

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**BALIKESİR ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ ATIKSULARININ JET
LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖR SİSTEMİYLE ARITIMININ
İNCELENMESİ**

BEHİCE YAĞMUR AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. BURHANETTİN FARİZOĞLU (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. MEHMET İŞLEYEN
Doç. Dr. BAYBARS ALİ FİL

BALIKESİR, OCAK - 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Balıkesir Organize Sanayi Bölgesi Atıksularının Jet Loop Membran Biyoreaktör Sistemiyle Arıtımının İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

BEHİCE YAĞMUR AYDIN

(imza)

ÖZET

BALIKESİR ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ ATIKSULARININ JET LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖR SİSTEMİYLE ARITIMININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEHİCE YAĞMUR AYDIN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. BURHANETTİN FARİZOĞLU)

BALIKESİR, OCAK - 2023

Organize Sanayi Bölgelerinin çok sayıda çeşitli sanayi tesisi bulundurması nedeniyle, buralardan elde edilen atıksular son derece karmaşıktır. Ayrıca OSB bünyesindeki tesislerin özelliklerine bağlı olarak atıksular yüksek konsantrasyonda organik madde (yaklaşık 3000 mg KOİ/L) içermekle birlikte, kimyasal atık karışımından dolayı toksik bir yapı da göstermektedir. Bu nedenle Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) arıtma tesisi seçimlerinde uzun akış şemalarına yer vermektedir. Genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtımın birlikte yer aldığı arıtma tesisi akım şemaları uygulanmaktadır. Ayrıca OSB'ler su tüketimi fazla olan bölge veya tesisleri barındırdığından su geri kazanımı da son derece önemlidir.

Atıksu arıtımı için membran ünitelerinin seçilmesi, yüksek performans ve çıkış suyunun yeniden kullanılması veya geri kazanılması olanağı açısından oldukça gereklidir. Bununla birlikte OSB atıksularındaki organik maddenin biyolojik parçalanabilirliği de zayıf olabileceğinden konvansiyonel biyoreaktörler yerine jet loop biyoreaktörler gibi yüksek performanslı reaktörlerin tercih edilmesi çok daha küçük alanlarda ve düşük maliyetlerde yüksek kalitede çıkış suyu eldesine imkan vermektedir.

Bu çalışmada Balıkesir OSB atıksuyu kullanılarak arıtımı laboratuvar bünyesinde kurulan Jet Loop Membran Biyoreaktör (JLMBR)'de incelenmiştir. Çapraz akış modunda işletilen seramik membran ile inşa edilen JLMBR sistemiyle yaklaşık 4 saatlik bekletme süresinde 7,5 kg KOİ/m³.gün yükleme altında % 98 arıtma verimine ulaşılmıştır. Sistemde MLSS konsantrasyonu 7,9 mg/L' ye kadar çıkmıştır. Sistem çamur yaşını çok yükseltme imkanı vermekte ve böylece çamur arıtma maliyetini düşürmektedir. Kurulu tesisin 24 saatlik bekletme süresine sahip olarak inşa edildiği düşünüldüğünde, oldukça düşük tesis boyutlarından elde edilen arıtma performansının son derece verimli olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Organize sanayi bölgesi atıksuyu, jet loop biyoreaktör, membran biyoreaktör, ultrafiltrasyon

Bilim Kod / Kodları : 90301, 90319

Sayfa Sayısı : 61

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF BALIKESİR ORGANIZED INDUSTRIAL ZONE WASTEWATER TREATMENT IN A JET LOOP MEMBRANE BIOREACTOR SYSTEM

MSC THESIS

BEHİCE YAĞMUR AYDIN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. BURHANETTİN FARİZOĞLU)

BALIKESİR, JANUARY - 2023

Wastewater obtained from Organized Industrial Zones (OIZ), due to the presence of a number of various industrial facilities, is extremely complex. Moreover, depending on the characteristics of the facilities within the OIZ, the wastewater not only contains a high concentration of organic matter (approximately 3000 mg COD/L), but also shows a toxic structure due to the chemical waste mixture. Therefore, Organized Industrial Zones (OIZ) include long flow charts in treatment plant selections. Generally, treatment plant flow charts are applied; where physical, chemical and biological treatments are situated. Besides water recovery is extremely important for OIZ's as they accommodate regions or facilities with high water consumption.

Choosing membrane units for wastewater treatment is quite necessary in terms of high performance and possibility to reuse or recovery of the effluent water. However, since the biodegradability of organic matter in an OIZ wastewater may be poor, choosing high-performance reactors such as jet loop bioreactors instead of conventional bioreactors allows obtaining a high quality effluent in much smaller areas and at lower costs.

In this study, Balıkesir OIZ wastewater treatment was investigated in Jet Loop Membrane Bioreactor (JLMBR) established in the laboratory. From the JLMBR system built with a ceramic membrane operated in cross flow mode, a treatment efficiency of 98% was achieved under 7.5 kg COD/m³.day loading during a holding period of approximately 4 hours. The MLSS concentration in the system increased up to 7.9 mg/L. The system allows to increase the sludge age and thus reduces the sludge treatment cost. Considering that the installed facility was built having a 24-hour waiting period, it was observed that the treatment performance of a rather small facility has been extremely efficient.

KEYWORDS: Organized industrial zone wastewater, jet loop bioreaktor, membrane bioreactor, ultrafiltration

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1 Endüstriyel Atıksu Arıtımı.....	3
2.1.1 Endüstriyel Atıksularda Ölçülen Parametreler.....	4
2.1.2 Endüstriyel Atıksu Özellikleri.....	6
2.1.3 Endüstriyel Atıksu Arıtım Metotları	7
2.1.3.1 Fiziksel Arıtma Metotları	7
2.1.3.2 Kimyasal Arıtma Metotları	9
2.1.3.3 Biyolojik Arıtım Metotları	9
2.1.3.3.1 Aerobik Prosesler	10
2.1.3.3.2 Anaerobik Prosesler.....	11
2.1.3.4 İleri Arıtma Metotları	14
2.2 Atıksu Arıtımında Membran Sistemleri.....	15
2.2.1 Membran Ayırma Prosesleri	18
2.2.1.1 Mikrofiltrasyon (MF)	18
2.2.1.2 Ultrafiltrasyon (UF).....	19
2.2.1.3 Nanofiltrasyon (NF)	19
2.2.1.4 Ters Osmoz (RO)	20
2.2.2 Membran Biyoreaktörler (MBR)	20
2.2.2.1 Düz plaka Membran Modülleri	23
2.2.2.2 İçi Boşluklu Fiber Membran Modülleri	24
2.2.2.3 Spiral Sargılı Modüller.....	25
2.2.2.4 Tübüler membran modülleri.....	26
2.3 Jet Loop Reaktörler (JLB)	28
2.3.1 Jet Loop Reaktörler ve Atıksu Arıtımında Kullanımı.....	30
3. MATERYAL VE METOD	34
3.1 Materyal	34
3.2 Deneysel Sistem.....	35
3.2.1 Kullanılan Membran Ünitesi.....	37
3.3 Yöntem.....	37
3.3.1 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Analizi	37
3.3.2 Askıda katı madde (AKM) ölçülmesi	38
3.3.3 Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) Ölçümleri	38
3.3.4 pH Ölçümü	39
3.3.5 İletkenlik Ölçümü.....	39

3.3.6 Çözünmüş Oksijen (ÇO).....	39
3.3.7 Transmembran Basıncı (TMB)	39
3.3.8 Çapraz Akış Hızı (v)	39
3.3.9 Membran Akısı (J)	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	41
4.1 Kullanılan Atıksuyun Karakterizasyonu	41
4.2 Jet Loop Biyoreaktörün Kütle Transfer Özellikleri	42
4.2.1 Sistemin Havalandırılması	46
4.3 Balıkesir Organize Sanayi Bölgesi (OSB) Atıksularının Jet Loop Membran Biyoreaktör (JLMBR) Sistemiyle Arıtımının İncelenmesi.....	47
4.3.1 Jet Loop Membran Biyoreaktör Sisteminin Biyolojik Arıtıma İçin Hazır Hale Getirilmesi.....	47
4.3.2 Jet Loop Membran Biyoreaktörde KOİ Gideriminin Performansına Etkisi	48
4.3.3 Organik Yükleme Hızının KOİ Giderimine Etkisi	49
4.3.4 Çamur Yaşının JLMBR Sisteminin KOİ Giderimine Etkisi ve Dizaynı	51
4.3.5 Hidrolik Bekletme Süresinin (HRT) JLMBR'ün KOİ Giderimine Etkisi	52
4.3.6 JLMBR Membran Filtrasyonu Özellikleri	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
6. KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Atıksuların Kimyasal Bileşenleri.....	6
Şekil 2.2: Fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtım metotları.....	7
Şekil 2.3: Biyolojik arıtmada kullanılan mikroorganizmalar.....	12
Şekil 2.4: Bakteri Çeşitleri	13
Şekil 2.5: Membran atıklarının şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.6: Dikey ve çapraz akışlı filtrasyon tekniklerinin şematik gösterimi	17
Şekil 2.7: Membran prosesleri ve genel özellikleri [9].....	18
Şekil 2.8: Membran biyoreaktör şematik gösterimi [12]	21
Şekil 2.9: Dahili ve harici membranların şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.10: Plaka-çerçeve modülünün çalışma prensibi.....	24
Şekil 2.11: Çapraz akışla çalışan bir içi boşluklu fiber membran modülü [9].....	24
Şekil 2.12: Spiral sargılı modülü içerisinde bulunan malzeme katmanları [13].....	26
Şekil 2.13: Tübüler membran çalışma prensibi [9].....	27
Şekil 2.14: Seramik malzemedeki yapılmış çeşitli tiplerde tübüler membranlar [9].	28
Şekil 2.15: Püskürtme başlığının şematik görünümü [23].....	30
Şekil 3.1: Balıkesir OSB atıksu arıtma tesisinin akım şeması	34
Şekil 3.2: JLMBR sisteminin 3 boyutlu görünümü	35
Şekil 3.3: Jet loop membran biyoreaktör (JLMBR) sisteminin akış şeması; 1: degazifikasyon tankı, 2: soğutucu 3: püskürtme başlığı (nozzle) 4: draft tüpü 5: çarpma levhası 6: by-pass hattı 7: reaktör besleme hattı 8: emme hattı 9: pompa 10: membran besleme hattı 11: seramik membran 12: membrandan çıkan süzüntü suyu 13: membrandan çıkan konsantre suyu 14: debimetre 15: vana. 36	36
Şekil 3.4: Çalışmada kullanılan seramik membran modülü	37
Şekil 3.5: KOİ ölçümleri için kullanılan kalibrasyon eğrisi	38
Şekil 4.1: Bu çalışmada kullanılan jet loop membran biyoreaktör sistemi (JLMBR)	43
Şekil 4.2: Yapılan deneylerde ölçülen çözünmüş oksijen değerlerinin Statistica 6.0 programı kullanılarak K_{La} ve C_S^* 'nin hesaplanması	44
Şekil 4.3: K_{La} değerlerinin gaz debisi ve sirkülasyon hızına bağlı olarak değişimi	45
Şekil 4.4: Oksijen temin mekanizması.....	46
Şekil 4.5: Jet loop membran biyoreaktörde KOİ giderimi	49
Şekil 4.6: Organik yükleme hızı değerleri ile KOİ giderme veriminin değişimi.....	50
Şekil 4.7: Çamur yaşıyla KOİ giderim veriminin değişimi	52
Şekil 4.8: Hidrolik bekletme süresinin çıkış KOİ değerine etkisi.....	53
Şekil 4.9: Membrandan elde edilen akı zaman eğrisi	54

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Su kalitesi kontrol yönetmeliği Tablo 19	4
Tablo 2.2: Dahili ve harici membranların karşılaştırılması [12]	22
Tablo 2.3: Membran biyoreaktörlerin avantajları ve dezavantajları	22
Tablo 2.4: Membran modüllerinin karşılaştırılması [9].	23
Tablo 4.1: Balıkesir organize sanayii bölgesi endüstriyel atıksu arıtma tesisine giren ham su parametreleri	41
Tablo 4.2: Balıkesir OSB'ye kabul edilen endüstriyel tesislerin özellikleri	42

SEMBOL LİSTESİ

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
cm	: Santimetre
F/M	: Besin/Mikroorganizma oranı
g	: Gram
HRT	: Hidrolik Bekletme Süresi, sa
JLR	: Jet Loop Reaktör
JLMBR	: Jet Loop Membran Biyoreaktör
m	: Metre
MBR	: Membran Bioreaktör
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre (10^{-9} m)
MF	: Mikrofiltrasyon
MLSS	: Aktif çamuru oluşturan mikroorganizma miktarı, mg/L
MLVSS	: MLSS'nin Uçucu Kısmı, mg/L
NF	: Nanofiltrasyon
K_{La}	: Gaz Transfer Katsayısı
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
L	: Litre
RO	: Ters Osmoz
s	: Saniye
sa	: Saat
SRT	: Çamur Yaşı (Çamur Bekletme Süresi), sa
TMP	: Transmembran Basıncı veya ΔP (Pa)
UF	: Ultrafiltrasyon
V_ç	: Çapraz Akış Hızı
J	: Akı ($m^3/m^2.s$ veya $L/ m^2.sa$)
μ	: Spesifik Biyokütle Büyüme Hızı, $saat^{-1}$
μ_{max}	: Maksimum Spesifik Biyokütle Büyüme Hızı, $saat^{-1}$
μm	: Mikrometre (10 ⁻⁶ m)
ϵ	: Gaz tutulma (%)

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında benden yardımlarını esirgemeyerek her türlü desteği veren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Burhanettin FARİZOĞLU'na, bilgi ve yardımını benden esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Süleyman UZUNER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Numune alma konusundaki yardımlarından dolayı Emre Can DEMİR'e, laboratuvar çalışmaları esnasındaki yardımlarından ve manevi desteğinden dolayı Esmâ Sultan ORTAASYALI'ya ve Işıl CIRİK'a, çalışmam esnasında bana her konuda destek olan Guşef BAGE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana maddi manevi her türlü desteği sağlayan değerli ailem Necmi AYDIN, Taliha AYDIN, Mert AYDIN ve Mehtap ŞAPAZ'a tez çalışmam esnasında gösterdikleri yoğun teşvik ve ilgilerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam boyunca bana her konuda destek olan yardımlarını benden hiç esirgemeyen değerli arkadaşım Fulya BALLAR SEVİNÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir, 2023

Behice Yağmur AYDIN

1. GİRİŞ

Günümüzde hızlı nüfus artışıyla yerleşim alanları hızlı bir şekilde büyümekte bunun yanında insanların yaşam standartları yükselmektedir. Şehirleşmeyle birlikte ortaya çıkan ihtiyaçlar neticesinde sanayileşmede de artış görülmektedir. Sanayi, büyük bir nüfusun ihtiyaçlarını desteklemek için seri üretime izin veren temel bir sektördür. Birçok endüstri, farklı kirleticilere sahip büyük miktarlarda endüstriyel atıksu oluşumuna sebep olmakta ve bu atıksuların endüstriyel atıksu arıtma tesisleriyle uzaklaştırılması gerekmektedir. Endüstriyel sistem, atıkları nedeniyle çevrede de bir endüstriyel kirlenmeye sebep olmaktadır. Sanayinin de hızla gelişmesi endüstriyel kirlenmeyi arttırmakta ve çevre kirliliğini de beraberinde getirmektedir [1].

Endüstriyel tesislerde, yapılan üretim faaliyetlerinin ardından açığa çıkan atıksu endüstriyel atıksu olarak adlandırılır. Endüstriyel atıksular birbirinden çok farklılık göstermektedir. Organik içerikli, inorganik içerikli ve toksik içerikli olabilmektedirler. Yiyecek, içecek, tekstil, tabakhane, kağıt, kereste ve kimya endüstrileri atıklarının her biri farklı içeriklere sahip olacağı için farklı kirliliklere neden olmaktadır. Endüstriyel atıksu çıkışlarına yıkama, ısıtma, taşıma, kalite kontrol ve ayırma süreçleri sebep olmaktadır. Her endüstrinin kullandığı su ihtiyacı miktarı; proseslere, yapılan işin teknolojisine ve çalışan insan sayısına göre farklılık göstermektedir. Endüstriyel tesislerde, proseslerde, proses haricinde ve çalışanların ihtiyaçlarını karşılamak için su kullanılmaktadır. Bundan dolayı endüstriyel atıksular sınıflandırılırken suyu kullandıkları alan ve kirletici özelliklerine dikkat edilmelidir. Bu kapsamda endüstriyel atıksular kullanım amaçlarına göre proses kaynaklı, proses dışı ve evsel nitelikli atıksular olarak üç ana sınıfta değerlendirilebilir. Proses atıksuları, proseslerde gerçekleşen işlemler sırasında fiziksel, kimyasal ya da biyolojik olarak kirlenmiş olan atıksular; proses dışı atıksular ise proses atıksularına oranla daha az kirletici madde içerir ve arıtma ihtiyaçları daha azdır. Endüstriyel atıksunun bünyesindeki evsel nitelikli atıksular ise çalışanların ihtiyaçlarından kaynaklanan atıksular olup, evsel atıksulara benzemektedir. Ancak bazı durumlarda, yapılan iş neticesinde maruz kalınan kirleticiler sebebiyle kirletici parametrelerinin değerleri ve birbirlerine oranları farklılık gösterebilir.

Endüstri kuruluşlarının çevreyi kirletmeden üretim yapabilmesi için arıtma teknolojilerinin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Her sanayinin üretim miktarı, türü, teknolojisi farklı olduğu için arıtım teknolojisi belirlenirken her endüstri ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Endüstriyel atık suların arıtımı, tehlikeli olma ihtimalleri ve biyolojik arıtma yöntemlerine dirençli yapıları nedeniyle limitlere sahiptir. Endüstriyel atık su arıtma tesislerine gelen çeşitli endüstriyel prosesler nedeniyle, standart bir arıtma oluşturmak zordur. Endüstriyel atık sular içerdiği toksik ve zor parçalanır organik bileşikler nedeniyle büyük bir sorun teşkil etmektedir [2]. Ayrıca endüstriyel atıksuların debi ve içeriğinde büyük çapta dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu durum endüstriyel atıksuların en önemli özelliğidir. Arıtma prosesi belirlenirken öncelikle endüstriyel atıksu karakterizasyonuna göre uygun arıtma metotları belirlenmelidir. Proses tasarımı yapılırken ilk başta atıksuyun özellikleri ve daha sonra kirlilik parametrelerinin deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar kullanılarak yol alınır. Dolayısıyla endüstriyel atıksu arıtma tesisleri ve özellikle de OSB'ler için tercihler genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtımın birlikte kullanıldığı uzun akım şemalarına sahip olmaktadır.

Bu çalışmada yüksek performanslı JLB'ün biyoreaktör olarak tercih edildiği ve bir çapraz akış UF ünitesinin eklendiği MBR bir konfigürasyonunun OSB atıksu arıtımında kullanımını incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Endüstriyel Atıksu Arıtımı

Tekstil, tabakhane, kağıt, yiyecek, içecek, boya, kereste vb. endüstrileri, büyük miktarlarda farklı türde zararlı atık suları boşaltır. Endüstriyel kuruluşların atıksularının kabul edilebilir kirlilik limitleri içinde arıtılması gerekir. Bu tür atık suların arıtılması, basit arıtma sistemleri gerçekleştirilemez. Endüstri koluna ve kabul edilen kirlilik limitlerine göre endüstriyel atıksuların arıtılması biyolojik arıtma tesislerinde çoğunlukla tek başına yeterli olmaz. Kirlilik limitlerinin sağlanmadığı durumlarda biyolojik arıtmadan önce atık suyun kimyasal arıtmadan geçirilmesi gerekir. Günümüzde membran biyoreaktörler (MBR'ler) endüstriyel atık suların arıtımında hayati bir rol oynamaktadır [3]. Endüstriyel atıksularda aranacak önemli kirlilik parametreleri; pH, sıcaklık, biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), organik madde miktarı, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), çözülmüş tuzlar, zehirli maddeler, renk, bulanıklık, askıda katı madde (AKM), nütrient madde, yağ-gres, radyoaktif madde, deterjanlar, fenol ve fenol türevleri, bakteriyolojik kirleticiler, tat-koku yaratan bileşikler, asitler, bazlar ve petroldür. Balıkesir organize sanayi bölgesine gelen atık sular karışık endüstriyel atık sular olduğu için Tablo 2.1 de gösterilen Su Kalitesi Kontrol Yönetmeliği (SKKY) Tablo 19'da yer alan deşarj standartları aralıklarına tabii olmalıdır.

Tablo 2.1: Su kalitesi kontrol yönetmeliği Tablo 19

Parametre	Birim	Kompozit numune (2 saatlik)	Kompozit numune (24 saatlik)
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	mg/L	400	300
Askıda Katı madde (AKM)	mg/L	200	100
Yağ ve gres	mg/L	20	10
Toplam fosfor	mg/L	2	1
Toplam krom	mg/L	2	1
Krom (Cr ⁺⁶)	mg/L	0.5	0.5
Kurşun (Pb)	mg/L	2	1
Toplam siyanür (CN ⁻)	mg/L	1	0.5
Kadmiyum (Cd)	mg/L	0.1	-
Demir (Fe)	mg/L	10	-
Florür (F ⁻)	mg/L	15	-
Bakır (Cu)	mg/L	3	-
Çinko (Zn)	mg/L	5	-
Civa (Hg)	mg/L	-	0,05
Sülfat (SO ₄)	mg/L	1500	1500
Toplam kjeldahl-azotu	mg/L	20	15
Balık biyodeneyi (ZSF)	-	10	10
pH	-	6-9	6-9

2.1.1 Endüstriyel Atıksularda Ölçülen Parametreler

Endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde genellikle aşağıda sıralanan parametreler ölçülür ve izlenir.

pH;

Çözeltinin asit ya da baz olma özelliğinin şiddetini göstermektedir. pH hidrojen iyonunun aktivitesini gösterir. pH değerinin su kalitesi kontrol yönetmeliği (SKKY) Tablo 19'da karışık endüstriyel atık suların alıcı ortama deşarj standartlarına göre 6-9 aralığında olması gerekmektedir. pH endüstriyel atıksular için kontrol edilmesi gereken önemli parametrelerin başında gelir. Bu maksatla gerekli görüldüğünde nötralizasyon uygulanır.

Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ);

Atıksu içerisindeki organik maddelerin konsantrasyonları kirlilik derecesinin ölçüsü olarak kabul edilir ve organik maddenin ölçüsü olarak biyokimyasal oksidasyon sırasında harcanan oksijen miktarı esas alınır. Biyokimyasal oksidasyon suda çözülmüş oksijeni kullanarak yapılan bir yanma olayıdır. OSB'de bulunan endüstriyel tesis çeşitlerine bağlı

olarak yüksek ya da düşük değerlerde olabilir. Özellikle gıda sanayi kaynaklı atıksuların BOİ içerikleri yüksektir. BOİ organik maddenin kolay parçalanabilir fonksiyonunu temsil eder.

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ);

Evsel ve endüstriyel atıksularının kirlilik derecesini belirlemede kullanılan önemli parametrelerden biri olan kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), redoks reaksiyonlarıyla oksitlenmesi esasına dayanır. Kimyasal oksidasyonda bütün organik maddeler oksitlenir. Aynı amaçla kullanılan biyokimyasal oksijen ihtiyacıyla aralarındaki en önemli fark laboratuvarda daha kısa sürede sonuca ulaşılabilmesidir. Laboratuvarda BOİ değerine ulaşabilmek için 5 gün beklenmektedir. KOİ değerleri ise 3 saat gibi kısa bir sürede ölçüldüğünden daha kullanışlı bir parametredir [4]. Endüstriyel atıksular için KOİ'nin karakterizasyonu iyi yapıлып içerisindeki kolay parçalanabilir ve inert fonksiyonları belirlenmeli ve ona göre proses seçimi yapılmalıdır.

Çözünmüş Oksijen (ÇO);

Havalandırma arıtma sistemlerinde bir diğer önemli parametre olan çözünmüş oksijen, su içerisinde çözünen oksijeni sürekli olarak sağlamaktadır. Oksijen sınırlamasının engellenmesi amaçlandığından oksijenin aktarım hızının, tüketme hızından büyük olması gerekmektedir.

Askıda Katı Madde (AKM);

Askıda katı madde, atıksu içerisindeki filtre edilemeyen katı maddelerdir. Endüstriyel tesislerin çeşidine bağlı olarak yüksek ya da düşük olabilir. AKM miktarının tam olarak tespit edilmesi önemlidir. Bu parametreye göre hem ön çöktürme (gerekliyse) hem de kimyasal çöktürme üniteleri tasarlanmaktadır.

Toplam Çökebilir Katı Madde (TÇKM);

Ağırlıkları sebebiyle kendiliğinden çökebilir katı maddeler olup, parçacıkların büyüklüğüne ve yoğunluğuna bağlı olarak çökme hızı gerçekleşir. Ölçüm işlemi çoğunlukla hacimsel olarak yapıldığından Imhoff konileri kullanılır.

TÇKM miktarı da önemli bir parametredir. OSB endüstriyel tesislerin çeşidine bağlı olarak yüksek miktarlarda gelebilir. Dolayısıyla özellikle fiziksel arıtma ünitelerinin iyi şekilde dizaynını gerektirmektedir.

2.1.2 Endüstriyel Atıksu Özellikleri

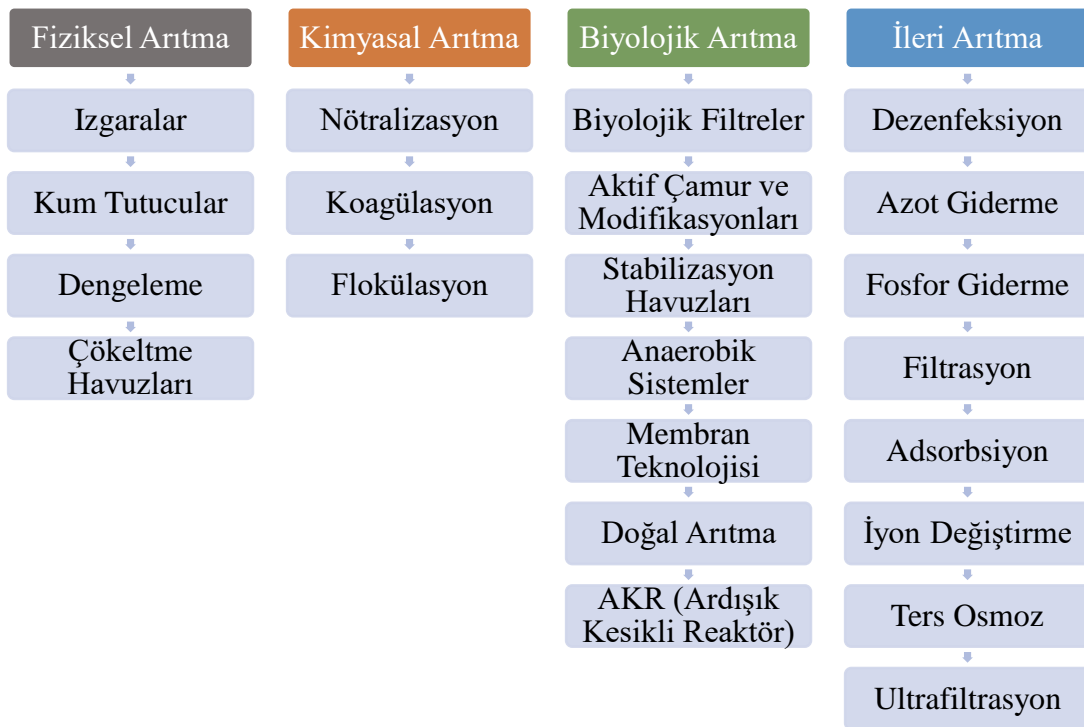
Endüstriyel atık su üretimi, ekosistemlerin sağlığı için bir risk oluşturan kirleticiler içermesi ve bunların salınması nedeniyle küresel bir endişe konusudur. Diğerlerinin yanı sıra madencilik, ilaç, tekstil, tarım endüstrisi, plastik endüstrisi gibi endüstriler, çevre üzerinde olumsuz etkisi olan tehlikeli kirleticiler içeren büyük miktarlarda atık su üretir. Endüstrilerden kaynaklanan atık sularda ağır metaller, organik kirleticiler, boyalar, mikroplastikler (MP) ve nano-plastikler (NP) tespit edilmiştir. Bu kirleticiler, su kütlelerinden uzaklaştırılmak için karmaşık süreçler gerektirir. Bu tehlikeli kirleticileri atık sudan uzaklaştırmak veya azaltmak için, bu kirleticilerin konsantrasyonunu azaltmayı amaçlayan fiziksel, kimyasal, biyolojik olmak üzere çeşitli stratejiler önerilmiştir [6]. Atıksu fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri ile karakterize edilir. Fiziksel özellikler; renk, koku, katılar ve sıcaklıktır. Kimyasal bileşenler; organik, inorganik ve gazlar olarak 3 gruba ayrılmakta ve aşağıdaki Şekil 2.1 de içerikleri gösterilmektedir. Biyolojik bileşenler ise bitkiler, bakteriler ve virüslerdir.



Şekil 2.1: Atıksuların Kimyasal Bileşenleri

2.1.3 Endüstriyel Atıksu Arıtım Metotları

Endüstriyel atık su arıtma tesislerine farklı endüstri kollarından gelen farklı kirletici parametrelere sahip atıksular olması nedeniyle standart bir arıtma tasarlamak zordur. Endüstriyel atık sular içerdiği toksik ve zor parçalanır bileşikler nedeniyle büyük bir sorun teşkil etmektedir. Endüstriyel atıksuları Şekil 2.2’de ayrıntılı olarak açıklanan fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma yöntemleriyle arıtmak mümkündür. Bununla birlikte geliştirilen membran teknolojileri endüstriyel atıksular için çok önemli bir alternatif sunmaktadır.



Şekil 2.2: Fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtım metotları

2.1.3.1 Fiziksel Arıtım Metotları

Izgaralar;

Arıtma tesislerinde kullanılan ızgaralar kaba ve ince olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Atıksu içindeki katı maddelerin pompa, mekanik aksam vb. tesisata zarar vermemesi için ve diğer arıtma ünitelerine gelecek yükü hafifletmek amacıyla fiziksel arıtmanın ilk aşaması olarak dizayn edilmektedir [4].

Kum Tutucular;

Atıksuda bulunan kum, çakıl, taş, cüruf gibi kolayca çökebilen maddeler pompalarda, kanallarda, borularda ve çökeltme havuzlarında tıkanmalara sebep olmaktadır. Bu tarz çökelebilen maddeler tesis girişlerinde ızgaralardan sonra inşa edilen kum tutucular vasıtasıyla sudan uzaklaştırılarak, diğer arıtma ünitelerinde yaşanabilecek tıkanmaları önlemektedir. Kum tutucular dikdörtgen planlı yatay akışlı, dairesel planlı, düşey akımlı ve havalandırılmalı olarak sınıflandırılabilir [4].

Dengeleme;

Biyolojik arıtma sistemlerinde debinin tesisi sürekli besleyemediği durumlarda ve organik yük salınımlarını kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Kimyasal arıtma sistemlerinde ise debi salınımlarının haricinde pH ve kimyasal madde beslemesinin kontrolü için kullanılmaktadır. Dengeleme havuzlarında karıştırma ve havalandırma işlemleri yapılmakta ve atıksu homojen olarak tesise iletilmektedir.

Dengelemenin amacı, atıksu karakterindeki dalgalanmaları kontrol ederek diğer arıtma ünitelerinde yaşanacak sorunların önüne geçmektedir. Özellikle endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde dengeleme havuzu bulunması mutlak gerekmektedir. Endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde, sisteme şok yüklemeyi önleyerek dalgalanmaları engellemek, pH ve kimyasal madde miktarını kontrol etmek, üretim yapılmadığı zamanlarda da arıtma sistemini sürekli beslemek ve sisteme yüksek konsantrasyonda toksik maddelerin girişini engellemek amacıyla dengeleme havuzlarının bulundurulması gerekmektedir [4].

Çökeltme Havuzları;

Çökeltme havuzlarında atıksu içerisinde bulunan çökebilen maddelerin çökeltilerek atıksudan ayırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Çöktürme havuzlarında çökeltme ile sıvıdan çamur alınırken aynı zamanda da yüzen maddeler yüzeyden sıyrılarak alınmaktadır. Bu şekilde sıvıların katılardan ayrılmasıyla bir miktar AKM ve BOİ de giderimi yapılır ve bu durum biyolojik arıtma esnasında arıtılacak organik yük miktarı azaltmış olur. Çökeltme havuzları ön, son ve kimyasal çökeltme havuzları olarak kullanım amaçlarına göre tasarlanır [4].

2.1.3.2 Kimyasal Arıtma Metotları

Atıksuda çözülmüş halde bulunan kirleticilerin çözünürlüğü düşük bileşiklere dönüştürülmesi ve askıda maddelerin çökerek giderilmesinin sağlanması amacıyla kimyasal arıtma metotları kullanılmaktadır [4]. Karma endüstrilerin ürettiği atıksularda ise, kimyasal arıtma biyolojik arıtmaya engel olacak atıksu bileşenlerini sistemden ayırmak amacıyla yapılmaktadır. Bu nedenle birçok proses seçimli olarak kullanılmaktadır.

Nötralizasyon;

Atıksuların pH'nın ayarlanması işlemine Nötralizasyon denilmektedir. Endüstriyel atıksular asidik ve bazik karakterli olduğundan, alıcı ortama veya biyolojik arıtma sistemine deşarj edilmeden önce standartlarının sağlanması için nötralize edilmeleri gerekmektedir [4].

Koagülasyon (Hızlı Karıştırma);

Koagülasyon, koagülant olarak adlandırılan (alum, kireç, demir klorür, demirsülfat gibi) kimyasal maddelerin atıksuyla beraber homojen olarak hızlı bir şekilde karıştırma işlemidir. Koagülasyon işlemi esnasında yüksek hızlı mekanik karıştırıcılar kullanılmaktadır. Koagülasyon işlemi neticesinde askıda ve kolloid formdaki atık maddeler giderilmektedir [4].

Flokülasyon (Yumaklaştırma);

Koagülasyon işlemi ardından suyun yavaş bir şekilde karıştırılıp, pıhtılaştırmayla oluşan tanecikler birleşerek daha kolay çökebilen yumaklar oluşturmaktadır [4].

2.1.3.3 Biyolojik Arıtım Metotları

Birçok OSB bünyesinde yüksek organik kirletici çıkaran endüstriyel kuruluş bulunmaktadır. Dolayısıyla atıksuların mutlaka biyolojik arıtıma sokulması gerekmektedir. Atıksuyun içinde yer alan organik maddeler, mikroorganizmalar tarafından parçalanarak substrat ve enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Mikroorganizmaların yaptığı bu parçalama işlemine biyolojik arıtma denir. Biyolojik atık su arıtımı, atıksuyun kimyasallar yerine mikroorganizmalarla arıtıldığı konvansiyonel bir tekniktir. Bu sayede atıksuların kimyasal arıtımından kaynaklanan su kütlelerinde kimyasal birikmesi veya alg patlaması gibi olumsuz etkilerin önüne geçmeye çalışılır. Biyolojik atık su arıtımında, suda bulunan farklı kirletici türlerini ve suyun biyokimyasal oksijen ihtiyacını azaltmak için birçok

aerobik ve anaerobik mikroorganizma çeşitli yöntemlerle kullanılabilir. Aktif çamur, atık su arıtma tesislerinde mikrobiyal reaksiyonları başlatmak için kullanıldığından atıksuyun biyolojik arıtımının da çok önemli bir parçasıdır. Biyolojik atık su arıtımı yavaş bir süreçtir ve suyu arıtmak, depolamak için geniş bir alan gerektirir. Bu sebeple yüksek sermaye ve işletme maliyetine yol açar. Atık suyun biyolojik olarak arıtılması, organik kirleticileri giderir ancak deterjanlar, kozmetik atıklar vb. gibi kirletici türlerinin tamamını ortadan kaldırmaz. Bunun için özel dizaynlar gerekir. Aerobik (havalı) ve anaerobik (havasız) olarak ayrılan biyolojik arıtma yöntemleri ortamda bulunan oksijen miktarına bağlı olarak sınıflandırılabilir [4].

2.1.3.3.1 Aerobik Prosesler

Ortamda oksijen varlığında gerçekleşen arıtma yöntemi olup, organik maddelerin oksidasyon ve sentezleme yolu ile giderilmesi işlemidir. Aerobik arıtma sistemleri organizmaların askıda ve sabit film prosesleri olarak bulunma durumlarına göre sınıflandırılır [4].

Aktif Çamur Prosesi;

Kolloidal ve çözülmüş maddelerin mikroorganizmalar vasıtasıyla çökebilir floklara dönüştürüldüğü prosestir. Aktif çamur prosesinde havalandırma havuzu içindeki mikroorganizmalar askıda tutulur ve sistemin bir sonraki aşaması olan çökeltme havuzuna çökeltim özelliği artan yumaklar aktarılır. Arıtılan su deşarj edilirken sistemde çöken çamurun bir kısmı geri devir yoluyla istenen mikroorganizma konsantrasyonunu sağlamak amacıyla havalandırma havuzuna aktarılır. Fazla çamur ise çamur işleme ünitelerine gönderilerek sistemden uzaklaştırılıp bertarafı yapılır. Biyokütlenin aktif çamur sisteminde kalış süresi, nütrient takviyesi, suyun sistemdeki bekleme süresi gibi faktörlere bağlı olarak klasik, tam karışım, kademeli havalandırma, kontakt stabilizasyonlu, uzun havalandırma, oksidasyon hendeği gibi çeşitli aktif çamur alternatifleri kullanılmaktadır [4].

Biyofilm Prosesleri;

Biyofilm sistemlerinde mikroorganizmalar bir yüzeye tutunarak büyür. Gerekli oksijen ortama ve suya transfer edilerek mikroorganizmaların bu oksijeni kullanıp organik maddeleri parçalaması sağlanır. Daha sonra kopan biyofilmler toplanarak çöktürme

havuzlarında sudan ayrılır ve arıtma tamamlanmış olur. Damlatmalı filtre ve biyodiskler bu proseste kullanılan sistemlerdir [4].

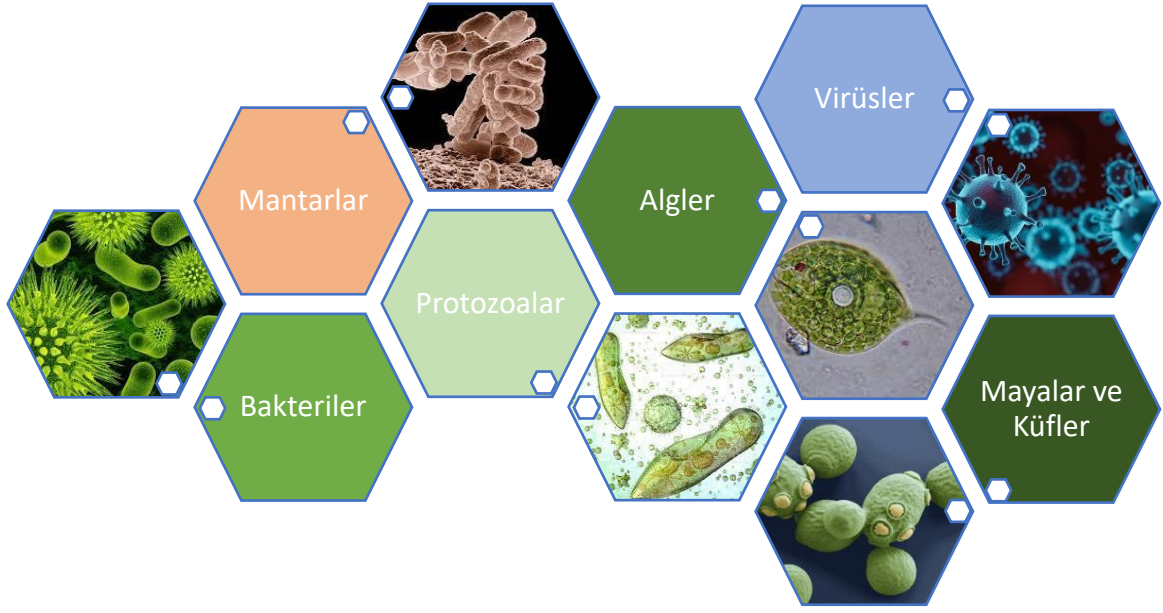
Stabilizasyon Havuzları;

Stabilizasyon havuzları, bir diğer arıtma ünitesidir. Büyük hacim ve geniş alana sahip, uzun süre bekletme özelliği barındırabilen arıtma üniteleridir. Biyokimyasal faaliyetlerin ortam, havuzların geometrisi ve hacmine göre kirlilik yükleri gibi özelliklerine bağlı olarak arıtmayı gerçekleştirirler. Ortam özellikleri sıcaklığa göre değişim gösterir. Lagün olarak da adlandırılan bu havuzlar, aerobik stabilizasyon, fakültatif stabilizasyon, anaerobik stabilizasyon, olgunlaştırma havuzları ve havalandırılmalı lagünler olarak gruplara ayrılırlar [4].

2.1.3.3.2 Anaerobik Prosesler

Anaerobik prosesler oksijen yokluğunda gerçekleşen arıtma yöntemi olup, organik kirliliği yüksek olan atıksuların arıtımında kullanılır. Anaerobik reaksiyonlar yüksek molekül ağırlıklı çözülmüş organik ve askıdaki organiklerin hidrolizi, küçük organik moleküllerin parçalanarak asetik asite (uçucu yağ asitleri) dönüşümü, asetik asidin aynı zamanda hidrojen ve karbondioksitin metana dönüşümüyle gerçekleşir. Anaerobik arıtmada mevcut arıtma yöntemleri, sürekli karışım tank reaktörü, anaerobik filtre ve akışkan yataklı sistemlerdir [4].

Biyolojik arıtma yöntemlerinde kullanılan mikroorganizmalar aerobik, anaerobik ve fakültatif mikroorganizmalar olarak sınıflandırılabilir. Aerobik mikroorganizmalar, oksijenli ortamda yaşayabilen canlılardır. Anaerobik mikroorganizmalar, oksijensiz ortamda yaşayabilen, ihtiyaç duyulan enerjiyi organik bileşiklerden sağlayan canlılardır. Fakültatif mikroorganizmalar ise oksijenli ortamda aerobik mikroorganizmalar gibi, oksijensiz ortamda anaerobik mikroorganizmalar gibi yaşayabilen canlılardır. Biyolojik arıtmada kullanılan mikroorganizmalar Şekil 2.3'te gösterilmiştir [4].



Şekil 2.3: Biyolojik arıtmada kullanılan mikroorganizmalar

Bakteriler;

Biyolojik arıtmada en yaygın olarak kullanılan mikroorganizmalar bakterilerdir. Bakteriler tek hücreli mikroorganizma grubudur. Binlerce değişik çeşidi vardır. Bakteriler şekillerine göre, küresel, silindirik ve spiral biçimde olarak 3 gruba ayrılmaktadır. Bakterilerin atıksu arıtma tesislerinde istenen verime ulaşabilmesi için ortamının uygun olması gerekmektedir. Ortamda pH değeri 6,5-8,5 arasında, sıcaklık 15-40 °C ve çözülmüş oksijen değerinin 2 mg/l 'den büyük olması şartlarının sağlanması gerekmektedir. Buldukları ortama uzun süre hava verilmezse bakteriler ölürlür. Bakteriler, Şekil 2.4'te belirtildiği gibi ototrofik ve heterotrofik bakteriler olarak 2 gruba ayrılmaktadır [4].

