

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



YÜKSEK ORGANİK KİRLİLİĞE SAHİP MEZBAHA ENDÜSTRİSİ
ATIKSULARININ ARITIMI İÇİN MEMBRAN ENTEGRE
BİYOREAKTÖR GELİŞTİRİLMESİ

SÜLEYMAN UZUNER

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Burhanettin FARİZOĞLU (Tez Danışmanı)**
Prof. Dr. Yalçın Şevki YILDIZ
Prof. Dr. Ergün YILDIZ
Prof. Dr. Taner YONAR
Doç. Dr. Baybars Ali FİL

BALIKESİR, ARALIK - 2021

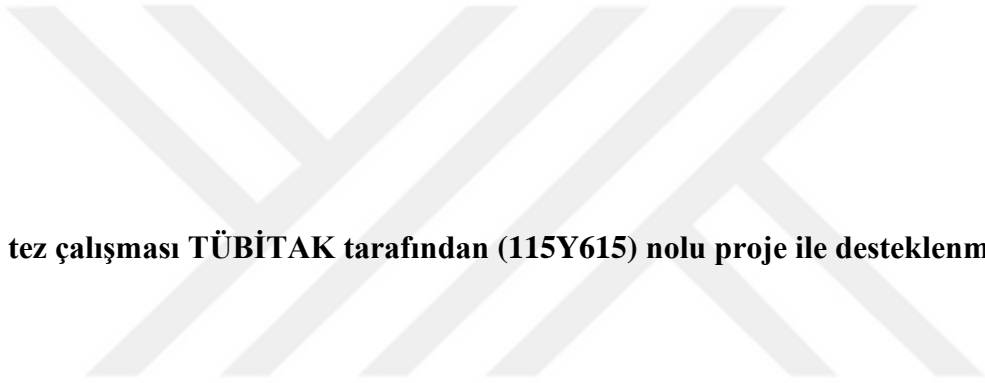
ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan **“YÜKSEK ORGANİK KİRLİLİĞE SAHİP MEZBAHA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMI İÇİN MEMBRAN ENTEGRE BİYOREAKTÖR GELİŞTİRİLMESİ”** 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.

Süleyman UZUNER



Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından (115Y615) nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**YÜKSEK ORGANİK KİRLİLİĞE SAHİP MEZBAHA ENDÜSTRİSİ
ATIKSULARININ ARITIMI İÇİN MEMBRAN ENTEGRE BİYOREAKTÖR
GELİŞTİRİLMESİ
DOKTORA TEZİ
SÜLEYMAN UZUNER
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. BURHANETTİN FARİZOĞLU)**

BALIKESİR, ARALIK - 2021

Membran proseslerin içme suyu, atıksu ve endüstriyel atıksu uygulamalarında kullanımı giderek artmaktadır. Membran prosesler özellikle atıksu arıtımındaki deşarj standartlarını sağlamasında ve su geri kazanımı için vazgeçilmez hale gelmiştir. Bununla birlikte membran kirlenmesi ve tıkanması elde edilen akı miktarını düşürmekte ve prosesin ekonomisini olumsuz olarak etkilemektedir. Membran biyoreaktör (MBR) sistemlerinde en çok görülen kirlenme olayları biyolojik kirlenme ve kek tabakası oluşumudur.

Bu çalışmada jet loop reaktörlerde (JLR) bulunan jet nozzle ile üretilen yüksek hızlı jet akımları membran yüzeyinde çapraz akış oluşturmak için kullanılmıştır. Bu jet akımları JLR'ün aynı zamanda yüksek miktarda karıştırma ve kütle transferi gibi avantajları olmasını da sağlamaktadır. Bu amaçla JLR en önemli parçalarından birisi olan draft tüpü membran modülü olarak tasarlanmıştır. Draft tüpü membran modülü ilk önce seramik membranlar kullanılarak, sonra da tabaka PES membranlar kullanılarak imal edilmiştir. Bu tasarım ile membran modülünün hem iç hem de dış yüzeyleri jet akımının oluşturduğu yüksek hızlı çapraz akış ile süpürülerek kek tabakasının oluşumu yavaşlatılmıştır. Geliştirilen bu reaktör modifikasyonu, membran draft tüplü jet loop reaktör (MDJLR) olarak adlandırılmıştır. Bu reaktör sistemi daha sonra mezbaha atık sularının arıtılmasında kullanılmıştır. PES membran modülünün kullanıldığı sürekli çalışma koşullarında sistemden 0,8 bar vakum altında 15 L.m⁻².sa⁻¹'dan yüksek akılar elde edilmiştir. Sistem 7,227 kg KOİ.m⁻³.gün⁻¹ yükleme hızında ve 8,06 saat hidrolik kalış süresinde işletildiğinde %98,56 KOİ giderim verimi elde edilmiştir ($\Theta_c \approx 0,7033$ gün, MLSS $\approx 0,64$ g.L⁻¹). Sistemin çalıştırıldığı süre boyunca mezbaha atıksuyunun KOİ değerleri 626,45 ile 6565,80 mg.L⁻¹ değerleri arasında değişmesine rağmen, sistemin çıkış KOİ değerleri 100 mg.L⁻¹'den düşük olmuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Membran proses, membran biyoreaktör, jet loop reaktör, membran modül tasarımı, mezbaha atıksuyu, kompakt reaktörler, mbr tasarımı

Bilim Kod / Kodları : 90301 90319

Sayfa Sayısı : 135

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF MEMBRANE INTEGRATED BIOREACTOR FOR TREATMENT OF SLAUGHTERHOUSE INDUSTRY WASTEWATERS WHICH CONTAINS HIGHLY ORGANIC POLLUTANTS

PH.D THESIS

SÜLEYMAN UZUNER

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. BURHANETTİN FARİZOĞLU)

BALIKESİR, DECEMBER - 2021

The use of membrane processes in water, wastewater and industrial wastewater treatment is becoming widespread. Membrane processes have become essential especially in ensuring discharge standards in wastewater treatment and in water recovery. However, membrane fouling causes flux decreases and is a significant determinant in the economy of the process. In membrane bioreactor (MBR) systems, the most common membrane fouling events observed as biological contamination and cake layer formation.

In this study, high speed jet stream produced by jet nozzle in jet loop reactors (JLR), which have important advantages such as high mixing events and mass transfer, was used for crossflow. For this purpose, the draft tube, one of the most important units of JLR, was designed as a membrane module. Draft tube was manufactured as a membrane module by using firstly tubular ceramic membranes and then sheet PES membranes. With this design, inner and outer surface of membrane module was swept off by high speeded cross flow created via high-speed jet flow and the formation of cake layer was slowed down. This developed reactor modification was named as membrane draft tube jet loop reactor (MDJLR). This reactor system was then used in the treatment of slaughterhouse wastewater. In operating mode where PES membranes were used, at an operating vacuum of 0,8 bar, more than $15 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ fluxes were obtained from the system. The system was operated at $7,227 \text{ kg COD.m}^{-3}.\text{day}^{-1}$ loading rate and 8,06 hours of HRT, and over 98,56% COD removal was achieved ($\Theta_c \approx 0,7033$ days, $\text{MLSS} \approx 0,64 \text{ g.L}^{-1}$). Inlet COD of wastewater was ranged from 626,45 to 6565,80 mg.L^{-1} , while the output COD values were less than 100 mg.L^{-1} at all times.

KEYWORDS: Membrane process, membrane bioreactor, jet loop reactor, membrane module design, slaughterhouse wastewater, high compact reactors, mbr design

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
2.1 Mezbaha Endüstrisi Atıksularının Mevcut Durumu ve Özellikleri	2
2.2 Gıda Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler	3
2.2.1 Mezbaha atıksularının arıtımı	4
2.2.1.1 Ön arıtım.....	4
2.2.1.2 Arazide arıtım uygulamaları.....	6
2.2.1.3 Fiziko-Kimyasal arıtım metotları	6
2.2.1.3.1 Çözünmüş hava flotasyonu	6
2.2.1.3.2 Koagülasyon ve flokülasyon	7
2.2.1.3.3 Elektrokoagülasyon.....	8
2.2.1.3.4 Membran filtrasyonu	9
2.2.1.4 Biyolojik arıtım	11
2.2.1.4.1 Anaerobik arıtım	11
2.2.1.4.2 Aerobik arıtım	14
2.2.1.5 İleri oksidasyon sistemleri.....	16
2.2.1.6 Birleştirilmiş prosesler	17
2.3 Membran Biyoreaktörler.....	17
2.3.1 Membran biyoreaktör konfigürasyonları	18
2.3.2 Membranların karakteristiği.....	21
2.3.2.1 Fiziksel özellikler	24
2.3.2.2 Kimyasal özellikler.....	25
2.3.3 Giriş suyunun ve biyokütlenin karakteristikleri.....	25
2.3.3.1 Giriş suyunun özellikleri	25
2.3.3.2 Biyokütlenin karakteristiği.....	27
2.3.4 Membran biyoreaktörün işletim koşulları ve yönetimi.....	32
2.3.4.1 Hidrolik kalış süresi (HKS).....	32
2.3.4.2 Çamur Yaşı (ÇY).....	33
2.3.4.3 Geri devir oranı, α	35
2.3.4.4 Sıcaklık.....	37
2.3.4.5 Akı (J).....	37
2.3.4.6 Transmembran basıncı (TMB) ve kritik akı.....	37
2.3.4.7 Permeabilite (Geçirgenlik)	39
2.3.5 Membran biyoreaktörlerdeki membran kirlenme mekanizmaları.....	39
2.3.6 Membran biyoreaktörlerde kirlenme kontrolü	45
2.4 Jet Loop Reaktörler (JLRs).....	49
2.4.1 Jet loop biyoreaktörler (JLB)	50

2.4.2 Jet loop membran biyoreaktörler (JLMBR).....	51
2.5 Çalışmanın Amacı.....	51
3. YÖNTEM.....	53
3.1 Deney sistemi.....	53
3.1.1 Sistemde kullanılan membranlar.....	53
3.1.2 Sistemin otomasyon ünitesi	56
3.2 Kullanılan Atıksu	57
3.3 Ölçülen Parametreler ve Ölçüm Metotları	57
3.3.1 AKM ve MLSS parametrelerinin ölçülmesi	57
3.3.2 KOİ parametresinin ölçülmesi	58
3.3.3 Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) analizi.....	59
3.3.4 Yağ ve gres parametresinin analizi	59
3.3.5 ÇO, pH, iletkenlik ve toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) ölçümleri.....	59
3.3.6 NO ₃ ⁻ -N parametresinin ölçümü.....	59
3.3.7 NH ₄ ⁺ -N analizi	59
3.3.8 Toplam Fosfor (TF) ölçümü	60
3.3.9 Toplam Azot (TA) parametresinin ölçümü.....	60
3.3.10 Membran akısı (J).....	60
3.3.11 Transmembran Basıncı (TMB).....	61
4. ELDE EDİLEN VERİLER	62
4.1 Reaktör Tasarımı.....	62
4.1.1 Membran modülünün tasarlanması	62
4.1.2 Anaerobik/Anoksik bölmenin tasarlanması	65
4.1.3 Jet Loop Reaktörün Tasarlanması.....	66
4.1.4 Üretimi yapılan parçalar.....	66
4.1.5 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Montajı (1. Versiyon).....	78
4.1.6 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Montajı (2. Versiyon).....	81
4.1.7 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Montajı (3. Versiyon).....	83
4.2 Membran Draft Tüplü Jet-Loop Reaktörün Kütle Transfer Özelliklerinin Belirlenmesi .	87
4.3 Mezhiba Atıksularının Arıtılması.....	93
4.3.1 Mezhiba Atıksuyunun Karakterizasyonu	93
4.3.2 MDJLR Sisteminin Biyolojik Arıtıma hazırlanması	95
4.3.3 MDJLR sisteminin KOİ giderme verimi	96
4.4 Membran Draft Tüplü Jet-Loop Reaktörün Membran Akı Değerlerinin Belirlenmesi....	104
4.4.1 Seramik membranlar ile yapılan çalışmalar	104
4.4.2 Polietersülfon (PES) membranlar ile yapılan çalışmalar	108
4.4.3 Membran draft tüpü modüllerinin karşılaştırılması	109
4.4.4 Membran draft tüpü modülü üzerinde oluşan biyofilm tabakası	111
4.5 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Otomasyonu	115
4.6 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün İşletme Parametreleri	119
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	120
6. KAYNAKLAR (IEEE)	123
ÖZGEÇMİŞ	133

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Tambur elek kullanılarak mezbaha atıksularının ön arıtımı [13]	5
Şekil 2.2: Helezon sıkıştırıcılar [14]	5
Şekil 2.3: Örnek bir DAF ünitesinin şeması (A: üniteye atıksu girişi, B: flotasyon bölgesi, C: mekanik sıyırıcı, D ₁ - D ₂ : çökelek çıkışı, E: ünite deşarj çıkışı) [18]	7
Şekil 2.4: Koagülasyon-Flokülasyon prosesi akım şeması [22]	8
Şekil 2.5: Tipik bir elektrokoagülasyon ünitesinin şematik diyagramı [3].....	9
Şekil 2.6: Filtrasyon spektrumu [29].....	10
Şekil 2.7: Tipik bir anaerobik filtre (AF) şematik diyagramı [3].....	12
Şekil 2.8: Anaerobik kontakt reaktör prosesinin şematik gösterimi [33]	12
Şekil 2.9: Tipik bir aktif çamur (AÇ) prosesinin şematik diyagramı [53]	15
Şekil 2.10: Tipik bir damlatmalı filtre (DF) akım şeması [34]	15
Şekil 2.11: Tek lambalı bir H ₂ O ₂ /UV fotoreaktör sisteminin şematik diyagramı [3].....	17
Şekil 2.12: Membran filtrasyonu işletme mekanizması. (a) batık ve (b) yan akımlı	19
Şekil 2.13: MBR teknolojilerinin temel konfigürasyonları [58].....	19
Şekil 2.14: Membran biyoreaktörlerin bileşenleri [30].....	20
Şekil 2.15: MBR parametreleri ve kirlenme arasındaki içsel ilişkiler [30, 58].....	21
Şekil 2.16: (a) EPSlerin, (b) hücrenin ve (c) çamur flok yapısının şematik gösterimi [90]	30
Şekil 2.17: Akış analizi: (a) Klasik aktif çamur sistemi, (b) yan akışlı MBR ve (c) sonsuz ÇY'li (çamur atımı olmayan) yan akışlı MBR sistemi [91].....	36
Şekil 2.18: TMB ve akı arasındaki ilişki: basıncın kontrol ettiği bölge ve kütle transferinin kontrolünde olan bölge [91].....	38
Şekil 2.19: MBR sistemlerinde membran kirlenmesinin takibi için çalışma şekline göre kullanılan iki metot. (a) sabit akı ve (b) sabit basınç [91]	40
Şekil 2.20: Membran kirlenme mekanizmaları. (a) tam, (b) iç, (c) kısmi por tıkanması ve (d) kek filtrasyonu [86].....	41
Şekil 2.21: MBR sistemlerinde membran kirlenmesinin sınıflandırılması: (A) yeni membran, (B) por daralması, (C) porların tıkanması ve (D) kek oluşumu [92]	42
Şekil 2.22: Sabit akı işletimi için MBR kirlenme mekanizmaları [58, 93].....	43
Şekil 2.23: Membran kirlenme sınıflandırmasına göre TMB profili [91]	44
Şekil 2.24: (a) Jet loop reaktör [94], (b) JLRs'de reaktör çapının (D _R), draft tüpünün çapının (D _D), draft tüpünün boyunun (L _D), draft tüpünün reaktörün üstüne ve altına olan mesafesinin (A _U , A _L) optimum geometrik oranları ve saptırma alanlarının hesabı (X _U , X _L), (c) nozzle konumuna göre gaz dağılımı [95].....	49
Şekil 2.25: JLMBR deney sisteminin akım şeması [82]	51
Şekil 3.1: Deney sisteminin akım şeması.....	54
Şekil 3.2: atech innovations gmbh firmasından temin edilmiş olan seramik membranların özellikleri	55
Şekil 3.3: Polietersülfon (PES) tabaka membranların özellikleri	55
Şekil 3.4: Otomasyon panosuna ait iç görünüm	56
Şekil 3.5: Kontrol paneli ve otomasyon panosu	57
Şekil 3.6: KOİ parametresinin ölçümünde kullanılan denklem ve kalibrasyon eğrisi.....	58
Şekil 3.7: Yağ-Gres analizlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi ve denklemi	60
Şekil 4.1: Klasik ve çapraz akış filtrasyonda akı azalması ve kek kalınlığı değişimi.....	63
Şekil 4.2: Emme tüpü/membran modülünün şematik gösterimi.....	64
Şekil 4.3: Anaerobik/anoksik bölgeye ait şematik gösterim.....	66
Şekil 4.4: Solidworks programı ile tasarlanmış olan reaktör (1. Versiyon).....	67
Şekil 4.5: Draft tüpü olarak kullanılan seramik membran modülü.....	68

Şekil 4.6: Seramik membranlar, seramik membranlara ait birleştirme ve montaj araplatları, birleştirme ve montaj araplatlarının üç boyutlu yazıcı ile prototiplenmesi	69
Şekil 4.7: Seramik membran draft tüpü (1,2: CNC freze ile üretilen akrilik birleştirme ve montaj parçaları; 3: M4 paslanmaz çelik somun; 4: özel olarak üretilmiş silikon contalar; 5: seramik membranlar; 6: paslanmaz çelik M4 dişli gijon)	70
Şekil 4.8: Seramik membran draft tüpünün ayrıntıları.	71
Şekil 4.9: Solidworks ile tasarlanmış olan tabaka membran modülü	73
Şekil 4.10: Tabaka membranlar kullanılan membran draft tüpünden akı toplamak için kullanılan paslanmaz çelikten imal edilmiş bağlantı aparatı.	74
Şekil 4.11: Draft tüpü olarak kullanılan tabaka membran modülünün montajı	75
Şekil 4.12: Jet loop reaktörün çarpma plakası olarak kullanılan ve anaerobik bölgeyi karıştıran pervane ve milin üç boyutlu tasarım programındaki montajı.	76
Şekil 4.13: Jet loop reaktörün aerobik ve anaerobik bölgesinin montajına ait tasarım.	77
Şekil 4.14: Jet loop reaktörün çarpma plakası olarak kullanılan ve anaerobik bölgeyi karıştıran pervane ve mil montajı.	78
Şekil 4.15: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (22-11-2017)	79
Şekil 4.16: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (1. Versiyon)	80
Şekil 4.17: Solidworks programı ile tasarlanmış olan reaktör (2. Versiyon)	81
Şekil 4.18: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (2. Versiyon)	82
Şekil 4.19: Solidworks programı ile tasarlanmış olan reaktör (3. Versiyon)	83
Şekil 4.20: İmal edilmiş olan tabaka membran plakası, çarpma plakası olarak kullanılan türbin fanı ve karıştırmalı anaerobik bölge	84
Şekil 4.21: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (3. Versiyon)	85
Şekil 4.22: MDJLR versiyonlarının boyutları (mm) [(a) ilk versiyon seramik membran draft tüplü, (b) ikinci versiyon seramik membran draft tüplü ve (c) PES membran draft tüplü]	86
Şekil 4.23: Deney sisteminin K_{La} ve C_s^* değerlerini hesaplamak için zamana dayalı çözülmüş oksijen değerlerinin değişimini gösteren veriler ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $E/V=1,68\text{ kW.m}^{-3}$)	88
Şekil 4.24: K_{La} değerlerinin E/V ve Q_{hava} değerleri ile değişimi	89
Şekil 4.25: Oksijen Tüketim Hızının (OUR) E/V değerleri ve Q_{hava} ile değişimi	90
Şekil 4.26: K_{La} 'nın E/V ve gaz debisi ile değişimi	91
Şekil 4.27: Reaktördeki K_{La} 'nın, E/V ve gaz debisi ile ilişkisi kullanılarak hesaplanan ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması	92
Şekil 4.28: Giriş KOİ konsantrasyonu ile KOİ giderim verimlerinin ilişkisi	98
Şekil 4.29: Sisteme verilen KOİ yükü ile KOİ giderim verimlerinin ilişkisi	99
Şekil 4.30: MLSS konsantrasyonu ile arıtma verimlerinin değişimi	101
Şekil 4.31: Hidrolik kalış sürelerinin KOİ çıkış konsantrasyonlarına etkisi	102
Şekil 4.32: İlk 30 dakikaya ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,28; TMB: 0,5 bar; $\sim 550\text{ mg MLSS.L}^{-1}$; Çapraz akış hızı $0,74\text{ m.s}^{-1}$; Membran Yüzey Alanı: $0,186\text{ m}^2$; Por çapı: 100 nm)	104
Şekil 4.33: İlk 24 saate ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,54; TMB: 0,5 bar; $\sim 550\text{ mg MLSS.L}^{-1}$; Çapraz akış hızı $0,74\text{ m.s}^{-1}$; Membran Yüzey Alanı: $0,186\text{ m}^2$; Por çapı: 100 nm)	105

Şekil 4.34: 54 saatlik Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %94,23; TMB: 0,5 bar; ~550 mg MLSS.L ⁻¹ ; Çapraz akış hızı 0,74 m.s ⁻¹ ; Membran Yüzey Alanı:0,186 m ² ; Por çapı:100 nm).....	105
Şekil 4.35: İlk 30 dakikaya ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,32; TMB: 0,5 bar; ~560 mg MLSS.L ⁻¹ ; Çapraz akış hızı 0,74 m.s ⁻¹ ; Membran Yüzey Alanı:0,278 m ² ; Por çapı:100 nm)	106
Şekil 4.36: İlk 24 saate ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,61; TMB: 0,5 bar; ~560 mg MLSS.L ⁻¹ ; Çapraz akış hızı 0,74 m.s ⁻¹ ; Membran Yüzey Alanı:0,278 m ² ; Por çapı:100 nm)	107
Şekil 4.37: 54 saatlik Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %94,27; TMB: 0,5 bar; ~560 mg MLSS.L ⁻¹ ; Çapraz akış hızı 0,74 m.s ⁻¹ ; Membran Yüzey Alanı:0,278 m ² ; Por çapı:100 nm).....	107
Şekil 4.38: İlk 30 dakikaya ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %96,43; TMB: 0,5 bar; ~555 mg MLSS.L ⁻¹ ; Çapraz akış hızı 0,74 m.s ⁻¹ ; Membran Yüzey Alanı:0,1872 m ²)	108
Şekil 4.39: 24 saatlik ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %96,16; TMB: 0,5 bar; ~555 mg MLSS.L ⁻¹ ; Çapraz akış hızı 0,74 m.s ⁻¹ ; Membran Yüzey Alanı:0,1872 m ²)	109
Şekil 4.40: 100 ve 200 nm por çapına sahip seramik membranların karşılaştırılması (0,186 m ² membran yüzey alanı; ~550 mg MLSS.L ⁻¹ ; Yükleme oranı: ~2,54 kg KOİ.m ⁻³ .gün ⁻¹)	110
Şekil 4.41: 200 nm por çapına sahip seramik membran ile PES membranın karşılaştırılması (4000 L.saat ⁻¹ sirkülasyon debisi; 0,8 bar transmembran basıncı; ortalama 500 mg.L ⁻¹ MLSS konsantrasyonu)	110
Şekil 4.42: TMB ile akı değerlerinin zaman ile değişimi (PES membran; 3500 L.saat ⁻¹ sirkülasyon debisi; ortalama 950 mg.L ⁻¹ MLSS).....	111
Şekil 4.43: Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktör'de (MDJLR) meydana gelen biyofilm tabakası (2. versiyon) (2018).	112
Şekil 4.44: Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktör'ün (MDJLR) jet nozzle kısmında meydana gelen biyofilm tabakası	113
Şekil 4.45: Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktör'de (MDJLR) meydana gelen biyofilm tabakası (3. versiyon) (2019)	114
Şekil 4.46: Ölçüm ekranı	117
Şekil 4.47: Elle kontrol ekranı	117
Şekil 4.48: Peristaltik pompa ayar ekranı	118
Şekil 5.1: Dizayn edilmiş olan ve deneylerde kullanılan MDJLR sistemi	120

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Mezbaha atıksularının genel karakterizasyonu [3].....	2
Tablo 2.2: Mezbaha atıksularının uluslararası ve ulusal deşarj standartları [4, 5]	3
Tablo 2.3: Mezbaha atıksularının arıtımında kullanılan farklı por büyüklüklerine ve boyutlara sahip membranların karşılaştırılması.....	10
Tablo 2.4: Su arıtımı için yoğun ve gözenekli membranlar [30].....	11
Tablo 2.5: Mezbaha atıksularının anaerobik arıtım prosesleri [34].....	13
Tablo 2.6: İleri oksidasyon olayları	16
Tablo 2.7: Batık MBR sistemlerinde kullanılan membranların tipleri ve karakteristikleri [59].....	22
Tablo 2.8: Yan akışlı MBR sistemlerinde kullanılan membranların tipleri ve karakteristikleri [59]	23
Tablo 2.9: Membran materyallerinin karşılaştırılması [86].....	26
Tablo 2.10: MLSS konsantrasyonunun değişiminin MBR kirlenmesine etkisi [58]	27
Tablo 2.11: MBR sistemlerindeki membran kirlenmesinin sınıflandırılması [91].....	46
Tablo 2.12: MBR sistemlerinde kirlenme kontrol teknikleri [91].....	47
Tablo 2.13: MBR sistemlerinde membran temizliğinde kullanılan genel kimyasallar [91]	48
Tablo 4.1: Farklı reaktör tiplerine ait K_{La} değerleri	92
Tablo 4.2: Atıksuda ölçülen parametreler ve değerleri	93
Tablo 4.3: Mevsimlere göre atıksuyun KOİ parametresinin değişimi (İlkbahar-Yaz).....	94
Tablo 4.4: Mevsimlere göre atıksuyun KOİ parametresinin değişimi (Sonbahar-Kış).....	94
Tablo 4.5: Literatürde bulunan çeşitli mezbaha atıksularının kimyasal özellikleri.....	95
Tablo 4.6: Literatürden seçilmiş olan mezbaha atıksularının arıtıldığı ve değişik arıtım tekniklerinin kullanıldığı çalışmalarının performanslarının karşılaştırılması.	103
Tablo 4.7: En dik iniş (steepest descent) arama algoritması	119
Tablo 4.8: MDJLR işletme parametreleri.....	119

SEMBOL LİSTESİ

L	: Litre
g	: Gram
mg	: Miligram (10^{-3} g)
m	: Metre
cm:	: Santimetre (10^{-2} m)
µm	: Mikrometre (10^{-6} m)
nm	: Nanometre (10^{-9} m)
Å	: Ångström (10^{-10} m)
sa	: Saat (h)
s	: Saniye
kJ	: Kilo Joule (10^3 Joule)
A	: Amper
mA	: Miliamper (10^{-3} A)
A.h	: Amper Saat
PLC	: Programlanabilir Mantık Devreleri
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı (mg.L^{-1})
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg.L^{-1})
TOK	: Toplam Organik Karbon (mg.L^{-1})
TA	: Toplam Azot (mg.L^{-1})
TF	: Toplam Fosfor (mg.L^{-1})
AKM	: Askıda Katı Madde miktarı (mg.L^{-1})
TAKM	: Toplam Askıda Katı Madde miktarı (mg.L^{-1})
UAKM	: Uçucu Askıda Katı Madde miktarı (mg.L^{-1})
TÇKM	: Toplam Çözünmüş Katı Madde (mg.L^{-1})
MLSS	: Aktif çamuru oluşturan mikroorganizma miktarı (mg.L^{-1})
K_La	: Gaz Transfer Katsayısı (sa^{-1})
MF	: Mikrofiltrasyon
UF	: Ultrafiltrasyon
NF	: Nanofiltrasyon
TO	: Ters Osmoz
JLR	: Jet Loop Reaktör
MBR	: Membran Biyoreaktör
JLMBR	: Jet Loop Membran Biyoreaktör
ABR	: Anaerobik Bölmeli Reaktör
KSKTR	: Klasik Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktör
KR	: Kesikli Reaktör
AKR	: Anaerobik Kesikli Reaktör
AF	: Anaerobik Filtre
YAÇB	: Yukarı Akışlı Anaerobik Çamur Battaniyesi
AL	: Anaerobik Lagün
AB	: Avrupa Birliği
UV	: Ultraviyole
PLA	: Poliaktik Asit
TMB	: Transmembran Basıncı (bar)
HKS	: Hidrolik Kalış Süresi (saat)
OYH	: Organik Yükleme Hızı ($\text{kg KOİ.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$)

ÇY : Çamur Yaşı (gün)
OUR : Oksijen Tüketim Hızı (kg O₂.kW⁻¹.sa⁻¹)
FAU : Formazin Zayıflatma Birimi



ÖNSÖZ

Tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Burhanettin FARİZOĞLU'na bu tez çalışmasındaki desteğinden ve engin bilgisini hiç esirgemediğinden dolayı teşekkür ediyorum.

Numune alma konusundaki ve laboratuvar çalışmaları esnasındaki yardımlarından dolayı Sayın Çevre Mühendisi Esmâ Sultan ORTAASYALI'ya, Sayın Çevre Mühendisi Gülşah KARTAL'a ve Sayın Çevre Mühendisi Gizem Nur ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora dönemimde bana her konuda destek olan aileme, sonsuz ve koşulsuz desteğinden dolayı eşim Yüksek Gıda Mühendisi Gülnaz ÇELİK YURT UZUNER'e ve hayatıma neşe katan sevgili kızım Defne UZUNER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın literatürde bulunan membran biyoreaktör tasarımlarına farklı bir bakış açısı kazandırması ve yüksek organik kirliliğe sahip mezbaha endüstrisi atıksularının arıtımındaki sorunların giderilmesine ışık tutması dileklerle.

Balıkesir, 2021

Süleyman UZUNER

1. GİRİŞ

Belli bölgelerde artan nüfus yoğunluğu ve endüstrileşme salınan atıkların çeşitlenmesiyle birlikte miktarlarının artmasına da yol açmaktadır. Bu sonuç çoğunluğunun faydalı kullanımları bulunan ve alıcı ortam olarak kullanılan doğal kaynak ve ortamların baskı altına alınmasına yol açmaktadır. Güney Marmara ve Ege Bölgesi tarıma dayalı endüstri ve hayvancılığın giderek yaygınlaştığı, yoğun endüstrileşmenin yaşandığı bölgelerdir. Gıda endüstrisi bu bölgelerde lokomotif sektördür ve büyük miktarlarda yüksek kirlilik konsantrasyonlarına sahip organik madde içeren atıksular üretmektedir. Başlıcaları zeytinyağı ve sofralık zeytin üretimi, süt ve süt ürünleri üretimi, mezbaha ve besicilik tesisleri, meşrubat üretimi olan gıda endüstrisinden ortaya çıkan atıksular bölgedeki önemli endüstriyel atıksulardır. Proses çeşitliliği ve gıda maddelerinin üretimi esnasında farklı proseslerden farklı özelliklere sahip olarak çıkan atıksular arıtılmadan ya da arıtma tesisi sonrası deşarj edilmektedir.

Endüstriyel atıksuların arıtımında klasik fiziko-kimyasal ve biyolojik yöntemlerin belirli kirleticilerin arıtımında sınırlı etkinliğe sahip olmaları nedeniyle bu yöntemlere dayalı arıtma çıkışlarında su kalitesi istenen seviyelere çıkarılamamaktadır. Deşarj standartlarını sağlamada dahi çok zorlanan yanlış arıtma tesisi seçimi; arıtılmasına karşın, önemli miktarlarda organik kirlilik içeren arıtılmış su çıkarmaktadır. Bununla birlikte iyi kalitede su çıkarılamaması ve su geri kazanılamaması su sarfiyatını da büyük ölçüde artırmaktadır. Atıksu bünyesindeki yüksek konsantrasyona ve çeşitliliğe sahip bu kirleticilerin arıtılması için yeni, etkili, temiz teknolojiye dayanan, ekonomik çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Hızla gelişmekte olan membran teknolojileri ve prosesleri bu ihtiyaçlara cevap verebilecek bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Mezbaha Endüstrisi Atıksularının Mevcut Durumu ve Özellikleri

Türkiye’de gıda endüstrisi gelişmekte olup, nüfus artışı ile doğru orantılı olarak et ve süt sanayii de büyümektedir. Dolayısı ile de toplam canlı hayvan sayısı da artmaktadır. Canlı hayvan sayısındaki artış aynı zamanda hayvansal ürünlerin de üretimi artmaktadır [1].

Mezbaha ve hayvansal ürünleri işleyen tesislerin sayılarındaki artış, bu tesislerin atıksularını deşarj ettikleri ortamların ekosistemlerini bozmaktadır. Bir ton kırmızı etin işlenebilmesi için yaklaşık 2,5 ila 40 m³ temiz suya ihtiyaç vardır, bu da aynı miktarda atıksu oluşumu var demektir [2].

Mezbaha atıksuları, kesim prosesi ile elde edilen yağ, protein ve liflerin kompleks kompozisyonu nedeniyle dünya çapında zararlı sayılır. Kirlenmenin esas kısmı kan, mide ve bağırsak mukusundan kaynaklanır. Mezbaha atıksuları, yüksek oranlarda organik madde, patojenik ve patojenik olmayan mikroorganizmalar ve temizleme faaliyetlerinde kullanılan deterjanları ve dezenfektanları içerir. Ayrıca nütrientler, ağır metaller, renk ve bulanıklık da içerir [3]. Mezbaha atıksularının genel karakterizasyonu Tablo 2.1’te verilmiştir.

Tablo 2.1: Mezbaha atıksularının genel karakterizasyonu [3]

Parametre	Aralık	Ortalama Değer
TOK (mg.L ⁻¹)	70 - 1200	546
BOİ ₅ (mg.L ⁻¹)	150 - 4635	1209
KOİ (mg.L ⁻¹)	500 - 15900	4221
Top. Azot (mg.L ⁻¹)	50 - 841	427
AKM (mg.L ⁻¹)	270 - 6400	1164
pH	4,90 - 8,10	6,95
Top. Fosfor (mg.L ⁻¹)	25 - 200	50
Orto-PO ₄ (mg.L ⁻¹)	20 - 100	25
Orto-P ₂ O ₅ (mg.L ⁻¹)	10 - 80	20
Potasyum (mg.L ⁻¹)	0,001 - 100	90
Renk (mg.L ⁻¹ Pt ölçeği)	175 - 400	290
Bulanıklık (FAU)	200 - 300	275

Mezbaha atıksularının uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenmiş olan deşarj standartları ve ülkemizde uygulanan deşarj standartları Tablo 2.2’te verilmiştir.

Tablo 2.2: Mezbaaha atıksularının uluslararası ve ulusal deşarj standartları [4, 5]

Parametre	USEPA	AB	CPCB	Çin	Kanada	Avustralya	Türkiye
pH	6-9	-	6,5-8,5	6-9	6-9	5-9	6-9
KOİ (mg.L ⁻¹)	-	125	250	100-300	-	40	160-250
BOİ (mg.L ⁻¹)	16-26	25	30	20-100	5-30	5-20	-
TA (mg.L ⁻¹)	4-8	10-15	-	15-20	1,25	10-20	-
TF (mg.L ⁻¹)	-	1-2	-	0,1-1	1,0	2	-
Yağ-Gres (mg.L ⁻¹)	-	-	10	-	-	-	20-30
TAKM (mg.L ⁻¹)	20-30	35-60	50	20-30	5-30	5-20	-

USEPA: ABD Çevre Koruma Ajansı; AB: Avrupa Birliği; CPCB: Hindistan Merkez Kirlilik Kontrol Kurulu

2.2 Gıda Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler

Endüstriyel atıksu, evsel atık su ve yağmur suyu dışında herhangi bir ticari endüstriyel faaliyetin yürütüldüğü alandan deşarj edilen atıksu olarak tanımlanabilir. Endüstriyel üretim sürecinde oluşan atıksuların yanı sıra soğutma suları, katı atık bertaraf tesisi atıksuları (sızıntı suyu), rejenerasyon tesisi atıksuları, içme suyu filtreleri, geri yıkama suları da endüstriyel atıksu olarak değerlendirilmektedir [5]. Endüstriyel amaçlarla kullanılan su miktarı genellikle bir ülkenin gelişmişliğinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Gelişmekte olan ülkelerde çekilen suda endüstriyel kullanım oranı %5 iken, Belçika ve Finlandiya gibi gelişmiş ülkelerde bu oran %85'e çıkmaktadır [6]. Türkiye'de ise sanayi amaçlı tüketim %11'dir [7]. Ancak bu oran gerçek değerlerin altındadır. Çünkü halen su tüketimi veya deşarjı kayıt dışı olan veya mevcut kayıtları gerçek miktarların altında gösterilen sanayi tesisleri bulunmaktadır.

Endüstri türüne bağlı olarak endüstriyel atıksuların özellikleri farklılıklar göstermektedir. Ayrıca aynı sektörde faaliyet gösteren endüstrilerde bile, uygulanan proseslerin farklılığı ve kullanılan hammaddeler, oluşan atık suyun özelliklerini değiştirmektedir. Kirlilik bileşenlerinin farklı olması nedeniyle her endüstrinin çevreye etkileri de farklı olmaktadır. Buna rağmen endüstri türüne bağlı olarak, sektörlerin atıksularının bazı ortak özellikleri bulunmaktadır. Örneğin, gıda endüstrisi atıksularının yüksek organik kirlilik (genellikle BOİ cinsinden) içerdiği söylenebilir [8, 9]. Tekstil sanayindeki ana kirlilikler ise boya işlemlerinden kaçan boyalar, bunların neden olduğu renk ve işleme esnasında kostik kullanılması sonucu oluşan yüksek pH'dır. Tabakhanelerden kaynaklanan atıksuların tipik özellikleri arasında kıl, katı madde, BOİ, azot, krom, sülfid, yüksek pH ve koku sayılabilir.

Günümüzde sistem yöneticileri, atıklarını yönetmek için teknolojinin sunabileceği geniş olanaklardan yararlanabilmektedirler. Daha katı deşarj standartları, araştırmacıları ve çevre mühendislerini etkin bir şekilde yeni teknolojilere yönlendirmektedir. Çünkü arıtma yöntemi seçilirken ekonomik, küçük (daha az yer kaplayan) ve kompakt yöntemlerin yanı sıra son derece yüksek arıtma verimi ve kaliteli çıkış suyu sağlayan teknolojiler tercih edilmelidir. Su kirliliğine en büyük yükü getiren endüstri dalı ise gıda endüstrisidir [10]. Balıkesir ve Yöresi tarıma dayalı endüstriyel tesisler bakımından yoğun bir bölgedir. Bu tesislerden ortaya çıkan yüksek organik kirliliğe sahip atıksular klasik yöntemlerle arıtılamamaktadır veya arıtma tesisi çıkışları deşarj standardını bile sağlayamamaktadır. Bu çalışmada incelenecek olan mezbaha endüstrisi atıksularının arıtımı için kullanılan bazı arıtım yöntemleri aşağıdaki gibidir;

- Mezbaha atıksularının arıtımı
 - o Ön arıtım
 - o Arazide arıtım uygulamaları
 - o Fiziko-kimyasal arıtım metotları
 - Çözünmüş hava flotasyonu
 - Koagülasyon ve flokülasyon
 - Elektrokoagülasyon
 - Membran filtrasyonu
 - o Biyolojik arıtım
 - Anaerobik arıtım
 - Aerobik arıtım
 - o İleri oksidasyon sistemleri
 - o Birleştirilmiş prosesler

2.2.1 Mezbaha atıksularının arıtımı

2.2.1.1 Ön arıtım

Ön arıtımda mezbaha işlemlerinden kaynaklanan bütün katı ve büyük partiküller atıksudan ayrılır. Askıda katı maddelerin uzaklaştırılması için kullanılan temel işlemler standart ızgaraları, süzgeçleri ve elekleri içerir. Çapları 10 -30 mm arasında olan büyük katı maddeler ızgaralarda tutulurlar. Tambur elekler ise çapı 0,5 mm'den büyük olan ve kullanılan ekipmanların kirlenmesine, tıkanmasına veya sıkışmasına sebep olacak olan katıların

tutulması amacı ile kullanılır. Helezon şeklindeki sıkıştırıcılar da diğer ızgara ve eleklerden gelen katıların iletiminde ve susuzlaştırılmasında kullanılır. Bu sayede ortaya çıkan katıların katı atık olarak değerlendirilmesi sağlanır [11, 12].



Şekil 2.1: Tambur elek kullanılarak mezbaha atıksularının ön arıtımı [13]



Şekil 2.2: Helezon sıkıştırıcılar [14]

Diğer ön işlemler, yakalama havuzları, homojenizasyon/dengeleme, flotasyon ve çöktürücülerdir. Dahası ızgara ve benzeri yapılar ile mezbaha atıksularından katıların %60'ı ve BOİ'nin de %30'undan fazla kısmı giderilebilir [12].

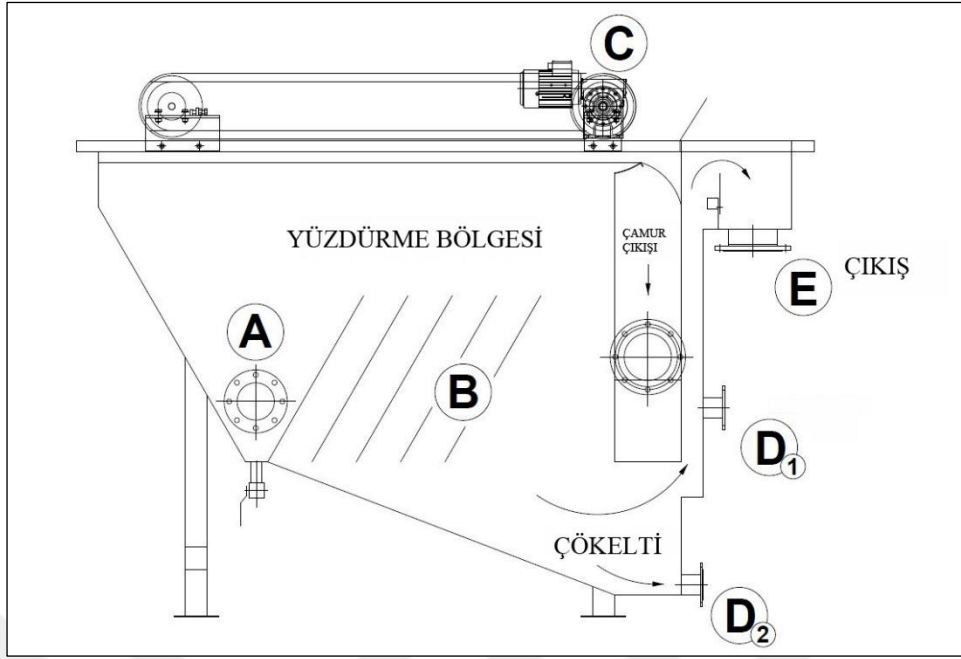
2.2.1.2 Arazide arıtım uygulamaları

Arazide arıtım uygulamasında, biyolojik olarak indirgenebilen maddeler direkt olarak toprağa yerleştirilerek, toprağa nütrient sağlanır. Bu uygulamanın bir dezavantajı ise, uygulamanın direkt olarak sıcaklık ve coğrafyaya bağlı olmasıdır [11]. Diğer yandan uygulamanın avantajları arasında, mezbaha atıksularının kullanılabilir yan ürünlerinin kazanılması, alternatif gübre kaynağı olarak kullanılması ve toprak yapısının iyileştirilmesi, gösterilebilir [12].

2.2.1.3 Fiziko-Kimyasal arıtım metotları

2.2.1.3.1 Çözünmüş hava flotasyonu

Çözünmüş hava flotasyonu (Dissolved Air Flotation – DAF) sistemleri, katı-sıvı ayırım metodu olarak havanın mezbaha atıksularının içerisine tabandan verilmesi ile atıksuyun içerisindeki hafif katıların, yağ ve gresin yüzeye çıkması ve yüzeyde bir çamur battaniyesi oluşturmasının sağlanmasıdır. Oluşan bu çamur battaniyesi yüzeyden sürekli olarak sıyrıcılar ile uzaklaştırılır. DAF sistemlerinin verimlerini arttırmak için polimerler ve diğer flokülantlar, aynı zamanda da pH ayarlanması ve partiküllerin floklaşması amacıyla eklenir. DAF prosesi ile %30 - %90 arasında KOİ ve %70 - %80 oranlarında da BOİ giderimi sağlanabilir. DAF sistemleri ayrıca yüksek nütrient giderimi sağlama kapasitesine sahiptirler [12, 15, 16, 17]. Örnek bir DAF ünitesi akım şeması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

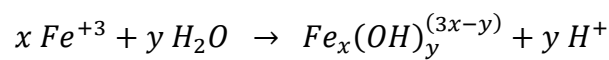


Şekil 2.3: Örnek bir DAF ünitesinin şeması (A: üniteye atıksu girişi, B: flotasyon bölgesi, C: mekanik sıyırıcı, D₁ - D₂: çökelek çıkışı, E: ünite deşarj çıkışı) [18]

2.2.1.3.2 Koagülasyon ve flokülasyon

Koagülasyon ve Flokülasyon işlemlerinde uzun zamandan beri kireç, alüminyum, demir tuzları ve demir oksitler gibi maddeler, atık maddelerin koagülasyonu amacıyla koagülant olarak kullanılmaktadır. Ancak bazı durumlarda bu kimyasallarla atık sularda bulunan maddelerin uzaklaştırılması mümkün olmayabilmektedir. Bu amaçla organik polimerlerde kullanılmakta ve bunlarla inorganik maddelere göre daha iyi renk giderimi ve daha az çamur oluşumu sağlamasına rağmen, tam bir renk giderimi sağlayamamaktadır [19].

Koagülasyon prosesinde kompleksleşme reaksiyonlarının önemli bir yeri vardır. Demir veya alüminyum gibi metal iyonlarının kompleks oluşum mekanizmasıyla etkili bir şekilde boyar maddelerin renk gideriminde kullanıldığı bilinmektedir. Kimyasal koagülasyonun gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan demir (III) iyonları aşağıdaki gibi bir hidroliz reaksiyonuna girmekte ve

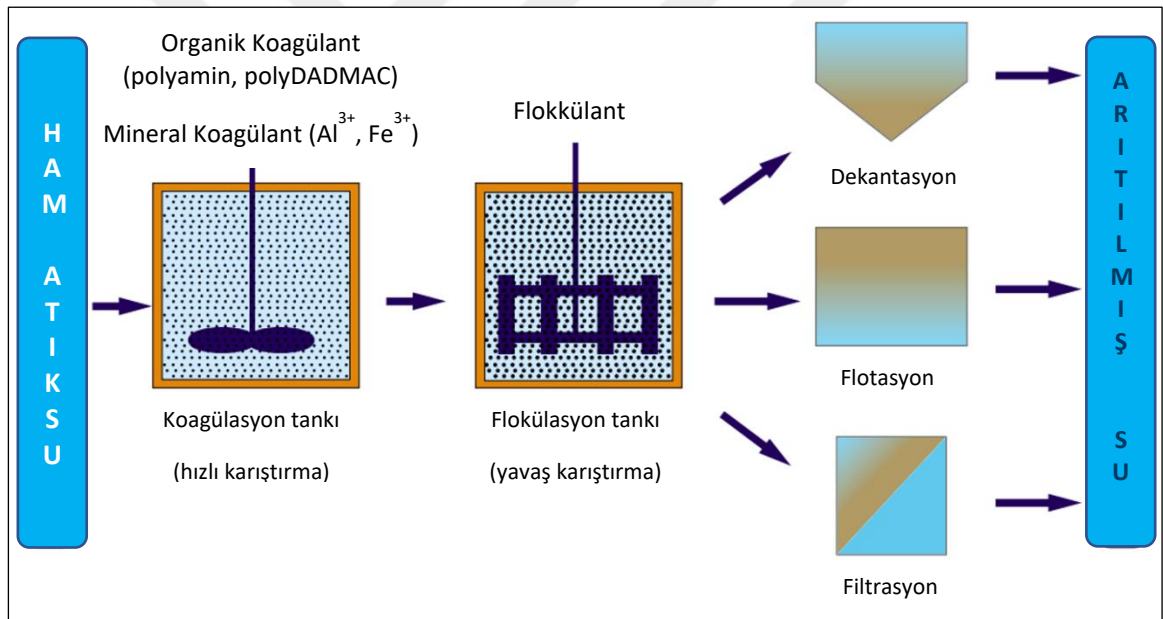


bu reaksiyon sonucunda $[Fe(OH)]^{+2}$, $[Fe_2(OH)_2]^{+4}$ ve $[Fe_3(OH)_4]^{+5}$ gibi kompleks iyonlar oluşmaktadır. Negatif yüklü kolloidal partiküller, oluşan çok değerlikli katyonik metal

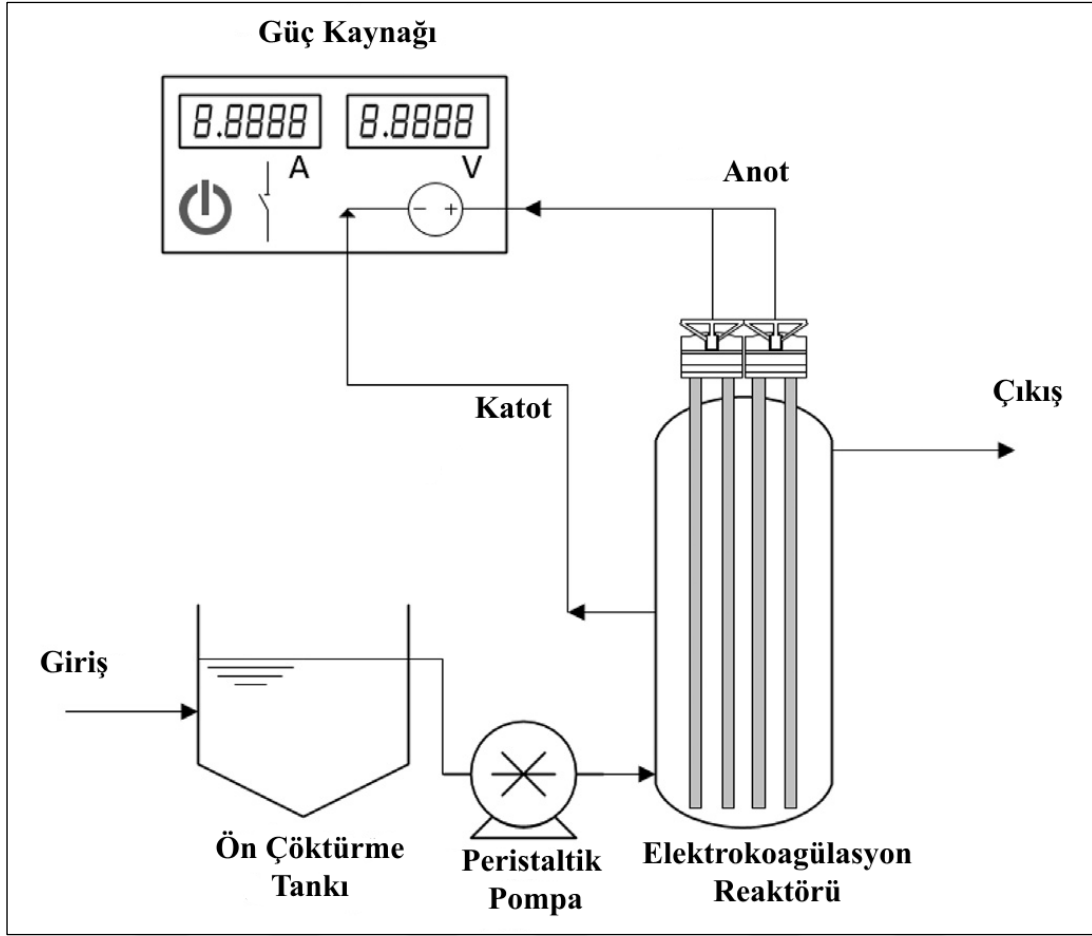
kompleksleri adsorplayabilir. Etkin bir renk giderimi, ortama negatif yüklü bir polimerik koagülant eklenmesiyle sağlanabilir [20]. Koagülasyon ve flokülasyon prosesine örnek bir akım şeması Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

2.2.1.3.3 Elektrokoagülasyon

Bu proseste reaksiyonların gerçekleştiği esas malzeme elektrotlardır. Bu sebeple uygun elektrot seçimi önemlidir. Elektrokoagülasyon işlemlerinde yaygın olarak alüminyum ve demir elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotların temini kolay ve maliyetleri düşüktür. Üstelik elektrokoagülasyon uygulamalarında kullanılabilirliği kanıtlanmış maddelerdir. Şekil 2.5, tipik bir elektrokoagülasyon ünitesinin şematik diyagramı göstermektedir. Elektrokoagülasyon prosesi ise koagülasyon, çökelme, adsorpsiyon ve flotasyon mekanizmalarını da içermektedir [21].



Şekil 2.4: Koagülasyon-Flokülasyon prosesi akım şeması [22]



Şekil 2.5: Tipik bir elektrokoagülasyon ünitesinin şematik diyagramı [3]

Doğru akımda anot olarak demir ve ya alüminyum elektrotlar çözünerek çözeltiliye Al^{+3} ve Fe^{+2} , Fe^{+3} iyonlarını vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek çok az çözünen $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ metal hidroksitleri oluşturmaktadır [23]. Oluşturulmuş olan bu amorf metal hidroksitlerin - $M(OH)_3$ çözünmüş organik bileşikleri hızlıca adsorplamaya ve koloidal partikülleri tutmaya yarayan çok geniş yüzey alanları vardır. Bu floklar $M_n(OH)_{3n}$ şeklinde polimerize olurlar ve sudan basitçe flotasyon veya çöktürme prosesleri ile uzaklaştırılırlar [24].

