

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE (MBR) TIKANMA KONTROLÜ İÇİN
TİTREŞİM UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve YILMAZ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri ve Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail KOYUNCU

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE (MBR) TIKANMA KONTROLÜ İÇİN
TİTREŞİM UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Merve YILMAZ
(501141724)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri ve Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail KOYUNCU

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501141724 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Merve YILMAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE (MBR) TIKANMA KONTROLÜ İÇİN TİTREŞİM UYGULAMALARI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İsmail KOYUNCU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Bülent Keskinler**
Gebze Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Derya Yüksel İmer
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Mayıs 2016
Savunma Tarihi : 27 Temmuz 2016

Eşime ve kızıma,

ÖNSÖZ

Dünyadaki su kaynaklarının hızlı bir şekilde tükendiği bilinmektedir. Bu sebeple su arıtımı konusuna verilen önem de giderek artmaktadır. Yenilikçi ve hızla yayılan bir teknoloji olan membran teknolojisi ise bunların başında gelmektedir. Birçok alanda kullanılabilen membranların MBR (Membran biyoreaktör) şeklinde kullanımı genellikle su arıtımı alanında uygulanmaktadır. Fakat her teknolojinin olduğu gibi MBR'lerin de bazı dezavantajları mevcuttur. Bunlardan en önemlisi ise tıkanma problemi.

Bu çalışmada, membranların tıkanmasını önlemek ve azaltmak amacıyla yeni çalışmalar yapılmış ve laboratuvar ölçekli MBR sisteminde bu çalışmalar denenmiştir. . Tez çalışmam kapsamında yardımları ve yol göstericiliği için tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail KOYUNCU'ya, projesinde çalışmama imkan verdiği için Sayın Doç.Dr. Osman Atilla Arıkan'a, çalışmamın gerçekleştiği projenin araştırmacılarından Sayın Doç. Dr. Nevzat Özgü Yiğit'e, Yard. Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin'e, Araş. Gör. Dr. Hale Özgün'e, tez çalışmalarım süresince her konuda desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Derya Yüksel İmer'e, tez çalışmalarım süresince teorik ve teknik bilgilerini esirgemeyen projede yer alan Araştırma Görevlisi Sayın Recep KAYA'ya ve diğer proje arkadaşlarıma ve tüm MEM-TEK çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam TUBİTAK 113Y341 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Maddi destekleri için TUBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak beni bugünlere getiren aileme, merhum babama, yüksek lisans eğitimi almam için beni destekleyen eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2016

Merve Yılmaz
(Çevre Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Tezin Kapsamı	3
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1 Genel Membran Tanımı	4
2.2 Membran Materyalleri	4
2.3 Membranın Sınıflandırılması	8
2.4 Membran Modül Geometrisi	13
2.5 Membran Performansı ile İlgili Genel Tanımlar	17
2.6 Membran Tıkanması ve Membran Kirliliğinin Giderilmesi	19
2.7 Membran Biyoreaktörler (MBR)	23
2.7.1 MBR teknolojisi	26
2.7.2 MBR ve klasik aktif çamur sisteminin karşılaştırılması	27
2.7.3 Evsel ve endüstriyel atıksu arıtımında MBR uygulamaları	29
2.7.4 MBR 'lerin avantaj ve dezavantajları	32
2.7.5 MBR'lerde tıkanma problemi	34
2.7.5.1 İşletme şartları	35
2.7.5.2 Membranın fizikokimyasal karakteri	37
2.7.5.3 Biyokütle özellikleri	38
2.8 MBR'lerde Tıkanma (Kirlenme) Kontrolü Ve İyileştirme	39
2.9 MBR Sistemlerinde Titreşim Uygulamaları	44
2.9.1 MBR sistemleri için titreşim konsepti	44
2.9.2 MBR modülleri için dizayn edilen titreşim sistemlerinin incelenmesi	45
2.9.3 Titreşimli MBR modül sistemlerinde gerçekleştirilmiş filtrasyon çalışmaları	56
3. MATERYAL-METOD	69
3.1 Atıksu Kaynağı ve Karakterizasyonu	69
3.2 Çamur Karakterizasyonu	70
3.3 Sistem Tanıtımı	71
3.4 Membran Modüllerinin Tanıtımı	81
3.4.1 Membran modüllerin fiziksel özellikleri ve dizaynı	81
3.4.2 Membran modüllerin hazırlanması	82

3.5	Titreşim Sistemleri	83
3.5.1	Mekanik motorlu sistem	84
3.5.2	Manyetik motorlu sistem	87
3.6	MBR İşletmesi Sırasında Yapılan Deneyler	88
3.6.1	Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	89
3.6.2	Askıda katı madde-uçucu askıda katı madde (AKM-UAKM).....	90
3.6.3	Toplam katı madde- toplam uçucu katı madde (TKM-TUKM).....	91
3.6.4	Toplam kjeldahl azotu (TKN)	92
3.6.5	Toplam fosfor (TP).....	94
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	95
4.1	MBR'nin Rutin İzleme Sonuçları	95
4.1.1	AKM-UAKM	95
4.1.2	pH	95
4.1.3	Sıcaklık	96
4.1.4	ORP	97
4.1.5	İletkenlik.....	97
4.1.6	Çözülmüş oksijen	97
4.2	Filtrasyon Performansı	98
4.2.1	TMP profilleri.....	98
4.2.2	Kritik Akı Deney Sonuçları.....	100
4.3	Uzun Süreli Deneysel İşletme Verim Sonuçları	102
4.3.1	AKM sonuçları	102
4.3.2	KOİ sonuçları	103
4.3.3	TKN sonuçları	104
4.3.4	TP sonuçları.....	105
4.3.5	Bulanıklık sonuçları.....	106
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
	KAYNAKLAR.....	112
	ÖZGEÇMİŞ	118

KISALTMALAR

AKM	: Askıda katı madde
BOI₅	: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
CIA	: Havada temizleme (cleaning in air)
EPS	: Hücre dışı polimerik madde (Extracellular Polimeric Substances)
FS	: Düz plaka (flat sheet)
GT	: Gaz transferi
GEWPT	: GE Water and Process Technologies
HRT	: Hidrolik bekleme süresi
KOI	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
LMH	: Litre/metrekare/saat
MBR	: Membran biyoreaktör
MF	: Mikrofiltrasyon
MLSS	: Karışık sıvıdaki askıda katı madde (mixed liquor suspended solids)
MRC	: Mitsubishi Rayon Corporation
MWCO	: Molekül ağırlığı ayırma sınırı (molecular weight cut off)
NF	: Nanofiltrasyon
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit (bulanıklık birimi)
ORP	: Oksidasyon redüksüyon potansiyeli
PES	: Polietersülfon
PTFE	: Politetrafloroetilen
PVDF	: Polyvinyliden difluorid
RO	: Ters osmoz (reverse osmosis)
SCADA	: Uzaktan kontrol ve gözleme sistemi (Supervisory Control And Data Acquisition)
SMP	: Çözünmüş mikrobiyal ürünler (Soluble Microbial Product)
SRT	: Çamur yaşı (solids retention time)
TAKM	: Toplam askıda katı madde
TUKM	: Toplam uçucu askıda katı madde
TKN	: Toplam kjeldahl azotu
TMP	: Transmembran basıncı
TP	: Toplam fosfor
UAKM	: Uçucu askıda katı madde
UF	: Ultrafiltrasyon

