

Ayrık evsel atıksuyun membran biyoreaktörde ayrışma mekanizmaları

Selda MURAT HOCAOĞLU*, Derin ORHON

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Environmental Biotechnology Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, ayrık evsel atıksuların membran biyoreaktörde (MBR) arıtılma mekanizmaları araştırılmıştır. Çalışma, siyah ve gri atıksuların beslendiği pilot ölçekli iki ayrı batık MBR kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Biyolojik arıtmanın kirlenici boyutu üstüne etkisinin incelenmesi ve membranların verimli süzme boyut aralığının belirlenmesi amacıyla, atıksu ve aktif çamur örnekleri üstünde, KOİ için boyut dağılım analizi gerçekleştirilmiştir. Aktif çamur örnekleri üstünde gerçekleştirilen kirlenici boyut dağılım analizi sonuçları ile membran süzütüsünün konsantrasyonu karşılaştırılarak membranın verimli süzme boyutu tahmin edilmiştir. Buna göre, bu çalışmada kullanılan membranlar mikrofiltrasyon sınıfında ve 400 nm gözenek açıklığına sahip olmasına karşın, MBR içinde membran yüzeyinde biyofilm oluşması ve ikinci bir bariyer görevi görmesi sebebiyle verimli süzme boyutunun yaklaşık 8 nm değerine düştüğü ve ultrafiltrasyon sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla membranın sadece biyokütle ile su fazının ayrılmasını sağlamakla kalmadığı, büyük molekül ağırlığına sahip ayrıştırılamayan çözünmüş organik maddelerin de reaktör içinde tutulmasını sağladığı belirlenmiştir. Bu noktadan hareketle, çözünmüş kalıcı KOİ'nin MBR'larda akibetinin araştırılması için atıksu, MBR içinden alınan aktif çamur numunesi süzütüsü ve membran süzütüsü arasında kararlı denge için kütle dengesi eşitliği kurulmuştur. Kütle dengesi eşitlikleri sonucunda, konvansiyonel sistemde ayrıştırılamayan bir kısım çözünmüş kalıcı KOİ'nin MBR'larda ayrıştığı belirlenmiştir. Her iki MBR'da da çözünmüş kalıcı KOİ'nin ayrışma verimi, reaktör içinde tutulan fraksiyon değerlendirildiğinde %95, çözünmüş kalıcı KOİ'nin tamamı dikkate alındığında ise %50 civarında bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Membran biyoreaktör, gri su, siyah su, çözünmüş kalıcı organik madde.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Selda MURAT HOCAOĞLU. selda.murat@mam.gov.tr ; Tel: (262) 677 29 41.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Environmental Biotechnology Programı'nda tamamlanmış olan "Mechanisms and modelling of segregated household wastewater treatment by membrane bioreactor" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 11.05.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 10.06.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Murat Hocaoglu, S.M., Orhon, D., (2011) 'Ayrık evsel atıksuyun membran biyoreaktörde ayrışma mekanizmaları', İTÜ Dergisi/E Su Kirlenmesi Kontrolü, 21: 1, 35-44" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Mechanisms of segregated household wastewater treatment by Membrane Bioreactor

Extended abstract

Worldwide, one in five persons does not have access to safe drinking water, whereas half of the world's population does not have access to sufficient sanitation (WHO, 2000). In addition, stress on water resources increases because of pollution, ineffective water use, increasing water demand and droughts.

In the current conventional wastewater management, end of pipe, approach all types of wastewater are mixed, transported in a sewer system, and treated in a wastewater treatment plant. However, the sewer systems usually do not end up with an appropriate treatment plant. As a result, uncontrolled wastewater discharges cause serious problems in the receiving environment. Recently, "decentralised sanitation and re-use" (DESAR), which is a logical on-site source separation and reuse based approach, was proposed as an alternative to current "end of pipe" approach. On household level, two main sources of wastewater are recognized which are grey and black water.

In this framework, treatment by MBR may be a promising alternative for small scale systems with the high hygienic standard effluent quality, reduced reactor volume, smaller footprint and operation easiness due to reduced net sludge production at high sludge ages. Two pilot-scales submerged MBRs were constructed for grey and black water treatment equipped with plate and frame type membrane modules.

In the first part of this study, detailed characteristics of grey and black water in terms of aerobic biodegradability related kinetic and stoichiometric model parameters, which are missing in the literature, were determined based on batch experimental study and respirometric tests. Assessment of biodegradable COD fractions and kinetic and stoichiometric constants were done by model fitting of the OUR data (Insel et al., 2003). The OUR data was analyzed according to endogenous decay modified ASMI (Orhon and Artan, 1994). For the case of black water as the large fraction likely to cover a wide range of compounds with different biodegradation pattern, dual hydrolysis rate is assigned. For the case of grey water, a single hydrolysis rate is sufficient to explain the hydrolysis. The results of aerobic biodegradability characterization showed that the kinetic and stoichiometric coefficients of grey and black water were

in accordance with the previously reported values for domestic wastewater. Compared with black water, hydrolysis rate of grey water was found to be lower, which is attributed to the slowly biodegradable detergents, soaps and cleaning agents heavily found in grey water. The combined wastewater followed the kinetics of black water.

