

Entegre Sabit Filmlili Aktif Çamur Sistemi ve Membran Biyoreaktör ile Farklı Yapıdaki Biyofilm Performanslarının Değerlendirilmesi

Türker TÜRKEN^{1,a}, Özgün YILMAZ^{1,b}

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

^a*ORCID: 0000-0003-0550-5975;* ^b*ORCID: 0000-0001-7440-9448*

Makale Bilgileri

Geliş : 20.03.2025

Kabul : 12.09.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1661989

Sorumlu Yazar

Türker TÜRKEN

turken@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

İfas

Membran biyoreaktör

Su geri kazanımı

Atıf şekli: TÜRKEN, T., YILMAZ, Ö., (2025). Entegre Sabit Filmlili Aktif Çamur Sistemi ve Membran Biyoreaktör ile Farklı Yapıdaki Biyofilm Performanslarının Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(3), 643-653.

ÖZ

Su tüketimindeki artış, mevcut kaynaklar üzerindeki baskıyı artırmakta ve gelecekte su krizine yol açabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle atıksuların geri kazanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, alan ihtiyacını en aza indiren ve yüksek artım verimi sağlayan membran biyoreaktör (MBR) sistemleri ile entegre biyofilm sisteminin (IFAS-MBR) performansı laboratuvar ölçeğinde araştırılmıştır. Çalışmada farklı biyotasiyıcı medyalar kullanılarak sistem performansına etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, hibrit sistemin yüksek organik madde gideriminde etkili olduğunu göstermiştir. KOİ giderimi %94 seviyesinde gerçekleşmiş, toplam azot (TN) giderimi %35, toplam fosfor (TP) giderimi %61 olarak belirlenmiştir. Çıkış suyu bulanıklık değerleri 10 NTU'nun altında kalmıştır. Biyofilm entegrasyonu sayesinde düşük SRT koşullarında dahi nitrifikasyonun gerçekleştiği gözlenmiş, ayrıca membrana gelen yük azalttığı için transmembran basıncının artışı yavaşlamış ve kimyasal yıkama ihtiyacı azalmıştır. Bu bulgular, IFAS-MBR hibrit sisteminin KOİ, azot ve fosfor gibi önemli parametrelerin giderimi ile membran ömrünün uzatılmasında da avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

Evaluation of Biofilm Performance of Different Structures with Integrated Fixed Activated Sludge and Membrane Bioreactor

Article Info

Received : 20.03.2025

Accepted : 12.09.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1661989

Corresponding Author

Türker TÜRKEN

turken@itu.edu.tr

Keywords

İfas

Membrane bioreactor

Water recovery

How to cite: TÜRKEN, T., YILMAZ, Ö., (2025). Evaluation of Biofilm Performance of Different Structures with Integrated Fixed Activated Sludge and Membrane Bioreactor Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(3), 643-653.

ABSTRACT

Increasing water consumption exerts pressure on available resources and is expected to cause a water crisis in the future. Therefore, wastewater reclamation has become increasingly important. In this study, the performance of an integrated fixed-film activated sludge-membrane bioreactor (IFAS-MBR) system, which minimizes land requirement while ensuring high treatment efficiency, was investigated at laboratory scale. Different bio-carrier media were tested to evaluate their effects on system performance. The results demonstrated that the hybrid system was effective in removing high organic loads. The chemical oxygen demand (COD) removal efficiency reached 94%, while total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) removal efficiencies were 35% and 61%, respectively. Effluent turbidity remained below 10 NTU. Biofilm integration enhanced nitrification even under low sludge retention time (SRT) conditions, and reduced the loading on the membrane, which slowed down the increase in transmembrane pressure (TMP) and lowered chemical cleaning requirements. These findings indicate that the IFAS-MBR hybrid system provides advantages not only in COD removal but also in nitrogen and phosphorus removal, as well as in extending membrane lifespan.

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve endüstriyel faaliyetler nedeniyle temiz su kaynaklarına ulaşmak zorlaşmıştır. Bu nedenle, gün geçtikçe atık su geri kazanımı ve daha düşük alan kaplayan arıtma tesislerinin kullanımı ihtiyacı artmaktadır. Membran teknolojileri, konvansiyonel arıtma sistemleri ile birlikte veya ayrı olarak kullanılan arıtma teknolojileridir. Membran biyoreaktör (MBR) sistemleri, biyolojik arıtma ve filtrasyon sistemlerinin kombinasyonu olarak çalışmakta ve yapılan çalışmalarda MBR sistemlerinin hem alan ihtiyacını azalttığı, hem de daha yüksek kalitede çıkış suyu eldesi sağladığı gözlenmiştir.

Buna ek olarak, Entegre Sabit Aktif Çamur (IFAS) sistemi ise atık su arıtımı için sürdürülebilir bir çözüm sağlayan önde gelen proseslerden biridir. IFAS, yüzeyde ve askıda büyüme sistemlerini entegre ederek Hareketli Yatak Biyoreaktör (MBBR) sisteminin geliştirilmiş bir hali olarak açıklanabilir. Bu sistem, yüksek oranda besin giderimi, tam nitrifikasyon, daha uzun katı madde tutma süresi gibi geleneksel aktif çamur sistemlerine göre avantajlar sunar. Son zamanlarda geliştirilen IFAS reaktörleri ayrıca metan üretimi, algler veya mikrobiyal yakıt hücreleri yoluyla enerji üretimi için verimli sonuçlar içermektedir.