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Membran yapımında kullanılan malzemeler (Köseoğlu, 2011).	5
Çizelge 2.2 : Membranların yapısal özellikleri ve önemleri (Ramesh, 1997).	8
Çizelge 2.3 : Çapraz akış ve klasik filtrasyon ayırma verimlerinin karşılaştırılması (Ramesh, 1997).	13
Çizelge 2.4 : Membran konfigürasyonları (Judd,S., Judd,C.,2006).	16
Çizelge 2.5 : Olgusal katsayılar ve akı için : itici kuvveti, akı denklemleri, SI birimleri ve farklı taşınım çeşitleri için yaygın kullanılan isimleri (Beier, 2008).	18
Çizelge 2.6 : MBR gelişimi ve ticarileştirilmesinin özeti (Judd,S., Judd,C.,2006).	25
Çizelge 2.7 : Dahili ve harici MBR’lerin karşılaştırılması (Yiğit, 2007).	27
Çizelge 2.8 : Dünya genelinde bulunan en büyük MBR tesisleri ve bu tesislerin bazı özellikleri (http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/).....	30
Çizelge 2.9 : Dört MBR üreticisi için, yoğun kimyasal temizleme protokol örnekleri (Judd,S.,Judd,C., 2006).	42
Çizelge 2.10 : Titreşim sistemleri özet tablosu.....	55
Çizelge 3.1 : Sentetik atıksu kompozisyonu (Agtas ve diğ., 2016)	69
Çizelge 3.2 : Sentetik atıksu karakterizasyonu	70
Çizelge 3.3 : Aşı çamuru karakterizasyonu	70
Çizelge 3.4 : MBR sisteminin teknik özellikleri	71
Çizelge 3.5 : Modül özellikleri.....	81
Çizelge 3.6 : Mekanik titreşim sisteminde kullanılan vibrasyon motorunun teknik özellikleri	85
Çizelge 3.7 : Manyetik titreştirici motor teknik özellikleri	88
Çizelge 3.8 : Modüllerin kritik akı deney sonuçları.....	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Konvansiyonel ve Yenilikçi membranlar; performans ve endüstriyelletirebilirlik karşılaştırması (Pendergast ve Hoek, 2011).....	7
Şekil 2.2.	Membran filtrasyon spekturumu (Osmonics Inc, 1996).....	9
Şekil 2.3.	Ölü-uç ve çapraz akım şeması.	12
Şekil 2.4.	Plaka ve çerçeve membran modülünün şeması (EPA, 2005).	14
Şekil 2.5.	Spiral sargılı membran modülünün şeması (EPA, 2005).	14
Şekil 2.6.	Tübüler membran modülünün şeması (EPA, 2005).....	15
Şekil 2.7.	Boşluklu fiber modülünün şeması.....	15
Şekil 2.8.	Membran konfigürasyonlarında akış şekilleri (a) plaka ve çerçeve modül (b) tübüler modül (c) boşluklu fiber modülü (Judd,S., Judd,C.,2006).	17
Şekil 2.9.	Konsantrasyon polarizasyonu (Eren, 2006).	21
Şekil 2.10.	Bir MBR ünitesinin üstten görünüşü (Delikanlı, 2013).	24
Şekil 2.11.	MBR türleri (Yiğit, 2007).....	26
Şekil 2.12.	MBR’larda tıkanmayı etkileyen faktörler (Chang ve diğ., 2002, Judd, 2001).	35
Şekil 2.13.	Boyuna titreşimli MBR sistemi (Low ve diğ., 2005).	45
Şekil 2.14.	Beier et al tarafından kullanılan titreşimli sistemin şematik çizimi (A eski versiyon, B yeni versiyon).	46
Şekil 2.15.	Li ve diğerleri tarafından kullanılan deney düzeneği. (Li ve diğ., 2013).....	47
Şekil 2.16.	Genkin ve diğerleri tarafından kullanılan laboratuvar ölçekli batık membran titreşim ünitesi.....	48
Şekil 2.17.	Levha membranlı batık titreşimli sistemin şekli (Gomaa ve diğ., 2011).....	49
Şekil 2.18.	Li’nin enine titreşim düzeneği. (Li ve diğ. 2013).	50
Şekil 2.19.	Anusha Kola tarafından kullanılan enine titreşim sisteminin şematik gösterimi (Kola ve diğ., 2014).....	51
Şekil 2.20.	Döngüsel titreşim düzeneği (Low ve diğ., 2005).....	52
Şekil 2.21.	Harici bir MBR modülü olarak kullanılan bir VSEP sistemi (Low ve diğ., 2005).....	53
Şekil 2.22.	Yeni geliştirilen indüklenmiş manyetik (MMV) MBR sisteminin şematik gösterimi. A) MMV sistemi ile donatılmış MBR sistemi. B) MMV modülünün haznesinin görünümü. C) Birden fazla membran çerçevelerinin paralel konumlandırmasını gösteren MMV modülünün yan görünümü (Bilad ve diğ. 2011, Mezohegyi ve diğ., 2012).....	54

Şekil 2.23.	Kritik akının ortalama yüzey kayma gerilimi ve ortalama zaman fonksiyonu log-log grafiği. +4 L/(m ² .h) hata payı her noktayla alakalıdır. Referans verileri [18] de bulunmaktadır.	57
Şekil 2.24.	Referans 18 'in titreşimsel biriminde gösterildiği üzere, frekansın kritik akı ve ortalama kesme gerilmesi üzerindeki etkileri.	57
Şekil 2.25.	Titreşim frekansının 3 farklı seviyedeki genlik değerleri için kritik akının bir fonksiyonu (Beier ve diğ. 2006).	58
Şekil 2.26.	Titreşim genliğinin 3 farklı seviyedeki frekans değerleri için kritik akının bir fonksiyonu. (Beier ve diğ. 2006)	59
Şekil 2.27.	Titreşim genliğinin filtrasyon akısı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).....	60
Şekil 2.28.	Titreşim genliğinin kek tabakası kalınlığı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).	60
Şekil 2.29.	Titreşim frekansının filtrasyon akısı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).....	61
Şekil 2.30.	Filtrasyon frekansının kek tabakası kalınlığı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).	61
Şekil 2.31.	1.7Hz(opm) frekansta koagülant konsantrasyonunun kritik akıya etkisi (Genkin ve diğ. 2006).....	62
Şekil 2.32.	Yıkanmamış maya, yıkanmış maya süspansiyonları ve yüzey fazı değerleri (yıkanmış ve yıkanmamış maya süspansiyonları 4g/l , yüzey fazı konsantrasyonu 1g/l . 5x5 fiber demeti, fiber uzunluğu 18cm , süzüntü akısı 25 LMH , enine titreşimli, titreşim genliği 16mm, titreşim frekansı 2Hz) (Li ve diğ. 2013).	64
Şekil 2.33.	Yıkanmış ve yıkanmamış maya hücreleri için yarı kritik akı filtrasyonu boyunca TMP değeri (30L/m ² h) . besleme: 4g/l kuru hücre ağırlığı. Modül titreşimi 25Hz 0.7mm genlik 880s-1 ortalama kayma gerilimi yüzeyi. Lineer gerilim çizgileri tıkanma oranını gösteriyor. (Beier ve Jonsson, 2008).	64
Şekil 2.34.	Enine ve boyuna titreşimli membranların tıkanma oranı (5x5 fiber demetleri, fiber uzunluğu 18cm, süzüntü akısı 25LMH , titreşim frekansı 1Hz ve yıkanmamış maya süspansiyonu 4g/l.) (Li ve diğ. 2013).....	65
Şekil 2.35.	Deney amaçlı kullanılan bir titreşim sistemli batık MBR düzeneği şeması (Beier ve diğ., 2006).	67
Şekil 2.36.	Manyetik titreşim sistemi ve MBR sistemi (a), kullanılan düz plaka membran modülü (b), çoklu membrandan oluşan modülün yandan görünümü(c).	68
Şekil 3.1 :	Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin akım şeması	72
Şekil 3.2 :	Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin genel görünümü.	73
Şekil 3.3 :	Çözünmüş oksijen probunun görünümü.....	73
Şekil 3.4 :	Havalandırma vanalarının görünümü.	74
Şekil 3.5 :	pH probunun görünümü.....	74
Şekil 3.6 :	ORP probunun görünümü.....	75
Şekil 3.7 :	Sıcaklık probunun görünümü.	75
Şekil 3.8 :	Basınç ölçerlerin görünümü.	76
Şekil 3.9 :	İletkenlik probunun görünümü.....	76
Şekil 3.10 :	Seviye sensörünün görünümü.	77
Şekil 3.11 :	Terazilerin görünümü.	78
Şekil 3.12 :	Vakum pompalarının görünümü.	78