Wastewater characterization usually includes, a single filtration size (450 nm), which conventionally differentiates soluble and particulate COD components. In this study, size information of pollutants has been explored in a much wider range between 2nm to 11 μm for a better understanding of feed water characteristics. Furthermore, size distribution study was also performed on the reactor bulk liquids of the MBRs mainly for better understanding of membrane separation and the fate of soluble non-biodegradable organics in MBRs.

It is found that due to biofilm formation, serving as an additional separation barrier on the surface of the membranes, the effective filtration size is in the range of ultrafiltration, around 5-14 nm, although the membrane itself is in the size range of microfiltration with the 400 nm pore size.

In conventional activated sludge systems, HRT controls the retention time of soluble COD, which is the filtrate of 450 nm filter. On the other hand, in MBRs this statement is not true anymore. Membrane separation decides the residence time of pollutants depending on the effective filtration range of the membrane and size of pollutants.

As a result of size distribution analysis of bulk liquid, it is found that the retained soluble residual organics, which are accepted as non-biodegradable in conventional activated sludge systems, are slowly biodegraded, around 50% and 95% for overall soluble residual organics and the retained fraction in the reactor bulk liquid respectively. Similar results were obtained for both of the MBRs.

According to the findings of this study, it can be concluded that the difference between MBRs and conventional activated sludge systems is not just a physical separation by a membrane.

Furthermore, better understanding of fate of soluble organics in MBRs will be a step for better understanding of membrane fouling mechanisms.

Keywords: Membran Bioreactors, grey water, black water, DESAR, soluble residual organics.

Giriş

Dünya üzerindeki her beş insandan birisi sağlıklı içme suyuna, dünya nüfusunun yarısı ise sağlıklı sanitasyon sistemine sahip değildir. Bunun yanında, kirlenme, verimsiz kullanım, artan su ihtiyacı ve kuraklıklar kısıtlı su kaynakları üstündeki baskıları giderek arttırmaktadır (WHO, UNICEF, 2000).

Mevcut konvansiyonel atıksu yönetimi olan “boru ucu sonu” yaklaşımında tüm atıksu kaynakları, arıtma tesisi ile sonlanan bir kanalizasyon hattında toplanmakta ve arıtılan su çoğunlukla alıcı su ortamına deşarj edilmektedir. Bu yaklaşımda endüstriyel deşarjlarla gelen ağır metaller, arıtılmış suda bulunan besi maddelerinin yeniden kullanımını kısıtlamaktadır (Werner vd., 2003; Otterpohl, 2003). Bunun yanında, bina içinde mevcut su yönetimi değerlendirildiğinde, içme suyu kalitesine sahip suların tuvalet atıklarını taşımak amacıyla sifon suyu olarak kullanıldığı görülmektedir. Kısıtlı su kaynaklarının sürdürülebilirliği dikkate alındığında, açıktır ki mevcut su ve atıksu yönetimi alışkanlıklarının ihtiyaçlar ve kısıtlamalar doğrultusunda yeniden düzenlenmesine ihtiyaç vardır. Bu çerçevede son yıllarda, yerinde kaynak ayırımı ve yeniden kullanım esasına dayanan ve ekolojik evsel atıksu yönetimi presibini benimseyen DESAR (merkezi olmayan evsel atıksu yönetimi) yaklaşımı gündeme gelmiştir (Wilderer, 2001). Atıksuların geri kazanımı, aynı zamanda iklim değişiminin neden olacağı su sıkıntısı sorununa karşı bir çözüm alternatifi olarak da görülmektedir. DESAR yaklaşımına göre evsel atıksular, kirlilik ve yeniden kullanılabilirlik potansiyellerine göre farklı akımlar olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda Otterpohl ve diğerleri (1997, 1999) evsel atıksuları gri ve siyah olmak üzere iki akım olarak değerlendirmektedir. Gri su genellikle duş, banyo, lavobo, çamaşır ve bulaşık sularını içermekte (Otterpohl vd., 1999; Nolde, 1999, Jefferson vd., 1999; Eriksson vd., 2002; Ottoson ve Stenström, 2003), geri kalan tuvalet suları ise siyah su olarak tanımlanmaktadır.

Gri suların arıtımı için fiziksel proseslerden, biyolojik sistemlere kadar geniş bir yelpazede ça-

lışmalar yapılmıştır. Ancak yapılan çalışmalar biyolojik arıtma dışında hiç bir arıtma yönteminin yeniden kullanım için tatmin edici kalitede su sağlayamadığını göstermiştir (Fangyue vd., 2009). Siyah suyun arıtımı konusunda yürütülen çalışmalar, anaerobik sistemler üstüne yoğunlaşmıştır. Çalışma sonuçları anaerobik arıtmanın tek başına yeterli olmadığını göstermiştir (Roelvelde vd., 2006; Loustarinen vd., 2007; Loustarinen ve Rintala, 2005; Loustarinen vd., 2006). Bu çerçevede, membran biyoreaktörler, hem gri suların hem de siyah suların arıtımı için önemli bir alternatif olabilirler. Gri ve siyah suların arıtımı için biyolojik arıtma gerekli görülmesine karşın, biyolojik arıtmanın tasarımı ve optimizasyonu için gereken biyolojik ayrışabilirlik özelliği, KOİ fraksiyonları, kinetik ve stokiyometrik parametreler ile ilgili literatürde kısıtlı sayıda çalışma vardır (Dixon vd., 1999b).