Son yıllarda IFAS-MBR hibrit sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, hem organik madde giderimi hem de azot-fosfor giderimi açısından umut verici sonuçlar vermiştir. Bu kapsamda yürütülen bir pilot ölçekli çalışmada IFAS-MBR sistemlerinin geleneksel MBR sistemlerine göre daha yüksek performans sergilediği gösterilmiştir. IFAS'ın pilot ve tam ölçekli uygulamalarda kompakt tasarımı ve yüksek biyofilm stabilitesi sayesinde gelecekte daha yaygın kullanılacağı öngörülmektedir [1]. Yine başka bir çalışmada IFAS sistemlerinde nitrifikasyon veriminin %98'e kadar çıkabildiğini belirtmiştir [2]. Ayrıca Yüksekdağ [3] çalışmasında, nanolif membranlarda yüzey modifikasyonlarının membran performansını ve antimikrobiyal özelliklerini iyileştirdiği, bu işlemin de tıkanmayı azaltma potansiyeli sunduğu bildirilmiştir.

Görüldüğü üzere batık tip membranlar ile çalışan sistemler için literatür, IFAS-MBR hibrit sistemlerinin çeşitli avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. MBR sistemlerinden önce daldırılan biyotayıyıcı sayesinde membranlar daha yüksek geçirgenlikli akış koşullarında çalıştırılabilir, membran yüzeyindeki kirlilik yükü azaltılır ve daha kompakt bir sistem olarak daha az alan gerektirir. Bu kapsamda oluşturulan pilot ölçekli IFAS-MBR hibrit sistem düzeneği, hem karbonu hem de besin maddeleri olan azot ve fosforu gidermek ve en uygun morfolojik yapıya sahip biyotayıyıcıyı belirlemek için tasarlanmıştır.

Çalışma kapsamında, PVDF polimeri kullanılarak üretilmiş ince boşluklu membran filtre biyoreaktörü ile entegre edilmiş farklı morfolojik yapılara sahip iki biyotayıyıcı kullanılmıştır. Uygun biyotayıyıcı materyalinin belirlenmesi için, evsel nitelikli atık su numunesi ile laboratuvar ölçekli deneyler yapılmış ve bazı parametreler izlenmiştir.

2. YÖNTEM

Laboratuvar ölçekli entegre IFAS-MBR sistemi için yapılan tayinler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

2.1. Atık Su Karakterizasyonu

Yapılan çalışmada evsel karakterli sentetik atık su hazırlanmıştır. Kullanılan kimyasallar ve besleme çamuruna ait veriler aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

Çizelge 1. Sentetik atık su reçetesi [4]

Parametre	Birim	Değer
Glikoz	mg/L	400
Bactopeptone	mg/L	115
(NH ₄) ₂ SO ₄	mg/L	104,8
KH ₂ PO ₄	mg/L	21,75
MgSO ₄	mg/L	15,63
CaCl ₂	mg/L	2,45
MnSO ₄	mg/L	1,8
NaHCO ₃	mg/L	255,5
MLSS	mg/L	5580
KOİ(Beslenen Çamur)	mg/L	460

2.2. KOİ Tayini

KOİ giderim verimlerini bulmak için reaktörün içindeki besleme atık suyundan ve arıtılmış süzöntü suyundan periyodik olarak numuneler alınarak KOİ analizleri yapılmıştır. Yöntem olarak standart yöntemlerden biri olan 5220-C kapalı reflü yöntemi kullanılmıştır. KOİ tüplerine 2,5 ml seyreltilmiş numune, 1,5 ml standart $K_2Cr_2O_7$ solüsyonu ve 3,5 ml H_2SO_4 reaktifi eklenmiştir.

Tüpler $150^\circ C$ 'de Hach marka DRB 200 model termoreaktöre yerleştirilmiş olup 2 saat sonra numuneler oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır.

Soğuyan numuneler erlene alındıktan sonra 1-2 damla ferroin indikatörü ilave edilerek Demir Amonyum Sülfat (DAS) çözeltisi ile kiremit kırmızısı renk elde edilinceye kadar titre edilmiştir. Deneyde kullanılan DAS solüsyonunun molaritesi Eşitlik 1 ile, KOİ değerleri ise Eşitlik 2 ile mg/L cinsinden hesaplanmıştır.

$$DAS \text{ Molaritesi} = \frac{\text{Titre edilen Potasyum Dikromat Hacmi} * 0,1}{DAS \text{ Hacmi (ml)}} \quad (1)$$

$$KOİ \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) * M * 8000}{Numune hacmi (ml)} \quad (2)$$

2.3. AKM Tayini

Reaktörlerdeki ve IFAS fiberleri üzerindeki katı madde değerleri düzenli aralıklarla izlenmiştir. Bu amaçla gravimetrik ölçüm yöntemi kullanılmıştır.