2.2.1.3.4 Membran filtrasyonu

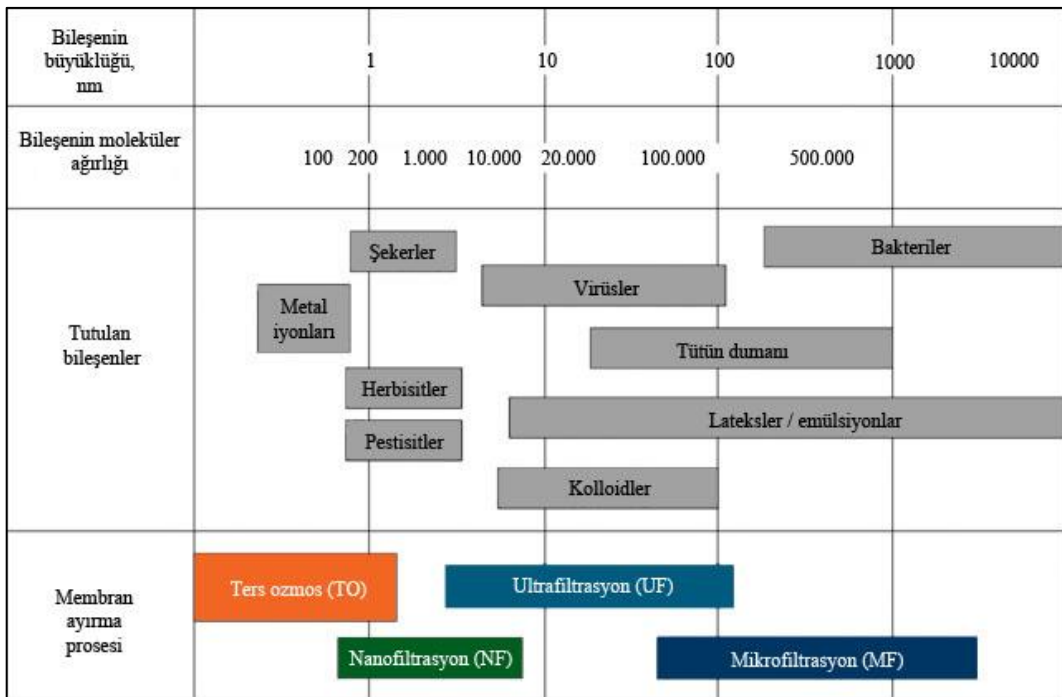
Mezbaha atıksularının arıtımda membran teknolojisi bir alternatif olmaya başlamıştır. Ters ozmos (TO), nano filtrasyon (NF), ultra filtrasyon (UF) ve mikro filtrasyon (MF) prosesleri por büyüklüklerine bağlı olarak partiküllerin, kolloidlerin ve makro moleküllerin uzaklaştırılmasını sağlar (Tablo 2.3) (Şekil 2.6). Mevcut membran proseslerinin sınırları işletildiği mekanizmaların ana hatları ile Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.3: Mezbaaha atıksularının arıtımında kullanılan farklı por büyüklüklerine ve boyutlara sahip membranların karşılaştırılması

Membran tipi	Por büyüklüğü (µm)	TOK giderimi (%)	KOİ giderimi (%)	BOİ giderimi (%)	TA giderimi (%)	Referans
Mikrofiltrasyon (MF)	0,080 - 0,550	44,81	90,63	-	45,22	[25]
Ultrafiltrasyon (UF)	0,030	75,00 - 96,00	83,00 - 97,00	-	27 - 44	[26]
Ultrafiltrasyon (UF)	0,010 - 0,100	-	94,52 - 94,74	97,80 - 97,89	-	[27]
Ters Osmoz (TO)	0,001 - 0,005	-	85,80	50,00	90,00	[28]

Aynı zamanda membran prosesler, mezbaaha atıksularının arıtımında bakterilerin, mikroorganizmaların, partiküllerin ve organik maddenin uzaklaştırılmasında da kullanılmaktadır [25].

Membran filtrasyonu ile her ne kadar yüksek organik uzaklaştırma elde edilse bile nütrient uzaklaştırılması için başka bir konvansiyonel proses ile birleştirilmesi gerekmektedir [26]. Dahası, mezbaaha atıksuları gibi yüksek konsantrasyonlu atıksuların filtrasyonunda fouling (kirlenme, porların tıkanması-iç kirlenme) problemleriyle karşı karşıya kalınabilir ve temizlenmesi oldukça zordur. Aynı zamanda membran yüzeyleri üzerinde atıksuyun organik içeriğinden kaynaklanan kalın film katmanlarının oluşması da membranların transfer oranını ve akı miktarını büyük ölçüde düşürebilir [3].



Şekil 2.6: Filtrasyon spektrumu [29]

Tablo 2.4: Su arıtımı için yoğun ve gözenekli membranlar [30]

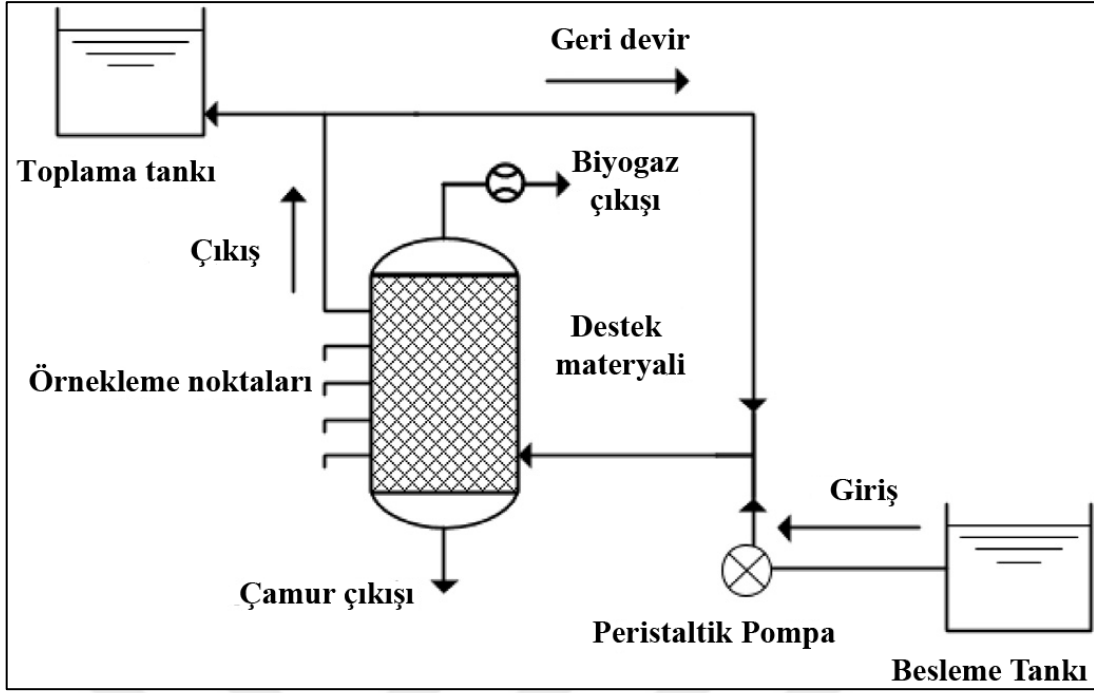
Basınçla çalışan	Ekstraktif/difüzyif
<i>Ters Ozmos (TO)</i> Ayırma, su (çözücü) ve suda çözünen maddelerin farklı çözünürlük ve difüzyon hızları sayesinde elde edilir.	<i>Elektrodiyaliz (ED)</i> Ayırma, farklı iyonik boyut, çözünen iyonların yük ve yük yoğunluğu nedeniyle iyon değişim membranları kullanılarak elde edilir.
<i>Nanofiltrasyon (NF)</i> Ayırma, yük reddi, çözünürlük-difüzyon ve mikro porlar yoluyla eleme kombinasyonu ile elde edilir (<2nm).	<i>Pervaporasyon (PV)</i> RO ile aynı mekanizmaya sahiptir, ancak (uçucu) çözünen madde, permeatı kısmen vakumlanması ile membranda kısmen buharlaştırılır.
<i>Ultrafiltrasyon (UF)</i> Mezo (orta) porlardan eleyerek ayırma (2-50 nm).	<i>Membran ekstraksiyonu (ME)</i> Bileşen, membranın retentat ve permeat tarafı arasındaki bir konsantrasyon farkı gradyanı sayesinde uzaklaştırılır.
<i>Mikrofiltrasyon (MF)</i> Makro porlardan elenerek askıda katıların sudan ayrılması (> 50 nm).	<i>Gaz transferi (GT)</i> Kısmi basınç gradyanı altında moleküler formda suya veya sudan dışarıya aktarılan gaz.

2.2.1.4 Biyolojik arıtım

2.2.1.4.1 Anaerobik arıtım

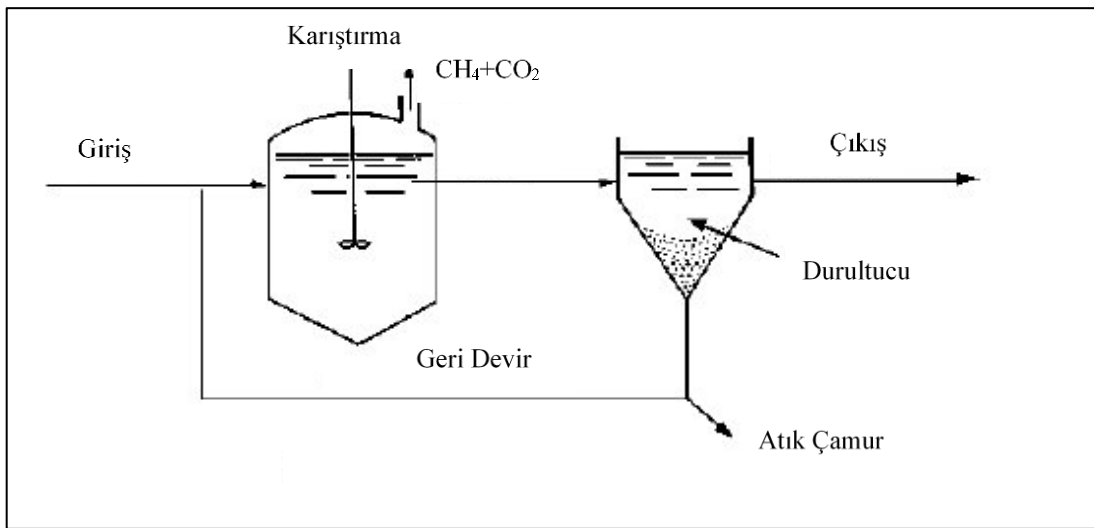
Atıksuların arıtımı için havasız çalışan biyolojik arıtım proseslerine anaerobik prosesler denmektedir.

Mezbaha atıksularının arıtımında anaerobik arıtmanın tercih edilmesinin sebebi yüksek kirliliğe sahip atıksuların arıtımındaki veriminin yüksek olmasıdır [31]. Anaerobik arıtma esnasında organik bileşikler oksijen yokluğunda değişik bakteriler tarafından CO₂ ve CH₄'e parçalanır. Ayrıca, anaerobik sistemlerin aerobik sistemlere göre yüksek KOİ giderimi, düşük çamur oluşumu (%5-20) gibi birkaç avantajı vardır. Aynı zamanda anaerobik sistemler daha az enerji gereksinimi ve potansiyel nutrient ve biyogaz kazanımı gibi de avantajlara sahiptir [3, 12, 32].



Şekil 2.7: Tipik bir anaerobik filtre (AF) şematik diyagramı [3]

Her ne kadar anaerobik arıtımın avantajları çok olsa da deşarj standartlarında çıkış suyu elde etmesi çok zordur. Anaerobik bölmeli reaktör (ABR), klasik sürekli karıştırılmalı tank reaktör (KSKTR), anaerobik kesikli reaktör (AKR), anaerobik filtre (AF) (Şekil 2.7), yukarı akışlı anaerobik çamur battaniyesi (YAÇB), anaerobik konkakt reaktör (Şekil 2.8) ve anaerobik lagün (AL) mezbaha atıksularının arıtımı için tipik anaerobik proses konfigürasyonlarıdır (Tablo 2.5).



Şekil 2.8: Anaerobik kontakt reaktör prosesinin şematik gösterimi [33]

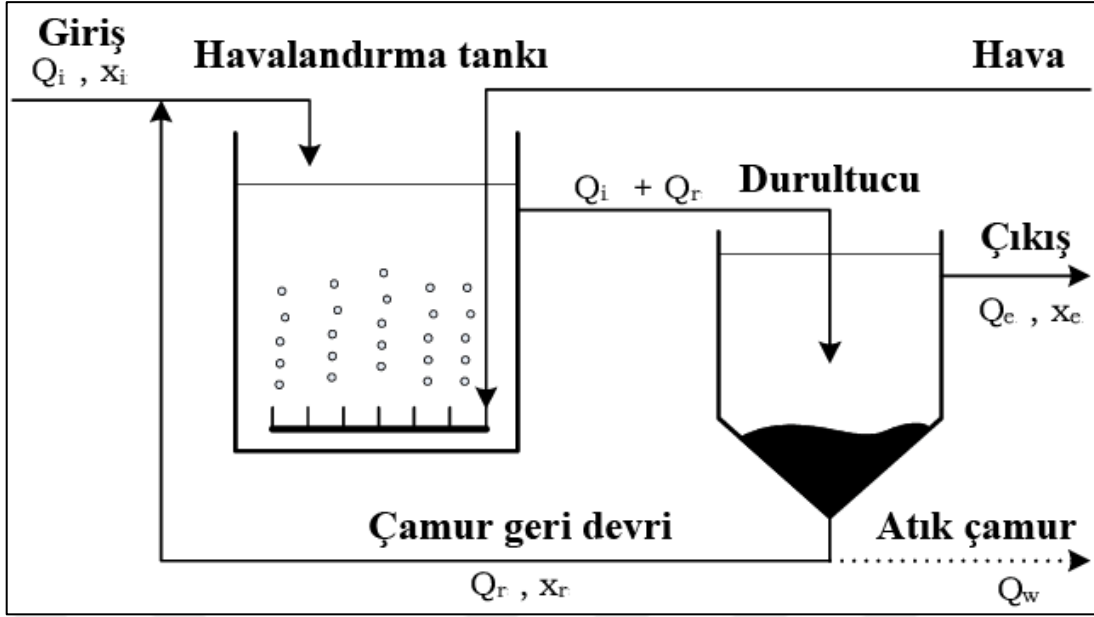
Tablo 2.5: Mezbaha atıksularının anaerobik arıtım prosesleri [34]

Reaktör Tipi	Yükleme hızı (kg KOİ.m ⁻³ .gün ⁻¹)	Alıkonma Süresi	Sıcaklık (°C)	Verim (%)	Gaz üretimi	Referans
Lagün	0,0016 - 0,068	10 - 12 gün	Ortam sıcaklığı	82,6 (BOİ)	-	[35]
Kontakt	1,2 - 2,2	1 - 1,7 gün	35	-	-	[36]
AF	2,0	-	-	85 (KOİ)	-	[37]
AF	5,5	1 gün	37	90,5 (KOİ)	-	[38]
Kademeli	-	1 gün	30 - 40	-	0,2 - 0,3 m ³ CH ₄ /giderilen kg KOİ	[39]
AF	0,8 - 3,6	1,4 gün	32	62 - 92 (KOİ)	-	[40]
AF	4,3 - 6,0	0,71 gün	35	49 - 57 (KOİ)	0,8 - 2,2 mL CH ₄ /giderilen gr KOİ	[41]
KSKTR	0,92	23 gün	35	56,6 (KOİ)	0,2 m ³ CH ₄ /giderilen kg KOİ	[42]
KSKTR	2,6 - 8,75 gr UAKM/L.gün	12 gün	35 - 55	45 - 65 (KOİ)	0,30 - 0,43 m ³ CH ₄ /giderilen kg KOİ	[43]
Kontakt	2,75	2,5 gün	35	84,5 (KOİ)	0,28 m ³ CH ₄ /giderilen kg KOİ	[44]
YAÇB	2,5 - 19,5 3,0 - 12,0	1,7 - 9 saat 5 - 10 saat	30 20	53 - 67 40 - 62 (KOİ)	0,82 - 5,2 1,22 - 3,2 kg CH ₄ -COD/m ³ .gün	[45]
YAÇB	0,5 - 20	0,5 - 1,7 gün	30	68,4 - 82,3 (KOİ)	-	[46]
Kontakt	1,0	3,3 gün	22	70,0 (KOİ)	-	[47]
Kontakt	16 kg TKM/m ³ .gün	10 gün	55	27 (TKM)	0,08 m ³ CH ₄ /kg TKM eklenen	[48]
AF	2 - 18,5	0,5 - 5 gün	-	27 - 85 (KOİ)	-	[49]
ABR	0,67 - 4,73	0,1 - 1,1 gün	25 - 35	75 - 90 (KOİ)	0,07 - 0,15 m ³ CH ₄ /kg giderilen KOİ	[50]
İki Kademeli YAÇB	15	5,5 saat	18	90,0 (KOİ)	-	[51]

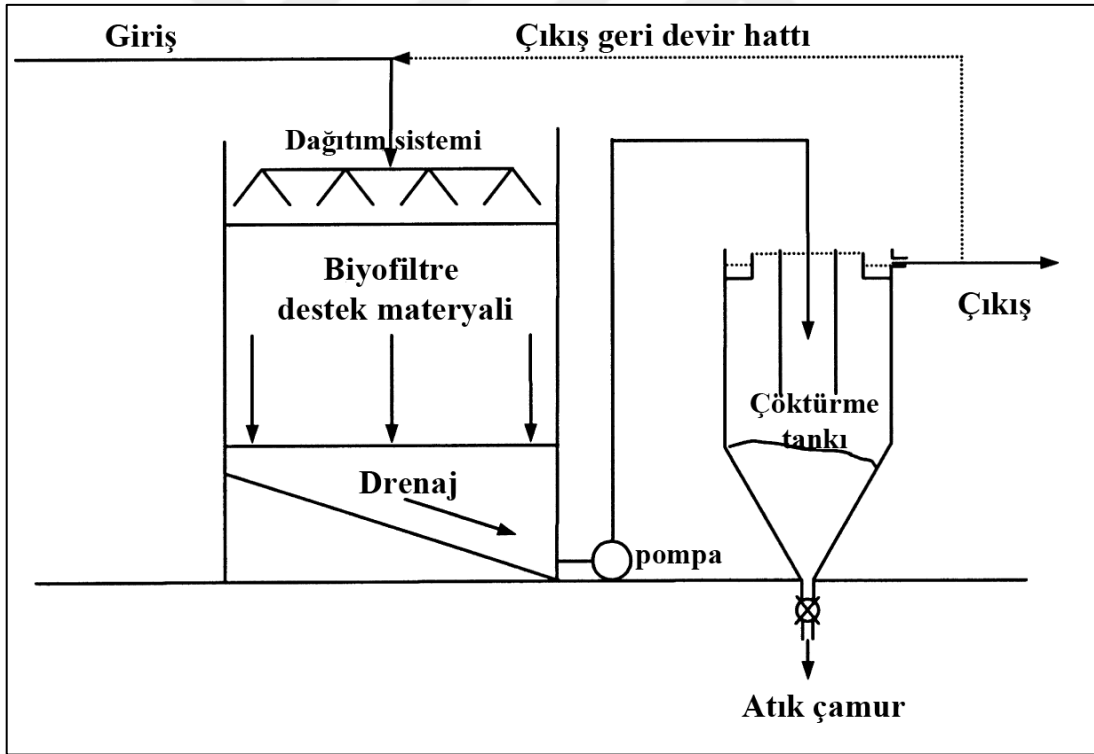
2.2.1.4.2 Aerobik arıtım

Biyolojik olarak parçalanabilen atıkların arıtımında yüz yılı aşkın bir süredir aerobik biyolojik arıtım teknikleri kullanılmaktadır. Aerobik sistemlerde, aerob bakteriler oksijenli ortamda organik maddenin uzaklaştırılmasından sorumludur. Aerobik sistemler iyi kalitede deşarj suyu sağlamaktadırlar. Giriş akımı BOİ değerinin %95 ve üzerinde verim ile arıtılabilirler [34]. Arıtım süresi ve ihtiyaç duyulan oksijen miktarı mezbaha atıksuyunun içerdęi yüksek organik madde ile doğru orantılı olarak artar. Aerobik arıtım genellikle son dekontaminasyon için, fizikokimyasal veya anaerobik proseslerden sonra nutrient giderimi amacı ile kullanılır [52]. Hangi aerobik prosesin kullanılacağına karar vermek için bazı faktörlerin hesaba katılması gereklidir. Bu faktörler, kurulum için gerekli alan miktarı, belirli atıksu tipi ile ilişkili olan problemler (örneğin çamur kabarması ve köpük oluşumu), enerji verimliliği ve aşırı çamur üretimidir. Konvansiyonel aerobik biyolojik arıtımın enerji maliyeti prosese sağlanmak zorunda olan hava miktarı ile doğru orantılıdır. Daha düşük arıtım maliyeti olan kentsel atıksular ile yüksek arıtım standartlarında atılması gereken endüstriyel atıksuların arıtım maliyeti aynı değildir. Örneğin amonyağın nitrata dönüştürülmesi için 4,5 mol oksijene ihtiyaç vardır. Bu hesaba katılır ise 1 mg.L⁻¹ amonyak konsantrasyonu 4,5 mg.L⁻¹ BOİ konsantrasyonuna eşittir. Bu nedenle, amonyağın nitrata dönüştürülmesi sadece ihtiyaç olduğunda amaçlanması gerekmektedir.

Aerobik reaktörler birkaç farklı konfigürasyona sahip olabilirler. Ancak, biyolojik prosesler çok benzerdir ve azot giderimi gerekip-gerekmediğine göre tanımlanabilir [11]. Aktif çamur (AÇ), döner biyodisk (DBD), damlatmalı filtre (DF), havalandırılmalı lagün ve aerobik kesikli reaktörler (KR) mezbaha atıksularının arıtımı için tipik aerobik proses konfigürasyonlarıdır.



Şekil 2.9: Tipik bir aktif çamur (AÇ) prosesinin şematik diyagramı [53]



Şekil 2.10: Tipik bir damlatmalı filtre (DF) akım şeması [34]

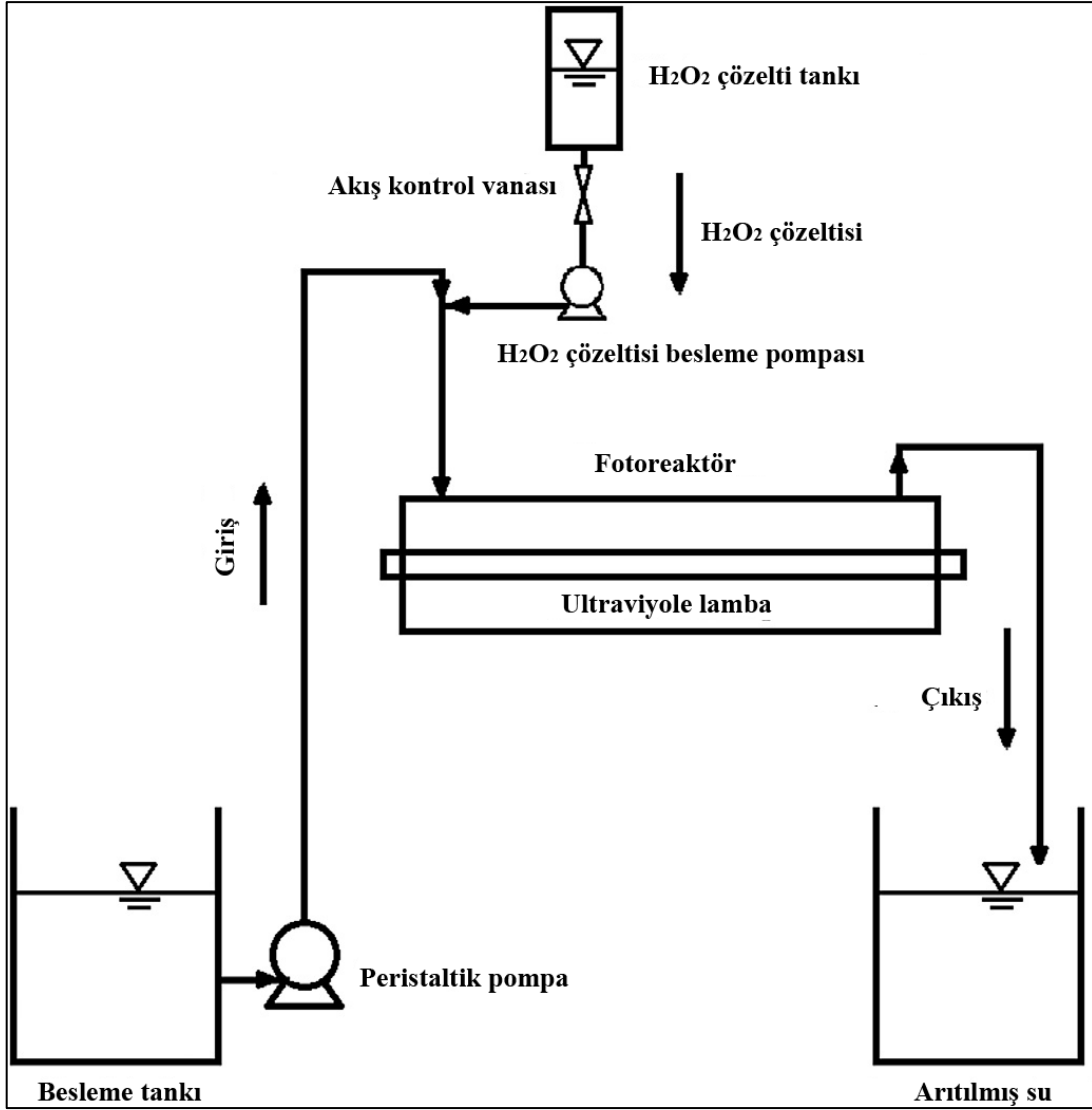
2.2.1.5 İleri oksidasyon sistemleri

Atıksu arıtımında karşılaşılan en önemli problemlerden bazıları biyolojik olarak parçalanmayan kimyasalların ve toksik kirleticilerin uzaklaştırılmasıdır. Bu maddelerin ve kimyasalların uzaklaştırılmasında kimyasal yükseltgeme/indirgeme prosesleri kullanılabilir en önemli tekniklerden bir tanesidir. Bu teknik, organik kirleticilerin H_2O , CO_2 ve diğer inorganik bileşiklere mineralleşmesi veya en azından zararlı olmayan maddelere çevrilmesi esasına dayanmaktadır. Kimyasal parçalama uygun şekilde geliştirildiği zaman kirletici problemini tamamen ortamdaki uzaklaştırılabilmektedir. Hidrojen peroksit, ozon, titanyum oksit bileşikleri, UV ışınımı ve Fenton belirteci (Fenton's reagent) olarak tanımlanan hidrojen peroksit ve demir iyonları bileşimi geniş kullanım alanına sahiptir [54].

H_2O_2/UV prosesi en fazla uygulaması olan ileri oksidasyon proseslerinden birisidir. H_2O_2/UV prosesinin mezbaha atıksularının arıtımında efektif bir şekilde kullanılacağı gözlemlenmiştir [3]. Bu proseste, kirleticilerin oksidasyonu ve bozunması H_2O_2 'nin UV ışığı ile reaksiyonu sonucu ortaya çıkan yüksek reaktiviteye sahip hidroksil radikallerine (*OH) bağlıdır. Tek lambalı bir H_2O_2/UV fotoreaktör sisteminin şematik gösterimi aşağıda verilmiştir (Şekil 2.11).

Tablo 2.6: İleri oksidasyon olayları

Bileşenler	İsim
H_2O_2/Fe^{+2}	Fenton
H_2O_2/Fe^{+3}	Fenton benzeri
$H_2O_2/Fe^{+2} (Fe^{+3})/UV$	Photoassisted Fenton
$H_2O_2/Fe+3$ -oksalat	
Mn^{+2} / Oksalik asit / Ozon	
$TiO_2 / h\nu / O_2$	Foto kataliz
O_3 / H_2O_2	
O_3 / UV	
H_2O_2 / UV	



Şekil 2.11: Tek lambalı bir H_2O_2/UV fotoreaktör sisteminin şematik diyagramı [3]

2.2.1.6 Birleştirilmiş prosesler

Birleştirilmiş prosesler ise yukarıda tanımlanmış olan proseslerin birlikte/ardışık olarak kullanılması sonucu, her prosesin avantajından faydalanabilmek amacı ile ortaya çıkmıştır. Örnek olarak aktif çamur-ters ozmos sistemleri, koagülasyon/adsorpsiyon sistemleri ve/veya anaerobik filtrenin (AF) aerobik KR'a eklendiği sistemler gösterilebilir.

2.3 Membran Biyoreaktörler

Membran proseslerin biyolojik (aerobik/anaerobik) proseslerle birlikte katı-sıvı ayırımı yapmak amacıyla kullanımı sonucu ortaya çıkan reaktör tipine membran biyoreaktör (MBR) denir [30]. MBR konfigürasyonları, arıtma verimliliğinin önemli olduğu birçok endüstriyel

atıksuyun arıtımı için optimal olduğu kanıtlanmıştır. Sanayi sektöründe, MBR'in performansı ABD'de General Motors tarafından Mansfield, Ohio fabrikasında ilk büyük MBR kurulumunun gerçekleştirildiği 1990'ların başından beri geniş çapta incelenmiştir [55]. 1998'de ise gıda endüstrisi atıksuyunu arıtmak için ilk büyük ölçekli dahili MBR sistemi Kuzey Amerika'da kuruldu [56].

Membran biyoreaktör, ardışık biyokimyasal reaksiyonların ve katı-sıvı ayrımının gerçekleştiği bütünleşik bir cihazdır. Bu sistemlerde genellikle mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon ile bakterilerin ayrımı ve biyoreaktör içerisinde kalması sağlanır. Bu durumda membran, seçici bir bariyer görevini yüklenir ve askıdaki hücrelerin reaksiyon bölgesinde kalmasını sağlar [57]. Reaktör içerisinde kalan bakteriler biyokütle konsantrasyonunu artırır ve bu da geleneksel sistemlere göre membran biyoreaktörlerin biyokütle konsantrasyonun daha fazla olmasını sağlar.

Membran biyoreaktörlerin tasarımı, üretimi ve işletilmesi esnasında önemli olan faktörler aşağıdadır:

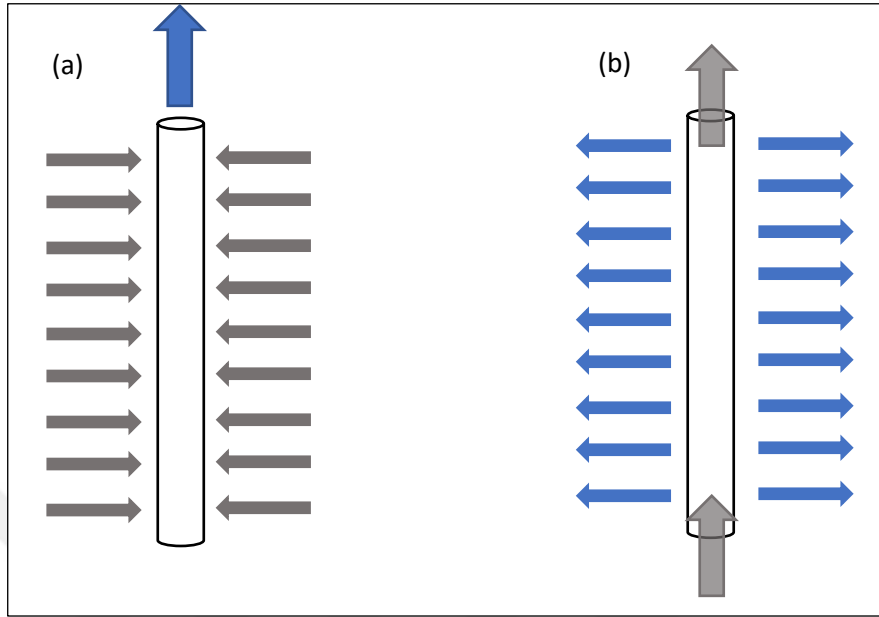
- MBR sisteminin konfigürasyonu
- MBR sisteminde kullanılacak olan membranların karakteristiği
- Sitemde bulunan biyokütlenin ve sisteme beslenen giriş suyunun özellikleri
- Membran biyoreaktörün işletim koşulları ve yönetimi
- Membran biyoreaktörlerdeki kirlenme mekanizmaları ve kontrolü

2.3.1 Membran biyoreaktör konfigürasyonları

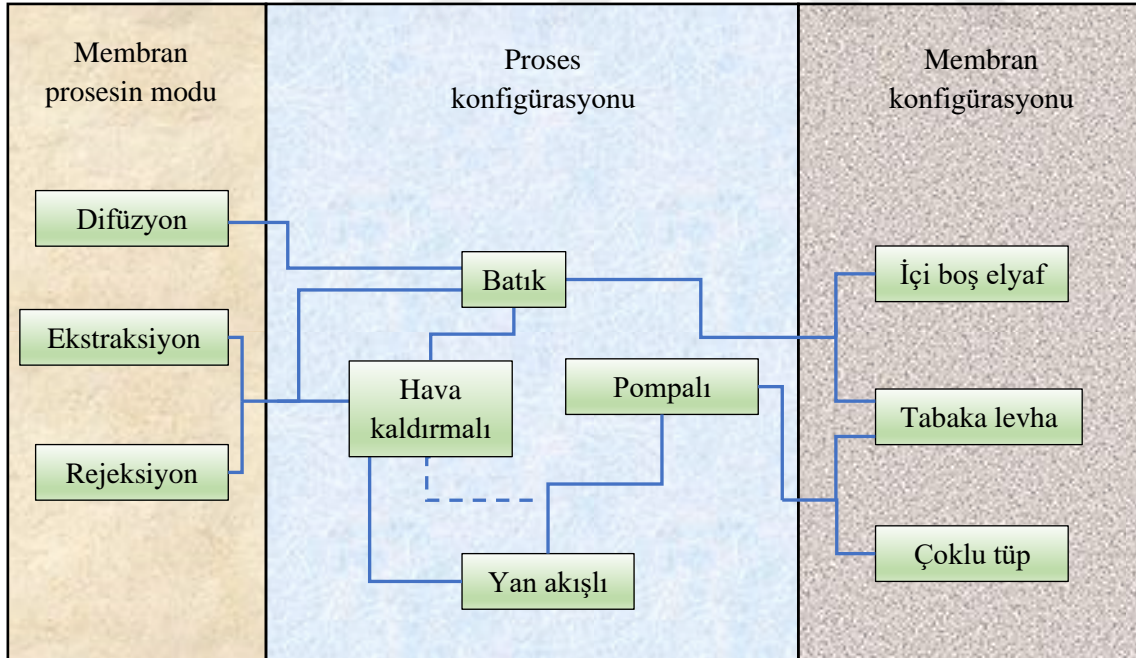
Konfigürasyon kelimesi hem membran biyoreaktör prosesini (ve özellikle membranın biyoreaktör ile nasıl entegre edildiğini) hem de membran modülünü kapsayacak şekilde kullanılabilir. İki temel MBR proses konfigürasyonu vardır: batık veya daldırılmış (immersed - iMBR), ve yan akımlı (sidestream - sMBR). Şekil 2.12, bu konfigürasyonları göstermektedir.

Aynı zamanda pompalı (pumped) veya hava kaldırmalı (airlift) olarak iki hidrolik çalışma şekli de bulunmaktadır. Bu konfigürasyonlar ve kütle transfer biçimleri, konvansiyonel (biyokütleyi sudan ayıran) MBR'ler tarafından kullanılmaktadır. Ancak, iki tane daha membran proses modu bulunmaktadır. Bunlar membranı biyokütleyi arıtılacak olan sudan

ayırmak dışında başka bir amaç ile kullanan ekstraktif (eMBR) ve difüzyif (dMBR) modlarıdır (Şekil 2.13.) [30].

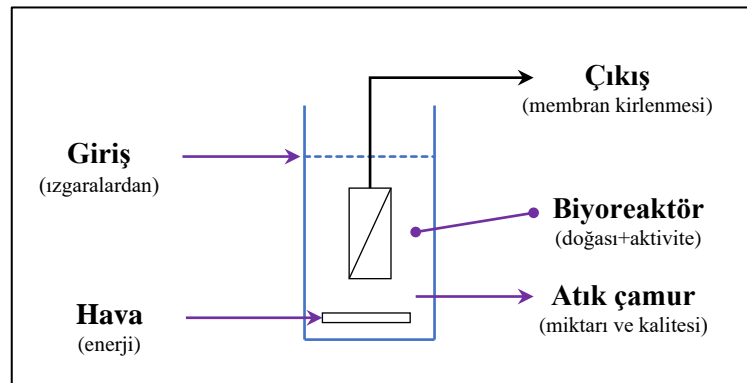


Şekil 2.12: Membran filtrasyonu işletme mekanizması. (a) batık ve (b) yan akımlı



Şekil 2.13: MBR teknolojilerinin temel konfigürasyonları [58]

iMBR'ler genellikle, yan akımlı çapraz akışlı membran modüllerinde yüksek basınç ve debiden kaynaklanan enerji kaybına maruz kalmadıklarından sMBR'lerden daha az enerji tüketirler. sMBR'lerde, her zaman pompa enerji ihtiyacı ve akı arasında bir tercih yapılması gerekmektedir. Akıyı maksimuma çıkarmak için, yüksek çapraz akış hızı ve yüksek TMP gerekmektedir [58]. sMBR'ler iMBR'lerden topolojilerinden dolayı daha yüksek fouling eğilimine sahiptirler. Çünkü fouling akının artması ile artar ve yüksek akıli işletme şartları düşük permeabilitelere sebep olur. Dahası yan akımlı proseslerde akışkana pompalama ile kazandırılmış olan yüksek kesme kuvvetleri aynı zamanda da flokların parçalanması (ve boyutlarının küçülmesi) için yeterli gelmektedir. Bu da flokların içerisinde bulunan bu ufak partiküllerin akışkanın içerisindeki miktarını arttırmakta ve membranlarda fouling olayına sebep olmaktadır. iMBR'ler süzüntü miktarı başına harcanan spesifik enerji ihtiyacı (kWh.m^{-3} süzüntü) bakımından değerlendirildiklerinde sMBR teknolojilerine göre çok daha fazla enerji verimliliğine sahiptirler. Her ne kadar batık membran konfigürasyonları kadar düşük enerji ihtiyacı olmasa da sMBR'ların sahada biyoreaktöre herhangi bir olumsuzluk yaratmayacak şekilde kimyasal olarak temizlenebilmesi, membran modüllerine erişimin kolay ve hızlı olması sebebi ile modül değişimlerini vb. bakım sürelerinin düşüklüğü, hollow fiber batık membran sistemlerinden daha yüksek MLSS değerlerinde işletilebilmesi ve havalandırmanın sadece biyolojik çamurun ihtiyacı için optimize edilebilmesi gibi avantajları da vardır [30].



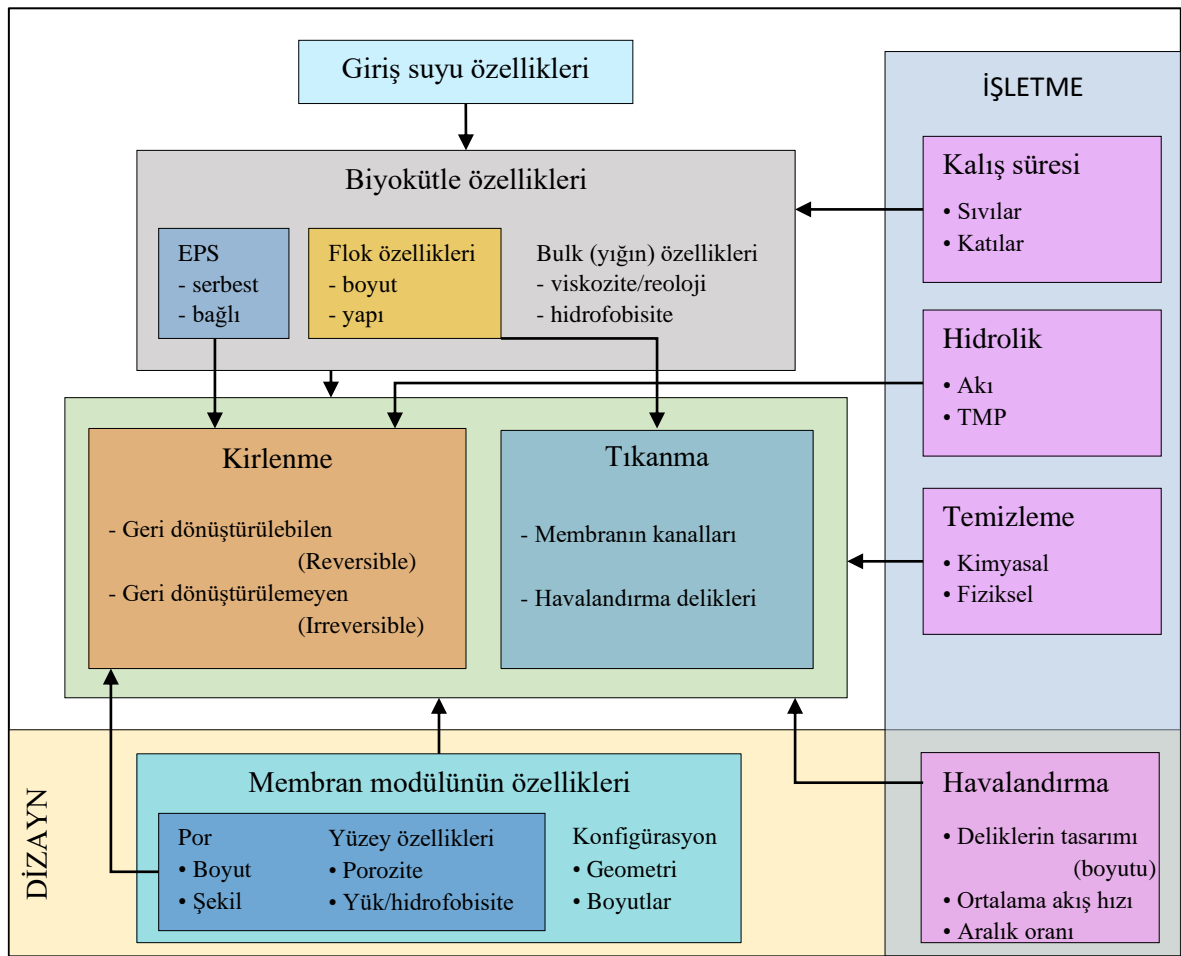
Şekil 2.14: Membran biyoreaktörlerin bileşenleri [30].

Membran biyoreaktörlerin tasarımı ve işletimi için gerekli olan ana bileşenler (Şekil 2.14) aşağıdadır:

- Membranın dizaynı ve permeabilitesinin sürdürülebilirliği;
- Giriş suyu, özellikleri ve ön arıtımı;
- Biyokütle ve membranın havalandırılması;

- Çamurun kalış süresi ve atımı;
- Biyokütlenin yapısı ve biyoaktivite.

Bu bileşenlerin hepsi birbirleri ile ilişkilidir (Şekil 2.15). Çamur atım oranı kalış süresini (ÇY) kontrol eder. Bu da Biyokütle konsantrasyonunu (MLSS) belirler. MLSS ise hem biyolojik (biyoaktivite ve mikroorganizmaların çeşitliliği) hem de fiziksel (oksijen transfer hızı, viskozite gibi) özellikleri etkilemektedir. Giriş suyunun kimyası, MBR işletimi üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Giriş suyunun yapısı genellikle membran kirlenme eğilimini belirler. MBR'lerin temel prensipleri ve ilişkileri Şekil 2.15'te değerlendirilmiştir.



Şekil 2.15: MBR parametreleri ve kirlenme arasındaki içsel ilişkiler [30, 58]

2.3.2 Membranların karakteristiği

Ana membran dizayn parametreleri konfigürasyon (akış yönü ve membran geometrisi), membran yüzeyinin karakteristik özellikleri ve membranların ayırımıdır. Ticari MBR

bileşenlerinin por büyüklükleri ultrafiltrasyonun kaba – mikrofiltrasyonun ince kısmına denk gelmektedir (Şekil 2.6). 50-200 nm aralığına denk gelen bu por büyüklükleri çalıştırma şartları bazında yeterli süzme ve kirlenme kontrolü sağlamaktadır. Tablo 2.7 ve Tablo 2.8 literatürde MBR sistemlerinde kullanılan membranların tiplerini ve karakteristiklerini özetlemektedir.

Tablo 2.7: Batık MBR sistemlerinde kullanılan membranların tipleri ve karakteristikleri [59]

No	Tip	Membran Geometrisi	Por Çapı (µm)	Atıksu	Referans
1	Düz tabaka (FS)	MF-Polietilen	0,4	Evsel	[60]
2	Hollow-fiber (HF)	Polietilen (PE)	0,1	Kentsel	[61]
3	Hollow-fiber (HF)	Zenon®	0,1	Sentetik (ham süt)	[61]
4	Hollow-fiber (HF)	Zenon®	0,1	Kentsel	[60]
5	Hollow-fiber (HF)	Polipropilen	0,1	Sentetik (evsel)	[62]
6	Hollow-fiber (HF)	Hidrofilik polietilen	0,1	Kentsel	[62]
7	Hollow-fiber (HF)	Polietilen	0,1	Evsel	[63]
8	Hollow-fiber (HF)	MF- Polietilen Mitsubishi®	0,1	Sentetik	[64]
9	Hollow-fiber (HF)	MF	0,1	Kentsel	[65]
10	Tabaka hollow-fiber	MF-Poliolefin	0,4	Kentsel	[66]
11	Hollow-fiber (HF)	MF- Polietilen	0,1	Kentsel	[67]
12	Plaka	MF-Poliolefin	0,4	Kentsel	[67]
13	Plaka hollow-fiber	Polisülfon (PS)	0,4	Evsel	[68]
14	-	Dokunmamış Polipropilen	0,5-5	Evsel	[68]
15	Tübüler	Seramik	0,01-0,02	Mezbaha	[69]

Tablo 2.8: Yan akışlı MBR sistemlerinde kullanılan membranların tipleri ve karakteristikleri [59]

No	Tip	Membran Geometrisi	Por Çapı (µm)	Atıksu	Referans
1	Tübüler	• Alümina (Al ₂ O ₃) • Zirkonya (ZrO ₂)	0,2 0,05	Kentsel	[70]
2	Tübüler	• UF-CA • Sülfonatlı PES • Hidrofobik PES	0,05	Sentetik	[71]
3	Plaka	UF	-	Alkollü içecek	[72]
4	Tübüler	UF seramik	0,02	Kentsel	[73]
5	Tübüler	MF seramik	0,2	Kentsel	[74]
6	Tübüler	• Seramik • Zirkonya (ZrO ₂)	0,2 0,05	Gıda (dondurma)	[75]
7	Plaka	UF PAN	-	Sentetik	[76]
8	Tübüler	Seramik (Keracel®)	0,1	Kentsel	[77]
9	Tübüler	MF	0,1	Kentsel	[78]
10	Tübüler	UF	-	Sentetik (akaryakıt)	[79]
11	Tübüler	Seramik (Keracel®)	-	Kentsel	[80]
12	Tübüler	Seramik	0,1	Süt Endüstrisi	[81]
13	Tabaka (FS)	CA		Peyniraltı suyu	[82]

Kullanılabilecek organik membran materyalleri ise aşağıdaki özellikleri sağlayan polimerler ile sınırlıdır. Bu özellikler:

- filtrasyon ve temizleme döngüleri esnasında ortaya çıkan kuvvetlere dayanacak yeterlilikte mekanik ve kimyasal olarak dirençli olmalı,
- hidrofobik bir yüzeyin sağlanabilmesi için modifiye edilebilmeli (aynı zamanda da kirlenmeye daha dayanıklı olması da sağlanmış oluyor),
- gerekli olan mekanik bütünlüğün sağlanması için hali hazırda bir maddeye bağlanmış olmalı, ve
- nispeten düşük üretim maliyetine sahip olmalıdır [30].

Batık membran sistemleri daha düşük akılarda çalıştıklarından ve sMBR'lere göre çok daha fazla yüzey alanı gerektirdiklerinden özellikle membran materyalinin üretim maliyeti önemlidir.

2.3.2.1 Fiziksel özellikler

Por (gözenek) büyüklüğünün membran kirlenmesine etkisi besleme (giriş) çözeltisinin karakteristiği, özellikle de içerdiği tanecik boyut dağılımı ile ilişkilidir. MBR sistemlerinin içerisindeki biyolojik süspansiyonun kompleks ve değişken yapısı dolayısıyla por büyüklükleri ve hidrolik performans ilişkisi için bir genelleme yapılamamaktadır. Por çaplarının küçülmesi, daha geniş bir aralıkta madde rejeksiyonu sağlamakla beraber membran yüzeyindeki kek tabakası direncini de arttırmaktadır. Halbuki daha geniş por çaplarına sahip membranlara göre kek tabakası daha kolay temizlenmekte ve kalıntıların gözenek tıkanıklığına sebebiyet vermesi daha az olasılığa sahiptir. Bu geri döndürülemeyen ve düzeltilemeyen kirlenme ile ilişkilendirilebilir.

Membranların pürüzlülüğü ve porozitesi, farklı kirlenme karakteristiklerinin olası nedenleri olarak tanımlanabilir. Aynı por çaplarına sahip fakat farklı por dağılım şekillerine sahip membranlar farklı kirlenme karakteristiklerine sahiptirler. Örneğin yoğun bir yapısı ve düzgün silindirik porları olan membran yüksek yüzey izoporozitesine sahip olduğundan, aynı por çapına ve yüksek gözenekli ağ örgüsü yapısına sahip olan daha az yoğunluktaki membranlara göre daha az direnç göstermekte ve kirlenme yatkınlığı da daha az olmaktadır. Membranın mikro yapısı, yapıldığı malzeme ve porlarının geometrisi MBR'lerin kirlenme olayında oldukça etkilidir ve yüksek bir öneme sahiptir [55, 83].

iMBR'ler genellikle hollow-fiber (HF) veya düz tabaka (FS) şeklinde yapılandırılırken sMBR'ler ise düz tabaka veya multitübüler (MT) şeklinde yapılandırılmıştır. HF modülleri genellikle daha ekonomiktir. FS ve MT membranlardan daha yüksek bir paketleme yoğunluğuna sahiptir ve daha güçlü bir geri yıkamaya olanak sağlamaktadır. Ancak FS ve MT membranların kanal boyutları iyi tanımlanmış olduklarından hidrodinamik olarak HF membranlardan daha iyi kontrol edilebilmektedir. FS membranların havalandırılması her ne kadar yüksek işletme maliyetlerine sebep oluyorsa da bu havalandırma aynı zamanda da yüksek membran permeabilitesinin de sebebidir [58].

2.3.2.2 Kimyasal özellikler

Membran materyali, mikrobiyal hücreler, hücre dışı polimerik maddeler (EPS) ve çözünenler arasında gerçekleşen hidrofobik etkileşimler nedeniyle hidrofobik membranlarda hidrofilik membranlara göre kirlenme daha fazla gerçekleşir. Hidrofilik membranların geçirimsizliği, hidrofobik membranlara göre daha fazladır [84]. Kimyasal direnci ve fiziksel dayanıklılık nedeniyle PP, PVDF, PES ve PE MBR membranlarının üretiminde kullanılan ana malzemelerdir. Aynı zamanda da PTFE, PVA (polivinilalkol) ve PAN'de kullanılmaktadır. Bu malzemeler görece hidrofobiktir. Membranların sulu filtrasyonlarda da kullanımını sağlayacak şekilde üretimleri esnasında bu malzemelere bazı katkı maddeleri de karıştırılabilmektedir. Ticari membranların çoğu bu spesifik ve orijinal katkı maddelerini içermektedirler. Bu nedenle membranların ana malzemesi temel alınarak yapılan filtrasyon performanslarının karşılaştırılması daha az anlamlıdır [58]. Membran hidrofobitesindeki değişimlerle ilgili literatürdeki çalışmalarda genellikle por morfolojisi ve boyutu birlikte incelenmiştir. Bu da membranların kirlenmesi ve hidrofobitesisi arasındaki ilişkinin değerlendirilmesini güçleştirmektedir [84, 85].

Seramik membranların üstün hidrolik, kimyasal ve termal dayanımları olmasına rağmen üretim maliyetlerinden dolayı membran biyoreaktörlerde kullanımı yüksek derecede kirliliğe sahip ve arıtımı zor olan endüstriyel atıksuların arıtımı ile sınırlıdır. Alümina (Al_2O_3) kullanılarak üretilen seramik membranlar, MBR uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca zirkonya (ZrO_2), silisyum dioksit (SiO_2), titanyum dioksit (TiO_2) ve silisyum karbür (SiC) materyallerinden de seramik membranlar üretilmektedir. Literatürde yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde seramik membranların polimerik membranlara göre inorganik kirlenmeye daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir [84].

Membranların üretiminde çeşitli mekanik dayanımları ve kimyasal dirençleri nedeniyle değişik malzemeler kullanılabilir. UF/MF membranların üretimi için kullanılan genel malzemeler, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin karşılaştırması Tablo 2.9'da verilmiştir.

2.3.3 Giriş suyunun ve biyokütlenin karakteristikleri

2.3.3.1 Giriş suyunun özellikleri

Fiziksel olarak katı-sıvı ayırımı yapılan atıksu filtrasyonunda membran kirlenmesi sadece atıksuyun kalitesine ve özellikleri bağlıdır. Membran Biyoreaktörlerdeki membran

kirlenmesi ise genellikle giriş suyu özelliklerine değil de membran ve biyoreaktör içeriği (biyokütle) arasındaki etkileşimlere bağlıdır [61, 85].