Membran Biyoreaktörler, aktif çamur sistemi ile membran teknolojisinin kombinasyonudur (Judd, 2006). MBR’ların en büyük avantajlarından birisi özellikle hijyenik parametreler açısından yüksek kalitede arıtılmış su elde edilebilmesidir. Bunun yanında, MBR sistemlerinde, biyokütle ayırımının çökeltme veriminden bağımsız olması sayesinde arıtılmış su kalitesinde süreklilik sağlandığı görülmektedir. Bu nedenle, özellikle arıtılmış suların yeniden kullanımı değerlendirildiğinde MBR sistemleri ilgi çekmektedir. MBR’ların hacim ihtiyacının konvansiyonel aktif çamur sistemlerine göre daha az olması, küçük hacimlerde yüksek çamur yaşlarında işletilebilmeleri ve bu sayede daha az biyolojik çamur oluşturulması, özellikle küçük ölçekli sistemler için avantaj olarak görülmektedir. MBR’lar bu yönleri dolayısıyla DESAR yaklaşımı için uygun bir arıtım yöntemi olabilirler.

MBR ve konvansiyonel sistemleri karşılaştırdığımızda temel farklılıklar şu şekilde özetlenebilir; i) yüksek çamur yaşı ve yüksek biyokütle konsantrasyonu ii) membran ayırımı. Bu işletme koşulları düşük oksijen transfer verimine (Günder, 2001), substrat ve oksijenin flok içine difüzyonun limitli olmasına ve bir kısım çözülmüş (<450 nm) ve kolloidal ayrışamayan organik maddenin reaktör içinde daha uzun süreler

tutulmasına sebep olmaktadır. Bu farklılıklar dikkate alındığında MBR'larda kalıcı organiklerin ayrışma mekanizmalarındaki farkların araştırılmasına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada kalıcı KOİ'nin MBR'daki akibeti incelenmiştir.

Materyal ve yöntem

Evsel atıksu akımlarının ayrılması

Bu çalışmada kullanılan siyah ve gri su TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi kampüsünde yer alan 2 lojman binasından toplam 28 daireden 2 ayrı hat kullanılarak toplanmıştır. 28 dairenin 17'si lojman, 11'i ise misafirhanedir. Siyah ve gri atıksular 6 ve 3 mm ızgaralardan geçirilerek ayrı rögarlarda toplanmış, çökelmelere engel olmak için pompa ile karışım sağlanmıştır.

Analitik yöntemler

KOİ fraksiyonlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. KOİ fraksiyonlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemler

Parametre	Yöntem
KOİ Fraksiyonları	
Toplam KOİ, C_T	Analiz
Çözünmüş KOİ, S_T	Süzüntünün analizi (450nm)
Partiküler KOİ, X_T	Kütle dengesi (S_T-X_T)
Biyolojik ayrışabilir KOİ, C_S	Deneysel-kesikli reaktör, kütle dengesi (C_T-C_I),
Kolay ayrışabilen KOİ, (S_S)	Respirometre
Hızlı hidroliz olabilen KOİ, (S_H)	Respirometre
Yavaş hidroliz olabilen KOİ, X_S	Respirometre, kütle dengesi
Inert KOİ, C_I	Deneysel, kütle dengesi
Çözünmüş inert KOİ, S_I	Deneysel-kesikli reaktörler
Partiküler inert KOİ, X_I	Deneysel-kesikli reaktörler

Respirometrik testler ManothermRA-1000 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma süresince oksijenin kısıtlı olmaması için havalandırma sürekli olarak sağlanmıştır. Oksijen Tüketim Hızı (OTH) verisi kaydedilmiştir. Nitrifikasyona engel olmak için reaktöre nitrifikasyon inhibitörü (Formula 2533TM, Hach Company) eklenmiştir. Aşırı çamuru MBR'dan alınmıştır. Respirometrik testler, temsil edici olması

açısından MBR'lardaki F/M oranına yakın şartlarda gerçekleştirilmiştir. OTH verisi, içsel so-lunum teorisine göre modifiye edilmiş aktif çamur modeli ASM1 (Orhon ve Artan, 1994) kullanılarak analiz edilmiş modelleme çalışmasında AQUASIM simülasyon program kullanılmıştır (Reichert vd., 1998). Kinetik ve stokiometrik model parametreleri Insel ve diğerleri (2003)'e göre belirlenmiştir. Siyah suyun önemli miktarda partiküler organik madde içermesi ve bu organik maddelerin farklı ayrışma hızlarını temsil etmesi açısından iki aşamalı hidroliz seçilmiştir.

Inert KOİ fraksiyonları Orhon ve diğerleri (1994) yöntemine göre belirlenmiştir. Her bir atıksu için iki adet kesikli reaktör kurulmuş ve reaktörlerden birisi ham atıksu, diğeri ise süzölmüş atıksu ile beslenmiştir (<450 nm). Reaktörlerde biyokütle konsantrasyonu 40 mgUAKM/L olacak şekilde ayarlanmıştır. Tüm organik maddenin ve biyokütlenin ayrışması için reaktörler yaklaşık 45 gün süreyle havalandırılmış ve bu süre boyunca toplam ve süzöntü KOİ değerleri izlenmiştir.