Şekil 3.13 : Besleme pompasının görünümü.	79
Şekil 3.14 : MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü.	80
Şekil 3.15 : Modülün üç boyutlu görünümü.	81
Şekil 3.16 : Boşluklu fiber (hollow fiber) membranların dizilimleri.	82
Şekil 3.17 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır laboratuvar ölçekli MBR modülü.	83
Şekil 3.18 : Özel salınım yayı (a) ve iki kutuplu titreşim motoru (b).	84
Şekil 3.19 : Mekanik titreşim sisteminin teknik detayları.	85
Şekil 3.20 : Mekanik titreşim sisteminin elektrik panosu.	86
Şekil 3.21 : Motor kutbu (a) ve kutup içerisindeki ağırlıkların birbirlerine göre farklı konumları (b).	86
Şekil 3.22 : Manyetik titreştirici motor (a) ve sürücü devresi (b).	87
Şekil 3.23 : Manyetik titreştirici sistemin teknik detayları.	88
Şekil 4.1 : İşletme boyunca reaktör içi AKM-UAKM profili.	95
Şekil 4.2 : pH profili.	96
Şekil 4.3 : Sıcaklık profili.	96
Şekil 4.4 : ORP profili.	97
Şekil 4.5 : İletkenlik profili.	97
Şekil 4.6 : Çözünmüş oksijen profili.	98
Şekil 4.7 : 1. Aşama için titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün TMP değişimleri.	99
Şekil 4.8 : 2. Aşama için titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün TMP değişimleri.	99
Şekil 4.9 : Kritik akı deneyinin sonuçları: (A) Titreşimsiz modül, (B) Manyetik titreşimli modül (C) Mekanik titreşimli modül.	101
Şekil 4.10 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde AKM giderim verimi grafiği.	103
Şekil 4.11 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde KOİ giderim verimi grafiği.	104
Şekil 4.12 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde TKN giderim verimi grafiği.	105
Şekil 4.13 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde TP giderim verimi grafiği.	106
Şekil 4.14 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde TP giderim verimi grafiği.	107

MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE (MBR) TIKANMA KONTROLÜ İÇİN TİTREŞİM UYGULAMALARI

ÖZET

Dünyamızın % 70'inin su olduğu bilinen bir gerçektir. Bu şekilde bakıldığında suya ulaşımın çok zor olmayacağı kanısına varılabilir. Fakat, yeryüzü sularının yalnızca % 2,5'u tatlı su kaynaklarını oluşturmaktadır. Su kaynaklarının yanlış kullanımı ve bilinçsizce kirletilmesi, zaten yeterince az olan mevcut su oranının daha da azalmasına neden olmaktadır. Dünyada genel olarak varlığını ciddi bir konumda koruyan su sorunu, Ortadoğu ülkelerinde ciddi boyutlara ulaşmıştır. Yaşanılan bu sıkıntı, su ve atıksu arıtımına verilen önemi arttırmıştır. Son yıllarda, mevcut arıtma sistemlerinin zaman zaman suyu istenilen kaliteye ulaştırabilmek için yetersiz kalması, su ve atıksu arıtımı konusunda yeni teknoloji arayışlarının hızlanmasına ve bu konuda yapılan çalışmaların yaygınlaşmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda çalışmalar yapılan teknolojilerden biri de membran proseslerdir. Membran, iki fazı birbirinden ayırmak için kullanılan geçirgen veya yarı geçirgen olarak farklılık gösterebilen seçici bir malzeme olarak tanımlanabilmektedir. Bahsedilen iki faz atıksuda, katı-sıvı fazdır.

Membran prosesler birçok özellik bakımından sınıflara ayrılabilir. Bunlardan biri por çapıdır. Por çapına göre membranlar; mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmoz olarak sınıflandırılabilir. Bu membranlar kullanım alanlarına göre; kolloidleri, yağ moleküllerini, büyük molekül ağırlığına sahip organikleri, şeker ve bazı multivalent tuzları, çözünmüş katıları hatta bakteri, virüs ve diğer mikropları tutabilmektedir. Özellikle bakteri, virüs ve mikropların tutulması içme suyu arıtımında çok önemli bir etmendir.

İlk etapta membran prosesler birçok açıdan pahalı olmasına rağmen, membran üretim firmalarının sayısının ve membran üzerinde yapılan çalışmaların artması membranın kullanım alanını genişletmiştir. Böylece membranın çeşitli alanlarda özellikle su arıtımında uygulanabilirliğinin de önü açılmıştır.

Membran proseslerin kullanıldığı bir alan da membran biyoreaktör (MBR)'lerdir. Membran biyoreaktörler aktif çamur sistemlerinde ayrı tanklarda yapılan biyokimyasal oksidasyon ve su ile biyokütle ayrımını tek bir tank içerisinde gerçekleştirebilmektedir. Klasik aktif çamur sistemleriyle benzerlik gösteren MBR sistemleri, biyolojik arıtımın dışında ayrıca arıtılan suyun membrandan filtrasyon işlemi gerçekleştiği için daha kaliteli bir çıkış suyu elde edilebilmektedir. MBR'ler; yüksek MLSS'lerde çalışmaya uygunluk, son çökeltim havuzu ihtiyacını ortadan kaldırma, daha kaliteli su çıkışı sağlayabilme, alan ihtiyacından tasarruf edebilme gibi özellikleri nedeniyle aktif çamur sistemlerine kıyasla avantajlı bir prosedir. Fakat, bütün bunların yanında tüm proseslerde olduğu gibi MBR'lerin de bazı dezavantajları mevcuttur. Bu dezavantajlardan en önemlisi ve maliyet açısından en çok öne çıkan MBR'lerdeki tıkanma problemidir.

Membran tıkanmalarının giderilmesi için fiziksel ve kimyasal temizleme yöntemleri mevcuttur. Fiziksel temizleme yöntemleri olarak; membranların suyla yada su-hava karışımıyla geri yıkanması ve membran üzerindeki kirliliğin hava ile sıyrılması gösterilebilir. Fiziksel temizleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı zamanlarda ise kimyasal temizleme uygulanır. Kimyasal temizleme ise, bazı belirli kimyasal çözeltileri ile membranın yıkanması olarak düşünülebilir. Bu temizleme periyotları sırasında sistemin durdurulması gerektiğinden, ayrıca temizleme sırasında uygulanan kimyasal sarfiyatı ve uygulanan havadan dolayı işletme maliyeti artmaktadır.

Mevcut fiziksel ve kimyasal temizleme yöntemlerinin yanı sıra, yeni temizleme ve tıkanmayı önleme metodları aranmaktadır. Tıkanmayı önleyici ve/veya azaltıcı yeni yöntemlerden biri de titreşim uygulamalarıdır.

Bu bağlamda yeni bir teknoloji olan titreşimli kayma gerilimli sistemleri öne çıkan bir konu olmuştur. Partiküllerin porlardan filtrasyon solüsyonuna geri transferi sonucu daha yüksek kayma gerilimi gücü daha düşük kirlenme oranına sebep olur. Üstelik membran yüzeyinde oluşan hız kritik akıyı artırır ve kirlenmeyi azaltır. Bu sistemlerin rotasyonel, çaprazlama ve boylamasına motor sürücülü yada manyetik itme çekmeli sürücülü olan farklı türleri vardır. Tüm bu teknikler membran yüzeyindeki kayma gerilimini geliştirme üzerine geliştirilmiştir.

Bu tez kapsamında, titreşimli kayma gerilimli sistemlerin MBR sistemleri içerisinde uygulaması denenmiştir. Literatürde bu uygulamaların denendiği bir çok çalışma vardır, fakat; kullanılan titreşim kaynağı, titreşim türü, izlenilen parametre (akı değişimi, kritik akı değişimi, genlik değişimi vb.) açısından farklılaştırılan bu çalışmalardan iki tanesi tez kapsamında yapılan çalışmayla paralellik göstermektedir. Yapılan çalışmalarda sadece bir titreşim kaynağının etkisi denenirken, bu çalışmada iki farklı titreşim kaynağı kullanılarak karşılaştırılması yapılmıştır.

THE VIBRATION APPLICATIONS FOR FOULING CONTROL OF THE MEMBRANE BIOREACTORS (MBR)

SUMMARY

It is a known fact that 70% of our water world. When viewed in this way, it is assumed access to water can be very easy. However, they constitute only 2.5% of the fresh water resources of surface water. Misuse of water resources and pollution of it unconsciously cause a further reduction of current water rates which is already low enough. Water problem which is existence of serious position in the world has reached more serious proportions in the Middle Eastern countries. This problem led to increase of importance give to water and wastewater treatment. In recent years, inadequate the required quality of existing water treatment systems from time to time leads to accelerate the search for new technologies in water and wastewater treatments and became widespread of studies on this subject. One of the technologies which is studying this regard are membrane processes. The membrane can be defined as selective material which can be vary as permeable or semi-permeable for using to separte two phases from each other. It said two phase the solid-liquid phase in wastewater.