Tablo 2.9: Membran materyallerinin karşılaştırılması [86]

Membran malzemesi	Özellikleri
Polipropilen (PP)	<ul style="list-style-type: none"> - Sınırlı pH dayanımı ve düşük kimyasal dayanım - İyi mekanik dayanım ve permeabilite - Düşük oksidan toleransı örneğin kloraminler (0,5 ppm'e kadar)
Polietilen (PE)	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrofobik ve kimyasal olarak modifiye edilmesi zor - MF membranlar için kullanılır ve oksidasyona karşı hassas
Polietersülfon (PES)	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek oksidan toleransı ve geniş pH aralığı (1-12) - Yağlara ve greslere direnç gösterir - Hidrofilik özellikler için kolayca modifiye edilebilir - Organik çözücülere karşı dayanıksız - UF derecelendirmesi ve polimer harmanlama için en iyisi
Polisülfon (PS)	<ul style="list-style-type: none"> - Geniş aralıktaki pH değişimlerine (1-13) ve oksidanlara dirençli - Yüksek mekanik dayanım ve yüksek sıcaklık sınırı (tipik olarak 75°C) - Kirlenmeye karşı düşük dirençli hidrofobik
Polivinildene florür (PVDF)	<ul style="list-style-type: none"> - Oksidan toleransı yüksek ve orta pH aralığı (2-10,5) - Orta sıcaklık sınırı (tipik olarak 40°C) - Yüksek mekanik dayanım ve esneklik
Selülozik türevler (CD)	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrofilik ve selüloz asetat (CA) içerir - Dar pH aralığı (4-8,5) ve düşük sıcaklık sınırı (< 35°C) - Orta düzeyde oksidan toleransı - Bakterilerin tutunması kolay - PVDF ve PS'den daha düşük kimyasal direnci ve mekanik dayanım
Poliakrilnitril (PAN)	<ul style="list-style-type: none"> - Orta düzeyde oksidan, asit ve kostik toleransı - Düşük membran kirlenmesi için hidrofilik - Orta düzeyde sıcaklık sınırı (40°C) ve orta pH aralığı (2-10) - PVDF'dan daha düşük ama iyi mekanik dayanım
Seramik	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek pH aralığı (0-14) - Yüksek kimyasal direnç - Organik membranlardan daha yüksek mekanik dayanım ve sıcaklık toleransı - Kırılgan ve gevrek bir yapıya sahip

2.3.3.2 Biyokütlenin karakteristiği

Biyokütlenin karakteristiğini belirleyen en önemli parametreler şu şekilde sıralanabilir: MLSS konsantrasyonu, viskozite, sıcaklık, çözülmüş oksijen konsantrasyonu, flokların karakteristiği, hücre dışı polimerik maddeler (EPS) ve çözülmüş mikrobiyal ürünler (SMP).

Tablo 2.10: MLSS konsantrasyonunun değişiminin MBR kirlenmesine etkisi [58]

MLSS değişimi, g/L	Detaylar	MBR işletme mekanizması
<i>Kirlenme artışı</i>		
0,09 – 3,7	Kek direnci: $21 - 54 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$ ve $\alpha: 18,5 - 0,7 \cdot 10^8 \text{ m.kg}^{-1}$	iMBR
2,4 – 9,6	Toplam direnç: $9 - 22 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$	iMBR
7 – 18	Kritik akı: 47 – 36 LMH (ÇY 30 – 100 gün için)	iMBR
2,1 – 9,6	Kritik akı: 13 – 8 LMH	iMBR
1 – 10	Kritik akı: 75 – 35 LMH	sMBR
2 – 15	'Limit akı': 105 – 50 LMH	sMBR
1,6 – 22	'Stabil akı': 65 – 25 LMH	sMBR
<i>Kirlenme azalışı</i>		
3,5 – 10	Kritik akı: >80, <60 LMH	sMBR
<i>Hiç ya da az etkisi olanlar</i>		
4,4 – 11,6	4'ten 8 g.L^{-1} 'ye etkisi yok, 12 g.L^{-1} için daha az kirlenme	iMBR
4 – 15,1	Kritik akı 25'ten 22 LMH'a azalmıştır	iMBR

Literatürde MLSS konsantrasyonunun değişiminin membran kirlenmesi ve tıkanması üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara göre MLSS miktarı ile membran kirlenmesi veya tıkanması arasında karmaşık bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. MLSS'nin artırılmasının membran permeabilitesi üzerine etkisi ya negatif ya pozitif ya da hiç olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 2.10) [30]. MLSS konsantrasyonlarının ayarlanması için kullanılan deneysel metotlar biyokütlenin karakteristiği üzerinde oldukça etkilidir. Çünkü biyokütle

katılarının miktarı dekantasyon ile birlikte kullanılan çöktürme yoluyla artırılabilir. Ancak ortama ve işletmeye alışkın olmayan bir biyokütle farklı karakteristikler sergileyecektir [87]. MLSS konsantrasyonu aynı zamanda arıtım verimini de etkilemektedir. KOİ ve faj uzaklaştırma verimleri üzerinden tanımlama yapıldığında, MBR sistemlerinde 6 g.L optimum MLSS konsantrasyonu olması gerektiği daha önceki araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [30].

Viskozite, biyolojik tank içeriğinin sıcaklığı ve askıda katı maddelerin konsantrasyonu ile yakından ilişkilidir. Her ne kadar viskozitenin MLSS konsantrasyonu ile üssel olarak arttığı gözlemlenmiş ise de, kritik bir MLSS değerinin altında viskozite düşüktür ve MLSS ile birlikte yavaş yavaş artmaktadır. Kritik MLSS değerinin üzerinde ise üssel olarak artmaktadır. Bu kritik MLSS değeri, giriş duyunun özelliklerine ve işletme şartlarına bağlı olarak değişmesine rağmen genellikle 10 – 17 g.L⁻¹ aralığındadır. Viskozite hem akı miktarlarını hem de sistemdeki hava kabarcık boyutlarını etkilemektedir. Biyolojik tank içeriğinin viskozitesi, hava kabarcıklarının difüzyonunu ve reaktör içerisindeki maddelerin hareketlerini etkilemektedir. Örneğin HF membranların kullanıldığı MBR sistemlerinde membran fiberlerinin yanal hareketini etkilemektedir [88].

Sıcaklık, süzüntü viskozitesi üzerinde etkili olduğundan, membran filtrasyonunu etkilemektedir. Aşağıdaki denklem genel olarak sıcaklık korelasyonu amacıyla kullanılmaktadır:

$$J_T = J_{20} \times 1,025^{(T-20)} \quad (2.1)$$

burada J_T , T işletme sıcaklığındaki akıdır. J_{20} ise 20°C'deki akıdır. Literatürde yapılmış olan çalışmalar, düşük sıcaklıklardaki standartlaştırılmış dirençlerin beklenilenden daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu duruma katkıda bulunan olaylar aşağıda açıklanmıştır:

- Süzüntünün viskozitesinin değil çamurun viskozitesinin sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkilenmesi. Çamurun (MLSS) viskozitesindeki değişim hava kabarcıkları ile membran yüzeyinden temizleme yapılması esnasındaki kesme kuvvetini etkilemektedir;
- Düşük sıcaklıklarda meydana gelen deflokülasyon, flokların boyutunu düşürmekte ve ortama EPS salınmasına sebebiyet vermektedir;

- Brownian difüzyonuna göre sıcaklıkla lineer olarak azalan partikül geri taşınım hızı;
- KOİ'nin biyolojik parçalanması sıcaklığın artışı ile azalmaktadır. Bu da yüksek konsantrasyonlarda biyolojik olarak parçalanamayan çözünmüş ve partiküler KOİ'ye sebep olur.

Bütün bu faktörler direkt olarak membran kirlenmesi üzerinde etkilidirler ve sonuç olarak kirleticilerin membran yüzeyinde düşük sıcaklıklarda daha fazla birikmesi beklenir [88].

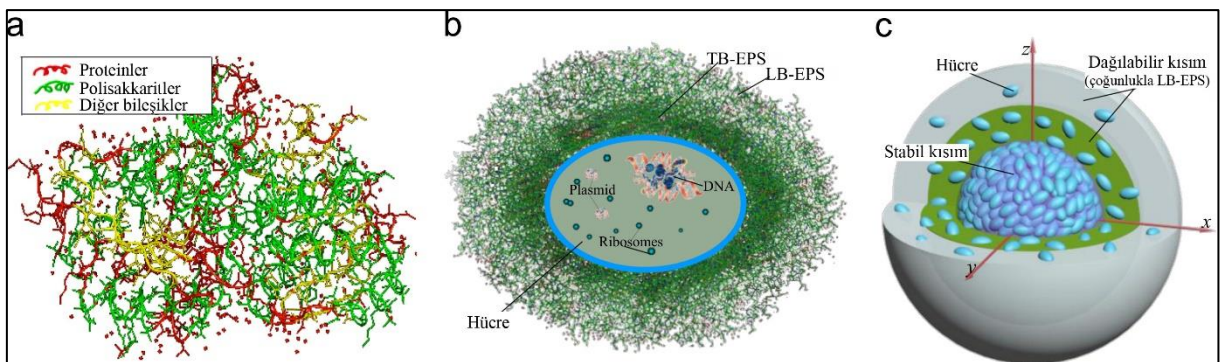
MBR sistemlerine havalandırma ile a) biyokütle için gerekli oksijen miktarının sağlanması, b) biyolojik tank içeriğinin çökelmemesi için sürekli karışımın sağlanması ve c) hava kabarcıklarının oluşturduğu kesme kuvveti ile membran yüzeyinin temizlenmesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Genel olarak çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonunun 1 – 3 mg.L⁻¹ aralığında olması yeterlidir. Ancak biyokütle içerisinde düşük oksijenli ölü noktaların oluşmaması için yeterli karışım da sağlanmalıdır. Yüksek ÇO konsantrasyonları genelde membran filtre edilebilirliğini arttırmaktadır. Bu membran yüzeyindeki spesifik kek tabaka direncinin düşük olması sebebiyle gerçekleşmektedir. Ancak aşırı yüksek ÇO konsantrasyonları işletme maliyetlerini de arttıracaktır. Diğer açıdan değerlendirildiğinde ise, düşük ÇO konsantrasyonları (< 1 mg.L⁻¹) mikrobiyal stresse sebep olup EPS üretimini arttıracığından membran kirlenmesini arttırmaktadır.

Literatürde yapılmış olan çalışmalarda daha yüksek çözünmüş oksijen konsantrasyonuna sahip koşullarda çalışan MBR sistemlerinde flokların boyutlarının daha büyük, biyokütlenin filtre edilebilirliğinin daha iyi ve çıkış akımının kalitesinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. ÇO konsantrasyonunun düşürülmesi spesifik bakteri türlerinin çoğalmasını ve ortamda baskın olmasını, sonucunda da daha fazla EPS üretimine sebebiyet verir [30, 88].

Membranların por büyüklükleri ile karşılaştırıldığında daha büyük boyutlu flokların, porları tıkanmasının mümkün olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak SMP üretimi ile membran tıkanmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca membranın geçirgenliği, flok boyutu ile pozitif korelasyona sahiptir. Hidrodinamik açıdan değerlendirildiğinde, büyük boyutlu flokların membran yüzeyinden yüksek kesme kuvvetleri ve düşük Brownian difüzyonu sayesinde uzaklaştırılması olasıdır. Büyük ve gevşek çamur floklarının oluşması, daha geçirgen ve gözenekli bir kek tabakasının meydana gelmesine ve kirlenme direncinin

düşmesine sebep olmaktadır. Brownian difüzyonu düşük kesme kuvvetleri altında küçük boyuttaki flokların hareketini kontrol etmektedir. Küçük boyuttaki flokların membran yüzeyinde tutunması geçirgenliği düşük olan bir kek tabakası oluşumuna ve hidrolik kek direncinin artmasına sebep olur [89]. Biyolojik çamurun EPS seviyeleri ve filamentli bakteri oranı biyokütlenin flok hidrofobitesini ve zeta potansiyelini etkilemektedir. Filamentli bakterilerini aşırı çoğalması EPS seviyelerini arttırmakta, zeta potansiyellerini düşürmekte, daha düzensiz flok şekilleri oluşmasına sebebiyet vermekte ve daha yüksek hidrofobisiteye neden olmaktadır. Yüksek köpürme eğilimi olan çamur, hidrofobik doğasının gereği, köpürme eğilimi olmayan çamura göre 100 kat daha fazla akı düşüşüne sebep olmaktadır [30].

EPS genellikle karbonhidratlar, proteinler, nükleik asitler, fosfor lipidleri ve polimerik bileşikler gibi hücrenin yüzeyinde, dışında ve hücreler arasındaki boşlukta bulunan otokton makro molekülleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Hücre tarafından salgılanan, hücre yüzeyinden kopan veya hücrelerin parçalanması sonucu ortaya çıkan çözünmeyen maddelerden oluşmaktadır (Şekil 2.16 (a)). EPS matrisi bakteri hücrelerinin flok ve biyofilm oluşturmasını, bakterinin etrafında koruyucu bir katman oluşturmasını, suyu tutmasını ve yüzeye yapışmasını sağlar [90]. Heterojen ve değişken yapısından dolayı EPSler mikrobiyal hücreleri de içeren yüksek oranda su içeren bir jel matris oluşturmaktadır. Bu jel matris membran proseslerde süzmeyi engelleyecek oranda dirence sahip bir bariyer haline gelebilir. Sonuç olarak membran yüzeyine tutunmuş olan bu biyo-floklar, biyofilm oluşumu için temel nütrient kaynağı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.16: (a) EPSlerin, (b) hücrenin ve (c) çamur flok yapısının şematik gösterimi [90]

Tanımı gereği hücre dışı polimerik maddeler (EPS) ya hücre yüzeyinin dışında ya da hücre yüzeyindedir. Ancak buldukları yer oldukça değişkendir. Bakteriyi çevreleyen veya

flokların içerisinde bulunan EPS, dinamik iki katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu yapıda sıkı bağlı EPS (TB-EPSs) iç katmanı, gevşek bağlı EPS (LB-EPSs) ise dış katmanı oluşturmaktadır. Şekil 2.16 (b) ve (c)'de görüleceği üzere LB-EPSs yüksek su içeren bir matrisin içerisinde ve sınırı belli olmayan gevşek bir sümüksü tabakadadır (dağılıbilir kısım, Şekil 2.16 (c)) [90].

Biyokütlenin (çamurun) morfolojisi üzerinde EPS'in etkisi çok fazladır. Çamurun morfolojisi genellikle flok boyutu ve fraktal boyut olarak iki parametre ile karakterize edilir. Membran biyoreaktör sistemlerinde flok boyutu çamur floklarının stabilitesi ve uygulanan kesme kuvveti ile alakalıdır. Flokların stabilitesi ise flok yapısı içerisindeki moleküller arasındaki etkileşimler ile kontrol edilmektedir. EPS miktarının artması flok stabilitesini arttırmaktadır. Deflokülasyon, partiküller arasındaki çekim kuvvetlerinin yok olması veya azalması ile meydana gelmektedir. Sıcaklık, pH, tuzluluk, çözülmüş oksijen miktarı ve beslemedeki toksisite gibi parametrelerdeki aşırı değişimler deflokülasyon olayını meydana getirmektedir. Deflokülasyon oluşma mekanizmaları aynı zamanda katyon (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+}) ve EPS konsantrasyonlarındaki değişimler, mikrobiyal topluluğun değişmesi, veya hücre parçalanması gibi olaylarla da ilişkilendirilebilir. Fraktal boyut ise çamur floklarının benzer özelliklerinin nicel ölçüsüdür. Yüksek fraktal boyut değerleri kompakt (katı) flok oluşumuna karşılık gelmektedir. Kek direnci artışı fraktal boyut değerleri ile doğru orantılıdır. Fraktal boyuttaki artış flokların boyutlarını küçültmekte, sıkılaştırmaktadır. Bu olay EPS'in küçük floklar arasındaki köprüleme etkisi olarak yorumlanmaktadır [90].

Çözülmüş mikrobiyal ürünler (SMP) genel olarak polisakkaritler, proteinler, nükleik asitler, enzimler veya lipitlerden oluşmaktadır. Hücre dışı polimerik maddelerin (EPS) çözülmüş halidir. SMP çok farklı kaynaklardan oluşabilmektedir. Örneğin hücrelerin parçalanması esnasında ortaya çıkabilirler veya doğrudan mikroorganizma tarafından salgılanabilirler ve hatta giriş akımı içerisinde de bulunabilirler. Mikrobiyal büyüme fazında orijinal substratın biyolojik olarak parçalanması esnasında ortaya çıkabileceği gibi endojen fazda biyokütlenin bozunması esnasında da ortama salınabilirler. Membran biyoreaktörlerin çoğu işletme parametresi SMP miktarını etkilemektedir. Çamur yaşının (ÇY) arttırılması EPS ve SMP seviyelerini düşürmektedir [88].

2.3.4 Membran biyoreaktörün işletim koşulları ve yönetimi

MBR sisteminin en önemli tasarım ve işletme parametreleri membranın ve biyoreaktörün karakteristik özellikleridir. Membran ve biyoreaktörün karakteristiği membran biyoreaktörün tasarımını ve performansını etkiler.

MBR sistemleri esasen ikincil çöktürme tankının yerine membran ünitesinin bulunduğu bir biyolojik atıksu arıtma prosesleridir. Membran ünitesi klasik aktif çamur sistemlerindeki (KAÇ) aynı ikincil çöktürme tankının üstlenmiş olduğu katı-sıvı ayırımını yapmaktadır. Bu nedenle membran biyoreaktörlerin işletimi klasik aktif çamur sistemlerinin işletimine benzemektedir. Klasik aktif çamur sistemlerinde biyokütleyi etkileyen işletme parametreleri MBR sistemlerinin işletilmesi için kullanılabilir.

Mikrobiyal parametreler, membranın ayırma performansını direkt olarak etkilemektedir. Örneğin klasik aktif çamur sistemlerinin havalandırma ve çöktürme tanklarında problemlere sebebiyet veren çamur kabarması, köpük oluşumu, vb. problemler membranın ayırma performansını düşürmektedir. Bu olaylar düşük çözülmüş oksijen veya düşük nütrient (azot ve/veya fosfor) konsantrasyonlarından dolayı gerçekleşmesine rağmen, çözülmüş oksijen ve nütrient konsantrasyonları membran işletme parametresi olarak değerlendirilmemektedir. Biyokütle karakteristiğini etkileyen işletme parametreleri de membran kirlenmesi bazında membran biyoreaktörlerin işletilmesi esnasında dikkatle gözlenmelidir [59, 91].

2.3.4.1 Hidrolik kalış süresi (HKS)

Hidrolik kalış süresi (HKS) atıksu arıtma sistemleri mühendisliği için temel ve işletim faktörlerinden birisidir. Evsel atıksuların arıtıldığı standart bir klasik aktif çamur sistemi, giriş suyunun karakterizasyonuna bağlı olarak HKS 4 ila 10 saat arasında olacak şekilde tasarlanmaktadır. Eğer parçalanması zor bileşikler içeren endüstriyel atıksular sisteme kabul edilecekse veya biyolojik nütrient giderimi de yapılacak ise daha uzun HKS ihtiyaç duyulmaktadır [91].

HKS, membran biyoreaktöre substrat yüklenmesini kontrol etmektedir. Membran biyoreaktörlerin içerisindeki mikroorganizma konsantrasyonları (örneğin MLVSS), klasik aktif çamur sistemlerinden çok daha fazla olduğundan düşük hidrolik kalış süreli işletim yapılabilmektedir. HKS, giriş debisi (Q_0) ve reaktör hacmi (V) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$HKS = \frac{V}{Q_0} \quad (2.2)$$

Yüksek biyokütle konsantrasyonundan dolayı MBR sistemlerinde organik maddelerin arıtılması, klasik aktif çamur sistemlerine göre daha hızlı ve daha stabil olarak gerçekleşmektedir. Eğer tasarım F/M oranı ($F/M = S_0/HKS * X$) sabit tutulursa, membran biyoreaktörün biyokütle konsantrasyonu (X) daha fazla olduğundan HKS de düşük olacaktır. Ancak genellikle MBR sistemleri, klasik aktif çamur sistemlerine benzer HKS ile çalıştırılırlar. Çünkü, organik maddelerin parçalanabilmesi için ihtiyaç duyulan zamanı MBR sistemlerinde de sağlamak gereklidir [91]. Düşük HKS değerleri, yüksek organik yükleme hızlarına ulaşılmasını sağlar. Bu da spesifik arıtım performansı elde etmek ve mikroorganizmaların çoğalmasını arttırmak amacı ile daha düşük reaktör hacimlerinin kullanılmasını sağlamaktadır. Diğer yandan, yüksek HKS genellikle daha iyi bir arıtım performansı sağlamaktadır [92].

HKS'nin, çamur miktarındaki ve EPS konsantrasyonlarındaki artışın sebep olacağı membran kirlenmesi üzerine dolaylı bir etkisi vardır. HKS'nin düşürülmesi, membran kirlenme hızını arttırmaktadır.

2.3.4.2 Çamur Yaşı (ÇY)

Biyoreaktör içerisindeki çamur üretim oranının ve sabit biyokütle konsantrasyonunun kontrolü için ÇY ana işletme parametrelerinden birisidir. Tipik klasik aktif çamur sistemlerinde ÇY değerleri 4 ila 10 gün arasında değişmektedir. Bu çamurun (biyokütlenin) gerçekten de 4 ila 10 gün boyunca biyoreaktör ve son çöktürme tankında kalması demektir. Ancak, MBR sistemlerinin membranlar vasıtasıyla mikroorganizmaları tutması daha iyi olduğundan, genelde ÇY değerleri 30 günün üzerindedir. Eğer MBR sisteminden çamur atımı olmaz ise, MBR sistemlerinin ÇY değeri sonsuz olur. Bu klasik aktif çamur sistemlerinde mümkün değildir. Çünkü, genellikle son çöktürme tanklarında alı konma süresi (HKS) 2 – 4 saat arasında değiştiğinden, son çöktürme tankı çıkış suyunda az da olsa (birkaç $mg.L^{-1}$) askıda katı madde bulunur. Atıksu arıtma tesislerinin işletilmesinde genel yaklaşım düşük HKS ve yüksek ÇY değerlerinde, sistemin performansında herhangi bir azalmaya sebep olmayacak şekilde sistemin işletilmesidir. Ancak bu klasik aktif çamur sistemlerinde mümkün olamamaktadır. Çünkü son çöktürme tanklarında mikroorganizma kaybı yaşanmaktadır. Klasik aktif çamur sistemlerinde HKS ve ÇY birbirleri ile sıkı bir

bağlantıya sahiptir. Diğer taraftan, membranların muhteşem katı-sıvı ayrımı yapabilmesinden dolayı, MBR sistemleri işletilirken HKS ve ÇY değerleri istenildiği gibi ve birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. MBR sistemleri daha yüksek çamur yaşı değerlerinde işletilebildiğinden ve diğer sistemlere nazaran daha az çamur atılması gerekeceğinden, gittikçe şartları sıkılaştırılan ve maliyeti de artan atık çamur bertarafı yöntemlerinin kullanımına daha az ihtiyaç duyulacaktır [91].

MBR sistemlerinde membran kirlenmesi düşük ÇY değerlerinde işletildiklerinde daha çabuk meydana gelmektedir. Çünkü bu düşük ÇY değerleri biyoreaktörde (eğer belirli bir MLSS konsantrasyonundan düşük bir konsantrasyona sahip ise) yüksek F/M oranına ve EPS oluşumuna sebep olur. Ancak aşırı yüksek ÇY değerleri ile MBR sistemlerinde yüksek çamur viskozitesi, yüksek biyokütle konsantrasyonu ve madde birikimi gerçekleşeceğinden ve bu şartlar da membran kirlenmesi meydana gelme olasılığını arttıracığından tercih edilmemektedir. Aynı zamanda bu yüksek çamur viskozitesi, yüksek biyokütle konsantrasyonu ve madde birikimi MBR sistemlerinde havalandırma verimini de düşürmektedir [30, 92].

Yüksek çamur yaşı MBR sistemlerindeki mikroorganizmaların mikrobiyal büyüme durumunu endojen faza geçirir. Çamur ne kadar yaşlı ise o kadar fazla oksijene ihtiyacı vardır. Mikroorganizmaların oto-oksidasyonu endojen fazda önemli ölçüde arttığından, çok daha fazla miktarda hava biyoreaktöre sağlanmalıdır. Membran kirlenmesi kontrolü için membran tanklarında zaten fazladan hava kullanıldığından bu ekstra hava ihtiyacı önemsizdir.

MBR sistemlerindeki yüksek ÇY işletme şartları için önemli bir konu da fosfor arıtımıdır. Çoğu biyolojik nütrient arıtımının yapıldığı membran biyoreaktör (BNR-MBR) sistemleri fosfor uzaklaştırma problemi ile karşılaşmaktadır. Fosfor, klasik aktif çamur sistemlerinin havalandırma tanklarında mikroorganizmalar tarafından çoğalma esnasında kullanılarak bünyelerine katılmaktadır. Daha sonra biyokütle içerisine geçmiş olan bu fosfor çamur atımı ile uzaklaştırılmaktadır. Ancak MBR sistemlerinde çamur atımı yüksek bir oranda olmadığından fosfor arıtımı da sınırlandırılmış olmaktadır. ÇY ne kadar büyük olursa, o kadar da az fosfor arıtılmış olur. Bu yüzden, çoğu MBR tesisinde fosfor arıtımı için ekstra ünitelerden faydalanılmaktadır [91].

2.3.4.3 Geri devir oranı, α

Geri devir oranı, son çöktürme tankından biyoreaktöre geri devrettirilen debinin (Q_r) giriş debisine (Q) oranı ($\alpha = Q_r/Q$) olarak tanımlanmaktadır. Geri devir oranı (α), klasik aktif çamur sistemlerinde geri devir çamurunun kontrolünde kullanılan çok önemli bir işletme parametresidir. Biyolojik atıksu arıtma tesislerinin işletilmesi esnasında genel olarak tesisin arıtım performansını kontrol edebilmek için α ve ÇY parametreleri kullanılır. Geri devir oranının değerleri tipik olarak 0,1 ile 0,4 arasında değişmektedir, yüksek α değerleri daha stabil bir biyolojik parçalanma sağlamasına karşın pompalama maliyetlerini arttırmaktadır. Batık MBR sistemlerinde çamurun geri devri gibi bir olay gerçekleşmediğinden geri devir oranından bahsedilemez. Ancak yan akışlı MBR sistemlerinde, havalandırma tankının dışında bulunan membran ünitesi aynı son çöktürme tankı gibi davranmaktadır (Şekil 2.17) [91]. Akış analizi bu analogiyi netleştirir. Eğer sMBR sisteminde çamur atımı gerçekleşiyorsa (Şekil 2.17b), havalandırma tankına geri devrettirilen debi $Q_c - Q_w$ olacaktır ve bu da klasik aktif çamur sistemlerindeki Q_r 'ye karşılık gelecektir. Böylece, sMBR sistemindeki $\alpha = (Q_c - Q_w)/Q$ olacaktır.

Eğer yan akışlı MBR sisteminde çamur atımı gerçekleşmiyorsa (örn: ÇY sonsuz ise Şekil 2.17c) havalandırma tankına geri dönen debi Q_c ve geri devir oranı da $\alpha = Q_c/Q$ olur.

Konvansiyonel membran filtrasyon işleyişinde “geri kazanım” (r), süzüntünün besleme debisine oranı ($r = Q_{\text{süzüntü}}/Q_{\text{besleme}}$) olarak tanımlanır. Şekil 2.17c'deki sadece membran ünitesi için geri kazanım, $r = Q/(Q + Q_c)$ olur. r ve α arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olur;

$$r = \frac{Q}{Q + Q_c} \quad (2.3)$$

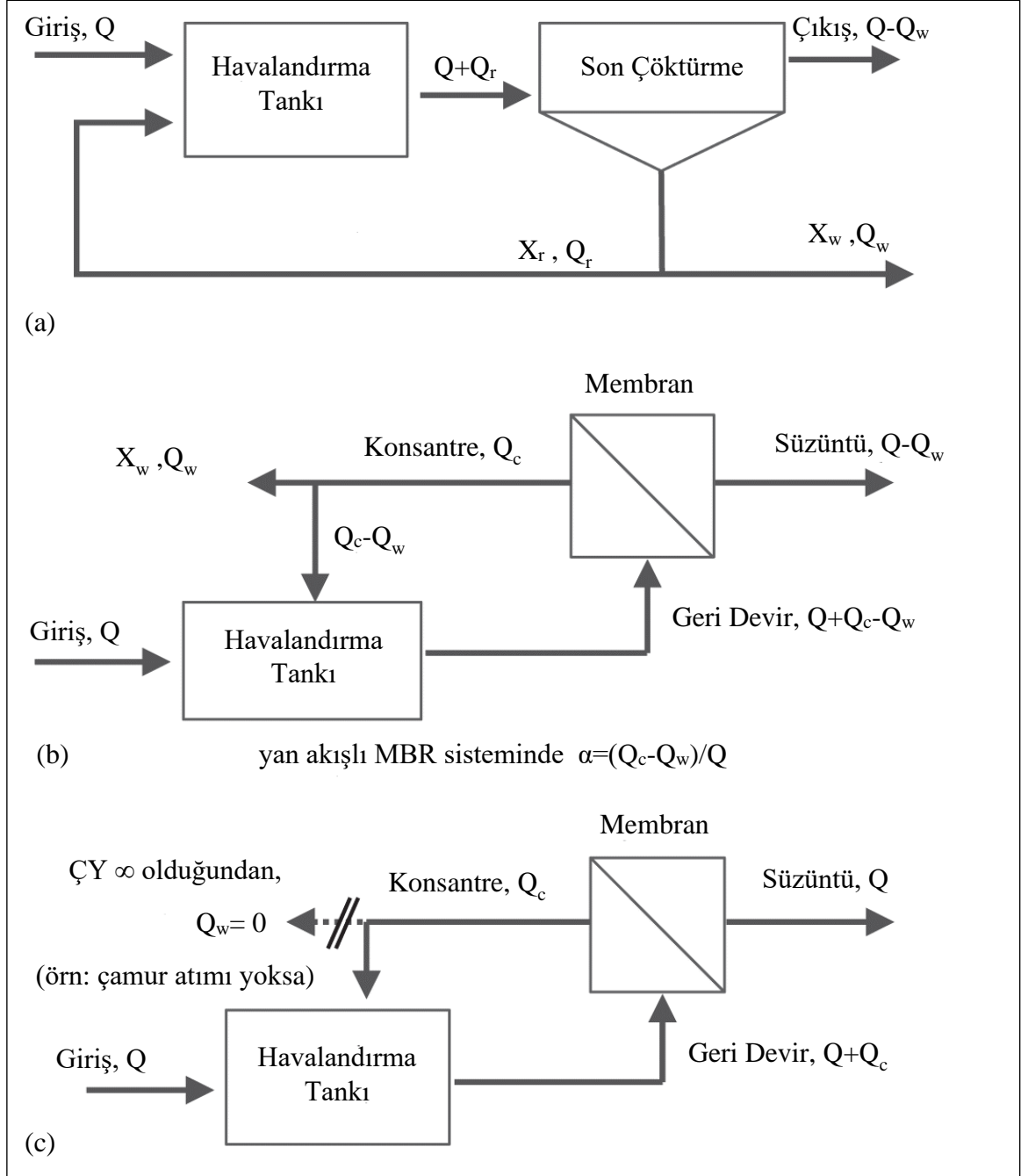
Her iki tarafın tersini alınır ve α yerine yazılırsa,

$$\frac{1}{r} = \frac{Q + Q_c}{Q} = 1 + \frac{Q_c}{Q} = 1 + \alpha \quad (2.4)$$

Yeniden düzenlendiğinde

$$r = \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2.5)$$

olur. Geri kazanım (r) ve α birbirlerine bu denklem kullanılarak çevrilebilir [91].



Şekil 2.17: Akış analizi: (a) Klasik aktif çamur sistemi, (b) yan akışlı MBR ve (c) sonsuz ÇY'li (çamur atımı olmayan) yan akışlı MBR sistemi [91]

2.3.4.4 Sıcaklık

Sıcaklık, kontrol edilemediğinden bir işletme parametresi olarak sınıflandırılmaz. Ancak mikrobiyal metabolizmayı etkilediğinden MBR sistemlerinin performanslarını etkileyen önemli bir etkidir. Klasik aktif çamur ve MBR sistemleri içerisinde bulunan biyokütle (MLSS) sıcaklık tarafından etkilenmektedir.

2.3.4.5 Akı (J)

Uygun bir akı miktarının seçilmesi membranın ömrü ve temizleme aralığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Akı, genellikle süzüntü akısı, birim membran alanından geçen madde miktarı olarak tanımlanır. Genellikle 10 ila 100 m³.m⁻².s⁻¹ arasında değişmektedir ve basit formülü aşağıdaki gibidir.

$$Akı (J) = \frac{\text{Süzüntü miktarı (m}^3/s\text{)}}{\text{Toplam membran yüzey alanı (m}^2\text{)}} \quad (2.6)$$

MLSS, sıcaklık, reaktördeki hava miktarı ve besin mikroorganizma oranı (F/M) akıyı etkileyen faktörlerdendir. Ayrıca, membran kirlenmesi miktarı akıya bağlıdır. Bu nedenle MBR sistemlerinde optimum akı ile membran kirlenmesi (fouling) kontrol edilebilir. Membran yüzeyinde oluşan kirlenme limit akıya ulaşıncaya kadar ihmal edilebilir. Kritik değer altındayken, akı TMB ile doğru orantılıdır.

2.3.4.6 Transmembran basıncı (TMB) ve kritik akı

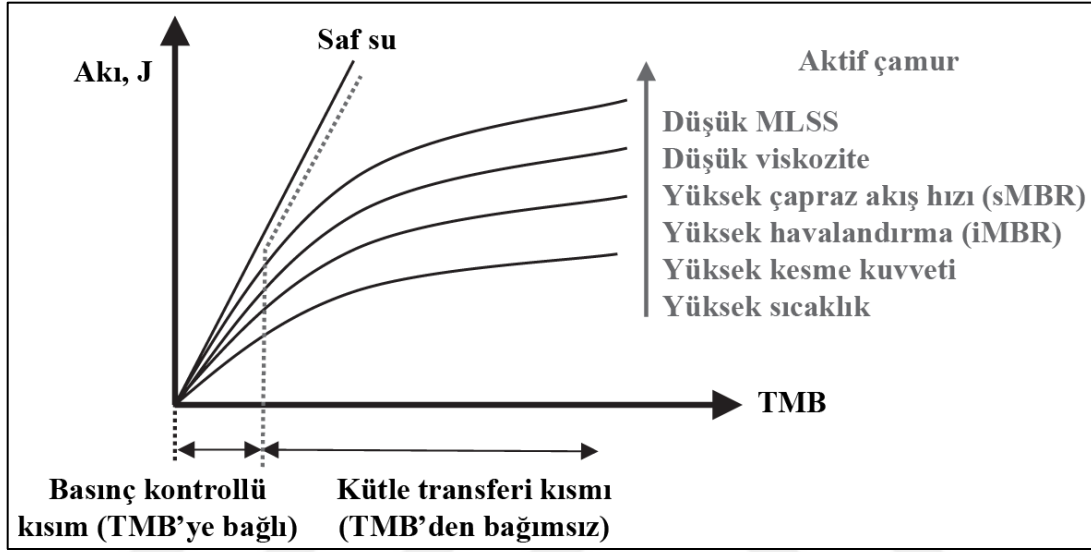
Sabit akı modunda çalışan bir batık MBR için en önemli parametre transmembran basıncıdır (TMB). TMB, konsantrenin basıncı ile süzüntünün basıncı arasındaki değişim olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta P_{TM} = \text{Statik basınç} - \text{Dinamik basınç} \quad (2.7)$$

TMB, membran modülündeki basınç kaybıdır ve membran kirlenme miktarını ölçmek için kullanılır. İşletme esnasında membran yüzeyinde artan bir madde miktarı vardır ve kirlenme de artmaktadır, bu da TMB artışına sebep olmaktadır. Bu şartlarda, kirlenme membran akısını azaltmakta ve transmembran basıncını arttırmaktadır [92].

Farklı konfigürasyondaki MBR sistemleri için TMB değerleri aşağıda belirtilmiştir [92]:

- Hollow-fiber (HF) membranlar için operasyonel TMB en azından 2,0 psi olmalıdır ama 10,0 psi aşmamalıdır.
- Düz tabaka (FS) membranlar için operasyonel TMB en azından 0,3 psi olmalıdır ama 3,0 psi aşmamalıdır.
- Tübüler membranlar için operasyonel TMB en azından 0,5 psi olmalıdır ama 5,0 psi aşmamalıdır.



Şekil 2.18: TMB ve akı arasındaki ilişki: basıncın kontrol ettiği bölge ve kütle transferinin kontrolünde olan bölge [91]

Aktif çamurun filtrasyonu esnasında TMB ve akı arasındaki ilişki Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Akı ve TMB saf suyun filtrasyonu esnasında, yani tıkanma ve kirlenme koşullarının olmadığı birbiri ile doğru orantılıdır. Bu basınç kontrollü bölgedir. Aktif çamurun filtrasyonu esnasında ise akı, TMB ile belirli bir TMP değerine ulaşıncaya kadar artırılabilir. Bu belirli TMB değeri aşılsa bile akı artışı düşecektir. Bu membranların kirlenmesi veya tıkanması ile alakalıdır. Çünkü burada akı kirleticilerin membran yüzeyinde oluşturduğu kek tabakasındaki kütle transferi ile sınırlandırılmıştır. Bu bölgeye ise kütle transferi kontrolünde olan bölge denir ve TMB'den bağımsızdır. Bu iki bölge arasındaki sınırı belirlemek çok zordur. Çünkü basınç birazcık artırılsa bile kütle transferinin kontrolünde olan bölgede de akı artacaktır. Membran yüzeyine aktif çamur içeriğindeki kirleticilerin taşınmasını etkileyen çok fazla faktör mevcuttur. Örneğin; düşük MLSS konsantrasyonu, düşük viskozite, yan akışlı membran biyoreaktör sistemlerindeki (sMBR) yüksek çapraz akış hızları, batık membran biyoreaktör sistemlerindeki (iMBR) yüksek

havalandırma miktarı (veya yüksek gaz sıyırma oranı) ve yüksek sıcaklık aktif çamurun kütle transferini arttıracak uygun koşullardır [91].

MBR sisteminin tasarımının ve işletmesinin başında kritik akı miktarını belirlemek çok önemlidir. Çünkü MBR sistemini kritik akı koşullarının altında işletmek stabil ve güvenilir bir işletme koşulunu membran kirlenmesini minimize ederek sağlar. Her ne kadar kritik akı, kirlenmenin oluşmadığı akı miktarı olarak tanımlansa da MBR sistemleri için bu doğru değildir.

2.3.4.7 Permeabilite (Geçirgenlik)

Permeabilite yani geçirgenlik, birim membran alanından birim zamanda ve birim transmembran basıncında geçen süzüntü miktarı olarak tanımlanabilir. Permeabilite membran performansının en önemli göstergelerinden birisidir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

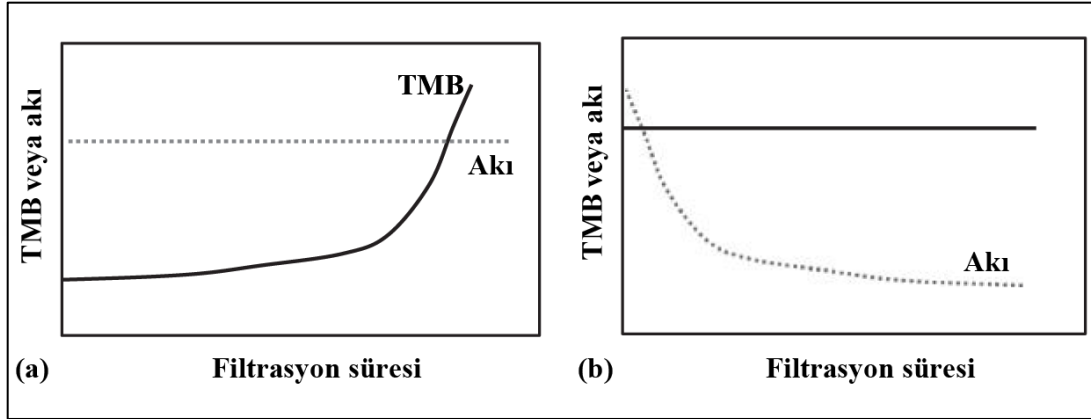
$$\text{Permeabilite } (m^3/m^2/s/Pa) = \frac{Akı (m^3/m^2/s)}{\Delta P (TMB)} \quad (2.8)$$

Nominal gözenek dağılımı mükemmel su geçirgenliğe sebep olur. Permeabilite sıcaklığa bağlı bir faktördür. Çünkü viskozite ve membranın koşulları sıcaklıkla değişmektedir. Maksimum akı değerinde permeabilite de en yüksek değerine ulaşacaktır. Membran porlarının tasarımı (boyut, şekil, vb.) ve dağılımı membranın kirlenmesi ve geçirgenliğini etkileyecektir.

2.3.5 Membran biyoreaktörlerdeki membran kirlenme mekanizmaları

Membran kirlenmesi ve tıkanması, su ve atıksu arıtımında membran ayırma proseslerinin uygulanmasındaki en temel sorundur. Diğer bütün sürücü kuvvetin basınç olduğu membran filtrasyon proseslerinde de olduğu gibi membran proseslerin doğası gereği karşılaşılan çeşitli problemler mevcuttur, ama membran biyoreaktörlerin esas sınırlayıcı basamağı membran kirlenmesidir. MBR sistemlerinin verimli işletilmesi, membran kirlenmesi ile nasıl baş edildiği ile alakalıdır. Giriş atıksuyunun kalitesi, membranların karakteristiği, biyoreaktörün işletme koşulları ve membran temizleme metotları membran kirlenmesi etkilemektedir.

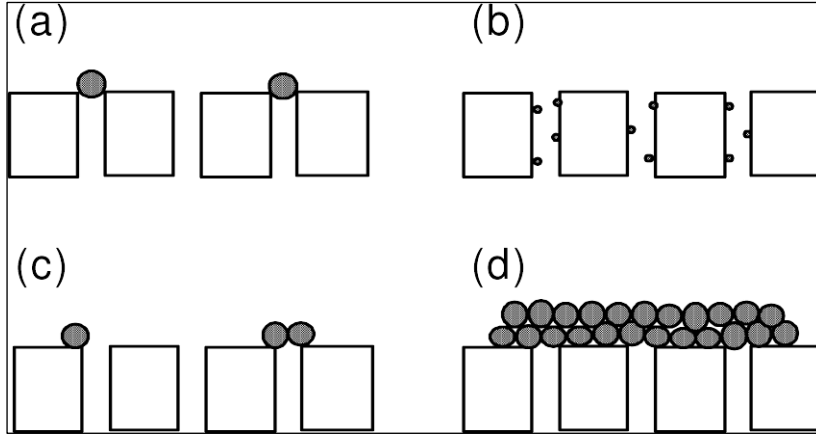
Membran kirlenmesi, membranın çalışma şekline (sabit akı veya sabit basınç) göre süzüntü akısındaki düşüş veya transmembran basıncındaki (TMB) artış olarak algılanabilir. Sabit akı işletiminde membran kirlenmesinin meydana geldiğini belirli bir akı miktarını alabilmek için TMP'yi arttırmak gerektiğinde anlayabiliriz. Sabit basınç işletiminde ise akının limit akı değerlerine ulaştıktan sonra daha da düşmeye başlaması ile membran kirlenmesinin oluştuğu anlaşılabilir.



Şekil 2.19: MBR sistemlerinde membran kirlenmesinin takibi için çalışma şekline göre kullanılan iki metod. (a) sabit akı ve (b) sabit basınç [91]

MBR sistemindeki membranların çalışma şekline göre kirlenme olayının tipik modeli Şekil 2.19'da görülmektedir. MBR sistemindeki membran kirlenmesinin algılanabilmesi için, sabit akı işletiminde TMB'nin, sabit basınç işletiminde ise akının işletme süresince dikkatlice takibinin yapılması gereklidir. Genellikle çoğu atıksu arıtma tesisi sabit akı işletiminde çalıştırıldığından, membran kirlenmesi TMB'nin zamanla değişimi gözlenerek anlaşılabilir. TMB'deki yavaş ve kademeli artışlar MBR sistemindeki membran kirlenmesinin ilk semptomlarıdır. MBR sisteminin işletilmesi esnasında uygun temizleme sağlansa bile, TMB'de kademeli artışı takip eden ani bir artış gözlemlenecektir. Membranlara uygun bir fizikokimyasal temizleme prosedürü uygulanması ani TMB artışının başlayacağı zamanı geciktirecektir [91].

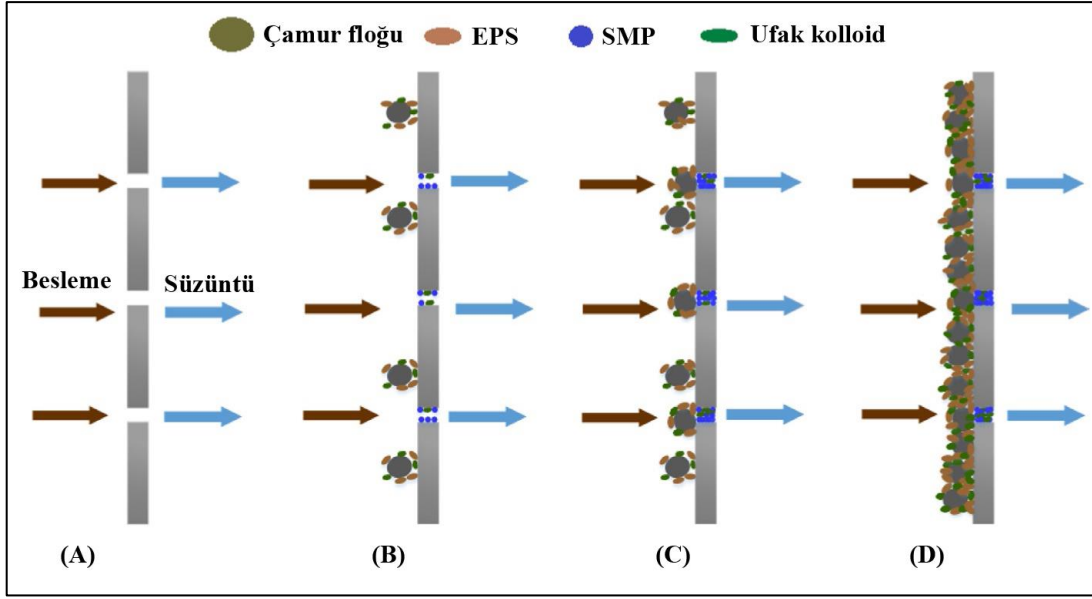
Membranların kirlenme mekanizmaları, membranın aktif por büyüklüğü ile çok alakalıdır. Dört temel membran kirlenme mekanizması mevcuttur. Bunlar; tam por tıkanması, porların içinin tıkanması, kısmi por tıkanması ve kek filtrasyonudur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: Membran kirlenme mekanizmaları. (a) tam, (b) iç, (c) kısmi por tıkanması ve (d) kek filtrasyonu [86]

Tam por tıkanması, membranın por büyüklüğünden daha büyük partiküllerin membranın porlarını tam olarak tıkanması sonucu oluşur. Bu, filtrasyon ve süzme için kullanılan aktif mevcut membran yüzey alanını azaltmaktadır. Membran porlarının içinin tıkanması esnasında membranın por büyüklüğünden daha küçük partiküller membranın porlarının içerisine tutunurlar veya yerleşirler. Membranın por büyüklüklerinin azalması sonucu membran direnci artmaktadır. Bu da süzünü akımını sınırlandırmaktadır. Membran yüzeyindeki partiküllerin kısmi olarak membranın porlarını tıkanması sonucu membran yüzey alanı azalmaktadır. Membran yüzeyindeki partiküllerin bir kek tabakası oluşturması, partiküllerin membran porlarının içerisine girmeden ve porları tamamen tıkamadan olur [86]. Porların daralması, porların tıkanması ve kek oluşumu membran kirlenmesinin oluşum basamaklarıdır (Şekil 2.21) [92].

Membran kirlenmesi mikroorganizmanın kendisinden kaynaklanabileceği gibi, metabolik ürünlerinden veya giriş akımı içerisindeki materyaller ile olan etkileşimi sonucu da olabilir. Membran kirlenmesi, kirlenmeyi oluşturan kirleticilerin kaynağına göre de sınıflandırılabilir: biyolojik kirlenme (biyofouling), organik kirlenme ve inorganik kirlenme. MBR sistemlerindeki biyolojik kirlenme, organik kimyasalların, mikroorganizmaların ve mikrobiyal toplulukların membran yüzeyinde birikmesi sonucu oluşur. Bakteriler herhangi bir yüzeye (doğal veya sentetik) uygun tutunma mekanizmalarını geliştireceğinden, her türlü yüzey üzerinde biyofilm oluşacaktır. Membranların biyolojik kirlenmesi iki basamaklı bir proses olarak düşünülebilir. Bakteriyel biyokütlein membran yüzeyine tutunması ile başlayan bu proses, bakterinin çoğalması ve büyümesi ile devam etmektedir.



Şekil 2.21: MBR sistemlerinde membran kirlenmesinin sınıflandırılması: (A) yeni membran, (B) por daralması, (C) porların tıkanması ve (D) kek oluşumu [92]

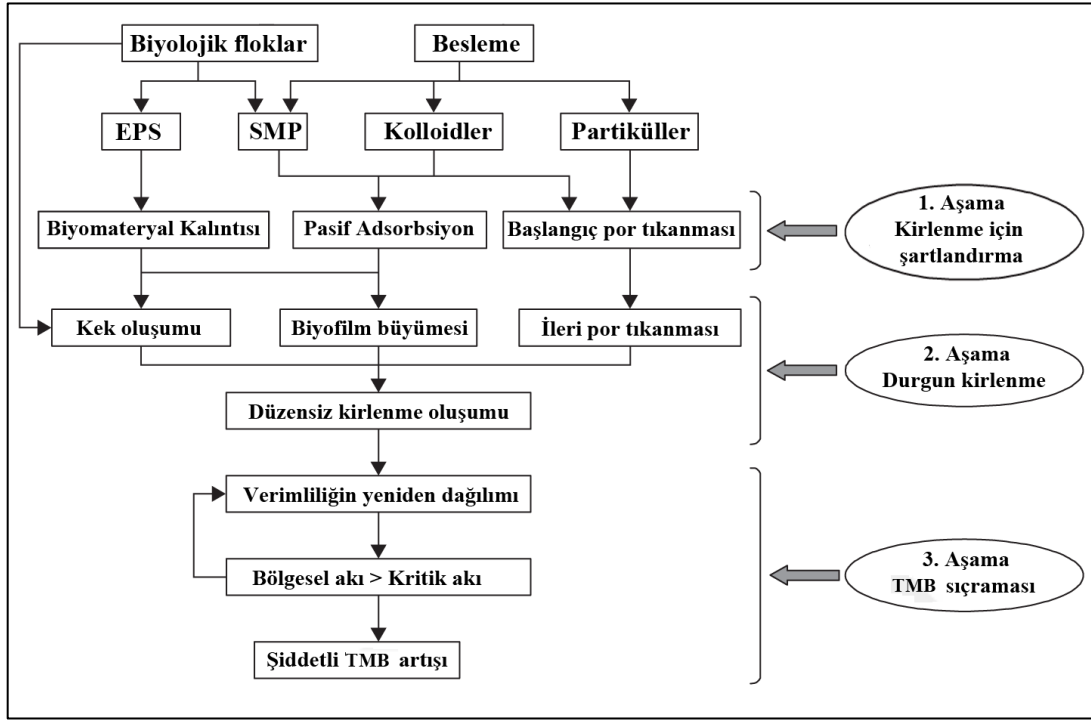
Çözülmüş organik maddelerin membran yüzeyine veya porlarına, moleküller arası etkileşimler sonucu adsorbsiyonu ise organik kirlenme olarak tanımlanabilir. Bu kirleticiler, bakterilerin metabolik ürünleri içerisinde olan hücre dışı polimerik maddelerdir (EPS). EPS'lerin temelini oluşturan polisakkaritler ve proteinler organik kirlenmeye sebep olmaktadır. İnorganik kirlenmeye ise az çözünür mineral tuzların doygunluk seviyesini aşması sonucu çökmesi sebep olmaktadır. Bu maddelere örnek olarak Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^- , OH^- vb. anyonlar ve kationlar verilebilir. Silika tabanlı membranlardaki inorganik kirlenmede kristalleşme ve partiküler kirlenme önemli mekanizmalardır. Çözeltideki iyonların çökmesi kristalleşme ile ve kolloidlerin konvektif olarak membran yüzeyine taşınması ise partiküler kirlenme ile ilişkilidir [92].

Membran kirlenmesi üç aşamada anlatılacak olursa (Şekil 2.22) [58];

1. Aşama – Kirlilik şartlanması: EPS/SMP ve membran yüzeyi arasındaki güçlü etkileşimlerden meydana gelmektedir. Bu aşamada hızlı bir tersinir tıkanma olur ve partikül birikimi öncesinde bile kolloidlerin ve organiklerin pasif adsorbsiyonu gözlemlenir.

2. Aşama – Yavaş/durağan kirlenme: Birinci aşamadan sonra membran yüzeyinin çoğunlukla SMP ile kaplanması beklenir. Bu da partikül ve koloidal biyokütle materyalinin bağlanmasını destekler. Adsorbsiyon sadece membran porlarında değil bütün membran yüzeyi boyunca oluşabildiği için biyolojik floklar bu ilk basamakta direkt olarak akıyı etkilemeksizin kek oluşumunu başlatabilirler. Fakat zamanla kısmi veya tam por tıkanması

oluşmaktadır. EPS tutunma hızı ve bunun sonucundaki TMB artışı sonrasında ise 2. aşamanın kısa sürmesine yol açan akı sebebiyle artış beklenebilmektedir. Yeterli kesme kuvveti sağlanan uygun hidrodinamik şartlarda dahi membran kirlenmesi oluşabilmektedir. Ancak iMBR sistemlerinde sıvı ve hava akımlarının düzensiz dağılımı söz konusudur ve homojen olmayan kirlenme oluşmaktadır.