İlk olarak filtrenin yıkanması prosedürü uygulanmıştır. Bunun için, filtre, filtrasyon setine yerleştirilip, vakum pompası yardımıyla vakum uygulanarak distile su ile yıkanmıştır. Filtrede su kalmayınca kadar vakum uygulamasına devam edilmiş ve yıkama suyu dökülmüştür. Filtre $103-105^\circ C$ etüvde 1 saat kurutulup hem havadaki nemden etkilenmeyecek hem de tamamen kuruyacak şekilde desikatörde bekletilmiştir. Sabit tartıma gelen filtre desikatörden dikkatlice alınarak tartılmıştır.

Ardından reaktör içerisinden 20 ml numune alınıp vakum uygulanarak hazırlanan filtreden süzölmüştür. Filtre bir forseps yardımıyla aparattan dikkatlice çıkarılıp alüminyum bir kaba yerleştirilerek $103-105^\circ C$ etüvde en az 1 saat kurutulmaya bırakılmıştır. Etüvden sonra desikatörde oda sıcaklığına getirildikten sonra tartılmıştır. Ardından, filtre ve üzerindeki tortu $550^\circ C$ 'deki kül fırınında 30 dakika yakılmıştır. Yakma işlemi sonucunda desikatörde soğuduktan sonra tartım işlemi yapılmıştır. AKM hesaplamaları Eşitlik 3 ile yapılmıştır.

$$AKM \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{(A - B) * 1000}{Numune hacmi (ml)} \quad (3)$$

IFAS fiberlerinden 14 günlük çalışmada 3., 5., 10. ve 12. günlerde numuneler alınarak üzerlerinde tutunan katı madde analizleri yapılmıştır.

Distile su içerisinde bir kaşık yardımıyla fiberlerin üzerinden katı maddeler sıyrılmış ve etüvde kurutulmuştur. Bu işlemten sonra ağırlık ölçümü yapılarak birim hacimdeki katı madde miktarı hesaplanmıştır.

2.4. Toplam Azot Tayini

Bu çalışmada belirli periyotlarda toplam azot ölçümleri, Hach-Lange marka 5-40 mg/L aralığındaki kitlerle ölçülmüştür.

Kit ölçümü için gerekli prosedürler uygulandıktan sonra DR 5000 Hach-Lange spektrofotometre ile sonuçlar elde edilmiştir. Ölçümler sonucunda çıkan değerler yapılan çalışmaların doğru sonuç verdiğini göstermiştir.

2.5. Toplam Fosfor Tayini

Standart Yönteme (APHA, 2005) göre yürütülen toplam fosfor analizi Hach-Lange marka LCK 350 deney kitleri ile DR 5000 Hach-Lange spektrofotometre üzerinde 507 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

2.6. Bulanıklık Tayini

Bulanıklık, bir görünüm özelliğidir, özellikle numunenin ışığı nasıl ilettiğinin bir ölçümüdür. Bulanık su ışığı çok iyi iletmez. Bunun nedeni, sudaki koloidal parçacıklardan kaynaklanan ışık saçılımıdır.

Bulanık olan su genellikle daha yüksek seviyelerde BOİ, KOİ ve patojenlere sahiptir. Işık geçirgenliği, mevcut koloidal parçacıkların hem boyutuna hem de sayısına bağlı olduğundan bulanıklığı TSS ile doğrudan ilişkilendirmenin de oldukça zor olduğuna dikkat etmek önemlidir.

Bulanıklık, NTU tarafından belirlenirken AKM, hacim başına kütle birimi cinsinden ölçülür. Entegre IFAS-MBR sistemi ile evsel atık su arıtma işlemi sonrasında atık su içerisindeki AKM, çıkış suyunda bulanıklık cinsinden ölçülmüştür. Aynı AKM seviyelerine sahip iki numune, farklı parçacık boyutu dağılımlarına sahiplerse farklı bulanıklık değerlerine sahip olabilir.