Membrane processes are divided into classes in terms of many features. One of these is the pore diameter. According to pore diameter membranes can be classified.as; microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis. These membranes can hold colloids, fat molecules, with a large molecular weight organics, sugar and some multivalent salts, dissolved solids and even bacteria, viruses and other microbes according to usage areas. Especially, the holding of bacteria, virus and microbes is very important factor as drinking water treatment.

At the fisrt stage, although membrane processes expensive in many aspects, increasing number of studies on the membrane and also membrane production companies has expanded the membrane usage areas. Thus, the applicability of membranes on various fields especially water treatment is opened up.

One of the another area used as membrane processes is membrane bioreactors (MBR). Membrane bioreactors can be carried out biochemical oxidation and seperation of water and biomass which are carried out seperate tanks in activated sluge systems in the single tank. The MBR systems which are similar with conventional activated sludge systems can obtain more quality effluent because of that MBR systems can biological treatment also filtration of treatment water from membrane. MBR's are more advantage process compared to activated sludge systems in many aspects which are the suitability of high MLSS concentration, the elemenate of secondary clarifiers, supplying of more quality efflents and minimization of the area demand. However, MBR's have also some disadvantages like all other processes. The important one of these disadvantages is membrane fouling.

There are physical and chemical cleaning methods to remove membrane fouling. The backwashing of membranes with water or water-air mixture and air-stripping are

examples of physical cleaning methods. When physical cleaning methods are inadequate, chemical cleaning methods are applied. Chemical cleaning methods can be defined as washing membranes with some specific chemical solutions. At this cleaning periods, the system should be stopped. Because of this and also the consumption of chemical and air while cleaning of membranes operating cost increases.

As well as existing physical and chemical cleaning methods, new cleaning and also fouling precaution methods are searched. One of the new method of fouling prevention and / or reduction is vibration applications.

In this context, vibration systems with shear stress has been a outstanding subject. With the back transfer to filtration solution from pores of particules, higher shear stress power causes a lower rate of contamination. Moreover, the velocity on membrane surface increases the critical flux and decreases fouling. There are different types systems; rotational, cross, longitudinal and engine driving and magnetic driving. All of these techniques have been developed on development of the shear stress on the membrane surface.

This thesis has been tested application of vibration systems with shear stress in MBR systems. In the literature there are many studies that tested these applications, however; two of them which are made different in terms of vibration source, vibration type, the parameter following (flux change, critical flux change, amplitude change, etc.) are similar to this thesis study. In studies has been tested the effect of a vibration sources, but, in this study also it is compared using two different vibration source.

1. GİRİŞ

Ülkemizde su talebi giderek artmaktadır ve bu durum maliyet açısından tercih edilebilir, güvenilir bir arıtım sağlayabilecek ileri arıtma teknolojilerine ihtiyacı artırmaktadır. Bu ihtiyaç göz önünde bulundurulduğunda, son yıllarda membran teknolojilerine olan talebin de arttığı görülmüştür. Membran, iki fazı birbirinden ayırmak için kullanılan geçirgen veya yarı geçirgen olarak farklılık gösterebilen seçici bir malzeme olarak tanımlanabilmektedir. Artan taleple birlikte, atıksu arıtmada uygulanan MBR'ler de gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde son on yılda eksponansiyel bir artışla arıtma tesislerinde devreye alınmıştır. Önümüzdeki yıllarda birçok konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinin teknolojilerini MBR'lere dönüştüreceği ve özellikle de son çökeltim havuzlarının ortadan kalkacağı A.B.D ve Avrupa'daki uzmanlar tarafından tahmin edilmektedir (Yiğit, 2007).

Membran biyoreaktörler, aktif çamur sistemlerinde ayrı tanklarda yapılan biyokimyasal oksidasyon ve su ile biyokütle ayrımını tek bir tank içerisinde gerçekleştirebilmektedir. MBR'lerde biyolojik arıtımın dışında ayrıca arıtılan suyun membrandan filtrasyon işlemi gerçekleştiği için daha kaliteli bir çıkış suyu elde edilebilmektedir. Aktif çamur sistemlerine kıyasla, hem verim açısından hem de yer sıkıntısı açısından oldukça avantajlı bir proses olan MBR'lerin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan en önemlisi ve maliyet açısından en çok öne çıkanı MBR'lerdeki tıkanma problemidir.

Membran tıkanmaları mekanik anlamda kabaca ikiye ayrılır: geri dönüşümlü (yüzeyde oluşan jel ve kek tabakasının havalandırma veya fiziksel geri yıkama ile giderilmesi) ve geri dönüşümsüz (çözülmüş veya kolloidal maddelerin adsorbsiyon sonucu gözenek içinde birikimi ve gözeneği tıkanmasının kimyasal temizleme ile giderilmesi (ZENON Env. Inc, 2002).

Membran kirlenmesi, ve bunun sonucunda membranların tıkanması membran sistemlerinin performansını düşüren kritik bir meseledir. Hava kabarcıklı, çapraz akışlı ve süzüntü geri yıkaması ile kayma gerilimi artırılması sıklıkla kullanılan tortu

azaltma yöntemleridir. Yine de bunların sahada uygulanması çok pahalı ve uygulanabilir maliyetine göre limitli olabilmektedir. Örneğin; hava kabarcığı yöntemi sınırlı akı artırımı sağlar ve toplam enerji tüketiminin %70'ini oluşturur. Dolayısıyla MBR sisemlerinde hem daha etkili hem de daha ekonomik başka teknolojiler kullanılmak istenmektedir. Bu teknolojilerden biri de titreşimli kayma gerilimli sistemlerdir. Bu sistemlerin rotasyonel, çaprazlama ve boylamasına motor sürücülü yada manyetik itme çekmeli sürücülü olan farklı türleri mevcuttur. Tüm bu teknikler membran yüzeyindeki kayma gerilimini geliştirme üzerine geliştirilmiştir. Partiküllerin porlardan filtrasyon solüsyonuna geri transferi sonucu daha yüksek kayma gerilimi gücü daha düşük kirlenme oranına sebep olabilmektedir.

Titreşimli kayma gerilimli sistemler bir çok özellik bakımından farklı seçenekler sunularak membran kirlenmesinin önlenmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Bu çalışmalardan olumlu sonuçlar alındıkça membran teknolojileri ve başta MBR'lar olmak üzere diğer kullanım alanlarının gelişmesi ve sayıca artması beklenmektedir. Böylece su arıtımının daha ekonomik ve daha verimli olmasına yol açması beklenmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan verimli su arıtma alternatiflerinden biri olan membran proseslerinin tıkanma problemlerine karşı yenilikçi bir çözüm bulmaktır. Bu tezde, MBR'lardaki membranların yüzeyinde oluşan tıkanmaya sebep olan biyolojik kirlenmenin önlenmesi için membran modüllerine farklı titreşim kaynakları uygulanarak, membran üzerindeki etkileri incelenecektir.

Bu çalışmada, MBR sistemindeki membran modüllere farklı kaynaklardan gelen titreşim uygulanarak biyotıkanma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Titreşimin sıyırma etkisiyle membran yüzeyinde oluşan biyofilm tabakasının kısa sürede tıkanmasının önleneceği öngörülmüştür. Bu bağlamda, farklı titreşim kaynaklarının uygulandığı iki titreşimli modül ve titreşim uygulanmayan bir kontrol modülü aynı MBR içerisinde işletilmiş ve tıkanma üzerindeki etkileri takip edilmiştir.