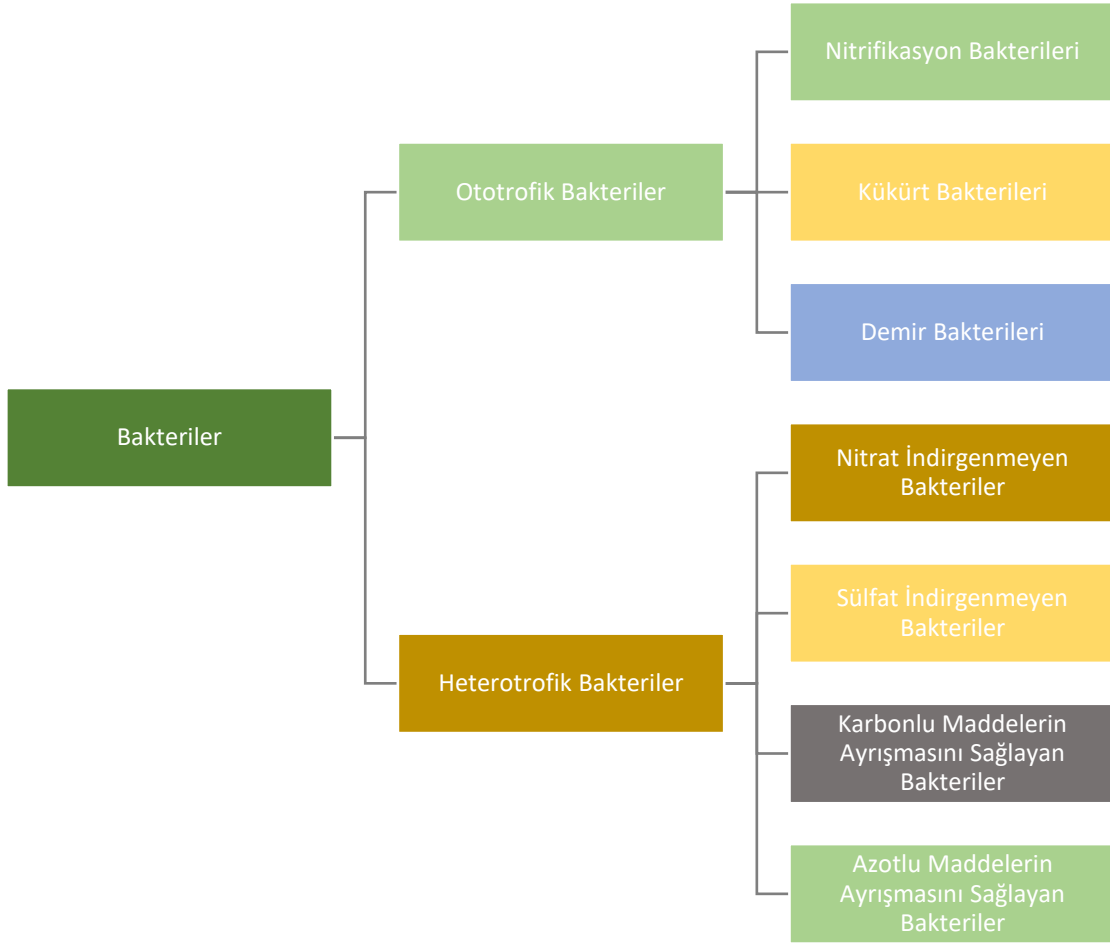
Protozoalar;

Bakterilerden daha iri olan protozoalar bakteriler gibi tek hücreli mikroorganizmalardır. Suda çökemeyen yani süspanse haldeki maddeleri tükettikleri için atıksu arıtma sistemlerinde olumlu etki yaratmaktadır [4].

Mantarlar;

Genel fizyolojik özellikleri bakımından bakterilerle benzerlik göstermektedir. Ancak ortamın pH'ı ve sıcaklığı bakımından bakterilerden daha dayanıklıdırlar. Mantarlar, pH 2-9 değerleri arasında faaliyet gösterebilirler. Mantarlar iplikli bitkilerdir ve biyolojik arıtmada

ipliksilerin baskın hale gelmesi şişkin çamur oluşumuna neden olur. Aktif çamur sistemlerinde önemlidir ve bakteriler pasif durumdayken mantarlar baskın hale gelir. Aktif çamur havuzunu tamamen doldurarak çamurun çökmesi engellenir ve olumsuz bir durum yaşanmasına sebep olunur. Böyle bir durumda havuza klor veya göztaşı eklenmelidir. Alınan tedbirler yeterli olmazsa havuz komple boşaltılarak yeniden bakteri üretimi yapılması gerekmektedir [4].



Şekil 2.4: Bakteri Çeşitleri

Algler;

Algler, ortamda bol oksijen sağlanması için özellikle yetiştirilir. Suda bulunan inorganik maddeleri kullanarak fotosentez yapar. Pigment taşırlar ve su içerisinde fotosentez yaparak su içerisindeki oksijen miktarını arttırlar [4].

Virüsler;

Virüsler parazit olarak yaşar ve arıtma sistemlerinde aktif olan bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Arıtma verimini düşürdükleri için biyolojik arıtma sistemlerinde varlıkları istenmemektedir [4].

Mayalar ve Küfler;

Mayalar tek hücreli organizmalardır. Mayalar atıkların yararlı ürünlere dönüştürülmesini sağlamaktadır. Arıtma sistemlerinde ağır metallerin giderilmesinde etkili olurlar. Küfler, dayanıklı, nemli yüzeylerde büyüyen ve sulu ortamlarda öbek oluşturan hücrelerdir [4].

2.1.3.4 İleri Arıtma Metotları

Dezenfeksiyon;

Dezenfeksiyon, arıtılan su alıcı ortama deşarj edilmeden önce su içerisinde bulunan bakteri ve virüslerin uzaklaştırılması için yapılan işlemdir. Klorla yapılan dezenfeksiyon işlemi en yaygın olarak kullanılmaktadır. Klor haricinde ozon ve ulyaviyole ile yapılan dezenfeksiyon yöntemleri de kullanılmaktadır [4].

Azot Giderme;

Nitrifikasyon, atıksu içerisindeki amonyumun önce nitrite sonra nitrata dönüştürülmesidir. Denitrifikasyon ise anoksik şartlar altında nitratin önce nitrite sonra azot gazına dönüştürülerek ortamdan uzaklaştırılmasıdır. Nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemleriyle azot giderimi yapılmaktadır [4].

Fosfor Giderme;

Fiziksel, kimyasal ve biyolojik metotlar kullanılarak fosfor giderimi yapılabilir. Biyolojik arıtmada fosfatın mikroorganizmalarca alınmasıyla fosfor giderimi sağlanır [4].

Filtrasyon;

Filtrasyon, fiziksel, biyolojik ve kimyasal arıtma metotlarında giderilemeyen AKM ve kolloidlerin tutulması için uygulanmaktadır [4].

Adsorbsiyon;

Adsorbsiyon sudaki çözülmüş maddelerin uygunluğuna göre katı, sıvı veya gaz ortamlarında toplanması işlemidir. Deşarj edilecek çıkış suyunun istenilen kaliteyi

sağlayabilmesi için toz veya granül olarak kullanılan bir aktif karbon ortamından geçirilir [4].

İyon Değişirme;

Endüstriyel atıksu arıtımında, atıksu bünyesinde istenmeyen anyon ve katyonların giderilmesi için kullanılmaktadır. Genellikle aşağı akışlı kolon tipinde olup, atıksu basınç altında kolona yukardan girer ve ilerleyerek aşağıda ortamdan uzaklaşır [4].

Ters Osmoz;

Genellikle endüstriyel atıksuyun geri kazanılarak yeniden kullanılması amacıyla kullanılan bir sistemdir. Organik maddelerin sudan uzaklaştırılması ya da yeniden kullanılarak geri kazandırılması amacıyla yüksek basınçla çalışan bir sistemdir [4].

Ultrafiltrasyon;

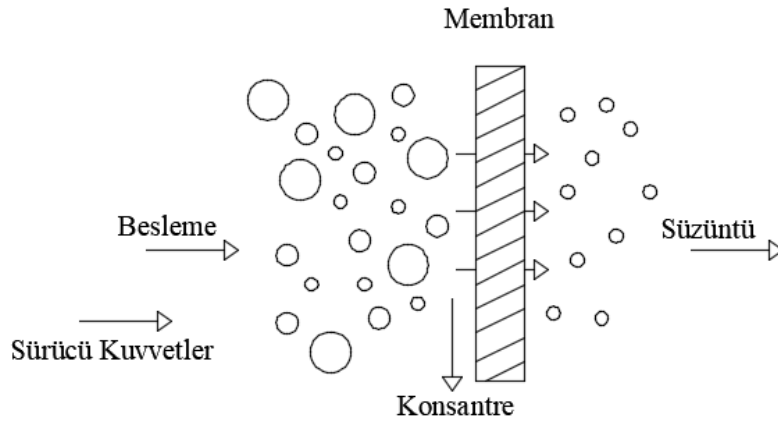
Yarı geçirgen membranların basınçlı membran filtrasyon metodu olup, ters osmoza oranla daha düşük basınç uygulanır [4].

2.2 Atıksu Arıtımında Membran Sistemleri

Atıksuyun geri kazanımı son yıllarda geliştirilen ileri arıtma yöntemleriyle mümkün olmaktadır. Bu durum çok su kullanılan endüstri alanlarında su sarfiyatını önlemek amacıyla ve ekonomik olarak avantaj sağlamaktadır. Membran prosesleri atıksuların yeniden kullanılmasını sağlayan arıtım yöntemleridir. Kullanılmış suların alternatif su kaynağı olarak değerlendirilmesi için gerekli teknolojiye sahiptir. Membran teknolojileri, evsel atıksular, endüstriyel atıksular ve kirlenmiş yüzey sularının arıtımında da kullanılmaktadır. Endüstriyel atık suların arıtılması, tehlikeli ve karmaşık yapıları nedeniyle sınırlamalara sahiptir ve biyolojik arıtma yöntemlerine karşı direnç gösterir. Membranlar, endüstriyel atıksuların arıtımında da önemli bir yere sahiptir. Endüstriyel atıksular birçok endüstri türünün atıklarını homojen bir şekilde içinde barındırmaktadır. Membran prosesleri karışım halindeki maddeleri birbirinden ayırmak amacıyla kullanıldığından endüstriyel atıksular için ehemmiyeti büyüktür [7].

Membran, seçici geçirgen bir tabakadır. İki farklı fazı veya ortamı birbirinden ayırır. Fazlar arasında maddelerin seçici bir şekilde taşınmasını sağlar. Membranlar gaz ayrımı, katı-sıvı ayrımı ve sıvı-sıvı ayrımı yapılması gereken durumlarda kullanılır. Karışım halindeki

birçok maddenin ayrılmasını sağlar. Membranlar çözünmüş maddelerin ayrımı ve tutulmak istenen partiküllerden maddelerin ayrılmasını amaçlar. Membran proseslerde ortamlar arasındaki sürekli kütle transferi, sürücü kuvvetlerin uygulanmasıyla gerçekleşmektedir. Sürücü kuvvetler, fazlar arasında oluşturulan basınç, sıcaklık, konsantrasyon veya elektriksel potansiyel farkıdır [8]. Ayırma işlemleri sürücü kuvvetlerin yardımıyla iki ayrı akıma ayrılarak gerçekleşmekte ve Şekil 2.5'te gösterildiği gibi membrandan geçene süzüntü, geçemeyene ise konsantre adı verilerek tanımlanmaktadır.

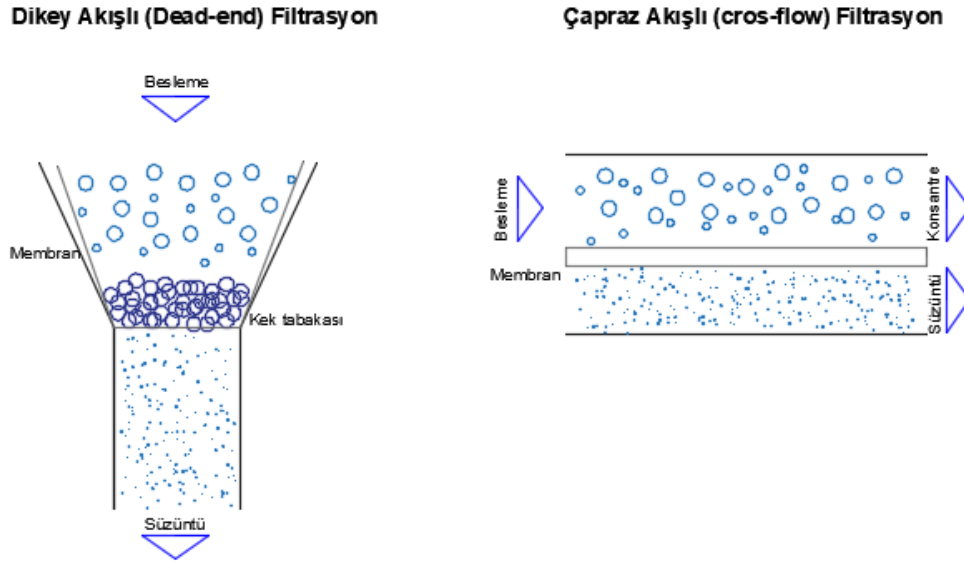


Şekil 2.5: Membran atıklarının şematik gösterimi

Membran proseslerinde, prosesin verimi ve performansı membranın seçiciliği ve akısıyla belirlenir. Birim zaman içerisinde membranın birim alanından geçen sıvı miktarına akı denilmektedir. Membran seçiciliği ise karışım içerisindeki madde veya maddeleri geçirmeyi reddetmesi olarak tanımlanmaktadır [9].

Membran filtrasyonda sürücü kuvvet olarak kullanılan basınç farkı nedeniyle molekül taşınımı gerçekleşir. Membran filtrasyonu sırasında partikül maddeler zamanla membran üzerinde birikirler. Membran filtrasyonunda düşük enerji kullanımıyla yüksek bir süzüntü akısı elde etmek amaçlanmaktadır. Membran üzerinde biriken maddeler süzüntü akısında düşüşe sebep olarak istenmeyen sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Membran yüzeyinde uzun süre kalarak membran yüzeyini örten bu birikme kek tabakası olarak tanımlanmaktadır. Beslemenin membrana dik bir şekilde yapıldığı klasik filtrasyonda kek tabakası sürekli artış göstermektedir. Oluşan kek tabakası beslemenin membran yüzeyine teğet bir şekilde

yapıldığı çapraz akışlı filtrasyonda ise belli bir süre sonra sabit bir kalınlığa ulaştırarak başka bir membran görevi görmektedir [9].



Şekil 2.6: Dikey ve çapraz akışlı filtrasyon tekniklerinin şematik gösterimi

Dikey akışlı membran proses modu (Dead-end);

Sıvının, membran yüzeyine doğru basınçla gönderildiği membran akış tekniğidir. Membranla karşılaşan sıvı içerisindeki por çaplarından büyük moleküller membran yüzeyinde tutulur ve membranın diğer tarafına sıvı çıkışı sağlanır. Membran üzerinde biriken kirlilik bir süre sonra yoğunlaşarak kek tabakası oluşturur. Bu kek tabakası sebebiyle membrana gelen sıvı por çaplarına göre değil kek tabakası üzerinde bulunan boşluklara göre arıtımı gerçekleştirir ve bu sebeple membranın ömrü azalmaktadır. Membranın yeniden faaliyet gösterebilmesi için temizlenmesi ya da değiştirilmesi gerekmektedir. Dikey akışlı membran proseslerinde Şekil 2.6'te gösterildiği gibi kek tabakası sürekli artış göstermekte ve bu sebeple akı miktarında sürekli düşüş olmaktadır [9].

Çapraz akışlı membran proses modu (Crossflow);

Sıvının, membran yüzeyine teğet bir şekilde gönderilerek zar boyunca bir basınç farkı oluşturulması amacıyla uygulanan bir membran akış tekniğidir. Bu akış tekniği membrandan bazı partiküllerin geçişine sebep olsa da küçük partiküllerin membran

üzerinde kek tabakası oluşturmasını önlemektedir. Çapraz akışlı membran prosesleri dikey akışlı membran proseslerine göre daha uzun ömürlü olmaktadır. Çapraz akışlı membran proseslerinde Şekil 2.6'te gösterildiği gibi kek tabakası bir süre sonra sabit bir kalınlığa ulaştığından akı miktarı da sabitleşmektedir [9].

2.2.1 Membran Ayırma Prosesleri

Moleküllerin boyutlarına ve kütlelerine göre ayırt edilen membran ayırma prosesleri, Şekil 2.7'de genel özellikleri ile açıklanmaktadır [10].

Membran Prosesi	MF	UF	NF	RO
Membranın Tipi	Gözenekli	Gözenekli	Gözeneksiz	Gözeneksiz
Membranın Yapısı	Simetrik/Asimetrik	Asimetrik	Asimetrik/İnce film kompozit	İnce film kompozit
Sürücü Kuvveti	Hidrostatik basınç	Hidrostatik basınç	Hidrostatik basınç	Hidrostatik basınç
Kullanım Alanları	AKM giderimi	Virüsler, kolloidler, makromolekül giderimi	İyonlar ve renk giderimi, suyu yumuşatma	İyonlar ve küçük moleküllerin giderimi
Performans Göstergesi	Gözenek çapı	MWCO	MgSO ₄ giderilmesi	NaCl giderilmesi
Membranın Tarzı	Düz plaka, tübüler ve içi boşluklu fiber	Düz plaka, tübüler, ve içi boşluklu fiber	Düz plaka, içi boşluklu fiber	Düz plaka
İşletme Basıncı	0,1-2	0,5-5	3-15	8-60

Şekil 2.7: Membran prosesleri ve genel özellikleri [9].

2.2.1.1 Mikrofiltrasyon (MF)

Gözenek boyutu 0,05-5 μm olan mikrofiltrasyon, basınç sürüclü bir membran ayırma yöntemidir. Düşük basınçla çalıştırılmaktadır. Por büyüklüklerinden geçemeyecek atıksu içerisindeki partiküller, mikroorganizmalar, virüsler ve kolloidal maddelerin giderilmesi amaçlanmaktadır. Mikrofiltrasyonda akım membrana paralel yapılmaktadır. Mikrofiltrasyonda membrana besleme yapılırken beslenen su içerisindeki çözünmüş veya katı haldeki maddeler porlar arasından geçerken zamanla membranda veya yüzeyinde

kirlilik birikmesine sebep olmaktadır. Bu biriken kirliliğin oluşturduğu yapı konsantrasyon polarizasyonu olarak tanımlanmaktadır. Konsantrasyon polarizasyonu zamanla daha fazla yoğunlaşarak bir kek tabakası haline dönüşür. Konsantrasyon polarizasyonu bir süre sonra membranın bir parçası gibi davranarak ayırma işlemine dahil olur ancak kek tabakasının sebep olduğu akı azalmasına vesile olarak membranın performansını düşürür. Bu durumda membranın temizlenmesi ya da yenilenmesi gerekeceğinden ekonomik olarak soruna sebebiyet verir. Mikrofiltrasyon, ters osmoz ve nanofiltrasyondan önce ön arıtma seçeneği olarak kullanılabilir. Mikrofiltrasyon membranlarının su sektörü, metal işleme, gıda, kağıt, ilaç endüstrisi gibi endüstriyel alanlarda uygulamaları mevcuttur [9].

2.2.1.2 Ultrafiltrasyon (UF)

Gözenek boyutu 0,05-1 µm arasında değişen ultrafiltrasyonda basınç sürücülü bir membran ayırma yöntemidir. Por büyüklüklerine göre mikrofiltrasyon ve nanofiltrasyon arasında kalmaktadır. Ultrafiltrasyonda makro moleküller ve kolloidlerin moleküler büyüklüğe, şekle ve iyonik yüke bağlı olarak tutma işleminin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Maddelerin iyonize olma seviyeleri moleküler ağırlığı ayırma sınırı olan MWCO ile ifade edilir. Belirli bir moleküler ağırlığı ayırma değerinin altındaki maddeler membranda tutulamaz. Bu değer her membran için farklılık gösterir. MWCO değeri, çalışma şartlarına, besleme çözeltisi içerisindeki kimyasal içeriğe ve moleküler özelliğine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ultrafiltrasyonda molekül ağırlığı 1.000-1.000.000 arasında kalan maddeler tutulmaktadır. Ultrafiltrasyonda da mikrofiltrasyon gibi düşük basınçla çalışmakta, membrana paralel akım yapılmakta ve konsantrasyon polarizasyonu yaşanmaktadır. Ters osmoz prosesinden önce ön arıtma seçeneği olarak da kullanılır. Seramik membranlar ultrafiltrasyon proseslerine örnektir. Ultrafiltrasyon membranlarının ev aletleri ve otomotiv, su sektörü, metal işleme, gıda, tekstil, kağıt, ilaç endüstrisi gibi endüstriyel alanlarda uygulamaları mevcuttur [9].

2.2.1.3 Nanofiltrasyon (NF)

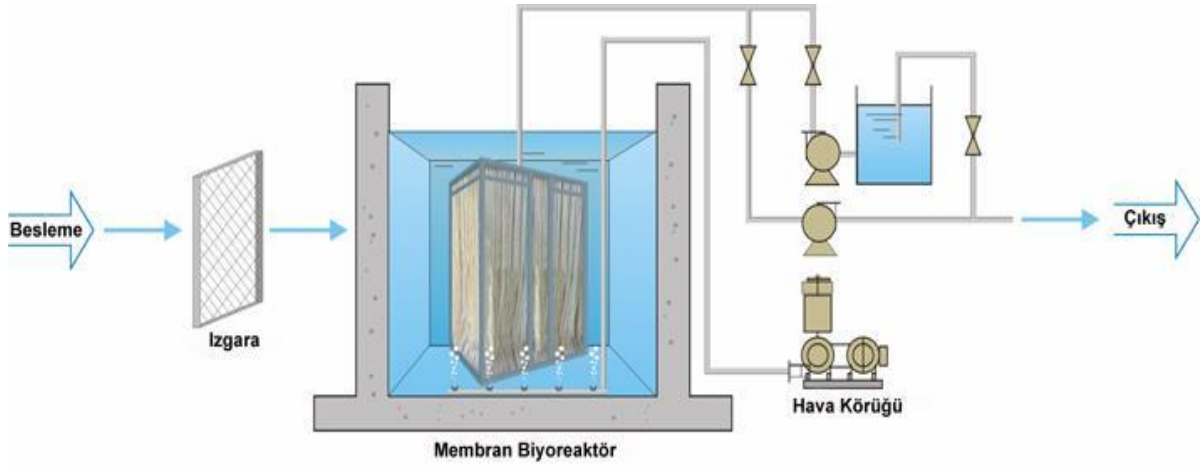
Nanofiltrasyon gözenek boyutu 0,001 µm'den büyük maddelerin gideriminde kullanılan, MWCO değeri 100-300 arasında değişen basınç sürücülü bir membran ayırma yöntemidir. Gözenek boyutuna göre ultrafiltrasyonla ters osmoz arasında kalmaktadır. Nanofiltrasyon membranlarının tekstil, kağıt endüstrisi, ağır metal giderimi, gıda işleme, metal işleme, kimyasal proses endüstrisi ve enerji sektörü gibi endüstriyel alanlarda uygulamaları mevcuttur [11].