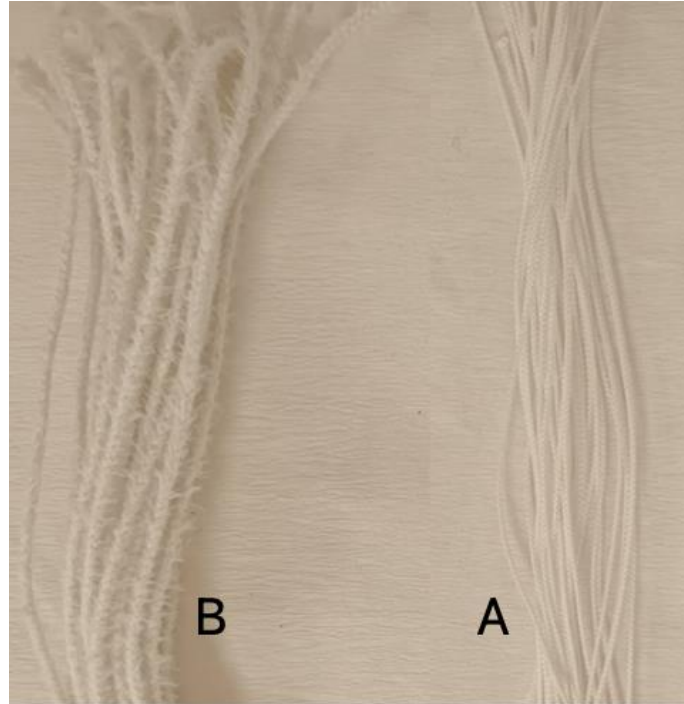
2.7. SEM Analizi

İşletme öncesinde ve sonrasında IFAS fiberlerinin yüzey özelliklerinin belirlenebilmesi için Taramalı Elektron Mikroskop analizi yapılmıştır. Ölçümde kullanılan cihaz FEI marka Quanta Feg 250 modelidir. SEM analizi yapılabilmesi için fiberlerin kuru ve ortam neminin çok düşük olması gerekmektedir.

Analiz için etanol/su karışımı içeren solüsyonda yıkandıktan sonra oda sıcaklığında kurutulan numuneler özel numune hücrelerine yerleştirilerek Au-Pt ile yüzey kaplaması yapılmıştır.

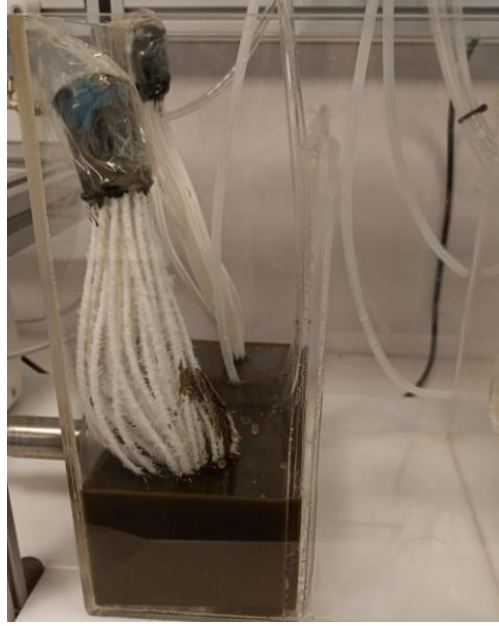
2.8. IFAS Modüllerinin Yapılışı

MBR ile entegre çalıştırılacak IFAS modülleri aynı malzeme, farklı yüzey alanları ve karakteristik özelliklere sahip Şekil 1'de gösterilen polyester fiberlerden oluşmaktadır.



Şekil 1. Farklı özelliklere sahip IFAS fiberleri

Uçlarından birleştirilen IFAS fiberleri tank içerisine Şekil 2’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Tank hacminin yüzde 40’ını kaplayacak şekilde yerleştirilen modüller MBR ile entegre işletildiğinde yüksek verimli IFAS modülü belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2. Tanka yerleştirilen IFAS modülleri

2.9. MBR Modüllerinin Yapılışı

Laboratuvar ölçekli sistem işletilmesi için son olarak ince boşluklu içi boş fiber membranların da modül haline getirilip uygun şekilde tanka yerleştirilmesi gerekmiştir. Bu nedenle aşağıda verilen eşitliklere (4,5,6) göre yapılan hesaplamalar sonucunda 104 adet fiber membran kullanılarak dıştan içe doğru akışlı ve vakum ile çalışan Şekil 3’teki modül üretilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Membran Alanı (m}^2\text{)} &= \frac{\text{Ortalama Debi (m}^3\text{/h)} * 1000}{\text{Akı (L/m}^2 * \text{h)}} \\ &= \frac{0,002 \text{ (m}^3\text{/h)} * 1000}{15} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Membran Alanı} &= 0,137 \text{ m}^2 \text{ Membran Fiber Alanı (m}^2\text{)} \\ &= \frac{0,0021 * \pi * (\text{Fiber Uzunluğu (m)} * 1000)}{1000} \\ &= \frac{0,0021 * 3,14 * (0,2 * 1000)}{1000} \\ \text{Membran Fiber Alanı} &= 0,0013 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Membran Miktarı (adet)} &= \frac{\text{Membran Alanı (m}^2\text{)}}{\text{Membran Fiber Alanı (m}^2\text{)}} \\ &= \frac{0,137 \text{ (m}^2\text{)}}{0,0013 \text{ (m}^2\text{)}} \\ \text{Membran Miktarı} &= 104 \text{ adet} \end{aligned} \quad (6)$$

Tanka yerleştirilen membran modülü Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. MBR modülü

Evsel karakterli atık suların arıtımında seçilen akı değeri 15–25 L/m²h arasında değişmektedir [5]. Bu veriler doğrultusunda seçilen akı değeri 15 L/m²h'dir.

2.10. IFAS-MBR Sisteminin İşletilmesi

Laboratuvar ölçekli IFAS-MBR sistemi PLC sistemine bağlıdır ve tüm kontroller bu ekrandan yapılabilmektedir. MBR sisteminde filtrasyon ve geri yıkama olmak üzere iki farklı proses vardır. PLC ekranında tüm sistem şeması görülebilmekte ve gerektiğinde ünitelere ilişkin Geri yıkama, filtrasyon basıncı, akı ve debi gibi çalışma parametreleri bu ekrandan değiştirilebilmektedir. Şekil 4'te sistemin işletme sırasındaki bir görüntüsü verilmektedir.