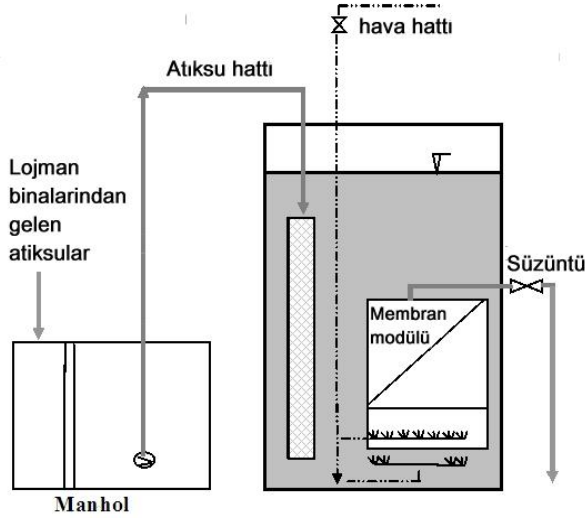
Tüm konvansiyonel parametrelerin analizleri Standart Yöntemler'e (APHA, 2005) göre yapılmıştır.

Membran biyoreaktör düzeneği

Bu çalışma, pilot ölçekli iki adet MBR kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Reaktörlerin verimli hacmi 630 L'dir. Pilot reaktörler batık düz tabaka membran modülü (KUBOTA) içermektedir. Membran malzemesi klorlu polietilen, nominal membran gözenek çapı 400 nm, her bir reaktör için toplam membran alanı 5 m²'dir. Pilot MBR'lar Ardışık Kesikli Reaktörlerdekine benzer şekilde kesikli çalıştırılmış, besleme ve reaksiyon düzeni PLC ile kontrol edilmiştir. Sistemin şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.

Molekül ağırlığı dağılımı seri filtrasyon ve ultrafiltrasyon çalışması

Atıksu ve MBR çamurlarından alınan numunelerde ardışık filtrasyon ve ultrafiltrasyon yapılmıştır. Ultrafiltrasyon için Amicon tam karışım hücresi (Model 8400; volume of 400 mL, Beverly MA, USA) kullanılmıştır. Süzme pozitif basınç altında azot gazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Membran biyoreaktör düzeneğinin şematik gösterimi

Atıksuda boyut dağılımı 2 nm ile 11 µm aralığında gerçekleştirilmiş, reaktörden alınan çamur numunesinde ise süzme 450 nm filtre ile başlamıştır. 450 nm filtre hem biyokütle ayrımını (çözünmüş ve partiküler), işaret etmesi hem de reaktörde bulunan membran gözenek çapına (400 nm) yakın olması nedeniyle önemlidir. Çalışmada nominal moleküler kütle ayırma sınırı (MWCO) 100, 30, 10, 5, 3 ve 1 kDa olan ultrafiltrasyon membranları (Millipore UF filtre, Ultracel PL serisi) kullanılmıştır.

Bulgular ve tartışma

Konvansiyonel atıksu karakterizasyonu

Konvansiyonel parametreler için gri ve siyah su karakterizasyonu, standart sapma değerleri ve

karşılaştırma için literatürde yer alan değerlerle birlikte Tablo 2’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her iki atıksu karakterinin de literatürde yer alan tipik değer aralığında yer aldığı görülmektedir. Gri su karışık evsel atıksuyun hacim olarak önemli bir kısmına karşılık gelmesine karşın, kirlilik olarak seyreltik özellik göstermektedir. Özellikle gri suyun azot konsantrasyonu, siyah suyla karşılaştırıldığında çok düşüktür. Siyah suyun konsantrasyonu sifon hacmine ve kullanılan su miktarına bağlı olarak önemli oranlarda değişiklik göstermektedir. (Palmquist vd., 2005).

KOİ fraksiyonlarının belirlenmesi

Respometre çalışması ile elde edilen Oksijen Tüketim Hızı (OTH) profilleri ve model kalibrasyonu Şekil 2’de gösterilmiştir. Siyah suyun organik madde içeriğinin önemli bir kısmı partikülerdir. Geniş bir yelpazede seyreden organik maddenin farklı ayrışma hızlarını karakterize edebilmesi için, siyah suyun OTH profilinin modellenmesinde iki aşamalı hidroliz uygulanmıştır. Gri suda ise, deneysel veri ve modelin uyum sağlaması için tek aşamalı hidroliz yeterli olmuştur.

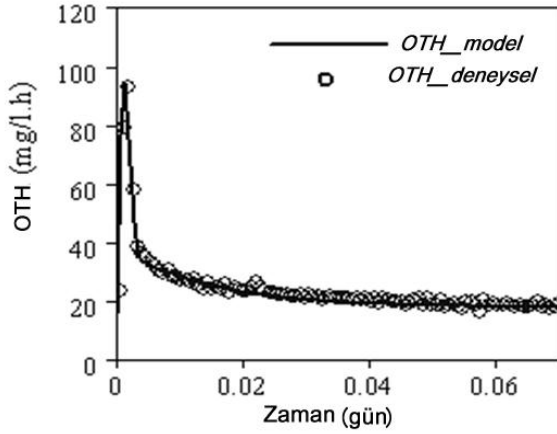
İnert KOİ fraksiyonları, kesikli reaktörlerde toplam ve süzüntü KOİ ile ilave edilen biyokütle- nin tamamen ayrışmasına kadar izlenmesi ve Orhon ve diğerleri (1994)’de verilen yöntem- e göre hesaplanması sonucunda bulunmuştur.