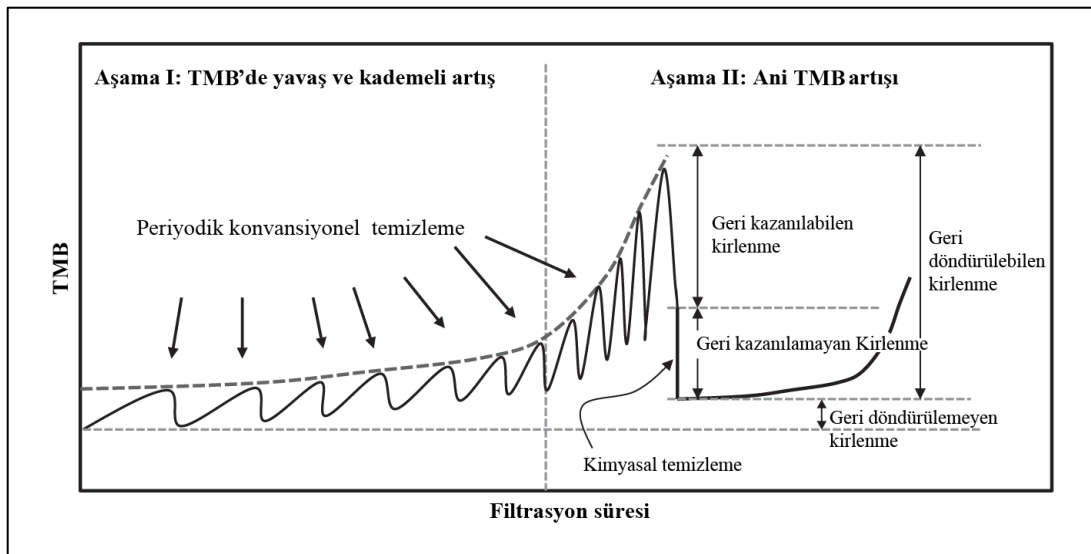
Şekil 2.22: Sabit akı işletimi için MBR kirlenme mekanizmaları [58, 93].

3. Aşama – TMB sıçraması: Membranın spesifik bölgelerinin diğer bölgelerine oranla daha fazla kirlenmesi sonucu, bu spesifik bölgelerde geçirgenlik ciddi bir ölçüde azalmaktadır. Bunun sonucunda membranın daha az kirli olan bölgelerinde süzüntü akımı artmakta ve kritik akı bu bölgelerde aşılmaktadır. Bu koşullarda kirlenme hızı akı ile katlanarak artar. TMB’deki ani artış (TMB sıçraması) sabit akı işletiminin bir sonucudur (Şekil 2.19a). Klasik membran kirlenme mekanizmalarında olduğu gibi TMB sıçrama koşullarına ulaşan bir MBR sistemi üzerinde birçok mekanizma geçerli olacaktır ve bu mekanizmaları açıklamak için farklı modeller kullanılabilir. Bu modelleri kısaca açıklayacak olursak;

- *Homojen olmayan kirlenme (alan kaybı) modeli:* TMB sıçraması, EPS ile yavaş kirlenmeye bağlı olarak membran boyunca çeşitli noktalarda ölçülen bölgesel

geçirgenlik kaybıyla eş zamanlıdır. Akının yeniden dağılımı sonucunda kritik-altı akıya sahip bölgeler oluşur ve membran kirlenme hızı artar.

- *Homojen olmayan kirlenme (gözenek kaybı) modeli:* TMB sıçraması, EPS ile yavaş kirlenmeye bağlı olarak membran boyunca çeşitli noktalarda ölçülen bölgesel geçirgenlik kaybıyla eş zamanlıdır. Bölgesel gözenek hızları kritik akı değerlerini aştığında, porların tıkanma hızı artacaktır ve por tıkanması meydana gelecektir. “Alan kaybı” modeli akının makroskobik yeniden dağılımını, “por kaybı” modeli ise akının mikroskobik ölçekte dağılımını açıklamaktadır. MBR sistemlerinde her iki mekanizma da eş zamanlı olarak oluşmaktadır.
- *Kritik emme basınç modeli:* Genelde klasik filtrasyon sistemlerinde gözlemlenen bu model çapraz akışlı sistemlerde gözlemlenmez. Ancak membran yüzeyinde oluşan kirlilik birikiminin artması sonucu daha sızdırmaz bir tabaka oluşacağından bu model kritik emme basıncına ulaşana kadar kirlenmenin sürdüğü herhangi bir membran sistemi için de uygulanabilmektedir.
- *Sızma teorisi:* Sızma teorisine göre, kirlenme tabakasının porozitesi sürekli filtrasyona ve birikim tabakasının madde tutulmasına bağlı olarak gittikçe azalmaktadır. Kritik bir koşulda, kirlenmenin oluşturduğu kek, bütünlüğünü ve direncini kaybetmekte, bu da TMB’de hızlı bir artışa sebep olmaktadır. Bu model MBR sistemlerinin kirlenmesini açıklamak için tasarlanmıştır. MBR işletimi esnasında görülen kek sıkışmasını başarıyla açıklamaktadır.



Şekil 2.23: Membran kirlenme sınıflandırmasına göre TMB profili [91]

Membran kirlenmesinin sınıflandırılmasının en basit ve kolay yolu basit bir temizleme operasyonu ile akının geri kazanımının değerlendirilmesidir. Bu sınıflandırma kriterine göre membran kirlenmesi geri döndürülebilir (reversible), geri döndürülemeyen (irreversible) ve geri kazanılamayan (irrecoverable) kirlenme olarak üç farklı şekilde isimlendirilir. Bu sınıflandırma, konvansiyonel temizleme basamaklarından sonra akı geri kazanımı temeline dayanmaktadır (Tablo 2.11). Geri yıkama, basınç azaltımı ve hava ile sıyırma gibi basit ve temel temizleme prosedürlerinden sonra akı geri kazanımı gerçekleşiyorsa bu kirlenmeye geri döndürülebilir kirlenme denir. Eğer bu basit temizleme prosedürleri sonucu değil de kimyasal temizleme prosedürü sonucu akı geri kazanımı oluyorsa geri kazanılamayan kirlenme meydana gelmiştir. Uygulanan temizleme prosedürlerinden sonra hiç akı geri kazanımı gerçekleşmiyorsa bu kirlenmeye de geri döndürülemeyen kirlenme denir [91]. Bunlar arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

$$\begin{aligned}\text{Toplam kirlenme} &= \text{geri döndürülebilir} + \text{geri döndürülemeyen} \\ &= \text{geri kazanılabilir} + \text{geri kazanılamayan} + \text{geri döndürülemeyen}\end{aligned}$$

2.3.6 Membran biyoreaktörlerde kirlenme kontrolü

MBR sistemlerinin işletilmesi ve bakımı esnasındaki en önemli basamak membran temizliğidir. Eğer membranlar gerektiği gibi temizlenmez ise bütün arıtma tesisi zarar görecektir ve eninde sonunda çalışamaz hale gelecektir. Bu sebeple membran temizlik prosedürleri ve stratejileri, daha tesis/sistem tasarımı esnasında göz önünde bulundurulmalı ve tasarıma buna göre devam edilmelidir. Farklı birçok membran konfigürasyonu olmasına rağmen, batık membran konfigürasyonu (iMBR) temizleme mekanizmasının kolaylığı ve basitliği yüzünden MBR sistemlerinde daha fazla tercih edilmektedir [92].

Çok farklı membran temizleme prosedürleri bulunmaktadır. Bir sistem için tam olarak uygun prosedür seçimi, giriş atıksuyunun karakterizasyonuna, membranın tipine ve sistemin tasarımına bağlıdır. Çoğu MBR sisteminde kirlenmenin kontrolü için kullanılan standart işletme stratejileri aşağıdaki gibidir:

- Hava/gaz ile sıyırma
- Fiziksel temizleme teknikleri
- Kimyasal temizleme teknikleri

Tablo 2.11: MBR sistemlerindeki membran kirlenmesinin sınıflandırılması [91]

Kirlenme sınıfının tanımlama kriteri	Kirlenme olayı	Açıklama
Temizleme sonrası akı geri kazanımı	Geri döndürülebilir kirlenme	Basit veya kimyasal temizleme sonrası akı geri kazanılır.
	Geri döndürülemez kirlenme	Hiçbir temizleme metodu ile akı geri kazanılamaz.
	Geri kazanılabilir kirlenme	Geri yıkama veya basınç değişimi gibi basit temizleme ile akı geri kazanılır.
	Geri kazanılamayan kirlenme	Sadece kimyasal temizleme ile akı geri kazanımı olur.
Kirlenmenin olduğu yer	Tıkanma	Modülünün içerisindeki hollow fiberler arasında ve tabaka kanallarında çamur birikir.
	Kek tabakası birikimi	Membran yüzeyinde çamur birikir.
	Porların iç kirlenmesi	Membranın por büyüklüğünden daha küçük çözümler membran porlarının iç duvarlarına tutunur (adsorblanır).
Katıların birikim şekli	Kek tabakası oluşumu	Membran yüzeyinde katman oluşur.
	Por daralması	Porların iç duvarına tutunmuş olan maddelerden dolayı por büyüklüğünü azalır.
	Por tıkanması	Porların girişini veya içini partikül tıkar.
Çözümlerden kaynaklı	Konsantrasyon polarizasyonu	Çözümler maddeler membran yüzeyinde konsantrasyon gradyanı oluşturur.
	Jel katmanı oluşumu	Çözümler ve aynı zamanda katılar membran yüzeyinde konsolide olur.
Kirlenme olmayan	Sıkışma	Uygulanan basınçtan dolayı membran yapısı ezilir (sıkışır).

MBR sistemlerinde genellikle hava/gaz membranların altından sisteme verilir ve yükselen hava kabarcıkları membran yüzeyinde bir kesme kuvveti oluşturarak kek tabakasını temizler ve konsantrasyon polarizasyonunu engeller. Bu prosedür aerobik MBR sistemlerinde zaten

gerekli olan oksijeni de ortama taşımaktadır. Anaerobik MBR sistemlerinde ise genelde üretilen biyogazın bir kısmı reaktörün altından sisteme geri devrettirilerek membran yüzeyinde kesme kuvveti oluşturulur. Havanın/gazın debisi kontrol edilerek sıyırma ile elde edilen verim ayarlanabilmektedir. MBR sistemlerinin karakteristiğinden dolayı hava/gaz ile sıyırma sadece membran kirlenmesini yavaşlatmaktadır.

Tablo 2.12: MBR sistemlerinde kirlenme kontrol teknikleri [91]

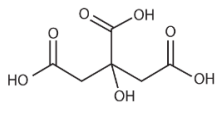
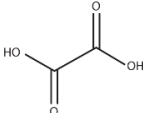
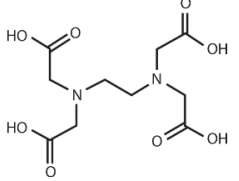

Membran Kirlenmesi Kontrol Stratejisi	Kirlenme Kontrolü Metodu	Temizleme Tekniğinin Sınıfı
Direkt membran temizliği	Kimyasallar	
	• Asit/baz, ozon, H ₂ O ₂ , NaOCl, PAC	Kimyasal
	• Kirlenme azaltıcı (polielektrolitler)	Kimyasal
	Havalandırma/kesikli havalandırma	Fiziksel
	İki fazlı akış	Fiziksel
	Geri yıkama	Fiziksel
	Kimyasal eklenmiş geri yıkama	Fiziksel+Kimyasal
Kirlenmeyi önleme	Giriş akımının ön arıtımı	Fiziksel
	Kritik akıda işletme	Fiziksel
	HKS, ÇY, F/M, ÇO ve MLSS kontrolü	Biyolojik
	Kirlenmeyen membran geliştirilmesi	Membran/modül
	Kirlenmeyen modül geliştirilmesi	Membran/modül
	Kesme (dönen disk, helezonik membran, vb.)	Membran/modül
	Quorum quenching	Kimyasal/biyolojik
	Nitrik oksit	Kimyasal/biyolojik

Fiziksel temizleme prosedürleri ile membranlardan akı geri kazanımı oldukça fazla olmaktadır. Temel olarak fiziksel temizleme operasyonları basit operasyonlardır. Genel olarak iki şekilde uygulanmaktadır. Birincisi basınç değişimidir. MBR sistemlerinde emme basıncı azaltılır, bu da membran yüzeyinde bir rahatlamaya sebep olur. Böylelikle mevcut olan kesme kuvvetleri membran yüzeyini kaplamış olan kirleticileri yeniden biyoreaktör içeriğine karıştırır. Diğer fiziksel temizleme tekniği ise geri yıkamadır. Geri yıkamada,

genellikle süzüntü, temiz su veya hava membranda ters bir akım oluşturarak gözenekler içerisindeki ve membran yüzeyindeki kirleticiler yeniden biyoreaktör içeriğine karıştırır.

Fiziksel temizleme prosedürleri ile istenilen akı değerleri geri kazanılamamış ise membran kimyasal temizlemeye ihtiyaç duyulacak kadar kirlenmiş demektir. Kimyasal temizleme membran modülleri MBR sisteminden sökülerek başka bir tankta yapılabileceği gibi eğer uygun şartlar sağlanırsa (havalandırma tankı tamamen boşaltılırsa) yerinde de yapılabilmektedir. Kimyasal temizleme prosedüründe membranlar temizleme reaktiflerinin bulunduğu bir tank içerisinde membran tipine, cinsine uygun prosedürler izlenerek temizlenmektedir. Kimyasal temizleme tekniklerinde kullanılan genel kimyasallar ve sınıflandırılmaları Tablo 2.13'te verilmiştir.

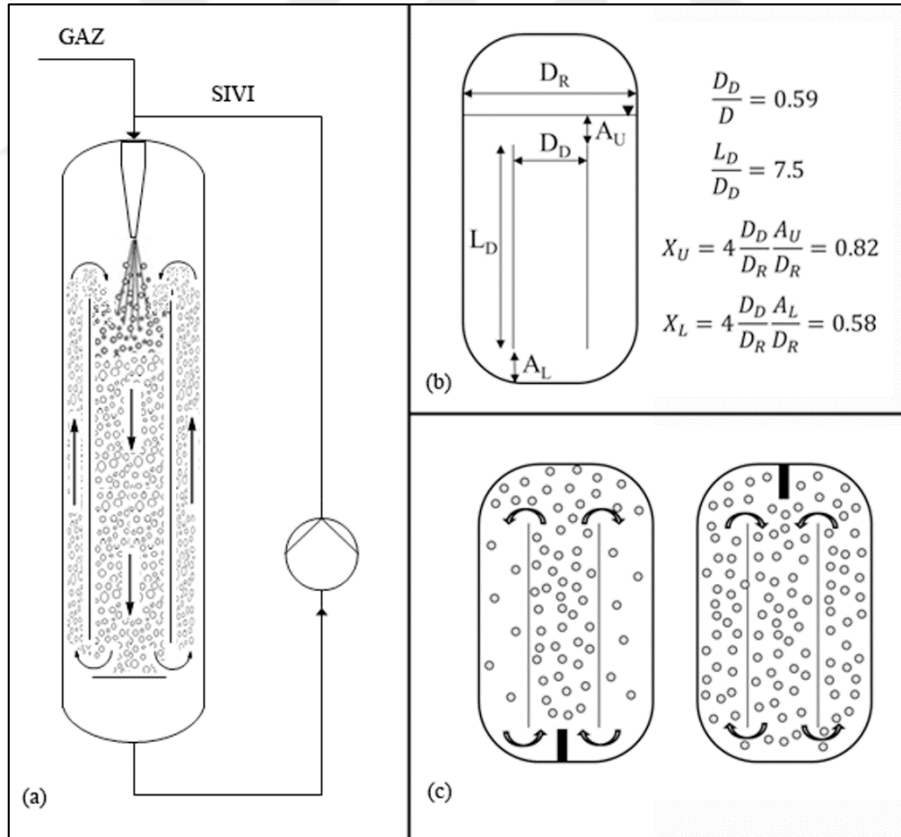
Tablo 2.13: MBR sistemlerinde membran temizliğinde kullanılan genel kimyasallar [91]

Kategori	Kimyasalın adı	Formülü	Molekül ağırlığı	Kimyasal yapısı
Oksitleyiciler	Sodyum hipoklorür	NaOCl	74,5	
	Kalsiyum hipoklorür	Ca(OCl) ₂	143,0	
	Ozon	O ₃	48,0	
	Hidrojen peroksit	H ₂ O ₂	34,0	
İnorganik asitler	Sülfürik asit	H ₂ SO ₄	98,0	
	Hidroklorik asit	HCl	36,5	
Organik asitler	Sitrik asit (2-hidroksiipropen-1,2,3-trikarboksilik asit)	C ₆ H ₈ O ₇	192,1	
	Oksalik asit (etandioik asit)	H ₂ C ₂ O ₄	90,0	
	EDTA	(HO ₂ CCH ₂) ₂ NCH ₂ CH ₂ N(CH ₂ CO ₂ H) ₂	292,4	
Sümfaktan	Sodyum dodesil sülfat (SDS)	CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OSO ₃ Na	288,4	
Enzim	Proteaz, hidrolaz, glikolitik enzim			
PAC	Toz aktif karbon	C		

2.4 Jet Loop Reaktörler (JLRs)

Jet loop reaktörler (JLRs), kabarcık kolon reaktörlerinin bir draft tüpü ile iki bölgeye ayrılarak ve akımın bir nozzle ile reaktöre girdiği modifikasyonudur. JLRs endüstriyel prosesler için kullanılan çok verimli ekipmanlardır. Özellikle yüksek askıda katı madde konsantrasyonlarına sahip olan atıksu arıtımı, aerobik fermantasyon, ilaç sanayi gibi endüstrilerde kullanılmaktadır.

JLRs karıştırma reaksiyon karışımının bir boru aracılığı ile reaktörün içerisine pompalanması ile sağlanır (Şekil 2.24a). Gaz reaktiflerin sıvı faz içerisinde çözünmesini gerektiren veya karışmayan iki sıvı fazın birbiri ile karıştırılmasını gerektiren iki aşamalı reaksiyonlar için çok önemli ekipmanlardır. Reaktif gaz ve sıvı faz karışımının bir nozzle içerisinden geçirilmesi gaz fazın sıvı faz içerisinde çözünmesini sağlar. JLRs, enerji dezavantajının olmadığı üstün karıştırma karakteristiklerine sahiptirler. Bu sebeple de gaz-sıvı reaksiyonları için uygundur [94].



Şekil 2.24: (a) Jet loop reaktör [94], (b) JLRs’de reaktör çapının (D_R), draft tüpünün çapının (D_D), draft tüpünün boyunun (L_D), draft tüpünün reaktörün üstüne ve altına olan mesafesinin (A_U , A_L) optimum geometrik oranları ve saptırma alanlarının hesabı (X_U , X_L), (c) nozzle konumuna göre gaz dağılımı [95]

Bu aşırı yüksek karışım kapasitesi reaktör hacmini minimize ederken, reaktörün verimini de maksimize etmektedir. Gaz-sıvı karışımları için akımın yukarıdan aşağıya doğru olması gaz fazın reaktör içerisindeki kalış süresini arttırdığından avantaj sağlamaktadır. JLRs'in kütle transfer kapasitesi yüksek oranda gaz-sıvı arakesit alanına bağlıdır. Jet akıştan dolayı gaz fazın kabarcıkların boyutu küçüldüğünden gaz-sıvı arakesit alanı artmaktadır. Boyutu küçülen bu kabarcıklar reaktörün içerisindeki akış dinamikleri gereği draft tüpü etrafında bir loop içerisinde olurlar. Bu da gaz fazın reaktör içerisinde kalış süresini arttırmaktadır. Gaz-sıvı karışımları için reaktör girişinin (nozzle) yukarıdan olması ve akışın yukarıdan aşağıya doğru draft tüpünün içerisinden reaktörün altında bulunan çarpma plakasına doğru olması, gaz fazın reaktörün içerisinde kalış süresini arttırdığından daha avantajlıdır.

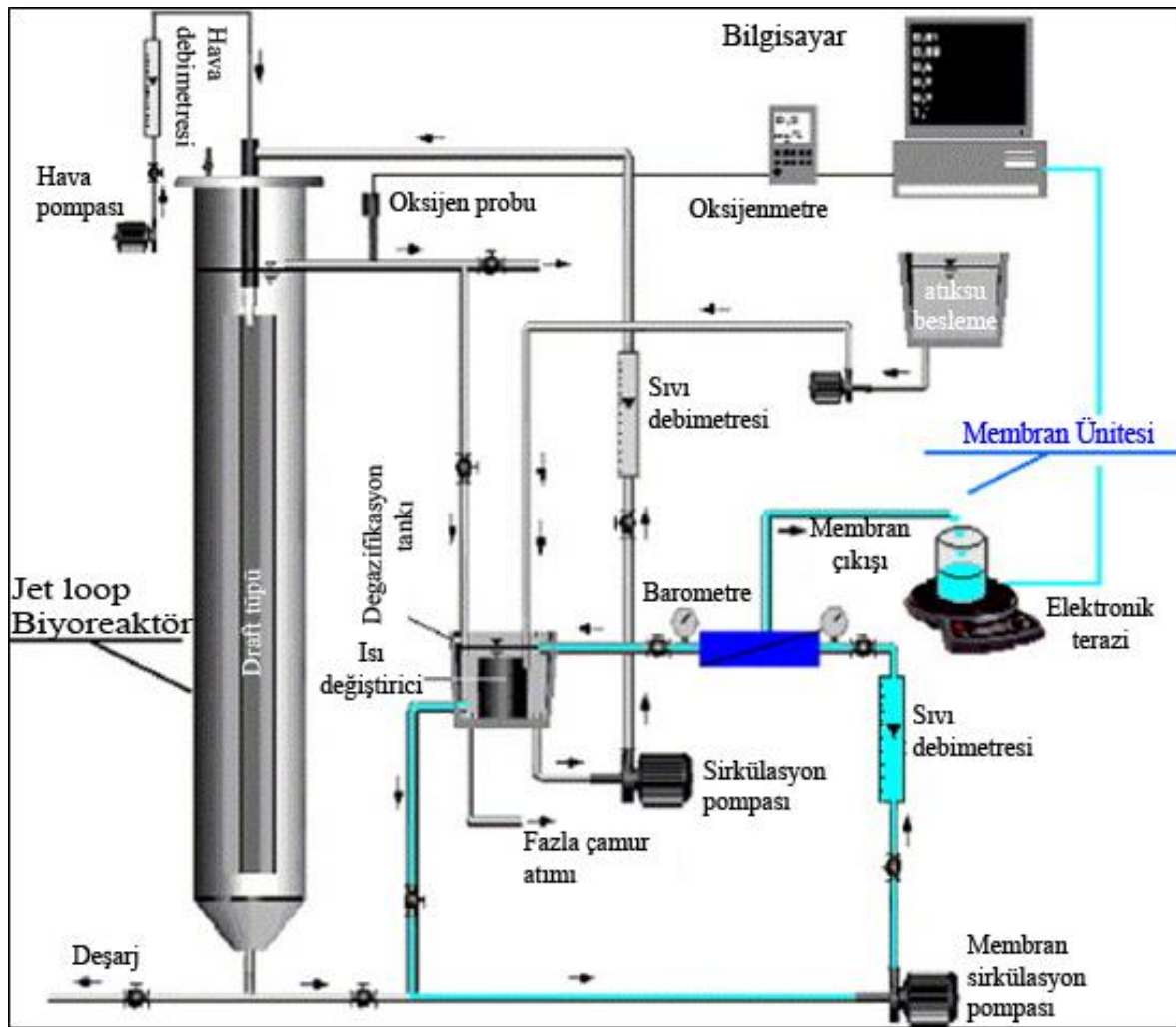
Büyük ölçekli uygulamalarda JLRs tasarımları gereği önemli avantajlar sağlamaktadırlar. Yüksek verimdeki kütle transfer kapasiteleri, basit ve sağlam tasarımları atıksu arıtımında kullanımları için cazip reaktörler haline getirmektedir. Diğer reaktör tiplerine göre karıştırma için enerji aktarımı karıştırma ekipmanların mekanik dayanımları ile sınırlandırılmamaktadır. İhtiyaç duyulan enerji aktarımı için sıvı pompa sayısının ve/veya kapasitesinin, oluşan ısının uzaklaştırılması için de ısı değiştiricilerin sayısının ve kapasitesinin artırılması yeterlidir. 2-3 kg O₂.kW⁻¹.m⁻³ miktarlarında yüksek oksijen transfer verimine ulaşmak mümkündür [95].

2.4.1 Jet loop biyoreaktörler (JLB)

Her ne kadar JLRs yüksek verimli kütle transfer performansları ile bilinseler de mikroorganizmaların yetiştirilmesi ile ilgili literatürde çok az bilgi bulunmaktadır. JLRs mayaların yetiştirilmesi için de kullanılmıştır. *Kluyveromyces fragilis*, *Endomycopsis lipolytica*, *C. utilis* ve *Trichosporon cutaneum* gibi mikroorganizmaların ve *Thermomonospora sp.* ve *Streptomyces tendae* gibi filamentli bakterilerin yetiştirilmesinde umut verici sonuçlar elde edilmiştir [95]. Ancak Çevre Mühendisliği uygulamalarında, özellikle de atıksuların arıtım uygulamalarında reaktör içeriği olarak aktif çamur kullanılmaktadır. Endüstriyel atıksuların aerobik ortamlarda arıtımının incelendiği çeşitli çalışmalarda, JLRs içerisine aktif çamur konulmuş ve gayet yüksek verimlerde arıtım sağlanmıştır [8, 9, 69, 81, 82, 96, 97, 98, 99]. JLRs içerisinde biyolojik faaliyetlerin (atıksu arıtımı, mikroorganizmaların yetiştirilmesi, vb.) yapıldığı reaktör tiplerine Jet loop biyoreaktörler (JLB) denir.

2.4.2 Jet loop membran biyoreaktörler (JLMBR)

Jet loop biyoreaktörlerin reaktör içeriği kesme kuvvetlerinin büyüklüğünden dolayı çökeltme özelliği az olan bir çamurdur. Bu sebeple hem çıkış suyu kalitesini arttırmak hem de reaktör içeriğini çıkış akımından ayırmak amacı ile genellikle JLB membran modülleri entegre edilmektedir [8, 81, 82]. Bu entegrasyon reaktör içerisinde olabileceği gibi reaktörün dışarısında da olabilmektedir [69, 81]. JLB membran entegre edilerek kullanılan reaktör tiplerine Jet loop membran biyoreaktörler (JLMBR) denmektedir [82]. Şekil 2.25'te yan akışlı bir JLMBR şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.25: JLMBR deney sisteminin akım şeması [82]

2.5 Çalışmanın Amacı

Yapılmış olan bu çalışma ile ayırma teknikleri ve reaktör mühendisliği alanlarındaki teknolojik gelişmeler ışığında endüstriyel atıksular için membran proseslerindeki düşük akı, yüksek maliyet ve işletim zorluklarının üstesinden gelebilecek yeni nesil arıtma

proseslerinin ve membran biyoreaktörlerin geliştirilerek, modüllerin biyoreaktörlere entegrasyonunun sağlanması ve bu sayede atıksu arıtma verimi ve performansının artırılması hedeflenmiştir. Böylece, su tüketimi yüksek olan gıda endüstrilerine ait atıksuların yenilikçi bütünleşik arıtma sistemi ile arıtılması sağlanarak; yeniden kullanılabilir arıtılmış su elde edilecektir. Bunun neticesinde su tüketimleri azaltılarak temiz su kaynaklarının korunması, konsantrasyon yönetimi çerçevesinde çevrenin sürdürülebilir nitelikte kullanılmasına katkı sağlanması, aynı zamanda da ekonomik olarak sahada uygulanabilir teknolojik esaslı bir endüstriyel seçeneğin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.



3. YÖNTEM

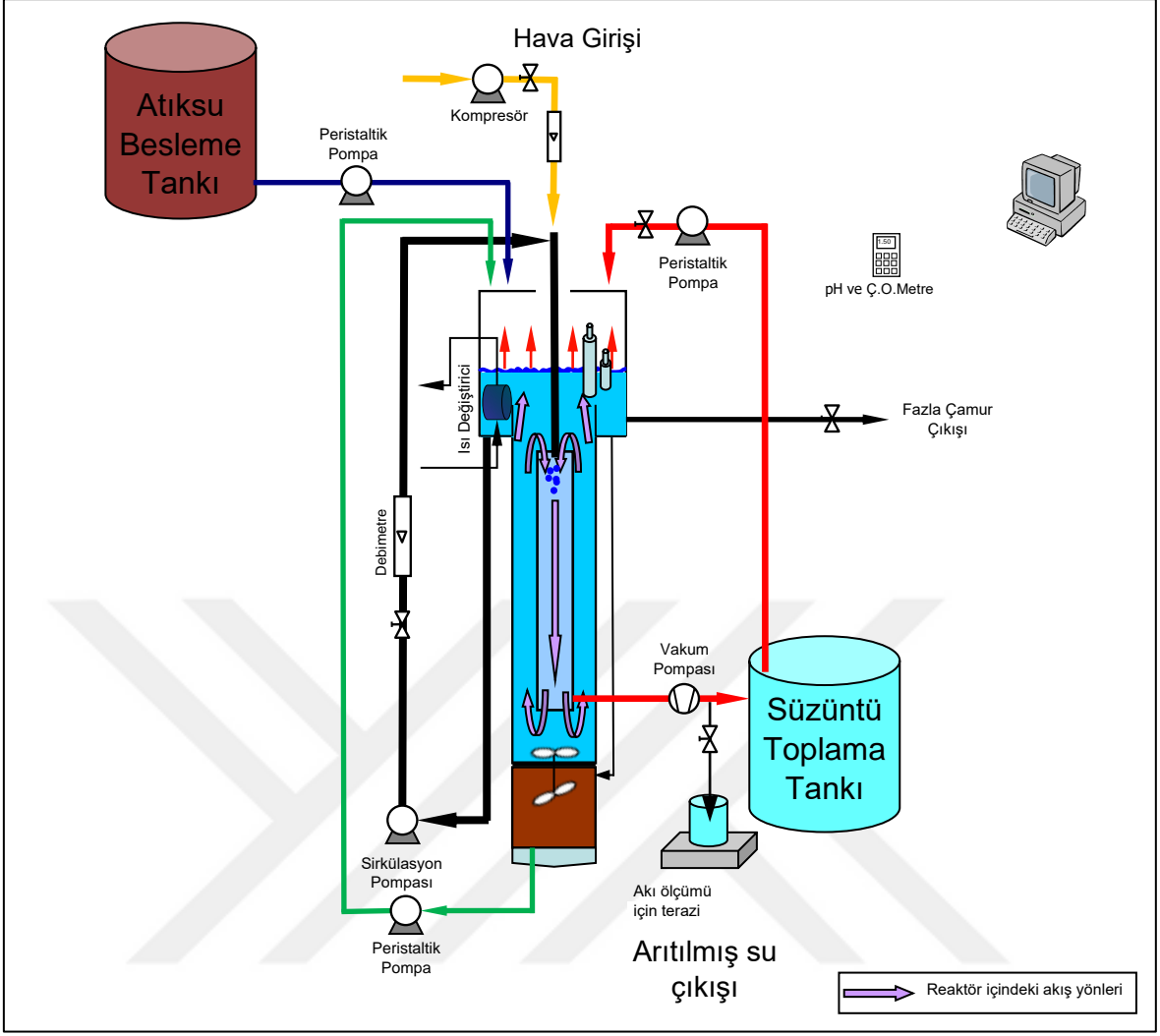
3.1 Deney sistemi

Bu çalışmada su tüketimi fazla olan ve yüksek organik kirliliğe sahip mezbaha endüstrisi atıksuların arıtımı için entegre bir arıtma sisteminin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Yüksek Hızlı Kompakt Reaktör'e (YHKR) membran ünitesi emme tüpü şeklinde dizayn edilerek çift fonksiyonlu (emme tüpü-ayırma) olarak modifiye edilip sadeleştirilmiş ve geliştirilerek yeni bir reaktör topolojisi ortaya konulmuştur. Yine reaktörde anaerobik/anoksik bir bölge oluşturarak daha komplike organik madde içeriği olan atıksuların tek bir reaktör içerisinde arıtılması hedeflenmiştir. Reaktörde meydana getirilen jet ile hem membran yüzeyinin kirlenmesinin engellenmesi hem de anaerobik/anoksik bölgenin karıştırılması ile enerji tasarrufu da sağlanması hedeflerden bir diğeridir. İyi kalitede çıkış suyu elde edilmesi, bu suların en başta proseste tekrar kullanımı ve sonra da tarımsal amaçlarla kullanımının sağlanması ve çamur bertarafının yapılması planlanan hedeflerdir. Deney sisteminin akım şeması Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

3.1.1 Sistemde kullanılan membranlar

Çalışmada ilk önce *Atech Innovations gmbh* firmasından satın alınmış olan 1 cm çapındaki seramik membranlardan (Şekil 3.2) membran modülü üretilmiş ve kullanılmıştır.

Çalışmanın ilerleyen safhalarında polietersülfon (PES) tabaka tipi membranlardan da membran modülü üretilmiş ve denemeler yapılmıştır. Kullanılan membranlara ait özellikler Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

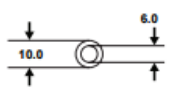



Şekil 3.1: Deney sisteminin akım şeması

SURVEY

Technical data of atech Al₂O₃- membranes

Support material	α- Al ₂ O ₃
Membrane material	MF: α- Al ₂ O ₃ ; ZrO ₂ ; TiO ₂ UF: TiO ₂ ; ZrO ₂ ; Al ₂ O ₃
Pore diameter / Molecular Weight Cut Off	1.2; 0.8; 0.4; 0.2; 0.1 μm 0.05 μm; 150 kD; 100 kD; 20 kD; 10 kD; 5 kD; 1 kD
Overall length	up to 1500 mm
pH- stability	0 to 14
All membrane designs are suitable for steam sterilisation ≥ 121°C / 249.8° F.	

Type	Design (mm)	Amount of channels	Length (mm)	Filter surface per element (m ²)	Illustration
1/6		1	1000	approx. 0.019	
			1200	<u>approx. 0.023</u>	

Şekil 3.2: atech innovations gmbh firmasından temin edilmiş olan seramik membranların özellikleri

Product Specification



**MICRODYN
NADIR**

ADVANCED SEPARATION TECHNOLOGIES

NADIR® UP150 P Ultrafiltration Membrane

NADIR® UP150 membrane is a polyethersulfone (PES) ultrafiltration membrane with a nominal molecular weight cut-off (M.W.C.O.) of 150,000 Daltons. UP150 membrane is commonly used in the removal of macromolecules or concentration of large organic solutes in both water and process applications, and can be used for membrane bioreactor (MBR) applications. UP150 membrane sheet is available in dry flat sheet rolls and is FDA compliant.

Membrane Characteristics

Membrane Chemistry	Backing Material	Nominal M.W.C.O (Da)	Thickness (μm)
Polyethersulfone (PES)	Polypropylene	150,000	210 - 250

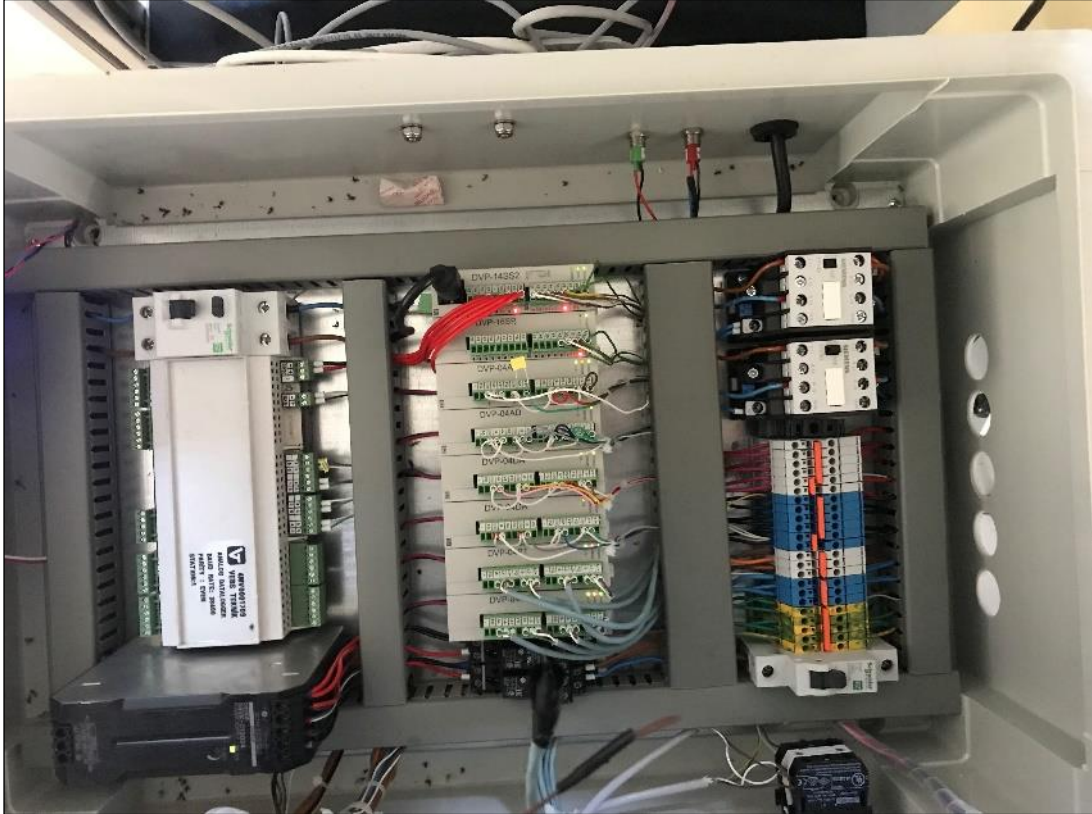
Permeability LMH/bar (GFD/psi) ^a	Retention PVP K85 (%) ^b	pH Range	Chlorine Tolerance ^c
≥ 285 (≥ 11.6)	90.0 – 98.0	0.0 – 14.0	500,000 ppm-hours

a Test conditions: Clean water, 2 bar (29 psi), 20°C (68°F), crossflow operation. Membrane specifications may change without notice as design revisions occur.
b Test conditions: 4% PVP K85, 2 bar (29 psi), 20°C (68°F), crossflow operation.
c pH must be between 10 – 11 during chlorine cleaning.

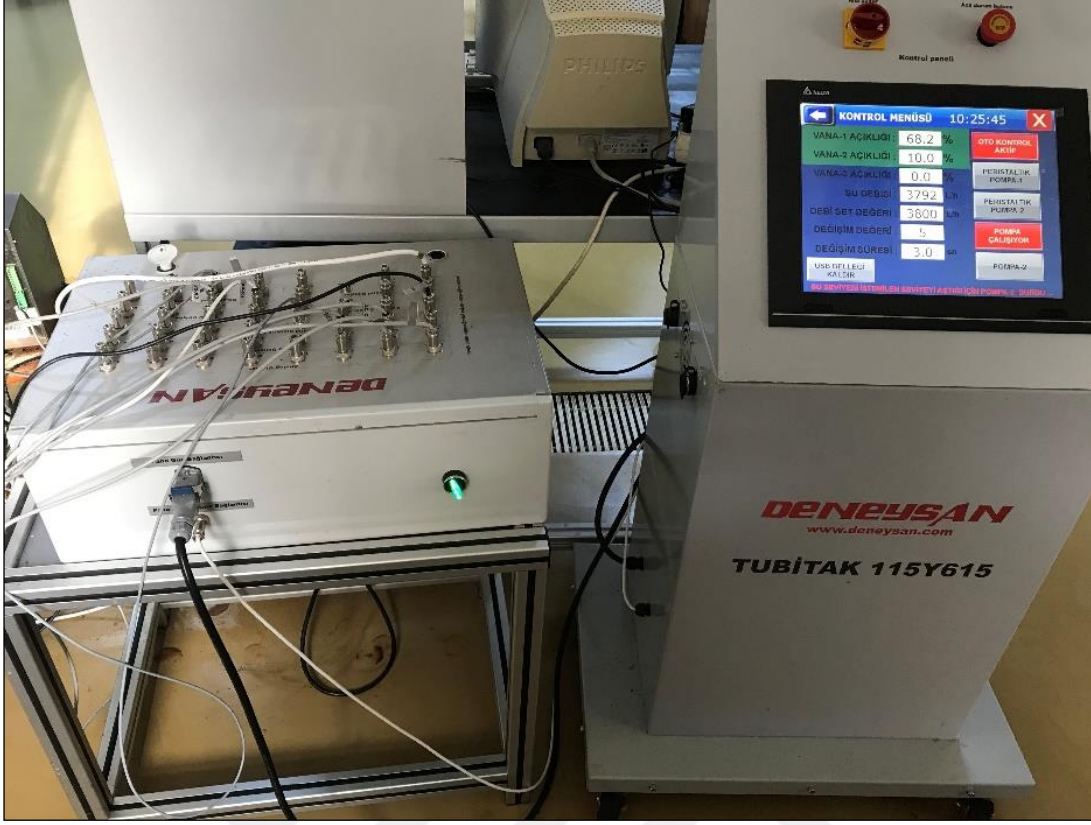
Şekil 3.3: Polietersülfon (PES) tabaka membranların özellikleri

3.1.2 Sistemin otomasyon ünitesi

Otomasyon ünitesi ve tüm gerekli paneller Balıkesir’de bir firma tarafından yapılmıştır. Yazılım ise TÜBİTAK 115Y615 nolu Projenin Ekibi tarafından geliştirilmiştir. Delta marka DVP-14SS211R model PLC (8 dijital girişli / 6 röle çıkışlı) ve bu PLC’ye uyumlu; 1 adet DVP-16SP11R (8 girişli / 8 röle çıkışlı) dijital giriş çıkış portu, 1 adet DVP-04PT-S (16 bit çözünürlüklü, 4 adet PT100/PT1000 girişli) sıcaklık okuma portu, 2 adet DVP-04DA-S2 (4 adet analog çıkışlı) analog çıkış portu, 2 adet DVP-04AD-S2 (4 adet analog giriş) analog giriş portu ve 1 adet 4 kanallı özel üretim 0-100 mV analog giriş portu genişleme modülleri, kontrol ekipmanlarından verilerin alınması, kaydedilmesi ve sistemin kontrolünün yapılması için kullanılmıştır. Ayrıca Delta marka DOP-W157B model 15” dokunmatik ekranda sisteme geliştirilen otomasyon yazılımının kullanıcı tarafından kontrolünün yapılabilmesi ve verilerin görselleştirilebilmesi için dahil edilmiştir. Bu ekran sayesinde uzaktan erişim ile de kumanda paneli izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. İmal ettirilmiş olan otomasyon panosunun ve kumanda panelinin görüntüsü, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.4: Otomasyon panosuna ait iç görünüm



Şekil 3.5: Kontrol paneli ve otomasyon panosu

3.2 Kullanılan Atıksu

Çalışmada kullanılan atıksu T.C. Bigadiç Belediyesi Mezbahasından temin edilmiştir. Atıksu mezbahanın arıtma tesisinin giriş ızgara yapısının çıkışından alınmıştır. 2-3 günlük periyotlarla alınan yaklaşık 180 L atıksu laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvara getirilmiş olan atıksuya pH, KOİ, BOİ, AKM, UAKM, TA, TF analizleri yapılarak deney sistemine beslenmiştir.

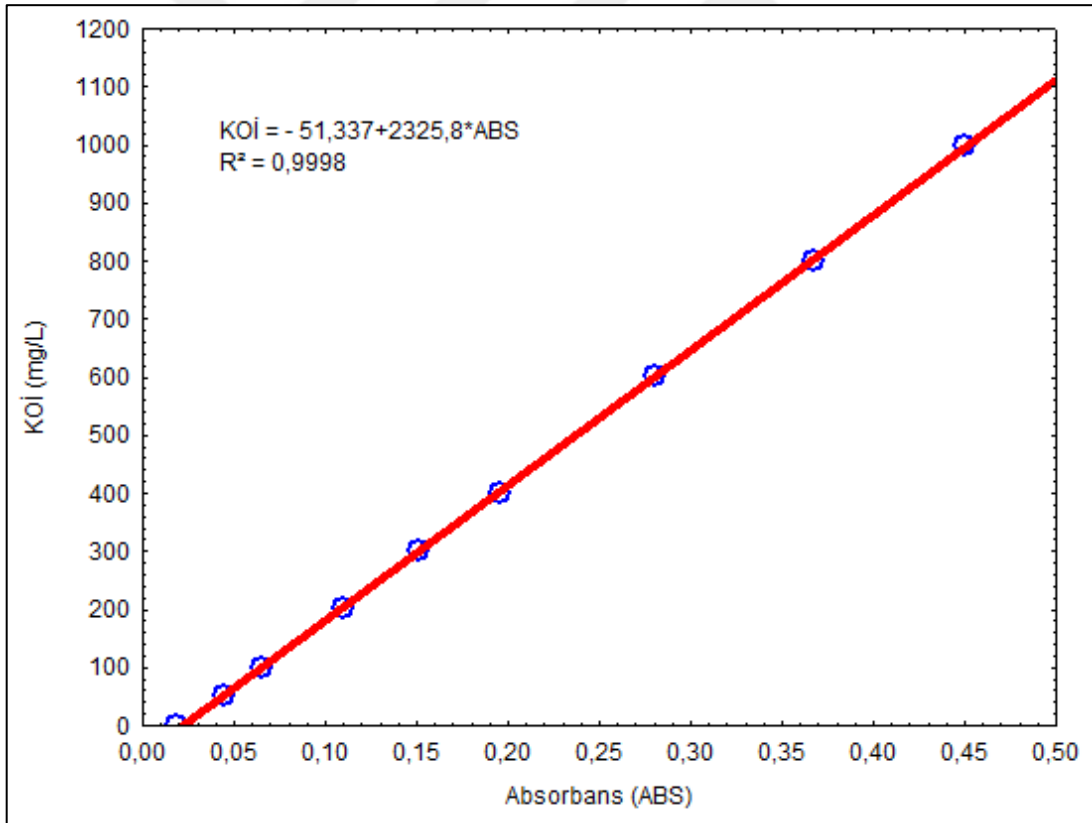
3.3 Ölçülen Parametreler ve Ölçüm Metotları

3.3.1 AKM ve MLSS parametrelerinin ölçülmesi

Askıda katı madde (AKM) değerleri Standart Metotlarda [100] belirtilen yöntemlerle yapılmıştır. Numunelerin glass-fiber filtrelerden vakum pompası ile vakumlanması suretiyle ölçüm yapılmıştır. Ayrıca atıksuda ve biokütlede Standart Metotlarda açıklandığı gibi MLVSS (uçucu fraksiyonlar) ve UAKM parametrelerinin ölçümleri de yapılmıştır [100].

3.3.2 KOİ parametresinin ölçülmesi

KOİ parametresinin ölçümü, standart metotlarda [100] belirtildiği şekilde kolorimetrik olarak yapılmaktadır. KOİ analizi için, 2000 mg.L⁻¹ KOİ içeren stok çözeltisinden standartlar hazırlanmıştır. Stok çözelti 0,5 L saf su içerisinde 850 mg Potasyum Hidrojen Ftalat çözülerek elde edilir. Parçalama çözeltisinin litresinde ise 10,216 g K₂Cr₂O₇, 33 g HgSO₄ ve 167 mL H₂SO₄ bulunmaktadır. Derişik asit çözeltisi ise 10,129 g Ag₂SO₄'ın bir litre H₂SO₄ içerisinde çözülmesi ile elde edilir. Daha sonra bu standart çözeltilerden 1,5 mL alınarak üzerine parçalama çözeltisinden 1 mL ve son olarak derişik asit çözeltisinden 1,5 mL eklenmiştir. Bir termoreaktörde 120 dakika boyunca 148±2°C'de ısıtılmıştır. Termoreaktörden alınan örneklerin oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiş ve daha sonra 600 nm dalga boyuna ayarlanmış olan bir spektrofotometrede (WTW Spectroflex 6600) absorbans değerleri okunarak kalibrasyon için veriler elde edilmiştir. Şekil 3.6 elde edilen veriler ile çizilen kalibrasyon eğrisini göstermektedir.



Şekil 3.6: KOİ parametresinin ölçümünde kullanılan denklem ve kalibrasyon eğrisi

Çözünmüş KOİ analizleri numunelerin 0,45 µm por çapındaki glass-fiber filtreden süzöldükten sonra, toplam KOİ değerleri ise numunelerin olduğu gibi analiz edilmesi sonucu tespit edilmiştir.

3.3.3 Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) analizi

Dijital BOİ metre (WTW OxiTop) kullanılarak BOİ ölçümleri yapılmıştır. Cihaz 6 şişe kapasiteli olup, BOİ değerlerindeki değişimleri saat bazında kaydedip gösterebilmektedir.

3.3.4 Yağ ve gres parametresinin analizi

Yağ ve gres ölçümleri için “yağ-gres, petrol-hidrokarbonu” ölçüm cihazı (Wilksir HATRT-2) kullanılmıştır. IR bölgede çalışan cihaz için yağ-gres standardı olarak bilinen bir yağ (30W motor yağı) kullanılmıştır. Standart Metotlardaki prosedüre göre kalibre edilerek yağ ve gres parametresinin ölçümleri yapılmıştır [100]. Kalibrasyonda kütleli ppm (mg.L^{-1}) kullanılmıştır. Dereceli silindire 0,1 g yağ koyulduktan sonra üzeri hekzan (C_6H_{14}) kullanılarak 100 mL'ye tamamlanmış ve bu stok çözeltiden belirli oranlarda hekzan ile seyreltilerek cihazda absorbans değerleri okunmuş ve şekil 3.7'de verilen kalibrasyon eğrisi hazırlanmıştır. Öncelikle numunenin pH'sı derişik H_2SO_4 ile 2'nin altına düşürölmüş, daha sonra belirli miktarda hekzan numuneye ilave edilerek hekzanın yağ ve gresi ekstrakte etmesi sağlandıktan sonra yağ-gres ölçüm cihazı aracılığı ile yağ-gres analizleri yapılmıştır.

3.3.5 ÇO, pH, iletkenlik ve toplam çözönmüş katı madde (TÇKM) ölçümleri

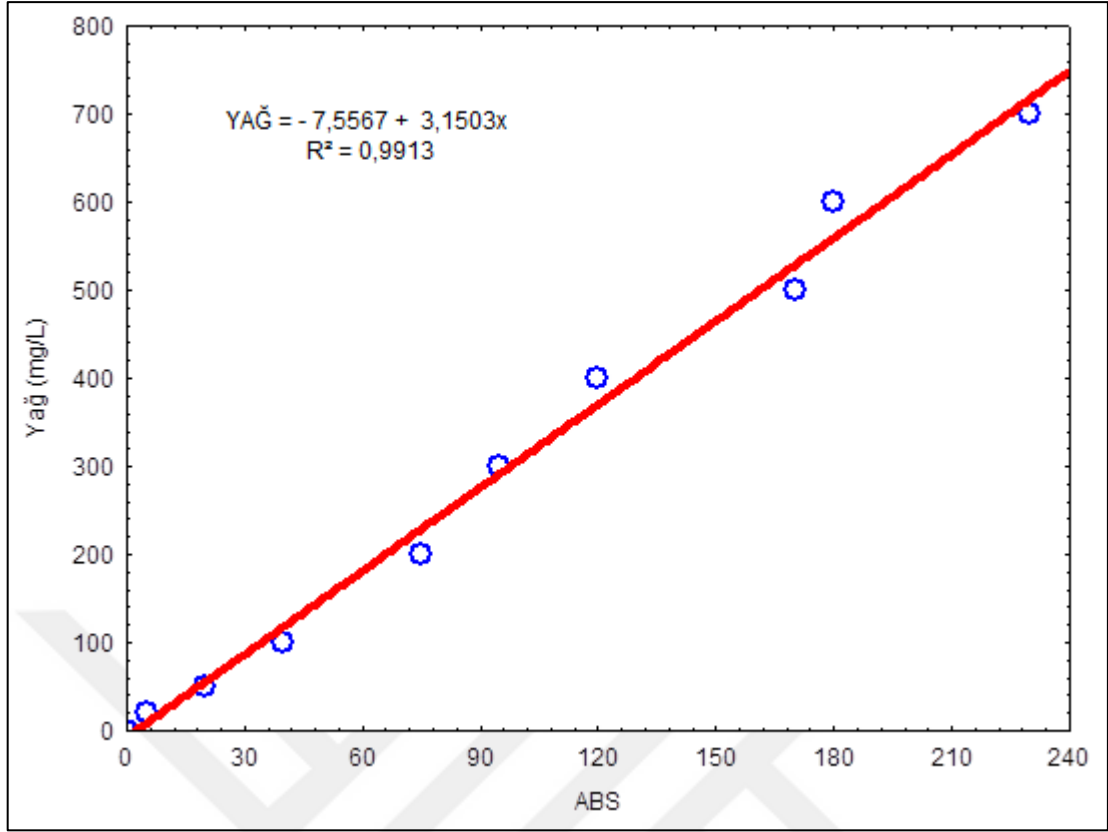
Reaktördeki pH ve ÇO değerleri otomasyon sistemine bağlı olan problar aracılığı ile sürekli olarak ölçölmüş ve kaydedilmiştir. Atıksuyun karakterizasyonu ve reaktör içerisindeki problemlerin kalibrasyonu için WTW marka InoLab IDS Multi 9430 model çoklu parametre ölçer cihazı kullanılmıştır. Aynı zamanda da iletkenlik ve toplam çözönmüş katı madde (TÇKM) parametreleri de bu cihaz yardımıyla ölçölmüştür.

3.3.6 NO_3^- -N parametresinin ölçümü

Nitrat azotu analizleri spektrofotometrik olarak Merck marka ve 1097130002 model numaralı hazır test kitleri kullanılarak yapılmıştır.

3.3.7 NH_4^+ -N analizi

Amonyum azotu ölçümleri spektrofotometrik metotla Merck marka ve 1145590001 model numaralı hazır test kitleri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.7: Yağ-Gres analizlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi ve denklemi

3.3.8 Toplam Fosfor (TF) ölçümü

TF ölçümleri spektrofotometrik metotla Merck marka ve 1147290001 model numaralı hazır test kitleri kullanılarak yapılmıştır.

3.3.9 Toplam Azot (TA) parametresinin ölçümü

TA ölçümü Merck marka ve 1147630001 model numaralı hazır test kitleri ile yapılmıştır. TA parametresinin ölçümü, organik ve inorganik bileşiklerin Koroleff metoduna göre nitrat azotuna termoraktörde oksidan ile dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır.

3.3.10 Membran akısı (J)

Membran filtrasyon sistemlerinde ölçülmesi gereken en önemli parametre membran akısıdır. Membranın; suyu olabildiğince fazla miktarda geçirmesi, sudan ayrılması istenenleri de mümkün olan en yüksek derecede membrandan geçirmemesi beklenir. Bu sebeple membran akısı yani membrandan geçen sıvı miktarı her zaman ölçülmeli ve işletme parametreleri ile ilişkisi gözlemlenmelidir. Akıların belirlenmesinde elektromanyetik bir debimetreden veya

bilgisayar bağlantılı bir hassas teraziden yararlanılmıştır. Membrandan geçerek gelen su terazi üzerinde bulunan bir kaptan toplanmakta ve terazideki ağırlık değişimi bilgisayara kaydedilmektedir. Akıların hesaplanması, elde edilen verilerin nümerik entegrasyon metotları kullanılarak işlenmesi ile yapılır. Birim zamandaki ağırlık değişiminin süzüntünün yoğunluğuna ve membranın yüzey alanına bölünmesi ile akı (J) hesaplanmıştır.

