki çamur yaşı (17 gün), HBS (24 sa) ile içsel geri devirler korunmuş ve organik madde gideriminde artış elde edilmiştir. Geri devir akımının yan akım reaktörüne beslenmeyen kısmı ana hat anoksik tanka gönderilmiştir. Geri devir çamur akımının %10, 50 ve 100 oranlarında yan akım anoksik reaktöre beslenmesinde, sırasıyla 34,5, 11,8 ve 5,9 sa'lık HBS (=çamur yaşı) uygulanmıştır. Ana hat organik madde giderimine etki oluşmamıştır. Çamur hacim indeksinde (ÇHI) 195 mL/g TAKM değerinden %100 yan akım arıtımında 122 mL/g TAKM'ye düşüş ile çökeltme özelliğinde önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Bu tip çalışmalarda mikrobiyomdaki değişimler araştırılmamış olsa da, ÇHI'ndeki iyileşme, uygulanan işletimle biyokütle içindeki ATP artırabilen ve çökelmeye pozitif etki yapan fosfat (PAO) ve glikojen (GAO) biriktiren organizmaların sayıca arttığını desteklemesi bakımından önem arz etmektedir.

Velho vd. gerçek ölçekli ön denitrifikasyonlu aktif çamur prosesi (toplam 7000 m³) ile geri devir akımı üzerine yerleştirilen anaerobik yan-akım reaktörlü sistem işletimlerini 5 yıl boyunca gerçekleştirmişlerdir (2016). Bu yöntemde hücre içsel solunumu ile canlı biyokütle miktarı azaltılmakta ve açığa çıkan çözünmüş BOİs ve amonyum azotunun ana hat aktif çamur sisteminde oksitlenmesi sağlanmaktadır. Çalışmada -250 mV ORP ve 7 gün'lük HBS (=çamur yaşı) değerleri ile işletilen 2 adet anaerobik reaktöre aktif çamurun kütleye %7+10 oranları beslenerek Y_{obs} dönüşüm oranında 0,44 kg TAKM/kg KOİ'den 0,35 kg TAKM/kg KOİ'ye %20'lik azalma elde edilmiştir. Lab-ölçekli sentetik atıksu ile çalışmalara göre daha düşük azaltım elde edilmesi atıksudaki inert maddelerin varlığına bağlanmıştır. Anaerobik reaktörlere beslenen çamur TAKM konsantrasyonları 9,3-10,1 g TAKM/L'ye yükselmiştir. Uygulanan çamur yükleri ile hızları 1,5-1,6 kg UAKM/m³.gün ve pH 6-6,5 aralığında gerçekleşmiştir. Geri devir hattında çözünmüş BOİs 10 mg/L konsantrasyonundan 226-255 mg/L seviyesine yükselmiştir. Eş zamanlı amonyum konsantrasyonundaki artış özellikle proteinli maddelerin (bakteriyel hücrelerin) parçalandığını göstermiştir. Ana hat çamur yaşı değeri 15-17 gün'den yan akım tek ve iki reaktör uygulamalarında sırasıyla 36 ve 44 gün'e yükselmiştir. ÇHI'nde artış ile çökeltme kabiliyetinde bir miktar bozulma gerçekleşmiştir. Yan akım reaktörü için uygulanan ORP seviyesinde ekonomik

olarak kullanılmayacak seviyede biyogaz üretimi gözlenmiştir. Reaktörlerde koku oluşumunu engellemek için periyodik olarak havalandırma yapılmıştır. Tesis çıkış suyu karakterinde herhangi bir etki gerçekleşmemiştir. SON önemli nokta olarak, bu sistemi uygulayacak gerçek ölçekli AAT'lerde açığa çıkacak fazladan amonyum azotunun oksitlenmesi için kurulu havalandırma ve oluşacak nitratin denitrifikasyonu için yeterli kapasite gerekmektedir.

Yan akım üzerinde işletilen anaerobik reaktörler ve uzun çamur yaşı gereğini ortadan kaldırmak için ana hat üzerinde ilave üniteler ile fazla biyolojik çamur oluşumunda azaltım sağlanmaya çalışılmıştır. Ana hat A₂O ünitesi önüne yerleştirilen mikro-aerobik ünite ve çöktürücüden oluşan ilavede kirleticiler düşük HBS'de giderilmiş ve aktif çamur prosesine gelen AKM konsantrasyonu düşürülerek çıkış suyu kalitesi artırılabilmiştir (Niu vd., 2016). Çamur dönüşümü 0,074 g AKM/g KOİ_{giderilen} değerine azaltılmıştır. Bir endüstri bölgesi AAT ana hattında gerçek ölçekli oluşturulan ve işletilen mikro-aerobik ünite ve çöktürme tankı için HBS sırasıyla 1,5 ve 2,9 sa değerlerinde tasarlanmış ve işletilmiştir (Jiang vd., 2018). Fazla biyolojik çamurun giriş atıksu ile beslendiği mikro-aerobik üniteye çözünmüş oksijen 0,5-1,0 mg/L aralığında homojen bir şekilde sağlanmıştır. A₂O ünitesinde çamur yaşı 20 gün olarak uygulanmıştır. İlave üniteye amonyum, nitrit, nitrat ve organik azottan oluşan giriş azotunun %50'den fazlası giderilmiştir. Düşük oksijenli anoksik şart altında amonyum azotu oksitlenirken nitrit ve nitrat denitrifikasyona uğramışlardır. Organik azotun tamamen giderimi, parçalayıcı heterotrofların hidrolizi tamamladığını göstermiştir. Çöktürme ile biyokütle tamamen ana akımdan ayrılarak sonrasında A₂O ünitesine atık biyokütle girişi önlenmiştir.