Besleme pompası vasıtasıyla IFAS tankına alınan atık su MBR tankına savaklanarak aktarılmıştır. Loblu pompa ile vakumlanan atık su membran filtresinden geçerek süzüntü tankında toplanmıştır.

9 dakika filtrasyon işlemi ve 1 dakika geri yıkama işlemi yapılarak membran yüzeyinde oluşabilecek tıkanıklıklar engellenebilmekte ve membran filtrasyonunun verimi istenilen seviyelerde tutulabilmektedir.



Şekil 4. İşletilen IFAS-MBR sistemi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Laboratuvar ölçekli IFAS-MBR sistemi işletme sonuçlarına göre, IFAS modüllerinin MBR sistem çalışmasına çeşitli etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir. IFAS malzemesi, geniş yüzey alanı sayesinde MLSS'nin üzerine yapışmasını sağlar ve böylece aerobik reaktör hacmi ihtiyacını azaltır. SEM görüntülerinde görüldüğü gibi, pürüzlü yüzeyli IFAS malzemesi, pürüzsüz yüzeyli IFAS malzemesinden daha fazla biyofilm tutmuştur. Bu bağlamda pürüzlü yüzeye sahip IFAS malzemesinin kullanıldığı sistemlerde aerobik reaktör hacmi daha düşük tutulabilmektedir.

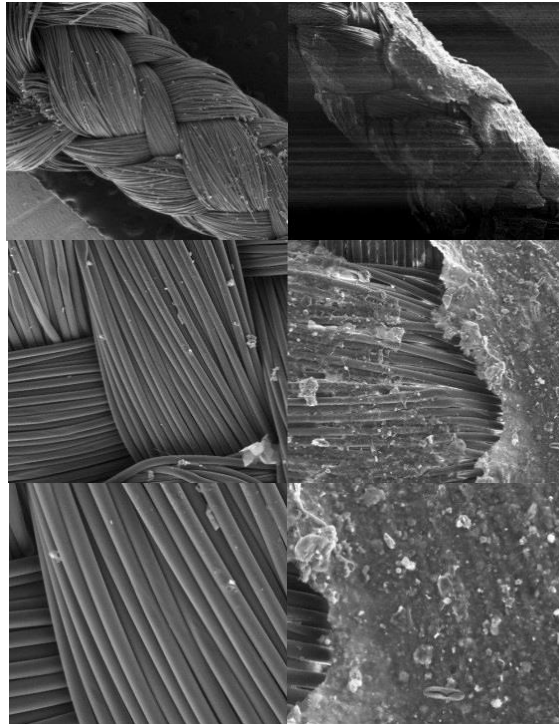
Hem MBR hem de IFAS sistemlerinin çıkış amacı arıtma tesislerinin alan ihtiyacını azaltmak olsa da IFAS-MBR sisteminin alan ihtiyacı konvansiyonel sistemlere göre çok daha düşüktür. IFAS-MBR sisteminin alan gereksiniminin de hem sabit hem de hareketli biyotaşıyıcı sistemlerine ve MBR sistemlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. IFAS taşıyıcıları üzerine biyofilm yapışması nedeniyle MBR sisteminin kimyasal yıkama sıklığının azaltılabileceği gözlemlenmiştir. Bu sayede membran modüllerin ömrünün uzatılabileceği düşünülmektedir.

Laboratuvar ölçekli çalışma sonrasında Şekil 5'te de görülebileceği gibi, IFAS B'de daha fazla biyofilm tutunması gözlemlenmiştir. Biyofilm tutunmasının sebepleri sonuç kısmında daha detaylı açıklanmıştır. IFAS modüllerinden belirli kesitler alınarak oda sıcaklığında 24 saat kurutularak SEM analizi yapılmıştır.



Şekil 5. Çalışma sonrasındaki IFAS modülleri

SEM ölçümü üç farklı büyütme ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. SEM çıktılarına göre, daha az yüzey alanına sahip IFAS modülündeki biyofilm ince iken daha geniş yüzey alanlı ve pürüzlü IFAS biyotaşıyıcıda biyofilmin daha kalın olduğu görülmüştür. Bu sonucun elde edilmesinde biyofilmin tutunabildiği yüzey alanının daha geniş olması ve IFAS dokusunun daha pürüzlü olması etkilidir. Kirli modüller için her üç büyütme oranındaki SEM görüntülerine bakıldığında IFAS B yüzeyinin tamamına biyofilm tutunması gerçekleştiği görülürken IFAS A'da hala temiz bölgeler bulunduğu saptanmıştır (Şekil 6 ve Şekil 7).