KOİ fraksiyonları yüzde olarak Tablo 3’te, model parametreleri ise Tablo 4’te verilmiştir.

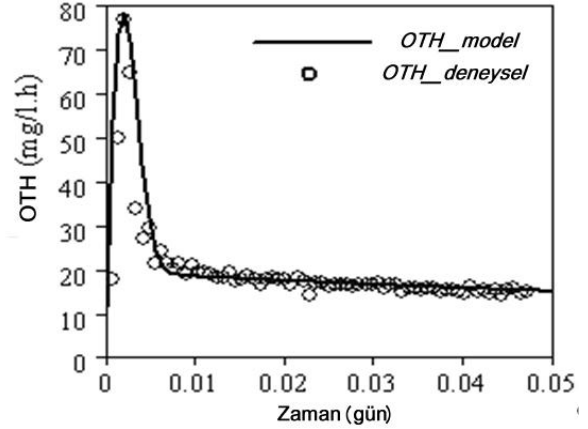
Tablo 2. Gri ve siyah su karakterizasyonu

Parametre	Siyah su	Gri su	Palmquist vd., 2005	Henze ve Ledin, 2001	
	ortalama/±sd	ortalama/±sd		Siyah su	Gri su
	Bu çalışma				
pH	8.0 / 0.3	7.2/0.3	8.87-9.08	-	-
T.KOİ, mg/L	1040 /390	310/80	806-3138	900-1500	200-700
BOİ ₅ , mg/L	340/150	120/30	410-1400*	300-600	100-400
TKN, mg/L	180 /30	7/3.5	130-180**	100-300**	8-30**
NH ₄ ⁺ -N, mg/L	150/15	1.6/1.4	-	-	-
TP, mg/L	25/9	8/3	21-58	20-40	2-7
AKM, mg/L	550/320	60/30	920-4320	-	-

*BOİ₇, **TN, sd: standart sapma



a) ham siyah su



b) ham gri su

Şekil 2. Siyah ve gri su için OTH eğrileri ve model sonucu

Tablo 3. Siyah ve gri su KOİ fraksiyonları, %

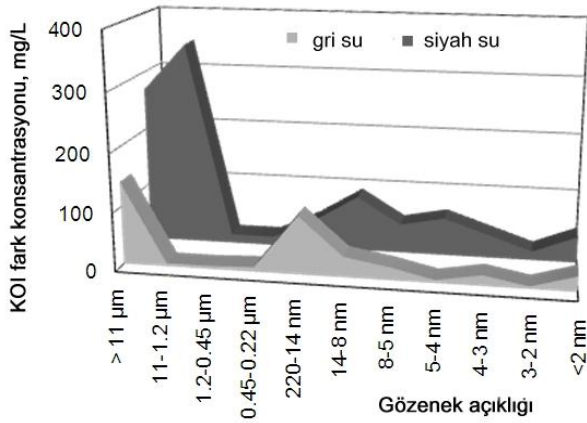
	Atıksu KOİ fraksiyonları (%)						
	C_S/C_T	S_T/C_T	S_I/C_T	S_S/C_T	X_{S1}/C_T	X_{S2}/C_T	X_I/C_T
Siyah su	95.1	31.6	3.7	14.7	29.7	50.7	1.1
Gri su	93.5	76.4	5.0	29.3	-	64.2	1.5
Evsel atıksu (Sarıoğlu vd., 2009)	86.0*	32.9	3.9	36.9	-	49	10

*TKOİ: 679 mg/L

Tablo 4. Siyah ve gri su model parametreleri

Model Parametreleri	Siyah su	Gri su	Orhon ve Okutman, 2003	Henze vd., 2000
	Bu çalışma		Evsel atıksu	Evsel atıksu, ASM1
Heterotrofik biyokütlenin maksimum çoğalma hızı, μ_{Hmaks} , 1/gün	4	3.8	3.5	6.0
Heterotrofik biyokütle için substrat yarı doyumluk sabiti, K_S , mgKOİ/L	4	7	6	20
Hızlı ayrışabilir substratın maksimum spesifik hidroliz hızı, k_h , 1/gün	2.8	1.1	3.8	3
Hızlı ayrışabilir substratın hidrolizi için yarı doyumluk sabiti, K_X , gKOİ/gKOİ	0.03	0.03	0.2	0.03
Yavaş ayrışabilir substratın maksimum spesifik hidroliz hızı, k_{hx} , 1/gün	1.1	-	1.9	-
Yavaş ayrışabilir substratın hidrolizi için yarı doyumluk sabiti, K_{XX} , gKOİ/gKOİ	0.1	-	0.18	-
Heterotrofik biyokütle için ölüm hızı, b_H , 1/gün	0.18	0.18	0.2	0.62
Heterotrofik dönüşüm oranı, Y_H , gKOİ/gKOİ	0.67	0.67	0.67	0.67