1.2 Tezin Kapsamı

Tez çalışması kapsamında, membranlardaki biyotıkanmayı önlemek amacıyla, membran modüllerine titreşim uygulanarak çalışmalar denenmiştir. Bu bağlamda, farklı titreşim mekanizmalarının uygulandığı iki titreşimli modül ile titreşim uygulanmayan kontrol modül bir MBR içerisinde işletilmiştir. Literatürdeki titreşim örneklerinden; ses dalgalarının kullanıldığı manyetik titreşim ile mekanik motorların kullanıldığı mekanik titreşim uygulamaları kullanılmıştır. Literatürde belirtilen yöntemlere göre membran modüllerinin içine yerleştirildiği mekanik aksam üç membran modülü için de eşit boyutlarda hazırlanmış ve titreşim kaynağına göre farklı güç kaynağı uygulanarak belli frekanslarda laboratuvar ölçekli MBR’de denenmiştir. Belirlenen frekans aralıklarında belli bir süre çalıştırılmış ve bu aşamada membranların TMP (Trans Membran Basıncı) sonuçları alınıp, değerlendirmeleri yapıldıktan sonra frekans değerleri değiştirilerek farklı frekans değerlerinin de membran üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu denemenin de sonuçları alınarak değerlendirmeleri yapılmıştır. Basınç değerlerinin takibinin yanında ayrıca, MBR’den alınan üç çıkış suyuna KOI, AKM, TP, TKN deneyleri yapılmıştır. Deneyler süresince MBR’lere besleme suyu olarak, evsel atıksu karakterizasyonuna benzer özelliklere sahip sentetik atıksu verilmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Genel Membran Tanımı

Membran prosesi bir bileşenin membran tarafından ayrılan bir fazdan diğer faza seçici ve kontrollü olarak taşınması olarak tanımlanabilir (Köseoğlu, 2011). Membran filtrasyonu, kolloidlerin, büyük moleküllerin, partikül maddelerin, iyonların, askıda katı maddelerin ve çözünmüş maddelerin ayrımı amacıyla kullanılan bir teknolojidir (Taşıyıcı, 2009).

Membran prosesleri fiyat ve arıtma etkisi bakımından hızlı bir şekilde su ve atıksu endüstrisinde kendini kabul ettirmiştir. Bu gelişimde büyük ölçekli ticari amaçlarla kullanılan membran ayırmalarının, konvansiyonel ayırma işlemleriyle kıyaslandıklarında ekonomik ve enerji kullanımı açısından daha verimli olmaları da etkili olmuştur (Köseoğlu, 2011).

Membran proseslerinin kullanıldığı başlıca endüstri alanları: Kimya, petrokimya, çevre, eczacılık, ilaç, gıda, günlük gıdalar, meyve konsantresi, kağıt, tekstil, elektronik endüstrisi ve benzeri endüstrilerdir.

Membran proseslerinin ana hatlarıyla çevre mühendisliğindeki uygulama alanları ise:

- Su (ham su) arıtımı
- Evsel ve endüstriyel atıksuların arıtımı
- Acı sulardan ve deniz sularından tuz giderilmesiyle (desalinasyon) içme suyu elde edilmesi
- Yumuşatma ve organiklerin giderimi

2.2 Membran Materyalleri

Membran üretiminde konvansiyonel malzemeler olarak genelde polimerik, seramik ve kompozit malzemeler kullanılır, bunun dışında yenilikçi malzemeler olarak son

zamanlarda nanoyapıya sahip, reaktif ya da biyo-ilham alınmış malzemeler kullanılmaktadır (Pendergast ve Hoek, 2011).

Polimerik malzemeler daha yaygın kullanılır. Bunun sebebi polimerik malzemelerin gözenek oluşturmaya daha yatkın olması, ucuz ve birçok uygulamaya uyarlanabilir olmasıdır. Membranlarda sıklıkla kullanılan polimerik malzemeler selüloz asetat, polietersülfon, polisülfon, polivinilidene piroldon, poliakrilonitril (Chou ve Yang, 2005). Bunların dışında günümüzde membran yapımında kullanılan farklı yapıda ve özellikte polimerler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Membran yapımında kullanılan malzemeler (Köseoğlu, 2011).

Çeşitli polimerik membran hammaddeleri		
Silikon	Polipropilen	Polifuran
Polisüfon	Selüloz asetat	Hidrofilik poliolefinler
Polikarbonat	Selüloz nitrat	Polialkilsülfon
Polivinilidendiflorür	Polieterimid	Sülfonlanmış polistiren
Poliakrilonitril	Akrilikler	Polimetilmetaakrilat
Naylon 6	Karbon	Polivinilklorür
Naylon 6,6	Sülfonlanmış polisülfon	Polieteramid
Aromatik poliamid	Polistiren	Polieterüre
Alümina	Zirkonya	Paslanmaz çelik

Seramik membranların polimerik membranlara göre daha iyi olmasının başlıca nedenleri;

- daha küçük gözenek çapı dağılımına sahip olmaları,
- yüksek gözeneklilikleri,
- ayırma etkinliğinin daha fazla olması,
- mekanik ve kimyasal dayanıklılıklarının nispeten daha iyi olmasıdır.

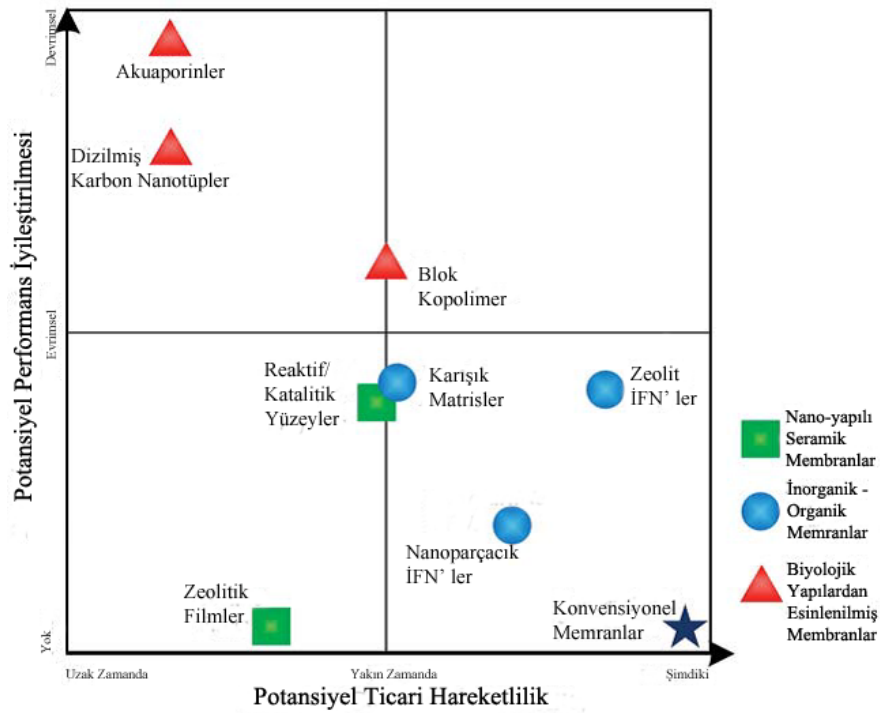
Seramik membranlarda sıklıkla kullanılan malzemeler zirkonyum, silika, alumina vb. gibi malzemelerdir (Pendergast ve Hoek, 2011). Uzun kullanım süreleri vardır fakat pahalıdırlar, bu yüzden de çok tercih edilmezler.

Kompozit membranlar olarak ince film kaplama membranlar gösterilebilir. İnce film kaplama membranlarda sıklıkla kullanılan ince film kısmı poliüre, poliamid gibi malzemeler oluştururken; destek tabakasını ise polisülfon; polietersülfon; poliakrilonitril gibi malzemeler oluşturmaktadır (Pendergast ve Hoek, 2011).

Yenilikçi membran malzemeleri göz önüne alındığında literatürde yapılan çalışmalar içerisinde zeolitli, katalitik, nanokompozit, biyo-benzetimli membranlar bulunmaktadır. Zeolitli membranlarda zeolit, hidrotermal, katma katman kristilasyon gibi yöntemlerle üretilir. Katalitik membranlarda sıklıkla kullanılan malzemeler ise titanyum dioksit, çinko oksit, demir oksittir. Nanokompozit membranlarda gümüş bazlı, silika bazlı, alüminyum bazlı, magnezyum bazlı, titanyum bazlı, karbon nanotüp, grafen gibi nanoparçacıklardır (Buonomenna, 2013; Goh ve diğ., 2013; Ng ve diğ., 2013; Pendergast ve Hoek, 2011). Bu membranlar düşük maliyetli, kolay üretilir ve yüksek mekanik dayanıklılığa sahip olmalarından dolayı avantajlıdır.

Biyo-ilham alınmış membranlar oldukça yüksek potansiyele ve özelliklere sahiptir lakin büyük ölçekte üretilmeleri henüz mümkün değildir. Aquaporin bazlı membranlar, dikey yerleştirilmiş karbon nanotüp membranlar, blok copolimerler kullanılıp üretilmiş membranlar bu grup içerisine girer (Pendergast ve Hoek, 2011).