3.3.11 Transmembran Basıncı (TMB)

TMB draft tüpü membran ünitesinin emme hattında bulunan bir basınç ölçüm probu ile otomasyon sistemi aracılığı ile sürekli olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.



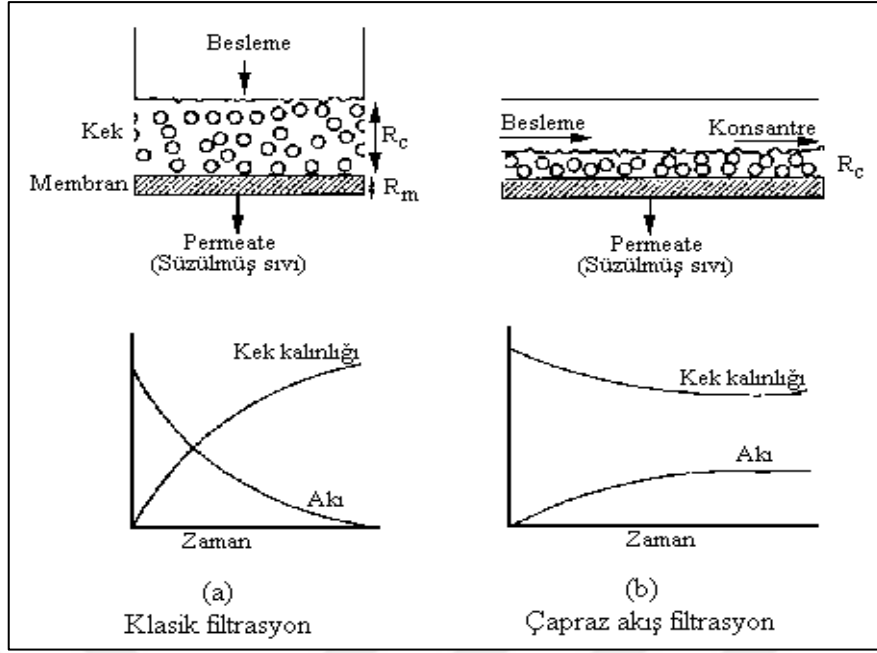
4. ELDE EDİLEN VERİLER

4.1 Reaktör Tasarımı

4.1.1 Membran modülünün tasarlanması

Atıksu arıtımında kullanılan MBR'lerdeki basınç sürücülü membranlar ya reaktör dışında (external) çapraz akış modunda ya da biyoreaktörün içerisinde batık membran modunda işletilmektedir. Çapraz akış modunda işletilen membran sistemlerde yüksek kesme kuvvetlerinden dolayı membran yüzeyinde biriken kek tabakası çok fazla kalınlaşmamakta ve buna bağlı olarak da akı düşüşleri daha az olmaktadır. Buna ilaveten sürücü kuvvet olan trans membran basıncının (TMB) istendiği kadar yüksek üretilmesi nedeniyle bu modda çalıştırılan MBR'den daha yüksek akılar elde edilebilmektedir. Tüm bu avantajlarının yanında external membran sistemlerinin biyoreaktörlerde oluşturduğu dezavantajlar da önemli boyuttadır. Çapraz akış modunda sistemin çalıştırılması esnasında üretilen yüksek kesme kuvvetleri biyolojik flokların çok daha fazla parçalanmasına ve sağlıklı flok yapısının oluşmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra membran sisteminde üretilen çok yüksek basınç değerleri de floklara ve buradaki mikro canlılara olumsuz etkiler yapmaktadır. Bu iki filtrasyon türündeki akı ve membran yüzeyine biriken keki kalınlığı arasındaki ilişkiye ait şematik gösterimler Şekil 4.1'de verilmektedir.

Sahip oldukları olumsuzluklara rağmen düşük vakum değerlerinde süzme işleminin yapılabilmesi, sistemin daha kompakt ve küçük alanlarda kurulabilmesi nedeniyle batık membran sistemlerinin membran biyoreaktörler (MBR) için daha fazla tercih edilmesine neden olmaktadır. Batık membranlardan daha yüksek akı almak üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı membran üretim teknolojisi üzerineyken birtakım çalışmalarda membranların yüzeyinde biriken kek tabakasının azaltılması veya birikimin engellenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada membran ünitesi çapraz akış modunda kullanılmıştır ve görülmüştür ki hem oluşturulan jet hem de membran için üretilen çapraz akış akımı flok yapısını tamamen bozmakta ve çökelme özelliği tespit edilemeyen aktif çamur üretilmektedir. Bu dağınık ve çok küçük flok yapısı nedeniyle membran akıları da çok hızlı düşmekte ve zor süzülmemektedir.

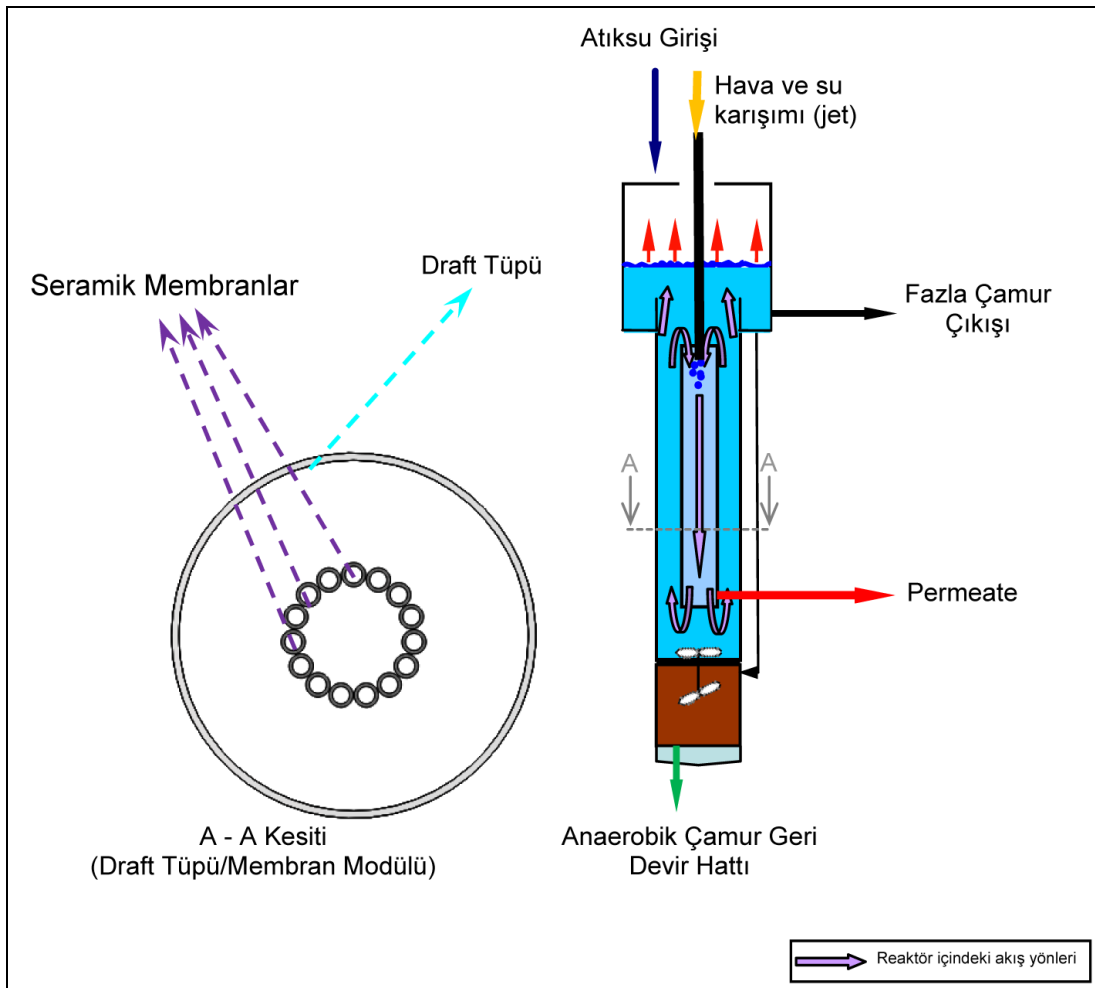


Şekil 4.1: Klasik ve çapraz akış filtrasyonda akı azalması ve kek kalınlığı değişimi

Bu çalışmada JLR'ün yüksek performansından faydalanarak daha kompakt ve işletilmesi kolay bir MBR sistemi üretilmiştir. Şöyle ki; Jet loop reaktörlerde üretilen jet akım yüksek kesme kuvvetlerine sahiptir. Reaktörün içerisinde bulunan emme tüpünün (draft tube) birçok başka fonksiyonu olmasına karşın en önemli katkısı su ve hava karışımının reaktör içerisinde daha uzun süre kalmasını sağlamasıdır. Emme tüpü jet akıma (su-hava karışımı) yön vererek akımın reaktör tabanına kadar ulaşip, tabana (çarpma levhasına) çarpıp, tekrar reaktör üstüne çıkmasını sağlamaktadır. Bu esnada draft tüpünün üst ve alt bölgelerindeki hidrostatik basınç farkı ise reaktör içerisinde çevrime (loop) yol açmakta ve hava kabarcıklarının reaktör içerisinde daha da uzun süre kalmasına neden olmaktadır. Böylece kütle transferine olumlu katkı yapmakta ve oksijen transfer katsayısını artırmaktadır.

Bu çalışma ile emme tüpüne ikinci bir fonksiyon kazandırılarak tamamen özgün bir tasarım hedeflenmiştir. Emme tüpü ayrıca bir membran ünitesi olarak tasarlanıp imal edilmiştir. Üretilmiş olan emme tüpü reaktördeki rolünü de yerine getireceğinden reaktörün iç çapı ile emme tüpü çapı arasındaki oran 0,4-0,6 arasında olacak şekilde inşa edilmiştir. Üretilmiş emme tüpü-membran modülü şematik görünümü Şekil 4.2'te gösterilmektedir. Membran modülünün 2 farklı membrandan üretilmesi planlanmıştır. İlk aşamada 1 cm çapında silindirik seramik membranlar kullanılarak membran modülü inşa edilmiştir. İkinci aşamada ise tabaka membranlar kullanılarak modül yapılmıştır. Kullanılan seramik membranların por boyutu 0,2 ve 0,1 µm olarak seçilmiştir. İlk olarak tek kanallı seramik membranlardan draft

tüpü yapılmış. Bu amaçla membranların giriş ve çıkışları üretilen bağlantı ekipmanları içerisinde sızdırmaz halde birleştirilerek emme tüpü geometrisinde membran modülü oluşturulmuştur. Şekil 4.2’te (A-A kesiti) seramik membranlardan üretilmiş draft tüpüne ait bir çizim verilmiştir. Membranları bir arada tutacak ve membran modülü oluşturacak alt ve üstteki bağlantı elemanları son derece önemlidir. Bu elemanlar çok fazla kesit daralmasına neden olmayacak şekilde özel tasarlanmıştır. Aksi durumda reaktörün akış özellikleri ve optimum geometrisi zarar görür ve jet akım membran yüzeyini yeterince sıyramaz.



Şekil 4.2: Emme tüpü/membran modülünün şematik gösterimi

Reaktör tabanındaki sızdırmazlığı sağlayan aynı zamanda membran kılıfı (housing) olacak bağlantı ekipmanına bir çıkış borusu yerleştirilmiş ve bir vakum pompasına bağlanarak membran için emme basıncı oluşturulmuştur. Buradan çekilen akılar bir teraziye alınarak membran kirlenmesi özellikleri incelenmiştir. Kurulan biyoreaktörün hacminin yaklaşık olarak 10-16 L olması planlanmıştır. Membran yüzey alanları imalattan sonra belirlenmiş akı hesaplarında kullanılmıştır.

Bu tasarım ile üretilmiş olan emme tüpünün iç ve dış yüzeyleri membran yüzey alanı olarak görev yapmaktadır. Püskürtme başlığından çıkan jet akım yüksek hızda emme tüpü içerisine girecektir. Bu akım membran yüzeyi için oldukça yüksek hızlı bir çapraz akış oluşturacağı gibi yüksek kesme kuvvetleri üreteceğinden yüzeyde kek tabakasının birikimi engellenecektir ve minimum olacaktır. Aynı şekilde reaktör tabanına çarpan akım yukarıya yönlenecek ve bu kez de membran dış yüzeyine yine yüksek bir çapraz akış üretecektir. Böylece emme tüpü/membran yüzeyinin yüksek kesme kuvvetleriyle süpürülmesi sağlanmış olacaktır.

4.1.2 Anaerobik/Anoksik bölmenin tasarlanması

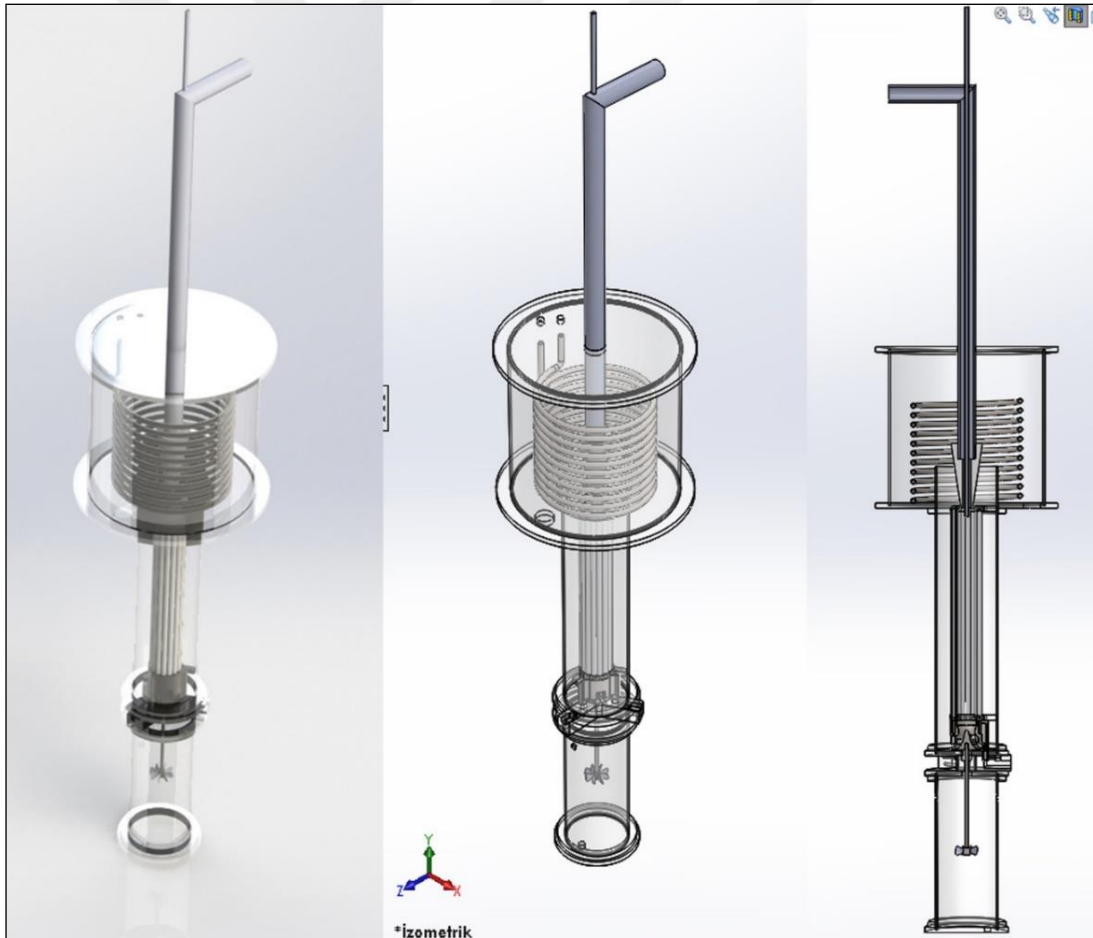
Jet loop biyoreaktörler mutlak aerob sistemlerdir. Yüksek oksijen transfer kapasiteleri nedeniyle çok yüksek yüklerde organik atıkların gideriminde büyük başarılar gösterebilmektedir. Biyoreaktörde oksijensiz bir bölgenin oluşturulmaya çalışılmıştır. Bir başka ifadeyle aerobik ve anaerobik/anoksik arıtımın tek bir reaktörde (yüksek performanslı kompakt bir biyoreaktörde) gerçekleştirilmesi için reaktörün iki bölgeye ayrılması planlanmıştır. Şekil 4.3'de planlanan anaerobik bölgeye ait şematik gösterim verilmektedir

Anaerobik arıtımda karıştırma önemli bir parametredir ve reaksiyon hızı üzerinde kayda değer etkisi bulunmaktadır. Anaerobik/anoksik proseslerde karıştırma ile reaksiyon hızı ve dolayısıyla prosesin performansı artar. Bu çalışmada da reaktörün anaerobik bölgesinin karıştırma işleminin reaktörde üretilen jet akım ile yapılması planlanmıştır. Jet loop reaktörlerde yüksek hız ve kinetik enerjiye sahip jet akım emme tüpünün yönlendirmesi ile reaktör tabanına çarparak geri dönmektedir. Bu çalışmada reaktör tabanına (aerobik bölgenin altına) türbin-fanı kanat geometrisinde bir çarpma levhası yerleştirilmiştir. Fan mili bir sızdırmaz rulman sistemine bağlanarak anaerobik bölgeye uzatılmıştır. Bu bölgede mile bir karıştırıcı çark bağlanmıştır. Jet akım tasarlanan çarpma levhasına çarpınca sahip olduğu kinetik enerjiyi fan kanatlarına iletacaktır. Böylece fanın ve fan miline bağlı olan karıştırıcı çarkın dönmesini sağlayacaktır. Bu çark ise anaerobik bölgeyi karıştıracaktır. Sonuç olarak dışarıdan başka bir güç ya da enerji kullanılmadan bu bölge karıştırılmış olacaktır.

Karıştırıcı sürekli kontrol edilecektir. Karıştırıcı hızı jetin (jeti üreten püskürtme başlığının) tabana olan mesafesinin artırılıp azaltılması ile ayarlanabilecektir. Anaerobik bölge ile aerobik bölge arasındaki geçiş de-gazifikasyon bölgesi ile anaerobik bölgenin tabanına

kompleks ve üretimi zor olan parçalar 3 boyutlu yazıcı ile PLA (Poliaktik Asit) veya ABS filament kullanılarak öncelikle prototipleme amacıyla üretilmiş, daha sonra 3 eksen CNC (Computer Numerical Control - Bilgisayarlı Sayısal Kontrol) freze ile üretilmiştir. Aşağıdaki şekillerde bilgisayarda Solidworks 3 boyutlu tasarım programı kullanılarak tasarlanmış ve daha sonra da üretilmiş parçalara ait resimler bulunmaktadır.

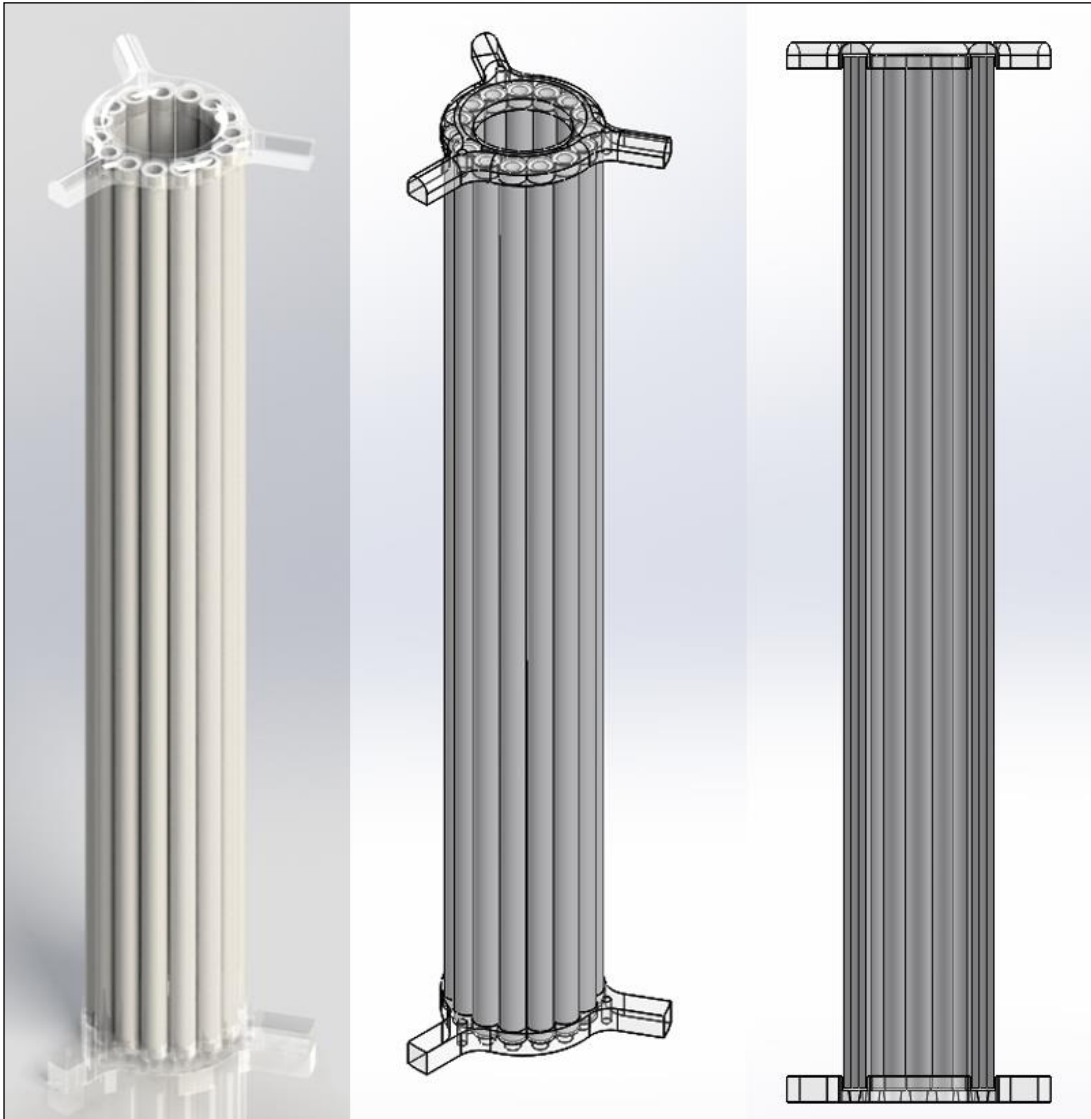
Öncelikle anaerobik bölgenin karıştırılması için düşünülen jet akışın çarptığı çarpma plakasının bir fan ile değiştirilmesi ve bu fandan sağlanan mekanik hareket ile anaerobik bölgenin karıştırılması fikri denenmiştir. Bu amaçla laboratuvarında mevcut halde bulunan bir jet loop reaktör modifiye edilmiş ve deneme sistemi olarak kullanılmıştır. Bu denemeler başarı ile sonuçlanmıştır. Her ne kadar bu denemelerde başarılı sonuçlar alınmış olsa bile karıştırıcı hızına etki eden jet akışın optimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.4: Solidworks programı ile tasarlanmış olan reaktör (1. Versiyon)

Deneme sisteminden elde edilmiş olan veriler ile Solidworks tasarım programı kullanılarak yeni bir reaktör tasarlanmıştır (Şekil 4.4). Daha sonra bu ilk versiyon reaktörden elde edilen veriler değerlendirilmiş ve yeni bir reaktör tasarlanmıştır.

1 cm çapındaki seramik membranlar 10 mm kalınlığındaki akrilik plakadan üretilmiş olan birleştirme ve montaj aparatları ile 15 tanesinden 1 adet draft tüpü/membran modülü oluşturacak şekilde birleştirilmiştir (Şekil 4.5). Üretilen bu membran modülünde, akrilik parçalar ile seramik membranlar arasındaki sızdırmazlık kauçuk o-ringler kullanılarak sağlanmıştır (Şekil 4.6). Üretilmiş olan bu ilk seramik membran modülünün yaklaşık membran yüzey alanı $0,186 \text{ m}^2$ 'dir.

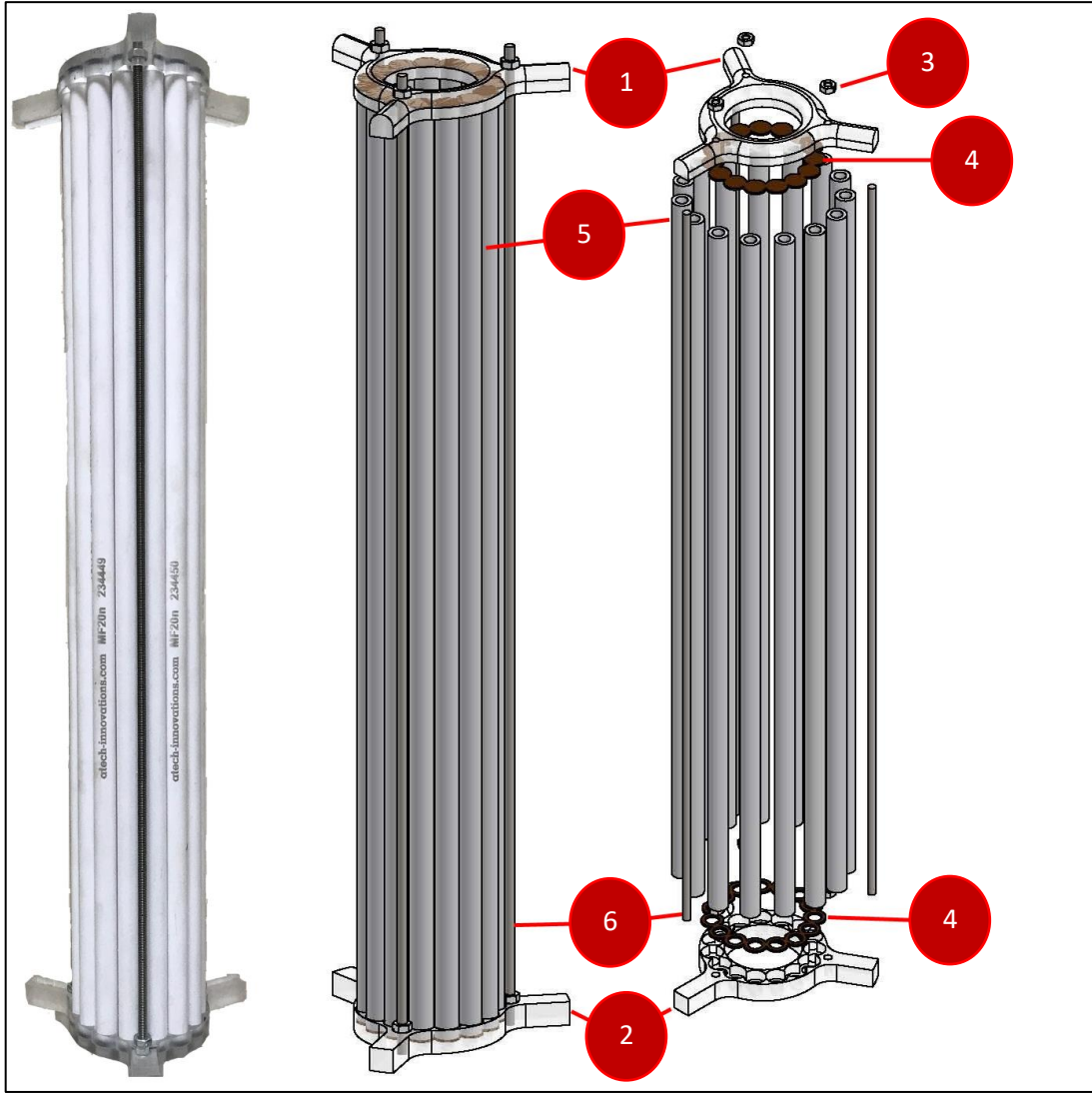


Şekil 4.5: Draft tüpü olarak kullanılan seramik membran modülü

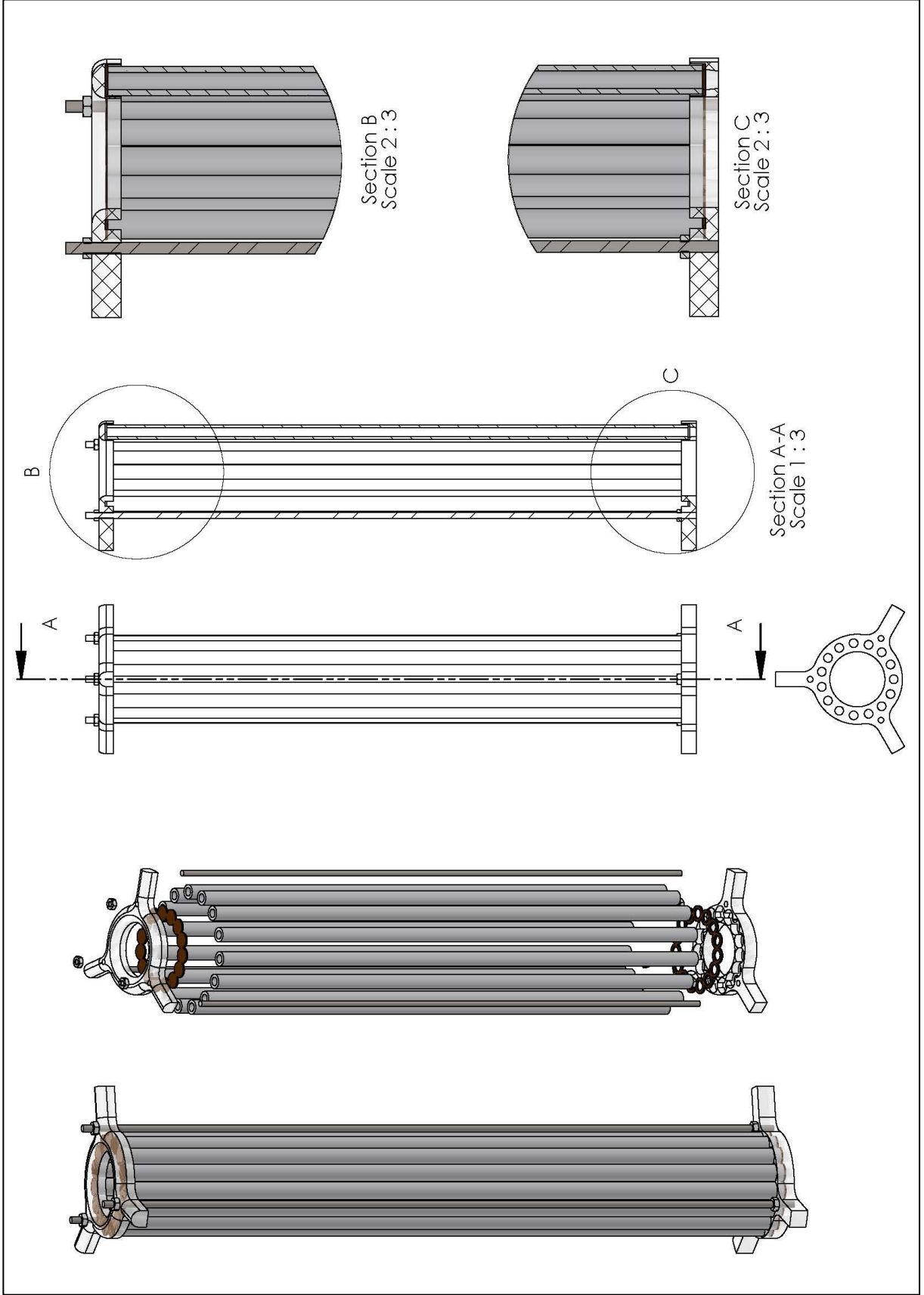
Seramik membranlar ile birleştirme ve montaj aparatları arasındaki sızdırmazlık için öncelikle o-ring kullanıldı. Ancak o-ring kullanılarak elde edilen sızdırmazlık hem montaj hem de aparatların üretiminde çeşitli zorluklara sebebiyet verdi. Daha sonra özel kalıplar hazırlanarak dizayn edilen silikon contalar imal edildi ve çalışmanın geri kalanında bu silikon contalar sızdırmazlık amacı ile kullanıldı.



Şekil 4.6: Seramik membranlar, seramik membranlara ait birleştirme ve montaj aparatları, birleştirme ve montaj aparatlarının üç boyutlu yazıcı ile prototiplenmesi



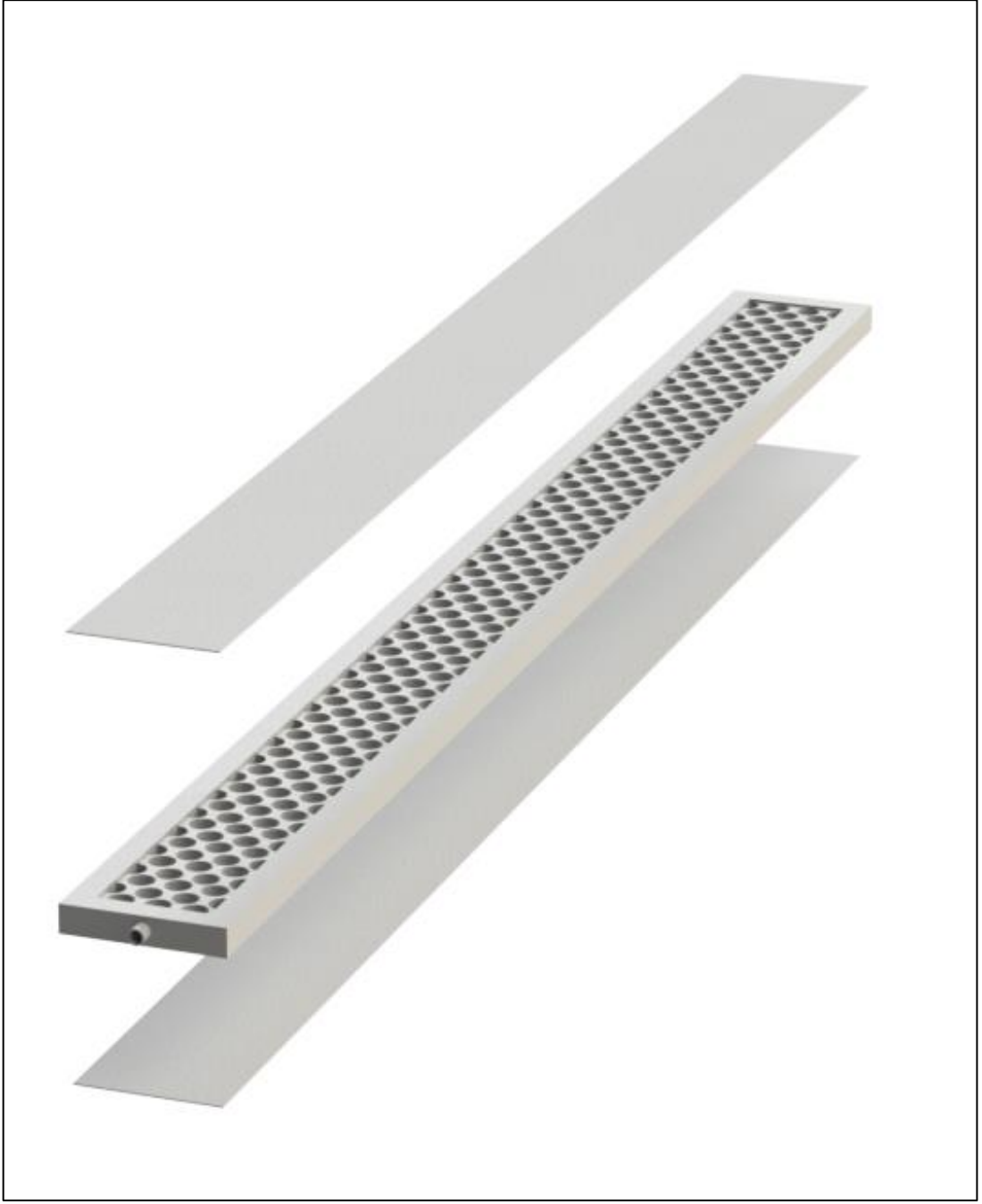
Şekil 4.7: Seramik membran draft tüpü (1,2: CNC freze ile üretilen akrilik birleştirme ve montaj parçaları; 3: M4 paslanmaz çelik somun; 4: özel olarak üretilmiş silikon contalar; 5: seramik membranlar; 6: paslanmaz çelik M4 dişli gijon)



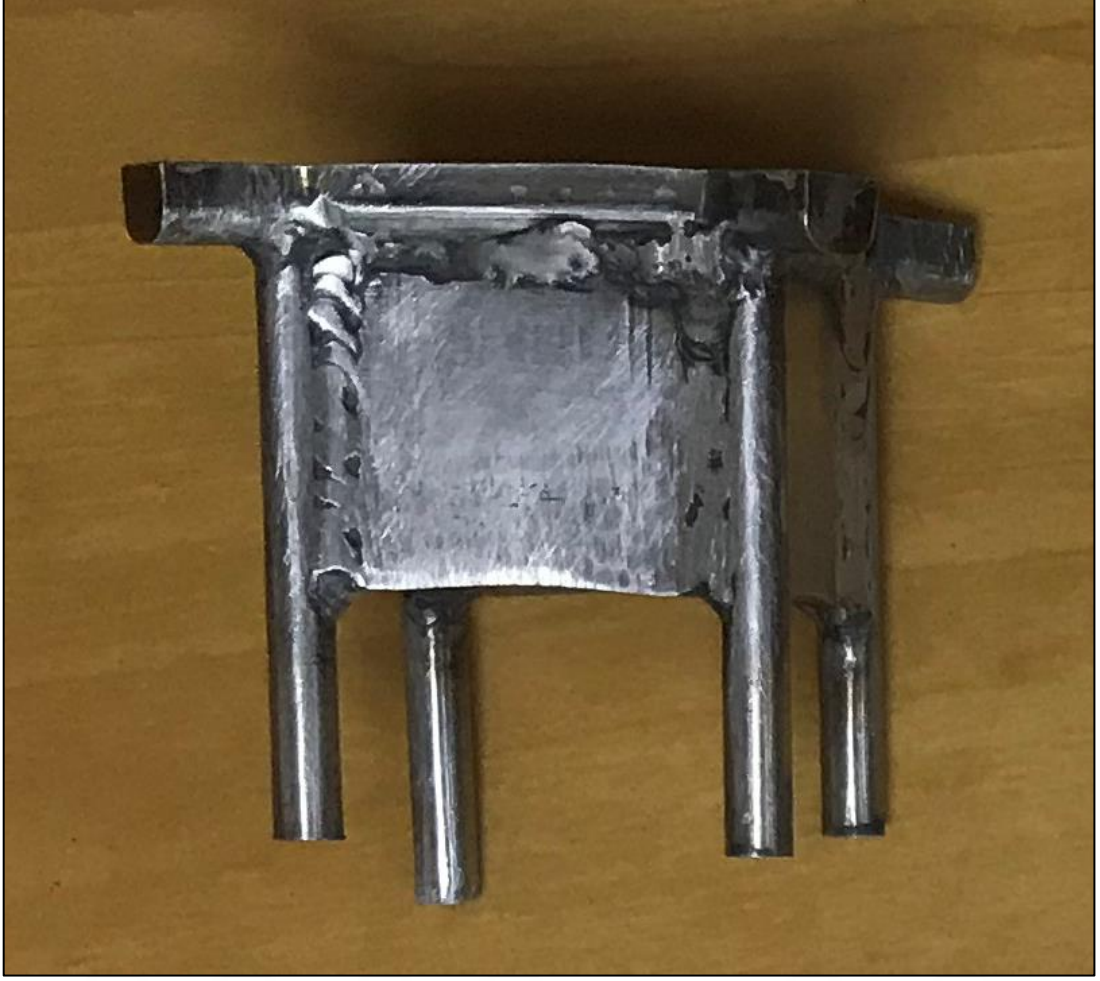
Şekil 4.8: Seramik membran draft tüpünün ayrıntıları.

PES membranlardan modül üretmek amacıyla membranlar için kestamit (polyamid) malzemedeki kalıp hazırlanmıştır (Şekil 4.9). Kalıplar 1 cm et kalınlığına, 5 cm en ve 59 cm ise uzunluğa sahiptir. Daha sonra membranlar bu kalıplara ısıl işlemle yapıştırılarak çift taraflı tabaka halinde membran plakaları oluşturulmuştur. Bu tabakalar bir araya getirilerek kare kesitli membran modülü oluşturulmuştur (Şekil 4.11). Oluşturulan membran modülünün membran yüzey alanı ise 0,1872 m² olarak tespit edilmiştir. Bu membran modülü daha sonra paslanmaz çelikten CNC freze ile üretilmiş olan bir akı toplama aparatına yerleştirilmiştir (Şekil 4.10).





Şekil 4.9: Solidworks ile tasarlanmış olan tabaka membran modülü



Şekil 4.10: Tabaka membranlar kullanılan membran draft tüpünden akı toplamak için kullanılan paslanmaz çelikten imal edilmiş bağlantı aparatı.



Şekil 4.11: Draft tüpü olarak kullanılan tabaka membran modülünün montajı

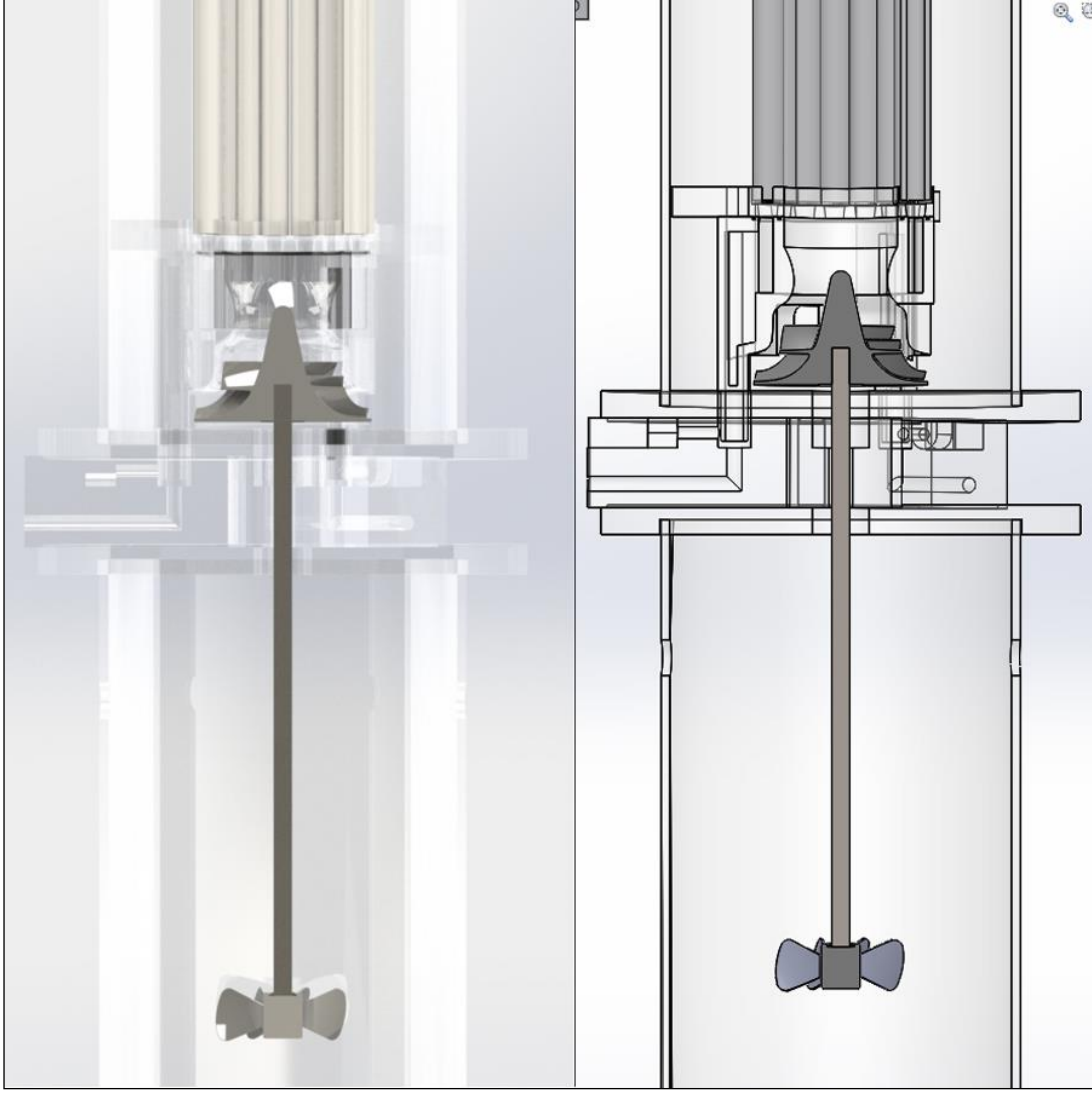
Bu haliyle MDJLR bir aerobik/anaerobik hibrit sistem ortaya çıkarmaktadır. Aerobik bölgede bulunan jet akışından güç alarak anaerobik bölgeyi karıştıracak olan fan, pervane (karıştırıcı) ve mil montajı Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Montajda bulunan fan ve pervane 3 boyutlu yazıcı ile PLA’dan, mil ise paslanmaz çelikten üretilmiştir.

Jet akımın taşıdığı enerjiden faydalanmak da bu tasarımdaki diğer bir amaçtır. Reaktör tabanına bir fan sistemi tasarlanmıştır. Bu fana sızdırmazlık sağlanarak birleştirilen karıştırıcı ile biyolojik prosese esneklik kazandırılması hedeflenmiştir.



Şekil 4.12: Jet loop reaktörün çarpma plakası olarak kullanılan ve anaerobik bölgeyi karıştıran pervane ve milin üç boyutlu tasarım programındaki montajı.

Şöyle ki; çalışmanın ilerleyen aşamalarında eğer gereksinim duyulursa havasız bir bölme sağlanarak bu bölmenin karıştırılması da dışarıdan enerji kullanmadan sağlanabilecektir. Bu dizayn ihtiyaç duyulduğunda girişin bu bölgeye bağlanması ile de daha yüksek yüklemeler için de esnek bir proses işletimi sağlamaktadır.



Şekil 4.13: Jet loop reaktörün aerobik ve anaerobik bölgesinin montajına ait tasarım.

Daha sonra pervanenin (karıştırıcının) dizaynında değişikliğe gidilmiş ve aşağıdaki şekilde görünen daha büyük bir karıştırıcı dizayn edilmiştir (Şekil 4.14). Montajda bulunan fan ve pervane 3 boyutlu yazıcı ile ABS'den, mil ise paslanmaz çelikten üretilmiştir.



Şekil 4.14: Jet loop reaktörün çarpma plakası olarak kullanılan ve anaerobik bölgeyi karıştıran pervane ve mil montajı.

4.1.5 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Montajı (1. Versiyon)

Üretilmiş olan parçalardan ilk önce otomasyon sistemi olmadan jet loop membran biyoreaktör Şekil 4.15’de görüldüğü gibi birleştirildi. Birleştirilen bu sistemde çeşitli kütle transferi ve biyolojik arıtım deneyleri yapıldı. Elde edilen veriler ışığında ikinci bir reaktör konfigürasyonu tasarlandı ve üretildi.



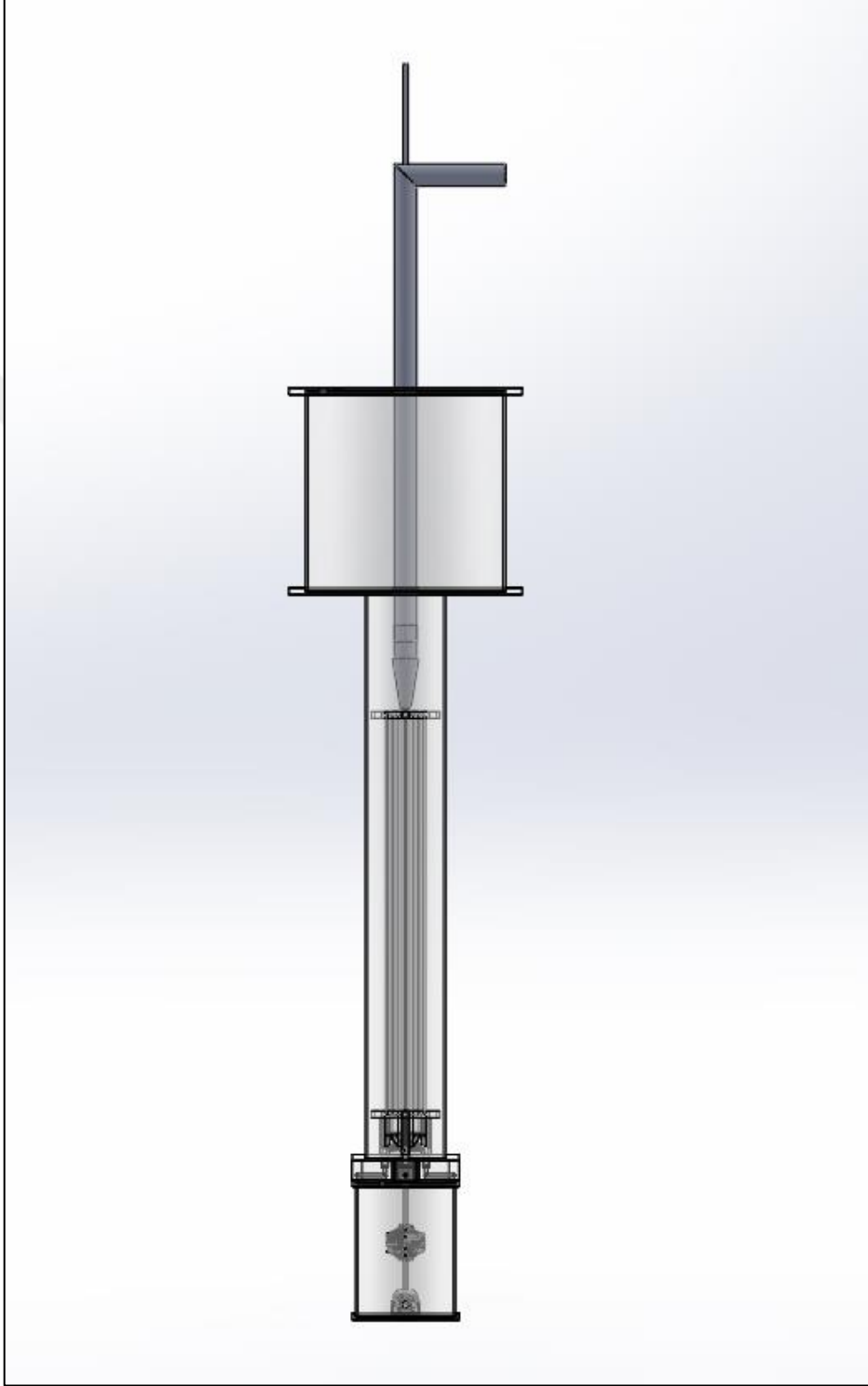
Şekil 4.15: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (22-11-2017)



Şekil 4.16: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (1. Versiyon)

4.1.6 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Montajı (2. Versiyon)

Üretilmiş olan ikinci versiyon jet loop membran biyoreaktör aşağıdaki şekillerde görüldüğü gibi birleştirilmiş ve denemelere devam edilmiştir (Şekil 4.18).