Model kalibrasyonu neticesinde elde edilen kinetik ve stokiometrik katsayılar ASM1’de verilen değerlerle uyum göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan modelin içsel solunum teorisi esasına dayanması sebebiyle, içsel solunum hızı ASM1’e göre farklı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, karışık evsel atıksularla daha önceki yıllarda yapılmış Orhon ve Okutman (2003) çalışması sonuçları ile de uyumludur. Genel olarak çalışılan gri ve siyah suyun biyolojik ayrışabilirlik özelliklerinin karışık evsel atıksuyla benzerlik gösterdiği ve akım ayrımının proses kinetiği açısından önemli bir fark oluşturmadığı belirlenmiştir. Akımlar arasındaki farkın siyah suda partiküler organiklerin, gri suda ise çözülmüş organiklerin toplanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanında gri suda nispeten düşük hidroliz hızı belirlenmiştir. Bu sonuç yavaş ayrışan deterjan ve sabunların bulunması ile açıklanabilir. Her iki atıksu için de heterotrofik biyokütlenin maksimum çoğalma hızı, ASM1’le karşılaştırıldığında biraz düşük bulunmuştur. Bu sonucun, ayrık atıksuların toplandığı lojman binasının yaklaşık üçte birinin misafirhane olması ve yoğun temizlik maddesi kullanımı ile ilişkili olduğu tahmin edilmektedir.



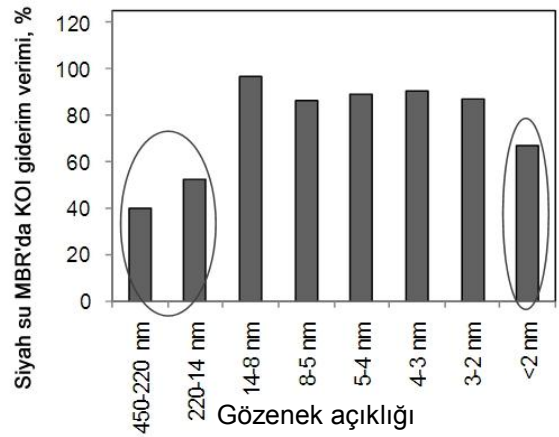
Şekil 3. Siyah ve gri su KOİ profilinin kirlenici boyutuna göre dağılımı

Boyut dağılımı çalışması sonuçları

Membran biyoreaktörlerde membrandan, fiziksel olarak ancak membranın verimli süzme aralığından daha küçük boyuttaki kirleniciler geçebilmekte, daha büyük boyutta kirleniciler ise reaktörde tutulmaktadır. Bu sebeple atıksuyun fiziksel karakterizasyonu ve organik kirlenicilerin

boyut dağılımı önem kazanmaktadır. Çalışma kapsamında, biyolojik arıtmanın atıksudaki organik kirlenicilerin boyut dağılımına etkisinin belirlenebilmesi, MBR’da organik kirlenicilerin tutulma özelliklerinin incelenmesi ve ayrışma mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için organik kirlenicilerin boyut dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Filtreden geçen kısımda ölçülen değerler o filtre boyutundan küçük tüm KOİ değerlerini içermektedir. İki filtre arasındaki değerin bulunabilmesi için filtre süzüntü sularında ölçülen değerlerin farkı alınmıştır. Gri ve siyah suyun KOİ dağılımında göze çarpan en belirgin fark partiküler KOİ fraksiyonunda görülmektedir. Siyah suda 1.2 µm ve 11 µm aralığındaki partiküler KOİ toplamın %35’ni oluştururken, bu değer gri su için sadece % 1.4’tür. Siyah su toplamda % 63 partiküler (>450 nm) ve % 5 ise 2 nm’den küçük KOİ içermektedir. Gri suda ise partiküler fraksiyon %41 civarındadır. Gri suda 14-220 nm arasında %27 ile belirgin bir fraksiyon daha görülmektedir. Şekil 3, siyah ve gri suda KOİ parametresi için boyut dağılımını göstermektedir.

Siyah su için kirlenici boyut dağılımına bağlı olarak giderim verimi Şekil 4’te yüzde olarak verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, 14 ile 450 nm arasında kirlenicilerin giderim veriminin ortalamayla karşılaştırıldığında düşük olduğu görülmektedir. Benzeri şekilde 2 nm’den küçük kirleniciler için de KOİ giderim verimi düşük bulunmuştur.



Şekil 4. Biyolojik arıtma ve membran ayrımının siyah su KOİ boyut dağılımı üstündeki etkisi