2.2.1.4 Ters Osmoz (RO)

Büyüklüğü 0,0001-0,001 μ arasındaki partikülleri tutabilen ters osmoz prosesi en küçük gözenek boyutuna sahiptir ve molekül ağırlığı çok düşük olan çözülmüş tüm maddeleri sıvıdan ayırmayı amaçlar. Ters osmoz proseslerinde kullanılan sürücü kuvvetler basınç ve konsantrasyondur. Ters osmozda temiz suyu kirletici maddelerden ayırabilme özelliği olan bir membran vardır ve yüksek basınçla çalışılır. Kullanılan membran yarı geçirgendir. Sistemde kirliliğe tabi tarafa uygulanan basınçla su, temiz kısma yayılır. Uygulama sonunda istenmeyen kimyasallar yoğunlaşmanın etkisiyle temiz suyu terk ederek arıtma işlemi gerçekleştirilir. Ters osmoz sisteminin en sık kullanıldığı alan deniz suyunun içme suyuna dönüştürülmesidir. Ters osmoz membranlarının desalinasyon (tuz giderme), ultra saf su, enerji sektörü, gıda işleme, kimyasal proses endüstrisi, metal ve metal işleme, ağır metal giderimi tekstil ve kağıt endüstrisi gibi endüstriyel alanlarda uygulamaları mevcuttur [9].

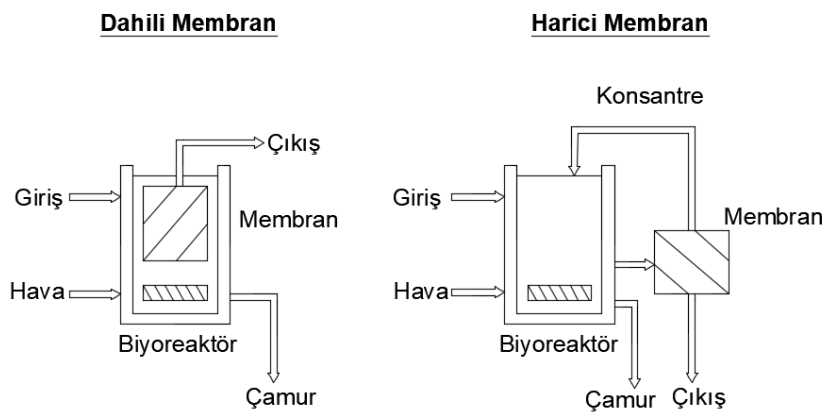
2.2.2 Membran Biyoreaktörler (MBR)

Membran biyoreaktörle biyolojik parçalanma ve ayırma işlemini gerçekleştirilir. MBR prosesinde giriş suyu biyoreaktöre girerek biyokütleyle etkileşime geçer ve oluşan karışım pompa yardımıyla belirli bir basınç altında membrandan filtrelenir. Konsantrasyon geri devir hattıyla biyoreaktöre verilirken süzüntü suyu deşarj edilir. Aktif çamur proseslerinde gerçekleşen biyokimyasal oksidasyon ve sıvı ayırımı MBR sistemlerinde tek bir prosesle gerçekleştiğinden MBR sistemlerinde çöktürme tankına ihtiyaç duyulmamaktadır. Membran proseslerinde yüksek kalitede çıkış suyu elde edilir. Membran biyoreaktörler konvansiyonel sistemlere göre daha az alan gereksinimine ihtiyaç duymaktadırlar [9]. Membran biyoreaktörlerde, Şekil 2.8'de membran biyoreaktörün şematik olarak gösteriminde görüldüğü gibi klasik sistemlere göre daha az prosese ihtiyaç duyulmaktadır [12].



Şekil 2.8: Membran biyoreaktör şematik gösterimi [12]

Membran prosesleri, biyokütleyi sudan ayırarak ve havalandırılarak ortamdaki kirleticilerin temiz sudan ayrılmasını sağlar. Membran biyoreaktörlerin dizaynı dahili (batık) ya da harici (dışarda) şeklinde yapılır. Reaktörün içerisinde kullanılan membranlara batık membran, reaktörün dışında pompa yardımıyla basınç oluşturularak kullanılan membranlara ise harici membran adı verilmektedir. Batık membranlar reaktör içerisinde difüzörlerin hizasında asılı bir şekilde tasarlanmaktadır. Difüzörler biyolojik arıtım için gereken havayı sağlarken asılı bir şekilde duran membranların üzerinde biriken katı maddeleri de temizlemektedir. Dahili ve harici membranların şematik gösterimi Şekil 2.9'de gösterilmiştir [12].



Şekil 2.9: Dahili ve harici membranların şematik gösterimi

Dahili ve harici membranların karşılaştırılması Tablo 2.2' de verilmiştir [12].

Tablo 2.2: Dahili ve harici membranların karşılaştırılması [12]

	Dahili MBR	Harici MBR
Havalandırma Masrafı	Yüksek	Düşük
Pompaj Masrafı	Düşük	Yüksek
Akı	Düşük	Yüksek
Temizleme İhtiyacı	Daha az	Daha Sık
İşletme Maliyeti	Düşük	Yüksek
İlk Yatırım Maliyeti	Yüksek	Düşük

Membran biyoreaktörler klasik arıtım metotlarına oranla daha avantajlıdır. Membran biyoreaktörlerde arıtılan su yüksek kalitededir. Membran proseslerinde katı ve kolloid maddelerin neredeyse tamamı ayıklanmaktadır. Bu sebeple çıkış suyu çöktürme adımından etkilenmez. Klasik aktif çamur sistemlerinde çamurun çökmesi adımında problem yaşadığı için suyun kalitesi bu durumdan etkilenmektedir.

Membranın Performansını etkileyen faktörler, basınç, sıcaklık, membran diziliş yoğunluğu, çapraz akış hızı, viskozite, membranın kirlenmesi, membranın ömrü, ön arıtım ve membranın türüdür. Kullanılan bütün membran uygulamalarında en büyük dezavantaj olarak karşılaşılan sorun membran kirlenmesidir. Membran kirliliği akıyı azaltır, membranın ömrünü kısaltır ve membranın ayırma özelliğine zarar verir. Membran kirliliği karşılaşılabilecek sorunları çözümsüz hale getirmeden önce müdahale edilmesi gereken bir problemdir. Membran kirliliği membran yüzeyindeki porların tıkanmasına sebep olacağından temizlenmezse membranın kullanım ömrünün son bulmasına sebep olur [12].

Tablo 2.3: Membran biyoreaktörlerin avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Arıtılmış suyun kalitesi	Klasik sistemlere oranla daha karmaşıktır
İşletme esnekliği	Membran gözeneklerinin tıkanması
Düşük alan ihtiyacı	Maliyet
Yüksek oranda ayrışma	Kimyasalların maliyeti
Düşük çamur üretimi	
Dezenfeksiyon	
Koku kontrolü	

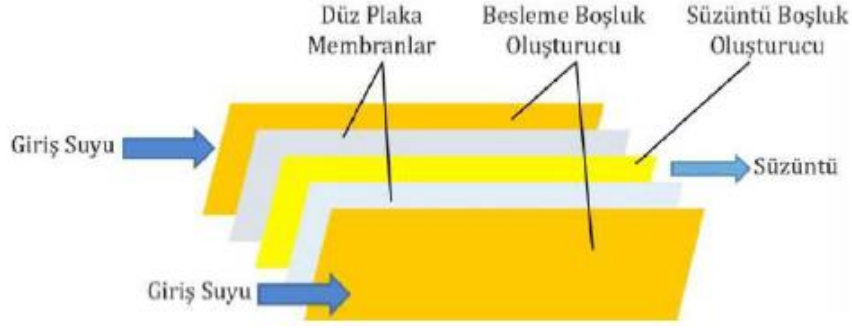
Membran biyoreaktörlerin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.3' verilmiştir. Günümüzde kullanılmakta olan çeşitli membran tipleri vardır. Düz plaka membranlar, içi boşluklu fiber membranlar, tübüler membranlar ve diğer membran kullanılan modüllerdir. Membran modüllerinin kullanım özelliklerinin birbiriyle karşılaştırılması Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4: Membran modüllerinin karşılaştırılması [9].

Parametre	İçi boşluklu fiber	Spiral sargılı	Plaka	Tübüler
Paketleme yoğunluğu (m ² /m ³)	Yüksek (500-5000)	Yüksek (500-1000)	Yüksek (500-1000)	Düşük (70-400)
Akım yönetimi / tıkanma kontrolü	Orta iyi	İyi (katı yoksa) zayıf (katılar içinde)	Orta	İyi
Konsantrasyon polarizasyonu kontrolü	Zayıf	Orta	İyi	Çok iyi
Yüzey alanı (m ² /m ³)	Çok yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
Ön arıtım gereksinimi	Yüksek	Orta	Yüksek	Basit
Temizlenebilirlik	Geri yıkama mümkün	Katılar olduğunda zor olabilir	Orta	İyi, fiziksel temizleme mümkün
Süzüntü basıncı düşüşü	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
Yüksek basınçta işletmeye uygunluk	Evet	Evet	Evet	Çok az
Belirli tip membran materyallerinde sınırlılık	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Üretim kolaylığı	Orta	Karışık	Kolay	Kolay
Enerji tüketimi	Düşük (laminer)	Orta (spacer kayıpları)	Düşük (orta laminer)	Yüksek (türbülanslı)

2.2.2.1 Düz plaka Membran Modülleri

İki membranın besleme yüzlerinin birbirine bakacak şekilde sandviç gibi yerleştirilen plak-çerçeve modüllerinde besleme ve süzüntü akışının sağlanması için uygun boşluklar oluşturulmuştur. Plak-çerçeve modülleri membran biyoreaktör proseslerinde kullanılmakta olup, düz plaka membranların arasına özel kanal tasarımı olan plastik bir çerçeve yerleştirilerek tasarlanmaktadır. Düz plaka membranları MBR proseslerinde genellikle batık membran modülü olarak kullanılırlar ve membranlar arasında büyük hava kabarcıkları geçişlerinin sağlanabileceği şekilde dizilmektedir. Plak-çerçeve modülünün çalışma prensibi Şekil 2.10'da gösterilmektedir [9].



Şekil 2.10: Plaka-çerçeve modülünün çalışma prensibi

2.2.2.2 İçi Boşluklu Fiber Membran Modülleri

İçi boşluklu fiber membranlar küçük partiküllerin gideriminde kullanılır. Çeşitli polimer malzemenin birleştirilerek ve çoğunlukla mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon membranları için üretilir. Dar, uzun ve ince bir boru şeklindedir. En çok farklı tiplerde demet halinde toplanarak modül haline getirilen tarzı yaygın olarak kullanılır. Bir demet halinde birleştirilmiş içi boşluklu membranlar dikey veya yatay olarak kullanılabilirler. Bu membran modülleri harici membran olarak reaktörün dışında basınç yardımıyla ve dahili membran olarak reaktörün içinde de işlevini gerçekleştirir. Bu modüller düz plaka ve benzeri membranlara göre daha avantajlı olduğu için daha çok tercih edilir. İçi boşluklu fiber membran modülünün kapladığı hacim oranının yüksek olması, kompakt bir tasarıma sahip olmaları ve bunun da geri kazanım oranını artırıp enerji tüketimini azaltması hem dıştan içe hem de içten dışa iki yönlü de çalıştırılabilir olması ve yüksek geri kazanım verimliliğine sahip olmalarından dolayı diğer membran türlerine göre daha çok tercih edilir. Bu tür membran modüllerinde hem çapraz akış hem de klasik akış yöntemleri uygulanabilir [9]. Şekil 2.11’de çapraz akışla çalışan bir içi boşluklu membran modülü gösterilmiştir.



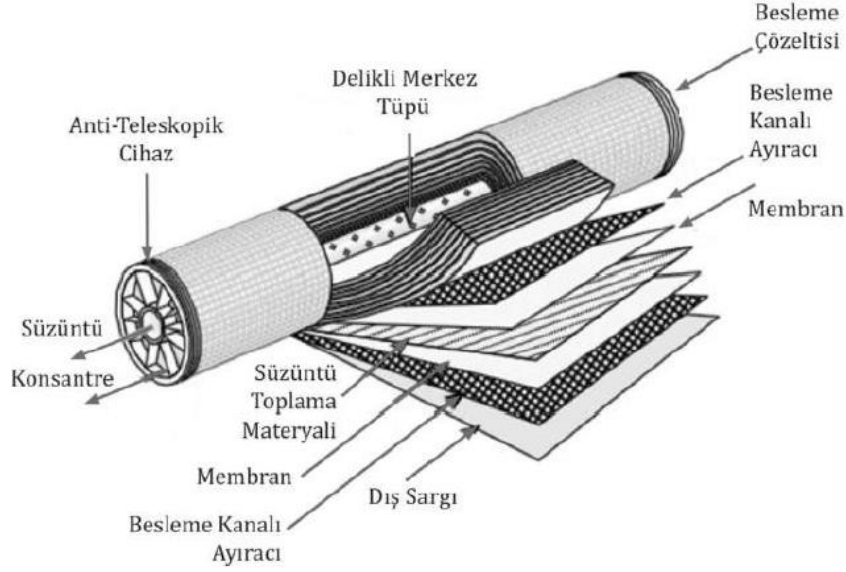
Şekil 2.11: Çapraz akışla çalışan bir içi boşluklu fiber membran modülü [9].

İçi boşluklu fiber membran modülünü diğer membran türlerinden ayıran en önemli fark tek bir membran modülü içerisine çok büyük membran alanı sığdırılabilmesidir. Belirli bir hacimdeki modülde daha yüksek alanda fiberlerle doldurulabilir. Aynı hacimdeki spiral sargılı modülleri daha az alanda fiberlerle doldurulabildiğinden içi boşluklu fiber modül spiral sargılı modüllere göre daha avantajlıdır. Üretim maliyetleri yüksektir ve kullanımı için kontrollü proses gereklidir [9].

İçi boşluklu fiber membranların kullanıldığı bir diğer modül tipi ise reaktörün içine daldırılan batık tip modülleridir. Membran biyoreaktör sistemlerinin aktif çamur havuzlarında arıtılan suyun filtre edilerek çamurdan ayrılmasını sağlar. Batık tip membran modüllerinde elde edilen çıkış suyu yüksek kalitede olup, görünümü şekilde verilmiştir [9].

2.2.2.3 Spiral Sargılı Modüller

Spiral sargılı membran modülleri ilk olarak ters osmoz uygulamalarında kullanılmış günümüzde ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve gaz ayrımı gibi uygulamalarında kullanılmaktadır ve membran uygulamalarında önemli bir yere sahiptir [9]. Plak-çerçeve modüllerinin geliştirilmiş hali olup en çok kullanılan membran modülüdür. Bu modül türü plak-çerçeve ve tübüler modüllere oranla daha yüksek bir paketleme yoğunluğuna sahiptir ve bu sebeple diğer modüllere üstünlük sağlamaktadır. Spiral sargılı membran modüllerinde Şekil 2.12'de gösterildiği gibi iki membran tabakası arasına bir ayırıcı yerleştirilir. Bu ayırıcı besleme ara parçası olarak tanımlanabilir ve süzüntü suyunun elde edildiği delikli toplama tüpünün etrafına sarılır. Tabakanın iç tarafında da membrana destek sağlamak amacıyla tasarlanan süzüntü ayırıcı bulunur. Süzüntü ayırıcı gözenekli bir yapıya sahiptir ve süzüntüyü süzüntü toplama tüpüne iletmektedir. Besleme kanalı ayırıcısı uygulanan basınç faktörüyle besleme suyunun süzüntü toplama tüpüne paralel bir şekilde akmasını sağlar. Spiral sargı modüllerinde membran metrekaresi başına düşen hacim oranı daha düşüktür. Bu durum spiral sargı modüllerinin membran tıkanma meylinin daha düşük olmasına ve işletmede kolaylık sağlamasına sebep olduğundan endüstri alanlarında daha çok talep görmektedir [9].



Şekil 2.12: Spiral sargılı modülü içerisinde bulunan malzeme katmanları [13].

Membran alanı arttığında geri kazanım oranı da artmaktadır. Tek membran kullanımında %30 oranlarında geri kazanım elde edilirken, dizili olarak tasarlanan modüllerde %90'a kadar artış gösterebilir. Membranlar, poliamid, kompozit poliamid ve selüloz asetat malzemeleri kullanılarak tasarlanmaktadır.

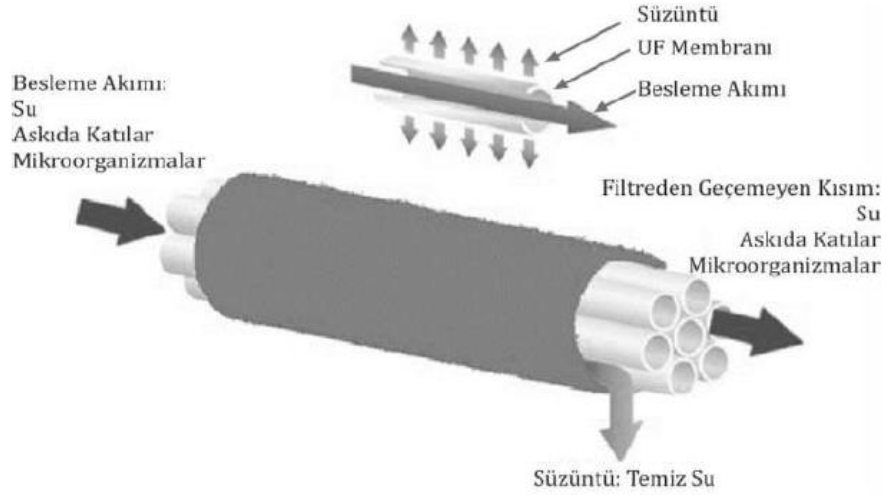
Spiral sargılı modüllerde, konsantrasyon polarizasyonu, membran tıkanması ve basınç kaybı problemleriyle çok sık karşılaşmaktadır. Spiral sargılı modüllerin performansını, besleme ve süzüntü kanalı yükseklikleri, yaprağın geometrisi, genişliği ve uzunluğu, boşluk oluşturucular membranların tıkanma eğilimi ve temizlenebilirliği, işletme şartları gibi parametreler belirlemektedir [14].

2.2.2.4 Tübüler membran modülleri

Çoğunlukla ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon uygulamaları ile sınırlı kalan tübüler membran modülü görünüm olarak içi boşluklu fiber membranlara benzemektedir. Ancak içi boşluklu fiber membran modüllerinden daha büyük boyutlardadır. Tübüler membranlar gözenekli paslanmaz çelik, polimerik ya da seramik malzemeler kullanılarak tasarlanmaktadır.

Genellikle paralel olarak yerleştirilen tüplerden akım geçerken her tüpten çıkan süzüntü şekilde gösterildiği gibi gözenekli destek tüpünden akmaktadır. Akan süzüntü suyu süzüntü toplama kanalına alınmaktadır. Tübüler membran modüllerinde türbülanslı akım

gerçekleştirdiğinden en büyük sorun olan tıkanmaya karşı direnç gösterilmekte ve tıkanma ihtimalinde temizlenmesi kolaydır. Tübüler membranın çalışma prensibi Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Tübüler membran çalışma prensibi [9].

Tübüler membranlarda yüksek oranda AKM giderimi gerçekleşmektedir. Tıkanmaya meyilleri düşük olduğundan katı içeriği yüksek olan endüstriyel atıksuların arıtılmasında kullanılmaktadır. Seramik malzemeden yapılmış çeşitli tiplerde tübüler membranlar Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Tübüler membran modüllerinde büyük alana ihtiyaç duyulması, yüksek enerji ihtiyacı ve yüksek yıkama maliyetleri dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 2.14: Seramik malzemeden yapılmış çeşitli tiplerde tübüler membranlar [9].

2.3 Jet Loop Reaktörler (JLB)

Jet loop reaktörler atıksu arıtma verimini artırmak için geliştirilen yeni tip reaktörlerden biridir. Jet-loop reaktörlerde oluşturulan jet akışla yüksek derecede sıvı sirkülasyonu ve gaz dağılımı gerçekleşmektedir. Tasarlamak istenilen reaktörün türü ve dizaynı enerji tasarrufunu etkilemektedir.

İlk olarak geliştirilen jet-loop reaktörlerde, reaktör tabanına yerleştirilmiş çift akışlı bir püskürtme başlığı (nozzle) bulunmaktadır. Merkezine de bir emme tüpü yerleştirilmiştir ve sıvı çıkışı reaktörün üst kısmından yapılır. Bu şekilde tasarlanan jet-loop reaktör modifikasyonlarında istenilmeyen sonuçlarla karşılaşmıştır. Çamur reaktörü olarak kullanılan jet loop reaktöründe, püskürtme başlığının reaktörün tabanında olması tıkanmalara sebebiyet verebilir. Ayrıca reaktörün içerisinde çözünmüş gaz içermesi bulunması durumunda gaz fazının sistemde yeteri kadar kalamadan reaktörü terk etmesi bu sistemin dizaynının dezavantajları sayılabilir. Jet loop reaktörünün en geliştirilmiş hali iki akışlı püskürtme başlığının emme tüpü içerisinde reaktörün üstüne yerleştirilerek yapılan dizayndır [15, 16, 17, 18].

Çarpışan akımlı loop reaktörler, başka bir jet-loop reaktör modifikasyonudur. İki ayrı püskürtme başlığı reaktörün üst kısmında emme tüpünün içerisine doğru tasarlanmıştır. Aynı güç tüketiminde klasik reaktörlere göre daha yüksek kütle transfer yeteneğine sahiptir. Çarpışan akımlı loop reaktörlerin temel prensibi reaktör içerisinde iki ayrı akışın

sağlanarak su ve hava karışımının çarpıştırılıp ön karışımın sağlanmasıdır [19]. Çarpışan akımlı reaktörlerin dizaynından dolayı gaz fazı sıvı fazın kaldırma kuvvetinin etkisiyle ters yönde hareket ettiğinden gaz fazının sistemde kalma süresi artar ve püskürtme başlığının tıkanması önlenir. Yapılan ilk çalışmalarda sıvı, reaktörün tabanından çıkacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu durumlarda suyun belli bir kısmı sirkülasyona girerken kalan kısmı reaktöre girmeden sistemden ayrıldığından fazın reaktör içerisindeki kalış süresi azalmaktadır.