2.2 Anaerobik arıtım sistemleri

Evsel atıksu seyreltik yapısına rağmen içeriğinde yaklaşık 7,6 kJ/L'lik kimyasal potansiyel enerji taşımaktadır (Heidrich vd., 2011). Geleneksel yöntemlerle evsel atıksu arıtımı kabaca 0,69–3,01 kWsa/kg KOİ'ye mal olmaktadır (Longo vd., 2016). Avrupa ülkelerinde toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %1-3'ü atıksu arıtımında gerçekleşmektedir. Tropik/ilıman bölgelerde evsel atıksu arıtımı anaerobik prosesle gerçekleştirilmektedir (Bowen vd., 2014; Chernicharo vd., 2015). Özellikle Latin Amerika'da ve Hindistan'da evsel atıksuyun doğrudan anaerobik arıtımı gerçek ölçekli gerçekleştirilmektedir (Von Sperling ve Oliveira, 2009; Sato vd., 2007; Chernicharo vd., 2015).

Evsel atıksu gibi seyreltik karakterde atıksuların anaerobik arıtımında düşük ortam sıcaklığında etkin verim eldesi için yüksek çamur yaşı (etkin biyokütle tutunumu) sağlanabilirdi anaerobik aşağı ve/veya yukarı akışlı filtreler, perdeli reaktör, çamur yatağı reaktör ve hibrid filtre reaktörlerin uygulanabilirliği konusunda lab ve pilot ölçekli araştırmalar mevcuttur. Cakir ve Stenstrom'un çalışmalarında ortaya konan dinamik model ile anaerobik filtrelerde düşük KOİ içerikli atıksular için %60'ın üzerinde KOİ giderimi için 24 saatten daha yüksek HBS ihtiyacı gösterilmiştir (2003). Ayrıca 20°C sıcaklıkta ve 130 mg/L'nin altında KOİ içeriğinden oluşan biyogazdaki metan içeriği %50'nin altında kalmaktadır. Halbuki Yu ve Anderson (1996) kombine etikleri anaerobik çamur yatağı ve ikili filtre (aşağı+yukarı akışlı) sisteminde 17-28°C sıcaklık aralığında ön çöktürülmüş evsel atıksuyun arıtımında ortalama %83 KOİ giderim verimi ile 0,09 m³ biyogaz/m³.gün (%72 metan) oluşumu için 10 saatlik HBS yeterli olmuştur. İki aylık adaptasyon sürecinde HBS'nin 11 saate düşürülmesi ile OYH'nin 0,9 kg KOİ/m³.gün'e yükseltilmesi mümkün olmuştur. Bu süreçte çamur yatağı bölümünde maksimum 2 mm'lik granüllerin ve filtre bölümlerinde ise biyofilm oluşumu ile %75'lik KOİ giderimi ve %70'lik metan içeriğinde biyogaza ulaşılmıştır. Kararlı işletim döneminde OYH artışları ile HBS'nin azaltılması sonucunda 4 sa'lık HBS'de %62'lik KOİ giderim verim eldesi prosenin düşük sıcaklıkta evsel atıksu arıtımında yüksek potansiyelini ortaya koymuştur. Diğer bir önemli sonuç ise OYH artışıyla KOİ giderim hızında da artışın

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

gerçekleşerek çözülmüş ve toplam KOİ için sırasıyla 1 ve 1,6 kg KOİ/m³.gün giderim hızlarına ulaşılması olmuştur. Çıkış suyunda 40 mg/L'lik AKM kriterinin sağlanması için gerekli minimum HBS 5 sa olarak gözlenmiştir. Önceki çalışmalara benzer şekilde 0,09-0,12 m³ CH₄/kg KOİ_{giderilen} metana dönüşümde düşük oranın nedeni çözülmüş metan ve atıksudaki sülfat içeriğine bağlanmıştır. Gaz-sıvı sistemlerinde Henry sabitine göre oluşan metanın %50'den fazlası çözülmüş fraksiyon olarak gerçekleşmektedir (Lettinga vd., 1993). İndirgenen her g sülfat için 0,7 g KOİ tüketilmektedir (Speece, 1996).

Evsel atıksuyun anaerobik arıtımında pH, alkalinite ve amonyum yeterli seviyelerde gerçekleşerek proses verimi için kritik şartlar oluşturmamaktadır (Yu ve Anderson, 1996). Çıkış suyunda UYA konsantrasyonu 10 mg/L altında kalırken, çamur yatağı veya filtre reaktörlerde yüksek HBS'de arıtımın yaklaşık %74'ü ilk bölgede oluşmakta ve düşük HBS'de bölmeler arasında birbirine yakın arıtım yüzdeleri gerçekleşmektedir. Uygulamalarda yüksek verim sağlayacak en önemli kriterin HBS ve biyokütle konsantrasyonu olduğu gözlenmektedir.