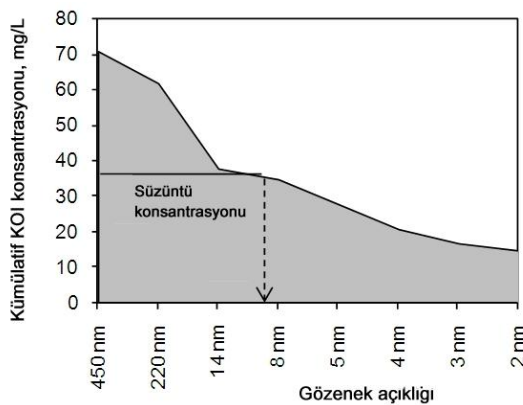
Siyah ve gri su MBR'larının içinden alınmış çamurlarda gerçekleştirilen kümülatif boyut dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. Membran çıkışında (süzüntü) ölçülen KOİ değerlerinin karşılık geldiği membran gözenek çapı yine şekil üstünde işaretlenmiştir. MBR'larda kullanılan membranın gözenek açıklığı 400 nm olmasına karşın, 450 nm'den küçük KOİ'nin yaklaşık %50'sinin membrandan geçtiği görülmüştür. Şekil 5 incelendiğinde, KOİ parametresi için her iki reaktörde de membranın verimli süzme aralığının yaklaşık 8 nm civarında olduğu görülmektedir. Bu fark, membran yüzeyinde biyofilm oluşumu ve biyofilmin membran yüzeyinde daha küçük boyutlu kirleticileri tutabilen ikinci bir membran görevi görmesi ile açıklanmıştır. Batık membran biyoreaktörlerde membran yüzeyinde biyofilm oluşumu Lee ve diğerleri (2001), Lee ve diğerleri (2003), Ng ve diğerleri (2006) tarafından da raporlanmış ve oluşan kek tabakasının membran tıkanmasında önemli bir etken olduğu belirtilmiştir. Ancak biyofilm oluşumunun biyolojik arıtma üstündeki etkisi ile ilgili daha önce herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

Membran biyoreaktörde membranın verimli süzme boyutunun gerçekte sahip olduğu gözenek açıklığından küçük olması, biyolojik olarak parçalanmamış çözünmüş organik kirleticilerin membranın verimli süzme boyutundan küçük boyutlu olanların membrandan geçerken büyük olanların reaktör içinde tutulmasına sebep olur. Bu da kalıcı KOİ'nin boyutuna bağlı olarak re-

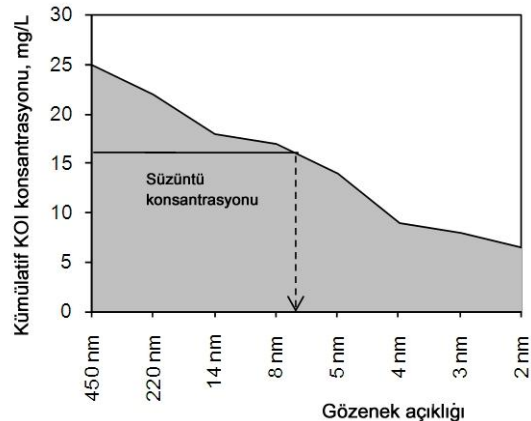
aktörde kalış süresini önemli oranda etkileyecektir.

Konvansiyonel aktif çamur sistemlerinde çözünmüş maddelerin sistemde kalış süresi hidrolik bekletme süresi (HBS) ile kontrol edilir, partiküler maddelerin sistemde kalış süresi ise çamur yaşına (ÇY) bağlıdır. Dolayısıyla çözünmüş KOİ'nin (<450 nm) sistemde kalış süresi de HBS kadardır. Ancak membran biyoreaktörler için çözünmüş KOİ'nin sistemde kalış süresi için bu durum geçerli değildir. MBR'larda çözünmüş KOİ'nin reaktörde kalış süresi kirleticinin boyut dağılımı ile membranın verimli süzme boyutuna göre değişiklik gösterecektir. Örneğin bu çalışmada kullanılan membranların verimli süzme boyutunun 8 nm civarında olduğu belirlenmiştir. Her iki MBR'da da bu boyuttan daha küçük biyolojik olarak parçalanmayan kirleticiler membrandan geçeceği için reaktörde kalış süreleri HBS kadar olacaktır. Ancak membranın verimli süzme boyutundan daha büyük olan biyolojik olarak parçalanmayan kirleticiler reaktörde ÇY/HBS süresince tutulabilecektir. Bu bağlamda reaktörde bir kısım kirleticiler birikecektir (Shin ve Kang, 2003; Kang vd., 2006).

Bu çerçevede kalıcı KOİ'nin MBR'daki akibetinin belirlenebilmesi için atıksuda bulunan inert KOİ ve çözünmüş mikrobiyal ürünler için kararlı denge kütle dengesi eşitlikleri kurulmuştur.



a) siyah su



b) gri su

Şekil 5. Siyah su MBR çamurunda kümülatif KOİ profili

Atıksuda bulunan inert KOİ için kütle dengesi eşitliği;

$$Q \times S_{I1} - Q \times S_{Ie} - P_{SI} = 0$$

S_{Ie} = membran efektif süzme aralığından daha küçük çözünmüş inert KOİ, bu çalışma için <8 nm

Çamur ile atılan;

$$P_{SI} = \frac{V \times S_{I \text{ bulk}}}{\theta_x}$$

P_{SI} eşitlikte yerine yazarsak reaktör içinde S_I ;

$$S_{IB} = (S_{I1} - S_{Ie}) \times \frac{\theta_x}{\theta_h}$$

θ_x = çamur yaşı, gün

θ_h = hidrolik bekletme süresi, gün

Benzeri eşitlikleri çözünmüş mikrobiyal ürünler için de yazar, reaktör içinde aktif çamur süzütüsü her iki parametreyi de içerdiği için toplarsak söz konusu eşitlik;

$$S_{IB} + S_{MPB} = ((S_{I1} + S_{MPG}) - (S_{Ie} + S_{MPE})) \times \frac{\theta_x}{\theta_h}$$

halini alır.

Buna göre MBR içinden alınan çamurun süzütüsünde (450 nm filtre altı) için KOİ değerinin hesaplanması mümkündür.