Püskürtme başlığı emme tüpü içerisine yerleştirilerek reaktörün üst kısmında duracak şekilde dizayn edilen jet-loop reaktörler geliştirilen son modifikasyon tasarımıdır. Bu şekilde tasarlanan reaktörlerde çıkış suyu reaktörün üst kısmından verilmektedir. Emme tüpü içerisindeki püskürtme başlığında karışan su ile hava jet etkisiyle reaktörün alt kısmına doğru püskürtülür. Jet etkisiyle draft tüpü içerisinden reaktörün alt kısmına doğru hareket eden su ile gaz karışımı, draft tüpünün tabanında yer alan çarpma levhasına çarparak draft tüpünün yanlarına doğru yayılır. Yayılan sıvı çevrimle yukarı doğru çıkar ve sirkülasyon sağlanır. Sağlanan sirkülasyonla reaktörün üst kısmına gelen gaz kabarcıkları ile sıvının bir bölümü püskürtme başlığından yayılan sıvının sürüklenme kuvveti sebebiyle yeniden emme tüpüne giriş yapabilir. Bu sebeple hava ile su karışımı reaktör içerisinde daha uzun süre kalabilir. Artan bu kalış süresiyle beraber gaz tutulma (ϵ) ve kütle transfer katsayısı (K_{La}) artırılmış olur [16, 18, 19].

Jet-loop reaktörlerde gaz fazın dağılımı iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi sıvı ile havanın ilk buluşma noktaları olan püskürtme başlığı çıkışında gerçekleşmektedir. Püskürtme başlığının şematik görünümü Şekil 2.15'te gösterilmiştir. İkinci yayılım ise sıvının reaktör içerisindeki dağılımıdır. İlk dispersiyon gerçekleştikten sonra gaz ile sıvı fazı draft tüpü tabanında yer alan çarpma levhasına çarparak gaz kabarcıklarındaki dağılım gerçekleşmiş olur. Birinci dağılım gerçekleştiğinde çok yüksek hızla gelen gaz ile sıvı fazı küçük kabarcıklara parçalanır. Parçalanan bu küçük kabarcıklar reaktörün alt kısmına doğru hareket ederek ikinci dağılım bölgesine giriş yaparlar. Bu kısımda sıvı basınçla beraber gaz fazı çözünürlüğünde de artış görülür. Bu sebeple kütle transferinde de artış görülür. Reaktörde sabitlenmiş emme tüpü vasıtasıyla sıvı faz birkaç kez sirkülasyon yaşar. Bunun sonucunda ise sıvı faz içerisinde dağılan gaz fazının reaktör içerisindeki kalış süresi artmış olur. [20, 21, 22].

Jet loop biyoreaktör sistemlerinde reaktör içerisine alınan çamur konsantrasyonu düzenli olarak arttırılmaktadır. Jet loop biyoreaktörlerde, çamur konsantrasyonları arttırılarak yüksek arıtma verimine erişilir. Biyolojik arıtma sistemlerde reaksiyonun hızı her ne kadar çamurun yaşlı ve genç oluşuna tabii olsa da biyokütle (MLSS) konsantrasyonuna da bağlıdır [22]. Bu sebeple çamur konsantrasyonunun arttırılması beraberinde yüksek reaksiyon hızı getirdiğinden, reaktör içerisinde sağlanan yüksek biyokütle konsantrasyonunun azalmasına sebep olmaktadır.

Jet loop biyoreaktör sistemlerinde flok boyutunun da gerçekleşen küçülme, etkin yüzey alanını arttırır. Bu sebeple kütle transferinin artmasına da olanak sağlar. Jet loop reaktörlerine alınan yüksek yüklerin etkili bir şekilde arıtım gerçekleştirmesinde küçük boyutlu flokların etkisi büyüktür. Arıtma verimini arttırmasıyla avantaj sağlayan küçük boyutlu floklar aynı zamanda çamurun çökmesinde problem yaratmaktadır [24].

Çamur konsantrasyonu, klasik aktif çamur sistemlerinde arıtma verimini ve reaksiyon hızını etkileyen önemli parametrelerden biri olduğu için yüksek çamur konsantrasyonu sistemlerde istenilen bir olgudur. Jet loop reaktörler sistemlerinde yüksek sirkülasyon gerçekleşmektedir. Gerçekleşen yüksek sirkülasyon sebebiyle flok yapıları parçalara ayrılarak sistem içerisine saçılırlar.

Jet loop biyoreaktör sistemlerinde yüksek oksijen transfer kapasitesinin mevcut olması gerekli oksijenin sağlanmasına vesile olmaktadır. Oksijenin kolaylıkla temin edilebilmesi reaktör içerisindeki biyokütle konsantrasyonunun arttırılabilmesine ve yüksek organik yüklerin verimli bir şekilde arıtılabilmesine olanak sağlar [25].

Jet loop biyoreaktörlerde kirlilik yükü yüksek olan atıksular verimli bir şekilde arıtılabilmektedir. Oksijenin rahatlıkla sağlanabilmesi ve yüksek kirlilik yüklü atıksuların arıtılabilmesi jet loop reaktör sistemlerinin önemli bir ayrıcalığıdır. Jet loop reaktörlerinin diğer sistemlere göre atıksu arıtımındaki daha yüksek performansına, kütle transfer alanı, gaz kabarcıklarına ve reaktör içerisinde gerçekleşen iki dağılımı sebep olmaktadır.

Klasik aktif çamur sistemleri için tavsiye edilen F/M yani besin mikroorganizma oranı 0,05–1 arasındadır [26]. F/M oranının yüksek olduğu ortamda besin, düşük olduğu ortamda ise mikroorganizma fazladır. Jet loop biyoreaktör sistemi kullanılarak yapılan bir araştırma

incelendiğinde organik yüklemenin artışıyla beraber F/M oranı 5,81 kg KOI/kg MLVSS.gün değerine kadar çıkarılabilmektedir. Artış gösteren F/M değeri ile KOI giderim hızının aynı doğrultuda arttığı gözlemlenmiştir [24]. Jet loop biyoreaktörlerdeki, biyokütle diğer sistemlere göre daha hızlı bir şekilde ortama alışabilmektedir. Bunun sebebi jet loop biyoreaktör sistemlerinin yüksek oksijen transfer kapasitesine sahip olmasıdır. Biyokütlenin daha hızlı stabilize olması sebebiyle çamur yaşı daha düşük, besin ve mikroorganizma oranı daha yüksektir. Buna rağmen üretilen çamur miktarı jet loop biyoreaktörlerde klasik aktif çamur sistemlerine oranla daha azdır. Jet loop biyoreaktör kullanılması, arıtma sistemlerinin en önemli maliyetlerinden birisi olan çamur bertarafı maliyetini düşürmektedir.

Klasik sistemler, jet loop biyoreaktör sistemlerine göre daha düşük sirkülasyona sahiptirler. Biyolojik arıtma sistemlerinin havalandırma ünitelerinde, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun 1,5–4 mg/L arasında olması uygun görülmektedir [26]. Klasik sistemlerde, çözülmüş oksijenin 2 mg/L'nin altına düştüğü durumlarda arıtma veriminin azaldığı gözlemlenmiştir. Jet loop biyoreaktörlerde ise yapılan araştırmalar neticesinde çözülmüş oksijen konsantrasyonunun 1 mg/L'ye düştüğü zamanlarda dahi sistemin performansında olumsuz bir değişime rastlanmadığı gözlemlenmiştir. Çünkü yüksek sirkülasyonla elde edilen yüksek karışım ve K_{La} ortamda ihtiyaç duyulan oksijeni sürekli olarak sağlamaktadır [27]. Jet loop biyoreaktörlerde oksijen reaktör içerisinde homojen bir şekilde dağıldığından reaktör içerisinde ölü bölgelerin oluşmadığı tespitine varılmıştır. Çözülmüş oksijen değeri sıfır olduğunda dahi ölü bölgeler meydana gelmemiştir.

Jet loop reaktörlerde sıvı jetinin etkisiyle yüksek bir şekilde türbülanslı bölge meydana gelmektedir. Bu türbülanslı bölgede etkili kütle transferi meydana gelmektedir. Bu yüksek türbülanslı bölge, kütle transferi meydana geldiğinde küçük gaz kabarcıkları üretmektedir. Bu bölgede bakteriler parçalanmakta ve bu şekilde yüzey alanları arttığından oksijen ve besin tüketme hızlarında da dolaylı olarak artış görülmektedir.

Jet içerisinde oluşan yüksek sirkülasyon sebebiyle reaktörde durağan bölgelerin oluşumu engellenir. Bu durumda bakterilerin reaktör içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlar. Jet loop reaktörler mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu çözülmüş oksijeni yeterince sağladığından bölgesel reaksiyon şartlarını artırmaktadır.

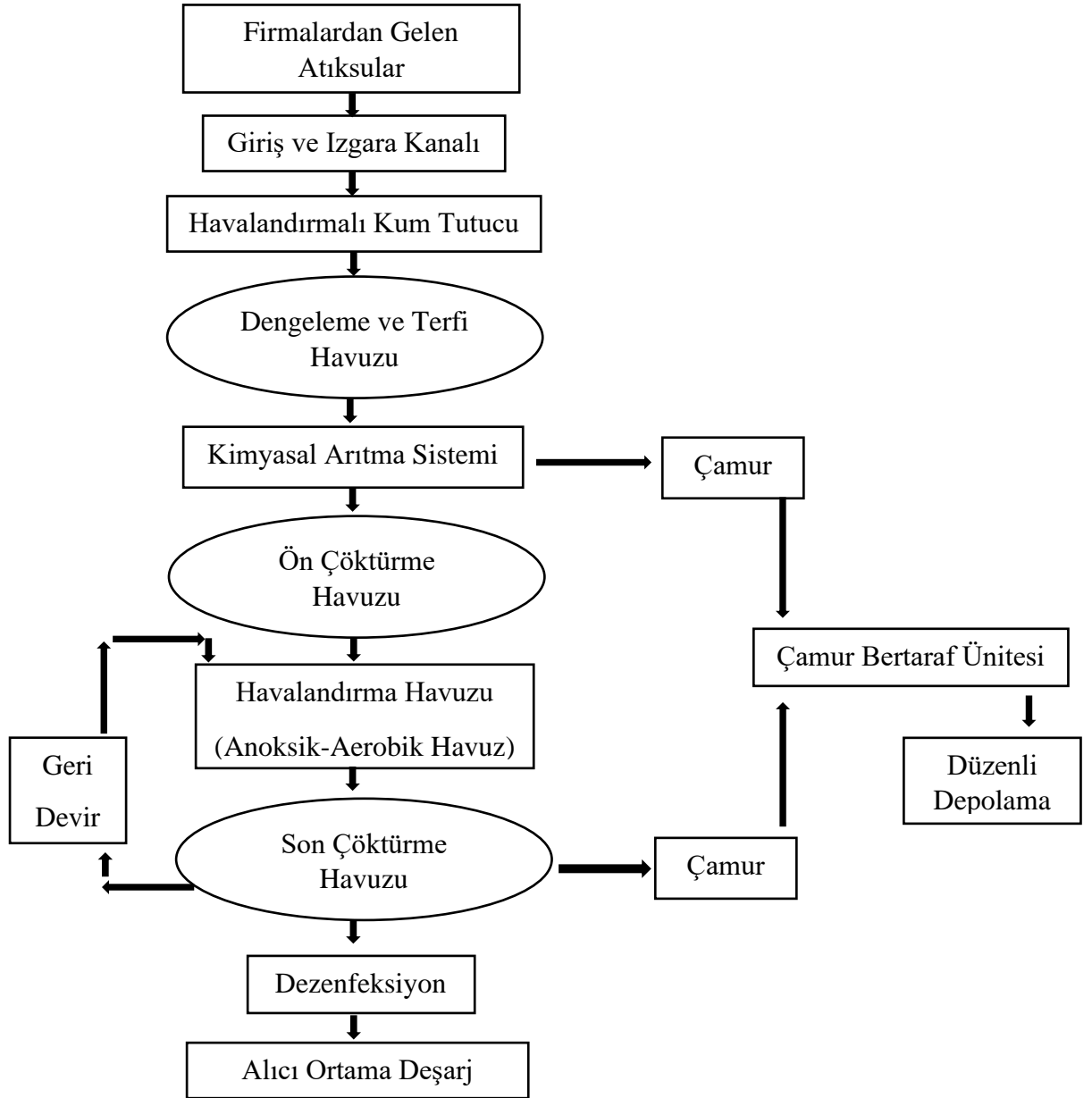
Jet loop reaktörler içerisindeki bakteri topluluğu incelendiğinde, klasik sistemlere oranla aerobik bakteri gruplarının anaerobiklere göre yüksek olduğu neticesine varılmıştır [29, 30]. Aerobik bakterilerin aktivitesinin anaerobik bakterilerden daha yüksek olduğundan jet loop reaktörlerinin klasik sistemlere oranla daha yüksek performans sağlamasına sebep olmaktadır.

Yüksek performansa sahip jet loop reaktörler [31], yüksek türbülans bölgesi oluşturan bir tasarıma sahiptirler. Akışkan içerisinde kütle transferinin kullanılması ve küçük topakların rezonansının daha etkin bir yüzey alanına sahip olması jet loop reaktör tasarımının özellikleri ile elde edilen sonuçlardır. Bu tasarımın sistemlerinin bakımı da geleneksel sistemlerden elde edilen faydalardan biridir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

Çalışmada kullanılan atıksu, Balıkesir Organize Sanayi Bölgesinden temin edilmiştir. 2010 yılında 1.650 m³/gün kapasiteyle 1.kısım devreye alınan tesisin, 2014 yılında 1.650 m³/gün kapasiteyle 2.kısım devreye alınmıştır. Tesisler 1.kısım ve 2.kısım olmak üzere toplam 3.300 m³/gün arıtma kapasitesine sahiptir. Çalışma için alınan atıksu yeni yapılan tesisten alındı. Balıkesir Organize Sanayi Bölgesi endüstriyel atıksu arıtma tesisi fiziksel-kimyasal ve biyolojik arıtım ünitelerinden oluşmaktadır. Tesisin akım şeması Şekil 3.1’ de gösterilmektedir.



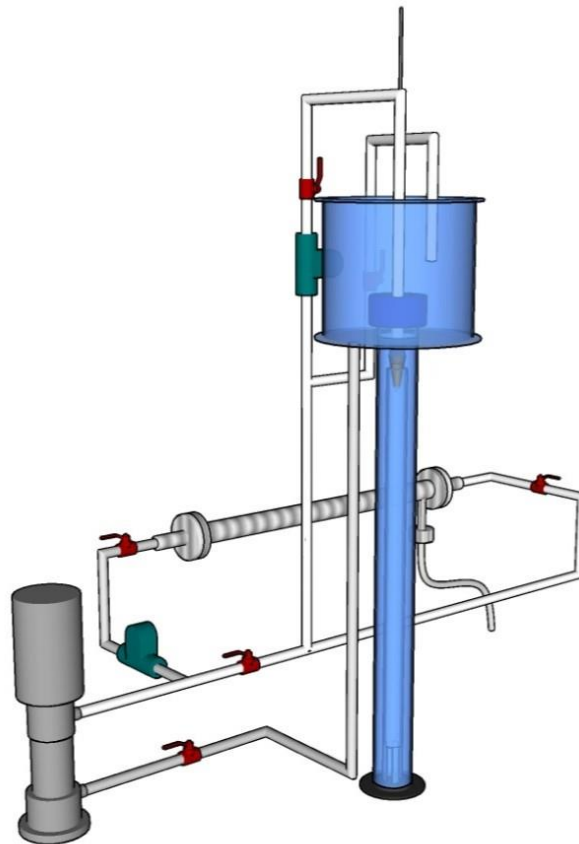
Şekil 3.1: Balıkesir OSB atıksu arıtma tesisinin akım şeması

Bu çalışmada, Balıkesir OSB'nin atıksu arıtma tesisi havalandırma havuzundan alınan aktif çamur, laboratuvarında çoğaltılarak kullanılmıştır. Dengeleme havuzundan alınan gerçek atıksu ile sistem beslenerek mikroorganizmaların atıksuya adaptasyonu sağlanmış ve reaktör şartlarına alışması beklenmiştir.

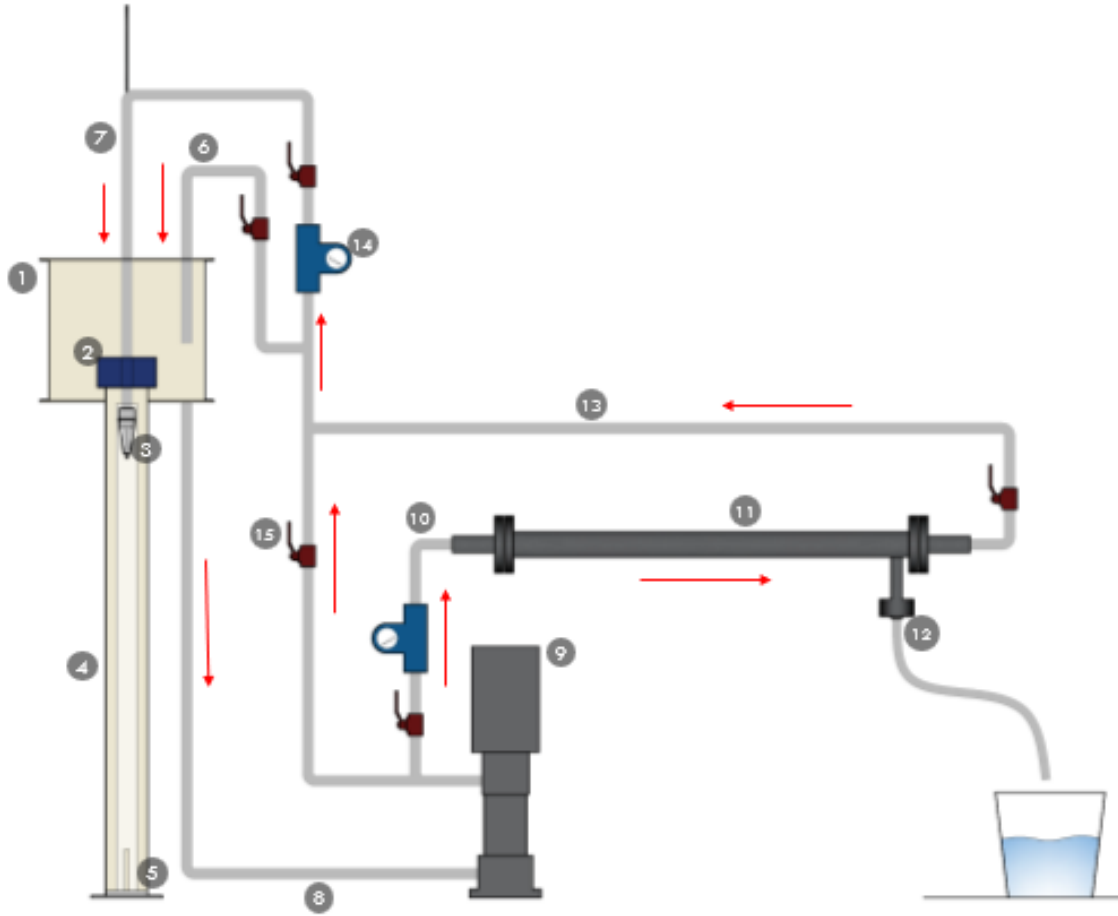
Tesisten 3 günlük periyotlarla alınan yaklaşık 200 L gerçek atıksu çevre mühendisliği araştırma laboratuvarına getirilerek kullanılmıştır. Getirilen atıksuda periyodik olarak pH, sıcaklık ÇO, KOİ, AKM, analizleri yapılarak sistem beslenmiştir.

3.2 Deneysel Sistem

Bu çalışma da Organize Sanayii Bölgesi karışık nitelikte olan endüstri atıksularının arıtımı için kompakt bir sistemin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada jet loop biyoreaktör ve silindirik seramik membran modülü kullanılmıştır. Jet loop biyoreaktör 14 L sıvı hacimli şeffaf akrilik malzeme kullanılarak silindirik bir şekilde tasarlanmıştır. Sistemin 3 boyutlu gösterimi Şekil 3.2' de akış şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2: JLMBR sisteminin 3 boyutlu görünümü

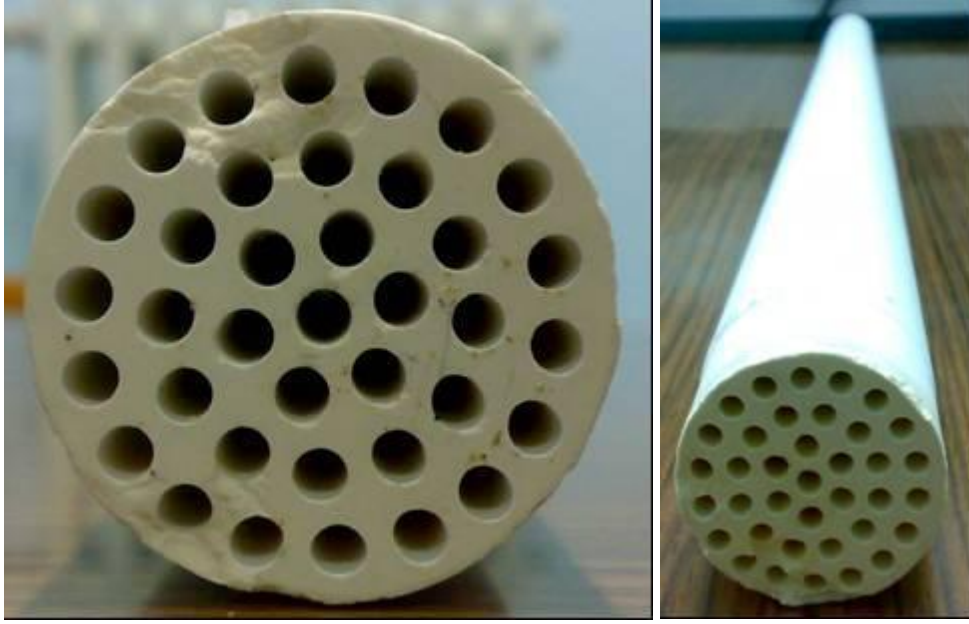


Şekil 3.3: Jet loop membran biyoreaktör (JLMBR) sisteminin akış şeması; 1: degazifikasyon tankı, 2: soğutucu 3: püskürtme başlığı (nozzle) 4: draft tüpü 5: çarpma levhası 6: by-pass hattı 7: reaktör besleme hattı 8: emme hattı 9: pompa 10: membran besleme hattı 11: seramik membran 12: membrandan çıkan süzöntü suyu 13: membrandan çıkan konsantre suyu 14: debimetre 15: vana

Biyoreaktörün üst kısmında degazifikasyon tankı bulunmaktadır. Burada gaz alma işlemi uygulanmaktadır. Degazifikasyon tankı içerisine bir soğutucu yerleştirilerek reaktörün ısınıını sabit tutabilmek amaçlanmıştır. Jet loop reaktör sisteminde, ölçülecek parametreler; pH, ÇO, sıcaklık, membran basıncı, sıvı sirkülasyon hızı ve membran akısı olarak seçilmiştir. Sistemde pH, ÇO ve sıcaklık ölçümleri sürekli olarak yapılmakta ve pH 7.0-7.5 aralığında, ÇO 2,40 mg/L ve sıcaklık 25-30 °C’de değerlerinde dengelenmeye çalışılmıştır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri yardımıyla kütle transferi (KLa) hesaplamaları yapılır ve sıcaklık düzeltmeleriyle de son değerlere ulaşılır.