Şekil 6. IFAS A için çalışma öncesi(sol) ve sonrası(sağ) sırasıyla 100, 500 ve 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

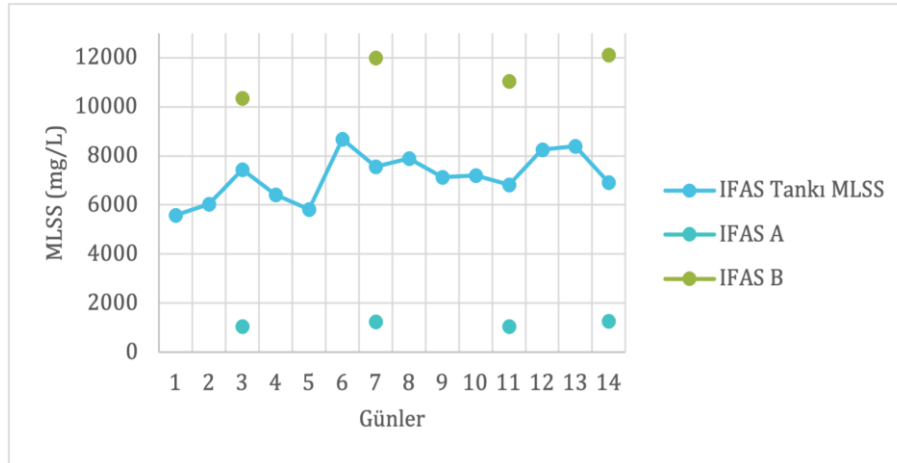


Şekil 7. IFAS B için çalışma öncesi(sol) ve sonrası(sağ) sırasıyla 100, 500 ve 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

IFAS modülleri üzerine biyofilm tutunması ile membran biyoreaktörde tıkanma ve birikimin geciktiği ve ekonomik ömrünün uzadığı belirlenmiştir. Ayrıca filtrasyon süresi uzatılarak geri yıkama ve membran havalandırma gibi maliyetli girdilere olan ihtiyaç azaltılır. IFAS gibi biyotaşıyıcıların kullanımı, geleneksel atık su arıtma sistemlerine kıyasla havalandırma havuzlarının hacmini azaltır. Konvansiyonel sistemlerde MBR kullanımı ile gerekli alan ihtiyacının yarı yarıya azaldığı da bilinmektedir [6]. Bu kapsamda IFAS ve MBR sisteminin entegre kullanımı sonucunda ihtiyaç duyulan alanın önemli ölçüde azaltılabileceği görülmüştür. IFAS'ın yüzeyinde oluşan biyofilm tabakasının kalınlığının artması ile tabakanın iç kısımlarında oksijensiz (anoksik) bir ortam oluştuğu ve bu sayede nitrifikasyon işleminin gerçekleştiğine dair literatürde çalışmalar mevcuttur [7].

Sistem sentetik atıksu ile beslenmiştir. Bu nedenle giriş atık sularında AKM değeri yoktur. Ancak Atıksu Arıtma Tesisinden alınan aktif çamurun MLSS konsantrasyonu 5580 mg/L olarak ölçülmüştür. Bu kapsamda MBR tankına ait MLSS konsantrasyon değişim grafiği aşağıda verilmiştir (Şekil 8).

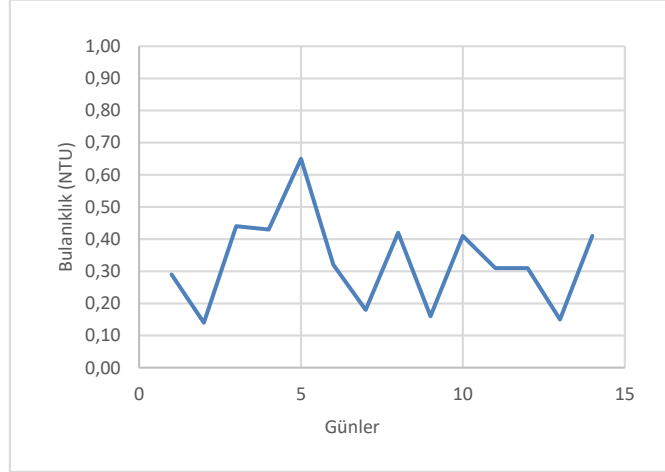
Şekil 8'e göre, üzerinde daha fazla biyokütle birikimi gözlenen IFAS B'deki MLSS konsantrasyonunun IFAS A'ya göre daha düşük mertebelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Tank içindeki ve IFAS modülleri üzerindeki MLSS değişimi

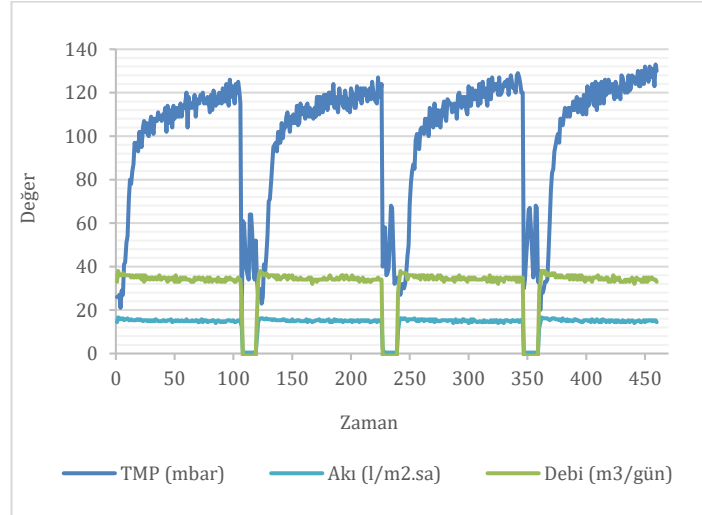
Aynı zamanda MBR çıkışındaki AKM konsantrasyonu 10 mg/L'nin altında olduğu için çıkışta AKM ölçümü yapılmamış, bulanıklık ölçümü yapılmıştır. IFAS-MBR sisteminin çıkışından alınan su numunesinin bulanıklık değişim grafiği aşağıda verilmiştir (Şekil 9).