Trego ve d. gerçek ölçekli hibrid genişlemiş granüler çamur-filtre reaktörleri ile 2-18°C (çoğunlukla <15°C) sıcaklık ve 2-200 mg/L BOİ₅ aralığında ortalama %85 giderim elde ederek düşük ortam sıcaklığında prosesin uygulanabilirliğini desteklemiştir (2021). OYH'nin %85 gibi yüksek derecede artışına karşı BOİ₅ giderimi kararlılığını korumuştur. Düşük sıcaklıkta oluşan metanın çoğu çözülmüş formda olduğundan ölçülememekte, çıkış suyunda KOİ değerini yükseltmekte ve bu durum düşük sıcaklıkta anaerobik arıtımın önemli bir problemi olmaktadır. Granüler biyokütle profilinde özellikle dayanıklı arke türü *Methanobacterium*, uyum sağlayarak popülasyondaki oranını %24'den 35-40'a çıkarmıştır. *Methanosaeta* ve *Synergistaceae* ile mikrobiyal biyokütlenin çoğunluğunu oluşturmuşlardır.

Singh ve Viraraghavan giriş KOİ aralığının 224-350 mg/L olduğu evsel atıksu için anaerobik çamur yatağı reaktörde düşük sıcaklıklar için biyokinetik parametreleri belirlemiştir (2002). Düşük karakterli evsel atıksu için 10 saatlik HBS'de 15, 11 ve 6°C'de sırasıyla %85, 77 ve 57'lik KOİ giderimi elde edilmiştir. Bu verimler ortalama 18300±100 mg/L'lik biyokütle konsantrasyonunda gerçekleşmiştir. Substrat kullanım hızının 15°C'de 0,234 gün⁻¹'den 6°C'de 0,041 gün⁻¹'e düşerken ölüm hızında belirgin bir azalma gerçekleşmemiştir. 6-20°C aralığında dönüşüm oranı 0,2 g biyokütle/g KOİ seviyesinde belirlenmiştir. Elde edilen katsayılar HBS'nin artırılması ile düşük sıcaklıkta oluşan verim kaybının telafi edilebileceğini göstermektedir. Viraraghavan ve Varadarajan'ın 5, 10 ve 20°C'de evsel atıksu arıtma çalışmasında lab-ölçekli anaerobik filtrede 1. derece hız sabitini sırasıyla 0,27, 0,40 ve 0,71 gün⁻¹ olarak elde edilmiştir (1996). Kullanılan medya 50 mm çapında ballast halkalar ve porozite %96,5 olarak gerçekleşmiştir. İki çalışma arasındaki katsayı farklılıkları filtrede gerçekleşen yüksek biyokütle konsantrasyonu ve/veya atıksu-tür farklılıklarından oluşsa da bulgular anaerobik prosesin aktif çamurla karşılaştırılabilir performansını ortaya koymaktadır. Anaerobik prosesle gerçekleşen hidroliz derecesinin ve dolayısıyla partikül içeriğinin de kinetik hızlarda etkisi belirleyici olmaktadır.

Evsel atıksuyun çöktürülmeden anaerobik arıtımında düşük HBS nedeniyle partikül KOİ'nin hidrolizi yetersiz kalabilmekte ve düşük giderim verimlerine yol açmaktadır. Halalshah vd. pilot ölçekli AÇYR-AF pilot sisteminde konsantre evsel atıksuyu (>1000 mg/L KOİ_{top}) 23°C'de arıtma sürecinde 15 ve 4 sa'lik HBS'lerde KOİ_{top}'da %55 ve partiküler KOİ'de %65'lik giderim sağlayabilmiştir (2010). Partiküler KOİ'nin KOİ_{top}'in %50-70'ine ulaştığı kuvvetli evsel atıksu karakteri çoğunlukla su kullanımının kısıtlı olduğu Ortadoğu ve Kuzey Afrika bölgelerinde veya karasu ve gri suyun ayrıldığı ülkelerde oluşmaktadır. Partiküler KOİ'nin anaerobik hidrolizi en az 24 sa'lik HBS ile yeterli hidroliz derecesini gerektirmektedir ve düşük HBS ve ortam sıcaklığında anaerobik evsel atıksu arıtımını sınırlandırmaktadır (Halalshah

vd., 2005). 1505 mg/L atıksu KOİ_{top} için 26°C'de 13-16 sa'lik HBS'de %55-62 giderim elde edilmiştir. Hidroliz derecesinin artırılabilirdiği 2 kademeli (AÇYR-AÇYR veya çürütücü-AÇYR) reaktör sistemlerinde ise KOİ_{top} giderimi %40-70 aralığında kalmaktadır (Mahmoud, 2008; Alvarez ve d., 2008). Evsel atıksuyun yüksek verimle anaerobik arıtımı için "ön çöktürme" şartının sağlanması gereği ortaya çıkmaktadır.

Evsel atıksuyun anaerobik arıtımında yeterli HBS'nin belirlenmesi önem arz etmektedir. Optimum HBS'nin altında değerlerde asitlenme etkileri etkin olmakta ve pH düşüşü gerçekleşmektedir (Bodkhe, 2008). Yeterli HBS ve üzerindeki değerlerde protein ayrışması tamamlandığı için pH'da ve alkaliniteye yükselme gerçekleşmektedir. Amonyum bikarbonat oluşumu proteinin parçalandığını göstermektedir. Uygun TUYA/ALK oranının elde edildiği HBS değerleri optimum olarak değerlendirilebilir. Çalışmada 12 sa'lik optimum HBS'de %95 KOİ giderimi ile 0,35 m³ CH₄/kg KOİ_{gid} ve %70'lik metan içeriği elde edilmiştir.