3.2.1 Kullanılan Membran Ünitesi

Çalışmada, Jiangsu Juwu Hitech Co. Ltd. firmasından tedarik edilen seramik membran modülü tercih edilmiştir. Şekil 3.4'te gösterilen çapraz akışlı ultrafiltrasyon membranının, boyutu 1 m uzunluğunda, 0,125 m² yüzey alanında, 0,1-0.05 µm por çapında 40 mm dış çapa ve 37 kanala sahip silindirik şekilde seramik yapıdadır ve 1 bar basınçla çalışmaktadır. Markası Groundfos olan 1.7 kW gücünde çalışan sirkülasyon pompası ile reaktörde jet oluşmasını sağlarken aynı zamanda membranda gerekli olan çapraz akış hızını ve basıncını üretilmektedir. Membran ünitesi için gerekli olan çapraz akış hızı sistemdeki sıvı geçişinin olduğu hatların üzerine konumlandırılan vanalar yardımıyla yapılmaktadır. Suyun debisini suyun geçtiği dik kesit alanına bölerek çapraz akış hızı hesaplanmıştır. Kullanılan membran modülü basınçlı hava kullanılarak geri yıkanmıştır.



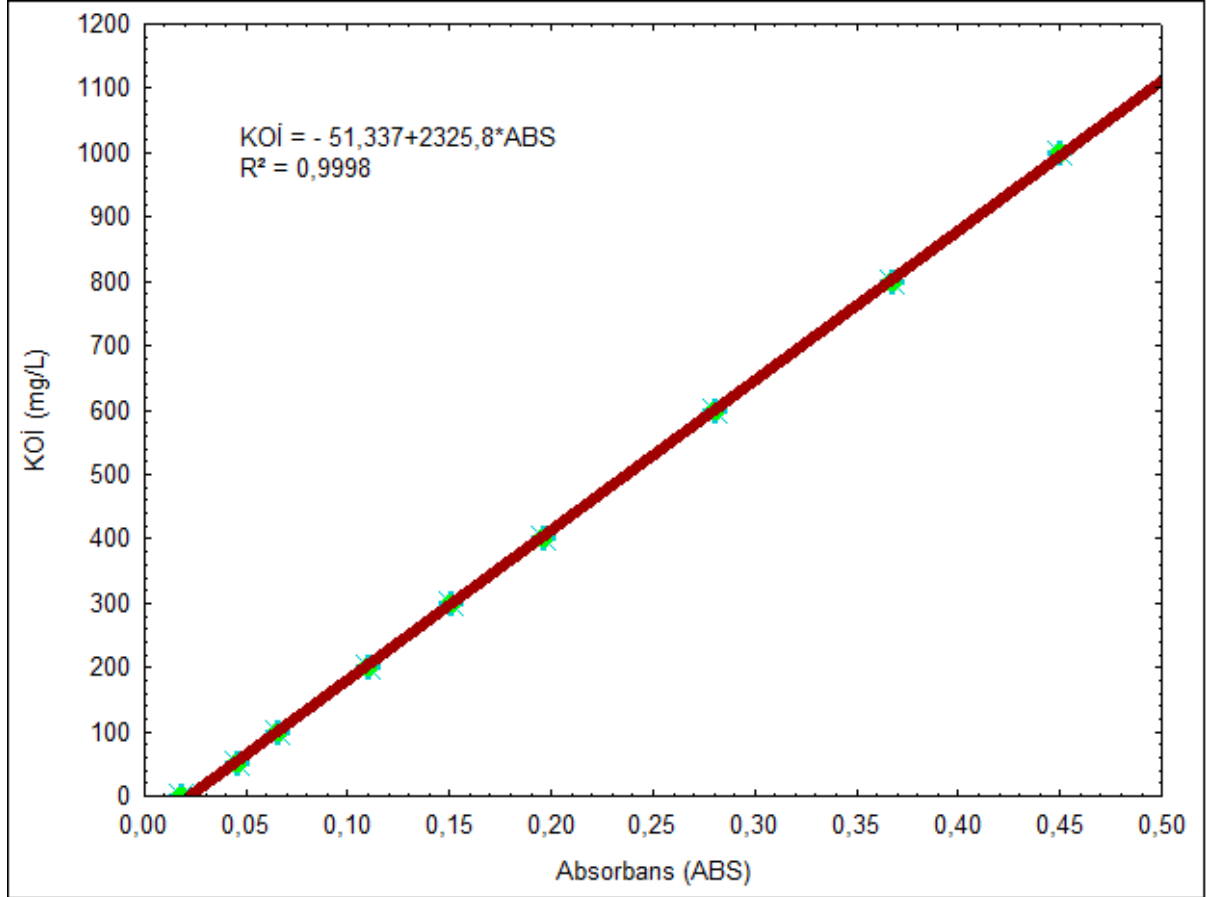
Şekil 3.4: Çalışmada kullanılan seramik membran modülü

3.3 Yöntem

3.3.1 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Analizi

KOİ analizi standart metotlarda verilen yöntemlere göre yapılmıştır. KOİ ölçümü için, 850 mg Potasyum Hidrojen Ftalat 0,5 L saf suda çözülerek elde edilen 2000 mg/L KOİ stok çözeltisinden standartlar hazırlanmıştır. Daha sonra bu standartlardan 1.5 mL alınarak üzerine litresinde 10.216 g K₂Cr₂O₇, 167 mL H₂SO₄ ve 33 g HgSO₄ bulunan parçalama çözeltisinden 1 mL ve son olarak litresinde 10.129 g Ag₂SO₄ bulunan derişik H₂SO₄ asit çözeltisinden 1.5 mL eklenerek 148 °C 'de 2 saat boyunca WTW marka CR3000 model bir

termoreaktörde ısıtılmıştır. Reaktörden alınan örnekler oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır. WTW marka Spectroflex 6600 model spektrofotometrede absorbans değerleri okunarak Şekil 3.5'te verilen kalibrasyon eğrisi çizilmiştir.



Şekil 3.5: KOİ ölçümleri için kullanılan kalibrasyon eğrisi

3.3.2 Askıda katı madde (AKM) ölçülmesi

AKM ölçümleri Standart Metotlarda verilen yöntemlerle yapılmıştır [32]. Glass-fiber filtreleriyle vakum pompası kullanılarak yapılan vakumlama işlemiyle AKM analiz sonuçlarına ulaşılmıştır.

3.3.3 Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) Ölçümleri

WTW marka OxiTop model dijital BOİ metre kullanılarak BOİ analiz sonuçlarına ulaşılmıştır. BOİ değerlerindeki değişimlere, cihazda bulunan 6 adet şişeye saat bazında yapılan ölçümler sonucunda ulaşılmıştır.

3.3.4 pH Ölçümü

pH ölçümleri WTW marka Multi 9430 model çoklu parametre ölçer cihaz kullanılarak yapılmıştır.

3.3.5 İletkenlik Ölçümü

İletkenlik ölçümleri yine WTW marka Multi 9430 model çoklu parametre ölçer cihazının iletkenlik probu kullanılarak sürekli olarak yapılmıştır.

3.3.6 Çözünmüş Oksijen (ÇO)

Sisteme sürekli bağlı olan WTW marka Multiline P4 350i model çoklu parametre ölçer cihazı yardımıyla ÇO değeri ölçülmüştür.

3.3.7 Transmembran Basıncı (TMB)

Membran filtrasyonundan sıvı geçirilmesinin sağlanmasını bir sirkülasyon pompası yardımıyla yapılmaktadır. Membran modülünde sıvı sirkülasyonu sırasında yüzeyde artan kirlilik transmembran basıncını etkilemektedir. Transmembran basıncı artan kirlilikle beraber doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Sirkülasyon pompası yardımıyla membrandan geçen sıvı, modüldeki konsantre ve süzüntü vanalarına farklı basınç uygular. Konsantre ve süzüntü basınçları arasındaki fark transmembran basıncı olarak ifade edilir. Membranda kirlenme oranının ölçülmesi amacıyla kullanılan transmembran basıncı modüldeki basınç kaybı olarak bilinmektedir.

3.3.8 Çapraz Akış Hızı (v)

Sıvının, membran yüzeyine teğet bir şekilde gönderilerek zar boyunca bir basınç farkı oluşturulması amacıyla uygulanan bir membran akış tekniğidir. Çapraz akış hızının artması membran yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki artışı engeller. Kek tabakasının artışı membrandan süzülen akıyı azalttığı için çapraz akış hızı membranın kullanım ömrünü uzatmaktadır.

3.3.9 Membran Akısı (J)

Membran filtrasyonunda birim zamanda, membranın birim alanından geçen sıvı miktarı akı olarak tanımlanmaktadır. Akı (J) birimi $m^3/m^2.sn$ ya da $L/m^2.sa$ olarak ifade edilmektedir. Membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının artışı akıyı azaltmaktadır. Membran filtrasyonunda süspans ve kolloid maddeler tutularak en iyi derecede suyu

geçirmesi beklenmektedir. Akı miktarı bu sebeple membran filtrasyonunda çok önemlidir. Sürekli olarak ölçülmeli ve diğer parametreler için önemi incelenmelidir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Kullanılan Atıksuyun Karakterizasyonu

Bu çalışmada Balıkesir Organize Sanayii Bölgesi Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisinden alınan gerçek atıksu kullanılarak yapılmıştır. Alınan ham atıksuyun giriş parametreleri Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

Tablo 4.1: Balıkesir organize sanayii bölgesi endüstriyel atıksu arıtma tesisine giren ham su parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	1700-4300
Azot	mg/L	30-100
pH	-	6-7
İletkenlik	microS/cm	1000-3500
Çözünmüş oksijen	mg/L	0,10-0,50

Sisteme beslenen atıksu OSB arıtma tesisinin dengeleme havuzundan temin edilmiştir. Özellikle büyük katılar ve çökebilir maddeler içermemesi için bu yol seçilmiştir. Bir başka ifadeyle ön (fiziksel) arıtma sonrasında alınmıştır. Laboratuvara getirilen atıksular ayrıca kaba bir süzme işlemine tabi tutulmuştur. Çökebilir katıların reaktör sistemine girmesi engellenmeye çalışılmıştır.

Atıksu analiz edildikten sonra sistem gün içinde kesikli olarak beslenmiştir.

Yapılan karakterizasyon çalışmasından atıksuyun yüksek KOİ konsantrasyonuna sahip olduğu gözlenmiştir. OSB’de 158 adet endüstriyel kuruluş bulunmakta ve bunlardan kaynaklanan atıksuların organik içeriğinin yüksek olduğu literatürden anlaşılabilmektedir. Atıksu kabul edilen endüstriyel tesislerin sayısı ve özellikleri Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: Balıkesir OSB'ye kabul edilen endüstriyel tesislerin özellikleri

Balıkesir OSB'ye Kabul Edilen Endüstriyel Tesislerin Özellikleri	
Gıda	26
Metal	22
Yağ	1
Cam Elyaf	2
Orman Ürünleri	6
Ambalaj	1
Mobilya	5
Temizlik	1
Kimya	7
Ayakkabı	2
Maden	3
Elektronik	4
Makine	31
Tekstil	7
Mermer	2
Plastik	9
Tarım	8
Otomotiv	4
İnşaat	5
Kağıt	2
Taş	3
Halıcılık	1
Prefabrik	3
Motor	2
Kuluçka	1

Bu endüstriyel tesis atıksularının kanal kabul standardına göre ön arıtımından sonra OSB sistemine verilmesi gerekmektedir. Ancak bu zaman zaman aksamakta ve çok farklı karakterde atıksu girişi olmaktadır.

4.2 Jet Loop Biyoreaktörün Kütle Transfer Özellikleri

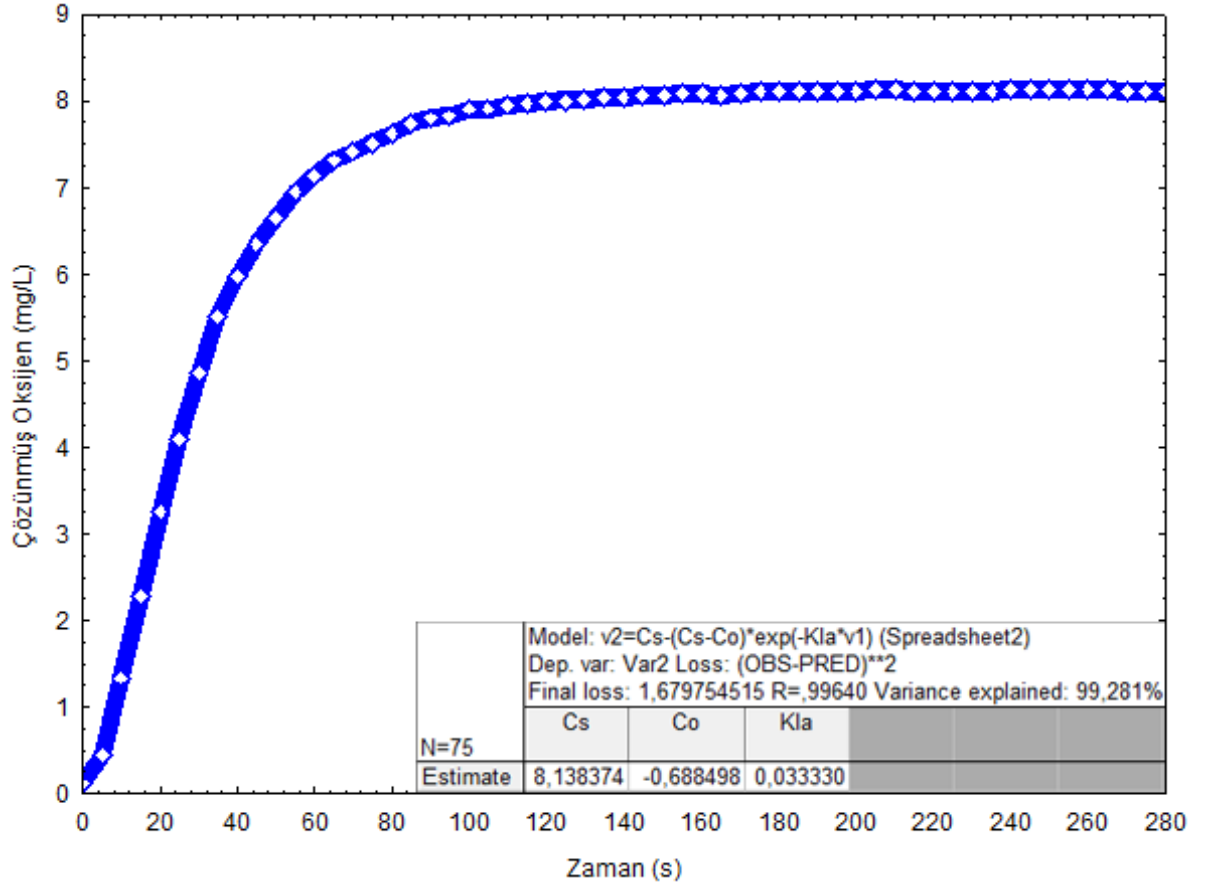
Jet loop sistemi yüksek hızlı yüksek karışımli kompakt bir reaktördür. Çalışmalarda kullanılan harici membran eklenmiş JLMBR sisteminin gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Sistem çalıştırılırken vana pozisyonları manuel olarak değiştirilerek hava miktarları ayarlanmıştır.

Membran temizlenmesi veya değişimi yapılacağı zamanlarda sistem vana pozisyonları yardımıyla membrana girmeden reaktöre basacak şekilde ayarlanabilmiştir.



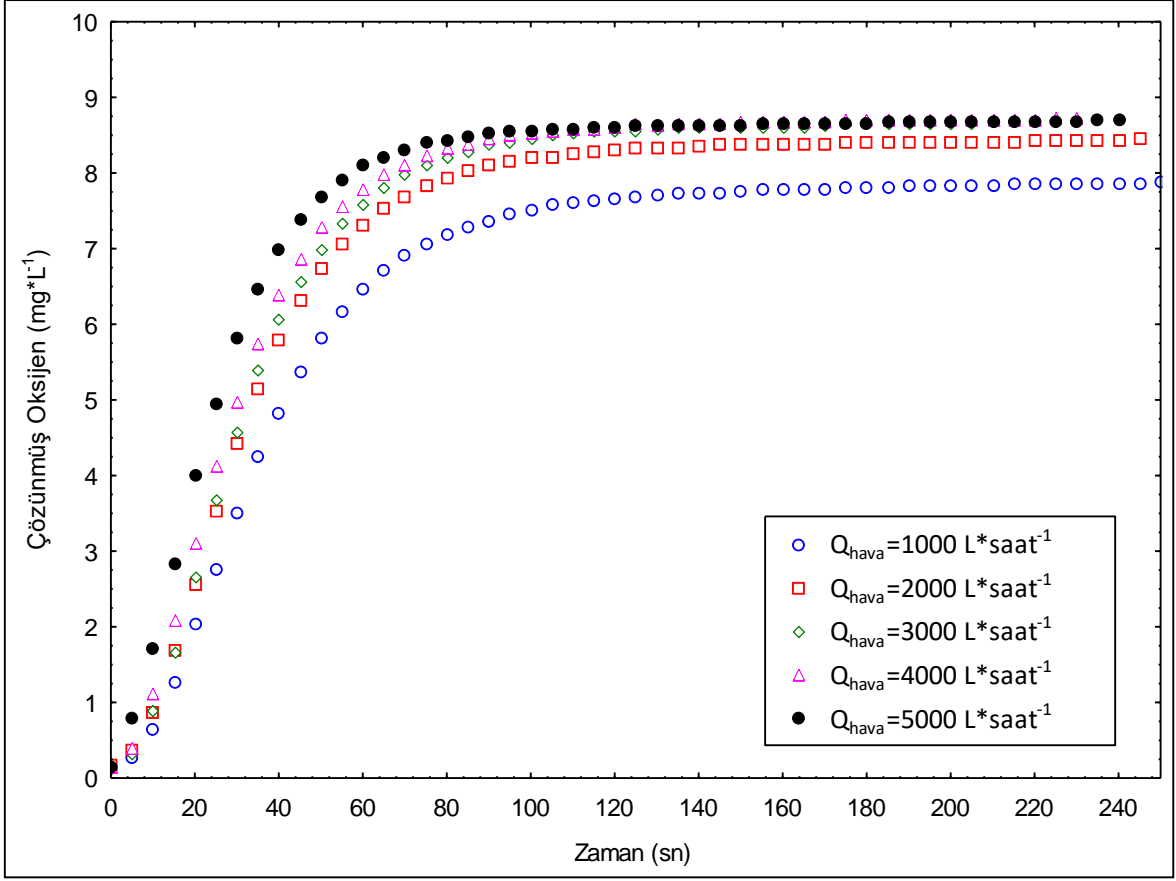
Şekil 4.1: Bu çalışmada kullanılan jet loop membran biyoreaktör sistemi (JLMBR)

Jet loop reaktörlerin en büyük avantajlarından bir tanesi yüksek kütle transferini sağlamasıdır. Jet loop reaktöründe emme hattı içerisindeki püskürtme başlığı ile üretilen sıvı jeti yüksek miktarda türbülans meydana getirerek kütle transfer katsayısını (K_{La}) artırır. Hava ve su debisi etkileri incelenerek K_{La} katsayısına etkisi gözlemlenmiştir. Püskürtme başlığı ile sisteme giren küçük boyutlara sahip hava kabarcıklarıyla su arasındaki etkin yüzey alanının artması, kütle transfer katsayısının da artmasına sebep olur. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda hesaplanan K_{La} ve C_s değerlerine göre hazırlanan grafik Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Yapılan deneylerde ölçülen çözülmüş oksijen değerlerinin Statistica 6.0 programı kullanılarak K_{La} ve C_s^* 'nin hesaplanması

Reaktördeki K_{La} değerinin artışı, ara yüzey alanının değerinin artışıyla ya da gaz-sıvı ara yüzey kütle transfer katsayısının artışı ile değişim göstermektedir. Jet loop reaktörlerde klasik sistemlere oranla daha yüksek oksijen transferi gerçekleşmektedir. Reaktör hacminin 14 L olduğu çalışmada, 22,5 °C sıcaklıkta yapılan deneyin sirkülasyon hızının 3300 L/saat olduğu durumdaki K_{La} değerinin 90 saat⁻¹ olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.3'te K_{La} değişimlerinin gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.3: K_{La} değerlerinin gaz debisi ve sirkülasyon hızına bağlı olarak değişimi

Şekil 4.3'ten de anlaşılacağı üzere K_{La} değerleri sirkülasyon hızı arttıkça artmaktadır. Sirkülasyon hızının artması sisteme verilen havanın çok daha küçük kabarcık boyutlarına dönüşmesine neden olmaktadır. Bu da O_2 ve kütle transferi için yüzey alanının artmasına neden olarak toplam kütle transferi hızını arttırmaktadır.