IFAS performansları ve MLSS konsantrasyonları göz önüne alındığında bulanıklık değerlerinin aynı doğrultuda sonuçlar verdiği görülmektedir.



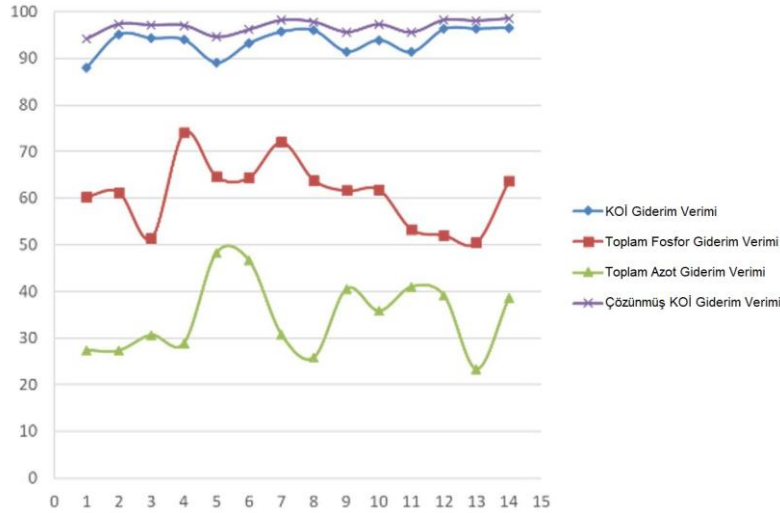
Şekil 9. Bulanıklık değişimi

MBR sisteminin filtrasyon döngüsü 9 dakika filtrasyon ve 1 dakika geri yıkama olacak şekilde ayarlanmıştır. Verilen grafikte (Şekil 10) filtrasyon basıncının (TMP) zamana göre değişimi, akı ve debi değerleri PLC verilerine göre hazırlanmıştır. Grafikte görülen ani basınç değişiklikleri, filtrasyonun 9 dakikalık döngüsünü tamamladığını ve 1 dakikalık geri yıkamanın başladığını göstermektedir. Aynı zamanda debi ve akı değerlerindeki ani düşüşün nedeni geri yıkamanın başlamış olmasıdır. MBR üzerindeki baskı negatif basınç olarak okunur ve grafiğe bakıldığında basınçta zamanla artış gözlenir. Bu artışa bağlı olarak membranların kimyasal yıkama işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 10. TMP-debi-akı değişimi

Laboratuvar ölçekli IFAS-MBR çalışması sonucunda arıtma verimi grafiği (Şekil 11) ve ortalama giriş ve çıkış değerleri (Çizelge 2) aşağıda verilmiştir. Sonuçlara göre verim değerleri ortalama değerden fazla sapmamaktadır. Beşinci günde gözlemlenen yüksek azot giderimi, IFAS modülü üzerinde biriken biyofilmin alt tabakasında anoksik bölge oluşumu ile meydana gelen denitrifikasyon işleminin sonucu olarak açıklanabilir. Dördüncü gündeki yüksek fosfor giderimi, sentetik atıksuda bulunan $FeCl_3$ konsantrasyonundan dolayı çökelme ile açıklanabilir. Verimlilik değerleri genellikle yedinci günde yüksektir.



Şekil 11. Arıtma verimi değişimi

Çizelge 2. Ortalama giriş ve çıkış değerleri

Parametre	Birim	Ortalama giriş değeri	Ortalama çıkış değeri
KOİ	mg/L	360	22,9
TN	mg/L	40	26
TP	mg/L	8,83	3,4
MLSS	mg/L	7155	-

4. SONUÇLAR

Temiz suya ulaşmanın zorlaşması ve alan ihtiyaçlarının azalması gerekliliği nedeniyle, konvansiyonel arıtma sistemleri yerini su geri kazanım sistemlerine bırakmaya başlamıştır. Bu kapsamda, son çökeltim havuzlarının kapladığı yüksek alanları ortadan kaldırmak ve daha yüksek giderim verimleri elde etmek için geliştirilen MBR sistemlerinin daha az alanda daha fazla atık su arıtımı ve geri kazanımı sağladığı birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. IFAS'ların da sisteme entegre edilmesi sayesinde kimyasal yıkamaya duyulan ihtiyacın azaltılarak MBR sistemlerin çalışma ömrünün uzadığı da görülmektedir.