3. Çamur Hattı İyileştirmeleri

Kentsel AAT'lerde ön çöktürme ünitelerinde çökelerak ayrılan birincil çamur (BÇ) ve İÇ fraksiyonlarının fiziksel farklılıkları, BÇ'nin İÇ ile karışma göre tek başına daha iyi yoğunlaşması, çürütülmesi ve mekanik olarak susuzlaşması Kopp ve Dichtl tarafından gösterilmiştir (2001). İki fraksiyonun ayrı anaerobik çürütülmesi sonrasında İÇ yüksek nütrient fakat düşük kirletici içeriği ile tarımsal uygulamalar için uygun bulunurken BÇ'un bertarafı için yakma seçeneği daha uygun bulunmaktadır (Mininni vd., 2004). Bu model ile yakmaya gönderilecek çamur miktarının önemli oranda azalması mümkün olmaktadır. Tomei ve d. tarafından geliştirilen Aktif Çamurun Bilgisayar Destekli Modellemesi yazılımı (Activated Sludge Computer Aided Modelling) kullanılarak ve literatürden alınan kabullerle 500000 nüfus için tasarlanan AAT'de (ön çöktürme, biyolojik organik madde ve azot giderimi ile ikincil çöktürme, BÇ ve İÇ için ayrı ve birleşik yoğunlaştırma, anaerobik çürütme ve susuzlaştırma) stabilize BÇ ve İÇ için sırasıyla nihai yakma ve toprakta kullanım için verim ve maliyetler hesaplanmıştır (2016). Elde edilen sonuçlara göre ayrı sistemde ünite sayısı (3 yerine 4 dekantör) ve hacim (yoğunlaştırıcı ve çürütücülerde sırasıyla % 39,4 ve 11,4) artmakta fakat tesis işletiminde önemli bir esneklik avantajı sağlanmaktadır. BÇ'un %31,2'den 59,1'e kurutulması için gerekli yakma entalpi çıkış gazdan sağlanabilmekte ve enerji nötr işletim mümkün olmaktadır. Benzer avantaj düşük yoğunluğundan (%19,1 KM) dolayı stabilize KÇ'un yakılmasında elde edilememekte ve ilave enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak birleşik çamur sisteminde net metan üretimi 0,35-0,4 MW'tan ayrık sistemde 0,85-0,9 MW'a artırılırken yakılacak çamur miktarında %40 ve kurutucu, fırın, buhar kazanı ve ünitelerinin boyutlarında %60-70 azalma sağlanabilmektedir.

İÇ, seyreltik yapısı ve farklı içeriği ile düşük biyo-ayırabilirlik özelliği göstermektedir (Henze vd., 2008). Özellikle ana hat aktif çamur prosesinin biyolojik azot giderimi modifikasyonları yüksek çamur yaşı gerektirdiğinden oluşan fazla İÇ anaerobik ayrışmaya daha dirençli olmaktadır. Anaerobik çürütme performansını artırmak için yüksek sıcaklık ve kademelendirme çalışmasında Bolzonella vd. pilot ölçekte mezofilik (35°C), termofilik (55°C) ve termofilik kademelendirme (65 (HBS:2 gün) + 55°C (HBS:18 gün)) uygulamasını 2 yıl boyunca 2,2 kg UKM/m³.gün OYH ve 20 gün'lük HBS'de yürüterek KOİ gideriminde %35'den %45 ve 55'e artış sağlayarak ayrışabilirlik artırılmıştır (2012). Benzer şekilde UKM giderimi %36'dan 48 ve 55'e yükselmiştir. Metan dönüşümü 0,33 L CH₄/g UKM_{ekl}.gün'den 0,43 ve 0,49 L CH₄/g UKM_{ekl}.gün'e artmıştır. Kısa HBS ve yüksek yüklemeli ilk kademede yüksek çözülmüş KOİ ve UYA oluşumu ikinci kademede %89 oranında metana dönüşmüştür. Termofilik sıcaklık şartında artan hidroliz sonucu çıkış süzöntü suyunda amonyum azotu konsantrasyonu 2380(±290) mg N/L'den yükselerek 3000 mg N/L'nin üzerinde

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

gerçekleşmiştir. Bu oluşum özellikle UYA kaynaklı alkalinite ihtiyacını dengeleyerek ilk kademe yüksek termofilik çürütücüde pH'yı 6,3 seviyesinde tutmuştur. Oluşan ilave azotun giderimi tesis için ilave arıtım masrafı olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer yandan açığa çıkan alkali amonyak asitlenme eğiliminde olan organik bileşenlerin özellikle çoklu-çürütme uygulamalarında tamponlanmasını sağlamaktadır. Süzüntü suyunda fosfatın artmaması ve yapılan P, Ca ve Mg analizleri, reaktörde % 62 oranında hidroksiapatit ve struvit çökmesi ile birliğini göstermiştir.

BÇ ve İÇ'un ayrı sistemle stabilizasyonunda, ayrı yoğunlaştırma ve anaerobik çürütülmesinde uygulanan OYH'nin ve metan eldesinin artırılması mümkün olmaktadır (Winter ve Pierce, 2010; Erdirençelebi ve Bayhan, 2020).