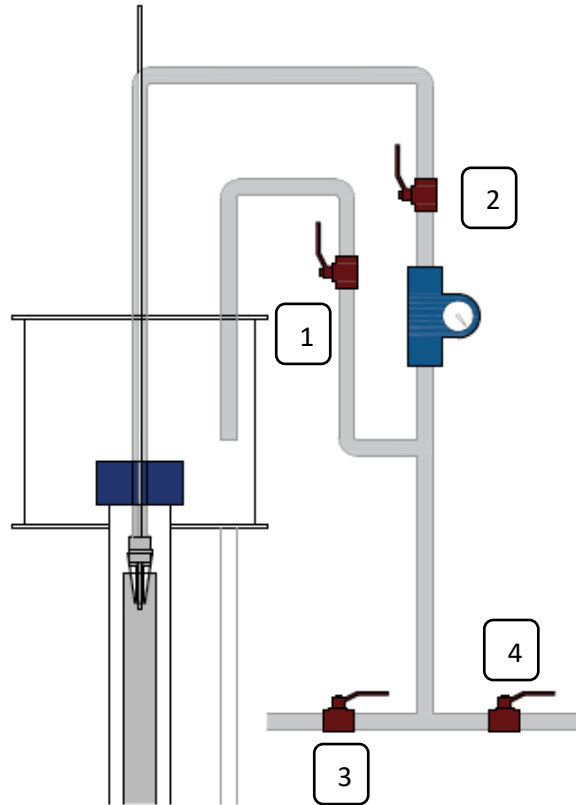
Benzer şekilde hava debisinin artışıyla K_{La} değerlerinde artış açık bir şekilde görülmektedir. Hava debisinin artışı sistemde havanın daha fazla tutulmasına neden olmaktadır. Sistemde havanın hem daha fazla miktarda tutulması hem de uzun süre kalması kütle transferini arttırmaktadır. JLR'lerin en önemli özelliklerinden birisi püskürtme başlığının emme tüpü girişinde oluşturduğu emme bölgesi nedeniyle sisteme giren kabarcıkların çevrime (loop) girerek uzun süre sistemde kalması nedeniyle kütle transferi için uzun zaman kazandırması olarak gözlenmektedir. Bu da yine yüksek O_2 transferi sağlanmasına yol açmaktadır.

4.2.1 Sistemin Havalandırılması

Aerobik biyolojik arıtma sistemlerinde (A.Ç, U.H.A.Ç, kontak stabilizasyon vs.) sisteme hava temini işletme maliyetinin en büyük kısmına tekabül etmektedir. Çalışmadan oksijen temini için ayrı bir hava sağlayıcı kullanılmamıştır. Sistemin kendi dinamiklerinden faydalanılarak oksijen temini sağlanmıştır.

JLMBR sisteminde membran modülü olarak UF seramik membranı kullanılmıştır. Çapraz akış modunda ve harici membran sistemi ile bütünleşiktir. Sisteme hem jet oluşturmak hem de çapraz akış ve transmembran basıncı oluşturmak için tek bir pompa kullanılmıştır. (Şekil 3.3)

Pompa ile JLR'nin degazifikasyon bölgesinden çekilen içerik öncelikle UF membran sistemine basılmaktadır. Burada kullanılan vanalar yardımıyla membran için gerekli TM basıncı oluşturulmaktadır. Membrana çapraz akış oluşturan akım (konsantre akım) püskürtme başlığının içerisinden geçerek JLR'e girmektedir. Püskürtme başlığında çelik hava borusu ile birleşerek draft tütünün girişinden itibaren reaktöre girmektedir.



Şekil 4.4: Oksijen temin mekanizması

Püskürtme başlığının çıkışında oluşan yüksek emme gücüne sahip jet akım ucu atmosfere açık olan çelik hava borusunda hava emmektedir. Şekil 4.4'te gösterilen 2 numaralı vananın olduğu hattın devamında ejektör olarak kullanılan bu püskürtme başlığı sistem için hava temin etmektedir.

By-pass hattı ile birlikte inşa edilen bu mekanizma ihtiyaç durumunda hattaki 1 numaralı vana kısılarak püskürtme başlığına gelen debinin artmasını sağlamakta ve artan jet hızında atmosferden daha fazla hava çekmektedir. Böylece istenilen ÇO konsantrasyonları sisteme sağlanmaktadır. Çalışmanın en değerli çıktılarından birisi de havanın direk sistem dinamikleri ile sağlanması olarak sunulmuştur.

4.3 Balıkesir Organize Sanayi Bölgesi (OSB) Atıksularının Jet Loop Membran

Biyoreaktör (JLMBR) Sistemiyle Arıtımının İncelenmesi

4.3.1 Jet Loop Membran Biyoreaktör Sisteminin Biyolojik Arıtıma İçin Hazır Hale Getirilmesi

Atıksular biyolojik metotlarla arıtılırken mikroorganizmaların çok büyük bir rolü vardır. Başlangıçta ise mikroorganizmaların prosese uyum sağlaması çok önemlidir. Çünkü ortama alışmamış mikroorganizmalar biyolojik arıtmada randımanı düşürmekte ve olumsuz etkilemektedir. Mikroorganizmaların uygun şartlarda havalandırılarak ve atıksuyla beslenerek ortama hazırlanması sağlanmalıdır.

Bu çalışmada OSB'nin havalandırma havuzundan alınan aktif çamur çevre mühendisliği araştırma laboratuvarına getirilerek çubuk difüzörlerle havalandırılarak ve düzenli olarak karıştırılarak jet loop reaktör içerisine alınmak için hazır hale getirilmiştir. Havalandırma işlemi yapılan çamur jet loop reaktörü içerisine alınarak kesikli olarak OSB'nin dengeleme havuzundan alınan atıksu ile besleme işlemi yapılmıştır. Jet loop reaktörler (JLR) akım şartları nedeniyle çok küçük flok yapısında mikrobiyal topluluğa sebep olmaktadır. Çalışmada da reaktöre alınan aktif çamur, 2 gün boyunca kesikli olarak beslenerek reaktörün yüksek kesme kuvvetine sahip akım şartlarına ve yüksek O₂ içerikli ortamına alıştırmıştır. Bu süreçte reaktör içeriğinin çokça köpürdüğü gözlenmiştir. Mikroorganizmaların sistemin akım şartlarına uyumunun tamamlanmasıyla köpürmelerin azaldığı görülmüştür.

Bu süreçte ÇO sürekli kontrol edilmiştir. Alıştırma evresinin akabinde sistem sürekli besleme moduna geçilerek çalıştırılmıştır.

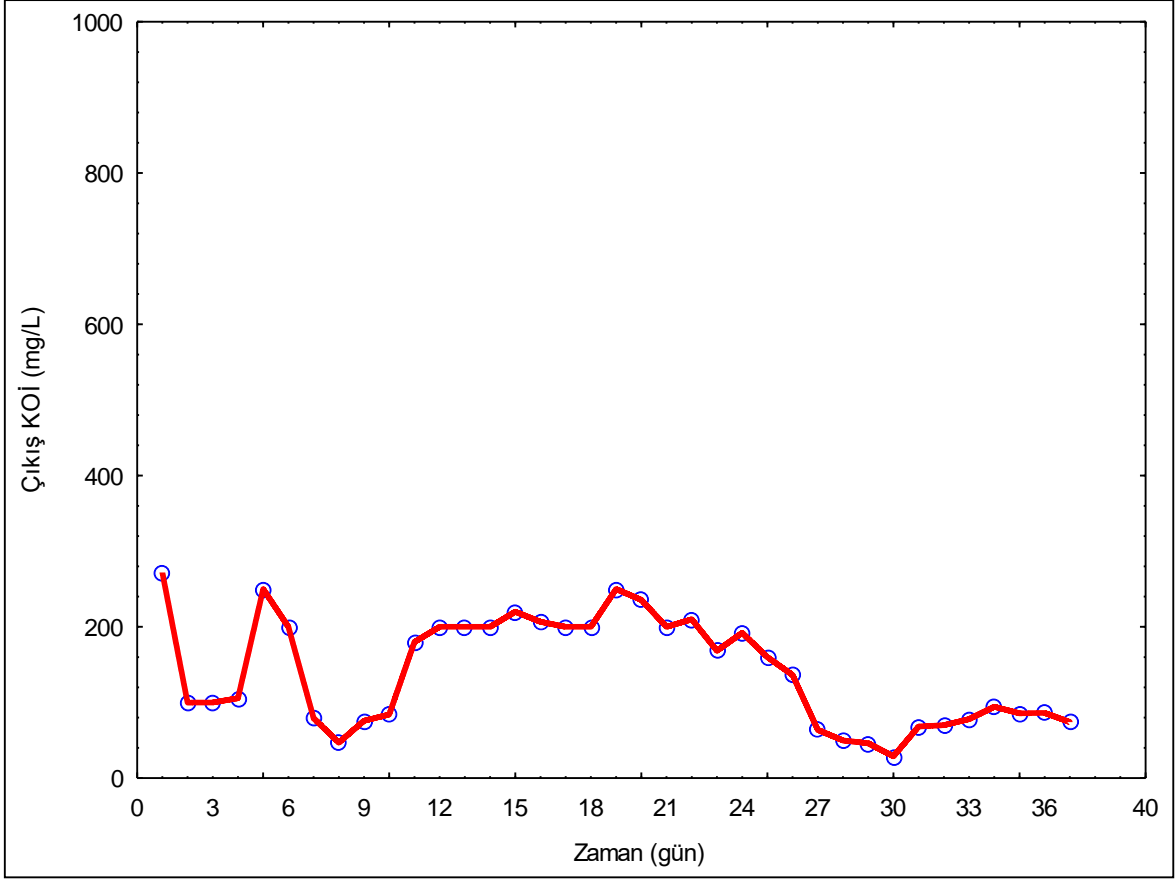
4.3.2 Jet Loop Membran Biyoreaktörde KOİ Gideriminin Performansına Etkisi

Balıkesir organize sanayi bölgesine gelen kirlilik yükleri farklı birçok endüstrinin atıksu karakterizasyonu incelendiğinde yüksek KOİ değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüksek kirliliği arıtmak için biyolojik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en etkili membran sistemleridir. Membran sistemleri endüstriyel atıksular için çok önemli bir arıtma alternatifidir. JLR emme tüpü girişindeki püskürtme başlığının sağladığı sıvı ve gaz akımı hava kabarcıklarını küçük parçalara böler. Bu sebeple etkili bir karışım elde edilir ve yüzey alanı etkin bir şekilde artar. Aktif çamur reaktöre alıştıktan sonra sisteme belirlenen miktarlarda beslemeler yapılmıştır.

Balıkesir OSB'den yaklaşık 3 günlük periyotlarla alınan 200 L atıksu gün içerisinde sisteme kesikli beslenirken sistem 24 saat kesintisiz çalıştırılmıştır. Beslenen atıksu miktarı giderek arttırılmıştır. Alınan atıksudan günlük KOİ analizi yapılarak besleme konsantrasyonları ve de yükleme hızları hesaplanmıştır. Sistemin hacminin yaklaşık 3-4 katı atıksu geçirildikten sonraki çıkış değerleri denge şartlarında olduğu kabul edilmiştir. Girişten alınan ve sistemden elde edilen KOİ çıkış değerleri Şekil 4.5'te gösterilmektedir.

Şekil 4.5'ten de anlaşılacağı üzere sisteme giriş konsantrasyonlarındaki büyük değişimlere rağmen sistemden stabil bir çıkış elde edilmiştir. Bu membran ünitesinin JLB ile kombinasyonundan oluşan JLMBR sisteminin yüksek kütle transfer ve karışım şartlarına atfedilebilir.

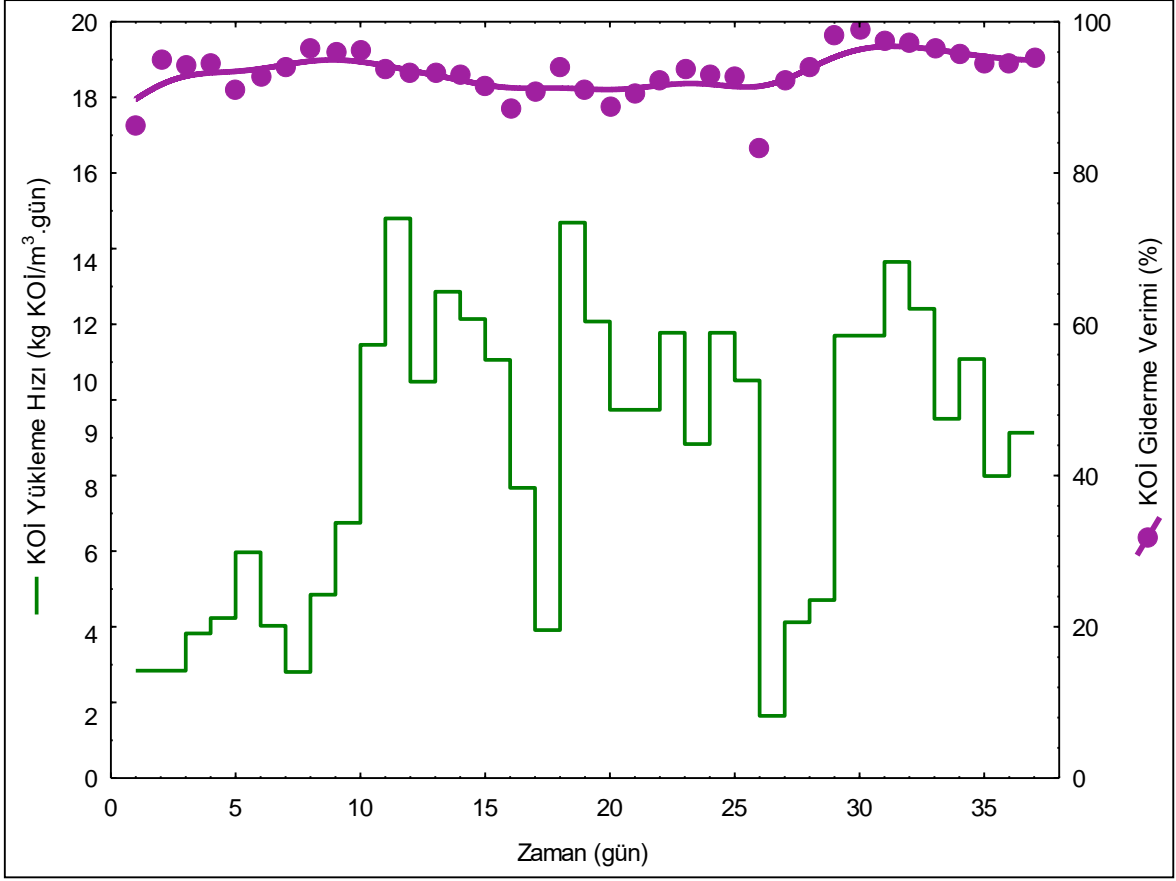
Sisteme her atıksu beslemesi esnasında ÇO değerlerinde KOİ girişine de bağlı olarak keskin düşüşler görülmüştür. Özellikle yüksek KOİ beslemelerinde çok daha hızlı düşüşler olmuştur. Aynı zamanda bu zamanlarda sistemde köpürmeler gözlenmiştir. Köpürmenin aşırı olduğu durumlarda köpüklerle birlikte sistemden çamur kaçağı olmuştur. Köpüren çamur toplanarak çamur yaşı hesabında miktarı değerlendirilmiştir.



Şekil 4.5: Jet loop membran biyoreaktörde KOİ giderimi

4.3.3 Organik Yükleme Hızının KOİ Giderimine Etkisi

Günlük olarak kullanılan atıksuyun KOİ konsantrasyonları ölçülerek günlük organik yükleme hızları hesaplanmıştır. Yükleme hızları ile çıkış verimleri arasındaki ilişki Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Organik yükleme hızı değerleri ile KOİ giderme veriminin değişimi

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere organik yükleme hızı 2,84-14,8 kg KOİ/m³.gün değerleri arasında değişmektedir. Reaktöre beslenen yüklemelerin yüksek salınım yaptığı görülmektedir. Reaktöre beslenen yüklerin salınımının bir sebebi farklı konsantrasyonlardaki atıksulardan ve değiştirilen besleme debisinden kaynaklanmaktadır.

Sisteme besleme hızlarınının 3-4 katına çıkmasına karşın arıtma verimlerinde çok büyük değişimler gözlemlenmiştir. Sisteme beslenen yükler 14,8 kg KOİ/m³.gün değerine çıktığında dahi sistemden oldukça yüksek verimler elde edildiği görülmektedir.

Reaktör sistemi sahip olduğu yüksek K_{La} ve karışım şartları nedeniyle yüksek yüklerde dahi yeterli O_2 'i temin etmiştir. Yükleme hızlarınının yüksek olduğu durumlarda O_2 konsantrasyonu düşmektedir. Bu durum hava debisinin artırılması ile (by-pass hattındaki vana kısılarak) CO konsantrasyonlarının yükselmesi ile sonuçlanmıştır.

Yükleme hızlarının artmasının yaşattığı bir diğer olumsuz şart ise köpüklenmenin artmasıdır. Bu da çamur kaçağına neden olmuştur. Dolayısıyla sistem verilen hava miktarı ile köpürmenin olmadığı şartlarla dengede tutulmuştur.

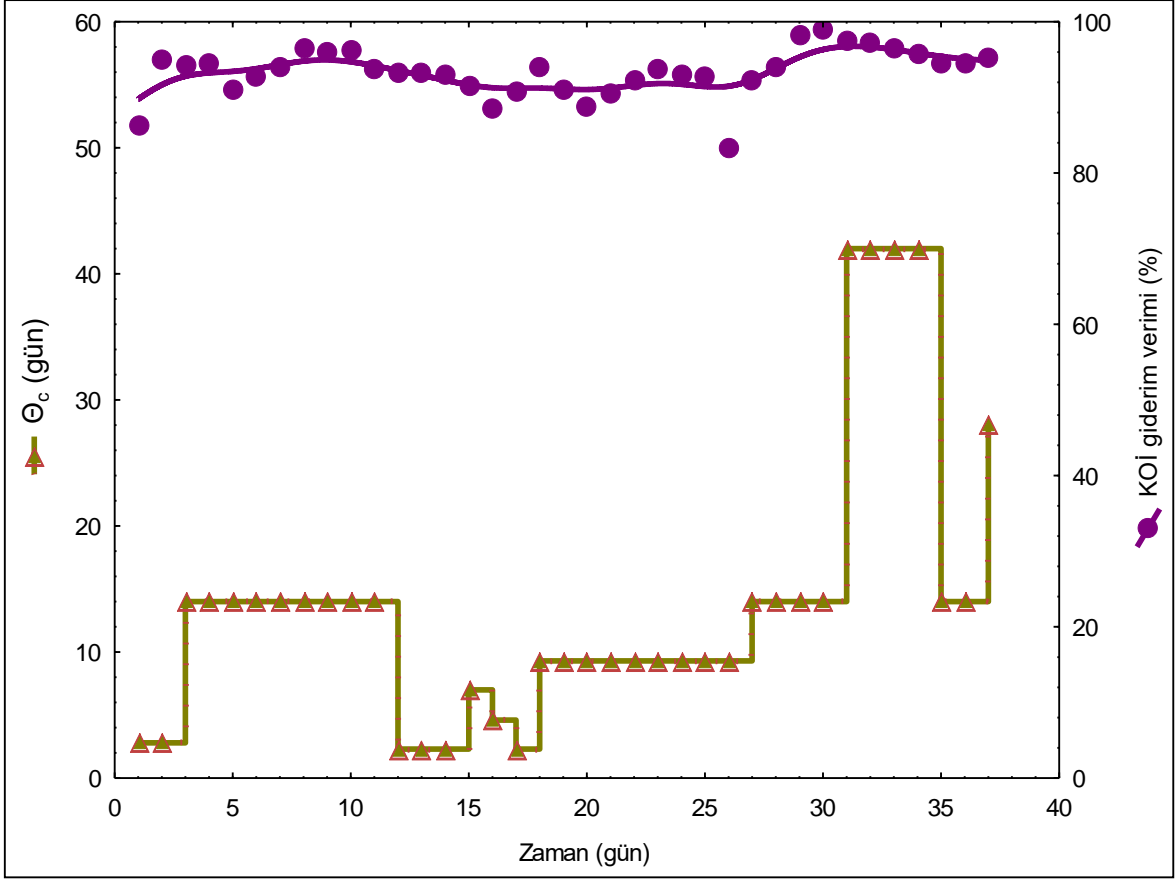
Yüksek yükleme hızlarında dahi ($14,8 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{gün}$) sistemden yüksek arıtma verimi ve performansı elde edilebilmesi JLMBR sisteminin OSB gibi zor artırılabilir ve yüksek kirlilik içeren atıksuların arıtımına ciddi bir alternatif sunmaktadır.

4.3.4 Çamur Yaşının JLMBR Sisteminin KOİ Giderimine Etkisi ve Dizaynı

Çamur yaşı, biyolojik arıtım sistemin dizayn ve işletilmesinde kullanılan parametrelerden biridir. Çamur yaşının değeri sistemdeki toplam biyokütle miktarı ve sistemden atılan çamur debisine oranıyla bulunmaktadır.

Yapılan çalışmada farklı çamur yaşlarının çıkış suyundaki KOİ giderim verimine etkisi Şekil 4.7’te ki grafikte gösterilmiştir. Çamur yaşının artışı ile sistemde tutulan MLSS miktarının artması sağlanmaktadır. Konvensiyonel sistemlerde MLSS konsantrasyonunun artışı sınırlıdır (en yüksek 5000 mg MLSS/L). Yüksek çamur konsantrasyonu gerekli oksijen temininde problem yaşanması sonucunu doğururken bu da çöktürme havuzlarında çökeltme sorunları yaşanmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada sistemin reolojisinden kaynaklanan yüksek oksijen temini nedeniyle oksijenin yetersiz gelme sorunu ortaya çıkmamaktadır. Çalışma süresince yeterince O_2 sürekli temin edilebilmiştir. Diğer taraftan ise kullanılan membran sayesinde çamurun tamamı sistemde tutulabilmektedir. Çamur yaşı (Θ_c) membrandan çekilen akı ile ayarlanmıştır. UF membran sisteminden yeterli miktarda akı (çıkış) alındığında çamur yaşı istenildiği değerlerde tutulmuştur. Çalışma süresince, hatta isteğe bağlı olarak MLSS analizleri vs. için çamur alımı dışında, çamur atılmamıştır. Sistemden köpüklenme yoluyla kaçan çamurlar toplanarak hacimleri ölçülmüş ve buradan çamur yaşı değerleri hesaplanmıştır. Çalışma süresince Θ_c ile çıkış değerlerinin değişmediği gözlenmiştir.