Konvansiyonel ve yenilikçi membranların performans ve endüstriyelletirebilirlik karşılaştırmasının yapıldığı şema Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Konvansiyonel ve Yenilikçi membranlar; performans ve endüstriyelileştirilebilirlik karşılaştırması (Pendergast ve Hoek, 2011).

Membranların ayırma performansını etkileyen, membranın yapısına bağlı olan özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir. Bu parametrelerin filtrasyon performansına etkileri Çizelge 2.2’de özetlenmiştir (Ramesh, 1997).

- Membran malzemesinin türü,
- Gözenek boyutu ve dağılımı,
- Boşluk oranı (porozite),
- Yüzey yükü,
- Hidrofobik/hidrofilik özellikleri,
- Membran kalınlığı.

Çizelge 2.2 : Membranların yapısal özellikleri ve önemleri (Ramesh, 1997).

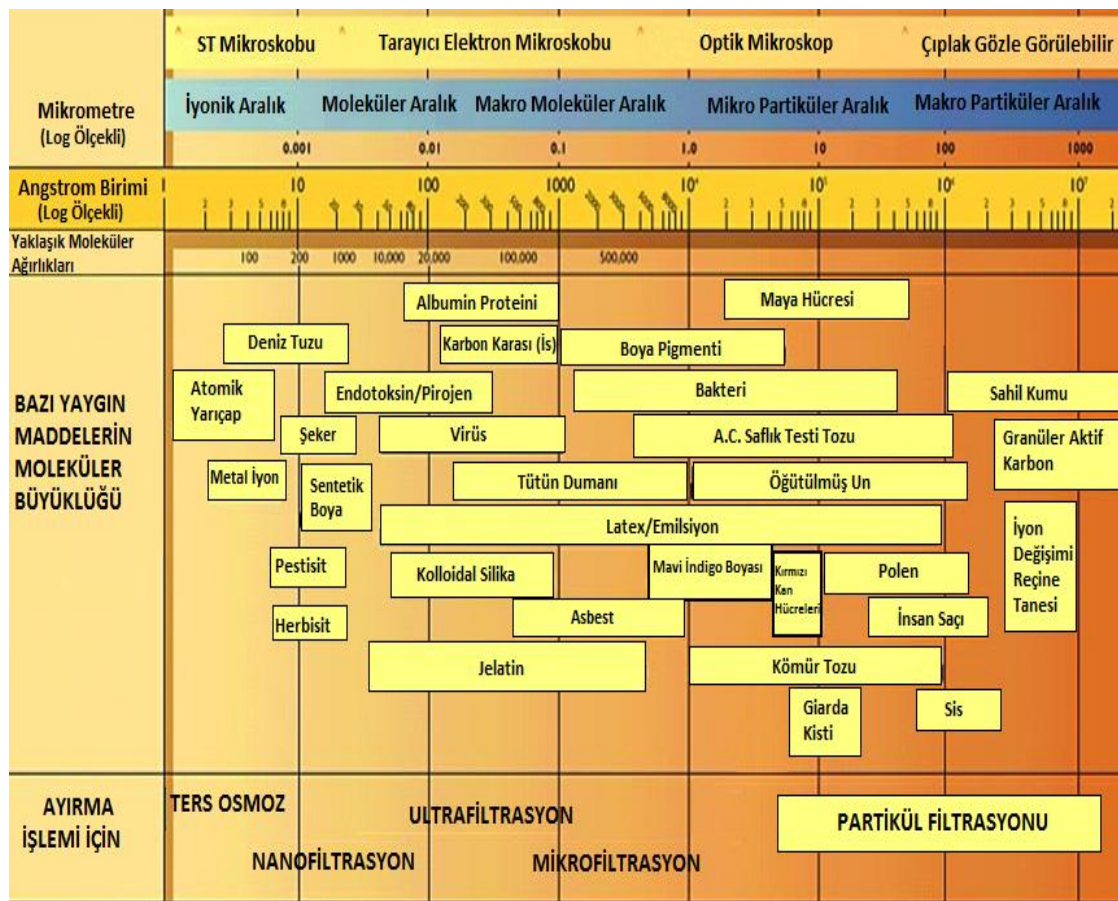
Membran özelliği	Akıya olan etki	Önemi
Asimetrik	Yüksek	Simetrik membran ile karşılaştırıldığında akı değerleri yüksektir.
Simetrik	Yüksek	Partiküllerin yüzeye tutunması geri dönüşü olmayan kirlenmeye sebep olabilir.
Gözenek boyutu	Yüksek	Yüksek akı değerlerinin optimizasyonu aşamasında uygun gözenek boyutunun seçilmesi önem taşımaktadır.
Gözenek boyutu dağılımı	Düşük	Dar gözenek boyutu dağılımı iyi bir ayırma verimi sağlar.
Boşluk oranı	Yüksek	Yüksek boşluk oranına sahip membran, yüksek geçirgenliğe sahiptir. Bu da doğal olarak akının artmasına sebep olur.
Zeta Potansiyeli	Düşük	Membran yüzey yükleri, adsorbsiyon nedeniyle oluşan kirlenmeyi etkiler.
Hidrofobiklik	Yüksek	Genellikle sterilizasyon sistemlerinde avantaj sağlamaktadır. Atıksu arıtımında kirlenme problemi yüksektir.

2.3 Membranın Sınıflandırılması

Her tür besleme ve çıkış parametresini karşılayabilecek tek bir membran proses olmadığı için istenilen parametrelere uygun membran prosesi seçilir. Prosesler genelde uygulanan sürücü kuvvete göre değişir. Membranlardaki sürücü kuvvetler dörde ayrılır. Bunlar;

- Konsantrasyon sürücülü,
- Sıcaklık sürücülü,
- Elektrik potansiyel sürücülü
- Basınç sürücülü.

Konsantrasyon farkını sürücü kuvvet olarak kullanan membranlarla uygulanan prosesler diyaliz, membran ekstraksiyonu, ileri osmozdur. Sıcaklık farkına göre ayırma işlemi yapan prosesler membran distilasyonudur. Elektrik potansiyelini sürücü kuvvet olarak kullanan membran prosesler ise; elektrodializ, elektroforez, membran elektrozudur.



Şekil 2.2. Membran filtrasyon spektrumu (Osmonics Inc, 1996).

Mikrofiltrasyon membranlarının gözenek çapı 0.05 μm 'den 10 μm 'ye kadardır. Kolloidal maddeler ve bakterilere kadar olan parçacıklar tutulur (Şekil 2.2). Eğer partikül çapları membranın gözenek çapından daha büyükse partiküller membrandan

geçemez, eğer membrane çapıyla aynı boyutta partikül olursa, bu parçacıklar da membrane gözenekleri tarafından absorplanır.

Mikrofiltrasyon membranları ile kolloid ve bakteriler dışında yağ molekülleri, hücreler de ayrılabilir. Konvansiyonel içme suyu arıtımında mikroorganizmaları sistemden uzaklaştırmak için çok miktarda dezenfektan kullanılır. Oysa mikrofiltrasyon ile dezenfektandan kaynaklı oluşacak dezenfeksiyon yan ürün oluşma olasılığı daha düşüktür (Türken, 2013).

Ultrafiltrasyon (UF)

Ultrafiltrasyon membranlarıyla makro moleküllerin ve virüslerin sudan ayrılması yüksek verimle sağlanabilmektedir (Şekil 2.2). UF membranlarındaki gözenek çapı 10-1000Å aralığında değişmektedir. UF membranlarının sınıflandırılmasında moleküler ağırlık engellemesi parametresi kullanılır. Buna göre UF membranları 1000 dalton ile 500000 dalton arasında moleküler ağırlığa sahip parçacıkları tutabilirler (Türken, 2013).

UF membranları genel olarak ters osmoz membranlarının ömürlerini uzatmak amacıyla ters osmoz prosesinde önce konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanmayı önlemek için ön arıtımda kullanılır (Eren, 2006).