Ayrı sistem çamur stabilizasyonunun sağladığı avantajların başında fazla İÇ'nin anaerobik çürütme öncesi fiziksel ve kimyasal ön işlemlerle ayrışabilirliğinin, enerji eldesinin ve susuzlaşma özelliğinin artırılması ile çamur hacminin azaltılmasının mümkün olması gelmektedir. Termal ve ultrasonik hidrolizlerin anaerobik çürütme ön işlemi olarak fazla İÇ'a uygulanması ticari olarak geliştirilmiş ve gerçek ölçekte uygulanan sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır (Carrere vd., 2010; Barber, 2016). Termal hidroliz tam ölçekli olarak 1995 yılından beri kullanılmaktadır. "Cambi THP" işlemi ilk olarak Norveç'te denemesinden sonra Danimarka, Yunanistan, İrlanda, Birleşik Krallık ve Çin gibi toplam 20 ülkede AAT'lerde uygulanmaktadır (Keep vd., 2000). Uygulanan bir diğer termal hidroliz işlemi BioThelys prosesidir ve Fransa, Danimarka ve Kore gibi ülkelerde uygulanmaktadır (Barber, 2016). Cambi ve BioThelys prosesleri özellikle yakma işleminden önce fazla İÇ'da optimum susuzlaşma ve çamur hacminde azalma sağlamak için tercih edilmektedir (Neyens ve Baeyens, 2003).

Ayrı sistemin sağladığı diğer bir avantaj ise İÇ'un farklı organik atıklarla çoklu çürütmesinde elde edilen performans artışlarıdır. Yüksek protein içeriği ile anaerobik parçalanma sürecinde asitlenme eğilimi gösteren yağ-gres ve karbonhidratlı atıklar (meyve-sebze) ile çoklu çürütme sürecinde C:N oranı artırılmakta ve sinerjik etki elde edilmektedir (Nghiem vd., 2017). Prosesin diğer bir faydalı çıktısı içerikçe zengin stabilize çamur olmaktadır.

4. Çıkış Suyu Azot Kalitesi İyileştirme Yöntemleri

Azot ve fosforun AAT çıkış sularında düşük seviyelerde kontrolünün sağlanması alıcı ortam su kalitesinin korunması için sıkı deşarj limitleri ile zorunlu hale getirilmiştir. Bu şartı sağlamak için günümüzde pek çok ülkede klasik aktif çamur sistemleri nütrient giderimi için A₂O sistemlerine dönüştürülmüştür. Fakat bu sistemlerin tasarımında göz ardı edilen önemli nokta ön çöktürme ünitesinde ayrılan partikül organik azotun anaerobik çürütücüde amonyum azotuna dönüştürülerek süzüntü suyu geri devri ile ana hatta tekrar beslenmesi olmuştur. Bu ilave azotun, aktif çamur ünitesine giren azotun %15-20'sini oluşturduğu ortaya konmuştur (Khin ve Annachhatre, 2004). Geri devredilen amonyum azotunun çıkış suyunda toplam azotun büyük çoğunluğunu oluşturması ve tasarım değerlerinin üzerinde havalandırma ihtiyacı göstermesi, ana hatta giderilmesine olanak sağlamamaktadır. Bu nedenle araştırma ve uygulamasına geçilen yan akım azot giderimi prosesleri başlangıcından itibaren nitrifikasyon-denitrifikasyon, sadece nitrifikasyon, kısa-yol nitritasyon-denitrifikasyon prosesinden sonra günümüzde kısmi nitritasyon-anaerobik amonyum oksidasyonuna (Anammox) evrilmiştir. Tümüyle ototrofik bakterilerce gerçekleşen kısmi nitritasyon+Anammox prosesi ile nitrifikasyon-denitrifikasyona kıyasla havalandırma ihtiyacı, çamur oluşumu ve sera gazı salınımında önemli tasarruflar sağlanmaktadır (Liu vd., 2018).

Kısa-yol azot giderimi proseslerinde uygun olanın seçilmesinde anaerobik çürütücülerde uygulanan HBS'nin önemli rolü

olmaktadır. Düşük HBS (<25 gün) ile işletilen çürütücü çıkış sularında bulunan yüksek konsantrasyonda ayrışabilir KOİ bu prosesin verimini düşürmektedir. Bu tip yan akım şartında ön denitrifikasyonlu nitritasyon-denitrifikasyon prosesi uygun olmaktadır ve ilave organik karbon ihtiyacından tasarruf sağlamaktadır (Erdirençelebi ve Koyuncu, 2018).