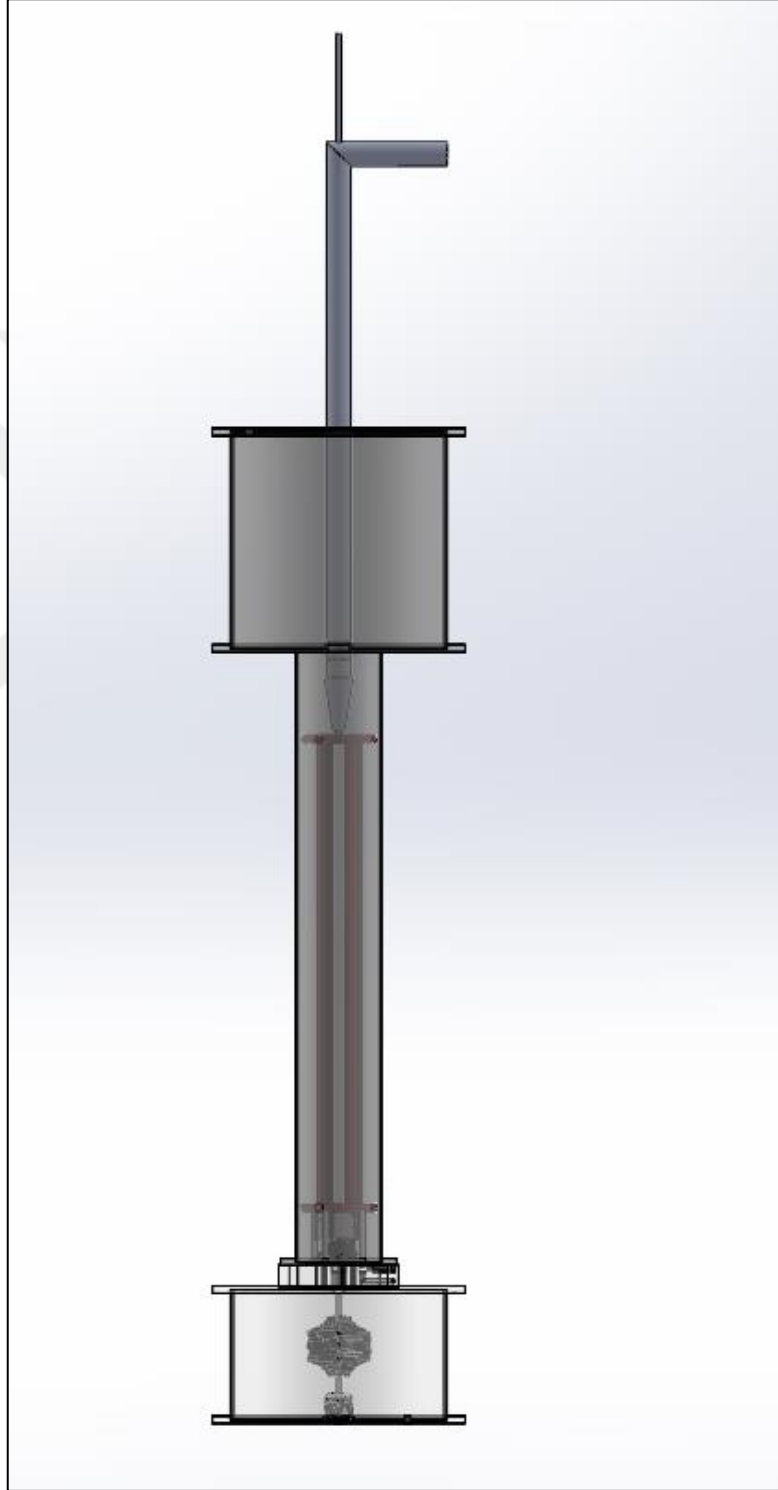
Şekil 4.17: Solidworks programı ile tasarlanmış olan reaktör (2. Versiyon)



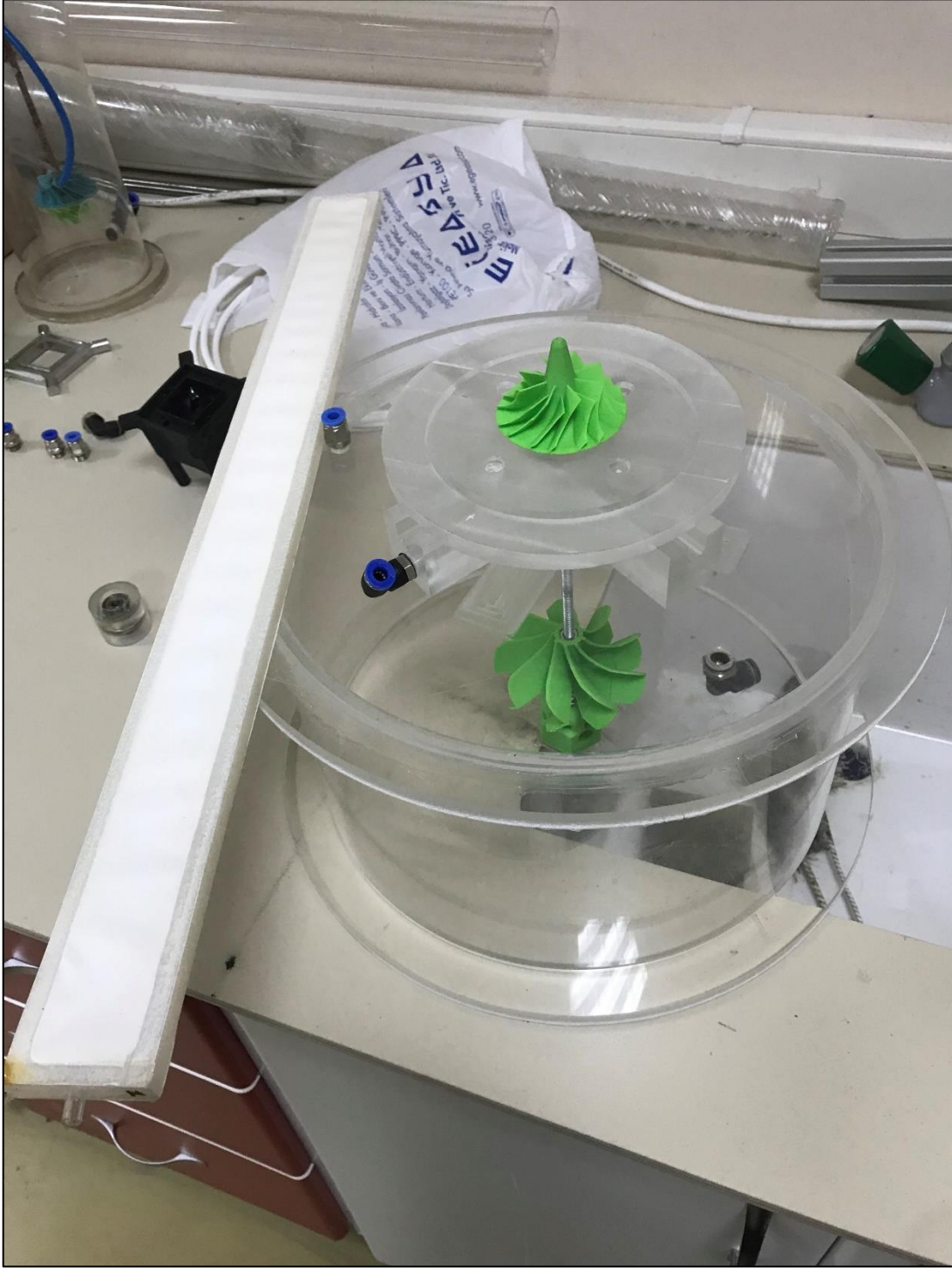
Şekil 4.18: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (2. Versiyon)

4.1.7 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Montajı (3. Versiyon)

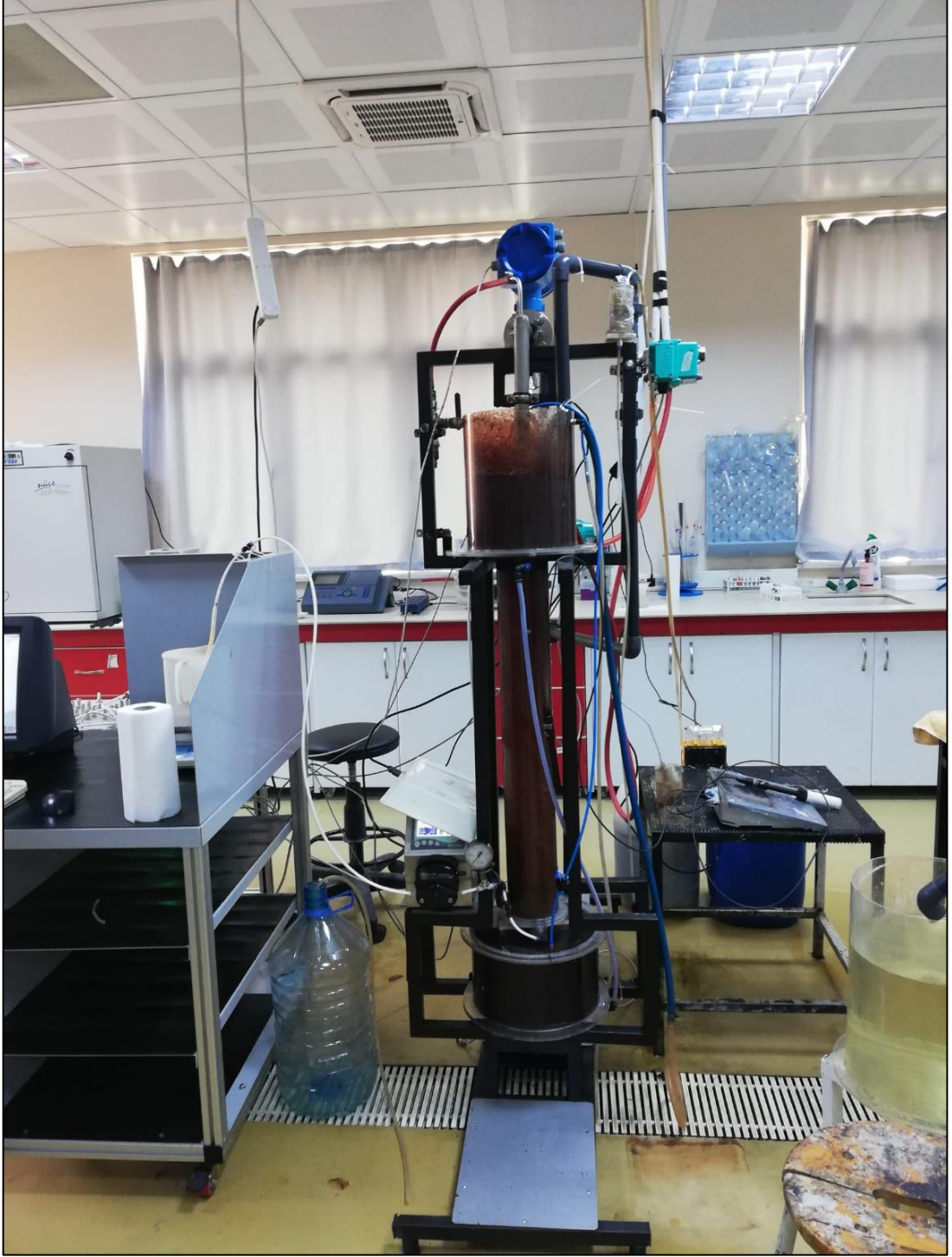
Üretilmiş olan üçüncü versiyon jet loop membran biyoreaktör aşağıdaki şekillerde de görüldüğü gibi birleştirilmiş ve denemelere devam edilmiştir. Otomasyon sisteminin de entegrasyonu tamamlanmıştır (Şekil 4.21).



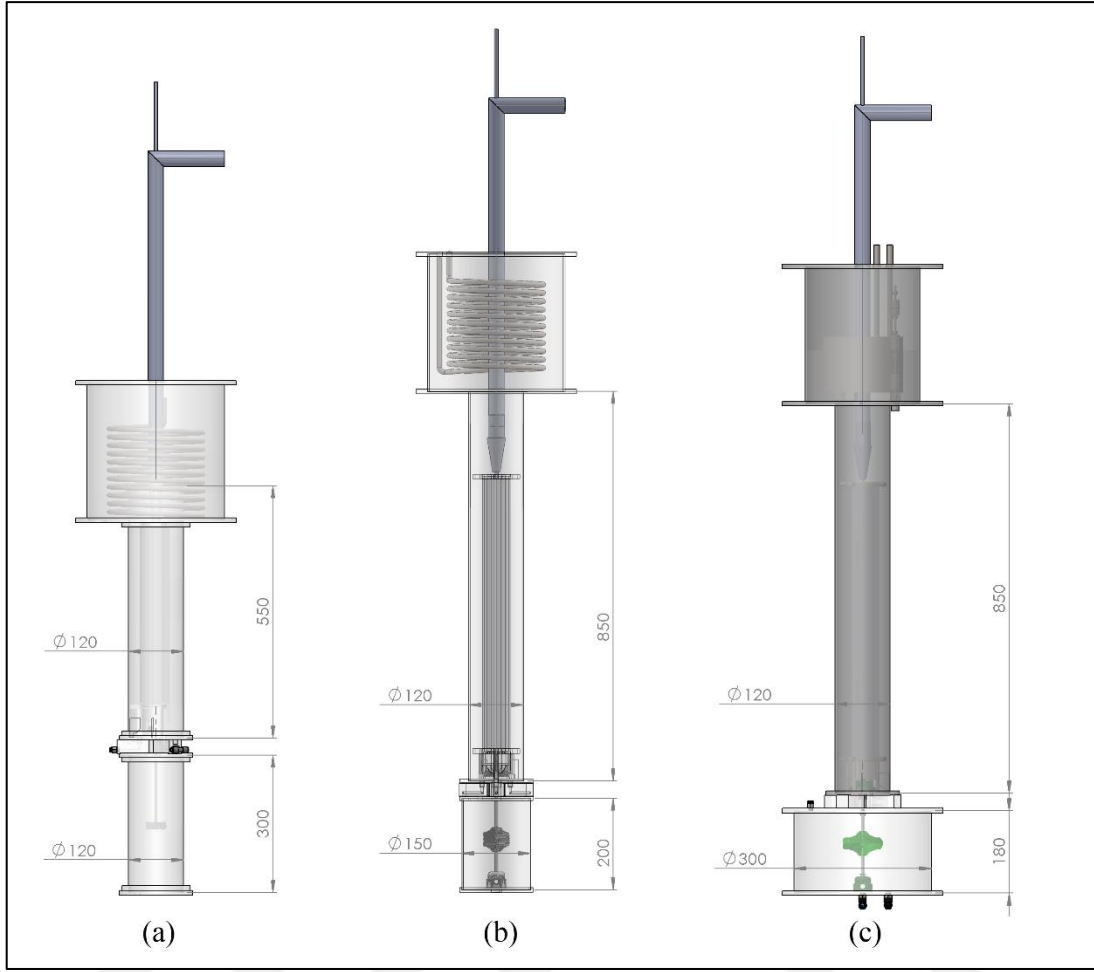
Şekil 4.19: Solidworks programı ile tasarlanmış olan reaktör (3. Versiyon)



Şekil 4.20: İmal edilmiş olan tabaka membran plakası, çarpma plakası olarak kullanılan türbin fanı ve karıştırmalı anaerobik bölge



Şekil 4.21: Üretilmiş olan parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilmiş olan Membran Draft Tüplü Jet Loop reaktör (MDJLR) (3. Versiyon)



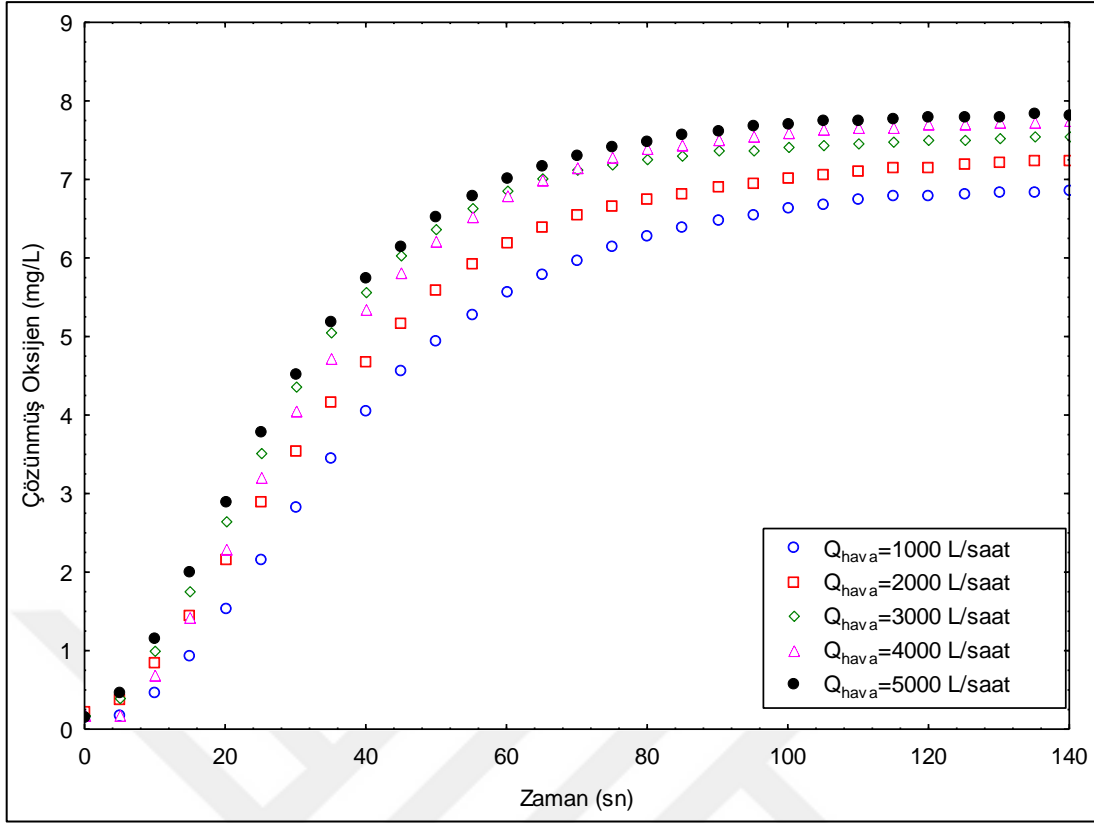
Şekil 4.22: MDJLR versiyonlarının boyutları (mm) [(a) ilk versiyon seramik membran draft tüplü, (b) ikinci versiyon seramik membran draft tüplü ve (c) PES membran draft tüplü]

4.2 Membran Draft Tüplü Jet-Loop Reaktörün Kütle Transfer Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilmiş olan membran draft tüplü jet-loop reaktörün (MDJLR) öncelikle oksijen transfer katsayısının bulunabilmesi için sistem şebeke suyu ile doldurulmuş (12 L) ve çözünmüş oksijen miktarını ölçebilmek içinde sisteme bir multiparametre ölçer (WTW inolab) bağlanmıştır. Sisteme öncelikle azot gazı verilerek reaktörün çözünmüş oksijen değeri sıfıra indirilmiştir. Daha sonra ise belirlenmiş olan debide hava sisteme verilmiş ve çözünmüş oksijen değerleri kaydedilmiştir. K_{La} ve C_s^* değerleri, reaktör içinde ölçülen ve zamana karşılık kaydedilen çözünmüş oksijen değerleri kullanılarak en uygun eğrileri veren Simplex ve Quasi-Newton metodu ile $\frac{C_s^* - C_t}{C_s^* - C_0} = e^{-K_{La}t}$ ifadesinden hesaplanmıştır. Şekil 4.23, bu metotla C_s^* ve K_{La} değerlerinin hesaplanışına ait bir örnek olarak verilmiştir.

Su ve havanın tam bir sirkülasyonunun sağlanabilmesi için sıvı hızının kabarcıkların nihai yükselme hızından belirli bir hava debisinde büyük olması gerekmektedir. Jet-loop reaktörlerde çevrimin (loop) oluşabilmesi su jetinin reaktörün içerisine sürüklediği hava kabarcıklarının emme tüpü boyunca (draft tüpünün tabanına kadar) aşağı doğru zorlanarak emme tüpünün altından yukarıya çıkması sağlanmalıdır. Hava ve su fazlarının çevrimi için gerekli kritik sıvı hızı (verilen bir gaz debisindeki çevrim için gerekli minimum sıvı jet hızı), hava hızı ve draft tüpü kesit alanının artışıyla artmaktadır. Sabit bir draft tüpü kesit alanında gaz debisi artışıyla kritik sıvı hızında meydana gelen artışın, kabarcıkların nihai yükselme hızındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Aksi halde hava kabarcıkları kritik su hızının altında draft tüpü içerisinde kendiliğinden yukarı doğru yükselmektedir. Sonuç olarak artan hava debisi ile hava kabarcıklarının nihai yükselme hızları artacağından, çevrimin tam oluşması için jetin kinetik enerjisinin kabarcıkların nihai yükselme hızını aşacak büyüklükte bir sıvı hızı üretmesi gerekmektedir.

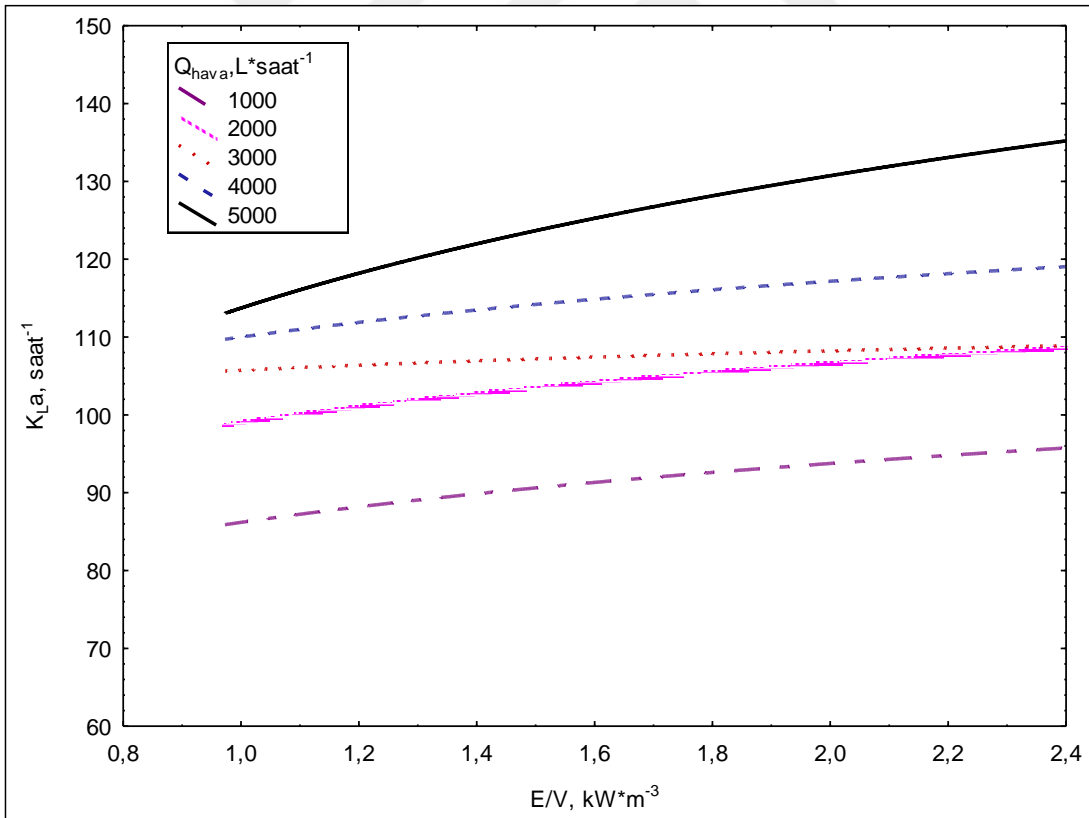
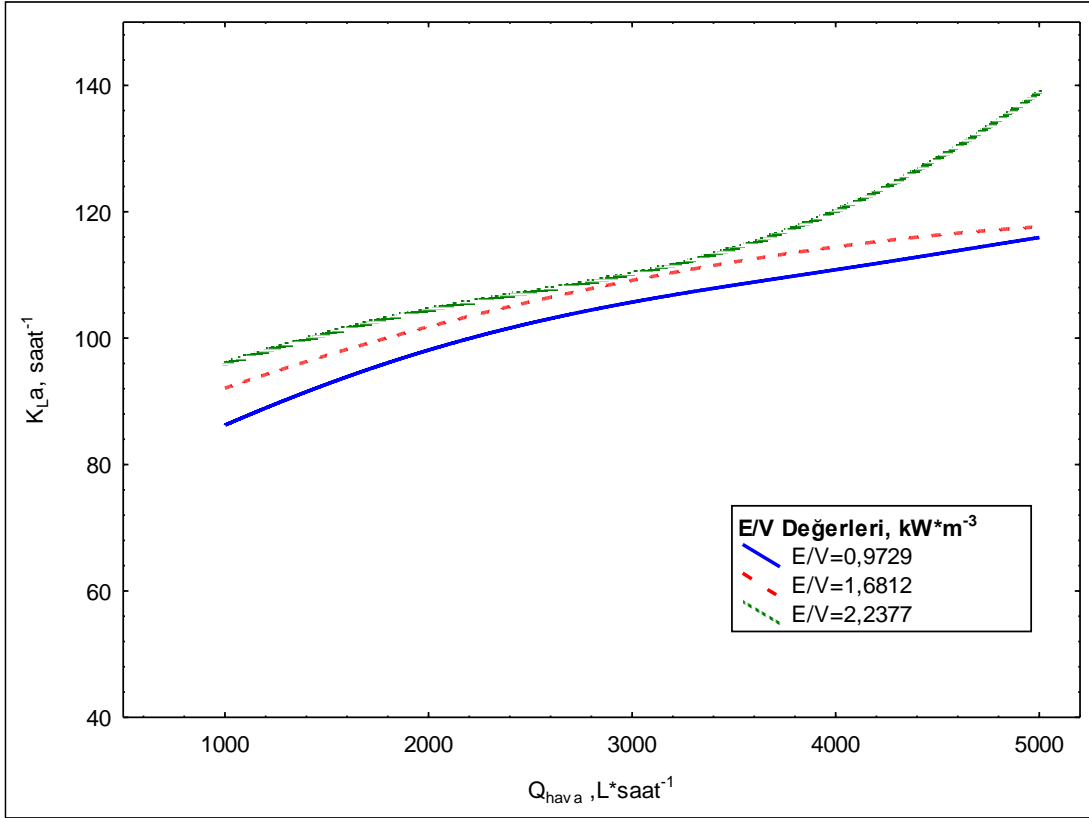
Membran draft tüplü jet loop reaktörün güç tüketim hızı püskürtme başlığının (nozzle) suyun geçtiği kesit alanına bağlı olarak sıvı jetinin kinetik enerjisi cinsinden hesaplanmaktadır. Kütle transfer denemeleri 1000-5000 L.saat⁻¹ hava debisi, 2000-3300 L.saat⁻¹ su debisi aralığında gerçekleştirilmiştir. Püskürtme başlığının (jet nozzle) çıkışında sağlanan sıvı debilerinin ürettiği enerji ise 0,498-2,237 kW.m⁻³ arasında hesaplanmıştır. Bu koşullarda K_{La} değerlerinin Q_{hava} , ve E/V ile değişimleri Şekil 4.24'de gösterilmektedir.



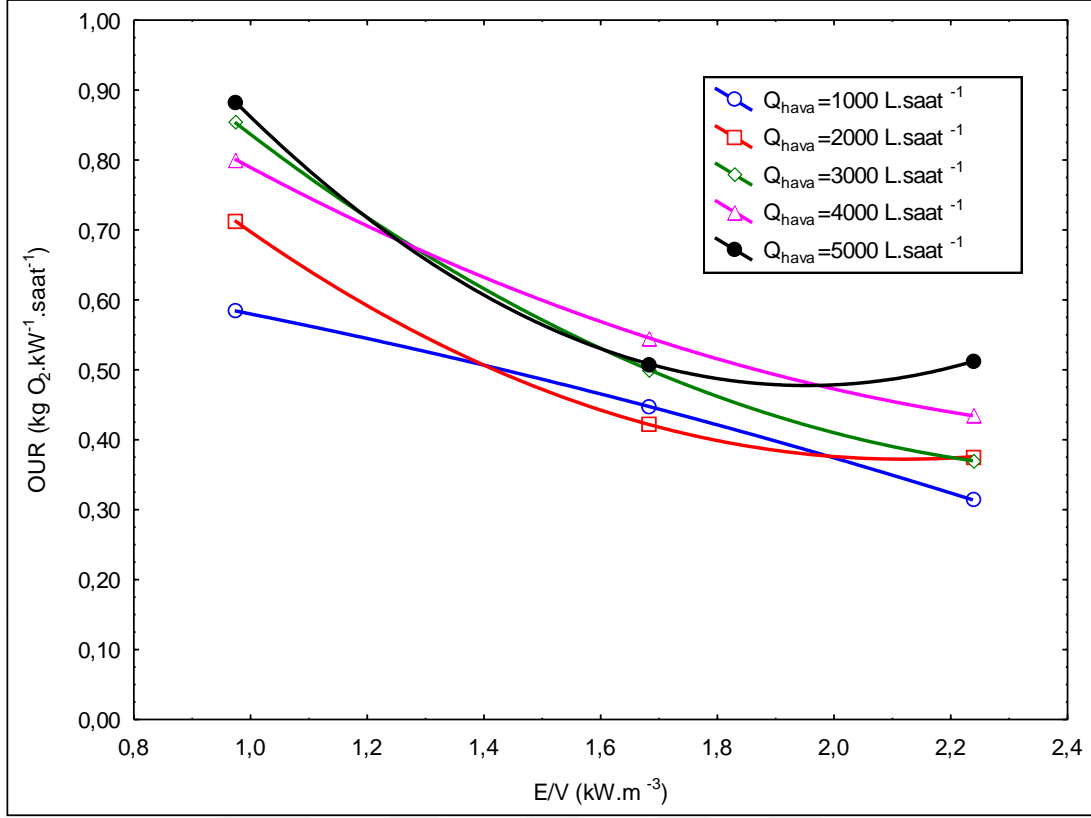
Şekil 4.23: Deney sisteminin K_{La} ve C_s^* değerlerini hesaplamak için zamana dayalı çözülmüş oksijen değerlerinin değişimini gösteren veriler ($T=20\text{ }^\circ\text{C}$; $E/V=1,68\text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$)

Sıvı hızının artması ile sistemin birim hacmi başına verilmesi gereken güç de artmaktadır. Sirkülasyon pompasıyla sağlanan ve püskürtme başlığı (jet nozzle) ile reaktöre iletilen güç, sistemde aşağıdaki mekanizmalar ile tüketilmektedir:

- Kabarcıkların reaktör içerisinde daha büyük ara yüzey alanı sağlamak amacıyla iyice dağıtılması gücün bir bölümü ile sağlanmaktadır.
- Bir bölümü de reaktörde türbülans oluşturmaktadır.
- Üretilen gücün diğer bir bölümü ise hava kabarcıklarını reaktörün tabanına ulaştırmak için sıvı momentumu oluşturmak da kullanılmaktadır.



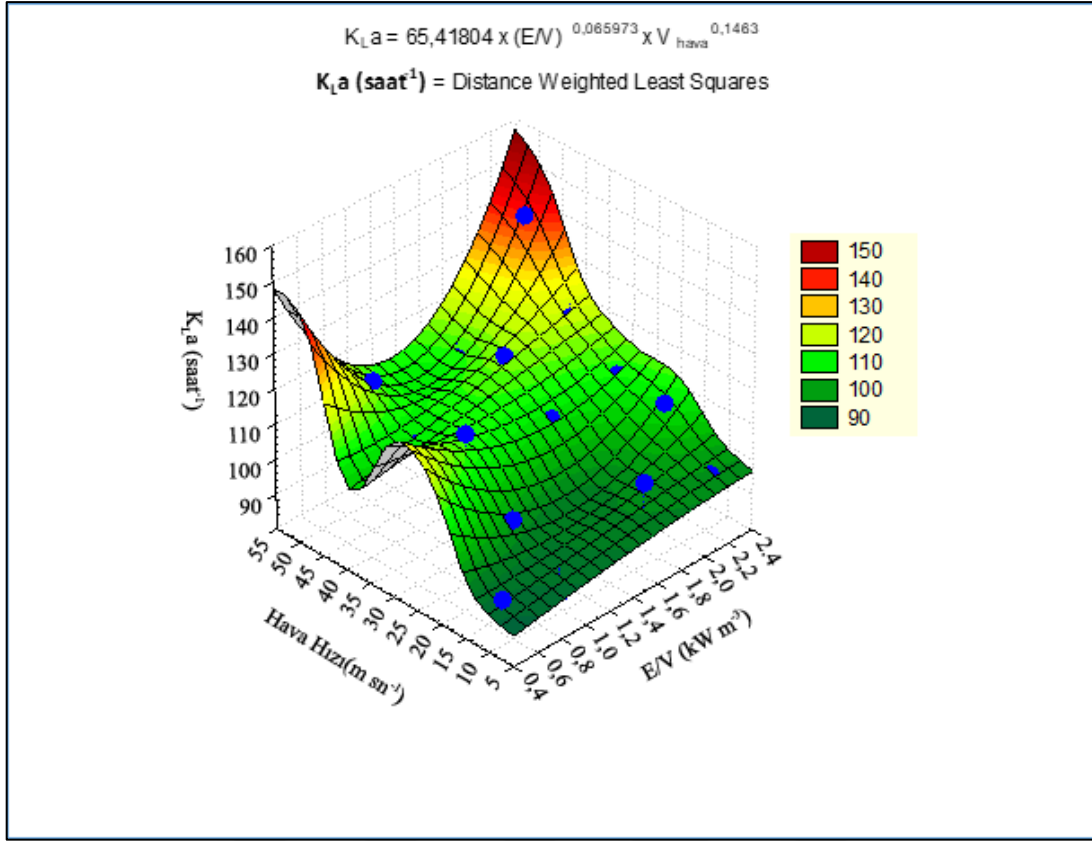
Şekil 4.24: K_{La} değerlerinin E/V ve Q_{hava} değerleri ile değişimi



Şekil 4.25: Oksijen Tüketim Hızının (OUR) E/V değerleri ve Q_{hava} ile değişimi

Sağlanan güç arttıkça sıvı jeti ile sisteme giren hava kabarcıkları daha küçük boyutlara parçalanmakta ve hava kabarcıkları reaktör içerisinde daha homojen olarak dağılmaktadır. Aynı zamanda da sıvı jet hızının artışı ile emme tüpünün girişinde oluşan jet bölgesinin emiş gücü de artmaktadır. Artan jet bölgesi emiş gücü nedeniyle emme tüpünü geçerek emme tüpü ile reaktör arasında kalan bölgede yükselen sıvı hızının artması sistemin birim hacmi başına verilmesi gerekli gücün de artması anlamına gelmektedir.

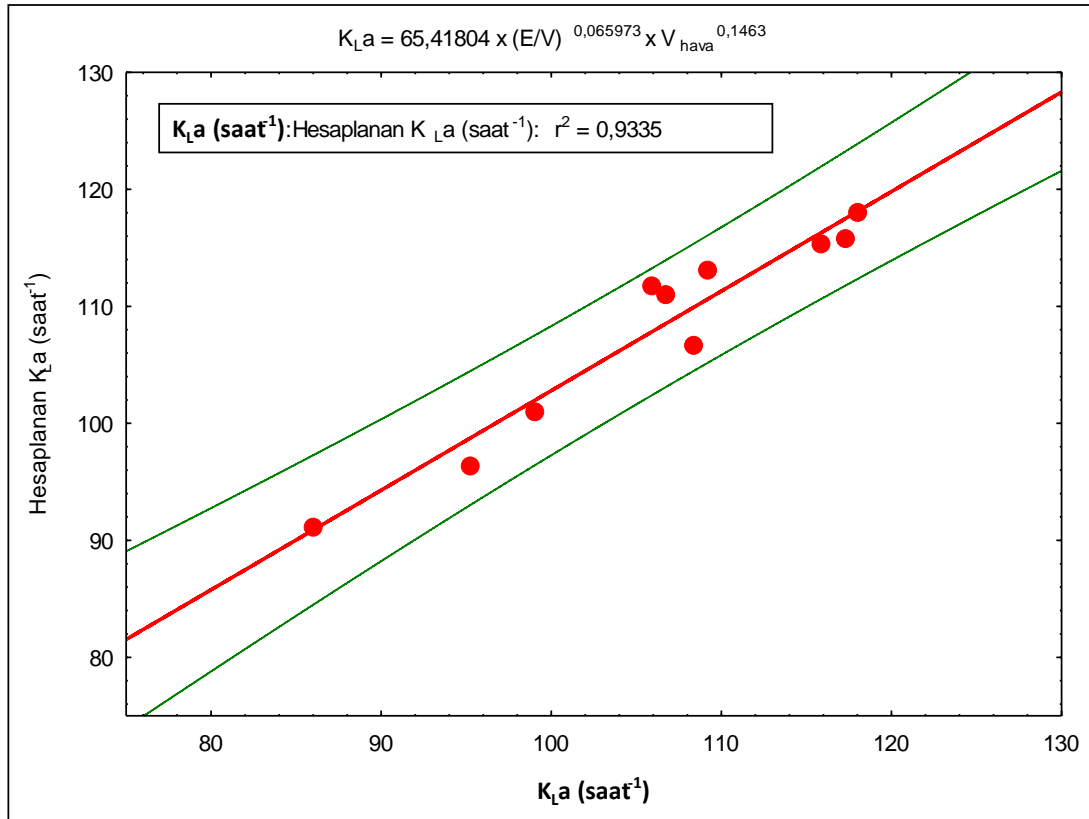
Kütle transfer katsayısı K_{La} 'nın artışı, reaktörlerin ya spesifik arayüzey alanı (a) değerinin ya da gaz-sıvı ara yüzey kütle transfer katsayısı (K_L) değerinin artışı ile gerçekleşmektedir. Çift akımlı püskürtme başlığı ile sisteme giren hava kabarcıklarının boyutlarının küçülmesine güç değerinin artması sebep olmaktadır. Böylece su ile hava kabarcıkları arasındaki etkin yüzey alanının (a) artmasına neden olmaktadır. Spesifik ara yüzey alanının artması, K_{La} 'daki artışın büyük oranını oluşturmaktadır. Klasik havalandırıcı cihazlardan 25-125 kat daha yüksek oksijen transferi Jet loop reaktörler vasıtası ile sağlanabilmektedir [9].



Şekil 4.26: K_{La} 'nın E/V ve gaz debisi ile değişimi

K_{La} 'nın E/V ve Q_{hava} değerlerine göre değişimi incelendikten sonra bu değişkenlere göre nonlineer olarak çözümü yapıldığında Şekil 4.26.'te gösterilen eşitlik ve katsayılar elde edilmiştir. K_{La} değerleri 86 ile 139 saat^{-1} arasında değişmektedir. Bu üç boyutlu grafik incelendiğinde K_{La} 'nın gaz debilerinin ve E/V değerlerinin artışıyla artmakta olduğu görülmektedir. Ancak gaz debilerindeki artış ile gerçekleşen K_{La} artışı E/V değerlerindeki artış ile meydana gelen artıştan daha baskın olmaktadır. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile oldukça iyi uyum göstermektedir [101].

0,498-2,237 kW.m^{-3} aralığındaki E/V ve 1000-5000 L.sa^{-1} arasında seçilen Q_{hava} değerleri için kurulan model yardımıyla hesaplanan ve deneylerde ölçülen K_{La} değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.27'te gösterilmektedir. Çalışma sırasında ölçülen ve modele göre hesaplanan K_{La} arasındaki ilişkinin statiksel analizinden R^2 değeri 0,93 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.27'den de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen K_{La} değerleri arasındaki uyum oldukça yüksektir (%7'lik bir regrasyon bandı mevcuttur).



Şekil 4.27: Reaktördeki K_{La} 'nın, E/V ve gaz debisi ile ilişkisi kullanılarak hesaplanan ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması

Çalışma ile elde edilen veriler sonucunda hesaplanmış olan minimum ve maksimum K_{La} değerlerinin literatürdeki yapılmış olan çalışmalar ile karşılaştırması Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Farklı reaktör tiplerine ait K_{La} değerleri

Reaktör tipi	Minimum K_{La} (saat ⁻¹)	Maksimum K_{La} (saat ⁻¹)	Referans
JLMBR	101	280	[81]
Dış çevrimli hava kaldırmalı reaktör	18	100	[102]
Hava kaldırmalı MBR	18	65	[103]
Batık MBR	2,82	26,88	[104]
Ajite gaz-sıvı kolon reaktörü	6,48	848,88	[105]
Jet-loop nitrifikasyonlu MBR	36	72	[106]
Hava kaldırmalı reaktör	36	252	[107]
İçsel hava kaldırmalı reaktör	10,8	540	[108]
Sirkülasyona zorlanmış loop reaktör	28,8	180	[109]
MDJLR	86	139	Bu çalışma

4.3 Mezbaha Atıksularının Arıtılması

4.3.1 Mezbaha Atıksuyunun Karakterizasyonu

T.C. Bigadiç Belediyesi Mezbahasından atıksu temin edilmiştir. Mezbahanın arıtma tesisinin giriş ızgara yapısının çıkışından alınan atıksuya karakterizasyon (Çözünmüş KOİ (ÇKOİ), Toplam KOİ (TKOİ), Askıda Katı Madde (AKM), Toplam Fosfor (TF), Amonyum Azotu, Nitrat Azotu ve Toplam Azot (TA)) parametreleri için analizler laboratuvara getirilir getirilmez yapılmıştır. Diğer parametrelerin (BOİ, toplam katı madde, yağ-gres) ölçümleri ise aralıklarla yapılmıştır.

Atıksuyun karakterizasyon değerleri ve istatistiksel sonuçları Tablo 4.2’de gösterilmektedir. Verilerin istatistiksel analizleri SPSS 11.5.0 programı kullanılarak yapılmıştır. Kirlilik parametrelerinin konsantrasyonlarının oldukça salınım gösterdiği yapılan karakterizasyon çalışması sonucunda görülmüştür. Yüklemelede salınımların olmasına konsantrasyonlardaki bu farklılıklar neden olmuştur. Klasik sistemlerin stabil şartlarda işletilmesi açısından bu durum sorun teşkil etmektedir. Ancak MDJLR sistemi bu salınımları son derece başarılı bir şekilde tolere etmiştir.

Tablo 4.2: Atıksuda ölçülen parametreler ve değerleri

Parametre	Konsantrasyon (mg.L ⁻¹)			
	En yüksek	En düşük	Ortalama	Standart Sapma
Çözünmüş KOİ	6565,80	605,34	2726,96	1036,59
Toplam KOİ	6691,20	626,45	3099,82	1208,05
ÇKOİ/TKOİ	1,00	0,57	0,87	0,10
BOİ	5145,00	325,00	2173,00	627,12
Askıda Katı Madde	520,00	35,00	158,91	94,55
Toplam Katı Madde	13635,00	310,90	2688,30	2156,27
Toplam Azot	632,00	48,00	213,67	163,82
Amonyum Azotu	144,00	2,30	50,96	44,15
Nitrat Azotu	44,00	5,00	13,36	9,62
Toplam Fosfor	80	7	33	18
Yağ-Gress	387,50	21,4	124,7	99,84
pH	7,8	5,9	6,3	1,24

Mezbaha atıksuları genellikle ardışık işlemler ve proseslerden, kesikli olarak üretilirler. Bu sebeple üretilen atıksuların fiziksel (sıcaklık, debi, vb.) ve kimyasal özelliklerinde farklılıklar bulunmaktadır.

Ayrıca mezbaha atıksuyunun karakterizasyonu kesimi yapılan hayvanların beslenmesi, cinsi, türü, kesim mevsimi, vb. etmenlerle de değişmektedir (Tablo 4.3 ve Tablo 4.4).

Tablo 4.3: Mevsimlere göre atıksuyun KOİ parametresinin değişimi (İlkbahar-Yaz)

İLKBAHAR (2018)				
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Toplam KOİ (mg.L ⁻¹)	626,45	6565,80	3196,45	1637,45
Çözünmüş KOİ (mg.L ⁻¹)	605,34	4222,50	2480,05	1163,80
YAZ (2018)				
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Toplam KOİ (mg.L ⁻¹)	777,75	4953,55	2686,06	863,32
Çözünmüş KOİ (mg.L ⁻¹)	742,50	4223,25	2312,85	772,42

Tablo 4.4: Mevsimlere göre atıksuyun KOİ parametresinin değişimi (Sonbahar-Kış)

SONBAHAR (2018)				
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Toplam KOİ (mg.L ⁻¹)	879,83	6478,80	3242,94	1164,96
Çözünmüş KOİ (mg.L ⁻¹)	1382,05	6691,20	3060,21	1058,67
KIŞ (2018)				
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Toplam KOİ (mg.L ⁻¹)	1804,53	5212,00	3403,73	1090,57
Çözünmüş KOİ (mg.L ⁻¹)	1604,55	5052,40	3017,90	962,62

Literatürde bulunan ve mezbaha atıksularının karakterizasyonunu içeren diğer çalışmalarla kıyaslandığında bu çalışmanın daha kapsamlı olduğu görülebilir. Mezbaha atıksularının kimyasal özellikleri ile ilgili literatür özeti Tablo 4.5'te gösterilmektedir. Mezbaha atıksuları yüksek oranlarda azot, fosfor ve KOİ konsantrasyonuna sahip atıksulardır.

Tablo 4.5: Literatürde bulunan çeşitli mezbaha atıksularının kimyasal özellikleri

Endüstri	KOİ (mg.L ⁻¹)	BOİ ₅ (mg.L ⁻¹)	pH	Yağ (mg.L ⁻¹)	TKM (mg.L ⁻¹)	TAKM (mg.L ⁻¹)	Referans
Mezbaha	15900	4635	8,10			6400	[3]
Sentetik mezbaha	2305	1143	6,52				[31]
Mezbaha	6040			960		4200	[97]
Mezbaha	1494	658	7,8			19717	[110]
Mezbaha	16910	10172,5	7,28		16218	7267	[111]
Mezbaha	10604			1881	5162		[112]
Mezbaha	2080	1339	7			103,5	[113]
Mezbaha	2008	740	5,4			340	[114]
Mezbaha	2800	1150		170		760	[115]
Mezbaha	6691,2	5145	7,8	387,5	13635	520	Bu çalışma

4.3.2 MDJLR Sisteminin Biyolojik Arıtma hazırlanması

Mikroorganizmaların (biyokütlenin) iyi bir şekilde ortama alıştırılması, atık suların biyolojik metotlarla arıtımında son derece önemli ve de gerekli bir aşamadır. Çünkü biyolojik arıtım ünitelerinin verimleri, ortama iyi uyum sağlayamamış mikroorganizmalar tarafından olumsuz yönde etkilenmektedir. Reaktör içerisinde son derece ekstrem akış şartlarının meydana geldiği biyoreaktörlerde, özellikle jet loop reaktörler gibi, bu koşullara uyum sağlayabilecek mikroorganizma popülasyonlarının çoğaltılması arıtımın verimi açısından oldukça önemlidir ve bu süreç biraz daha uzun olabilmektedir. Aktif çamuru aşılama ve üretmek maksadı ile BASKİ İvrindi Eysel Atıksu Arıtma Tesisi'nin biyoreaktöründen (havalandırma havuzundan) alınan biyokütle Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bir tankta havalandırılmaya başlanmıştır. Bu biyokütlenin beslenmesi için çeşitli nütrientler ve organik maddeler ile hazırlanan bir besleme çözeltisi kullanılmıştır. Daha sonraki aşamalarda ise gerçek atıksu ile beslenmeye başlanmıştır.

Başlangıçta tankta 200 mg.L^{-1} civarında mikroorganizma bulunmaktaydı. 15 gün boyunca yapılan beslemelerden sonra ise bu tankın mikroorganizma konsantrasyonu 480 mg.L^{-1} değerine çıkmıştır. Bir ay sonra çoğaltılan bu biyokütle (aktif çamur) MDJLR aktarılmış ve sistem çalıştırılarak reaktördeki mikroorganizma konsantrasyonu 550 mg.L^{-1} 'ye kadar sistem kesikli olarak beslenmiştir. Bir hafta sonra ise sistem sürekli beslenmeye başlanmıştır.

4.3.3 MDJLR sisteminin KOİ giderme verimi

Biyokütlenin sistemin ekstrem şartlarına alıştırılması sağlandıktan sonra sürekli çalışmalara geçildi. Alınan atıksular o zaman dilimine ait işlem ve proseslerin özelliklerini taşımakta olduğunda atıksuların özelliklerinde çok yüksek salınımlar görülmüştür. Her seferinde yaklaşık olarak 180 L atıksu alınmış ve tükeninceye kadar sisteme direk beslenmiştir. Yaklaşık 1-2 günlük periyotlarda alınan atıksu su 200 L hacimli besleme tankına doldurularak debisi ayarlanabilir bir peristaltik pompa kullanılarak biyoreaktörün degazifikasyon haznesine aktarılmıştır. Sistemin çıkışı (deşarj) membran ünitesinden yani emme (draft) tüpünden gerçekleştirilmiştir. Çıkıştan günde 1-2 kez KOİ ölçümü alınmış ve değerlendirilerek o güne ait ölçüm sonucu olarak kaydedilmiştir. Reaktör hacminin yaklaşık 10 katı kadar sisteme atıksu beslenerek her besleme koşulu denenmiştir. Çünkü reaktör hacminin 3-5 katı atıksu devredilen sistemin dengeye rahatlıkla geldiği kabul edilir. Sisteme beslenen organik yükleme hızı alınan atıksuyun konsantrasyonuna bağlı olarak hesaplanmıştır.

MDJLR; 500 L.saat^{-1} hava debisine ve 32 m.s^{-1} sirkülasyon hızına sahip işletme şartlarında çalıştırılmıştır. Reaktördeki aktif çamurun sıcaklığı ısı değiştirici yardımıyla $23 \pm 2^\circ\text{C}$ değerinde sabit tutulmuştur. Çalışma boyunca aktif çamurun sürekli pH'sı ölçülerek 6,8-7,5 arasında dengelenmiştir. Membran ünitesinde emme basıncı 0,3 ile 0,8 bar arasında değiştirilerek çalışılmıştır. Çalışma boyunca beslenen atıksuya seyreltme yapılmamış ve atıksu direk olarak debi ayarlı bir peristaltik pompa ile sisteme verilmiştir. Besleme yapılan atıksudan hayvansal yağ ve partikül maddelerin sıyırılması mekanik olarak sağlanmıştır.

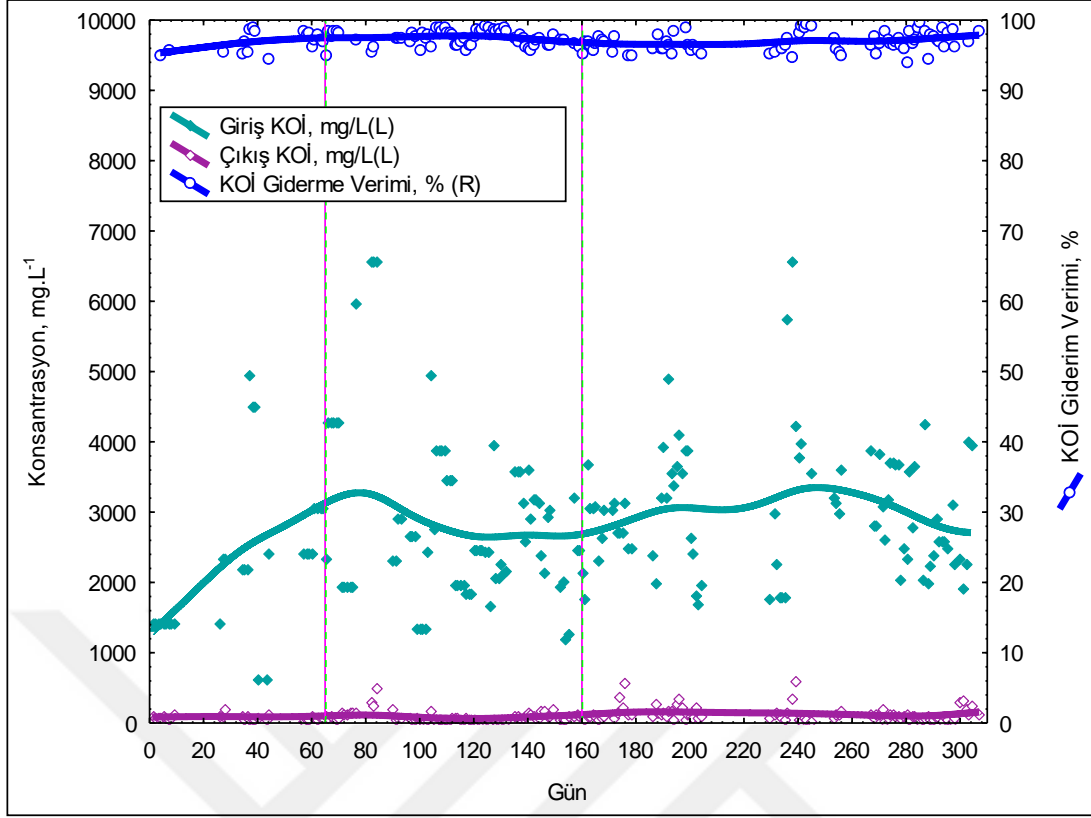
MDJLR sistemine yüksek debilerde veya yüksek konsantrasyonlarda atıksu verildiği durumlarda reaktörde aşırı köpürmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle atıksuyun yüksek konsantrasyonlu geldiği zamanlar meydana gelen aşırı köpürmeler, büyük miktarlarda aktif çamur kaçışlarına ve kayıplarına sebep olmuştur. Biyokütle kaybını önlemek amacıyla degazifikasyon ünitesi izole edilmeye çalışılmasına karşın belli dönemlerde önüne

geçilememiştir. Ancak besleme şartlarına aktif çamur alışıncı köpürmelerin kesildiği gözlenmiştir.

Reaktör içerisinde zamanla biyofilm oluşumu gözlenmiştir. Soğutma ünitesinin üzerinde ve de-gazifikasyon tankının cidarlarında en yoğun şekilde biyofilm oluşumu meydana gelmiştir. Yüksek kesme kuvvetlerinin meydana geldiği reaktör cidarında da zamanla biyofilm oluşumu gözlenmiş, ancak oluşan biyofilm tabakası da kısa sürede koparak sirkülasyona katılmıştır. De-gazifikasyon haznesinin cidarlarında ve soğutucunun etrafında oluşan biyofilm kalınlığının bazı zamanlarda yer yer 2-3 mm'ye ulaştığı gözlenmiştir. Besleme KOİ konsantrasyonlarının yüksek olduğu ve/veya yüksek yükleme şartlarında biyofilm oluşumunun arttığı dikkat çekmiştir. Bu sonuç aşağıdaki gibi yorumlanabilir: Öncelikle; yüksek yüklemelerde ortamda fazlaca organik madde olması nedeniyle biyofilm formundaki bakteriler kolayca besin bulabilmişler ve tutunarak çoğalmaya devam etmişler ve buna bağlı olarak biyofilm kalınlığı artmıştır. Öte yandan düşük yüklemeler de ise ortamda az besin olması nedeniyle biyofilm formundaki aktif biyokütle besin bulamadığı ve biyofilmin tutunduğu yüzeye kadar besin ulaşamadığı için orada mikroorganizmalar ölmeye başlamış ve böylece kopmalar daha da kolay olmuştur.