Yürütülen çalışmada elde edilen %94 KOİ giderimi literatürde bildirilen değerlerle uyumludur; yapılan benzer bir çalışmada %92 giderim raporlanmış olup, bu çalışmadaki değer bir miktar daha yüksektir [1]. Bui et al. [2] tarafından raporlanan yüksek nitrifikasyon verimleri ile karşılaştırıldığında, biyofilmin düşük SRT koşullarında bile nitrifikasyonu desteklediği görülmüştür. Benzer şekilde, IFAS-Anammox entegrasyonu çalışmalarında görüleceği üzere biyofilm tabakalarının iç kısımlarında anoksik bölgelerin oluşması denitrifikasyonu artırmıştır [8]. Ayrıca, modelleme çalışmalarında öne çıkan parametrelerle karşılaştırıldığında bu çalışmadaki MLSS ve TMP verileri benzer eğilimler göstermiştir [9]. Çalışma kapsamında diğer performans parametreleri de değerlendirilmiş; toplam azot (TN) giderimi %35 (40 mg/L → 26 mg/L), toplam fosfor (TP) giderimi %61 (8.83 mg/L → 3.4 mg/L) olarak ölçülmüştür.

Çıkış suyu bulanıklığı düşük seviyelerde seyretmiş ve 10 NTU'nun altında kalmıştır. Pürüzlü yüzeye sahip biyotayıyıcı kullanılan IFAS modülünde daha fazla biyofilm tutunması sayesinde MBR tankında daha düşük MLSS değerleri gözlenmiştir. Yeşiltaş ve Yılmaz [10] çalışmasında da, koagülasyon uygulamalarının su kalitesini iyileştirerek membran öncesi yükü azaltabileceği ve filtrasyon performansını olumlu etkileyebileceği belirtilmiştir. TMP (transmembran basıncı) ise süreç boyunca artış göstermesine rağmen biyofilm entegrasyonu sayesinde kimyasal yıkama ihtiyacı azalmıştır. Tüm bu bulgular, sistemin sadece KOİ değil aynı zamanda azot ve fosfor giderimi ile operasyonel sürdürülebilirlik açısından da etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan laboratuvar ölçekli çalışmada IFAS sistemi ve MBR sisteminin entegre edildiği hibrit sistem sayesinde, alan ihtiyacı minimuma indirilmiş ve yüksek giderim verimi eldesi ile yüksek kirletici konsantrasyonlarına sahip atıksuların geri kazanılabileceği görülmüştür. Gelecekte, IFAS malzeme yapısı,

yüzey alanı ve geometrik şekil gibi değerleri değiştirilerek daha yüksek verimliliğe sahip sistemlerin geliştirilmesi öngörülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Nguyen, H. T. & Phan, T.M. (2025). Recent progress in integrated fixed-film activated sludge process for wastewater treatment: A review. *Environmental Technology Reviews*, 14(1), 88-115.
2. Bui, X. T., Tran, H.T., Vo, T.D.H. & Nguyen, T.T. (2024). Performance evaluation of integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system for nitrogen removal under different operational conditions. *Processes*, 12(10), 2131.
3. Yüksekdağ, A. (2024). Elektroeğirme yöntemi ile üretilen antimikrobiyal nanolif membranlarda Lycopodium özütü etkisinin incelenmesi. *Ç.Ü. Müh. Fak. Dergisi*, 39(4), 1027-1038.
4. Ergön-Can, T., Köse-Mutlu, B., Koyuncu, İ. & Lee, C.H. (2017). Biofouling control based on bacterial quorum quenching with a new application: Rotary microbial carrier frame. *Journal of Membrane Science*, 525, 116-124.
5. Özkan, O., Uyanık, İ., Rençber, M., Oğuz, M., Şahin, U. ve Koyuncu, İ.S. 2017. Organize sanayi bölgesi atıksularının membran biyoreaktörlerle arıtılması: KOSB için ilk sonuçlar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1060.
6. Bengtsson, S., de Blois, M., Wilén, B. M. & Gustavsson, D. (2019). A comparison of aerobic granular sludge with conventional and compact biological treatment technologies. *Environmental Technology*, 40(21), 2769-2778.
7. Albizuri, J., Santamaria, A. & Larrea, L. (2010). IFAS process for nitrogen removal with an HRT of 4 hours. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 440-457.
8. Li, X. & Yu, R. (2024). Integrated fixed-film activated sludge and Anammox systems: Recent developments and influencing factors. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1091538.
9. Pryce, J., Ahmed, M. & Collins, R. (2022). Modelling and sensitivity analysis of integrated fixed-film activated sludge processes for municipal wastewater treatment. *Scientific Reports*, 12, 13779.
10. Yeşiltaş, H.K. ve Yılmaz, T. (2022). Yüzeysel su kaynağından içme suyu eldesinde alkali koagülasyon metodunun uygulanması ve kalsiyum sertliğinden ileri gelen kireç taşı oluşumu. *Ç.Ü. Müh. Fak. Dergisi*, 37(1), 249-260.