25 gün ve üzeri HBS'lerde işletilen anaerobik çamur çürütücülerinin çıkış süzüntü sularında ayrışabilir KOİ oldukça düşük seviyelerde gerçekleştiğinden kısmi nitritasyon-Anammox prosesi başarı ile uygulanabilmektedir. Bu prosesin başarısında birinci kademe kısmi nitritasyonda, sonraki Anammox basamağı için uygun giriş suyunun (KOİ<100 mg/L, NO₂/NH₄⁺:1,3 oranı, ihmal edilebilir AKM) eldesi önem arz etmektedir (Strous vd., 1997). Ön kısmi nitritasyon ve ikinci kademe anammox biyofilm reaktörleri şeklinde uygulanan yan akım azot giderimi sistemlerinde Anammox reaktörüne girişte uygun atıksu özelliklerinin sağlanması önemlidir ve işletim zorlukları içermektedir. Kısmi nitritasyon basamağında atıksu içeriğinde amonyum konsantrasyonunun değişim gösterdiği durumlarda gerekli stokiometrik oranı sağlamak için işletimde parametrik izleme önemlidir. pH, ORP ve ÇO'nin yanı sıra amonyum ve nitritin on-line problemlerle izlenmesi gereklidir. Yüksek sıcaklık, düşük ÇO, kesikli havalandırma ve düşük çamur yaşı uygulamaları ile nitrifikasyonun nitrite kalması (nitrit birikimi) elde edilebilmektedir. Kısmi nitritasyon için AKR'lerin kullanımını yüksek seviyede esneklik sağlamaktadır. pH ve ORP yüksek amonyumun oksitlenmesi izlenmesi ile döngü süreleri oluşturulabilir ve gerekli seviyede nitrit oluşumu elde edilirken nitrate dönüşüm engellenebilir. Amonyumun nitrite oksitlenmesinde önemli miktarda asitlenme gerçekleşmektedir. pH'nın 6.0 seviyesi eşik değerdir ve AOB'ler aktivitelerini durdururlar. Atıksuyun tamponlanmasını hassas bir denge gerektirir çünkü bikarbonat konsantrasyonu da ÇO gibi NOB'ler için kısıtlayıcı bir faktördür ve aşırısı durumunda nitritin nitrate oksitlenmesi gerçekleşir (Erdirençelebi ve Koyuncu, 2018). NOB'lerin aktivitelerinin kısıtlanmasında, sırasıyla yüksek ve düşük pH'da konsantrasyonları zararlı seviyelere ulaşan serbest amonyak ve serbest nitroz asit etkili olmaktadır.

Ana hat evsel atıksu arıtımında mevcut modifiye A₂O aktif çamur sistemlerinde yüksek havalandırma ve çamur oluşumu maliyetleri ile sera gazı salınımını azaltmak için hızlı aktif çamur prosesinin arkasına kısmi nitritasyon+Anammox uygulamaları da bir alternatif olarak geliştirilmiştir ve gerçek ölçekli uygulamalarda yer bulmuştur (Liu vd., 2018). Çoklu avantajlarına rağmen ana hatta Anammox uygulamaları önemli zorluklar içermektedir. Özellikle sıcaklık, havalandırma ihtiyacını etkileyen ve belirleyen önemli bir parametre olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda Anammox bakterilerinin aşılması, biyo-artırımı ve adaptasyonunu sağlayacak sistemlerin uygulanması önem arz etmektedir. Anammox biyokütlesinin yeterli tutunumunu sağlayacak biyofilm sistemleri (granül, entegre sabit biyofilm, hareketli biyofilm reaktörler) prosesin yüksek verimi için daha etkin alternatifleri oluşturmaktadır.

5. Sonuçlar

Aktif çamur sistemlerinde yan akımda anoksik veya anaerobik reaktör uygulaması çamur oluşumunda %20'ye varan oranlarda etkili olurken, yan akımın kısmi veya tam olarak işleme alınmasında önemli farklar oluşmamaktadır. Elde edilen çamur azaltımı %20 seviyesine ulaşırken Yobs'de ulaşılan düşük seviye her çalışmada değişmektedir. Kimyasal ve fiziksel yöntemlerle çamur azaltımı daha yüksek seviyede gerçekleşirken maliyet azaltıcı olarak ozonlama ve MV öne çıkmaktadır.

Evsel atıksuyun anaerobik arıtımında ön çöktürme yapılmış atıksuyun anaerobik arıtıma alınması ön şarttır ve yeterli HBS'nin

belirlenmesi önem arz etmektedir. Optimum HBS'nin altındaki değerlerde asitleme etkileri öne çıkmakta ve pH düşüşü gerçekleşmektedir. Yeterli HBS ve üzerindeki değerlerde protein ayrışması tamamlandığı için pH ve alkaliniteye yükselme gerçekleşmektedir. Bölgesel olarak evsel atıksu karakterindeki değişimler önemli seviyede gerçekleştiğinden uygun TUYA/ALK oranının elde edildiği HBS değerleri optimum olarak değerlendirilebilir. Düşük sıcaklıklarda da yeterli HBS uygulamasına olanak sağlayacak esneklikte sistemin inşa edilmesi durumunda %70 oranında KOİ'nin biyogaza dönüşümü mümkün olabilmektedir.

Aritma çamurlarının hacimsel ve miktarsal bakımlardan azaltımı ve biyogaz eldesinin artırılmasının da ön işlemlerin uygulanmasına olanak verecek ayrık sistem çamur çürütmesi mevcut birleşik sisteme göre önemli avantajlar içermektedir. Birincil ve ikincil çamur fraksiyonlarının yapı, biyolojik ayrışabilirlik ve susuzlaşma özelliklerindeki önemli farklılıklar hem çürütme performansı hem de nihai çamur kalitesini etkilemektedir.

Yan akım azot giderimi prosesleri ile ana hatta ilave yük getiren AÇSS'nin biyolojik yöntemlerle azot içeriğinden arındırılması ana hat aktif çamur sistemlerinde önemli tasarruflar getirmektedir. AB ülkelerinde 2023'e kadar 1900 AAT'de yan akım arıtımı amaçlanmaktadır. Anammox içerikli tam ototrofik biyolojik azot giderimi sisteminin sağladığı önemli tasarruflar nedeniyle, ana hat biyolojik arıtmada yer alması yönünde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Sistemin düşük sıcaklıkta performans düşüşünü telafi edecek ve Anammox biyokütlesinin tutunumunu sağlayacak biyofilim sistemlerle hızlı aktif çamur prosesi arkasında gerçek ölçekte uygulanması mümkün olacaktır.