Nanofiltrasyon (NF)

Nanofiltrasyon membranları UF ile ters osmoz arasında kalan prosestir (Şekil 2.2). NF prosesiyle bulanıklık, mikroorganizmalar, sertlik, ve de çözünmüş tuzların bir kısmı tutulabilir. Her iki prosesin de özelliklerini taşımaktadır. Ana uygulama alanı içme suyu teminidir fakat atıksu arıtımı, desalinasyon, yüzey ve yeraltı suyu arıtımında da kullanılır. Tüm bunlar göz önüne alındığında NF prosesi daha düşük basınçlarda çalıştırılabilir ve daha az enerji tüketir olmasıyla ters osmoz prosesinden daha avantajlıdır.

Ters Osmos (RO)

Ters osmoz prosesi, suyun yarı geçirgen bir membrandan doğal osmotik basınca karşı gelinerek geçirilmesidir. Suyun membrandan geçmek için zorlanmasıyla birlikte çözünmüş tuzların çok büyük bir kısmı, ve sudaki diğer bütün kirleticiler uzaklaştırılır (Şekil 2.2). Nispeten saf su elde edilir. Ters osmoz membranlarının

gözenek çapı 1 nm civarındadır. Ters osmoz su arıtımında, desalinasyonda ve su geri kazanımındaki en etkili yoldur (Baker, 2004).

Konvansiyonel membran prosesleri iki farklı yöntemle işletilebilmektedir. Eğer konsantre akım yoksa, bu işletme sistemine ölü uç (dead-end) filtrasyonu; eğer konsantre akım modül çıkışından sürekli olarak akıyorsa bu işletim sistemine çapraz akışlı (crossflow) filtrasyon denir (Ağtaş, 2014).

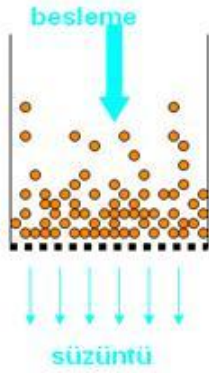
Ölü uç filtrasyonu (klasik filtrasyon), içerisinde 0.1-10 µm boyut aralığındaki partikülleri içeren sıvı veya gazların ayırma işleminde kullanılmaktadır. Bu filtrasyon şekli yaygın olarak mikrofiltrasyon membranlarının kullanıldığı sistemlerde tercih edilmektedir. Prosesin verimliliği genellikle filtre edilecek partiküllerin boyutuna bağlıdır. Sürücü kuvvetin basınç olduğu klasik filtrasyon sisteminde, çözelti membrana yüzeyine dikey olarak gelirken, partiküller veya askıda katı maddeler membran tarafından tutulur. Tutulan bu maddeler yüzeyde birikime sebep olurlar. Bu birikim membran gözeneklerinde ve membran yüzeyinde oluşur. Birikim sonucunda membrandan geçen su miktarı yani akış tamamen durabilir ya da ciddi miktarda azalabilir. Böyle durumlarda membranın temizlenmesi veya değiştirilmesi gerekir. Teoride, membran gözeneklerinin, ayırım yapılması istenen çözeltideki partiküllerden küçük olduğu ve partiküllerin membran yüzeyinde tutulduğu düşünülür. Fakat pratikte, istenen bu durum tamamen gerçekleşmez. Çünkü membranın üzerinde bulunan gözeneklerin hepsi aynı boyutta değildir ve rastgele dağılmıştır. Ayrıca besleme çözeltisindeki partiküller de eş ve aynı boyutta değildir. Bu nedenle tüm partiküller membran yüzeyinde tutulamaz. Partiküller membranın gözeneklerinin içinde veya yüzeyinde tutunur. Bu da filtrasyon akısının düşmesine neden olur. Klasik filtrasyonun uygulama alanları genellikle saflaştırma, berraklaştırma ve sterilizasyondur (Scott, 2006).

Çapraz akış filtrasyonu, askıda ya da çözünmüş maddelerin membran yüzeyine paralel doğrultuda basınç uygulayarak molekül ağırlıklarına ve molekül büyüklüklerine göre ayrılmasını sağlayan bir ayırma tekniğidir. Çapraz akış filtrasyonunda akış membran yüzeyine paraleldir. Membran üzerinde oluşan tabaka membranın yüzeyinden devamlı sıyrılarak membranın geçirgenliği arttırılmış olur (Butcher, 1989).

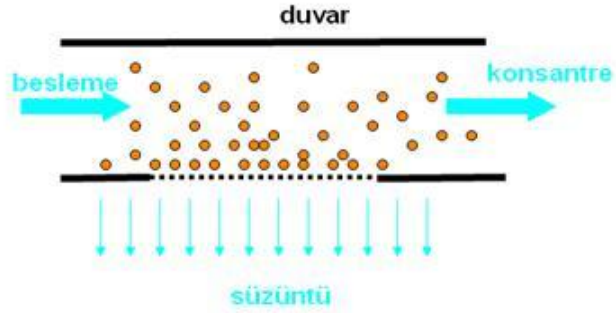
Çapraz akış filtrasyon tekniği, oluşturulan basınç farkı sayesinde filtrelenecek olan sıvı veya gaz akımının, membran yüzeyine paralel olarak geçirilmesi ve bu sırada süzüntünün akım yönüne dik doğrultuda membran içerisinden geçmesi olarak tanımlanır. Bu sırada membran tabakası üzerinde kek tabakası meydana gelip çapraz akış uygulaması bu kek tabakasının kalınlığını düşük seviyede tutmaktadır. Çapraz akışın bu etkisi sayesinde, sistemin uzun süreli periyotta sabit bir akıda çalıştırılabilmesi mümkün olmaktadır (Ripperger ve Altmann, 2002).

Şekil 2.3'te ölü-uç ve çapraz akım şeması verilmiştir.

Ölü uç akımı



Çapraz akım



Şekil 2.3. Ölü-uç ve çapraz akım şeması.

Çizelge 2.3'te çapraz akışlı filtrasyon ve ölü uç filtrasyonun ayırma verimleri arasındaki farklar verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Çapraz akış ve klasik filtrasyon ayırma verimlerinin karşılaştırılması
(Ramesh, 1997).

Ayrırma Mekanizması	Ayrırma Performansı	
	Çapraz akışlı filtrasyon	Ölü uç filtrasyon
Çeşitli partikül boyutuna sahip sıvının filtrasyonunda	Yüksek verimli	Düşük Verimli
Değişen ve farklı katı konsantrasyonlarına sahip sıvının filtrasyonunda	Yüksek verimli	Genellikle tercih edilmez
Katı minimizasyonunda	Yüksek verimli	Çözelti düşük katı miktarına ve besleme debilerine sahip olduğunda verim yüksek
Saflaştırma proseslerinde	Eğer akıdaki azalmalar önlenebilirse verim yüksek	Adsorbsiyona bağlı olarak gerçekleşen kirlenme problemi engellenebilirse verim yüksek

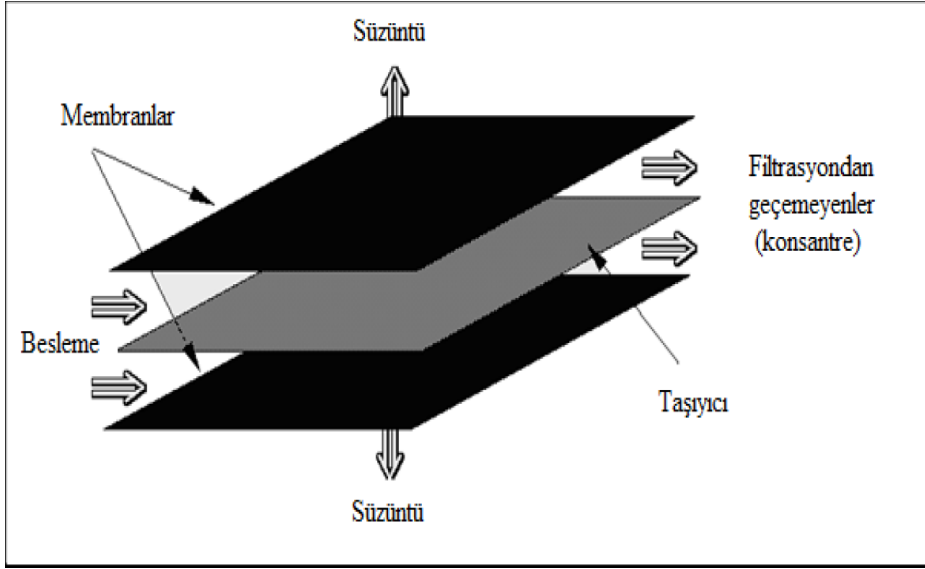
2.4 Membran Modül Geometrisi

Endüstriyel membran tesisleri, gerekli membran proseslerini gerçekleştirebilmek için yüzlerce metrekare membran alanına ihtiyaç duymaktadır. Membran ayırma prosesi endüstriyel olarak gerçekleştirilmeden önce, geniş alana sahip, verimli ve ekonomik bir şekilde paketlenmiş membranlara gereksinim duyulur. Bu şekilde paketlenmiş membran yığınlarına membran modülü denir (Baker, 2004).