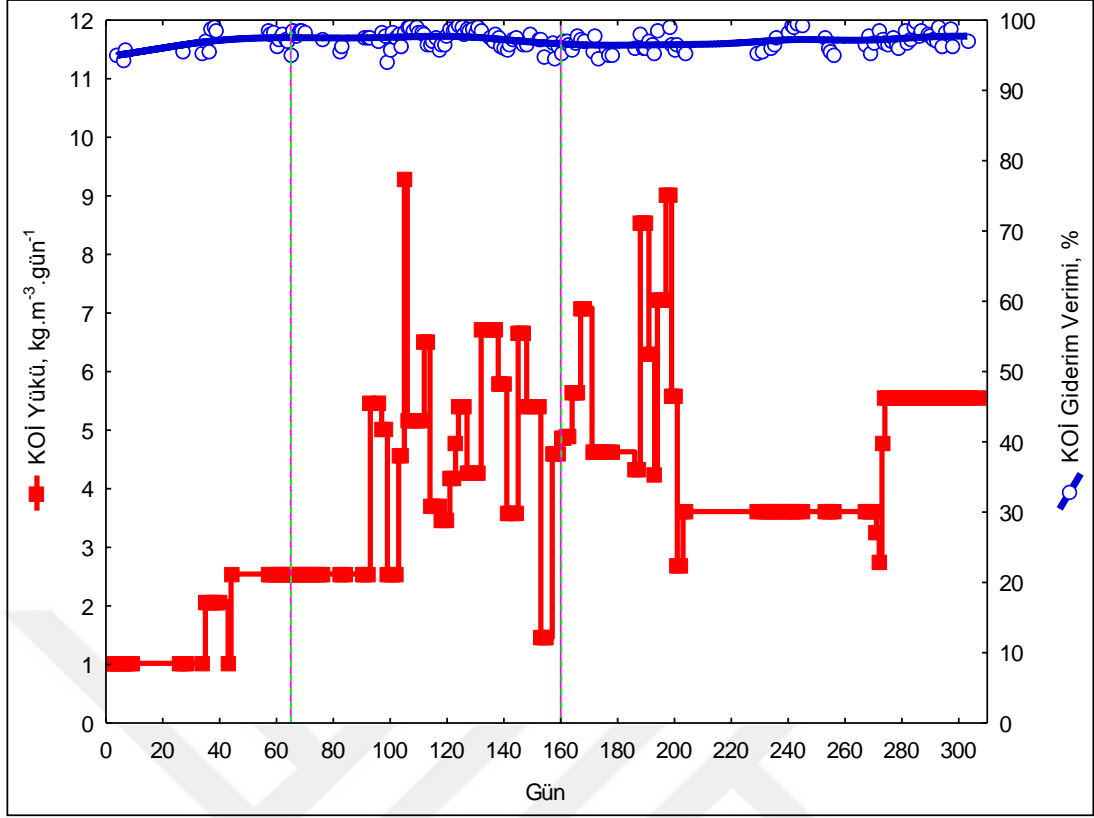
Kalınlığı iyice artan biyofilm tabakasının tutunma yüzeyine yakın bölgelere besin ve çözünmüş oksijen ulaşamamaktadır. Böylece cidarda ve yakın mesafelerde önce anoksik sonra da anaerobik koşullar meydana gelmiş ve bu bölgelerde hücre ölümleri gerçekleşmiştir (biyofilm tabakasının zamanla siyah bir renk almasının nedeni de bu ölümler ve anaerobik koşullara geçiştir). Bu aşamadan sonra ise biyofilmler reaktördeki kesme kuvvetlerinin de etkisiyle kopmakta ve sistemde süspanse hale gelmiştir. Bu yoğun biyofilm oluşumu nedeniyle jet-loop reaktörün hibrit (süspanse-biyofilm) bir sistem gibi davrandığı düşünülebilir.

Sistemde ilk 65 gün boyunca seramik membran draft tüpü modülü (membran yüzey alanı:0,186 m²), 66. ve 160. günler arasında da seramik membran draft tüpü modülü (membran yüzey alanı: 0,278 m²) kullanılmıştır. 161. günden sonra ise polietersülfon (PES) membran draft tüpü modülü (membran yüzey alanı:0,1872 m²) çalışma bitene kadar kullanılmıştır. Çalışma süresince sistemden elde edilen arıtma verimlerinin karşılığı olan KOİ giriş konsantrasyonları Şekil 4.28'de gösterilmektedir.



Şekil 4.28: Giriş KOİ konsantrasyonu ile KOİ giderim verimlerinin ilişkisi

Giriş KOİ değerine bağlı olarak sisteme beslenen hacimsel organik yükler değişmiştir. Çalışma süresinin tamamında sistemden %94'nin üzerinde verim elde edilmiştir. Hatta sistemin dengede olduğu sürelerde ve stabilitenin kurulduğu zamanlarda sistemden %97-99 arasında verimler elde edilmiştir. Atıksuyun özellik ve konsantrasyonunda büyük değişimler olduğu dönemlerde arıtma verimlerinde çok kısa süreli değişimler gözlenmiştir. Çalışmada sistemden elde edilen arıtma verimlerine karşılık gelen hacimsel organik (KOİ) yüklemeleri Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Direk endüstriden gelen şekli ile beslendiği için sisteme verilen hacimsel organik yükler giriş KOİ değerleri ile değişmiştir. Çalışma başlangıcında yükleme değeri $1,02 \text{ kg.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$ iken ve bir süre sonra $2,5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$ 'e giriş KOİ değerine bağlı olarak çıkarılmıştır. Başlangıçta %94'lerde KOİ giderim verimi elde edilirken daha sonra %98'lere ulaşmıştır. Daha sonraki dönemlerde yükler azaltılıp artırılmıştır. 95. gün itibarıyla $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$ yük değerlerinin üstüne çıkmış ve sistemden %95-98 arası verim elde edilmiştir. 100-102 günleri arasında yükleme hızı $9,28 \text{ kg.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$ değerine ve 190-200. günler arasında ise $8,5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$ değerinde (gelen atıksuyun yüksek KOİ konsantrasyonundan dolayı) MDJLR sistemine organik yük verilmiş ve bu şartlarda %96-98 arıtma verimi elde edilmiştir.



Şekil 4.29: Sisteme verilen KOİ yükü ile KOİ giderim verimlerinin ilişkisi

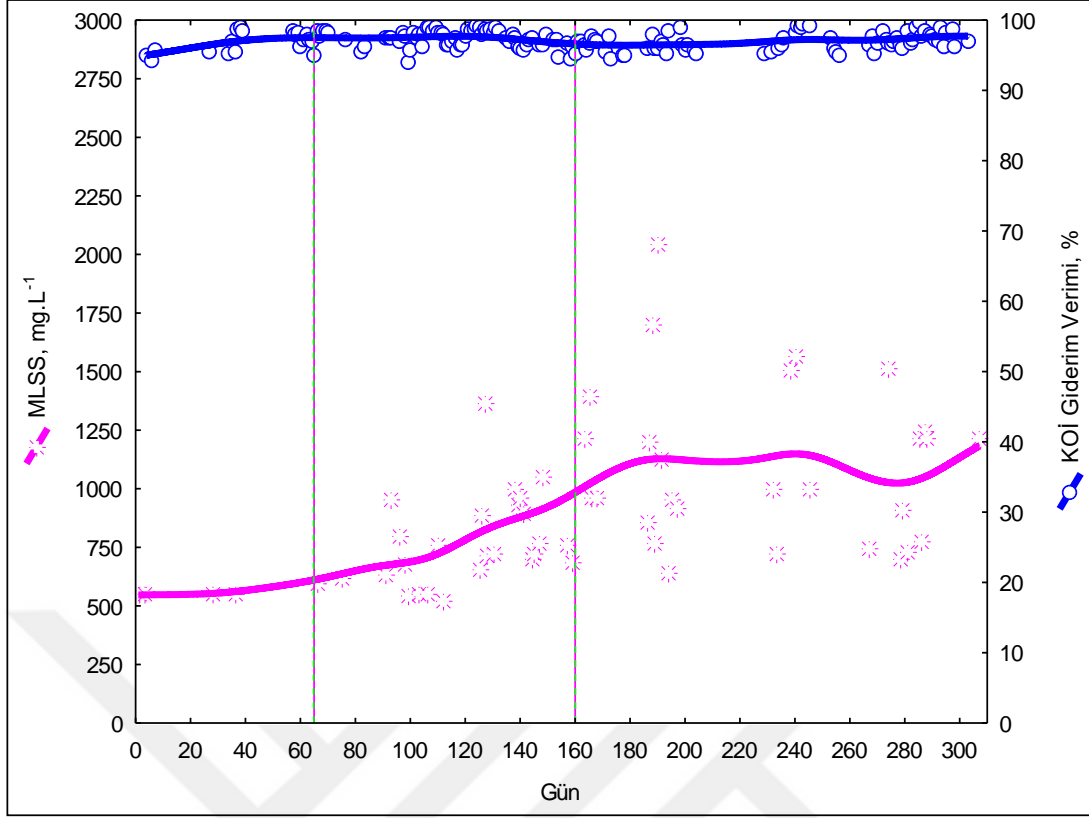
Şekil 4.29'dan da görüleceği gibi $1,02-9,28 \text{ kg.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$ değerleri arasında sisteme verilen KOİ yükleri değişmiştir. Buradan yüklemelerin oldukça salınım gösterdiği anlaşılabilir. Yüklerdeki salınımlar, besleme debisinin azaltılıp artırılmasından ve atıksuyun konsantrasyondaki değişmelerden kaynaklanmaktadır. Yüksek yüklerde dahi MDJLR sisteminden stabil çıkışlar, sisteme verilen yüklerde büyük salınımlar olmasına rağmen, alınabilmiştir. Bir başka deyişle giriş atıksuyundaki ve yüklerdeki yüksek dalgalanmaları MDJLR sistemi oldukça iyi bir şekilde tolere edebilmiş ve hemen hemen bütün koşullar altında KOİ giderme verimi %94'ün üzerinde gerçekleşmiştir.

Biyolojik arıtım ünitelerinde MLSS konsantrasyonu ile arıtma verimi arasında doğru orantı vardır. Sistemde ne kadar fazla aktif biyokütle tutulabilirse arıtma verimi de o derece yüksek olmaktadır. Ancak klasik aktif çamur proseslerinde yeterli oksijenin temin edilememesi, çökeltme sorunları ortaya çıkarması nedeniyle yüksek biyokütle konsantrasyonlarına çıkılamaz.

Şekil 4.30'da MDJLR sisteminde çalışma süresince ölçülen MLSS konsantrasyonları gösterilmektedir. Çalışma süresince MLSS konsantrasyonu $500 \text{ ile } 2500 \text{ mg.L}^{-1}$ arasında

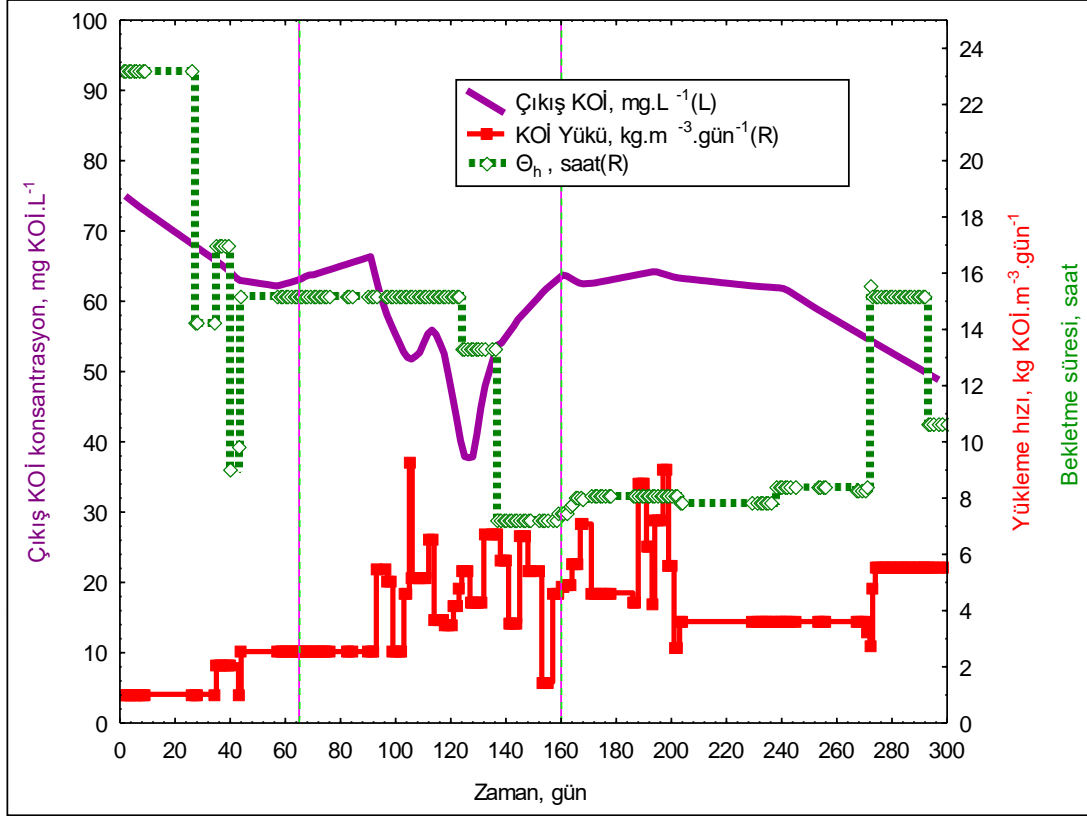
değişmiştir. MLSS konsantrasyonlarındaki değişimler genellikle bekletme süresi, çamur yaşı ve hacimsel yüklere bağlı olarak değişmekle beraber aşırı köpürmelerin olduğu dönemlerde aktif çamur kayıpları da etkili olmuştur. Sistemde çamur yaşı artırılarak yüksek MLSS değerlerine ulaşılabilmiştir. Pratikte biyolojik arıtma sistemlerinin havalandırma ünitelerinde, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun 1.5 - 4 mg.L⁻¹ arasında olması tavsiye edilmektedir [116]. Klasik sistemlerde, düşük sirkülasyonlar ve sistemde çözülmüş oksijen konsantrasyonunun sıfıra düştüğü ölü bölgelerin meydana gelmesi nedeniyle çözülmüş oksijen değerinin 2 mg.L⁻¹ civarında olması ve özellikle 2 mg.L⁻¹ den düşük olmaması istenir. Çözülmüş oksijenin 2 mg.L⁻¹'nin altına düşmesi durumunda sistem performansının son derece olumsuz etkilendiği bilinir. Denemeler sırasında MDJLR sisteminde özellikle yüksek organik yüklemeler ve besleme konsantrasyonlarında çözülmüş oksijenin 1 mg.L⁻¹'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak çözülmüş oksijen değerinin 1 mg.L⁻¹'ye düştüğü zamanlarda dahi mikroorganizmaların ve sistemin performansının olumsuz bir şekilde etkilenmediği tespit edilmiştir. MDJLR sisteminde çok yüksek sirkülasyonlar sonucunda elde edilen son derece yüksek karışım ve yüksek K_La nedeniyle mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu oksijenin sürekli olarak temin edilmesinin bu sonucu doğurduğu düşünülmektedir. Yapılan bir çalışmada jet loop biyoreaktördeki çözülmüş oksijen konsantrasyonunun 0,1 mg.L⁻¹ değerine düşmesi ve sonra 2,0 mg.L⁻¹ ye çıkarılması sırasında hem mikroorganizma hem de sistem performansının etkilenmediği görülmüştür [117]. Sonuç olarak bu sistemde çözülmüş oksijen reaktörde homojen olarak dağılmakta ve ölü bölgeler meydana gelmemektedir.

Bu çalışmada MDJLR sisteminde yüksek MLSS konsantrasyonlarına çıkılamamıştır. Bunun iki önemli nedeni bulunmaktadır. Birincisi alınan atıksu doğası gereğince aşırı köpürmelere neden olmaktadır. Köpürme nedeniyle de sistemden çamur kaçakları çok olmaktadır. İkincisi membran ünitesinden yeterince akı alınamamıştır. Bu nedenle çamur yaşı da artırılmamaktadır. Çamur yaşı artırılmadığı için sistemde yüksek çamur konsantrasyonlarına ulaşılammıştır. Öte yandan sistemden oldukça yüksek arıtma verimleri elde edilmiştir. Bunun nedenine ise sistemde son derece aktif bir biyokütlenin tutulması olarak kanaat edilmiştir.



Şekil 4.30: MLSS konsantrasyonu ile arıtma verimlerinin değişimi

Θ_c değerleri 17 ile 189 saat arasında çalışma sürecinde değiştirilmiştir. Sistemden çekilen membran akısı ile çamur yaşı doğrudan ilişkilidir. Yükleme hızı besleme debisi ile ayarlanmıştır. Besleme debisi ile membran çıkış debisi arasındaki fark kadar bir debi ile sistemden çamur atılmıştır. Çamur yaşını belirleyen parametre dolayısıyla membran akısı olmuştur. Denemelerde çok yüksek Θ_c değerlerine çıkılamamıştır. Bunun yanı sıra 17 saat ve üzerindeki çamur yaşlarında yüksek bir KOİ giderim performansı elde edilmiştir. Sistemin KOİ çıkış konsantrasyonları ve bekletme süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.31'de verilmektedir. Sistemden her şartta 100 mg.L^{-1} değerinin altında KOİ çıkış konsantrasyonları elde edilmiştir.



Şekil 4.31: Hidrolik kalış sürelerinin KOİ çıkış konsantrasyonlarına etkisi

Anaerobik prosesler mezbaha (et kesim endüstrisi) atıksularının arıtımında son yirmi yıldan beri oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tablo 4.6 bu uygulamalara ait literatür özetini içermektedir. $0,54 - 18,6 \text{ kg KOİ.m}^{-3}.\text{gün}^{-1}$ organik yükleme arasında değişen koşullarda etkili bir şekilde yüksek hızlı anaerobik reaktörler kullanılmıştır. Tablo, bu çalışma ile geliştirilen aerobik bir sistem olan MDJLR'den elde edilen performans değerlerini de göstermektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde membran bağlanmış olan jet loop biyoreaktörün, mezbaha atıksuları gibi önemli çevre kirliliğine yol açabilen gıda sanayi atıksularının arıtılmasında son derece önemli bir alternatif sunacağı değerlendirilebilir.

Tablo 4.6: Literatürden seçilmiş olan mezbaha atıksularının arıtıldığı ve değişik arıtım tekniklerinin kullanıldığı çalışmalarının performanslarının karşılaştırılması

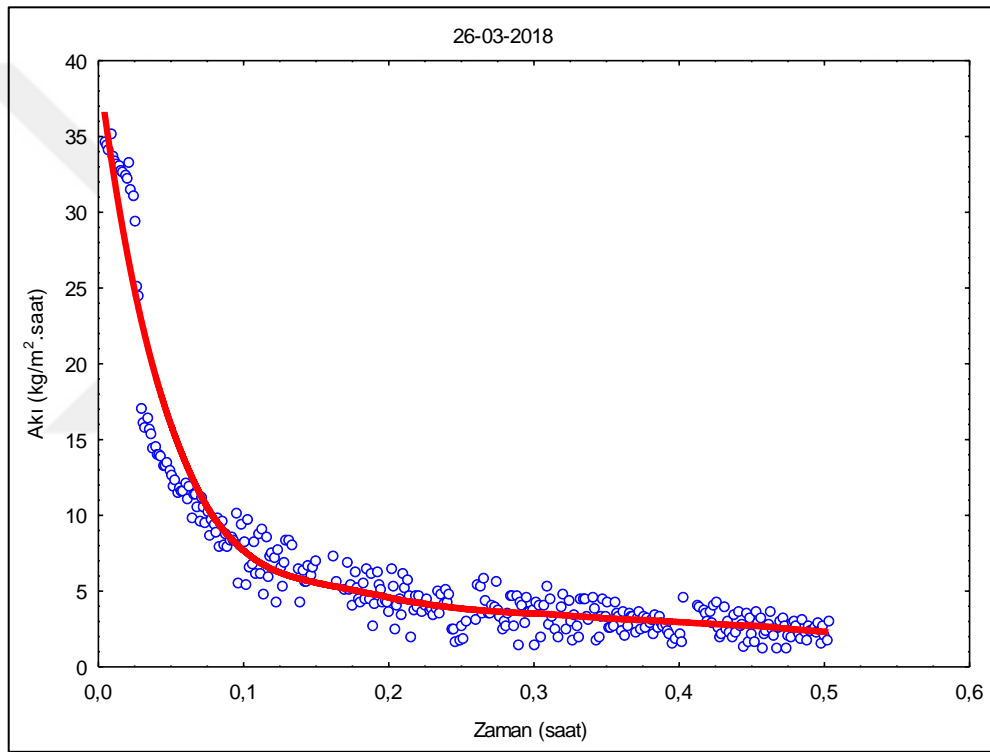
Reaktör	Hacim (L)	Sıcaklık, T (°C)	KOİ (mg.L ⁻¹)	Verim % KOİ	Hidrolik Kalış Süresi (saat)	Organik Yük (kgKOİ.m ⁻³ .gün ⁻¹)	Referans
ABR ve UV/H ₂ O ₂	35	25,5	2305	97,7	94,8	0,6	[31]
AnFMBR	196	30±1	6040	97	19.5–21.3	3,5-7,4	[97]
AÇ ve SFEF	0,4	35	1494	95	> 720		[110]
HYAÇBR	13,5	37	16910	95,85	10	18,6	[111]
AnMBR	200	37	13381	95	96	3,5	[112]
ABR ve AÇ	50	24,75	2080	98			[113]
AFO	6	22±1	2008	93	24		[114]
EAAAKR	12	26-28	2711	97	48	4,5	[118]
GGÇB ve UF	2+100	33-40	13250	98	5.71	4,8-16,8	[119]
KNR ve ANAMMOX	1,6+0,5	37	1292	97	9.8 ± 1.6	0,54	[120]
MDJLR*	16	23±2	2752	98	23	9,3	Bu çalışma

AÇ: Anaerobik Çürütücü, SFEF: Solar Fotoelekton-Fenton, EAAAKR: Entegre Anaerobik/Aerobik Ardışık Kesikli Reaktör, HYAÇBR: Hibrid Yukarıakışlı Anaerobik Çamur Battaniyesi Reaktörü, ABR: Anaerobik Bölmeli Reaktör, UV/H₂O₂: UV peroksit, AnMBR: Anaerobik Membran Biyoreaktör, AÇ: Aktif Çamur, GGÇB: Genişletilmiş Granül Çamur Battaniyesi Reaktörü, UF: Ultrafiltrasyon Membran, KNR: Kısmi Nitrifikasyon Reaktörü, ANAMMOX: Anammox biyokütle içeren Yukarıakışlı Anaerobik Çamur Battaniyesi Reaktörü, AFO: Aktif çamur-Filtrasyon-Ozonlama, AnFMBR: Jet-loop Anaerobik Filtre Membran Biyoreaktör, **MDJLR***: Membran Draft Tüplü Jet-Loop Reaktör

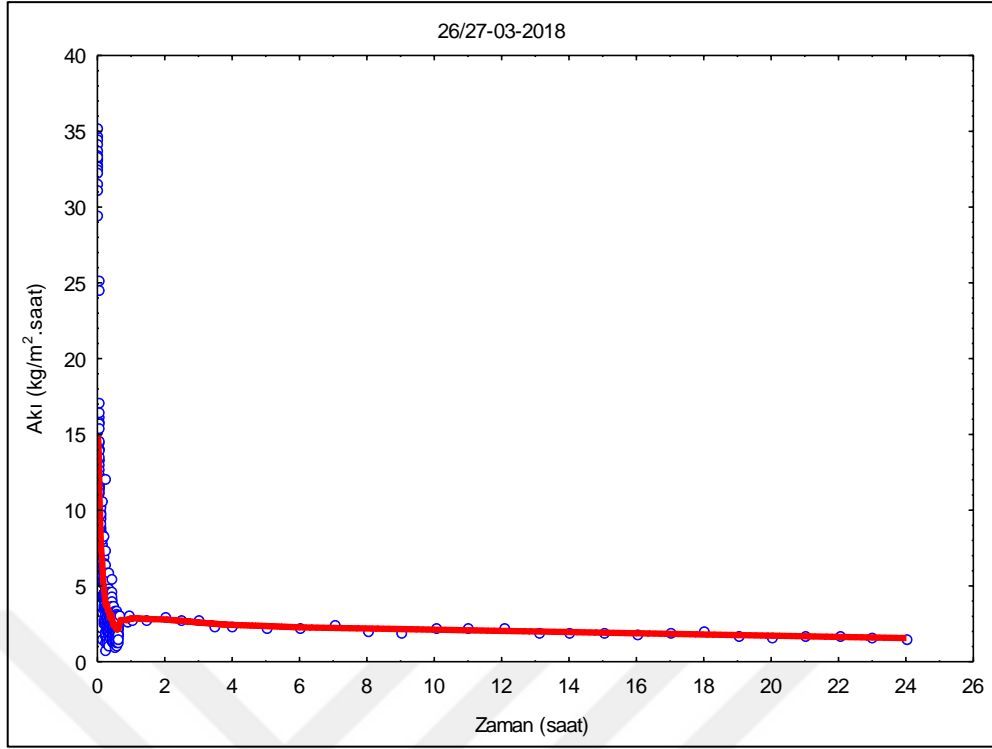
4.4 Membran Draft Tüplü Jet-Loop Reaktörün Membran Akı Değerlerinin Belirlenmesi

4.4.1 Seramik membranlar ile yapılan çalışmalar

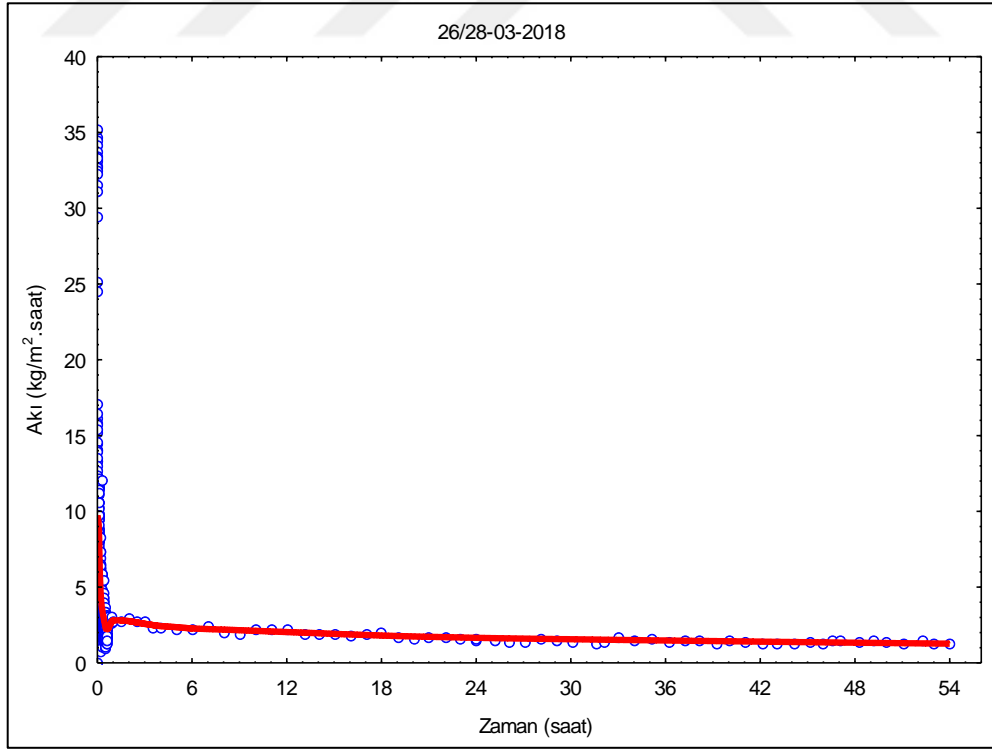
Üretilmiş olan jet loop membran biyoreaktörün membran akı değerlerinin belirlenebilmesi için sistem aktif çamur ile (16 L) dolduruldu ve sistem çalıştırıldı. Yapılan ilk tasarıma göre sistemde 39 cm uzunluğunda seramik membranlardan (100 nm por çapına sahip) 15 adet kullanılmıştır. Bu konfigürasyondaki membran modülü (0,186 m² yüzey alanına sahip, 1. versiyon) kullanılarak elde edilen akılara ait grafikler Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te gösterilmektedir.



Şekil 4.32: İlk 30 dakikaya ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,28; TMB: 0,5 bar; ~550 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,186 m²; Por çapı:100 nm)

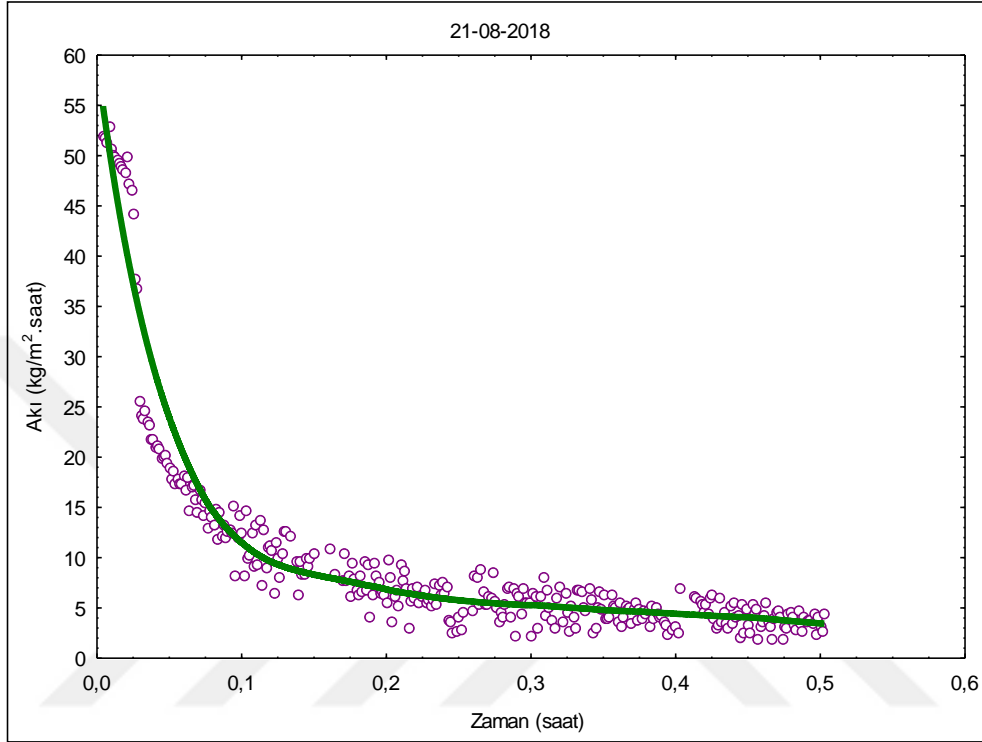


Şekil 4.33: İlk 24 saate ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,54; TMB: 0,5 bar; ~550 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,186 m²; Por çapı:100 nm)

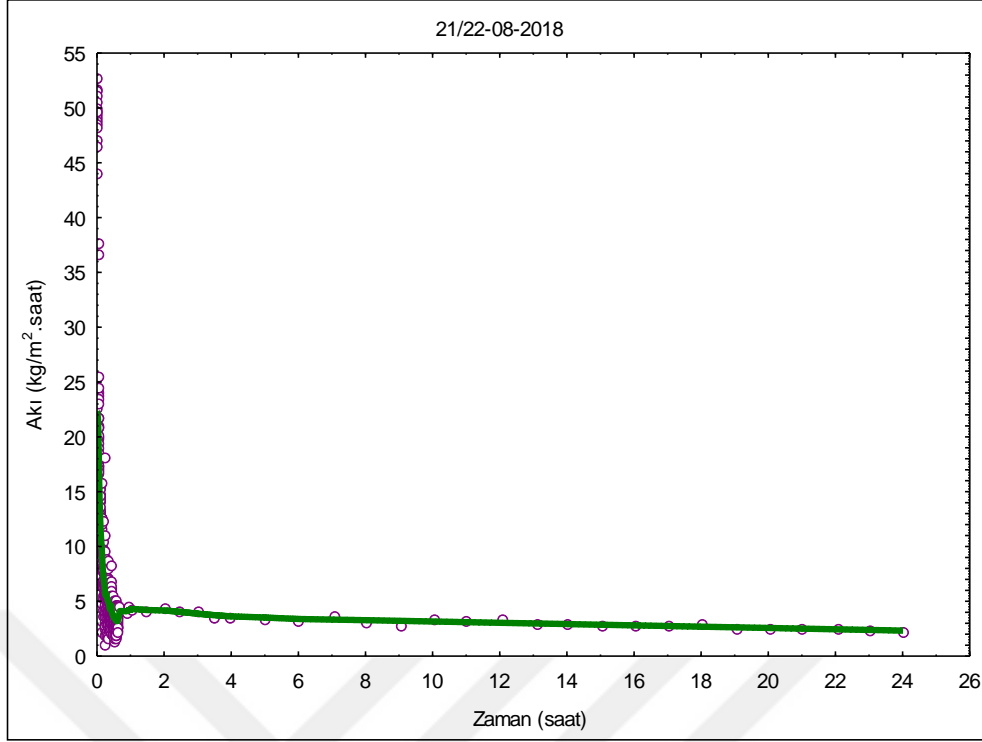


Şekil 4.34: 54 saatlik Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %94,23; TMB: 0,5 bar; ~550 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,186 m²; Por çapı:100 nm)

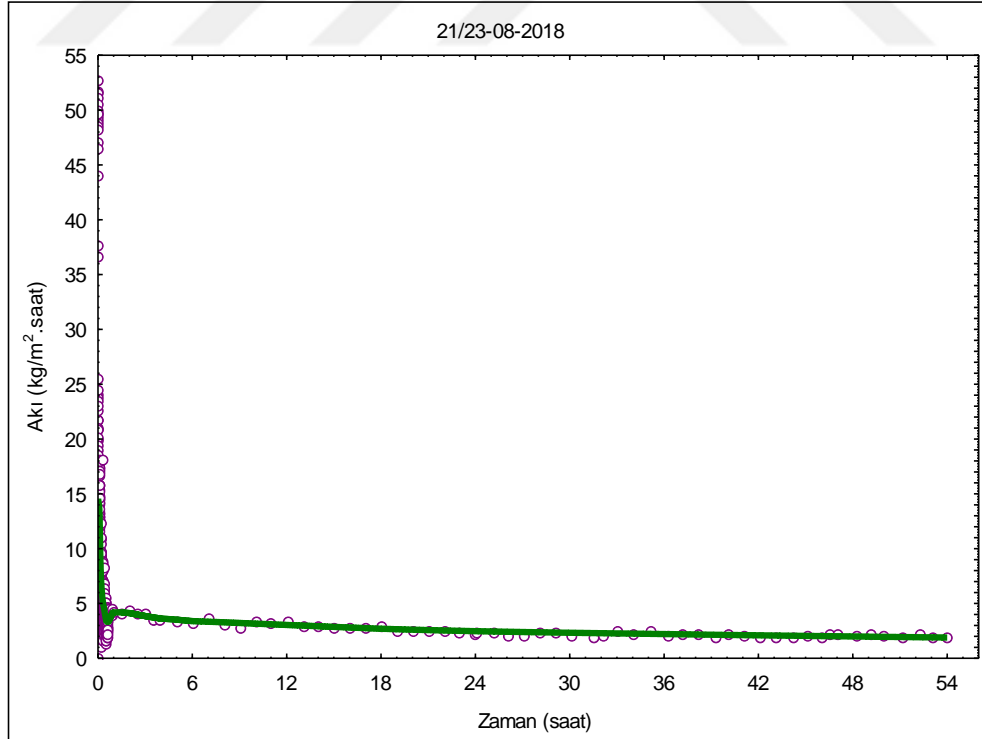
Daha sonraki tasarımda sistemde 59 cm uzunluğunda seramik membranlardan (100 nm por çapına sahip) 15 adet kullanılmıştır. Bu konfigürasyondaki membran modülü (2. versiyon) 0,278 m² yüzey alanına sahiptir. Bu konfigürasyon kullanılarak elde edilen akılara ait grafikler Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’te gösterilmektedir.



Şekil 4.35: İlk 30 dakikaya ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,32; TMB: 0,5 bar; ~560 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,278 m²; Por çapı:100 nm)



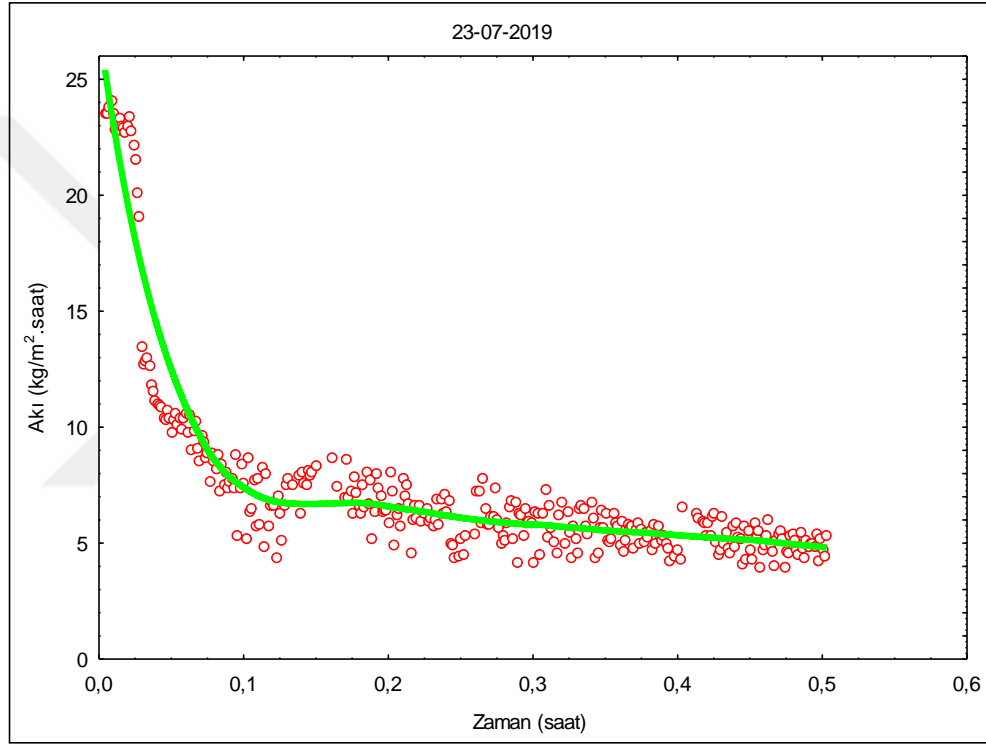
Şekil 4.36: İlk 24 saate ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %95,61; TMB: 0,5 bar; ~560 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,278 m²; Por çapı:100 nm)



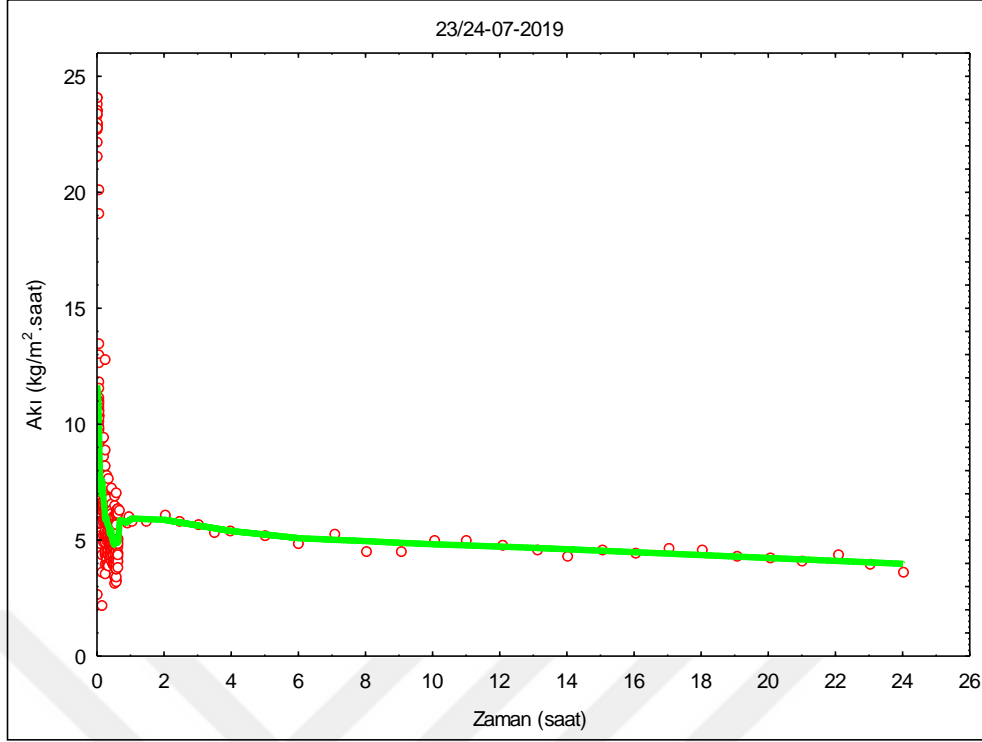
Şekil 4.37: 54 saatlik Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %94,27; TMB: 0,5 bar; ~560 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,278 m²; Por çapı:100 nm)

4.4.2 Polietersülfon (PES) membranlar ile yapılan çalışmalar

İmal edilmiş olan jet loop membran biyoreaktörün membran akı değerlerinin belirlenebilmesi için sistem aktif çamur ile (16 L) dolduruldu ve çalıştırıldı. Yapılan tasarıma göre sistemde 59 cm uzunluğunda, 5 cm genişliğinde PES membran tabakalarından 4 adet kullanıldı. Bu konfigürasyondaki membran modülü (0,1872 m² yüzey alanına sahip, 3. versiyon) kullanılarak elde edilen akılara ait grafikler Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da gösterilmektedir.



Şekil 4.38: İlk 30 dakikaya ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %96,43; TMB: 0,5 bar; ~555 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,1872 m²)

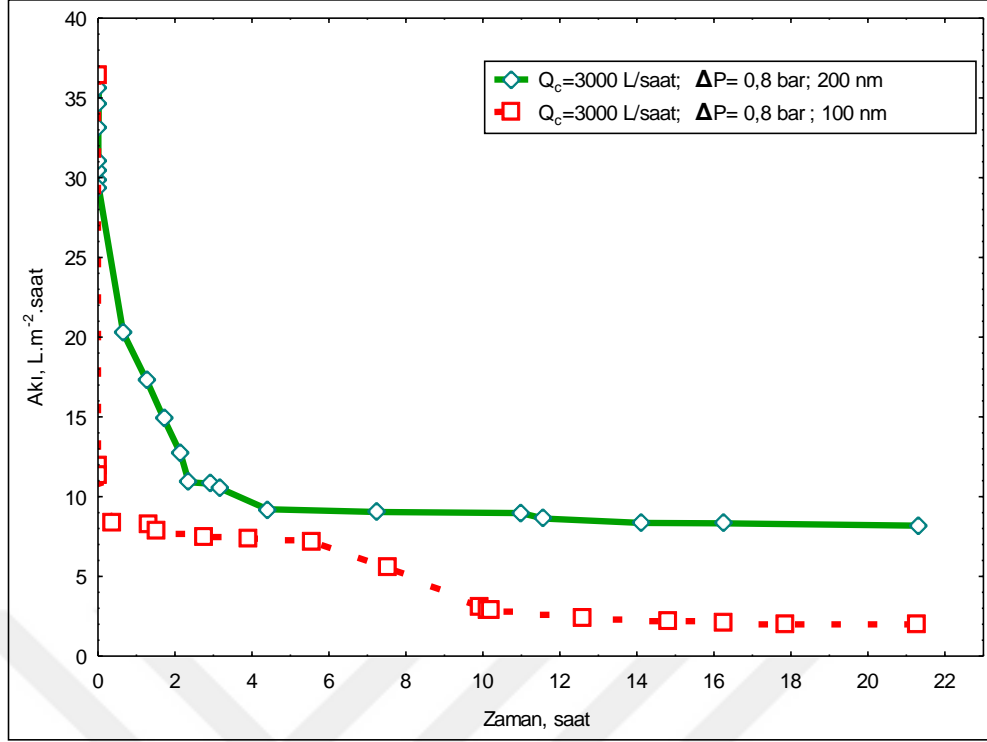


Şekil 4.39: 24 saatlik ait Akı-Zaman grafiği (Ortalama KOİ Giderim Verimi %96,16; TMB: 0,5 bar; ~555 mg MLSS.L⁻¹; Çapraz akış hızı 0,74 m.s⁻¹; Membran Yüzey Alanı:0,1872 m²)

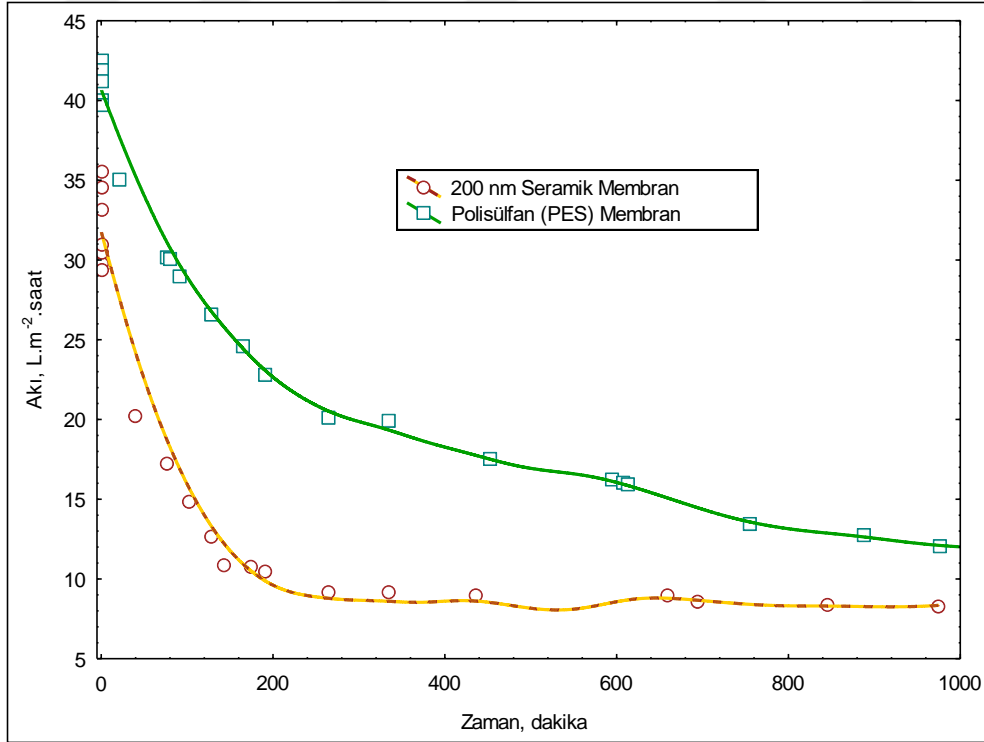
4.4.3 Membran draft tüpü modüllerinin karşılaştırılması

Her ne kadar elde edilen akı değerleri birbirlerine çok yakın olsalar da seramik membranların akı değerleri PES membranlardan daha düşük olduğu bulunmuştur. Seramik membranların yüzeylerinin PES membranlara göre daha pürüzlü olması, membran yüzeyinde biyofilm tabakasının daha kolay oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yüzeyde oluşan bu biyofilm tabakası membranların akı performansını etkilemektedir.

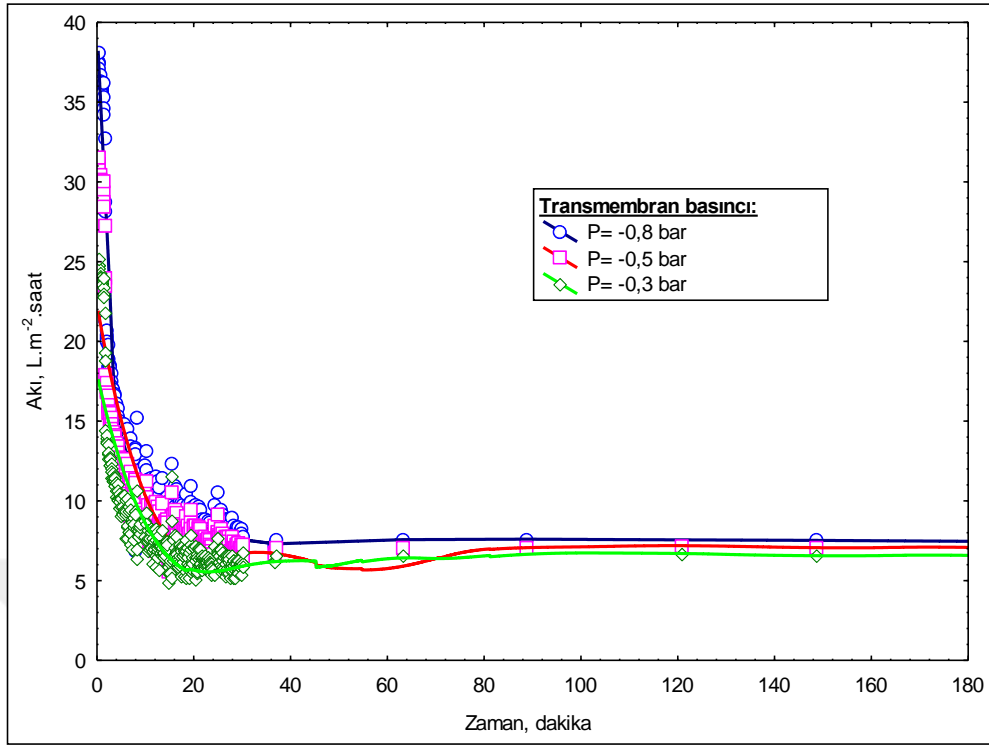
PES membranlar için genellikle temizlik esnasında sadece modülün basıncının değiştirilmesi ve/veya basit bir fiziksel temizlik yeterli olurken, seramik membranlar için kimyasal ve fiziksel temizlik yapılması gerekmiştir.



Şekil 4.40: 100 ve 200 nm por çapına sahip seramik membranların karşılaştırılması (0,186 m² membran yüzey alanı; ~550 mg MLSS.L⁻¹; Yükleme oranı: ~2,54 kg KOİ.m⁻³.gün⁻¹)



Şekil 4.41: 200 nm por çapına sahip seramik membran ile PES membranın karşılaştırılması (4000 L.saat⁻¹ sirkülasyon debisi; 0,8 bar transmembran basıncı; ortalama 500 mg.L⁻¹ MLSS konsantrasyonu)



Şekil 4.42: TMB ile akı değerlerinin zaman ile değişimi (PES membran; 3500 L.saat⁻¹ sirkülasyon debisi; ortalama 950 mg.L⁻¹ MLSS)

4.4.4 Membran draft tüpü modülü üzerinde oluşan biyofilm tabakası

Üretilmiş olan jet loop membran biyoreaktörde, membranlar ne hava ne de saf su ile geri yıkanmıştır. Membranların yüzeyi jet loop reaktörün topolojisi gereği meydana gelen kabarcıkların oluşturduğu yüksek kesme/sıyırma kuvvetleri sayesinde temizlenmiştir. Bu yüksek kesme/sıyırma kuvvetlerine rağmen membranların yüzeyinde ve reaktörün iç yüzeyinde biyofilm oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45).

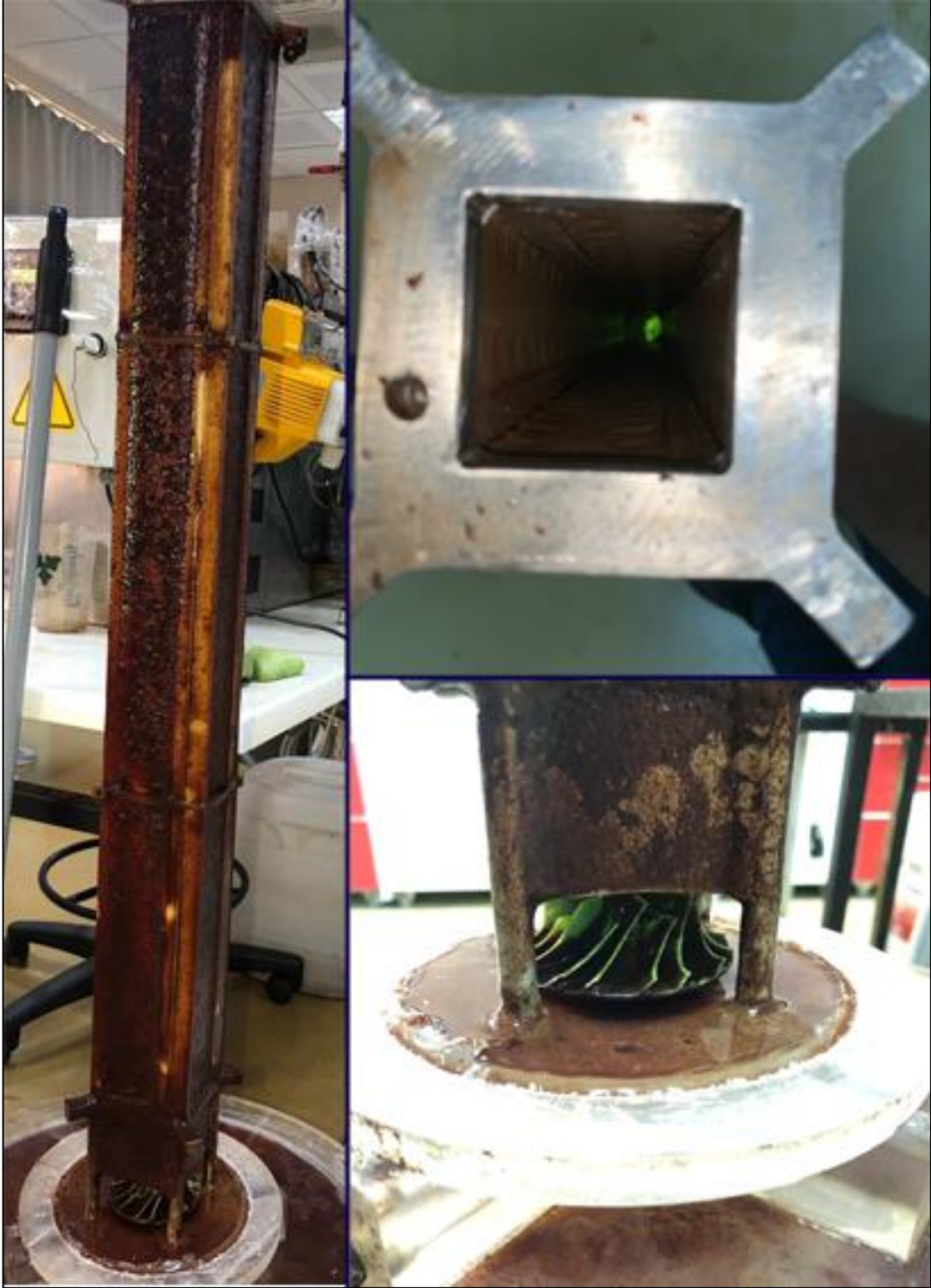
Oluşan bu biyofilm tabakasının MDJLR'ün verimi üzerine olumlu bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Her ne kadar oluşmuş olan bu biyofilm tabakasının miktarı ölçülememiş olsa da hem membranların hem de reaktörün diğer parçaları üzerindeki bu tutunma göz ardı edilemeyecek düzeyde olmuştur. Biyofilm oluşumunun sebeplerinden birisinin de MDJLR'de arıtım için seçilen yüksek organik madde içeriğine sahip mezbaha atıksuyu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.43: Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktör'de (MDJLR) meydana gelen biyofilm tabakası (2. versiyon) (2018).