Şekil 4.7: Çamur yaşıyla KOİ giderim veriminin değişimi

Yapılan literatür taramasında elde edilen bilgilere göre daha önceki jet loop membran biyoreaktör sistemiyle yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [24, 33]. Çamurun ortama adaptasyonu için yaklaşık 5-10 günlük bir zamana ihtiyaç duyduğu gözlemlenmiştir.

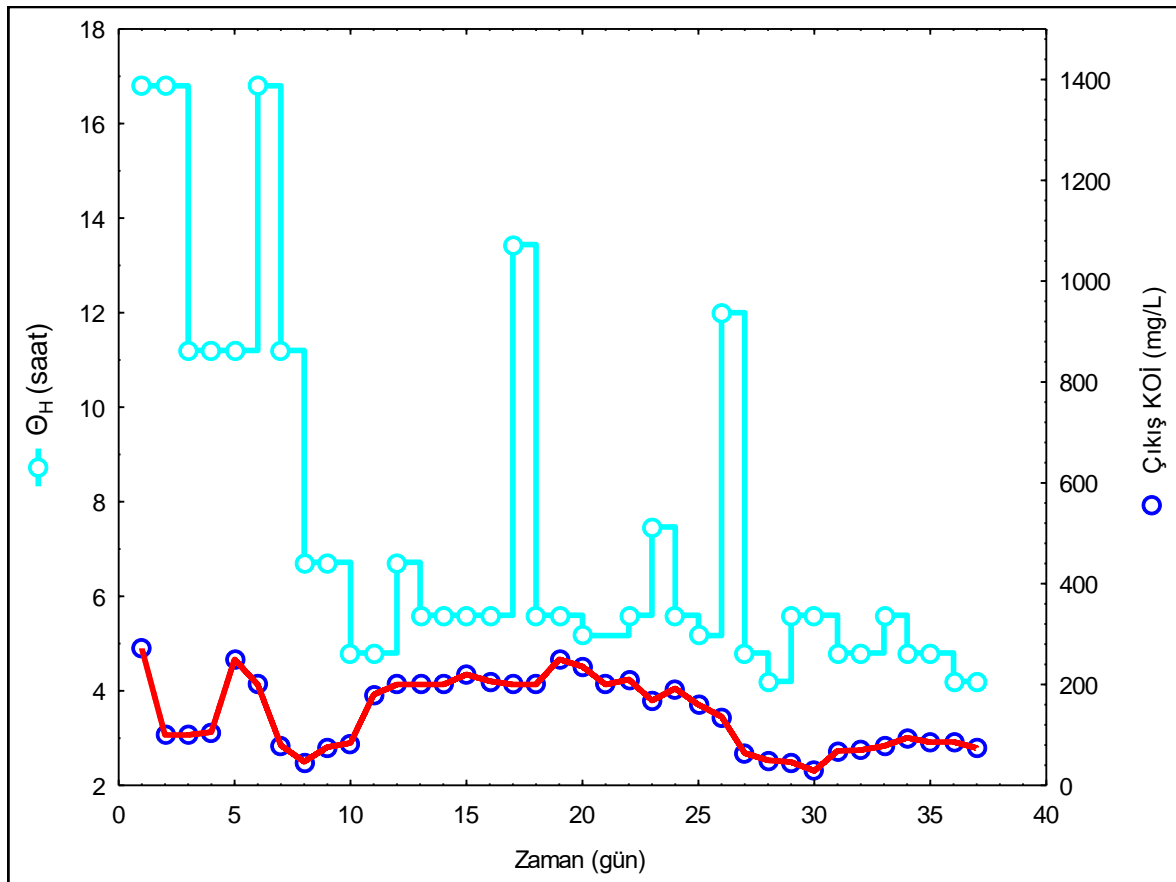
Bu çalışma Θ_c değeri 2,3 ve 42 gün arasında işletilmektedir. Çalışma süresince KOİ verimlerinin % 88 ile % 98 arasında olduğu görülmüştür.

4.3.5 Hidrolik Bekletme Süresinin (HRT) JLMBR'ün KOİ Giderimine Etkisi

Sistemin hidrolik bir şekilde dengede olması amacıyla besleme debisinin ve çıkış debisinin birbirine eşit olarak ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada çıkış, reaktör seviyesi kontrol edilerek membrandan alınmaktadır. Şekil 4.8'de ki grafikte görüldüğü üzere hidrolik bekletme süresi 4,2-16,8 saat aralığında değişim göstermektedir. Sistemde bekletme süreleri besleme debisine göre hesaplanmıştır. Bekletme süresinin 3,5 saatin altına düştüğü zamanlarda dahi oldukça düşük çıkış değerleri elde edilmiştir. Şöyle ki

kurulu arıtma tesislerinde (Balıkesir OSB ve diğer OSB'ler) havalandırma havuzlarında bekletme süreleri 24 saatin üzerindedir. Bu sonuç sistemin OSB atıksularının arıtım ve hatta kurulumu için heyecan vericidir. Oldukça düşük bekletme süreleri son derece az havalandırma ve işletme maliyetinde azalma anlamını taşımaktadır.

Bu yüksek performans JLR' ün yüksek oksijen temini ve karışım olaylarının yanı sıra UF membran ünitesinin katkısıyla yüksek MLSS tutulmasına atfedilebilir.

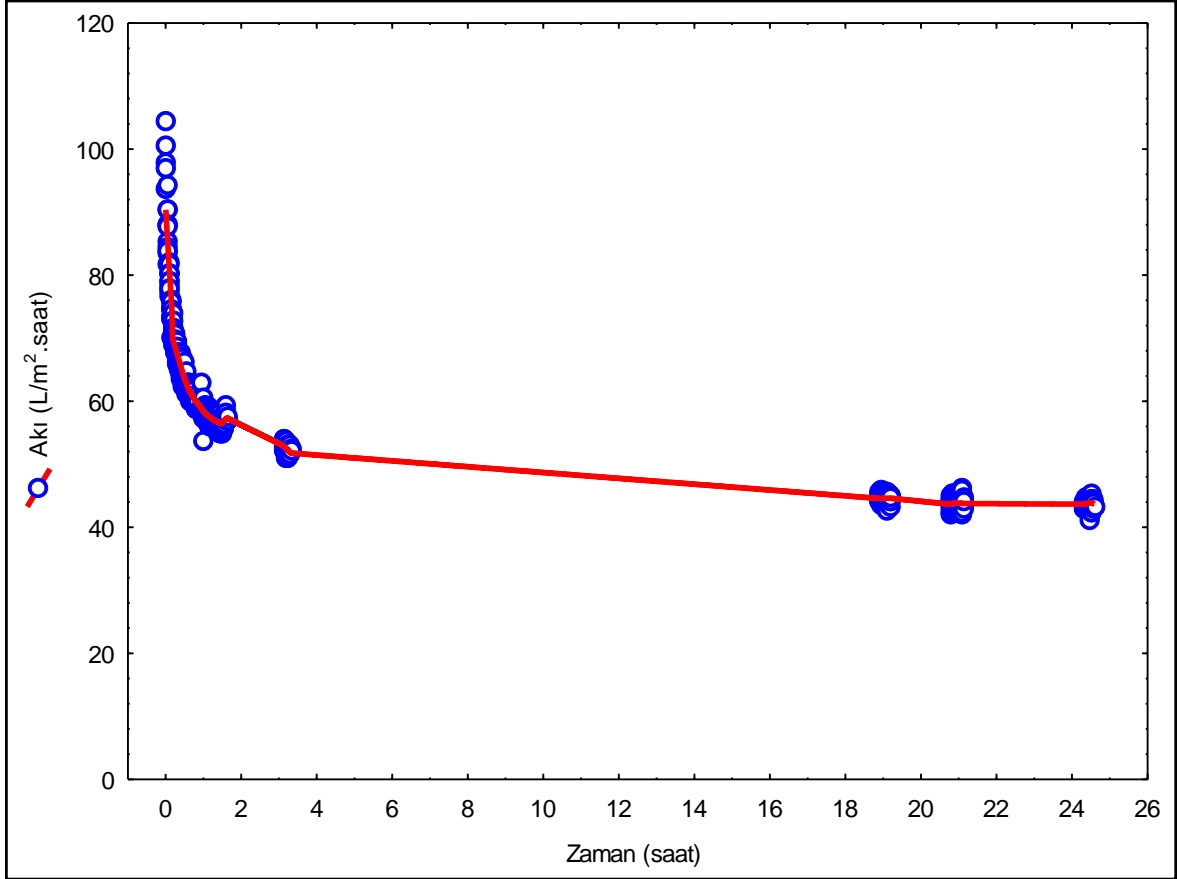


Şekil 4.8: Hidrolik bekletme süresinin çıkış KOİ değerine etkisi

4.3.6 JLMBR Membran Filtrasyonu Özellikleri

Seramik membranların özellikle son dönemlerde çeşitli avantajlarından dolayı kullanılması arıtma sektöründe oldukça yaygınlaşmıştır. Seramik membranların, kolay bir şekilde temizlenebilir olması, üretim maliyetinin düşük olması, uzun ömürlü olmaları, yüksek sıcaklıklara ve çeşitli kimyasallara direnç gösterebilmeleri sebebiyle arıtma endüstrisinde pek çok avantaja sahiptir. Çalışmada kullanılan membran, Jiangsu Jiuyu Hitech Co. Ltd. firmasından tedarik edilmiştir. Sistem yaklaşık 1 bar basınçla çalıştırılmıştır. Çapraz akışlı

ultrafiltrasyon membran, 1 m uzunluğunda, 0,125 m² yüzey alanında ve 0,1 µm por çapında silindirik şekilde seramik malzemedendir. Jet loop biyoreaktör içerisinde meydana gelen biyokütlenin çıkış suyundan ayrılmasında ultrafiltrasyon ünitesi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ultrafiltrasyon ünitesinin filtrasyon özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.9'da ki grafiğe göre membrandan elde edilen akının zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 4.9: Membrandan elde edilen akı zaman eğrisi

Şekil 4.9'da temiz membrandan elde edilen akı değerlerinin 24 saatlik bölümü gösterilmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere 24 saatlik sürenin yaklaşık 18. saatinden itibaren sabit akı değerlerine ulaşılmıştır. Bundan sonra gözlenen akılardaki azalma çok daha az olmaktadır. 24 saatin sonunda yaklaşık olarak 50 lt/m².saat'lik akılar gözlenmiştir.

Jet loop membran biyoreaktörü içerisinde sürekli olarak artış gösteren MLSS konsantrasyonu, belli bir zaman sonra membran yüzeyinde birikerek kek tabakası oluşturur. Oluşan kek tabakasının kalınlığının artması nedeniyle membrandaki akıların miktarında düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 4.9'de görüldüğü üzere membran giriş debisi

arttırılarak kesme kuvvetinin arttırılması sağlanmıştır. Artan kesme kuvveti sayesinde kek tabakası daha çok ve hızlı bir şekilde yüzeyden sprlmektedir. Bu şekilde yüksek akı değerleri elde edilir.

Çalışma süresince membran ünitesinden oldukça yüksek akı değerleri elde edilmiştir. Bu da kirlenmenin az olduğunun yanı sıra membran tıkanmasının gerçekleşmediğine atfedilebilir. Bu durumun atık suyun yapısından da kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Çalışmada Balıkesir OSB atıksuyunun JLMBR sisteminde arıtılabilirliği incelenmiştir. Mevcut arıtma tesisinin dengeleme havuzundan alınan atıksular direk olarak sisteme beslenerek çalışılmıştır. Çalışma süresince oldukça heyecan verici sonuçlar elde edilmiştir. Jet loop biyoreaktör sistemlerindeki K_{LA} değerleri klasik sistemlerin çok üstündedir. Reaktör hacminin 14 L olduğu çalışmada, 22,5 °C sıcaklıkta yapılan deneyin sirkülasyon hızının 3300 L/saat olduğu durumdaki K_{LA} değerinin 90 saat⁻¹ olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sisteme gerektiği kadar oksijenin temin edilmesine imkan vermektedir.

2. OSB atıksu arıtma tesisinden alınan ham atıksuyun kirlilik yüklerine göre karakterizasyonları; KOİ konsantrasyonu 1700-4300 mg/L, N 30-100 mg/L, pH 6-7, iletkenlik 1000-3500 microS/cm, ÇO 0,10-0,50 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir.

3. Jet loop reaktör içerisine alınan atıksuyun yükleme hızı arttıkça reaktörde doğru orantılı bir şekilde köpürme olduğu gözlemlenmiştir. Biyokütle ortama alışıp adapte olunca köpürme durumu sonlanmıştır. Biyoreaktörün çeşitli bölgelerinde biyofilm tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu tabakanın renginin kahverengiden siyaha dönecek şekilde değiştiği görülmüştür. Daha sonra zamanla kalınlaşan kek tabakasının, kesme kuvvetinin etkisiyle koparak sirkülasyona dahil olduğu gözlemlenmiştir.

4. Jet loop membran biyoreaktör sisteminde arıtma performansı açısından oldukça yüksek verimler elde edilmiştir. Prosesten 11,7 kg KOİ/m³.gün (KOİ giriş 2730,2 mg/L) ve 5,6 saat hidrolik bekletme süresi için % 98,9 arıtma verimi elde edilmiştir. Yine bu çalışmada 11,08 kg KOİ/m³.gün (KOİ giriş 2216,8 mg/L) ve 4,8 saat hidrolik bekletme süresi için % 95,7 arıtma verimi elde edilmiştir. Jet loop membran biyoreaktör sistemi ile çok yüksek verimde arıtma gerçekleşmiştir.

5. Çalışma boyunca ÇO konsantrasyonu genel olarak 1,72 mg/L civarında ölçülmüştür. Yüksek yüklemelerde ÇO konsantrasyonu oldukça düşük göstermiş fakat bu koşullarda bile performansı olumsuz etkileyecek bir durum yaşanmamıştır. Bunun sebebi jet loop membran biyoreaktörlerin oldukça yüksek oksijen transferi sağlaması ve yoğun sirkülasyondan dolayı tamamen homojen bir içerik bulundurmasıdır.

6. Sisteme dışarıdan bir ekipman (blower, kompresör, hava pompası) kullanmadan hava sağlanmış ve ÇO konsantrasyonları ayarlanmıştır. JLR'nin püskürtme başlığı ejektör modunda çalıştırılarak sistemin kendiliğinden atmosferden hava çekmesi sağlanmıştır. Böylece havalandırma maliyeti ortadan kaldırılmıştır.

7. Kullanılan UF membran ünitesinden AKM=0 olacak şekilde sürekli olarak çıkış elde edilebilmiştir. Membran akısı ile sistemin çamur yaşı ayarlanmıştır.

8. Çalışma devam ettirilerek membran kirlenme ve süzme özellikleri araştırılmaktadır.

9. Sonuç olarak çalışmada OSB atıksularının arıtımından JLMBR sistemi oldukça değerli bir alternatif oluşturmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] M.T. Santos, & P. A. Lopes, “Sludge recovery from industrial wastewater treatment. Sustainable Chemistry and Pharmacy”, 29, 100803. Sludge recovery from industrial wastewater treatment, 2022.
- [2] F. Ferella, I. De Michelis, C. Zerbini, & F. Vegliò, “Advanced treatment of industrial wastewater by membrane filtration and ozonization”, *Desalination*, 313, PP. 1-11, 2013.
- [3] S. Udayakumar, & K. Praveen, “Advancements in industrial wastewater treatment by integrated membrane technologies. In Integrated Environmental Technologies for Wastewater Treatment and Sustainable Development”, pp. 369-382, Elsevier, 2022.
- [4] İ. Öztürk, H. Timur, & U. Koşkan, “Atıksu arıtımının esasları evsel, endüstriyel atıksu arıtımı ve arıtma çamurlarının kontrolü”, *TC Çevre ve Orman Bakanlığı, İstanbul*, 2005.
- [5] P.D. Günay, “Su kimyası ve Kimyasal temel işlemler”. “Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü”, *Balıkesir*. s: 56-62, 2018.
- [6] E. Hualpa-Cutipa, R. A. S. Acosta, S. Sangay-Tucto, X. G. M. Beingolea, G. T. Gutierrez, & I. N. “Zabarburú, Recent trends for treatment of environmental contaminants in wastewater: An integrated valorization of industrial wastewater”, “In *Integrated Environmental Technologies for Wastewater Treatment and Sustainable Development*”, (pp. 337-368). Elsevier, 2022.
- [7] S.B. Doltade, Y. J. Yadav, & N. L. Jadhav, “Industrial wastewater treatment using oxidative integrated approach”, “*South African Journal of Chemical Engineering*”, 40, 100-106, 2022.
- [8] H.H. Nijhuis, M.H.V. Mulder, & C.A. Smolders, “Removal of trace organics from aqueous solutions. Effect of membrane thickness. Journal of membrane science”, 61, 99-111, 1991.
- [9] İ. Koyuncu, H. Hasar, B. Keskinler, V. Uyak, İ. Öztürk, D.Y. İmer, & A. Altınay, “Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları- Cilt 1: Membran Teknolojileri ve Su Arıtma”, 2018.
- [10] R.W. Baker, “*Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons”, 2012.
- [11] D. Yadav, S. Karki, & P.G. Ingole, “Current advances and opportunities in the development of nanofiltration (NF) membranes in the area of wastewater treatment, water desalination, biotechnological and pharmaceutical applications”. “*Journal of Environmental Chemical Engineering*”, 108109, 2022.

- [12] P. D. Ardalı, “Membran Biyoreaktörler ve Uygulama Alanları Biyofilm Kinetiği”, 2020.
- [13] J. Wagner, “Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints by Chem. Eng Second Edition, Revision 2”, 2001.
- [14] J. Schwinge, P. R. Neal, D. E. Wiley, D. F. Fletcher, A.G. Fane, “Spiral wound modules and spacers: Review and analysis. Journal of Membrane Science. Elsevier”, 2004.
- [15] D. K. Jain, A. N. Patwari, M. B. Rao, A. A. Khan, “Liquid circulation characteristics in jet loop reactors. The Canadian Journal Of Chemical Engineering”, 68, 1047–1051, 1990.
- [16] M. Velan, T. K Ramanujam, “Gas-liquid mass transfer in a down flow jet loop reactor. Chem. Eng. Science”, 47, 2871–2876, 1992.
- [17] G. Padmavathi, K. R. Rao, “Influence of geometry on gas holdups in a reversed flow jet loop reactor. The Canadian Journal Of Chemical Engineering”, 71, 94–100, 1993.
- [18] K.Y. Prasad, T. K. Ramanujam, “Gas holdup and overall volumetric mass transfer reversed flow jet loop reactor. The Canadian Journal Of Chemical Engineering”, 1995.
- [19] E. S. Gaddis, A. Vogelpohl, “The impinging-stream reactor: a high performance loop reactor for mass transfer controlled chemical reactions. Chem. Eng. Science”, 47, 2877–2882, 1992.
- [20] U. Wachsmann, N. Rabiger, And A. Vogelpohl, “The compact reactor- a newly developed loop reactor with a high mass transfer performance. Ger. Chem. Eng.” 8, 411-418, 1984.
- [21] C. A. M. C. Dirix, K. Van der Wiele, (1990). “Mass transfer in jet loop reactors. Chem. Eng. Science”, 45, 2333-2340. Dudley, J., 1995. “Mass transfer in bubble columns: a comparison of correlations. Wat. Res.”, 29, 4, 1129-1138.
- [22] A. Vogelpohl, “ Wastewater treatment by the HCR-Process. Acta Biotechnol”, 20, 2, 119–128, 2000.
- [23] S. Lübbecke, A. Vogelpohl, W. Dewjanin, “Wastewater treatment in a biological high performance system with high biomass concentration. Was. Res.”, 29, (3), 793-802, 1995.
- [24] B. Farizoglu, B. Keskinler, E. Yıldız, A. Nuhoglu, “Cheese whey treatment performance of an aerobic jet loop membrane bioreactor. Process Biochemistry”, 39, 2283–2291, 2004.
- [25] S. Lübbecke, A. Vogelpohl, W. Dewjanin, “Wastewater treatment in a biological high performance system with high biomass concentration. Was. Res.”, 29, (3), 793-802, 1995.

- [26] G. Tchobanoglous, and F. L. Burton, "Wastewater Engineering. McGraw-Hill Inc.", p1315 (3rd ed.) NewYork, 1991.
- [27] C. J. Bloor, G. Anderson, A. R. Willey, "High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor, Wat. Res.", 29, 5, 1217-1223, 1995.
- [28] E. A. Naundorf, D. Subramanian, N. Rabiger, A. Vogelpohl, "Biological treatment of wastewater in compact reactor. Chem. Eng. Process.", 19, 229-233, 1985.
- [29] F. B. Dilek, G. K. Anderson, J. Bloor, "Investigation into the microbiology of a high rate jet-loop activated sludge reactor treating brewery wastewater. Wat. Res.", 34,5-6, 107-112, 1996.
- [30] B. Farizoğlu. "Peyniraltı Sularının Membran Filtrasyonlu Püskürtme Çevrimli Reaktörde Arıtımı. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü", Erzurum, 2003.
- [31] M. K. N. Yenkie, S. U. Geissen, A. Vogelpohl. "Biokinetics of wastewater treatment in the high performance compact reactor (HCR). The Chem. Eng. Journal", 49, B1-B12, 1992.
- [32] AWWA, APHA, WPCF, "Standard Methods For Water And Wastewater Examination", *Sixteenth edition*, New York, 1985.
- [33] S. Uzuner, "Süt endüstrisi atıksularının arıtımında Jet-loop membran biyoreaktörlerin performansının incelenmesi" (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü), 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Behice Yağmur AYDIN

Doğum tarihi ve yeri : 25.01.1993 / Erzurum

e-posta : b.yagmuraydin10@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Çevre Mühendisliği	2023
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi/Çevre Mühendisliği	2016
Lise	Burhaniye Lisesi, Burhaniye/BALIKESİR	2010