Siyah su MBR'da 20 gün çamur yaşı için aktif çamur süzütü KOİ'sini hesaplırsak;

$$S_{IB} + S_{MPB} = (70 - 31) \times \frac{20}{0.875} \cong 891 \text{ mg/L}$$

olarak bulunur. Ancak reaktör içinde 450 nm filtreden elde edilen süzütüde ölçülen KOİ değeri sadece 71 mg/L'dir. Benzeri yaklaşımla gri su MBR'ı için hesap yaparsak reaktör içinde beklenen konsantrasyon 343 mg/L olarak bulunur. Ancak reaktör içinde 450 nm filtreden elde

edilen süzütüde ölçülen KOİ değeri sadece 35 mg/L'dir. Aradaki fark uzun bekletme süreleri sebebiyle biyolojik parçalanma ile açıklanmıştır. Bu çerçevede MBR'larda, konvansiyonel aktif çamur sistemlerinde biyolojik olarak parçalanamayan bir kısım çözünmüş kalıcı KOİ reaktörde uzun kalış süresi sayesinde parçalanmaktadırlar. Bu çalışma sonuçları göstermiştir ki membran biyoreaktörler, biyolojik ayrışma mekanizmaları açısından aktif çamur sisteminden farklılıklar göstermektedir. Bu bağlamda, MBR'ları biyokütlenin fiziksel olarak ayrıldığı aktif çamur sistemleri olarak nitelemenin eksik yorumlamaya sebep olacağı düşünülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar daha önce hiç dikkat çekilmemiş bir noktaya, MBR ve konvansiyonel aktif çamur sistemlerinin organik maddenin ayrışması açısından farklarına işaret etmiştir. Elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Batık membran biyoreaktörlerde membranın verimli süzme boyutu membran yüzeyinde oluşan biyofilm dolayısıyla membranın gerçekte sahip olduğu gözenek çapından çok daha küçüktür. Bu çalışmada kullanılan membranın nominal gözenek açıklığı 400 nm olmasına karşın, KOİ parametresi için membranın verimli süzme aralığı 8 nm civarında bulunmuştur.
- Membran biyoreaktörlerde, membranın verimli süzme boyutundan daha büyük boyut-taki çözünmüş ayrışamayan kirleticilerin sistemde kalış süresi çamur yaşı ve hidrolik bekletme süresi oranı kadar olabilmektedir.
- Reaktörde uzun tutulma dolayısıyla konvansiyonel aktif çamur sistemlerinde ayrışmayan bir kısım çözünmüş kalıcı KOİ MBR'larda kısmen ayrışmaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kalıcı KOİ'nin ve bununla ilişkili olarak zenobiyotiklerin MBR'larda ayrışma mekanizmalarının anlaşılması açısından son derece önemlidir. Elde edilen sonuçlar MBR'larda modelleme çalışmalarını bir adım ileriye taşıyacaktır. Bunun yanında, bu çalışma sonuçlarının, membran tı-

kanması çalışmalarına da katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- APHA., (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th Ed., Washington D.C.
- Henze, M. and Ledin, A., (2001). Types, characteristics and quantities of classic, combined wastewaters, in Lens, P., Zeeman, G., Lettinga, G., eds, *Decentralised Sanitation and Reuse*, IWA Publishing, UK, 57–72.
- Insel, G., Orhon, D. and Vanrolleghem, P.A., (2003). Identification and modelling of aerobic hydrolysis mechanism-application of optimal experimental design, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **78**, 437-445.
- Kang, S., Lee, W., Chae, S. and Shin, H., (2006). Positive roles of biofilm during the operation of membrane bioreactor for water reuse, *Desalination*, **202**, 129-134.
- Lee, J., Ahn, W.-Y. and Lee, C.-H., (2001). Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor, *Water Research*, **35**, 10, 2435-2445.
- Lee, W., Kang, S. and Shin, H., (2003). Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors, *Journal of Membrane Science*, **216**, 1-2, 217-227.
- Ng, H.Y., Tan, T.W. and Ong, S.L., (2006). Membrane fouling of submerged membrane bioreactors: Impact of mean cell residence time and the contributing factors, *Environmental Science and Technology*, **40**, 8, 2706-2713.
- Orhon, D. and Okutman, D., (2003). Respirometric assessment of residual organic matter for domestic sewage, *Enzyme and Microbial Technology*, **32**, 560-566.
- Otterpohl, K., Grottker, M. and Lange, J., (1997). Sustainable water and waste management in urban areas, *Water Science and Technology*, **35**, 9, 1211-133.
- Ubay Cokgor, E., Sozen, S., Orhon, D. and Henze, M., (1998). Respirometric analysis of activated sludge behaviour-I, Assesment of readily biodegradable substrate, *Water Research*, **32**, 2, 461-475.
- Orhon, D., Artan, N. and Ates, E., (1994). A description of three methods for the determination of the initial inert particulate chemical oxygen demand of wastewater, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **61**, 73-80.
- Sarioglu, M., Insel, G., Artan, N. and Orhon, D., (2009). Effect of biomass concentration on the performance and modeling of nitrogen removal for membrane bioreactors, *Journal of Environmental Science and Health, Part A. Toxic/Hazardous Substances Environmental Engineering*, **44**, 733-743.