Şekil 4.44: Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktör'ün (MDJLR) jet nozzle kısmında meydana gelen biyofilm tabakası



Şekil 4.45: Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktör’de (MDJLR) meydana gelen biyofilm tabakası (3. versiyon) (2019)

4.5 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün Otomasyonu

MDJLR esasen aerobik bir sistemdir. Aerobik sistemlerin arıtım performansına en fazla etki eden parametre ise reaktör içerisindeki çözülmüş oksijen miktarıdır.

Geliştirilmiş olan MDJLR'ün en önemli özelliği reaktör içerisinde çözülmüş oksijen miktarının yüksek seviyelerde olmasını sağlamasıdır. Reaktör içerisine verilen hava miktarının artırılması sirkülasyon pompasında kavitasyon oluşturmakta ve arızalanmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple jet akımına verilen hava miktarı belirli bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Jet akımının hızının artırılması, oksijen transfer miktarının artırılması için gereklidir. Jet akımının hızının da enerji sarfiyatı ve arıtım performansı baz alınarak optimum bir değerde tutulması gerekir. Bu nedenle bir otomasyon sistemi jet akımı ayarlanabilmelidir. 1 kW gücünde LEO marka tek fazlı sirkülasyon pompası, geliştirilen reaktörde jet akımının oluşturulması ve sirkülasyon için kullanılmaktadır. Bu sirkülasyon pompasının devreye alınıp devreden çıkartılabilmesi için pompanın güç hattına elektriksel olarak kontrol edilebilen açma kapama kontaktörü bağlanmıştır. Sirkülasyon pompası doğrudan şebeke üzerinden sabit güç ile çalıştırıldığından debi ayarının yapılabilmesi için pompa çıkışındaki jet nozzle hattına paralel olarak bir bypass hattı da bağlanmıştır. Her iki hat üzerine ALTIGEN KOSAPLUS KE005-8G model oransal atıksu vanaları, sirkülasyon pompası çıkışındaki bulunan bu hatlar üzerinden geçen debilerin pompayı zorlamayacak şekilde ayarlanabilmesi için bağlanmıştır. Bu oransal atıksu vanalarının açıklık oranları üzerlerinde bulunan 4-20 mA kontrol girişleri vasıtası ile elektriksel olarak ya da elle kontrol edilebilmektedir. Jet nozzle hattındaki akış debisinin ölçülebilmesi için bu hatta 100-5000 L.saat⁻¹ ölçüm aralığına sahip, 4-20 mA elektriksel ölçüm çıkışı verebilen Tecfluid FLOMID-MX marka atıksu debimetresi bağlanmıştır.

Reaktörde oluşturulan jet akışının içerisine hava karıştırılma işlemi kompresör vasıtası ile sağlanan basınçlı hava kullanılarak yapılmaktadır. Enjekte edilen havanın debisinin ölçülebilmesi için basınçlı hava giriş hattı üzerine 0,6 – 16 m³.saat⁻¹ ölçüm aralığına sahip, 4-20 mA elektriksel ölçüm çıkışı verebilen Flowtech KF-800 marka hava debimetresi bağlanmıştır. Hava giriş hattı üzerine 4-20 mA elektriksel kontrol girişine sahip ALTIGEN KOSAPLUS KE005-8G model oransal hava vanası, hava debisinin kontrol edilebilmesi için bağlanmıştır. Reaktörün çözülmüş oksijen seviyesi ECDOGEN-S model Eutech marka çözülmüş oksijen probu aracılığı ile ölçülmektedir.

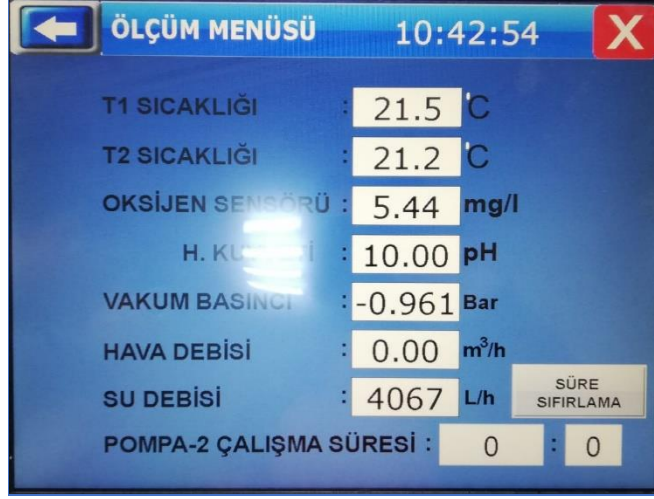
Reaktör içeriğinin pH miktarının ölçülmesi için Eutech marka EC100GTSO05B model pH probu kullanılmaktadır. Reaktör içeriğinin pH seviyesi istenilen değerde ayarlanabilmesi ve sabit tutulabilmesi için reaktöre iki adet elektriksel olarak açma kapama özelliğine sahip, asit ve baz çözeltilerinin eklenmesini sağlayan Shenchen marka F6 model peristaltik pompa bağlanmıştır.

Longer Pump marka bir peristaltik pompa, reaktöre atıksu besleme pompası olarak kullanılmaktadır. Bu pompa elektrik hattı üzerine bağlanan kontaktör vasıtası ile elektriksel olarak açılıp kapatılabilmektedir. Reaktör içerisine yerleştirilen elektromekanik seviye sensörü aracılığı ile reaktörün seviyesi ölçülebilmekte ve besleme pompası çalıştırılmaktadır. Seviye sensöründen düşük seviye ve yüksek seviye olmak üzere iki seviye bilgisi okunabilmektedir.

Reaktör çıkışı sisteme bağlanan F6 model Shenchen marka peristaltik pompa ile membranların içinden vakumlanarak olmaktadır. Vakum yapan peristaltik pompanın kontrolü elektrik hattı üzerine bağlanan elektriksel kontrollü kontaktör vasıtası ile aç kapa şeklinde sağlanmaktadır. Vakum hattında oluşan basınç, arıtılmış su hattına bağlanan 4-20 mA elektriksel ölçüm çıkışlı manometre ile ölçülmektedir.

Reaktör içerisindeki atıksuyun ısı kontrolü reaktör içerisine yerleştirilen bir ısı değiştirici (eşanjör) ve ona bağlı elektriksel açma kapama özelliğine sahip soğutma ekipmanı sayesinde yapılmaktadır.

Kontrol yazılımı, geliştirilen otomasyon sisteminde iki temel çalışma prensibi benimsenerek oluşturulmuştur. İlk çalışma şeklinde, sisteme bağlı tüm sensörlerin değerleri ölçülüp USB bellek üzerine kaydedilmekte ve aynı zamanda kontrol paneli üzerinde görüntülenmektedir. Ayrıca sisteme bağlı yukarıda anlatılmış olan tüm kontrol ekipmanları da (oransal vanalar, pompalar ve soğutucu) kumanda paneli üzerinden el ile kumanda edilebilmektedir. Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de ölçüm ekranı ve elle kontrol ekranı görülmektedir.

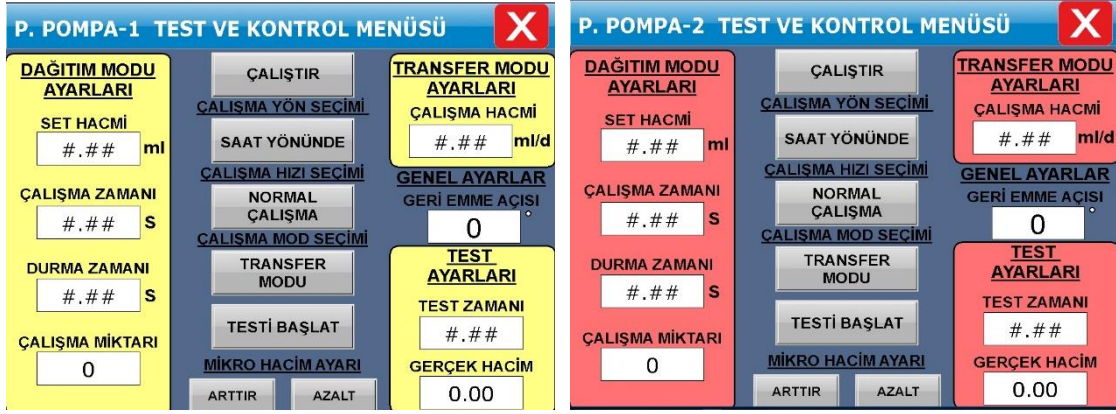


Şekil 4.46: Ölçüm ekranı



Şekil 4.47: Elle kontrol ekranı

İkinci çalışma şeklinde ise sistem otomatik olarak çalışmaktadır. Bu çalışma şeklinde de sensörlerin tamamından alınan ölçümler kumanda paneli üzerinde de gösterilmekte ve USB bellek üzerine kaydedilmektedir. Sistemde oluşan pH değerinin 7 civarında tutulması için pH probundan okunan değere göre, baz ve asit pompalama işlevlerini yerine getiren peristaltik pompalar çalıştırılmaktadır. Peristaltik pompalar PLC ile MODBUS haberleşme protokolü üzerinden bağlı olduklarından çalışmaları için gereken ayar işlemleri de Şekil 4.48'de verilen ekran vasıtası ile yapılabilmektedir.



Şekil 4.48: Peristaltik pompa ayar ekranı

Arıtılmış suyun alınabilmesi için bağlanan vakum pompası ve jet akımını oluşturmak için bağlanan sirkülasyon pompası otomatik çalışma modu aktif edildiğinde sürekli olarak çalıştırılmaktadır. Atıksu besleme pompası da seviye sensöründen gelen düşük seviye sinyali geldiğinde otomatik olarak çalışmakta ve yüksek seviye bilgisi geldiğinde durmaktadır.

Jet akımının debisinin ayarlanması için deney başlangıcında kullanıcı tarafından kumanda panelinden girilen debi hedef değerine göre jet akı hattındaki ve bypass hattındaki oransal vanalar otomatik olarak ayarlanmaktadır. 2 numaralı oransal vananın değeri girilen hedef değerin 2000 L.saat^{-1} değerinden küçük, $2000-3000 \text{ L.saat}^{-1}$ aralığında ve 3000 L.saat^{-1} değerinden büyük olması durumlarına göre sırasıyla %42,5, %20 ve %5 açıklıklarında sabit tutulur. 1 numaralı oransal vana ise Tablo 4.7’de verilen en dik iniş (steepest descent) arama algoritmasına göre ayarlanmaktadır. Akış sistemlerinde sıcaklık, basınç, akışkandaki madde düzensizlikleri vb. gibi tahmin edilemeyen çevresel değişkenlerden dolayı sabit vana açıklıklarına karşın debi sabit kalmamaktadır. Bu durumla başa çıkabilmek için Tablo 4.7’deki arama algoritması geliştirilmiştir. Başlangıçta; vana açıklık oranı $K_{açıklık}$ sıfır, debi hedef değeri R_{hedef} kullanıcı tarafından ayarlanan değer, vananın gecikmeli çalışmasından dolayı karasız çalışmaya sebep olmamak adına bir sonraki çevrime geçmek için beklenilmesi gereken süreyi $T_{bekleme}$ (5sn), tepkisiz kalınacak en küçük hata değeri $E_{histeresis}$ (5) ve arama adım değeri $K_{adım}$ (3) olarak ayarlanmaktadır. Daha sonra debimetreden akış debi bilgisi okunmakta $D_{akış}$ ve buna bağlı olarak debi hata değeri E belirlenmektedir. Hata değerinin duyarsızlık değerine $E_{histeresis}$ göre durumuna bakılarak bir sonraki vana açıklık oranı belirlenmektedir. Daha sonra sistemin tepki verme süresi $T_{bekleme}$ beklenmekte ve 2. adımdan sonsuz döngü halinde devam edilmektedir.

Benzer şekilde jet akımına karıştırılacak olan hava miktarı da ilgili debimetreden gelen debi bilgisi ve ilgili oransal vana kullanılarak yine kullanıcı tarafından belirlenen hedef akış değerine göre ayarlanmaktadır. Hava hattındaki oransal vana ile jet akış hatlarında kullanılan vanalar aynı mekanik özelliklere sahip olduğundan bu vananın da açıklık oranı Tablo 4.7’de verilen algoritma kullanılarak belirlenmektedir.

Tablo 4.7: En dik iniş (steepest descent) arama algoritması

Adım	İşlem
1	Vana açıklık oranını belirle, $K_{açıklık} = 0$ Hedef değeri ayarla, R_{hedef} Bekleme süresini ayarla, $T_{bekleme} = 5$ Duyarsızlık değerini belirle, $E_{histeresis} = 5$ Artım/azaltım değerini ayarla, $K_{adim} = 3$
2	Debimetreden akış debisini oku, $D_{akış}$
3	Hatayı hesapla, $E = R_{hedef} - D_{akış}$
4	Eğer $E > E_{histeresis}$ ise $K_{açıklık} = K_{açıklık} + K_{adim}$ Değilse Eğer $E < -E_{histeresis}$ ise $K_{açıklık} = K_{açıklık} - K_{adim}$ Değilse $K_{açıklık} = K_{açıklık}$
5	Tepki süresi $T_{bekleme}$ kadar bekle
6	Adım 2 ye git

4.6 Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktörün İşletme Parametreleri

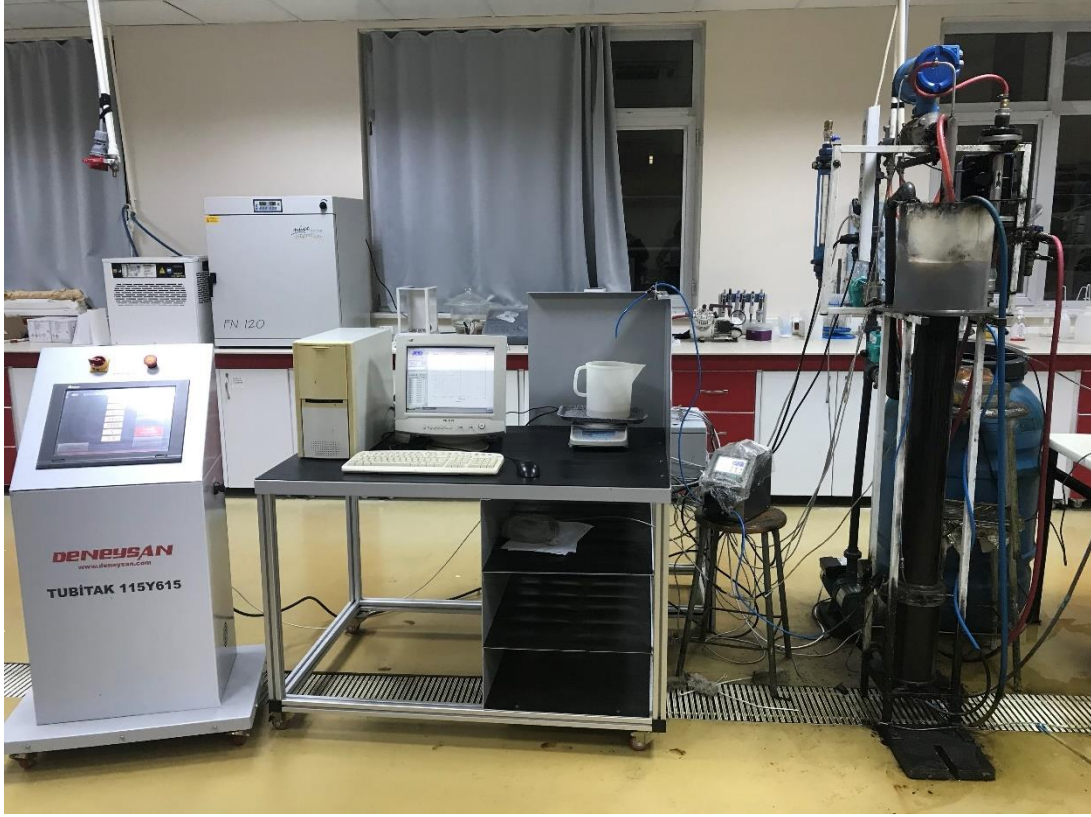
Çalışma süresince toplanan veriler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktöre ait işletme parametreleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8: MDJLR işletme parametreleri

Parametre	Minimum	Maksimum
HKS (Θ_h), saat	7,23	23,21
Θ_c , gün	0,70	7,88
OYH, $\text{kg KOİ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{gün}^{-1}$	1,02	9,29
Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$	19	24
MLSS, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	500	2045
pH	6	8

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında yeni nesil bir reaktör çeşidi olan jet loop reaktör modifiye ederek daha önce uygulaması hiç olmayan bir membran biyoreaktör tasarlanmış ve yüksek organik kirliliğe sahip mezbaha endüstrisi atıksularının arıtımında denemiştir. Çalışma ile tasarlanmış ve üretilmiş olan sistemin genel görünümü Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Dizayn edilmiş olan ve deneylerde kullanılan MDJLR sistemi

Atıksuyun karakterizasyonunun yapılması, geliştirilen yeni biyoreaktörün kütle transfer özelliklerinin belirlenmesi ve MDJLR sürekli arıtım performansının incelenmesi basamaklarının olduğu bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Çalışma kapsamında yeni nesil bir Membran Draft Tüplü Jet Loop Reaktör (MDJLR) geliştirilmiştir. Jet loop reaktörlerde emme tüpü reaktör içerisinde akışa yön veren ve reaktör içerisinde çevrimin oluşmasını sağlayan en önemli reaktör parçası veya ekipmandır. Ayrıca da havanın reaktör içerisinde uzun süre kalmasını sağlayarak yüksek oksijen transferi elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada özgün bir yaklaşımla reaktörün emme tüpü membran modülü halinde tasarlanmış ve üretilmiştir.

2. Üretilen emme tüpü/membran modülü batık membran olarak çalıştırılmıştır. Batık membranlarda yüksek hızlı çapraz akış oluşturulamadığından veya çok sınırlı oluşturulabildiğinden membran kirlenmesi hızlı olmakta ve membrandan elde edilen akılar azalmaktadır. MDJLR tasarımıdaki yüksek hızlı jet akımının membran yüzeyine çapraz akış oluşturması sağlanmıştır. Böylece membran yüzeyindeki kek tabakası oluşumu yavaşlatılmıştır.
3. Geliştirilen MDJLR sisteminin kütle transfer katsayıları çalışılmış ve ölçülen K_{LA} değerleri 86-139 saat⁻¹ arasında değişmiştir. Bu değerler konvansiyonel sistemlerden yaklaşık olarak 50-110 kat daha yüksektir. Ancak literatürde bulunan JLMBR sistemlerinin kullanıldığı çalışmalardan elde edilenden daha düşüktür. Bunun nedeni, seramik ve PES membranlar kullanılarak draft tüpü oluşturulurken yan yana dizilen membranların arasında bulunan milimetrik boşluklardır. Bu boşluklardan kabarcıklar çıkmakta ve degazifikasyon ünitesine kısa yoldan ulaşmaktadır. Böylece kabarcıkların bir kısmı daha az sürede reaktör içerisinde kalmakta ve kütle transferinin azalmasına neden olmaktadır.
4. İki farklı malzeme ve özellikteki membranlar kullanılmıştır. PES membranlar kullanılarak imal edilmiş olan modülden elde edilen akılar seramik membranlardan kullanılarak imal edilmiş olan modülden %40 daha fazladır.
5. Çalışma kapsamında geliştirilen bir diğer özgün yaklaşım ise aerobik bir reaktör olan jet loop biyoreaktör içerisinde anaerobik/anoksik bir bölge oluşturulması ve bu bölgenin reaktörün doğasında var olan jet akımın gücü ile karıştırılmasıdır. Anoksik/anaerobik bölgenin karıştırılması ile reaksiyon hızı artırılırken bu işlem için dışarıdan enerji kullanılmaması önemli bir tasarruf yaklaşımıdır. Bu bölme denitrifikasyon gerçekleştirilmek üzere düşünülmüş ancak hacmi düşük tutulduğundan yeterli ve verimli yapılamamıştır.
6. Üretilen bu yeni jet loop membran biyoreaktör konfigürasyonu ile konvansiyonel kirlilik parametrelerinin (KOİ gibi) giderim verimleri incelenmiştir. Sürekli modda işletilen MDJLR sisteminden 9 kg KOİ.m⁻³.gün⁻¹ organik yükleme değeri altında (18 saat bekletme süresinde), mezbaha atıksuyundaki organik içeriği %97-98 arasında değişen verimlerle arıtılabileceği görülmüştür. Çıkış KOİ konsantrasyonları tüm çalışma boyunca 100 mg.L⁻¹'nin altında elde edilmiştir.
7. Çalışma süresince çözülmüş oksijen konsantrasyonu genellikle 2,5 mg.L⁻¹'nin üstünde ölçülmüştür. Yüksek yüklemelerde ÇO konsantrasyonu 1,1-1,2 mg.L⁻¹'ye kadar düşmüş ancak bu şartlarda dahi performans olumsuz etkilenmemiştir. Çünkü

jet loop biyoreaktörler son derece yüksek oksijen transferi sağlamakta ve reaktördeki akım şartlarından dolayı da oldukça homojen bir içerik oluşturmaktadır. Bir başka deyişle harcanan kadar oksijen sisteme sağlanabilmektedir. Sistemde yükler yüksek değerlerde salınım gösterse dahi arıtma verimlerinde oldukça stabil değerler elde edilmiştir.

8. Sistemin otomatik kontrolü de yapılmıştır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu için kontrol sirkülasyon debisi ile yapılmıştır. Çalışmanın büyük kısmında hava pompasına gerek kalmamıştır. Çünkü oluşturulan jet akımı püskürtme başlığında bir emme bölgesi oluşturmakta ve atmosferden direk hava emmesine neden olmaktadır. Otomasyon sistemi ile reaktör içerisindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu azaldıkça sirkülasyon debisi artırılarak ÇO değerleri 2 mg.L⁻¹ civarında tutulmuştur. Havanın yetersiz kaldığı durumlarda ise harici hava kaynağı açılarak sisteme hava verilmiştir.

6. KAYNAKLAR (IEEE)

- [1] Türkiye İstatistik Kurumu, "Türkiye İstatistik Kurumu," [Çevrimiçi]. <http://www.tuik.gov.tr>. [Erişildi: 23 01 2021].
- [2] World Bank Group, "Environmental, Health and Safety (EHS) Guidelines for Meat Processing. General EHS Guidelines: Environmental Wastewater and Ambient Water Quality," [Çevrimiçi]. <http://www.ifc.org/ehsguidelines>. [Erişildi: 01 6 2020].
- [3] C. F. Bustillo-Lecompte and M. Mehrvar, "Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances," *Journal of Environmental Management*, vol. 161, pp. 287 - 302, 15 09 2015.
- [4] A. Aziz, F. Basheer, A. Sengar, Irfanullah, S. U. Khan ve I. H. Farooqi, "Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater," *Science of The Total Environment*, cilt 686, pp. 681-708, 10 10 2019.
- [5] Türkiye Cumhuriyeti, *Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2004.
- [6] E. W. Steel and T. J. McGhee, *Water Supply and Sewerage*, McGraw-Hill Book Company, 1991.
- [7] T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, Dokuzuncu Kalkınma Planı, Toprak ve Su Kaynaklarının Kullanımı ve Yönetimi, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara: T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, 2007.
- [8] S. Uzuner, "Süt Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Jet-Loop Membran Biyoreaktörlerin Performansının İncelenmesi," Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2012.
- [9] B. Farizoğlu, "Süt Endüstrisi Atıksularının Jet Loop Membran Biyoreaktörde Arıtılabilirliğinin İncelenmesi," TÜBİTAK, 2010.
- [10] V. Blonskaja and T. Vaalu, "Investigation of different schemes for anaerobic treatment of food industry wastes in Estonia," *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Chemistry*, vol. 1, no. 55, pp. 14 - 28, 2006.
- [11] T. San José, "Bird slaughterhouse: generation and purification of their water," *Tecnología del agua*, vol. 24, no. 251, pp. 48 - 51, 2004.
- [12] G. S. Mittal, "Treatment of wastewater from abattoirs before land application - a review," *Bioresource Technology*, vol. 9, no. 97, pp. 1119 - 1135, 2006.

- [13] Toro Equipment, "YouTube.com," 18 03 2015. [Çevrimiçi]. <https://www.youtube.com/watch?v=BsunplJtMss>. [Erişildi: 23 12 2020].
- [14] WAM Group, "WASTEMASTER GCP-GCE Screw Screens," [Çevrimiçi]. <https://wamgroup.com.tr/en-GB/WAMTR/Product/WASTEMASTER%20GCP-GCE/Screw-Screens>. [Erişildi: 23 12 2020].
- [15] M. R. Johns, "Developments in wastewater treatment in the meat processing industry: A review," *Bioresource Technology*, cilt 3, no. 54, pp. 203 - 2016, 1995.
- [16] N. Z. Al-Mutairi, F. A. Al-Sharifi ve S. B. Al-Shammari, "Evaluation study of a slaughterhouse wastewater treatment plant including contact-assisted activated sludge and DAF," *Desalination*, Cilt 1-3, no. 225, pp. 167 - 175, May 2008.
- [17] I. R. de Nardi, V. Del Nery, A. Amorim, N. G. dos Santos ve F. Chimenes, "Performances of SBR, chemical-DAF and UV disinfection for poultry slaughterhouse wastewater reclamation," *Desalination*, Cilt 1 - 3, no. 269, pp. 184 - 189, 15 March 2011.
- [18] WPL Environmental Wastewater Solutions, "WPL DAF Product," [Çevrimiçi]. <https://www.wplinternational.com/product/wpl-dissolved-air-flotation-daf/>. [Erişildi: 23 12 2020].
- [19] B. Hazel, Industry Evaluation of color reduction and removal color in Dye House Effluents, 1995, pp. 59-63.
- [20] Y. Hsu, C. Yen ve H. Huang, "Multistage Treatment of High Strength dye wastewater by coagulation and ozonation," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, cilt 7, no. 1, pp. 70-71, 1998.
- [21] C. Tsai, S. Lin, Y. Shue ve P. Su, "Electrolysis of soluble organic matter in leachate from landfills," *Water Research*, cilt 31, no. 12, pp. 3073-3081, 1997.
- [22] SSWM University, "Coagulation-Flocculation," [Çevrimiçi]. <https://sswm.info/sswm-university-course/module-6-disaster-situations-planning-and-preparedness/further-resources-0/coagulation-flocculation>. [Erişildi: 24 12 2020].
- [23] H. İnan, H. Şimşek, M. Karpuzcu ve A. Dimoglo, "I.Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları Çalıştayı," Edremit, 2002.
- [24] M. Kobya, E. Senturk ve M. Bayramoglu, "Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, Cilt 1-3, no. 133, pp. 172-176, 2006.
- [25] M. C. Almandoz, C. L. Pagliero, N. A. Ochoa and J. Marchese, "Composite ceramic membranes from natural aluminosilicates for microfiltration applications," *Ceramics International*, vol. 4, no. 41, pp. 5621 - 5633, 2015.

- [26] L. Gürel and H. Büyükgüngör, "Treatment of slaughterhouse plant wastewater by using a membrane bioreactor," *Water Science & Technology*, vol. 1, no. 64, pp. 214 - 219, 2011.
- [27] D. Yordanov, "Preliminary Study Of The Efficiency Of Ultrafiltration Treatment Of Poultry Slaughterhouse Wastewater," *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, vol. 6, no. 16, pp. 700 - 704, 2010.
- [28] J. Bohdziewicz and E. Sroka, "Integrated system of activated sludge–reverse osmosis in the treatment of the wastewater from the meat industry," *Process Biochemistry*, vol. 5, no. 40, pp. 1517 - 1523, 2005.
- [29] V. V. Volkov, B. V. Mchedlishvili, V. I. Roldugin, S. S. Ivanchev ve A. B. Yaroslavtsev, "Membranes and Nanotechnologies," *Nanotechnologies in Russia*, cilt 3, no. 11, p. 656–687, 12 5 2008.
- [30] S. Judd, *The MBR Book Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, First edition, Elsevier, 2006.
- [31] W. Cao and M. Mehrvar, "Slaughterhouse wastewater treatment by combined anaerobic baffled reactor and UV/H₂O₂ processes," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 7, no. 89, pp. 1136 - 1143, July 2011.
- [32] D. I. Massé and L. Masse, "Characterization of wastewater from hog slaughterhouses in Eastern Canada and evaluation of their in-plant wastewater treatment systems," *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 3, no. 42, pp. 139 - 146, 2000.
- [33] S. R. Hassan, H. M. Zwain ve I. Dahlan, "Development of Anaerobic Reactor for Industrial Wastewater Treatment: An Overview, Present Stage and Future Prospects," *Journal of Advanced Scientific Research*, cilt 4, no. 1, pp. 07-12, 2013.
- [34] L. K. Wang, Y.-T. Hung, H. H. Lo ve C. Yapijakis, *Waste treatment in the food processing industry*, Boca Raton, FL: CRC Press - Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [35] R. N. Cooper, J. F. Heddle ve J. M. Russell, "Characteristics and treatment of slaughterhouse effluents in New Zealand," *Prog. Wat. Treat.*, no. 11, pp. 55-68, 1979.
- [36] C. F. Denmead, *The anaerobic treatment of effluent from meat processing operations*, Meat Industry Research Institute, 1974.
- [37] C. F. Denmead, *Methane production from meat industry wastes and other potential methods for their utilization*, Hamilton: Meat Industry Research Institute, 1977.
- [38] H. C. Arora ve T. Routh, "Treatments of slaughterhouse effluents by anaerobic contact filter," *Indian Assoc. Water Pollut. Control*, no. 16, pp. 67-68, 1980.
- [39] H. Vollmer ve W. Scholz, "Recycle international," *4th International Recycling Congress*, Berlin, 1984.

- [40] D. R. Andersen ve L. A. Schmid, "Pilot plant study of an anaerobic filter for treating wastes from a complex slaughterhouse," *Proceedings of 40th Purdue Industrial Waste Conference*, Lafayette, 1985.
- [41] A. D. Wheatley ve L. Cassell, "Effluent treatment by anaerobic biofiltration," *Water Pollut. Control*, no. 84, p. 10–22, 1985.
- [42] R. Campagna, G. Del Medico ve M. Pieroni, "Methane from biological anaerobic treatment of industrial organic wastes," *3rd EC Conference on Energy from Biomass*, 1985.
- [43] A. E. Steiner, F. X. Wildenauer ve O. Kandler, "Anaerobic digestion and methane production from slaughterhouse wastes," *3rd Energy Conservation Conference*, 1985.
- [44] C. R. Kostyshyn, W. A. Bonkoski ve J. E. Sointio, "Anaerobic treatment of a beef processing plant wastewater: a case history," *Proceedings of 42nd Industrial Waste Conference*, Lafayette, 1987.
- [45] S. Sayed, L. van Campen ve G. Lettinga, "Anaerobic treatment of slaughterhouse waste using a granular sludge UASB reactor," *Biol. Waste.*, no. 21, pp. 11-28, 1987.
- [46] S. Sayed ve W. De Zeeuw, "The performance of a continuously operated flocculent sludge UASB reactor with slaughterhouse wastewater," *Biol. Waste.*, no. 24, pp. 213-226, 1988.
- [47] W. R. Ross, "Anaerobic treatment of industrial effluents in South Africa," *Water SA*, no. 15, pp. 231-246, 1989.
- [48] U. Marchaim, D. Levanon, O. Danai ve S. Musaphy, "A suggested solution for slaughterhouse wastes: uses of the residual materials after anaerobic digestion," *Biores. Technol.*, no. 37, pp. 127-134, 1991.
- [49] W. P. Tritt, "The anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in fixed-bed reactors," *Biores. Technol.*, no. 41, pp. 201-207, 1992.
- [50] C. Polprasert, P. Kemmadamrong ve F. T. Tran, "Anaerobic Baffle Reactor (ABR) process for treating a slaughterhouse wastewater," *Environ. Technol.*, no. 13, pp. 857-865, 1992.
- [51] S. K. Sayed, H. van der Spoel ve G. J. Truijen, "A complete treatment of slaughterhouse wastewater combined with sludge stabilization using two stage high rate UASB process," *Water Sci. Technol.*, no. 27, pp. 83-90, 1993.
- [52] C. A. L. Chernicharo, "Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater," *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, vol. 1, no. 5, pp. 73 - 92, February 2006.

- [53] C. Qian, R. Bakke ve B. Lie, "Object-oriented Modeling and Optimal Control of a Biological Wastewater Treatment Process," *Proceedings of the Eighth IASTED International Conference on Control and Applications*, 2006.
- [54] H. S., "Zeytin Karasuyunun İleri Oksidasyon ve Adsorpsiyon Yöntemleri Kullanılarak Arıtılması," Muğla, 2006.
- [55] N. S. A. Mutamim, Z. Z. Noor, M. A. A. Hassan, A. Yuniarto ve G. Olsson, "Membrane bioreactor: Applications and limitations in treating high strength industrial wastewater," *Chemical Engineering Journal*, cilt 225, pp. 109-119, 2013.
- [56] P. M. Sutton, "Membrane bioreactor for industrial wastewater treatment: the state of the art based on full scale commercial application," *Water Environment Federation*, 2003.
- [57] M. Waszak and M. Gryta, "The ultrafiltration ceramic membrane used for broth separation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 305, pp. 129-135, 2016.
- [58] S. Judd ve C. Judd, MBR Su ve Atıksu Arıtımında Membran Biyoreaktörlerin Esasları ve Uygulamaları, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2015.
- [59] G. B. More ve S. R. Thorat, "Performance evaluation of membrane bioreactor technology for treatment of industrial wastewater: A review," *Global Journal of Engineering Science and Researches*, cilt 4, no. 11, pp. 74-82, November 2017.
- [60] E. H. Bouhablla, R. B. Aïm ve H. Buisson, "Microfiltration of activated sludge using submerged membrane with air bubbling (application to wastewater treatment)," *Desalination*, Cilt 1-3, no. 118, pp. 315-322, 1998.
- [61] E. H. Bouhablla, R. B. Aïm ve H. Buisson, "Fouling characterisation in membrane bioreactors," *Separation and Purification Technology*, no. 22-23, pp. 123-132, 2001.
- [62] X. Huang, R. Liu ve Y. Qian, "Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor," *Process Biochemistry*, cilt 36, pp. 401-406, 2000.
- [63] X. Huang, P. Gui ve Y. Qian, "Effect of sludge retention time on microbial behaviour in a submerged membrane bioreactor," *Process Biochemistry*, cilt 36, pp. 1001-1006, 2001.
- [64] J. Lee, W.-Y. Ahn ve C.-H. Lee, "Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor," *Water Research*, no. 35, pp. 2435-2445, 2001.
- [65] M. Mulder, Basic Principles of Membrane Technology, 2 ed., Springer Netherlands, 1996.

- [66] T. Murakami, J. Usui, K. Takamura ve T. Yoshikawa, "Application of immersed-type membrane separation activated sludge process to municipal wastewater treatment," *Water Science and Technology*, cilt 41, no. 10-11, p. 295–301, 2000.
- [67] M. Ogoshi ve Y. M. S. Y. Suzuki, "Application of MBR to an easily installed municipal wastewater treatment plant," *Water Science and Technology*, cilt 41, no. 10-11, p. 287–293, 2000.
- [68] H.-S. Shin ve H.-S. Park, "Enhanced nutrient removal in porous biomass carrier sequencing batch reactor (PBCSBR)," *Water Science and Technology*, cilt 23, no. 4-6, pp. 157-163, 1991.
- [69] B. Farizoğlu ve S. Uzuner, "Design of a Novel Membrane Draft Tube Jet Loop Reactor (MDJLR) and Treatment of Slaughterhouse Wastewater," *Membranes*, no. 9, p. 155, 11 2019.
- [70] C. Wisniewski ve A. Grasmick, "Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, no. 138, pp. 403-4011, 1998.
- [71] J.-G. Choi, T.-H. Bae, J.-H. Kim, T.-M. Tak ve A. A. Randall, "The behavior of membrane fouling initiation on the crossflow bioreactor system," *Journal of Membrane Science*, no. 203, pp. 103-1013, 2002.
- [72] K.-H. Choo ve C.-H. Lee, "Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor," *Water Research*, no. 30, p. 1771–1780, 1996.
- [73] X.-J. Fan, V. Urbain, Y. Qian ve J. Manem, "Ultrafiltration of activated sludge with ceramic membranes in a cross-flow membrane bioreactor process," *Water Science and Technology*, no. 41, pp. 243-250, 2000.
- [74] S. Holler ve W. Trösch, "Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates," *Journal of Biotechnology*, no. 92, pp. 95-101, 2001.
- [75] J. Scott ve K. Smith, "A bioreactor coupled to a membrane to provide aeration and filtration in ice-cream factory wastewater remediation," *Water Research*, no. 31, pp. 69-74, 1997.
- [76] J.-S. Kim, C.-H. Lee ve I.-S. Chang, "Effect of pump shear on the performance of a crossflow membrane bioreactor," *Water Research*, no. 35, p. 2137–2144, 2001.
- [77] L. Defrance ve M. Y. Jaffrin, "Comparison between filtrations at fixed transmembrane pressure and fixed permeate flux application to a membrane bioreactor used for wastewater treatment," *Journal of Membrane Science*, no. 152, pp. 203-210, 1999.
- [78] R. Messalem, A. Brenner, S. Shandalov, Y. Leroux, P. Uzlaner, G. Oron ve D. Wolf, "Pilot study of SBR biological treatment and microfiltration for reclamation and reuse

- of municipal wastewater,” *Water Science & Technology*, Cilt 1-2, no. 42, pp. 263-268, 2000.
- [79] W. Scholz ve W. Fuchs, “Treatment of oil contaminated wastewater in a membrane bioreactor,” *Water Research*, cilt 14, no. 34, pp. 3621-3629, 2000.
- [80] C. H. Xing, E. Tardieu, Y. Qian ve X. H. Wen, “Ultrafiltration membrane bioreactor for urban wastewater reclamation,” *Journal of Membrane Science*, Cilt 1-2, no. 177, pp. 73-82, 2000.
- [81] B. Farizoglu ve S. Uzuner, “The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system,” *Biochemical Engineering Journal*, cilt 1, no. 57, pp. 46-54, 2011.
- [82] B. Farizoglu ve B. Keskinler, “Sludge characteristics and effect of crossflow membrane filtration on membrane fouling in a jet loop membrane bioreactor (JLMBR),” *Journal of Membrane Science*, no. 279, p. 578–587, 2006.
- [83] K. Poojamnong, K. Tungsudjawong, W. Khongnakorn ve P. Jutaporn, “Characterization of reversible and irreversible foulants in membrane bioreactor (MBR) for eucalyptus pulp and paper mill wastewater treatment using fluorescence regional integration,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, cilt 8, no. 5, p. 104231, 27 Haziran 2020.
- [84] A. W. Mohammad, Y. H. Teow, W. C. Chong ve K. C. Ho, “Hybrid Processes: Membrane Bioreactor,” %1 içinde *Membrane Separation Principles and Applications*, A. F. Ismail, M. A. Rahman, M. H. D. Othman ve T. Matsuura, Dü, Amsterdam, Elsevier Inc., 2019, pp. 401-470.
- [85] B. Ladewig ve M. N. Z. Al-Shaeli, *Fundamentals of Membrane Bioreactors*, Singapur: Springer Singapore, 2017.
- [86] S. Smith, “Pilot assessment of Novel Membrane Bioreactor Processes - Improvements in Biological Nutrient Removal and Membrane Operation,” University of South Florida, 2011.
- [87] N. Çiçek, J. P. Franco, M. T. Suidan, V. Urbain and J. Manem, "Characterization and comparison of a membrane bioreactor and a conventional activated-sludge system in the treatment of wastewater containing high-molecular-weight compounds," *Water Environment Research*, vol. 71, no. 1, pp. 64 - 70, 1999.
- [88] P. K. Gkotsis ve A. I. Zouboulis, “Biomass Characteristics and Their Effect on Membran Bioreactor Fouling,” *Molecules*, cilt 24, no. 2867, pp. 1 - 19, 2019.
- [89] L. Deng, W. Guo, H. H. Ngo, H. Zhang, J. Wang, J. Li, S. Xia ve Y. Wu, “Biofouling and control approaches in membrane bioreactors,” *Bioresource Technology*, cilt 221, pp. 656 - 665, 2016.

- [90] H. Lin, M. Zhang, F. Wang, F. Meng, B.-Q. Liao, H. Hong, J. Chen ve W. Gao, "A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies," *Journal of Membrane Science*, cilt 460, pp. 110 - 125, 2014.
- [91] H.-D. Park, I.-S. Chang ve K.-J. Lee, *Principles of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*, CRC Press, 2015.
- [92] E. Jalilnejad, P. Sadeghpour ve K. Ghasemzadeh, "Achievements in membrane bioreactors for wastewater and water treatment," *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, Elsevier Inc., 2020, pp. 187-2020.
- [93] J. Zhang, H. C. Chua, J. Zhou ve A. G. Fane, "Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors," *Journal of Membrane Science*, cilt 284, no. 1 - 2, pp. 54 - 66, 2006.
- [94] S. A. Hristova, "Continuous Homogeneous Hydroformylation with Integrated Membrane Separation: Kinetics, Mechanism and Jet Loop Reactor Technology," Technische Universiteit Eindhoven, 2013.
- [95] S. Weber, "Jet Aerated Loop Reactors as Alternative to Stirred Tank Reactors," Halle-Wittenberg, 2019.
- [96] S. Moradi, A. A. Zinatizadeh, S. Zinadini ve F. Gholami, "High-rate CNP removal from wastewater in a single jet loop air lift bioreactor: Process modeling and optimization with four process and operating factors," *Journal of Water Process Engineering*, cilt 40, 04 2021.
- [97] V. Diez, J. M. Cámara, M. O. Ruiz, R. Martínez ve C. Ramos, "A novel jet-loop anaerobic filter membrane bioreactor treating raw slaughterhouse wastewater Biological and filtration processes," *Chemical Engineering Journal*, cilt 408, 03 2021.
- [98] F. Gholami, A. A. Zinatizadeh, S. Zinadini, T. McKay ve L. Sibali, "An innovative jet loop-airlift bioreactor for simultaneous removal of carbon and nitrogen from soft drink industrial wastewater Process performance and kinetic evaluation," *Environmental Technology & Innovation*, cilt 19, 08 2020.
- [99] B. Farizoğlu ve B. Keskinler, "Influence of draft tube cross-sectional geometry on K_La and ϵ in jet loop bioreactors (JLB)," *Chemical Engineering Journal*, cilt 133, no. 1-3, pp. 293-299, 09 2007.
- [100] American Public Health Association / American Water Works Association, *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, 20. ed., Washington, 1999.
- [101] U. Wachsmann, N. Rabiger ve A. Vogelpohl, "The compact reactor - a newly developed loop reactor with a high mass transfer performance," *German Chemical Engineering*, no. 8, pp. 411-418, 1984.

- [102] N. L. Lukić, I. M. Šijački, P. S. Kojić, S. S. Popović, M. N. Tekić ve D. L. Petrović, “Enhanced mass transfer in a novel external-loop airlift reactor with self-agitated impellers,” *Biochemical Engineering Journal*, no. 118, pp. 53-63, 2017.
- [103] M. Kazemzadeh-Afshar, M.-H. Sarrafzadeh ve M.-R. Mehrnia, “Performance of An Airlift Membrane Bioreactor Under Different Aeration Rates,” *Journal of Membrane and Separation Technology*, no. 1, pp. 145-154, 2012.
- [104] N. Kayaalp ve G. Öztürkmen, “A venturi device reduces membrane fouling in a submerged membrane bioreactor,” *Water Science & Technology*, cilt 1, no. 74, pp. 147-156, 2016.
- [105] H. Gagnon, M. Lounès ve J. Thibault, “Power consumption and mass transfer in agitated gas-liquid columns: A comparative study,” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, no. 76, pp. 379-389, 06 1998.
- [106] E. Kouakou, T. Salmon, D. Toyé, P. Marchot ve M. Crine, “Gas-liquid mass transfer in a circulating jet-loop nitrifying MBR,” *Chemical Engineering Science*, no. 60, p. 6346 – 6353, 2005.
- [107] E. R. Gouveia, C. O. Hokka ve A. C. Badino, “The Effects of Geometry and Operational Conditions on Gas Holdup, Liquid Circulation and Mass Transfer in an Airlift Reactor,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, cilt 4, no. 20, pp. 363-374, 12 2003.
- [108] U. Onken ve P. Weiland, *Advances in Biotechnological Processes*, cilt 1, A. Mizrahi ve L. van Werzel, New York: Alan R. Liss, 1983, pp. 67-95.
- [109] A. Fadavi ve Y. Chisti, “Gas-liquid mass transfer in a novel forced circulation loop reactor,” *Chemical Engineering Journal*, no. 112, pp. 73-80, 2005.
- [110] J. Vidal, C. Huiliñir ve R. Salazar, “Removal of organic matter contained in slaughterhouse wastewater using a combination of anaerobic digestion and solar photoelectro-Fenton processes,” *Electrochimica Acta*, cilt 210, pp. 163-170, Ağustos 2016.
- [111] R. Loganath ve D. Mazumder, “Performance study on organic carbon, total nitrogen, suspended solids removal and biogas production in hybrid UASB reactor treating real slaughterhouse wastewater,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, cilt 6, no. 2, pp. 3474-3484, Nisan 2018.
- [112] P. Jensen, S. Yap, A. Boyle-Gotla, J. Janoschka, C. Carney, M. Pidou ve D. Batstone, “Anaerobic membrane bioreactors enable high rate treatment of slaughterhouse wastewater,” *Biochemical Engineering Journal*, cilt 97, pp. 132-141, 15 Mayıs 2015.
- [113] C. F. Bustillo-Lecompte ve M. Mehrvar, “Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic-aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner

- production in the meat processing industry,” *Journal of Cleaner Production*, cilt 141, pp. 278-289, 10 Ocak 2017.
- [114] P. Alfonso-Muniozguren, J. Lee, M. Bussemaker, R. Chadeesingh, C. Jones, D. Oakley ve D. Saroj, “A combined activated sludge-filtration-ozonation process for abattoir wastewater treatment,” *Journal of Water Process Engineering*, cilt 25, pp. 157-163, Ekim 2018.
- [115] R. Del Pozo ve V. Diez, “Integrated anaerobic–aerobic fixed-film reactor for slaughterhouse wastewater treatment,” *Water Research*, cilt 39, no. 6, p. 1114–1122, 2005.
- [116] G. Tchobanoglous ve F. L. Burton, *Wastewater engineering : treatment disposal reuse / Metcalf and Eddy*, 3. ed., New York: McGraw-Hill, 1991.
- [117] J. C. Bloor, G. K. Anderson ve A. R. Willey, “High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor,” *Water Research*, cilt 29, no. 5, pp. 1217-1223, Mayıs 1995.
- [118] A. R. Rajab, M. R. Salim, J. Sohaili, A. N. Anuar, Salmiati ve S. K. Lakkaboyana, “Performance of integrated anaerobic/aerobic sequencing batch reactor treating poultry slaughterhouse wastewater,” *Chemical Engineering Journal*, cilt 313, pp. 967-974, Nisan 2017.
- [119] M. N. Bingo, M. Njoya, M. Basitere, S. K. Obed Ntwampe ve E. Kaskote, “Performance evaluation of an integrated multi-stage poultry slaughterhouse wastewater treatment system,” *Journal of Water Process Engineering*, cilt 43, p. 102309, 2021.
- [120] N. C. Silveira, G. H. D. Oliveira, M. H. R. Z. Damianovic ve E. Foresti, “Two-stage partial nitrification-Anammox process for nitrogen removal from slaughterhouse wastewater: Evaluation of the nitrogen loading rate and microbial community analysis,” *Journal of Environmental Management*, cilt 296, p. 113214, 9 Temmuz 2021.

Yayın Listesi

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN** (2019). Design of a Novel Membrane Draft Tube Jet Loop Reactor (MDJLR) and Treatment of Slaughterhouse Wastewater. *MEMBRANES*, 9(11), 155, Doi: 10.3390/membranes9110155 (Yayın No: 5516261) [**Tezden türetilmiştir**]
2. FARİZOĞLU BURHANETTİN, FİL BAYBARS ALİ, **UZUNER SÜLEYMAN**, BİÇAKCI SABRİ, ER EREN, KARA EDA NUR (2018). Reactive Black 5 Removal with Electro-Oxidation Method using Ti/IrO₂/RuO₂ Anode and Stainless Steel Cathode. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(4), 3288-3296., Doi: 10.20964/2018.04.58 (Yayın No: 4240270)
3. AYTAR ÇELİK PINAR, Gedikli Serap, YAVUZ ÇELİKDEMİR MELTEM, **UZUNER SÜLEYMAN**, FARİZOĞLU BURHANETTİN, ŞAM MESUT, ÇABUK AHMET, SAĞLAM NECDET (2011). Dephenolization of Olive Mill Wastewater by Pellets of Some White Rot Fungi. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 39(4), 379-390. (Yayın No: 3323653)
4. FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN** (2011). The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system. *BIOCHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 57, 46-54., Doi: 10.1016/j.bej.2011.08.007 (Yayın No: 144588)

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, FİL BAYBARS ALİ, ORTAASYALI ESMA SULTAN (2019). Investigation of Slaughterhouse Wastewater Treatment with Newly Designed Membrane Draft Tube Jet Loop Reactor (MDJLR). 6th MEMTEK International Symposium on Membrane Technologies and Applications (MEMTEK 2019), 285-292. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5516341)
2. **UZUNER SÜLEYMAN**, FARİZOĞLU BURHANETTİN, FİL BAYBARS ALİ, ORTAASYALI ESMA SULTAN, MERT HEKİM SERPİL, KUL SİNAN (2019). COD Removal from Slaughterhouse Wastewater Using Laboratory Scale Membrane Bioreactor. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET 2019) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5345459)
3. FİL BAYBARS ALİ, Kara Eda Nur, FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, Günaslan Sermin, KUL SİNAN (2019). Electrooxidation method for the treatment of olive brine wastewater: Effect of support electrolyte type and concentration. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET 2019) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5713576)
4. **UZUNER SÜLEYMAN**, FARİZOĞLU BURHANETTİN, FİL BAYBARS ALİ (2018). INVESTIGATION OF COD REMOVAL FROM SLAUGHTERHOUSE WASTEWATER USING NEWLY DEVELOPED JET LOOP MEMBRANE BIOREACTOR. 1.ULUSLARARASI İÇMESUYU ve ATIKSU SEMPOZYUMU (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4647927)
5. FİL BAYBARS ALİ, BONCUKCUOĞLU RECEP, YILMAZ ALPER ERDEM, **UZUNER SÜLEYMAN** (2018). Elektrokoagülasyon İle Renk Gideriminde Başlangıç Boyar Madde Konsantrasyonu ve Akım Yoğunluğunun Etkisi. 1. Uluslararası İçmesuyu ve Atıksu Sempozyumu (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4729230)
6. FİL BAYBARS ALİ, BONCUKCUOĞLU RECEP, YILMAZ ALPER ERDEM, FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN** (2017). STUDY OF THE ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF ORGANIC DYES. 3rd International Conference on Environmental Science and Technology (ICOEST), 193 (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3620075)
7. FİL BAYBARS ALİ, BONCUKCUOĞLU RECEP, YILMAZ ALPER ERDEM, KUL SİNAN, **UZUNER SÜLEYMAN** (2017). COD (Chemical Oxygen Demand) Removal from Wastewater Using Ti/IrO₂/RuO₂ Anode. 3rd International Conference on Environmental Science and Technology, 248-252. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4444618)
8. FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, FİL BAYBARS ALİ, ÇAM BÜŞRA, GÖKSEL ZAFER (2017). COD and Suspended Solids Removal of Wood Industry Wastewater Using Cross-flow Ceramic Membrane System. 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2838-2838. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3510160)
9. FİL BAYBARS ALİ, FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, ER EREN (2017). Removal of Organic Dye from Aqueous Solutions with Electro-oxidation. 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 3066-3074. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3510191)

10. KORKMAZ MUSTAFA, FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, FİL BAYBARS ALİ (2013). DETERMINATION OF PARAMETERS AFFECTING OXYGEN TRANSFER COEFFICIENT IN A JET-LOOP BIOREACTOR. Second International Conference on Water, Energy and the Environment (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3731216)
11. **UZUNER SÜLEYMAN**, SERTKAYA SİMGE, YILDIZ ERGÜN, NUHOĞLU ALPER, FARİZOĞLU BURHANETTİN (2013). PERFORMANCE OF JLMBR SYSTEM AT OLIVE MILL WASTEWATER. International Conference of West of The East The East of The West (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3512264)
12. **UZUNER SÜLEYMAN**, KÖYBAŞI ERMAN, SERTKAYA SİMGE (2013). CONTROL OF LABORATORY SCALE JET LOOP BIOLOGICAL REACTOR SET UP. International Conference West of The East The East of The West (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:3512254)

E. E. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, ÇAMBÜŞRA, DEMİR EMRE CAN, HEKİM SERPİL (2017). Ağaç Sanayi Atıksularının Laboratuvar Ölçekli Bir MBR Sisteminde Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. 5. Ulusal Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu (MEMTEK 2017) (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3589667)
2. SERTKAYA SİMGE, FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, FİL BAYBARS ALİ (2015). Jet Loop Reaktörle Sızıntı Sularından Amonyak Giderimine Sıcaklığın Etkisinin İncelenmesi. 11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, 2, 313-323. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2144767)
3. FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN**, SERTKAYA SİMGE (2012). Süt Endüstrisi Atıksularının Arıtıldığı Jet-loop Membran Biyoreaktörün Sürekli Arıtım Biyolojik Katsayılarının Belirlenmesi. TÜRKİYE DE ÇEVRE KİRLENMESİ ÖNCELİKLERİ SEMPOZYUMU VII (ÇEVKOS) (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3620076)
4. FARİZOĞLU BURHANETTİN, **UZUNER SÜLEYMAN** (2009). Süt Endüstrisi Atıksularının Jet Loop Biyoreaktörde Arıtılması. VIII. ULUSAL ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ KONGRESİ, 1(1), 249-262. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:144902)