6. Kaynaklar

Alvarez, J.A.; Armstrong, E; Gomez, M.; Soto, M. 2008. Anaerobic treatment of low strength municipal wastewater by a two-stage pilot plant under psychrophilic conditions. *Bioresour. Technol.*, 99,7051-7062.

An, K., and Chen, G. (2008). Chemical oxygen demand and the mechanism of excess sludge reduction in an oxic-settling-anaerobic activated sludge process. *J. Environ. Eng.* 134, 469-477.

Bodkhe, S. 2008. Development of an improved anaerobic filter for municipal wastewater treatment, *Bioresource Technology* 99, 222-226.

Bolzonella, D., Cavinato, C., Fatone, F., Pavan, P., Cecchi, F. 2012. *Waste Management* 32 1196-1201.

Barber, W.P.F. 2016. Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review. *Water Res.* 104, 53-71.

Bowen, E.J., Dolfing, J., Davenport, R.J., Read, F.L., Curtis, T.P., 2014. Low-temperature limitation of bioreactor sludge in anaerobic treatment of domestic wastewater. *Water Sci. Technol.* 69, 1004-1013.

Cakir, F. Y. Stenstrom, M. K. 2003. A Dynamic Model for Anaerobic Filter, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, A38(10), 2069-2076.

Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Ferrer, I., 2010. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. *J. Haz. Mat.* 183(1-3), 1-15.

Chernicharo, C.A.L., van Lier, J.B., Noyola, A., Bressani Ribeiro, T., 2015. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* 14 (4), 649-679.

Chudoba, P., Chudoba, J., Capdeville, B., 1992. The aspect of energetic uncoupling of microbial growth in the activated sludge process: OSA system. *Water Sci. Technol.* 26 (9-11), 2477-2480.

Coma, M. Rovira, S. Canals, J. Colprim, J., 2013. Minimization of sludge production by a side-stream reactor under anoxic conditions in a pilot plant, *Bioresource Technology* 129, 229-235.

E.P.A. 2008. Municipal Solid Waste in The United States: 2007 Facts and Figures. EPA530-R-08-01, November 2008, <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/pdf/msw07-rpt.pdf>.

Erdirencelebi, D., Kucukhemek, M., 2015. Diagnosis of the anaerobic reject water effects on WWTP operational characteristics as a precursor of bulking and foaming, *Water Sci. Technol.* 71 (4) 572-579.

Erdirencelebi, D., Koyuncu, S. 2018. Optimization of Biological Nitrogen Removal over Nitrite in the Presence of Lipid Matter by Regulation of Operational Modes. *Journal of Environmental Engineering*, 144(2): 04017099, 1-9.

Erdirencelebi, D., Bayhan, C. 2020 Feasibility and potential of separate anaerobic digestion of municipal sewage sludge fractions, *Water SA*, 46(1), 123-130.

Foladori, P., Andreottola, G., Ziglio, G., 2010a. Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants. IWA Publishing, London.

P. Foladori, S. Tamburini, L. Bruni, 2010b. Bacteria permeabilisation and disruption caused by sludge reduction technologies evaluated by flow cytometry. *Water Res.* 44, 4888-4899.

Foladori, P., Velho, V.F., Costa, R.H.R., Bruni, L., Quaranta, A., Andreottola, G., 2015. Concerning the role of cell lysis-cryptic growth in anaerobic side-stream reactors: the single-cell analysis of viable, dead and lysed bacteria. *Water Res.* 74, 132-142.

Halalshah, M.M., Abu Rumman, Z.M., Field, J.A. 2010 Anaerobic wastewater treatment of concentrated sewage using a two-stage upflow anaerobic sludge blanket-anaerobic filter system, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 45, 383-388.

Halalshah, M., Sawajneh, Z., Zu'bi, M., Zeeman, G., Lier, J., Fayyad, M., Lettinga, G. 2005. Treatment of strong domestic sewage in a 96 m³ UASB reactor operated at ambient temperatures: two-stage versus single-stage reactor, *Bioresource Technology*, 96, 577-585.

- Heidrich, E.S., Curtis, T.P., Dolfing, J., 2011. Determination of the Internal Chemical Energy of Wastewater. *Environ. Sci. Technol.* 45 (2), 827–832.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, Diğ., 2008. *Biological Wastewater Treatment Principles: Modelling and Design*, IWA Publishing, London.
- Kamiya, T., Hirotsuji, J., 1998. New combined system of biological process and intermittent ozonation for advanced wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* 38, 145-153.
- Keep, U., Machenbach, I., Weisz, N., Solheim, O.E., 2000, Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis – 3 years of experience with full scale plants, *Water Science and Technology*, 42 (9), 89-96.
- Khin, T., A.P. Annachatre, Novel Microbial Nitrogen Removal Processes. *Biotechnology Advances*, 2004. 22: p. 519-532.
- Kopp, J. and Dichtl, N. 2001. Influence of the free water content on the dewaterability of sewage sludges. *Wat. Sci. Tech.*, 44(10), 177–183.
- Lettinga, G., de Man, A., van der Last, A.R.M., Wiegant, W., van Knippenberg, K., Frijns, J. and van Buuren, J.C.L. 1993. Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater. *Water Sci. Technol.* 27, 67-73.
- Liu, W. Yang, D. Shen, Y. Wang, J., 2018. Two-stage partial nitrification-anammox process for high-rate mainstream deammonification, *Appl. Microbiol Biotechnol.* 102, 8079–8091.
- Longo, S., d'Antoni, B.M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J. M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Hospido, A., 2016. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Appl. Energy* 179, 1251–1268.
- Jiang, L.-M., Z. Zhou, C. Cheng, J. Li, C. Huang, T. Niu, 2018. Sludge reduction by a micro-aerobic hydrolysis process: A full-scale application and sludge reduction mechanisms, *Bioresource Technology* 268, 684–691.
- Mahmoud, N. 2008. High strength sewage treatment in a UASB reactor and an integrated UASB-digester system. *Bioresour. Technol.*, 99, 7531–7538
- Mininni, G., Braguglia C.M., Ramadori, R. and Tomei, M.C. 2004. An innovative sludge management system based on separation of primary and secondary sludge treatment. *Water Science and Technology* 50(9), 145-153.
- Neyens, E., Baeyens, J., 2003, A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability, *Journal of Hazardous Materials*, B98, 51-67.
- Nghiem, L.Diğ., Koch, K., Bolzonella, Diğ., Drewes, J. E. 2017. Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: bottlenecks and possibilities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 354-362.
- Niu, T., Zhou, Z., Shen, X., Qiao, W., Jiang, L.-M., Pan, W., Zhou, J., 2016. Effects of dissolved oxygen on performance and microbial community structure in a micro-aerobic hydrolysis sludge in situ reduction process. *Water Res.* 90, 369–377.
- Novak, J.T., Chon, D.H., Curtis, B., Doyle, M., 2007. Biological solids reduction using Cannibal process. *Water Environ. Res.* 79 (12), 2380e2386.
- Sakai, Y., Fukase, T., Yasui, H., Shibata, M., 1997. An activated sludge process without excess sludge production. *Water Science Technology* 36, 163–170.
- Sato, N.; Okubo, T.; Onodera, T.; Agrawal, L.K.; Ohashi, A.; Harada, H. Economic evaluation of sewage treatment processes in India. *J. Environ. Mgmt.* 2007, 48, 447–460
- Semblante, G.U., Hai, F. I., Bustamante, H., Price, W. E., Nghiem, L. D. 2016. Effects of sludge retention time on oxic-settling-anoxic process performance: Biosolids reduction and dewatering properties, *Bioresource Technology*, 218, 1187-1194.
- Singh, K. S., Viraraghavan, T. 2002. Effect of temperature on bio-kinetic coefficients in UASB treatment of municipal wastewater, *Water, Air, and Soil Pollution*, 136: 243–254.
- Speece R.E. 1996. *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Archae Press, TN, USA, p.297.
- Strous, M., et al., 1997. Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process in different reactor configurations. *Water Research*, 31, 1955–1962.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, Mc Graw Hill Press, New York, 2003.
- Taboada-Santos, A. Lema, J. M. Carballa, M. 2019. Energetic and economic assessment of sludge thermal hydrolysis in novel wastewater treatment plant configurations, *Waste Management* 92, 30–38.
- Tomei, M. C., Bertanza, G., Canato, M., Heimersson, S., Laera, G., Svanstrom M. 2016. Techno-economic and environmental assessment of upgrading alternatives for sludge stabilization in municipal wastewater treatment plants, *Journal of Cleaner Production* 112, 3106-3115.
- Trego, A. C., Conall Holohan, B., Keating, C., Graham, A., O'Connor, S., Gerardo, M., Hughes, Diğ., Ijaz, U. Z., O'Flaherty, V. 2021. First proof of concept for full-scale, direct, low-temperature anaerobic treatment of municipal wastewater, *Bioresource Technology*, 341, 125786.
- Troiani, C., Eusebi, A.L., Battistoni, P. 2011. Excess sludge reduction by biological way: From experimental experience to a real full scale application. *Bioresource Technology*, 102, 10352–10358.
- Velho, V.F., Foladori P., Andreottola, G., Costa, R.H.R. 2016. Anaerobic side-stream reactor for excess sludge reduction: 5-year management of a full-scale plant, *Journal of Environmental Management*, 177, 223-230.
- Viraraghavan, T., Varadarajan, R. 1996. Low-Temperature Kinetics Of Anaerobic-Filter Wastewater Treatment, *Bioresource Technology* 57, 165-171.
- Von Sperling, M., Oliveira, C. 2009. Comparative performance evaluation of full-scale anaerobic and aerobic wastewater treatment processes in Brazil. *Water Sci. Technol.*, 59, 15–23.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Wei, Y., Van Houten, R. T., Borger, A. R., Eikelboom, D. H., Fan, Y. 2003. Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment, *Water Research* 37, 4453–4467.

Winter, P., Pearce, P. 2010. Parallel digestion of secondary and primary sludge. In: Horan, N.J. (Ed.), *Proceedings of the 15th European Biosolids and Organic Resources Conference*, November, Aqua Enviro, Leeds.

Yasui, H., Shibata, M., 1994. An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process. *Water Science and Technology* 30 (9), 11-20.

Yasui, H., Nakamura, K., Sakuma, S., Iwasaki, M., Sakai, Y., 1996. A full-scale operation of a novel activated sludge process without excess sludge production. *Water Science and Technology* 34(3-4), 395-404.

Yu, H., Anderson, G.K., 1996. Performance of a combined anaerobic reactor for municipal wastewater treatment at ambient temperature, *Resources, Conservation and Recycling*, 17, 259-271. 85(12), 1713–1719.