Günümüze kadar su ve atıksu arıtımı için değişik tipte ticari membran geometrileri geliştirilmiştir. Bunların arasında en çok kullanılan membran modülleri;

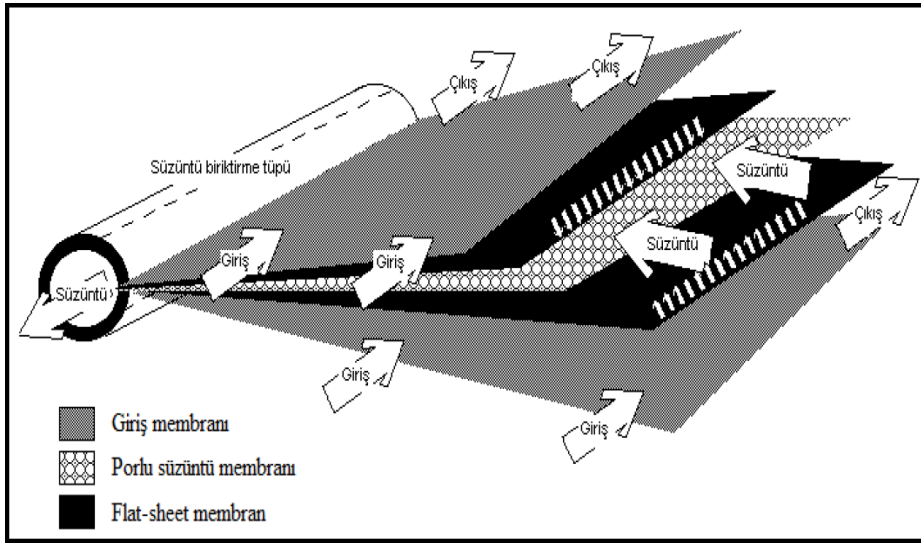
- Plaka ve çerçeve (plate and frame),
- Spiral sargılı (spiral wound),
- Tübüler (tubular),
- Boşluklu fiber (hollow fiber)'dir.

Plaka ve çerçeve tasarımı, düz plaka membranlarda kullanılır. Çok yönlü kullanıma sahip olmasına rağmen pahalıdır (Dizge, 2011). Şekil 2.4'de plaka ve çerçeve modül şeması verilmiştir.



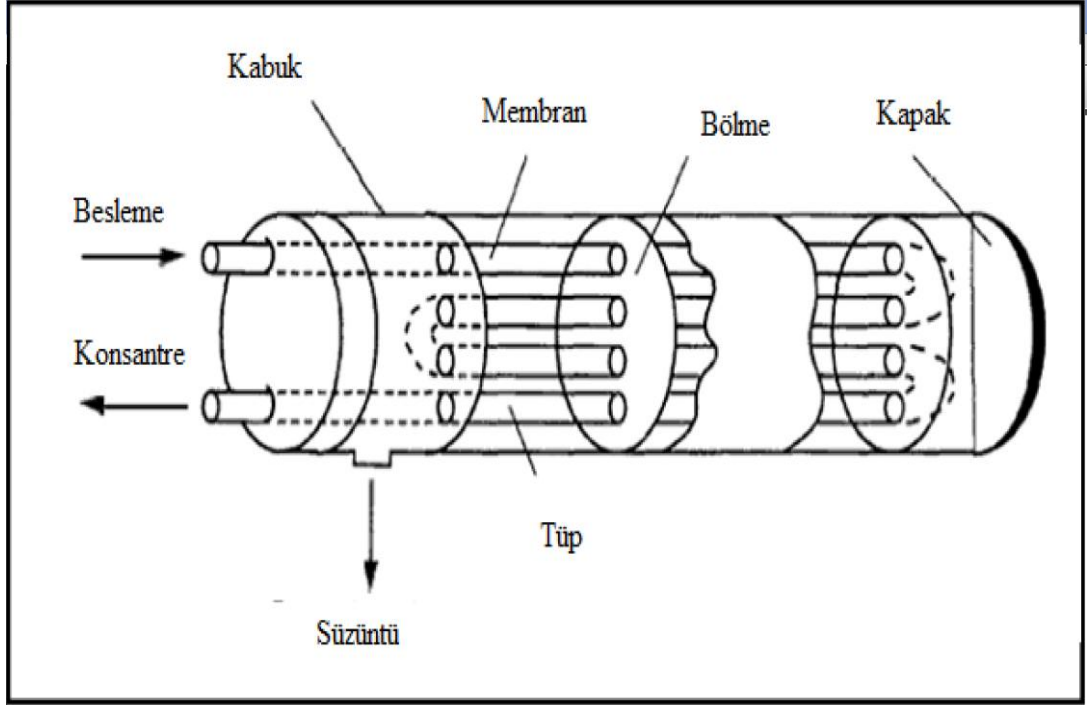
Şekil 2.4. Plaka ve çerçeve membran modülünün şeması (EPA, 2005).

Spiral sargılı membran modülünde, tabaka halindeki membranlar silindir olacak şekilde sarılır. Bu geometri membrana birim hacim başına daha fazla yüzey alanı sağlar ve toplam maliyeti daha düşüktür (Dizge, 2011). Şekil 2.5'te spiral sargılı modül şeması verilmiştir.



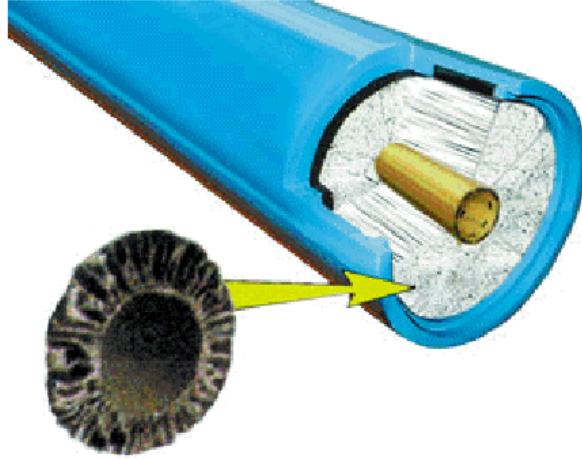
Şekil 2.5. Spiral sargılı membran modülünün şeması (EPA, 2005).

Tübüler modüller, membranların sıkça kullanıldığı bir modül tasarımıdır. Bir diğer modül şekli olan boşluklu fiber (hollow fiber) modüllerle karşılaştırıldığında, daha düşük kütle transfer alanına ve daha geniş çapa sahip oldukları söylenebilir (Dizge, 2011). Şekil 2.6'da tübüler modül şeması verilmiştir.



Şekil 2.6. Tübüler membran modülünün şeması (EPA, 2005).

Birbirine paralel şekilde konumlanmış fiber kanallarının bir araya gelmesi ile boşluklu fiber modülü oluşur. Kütle transfer alanı fazladır (Dizge, 2011). Şekil 2.7’de boşluklu fiber şeması verilmiştir.



Şekil 2.7. Boşluklu fiber modülünün şeması.

Membran modül konfigürasyonları, tüm proses performansının belirlenmesinde kritik bir faktördür. Diğer bir faktör ise, membran elemanlarının modül oluşturmak için içinde bulunduğu basınç kabıdır. İdeal olarak, membran aşağıdaki faktörlere sahip olacak şekilde yapılandırılmalıdır.

- Yüksek membran yüzeyi/modül yığın hacmi oranı,
- Besleme tarafında kütle transfer arttırımı için yüksek türbülans derecesi,
- Üretilen birim su miktarı başına düşük enerji harcaması,
- Birim membran alanı başına düşük maliyet,

Temizlemeyi kolaylaştıracak bir dizayn (Judd,S., Judd,C.,2006).

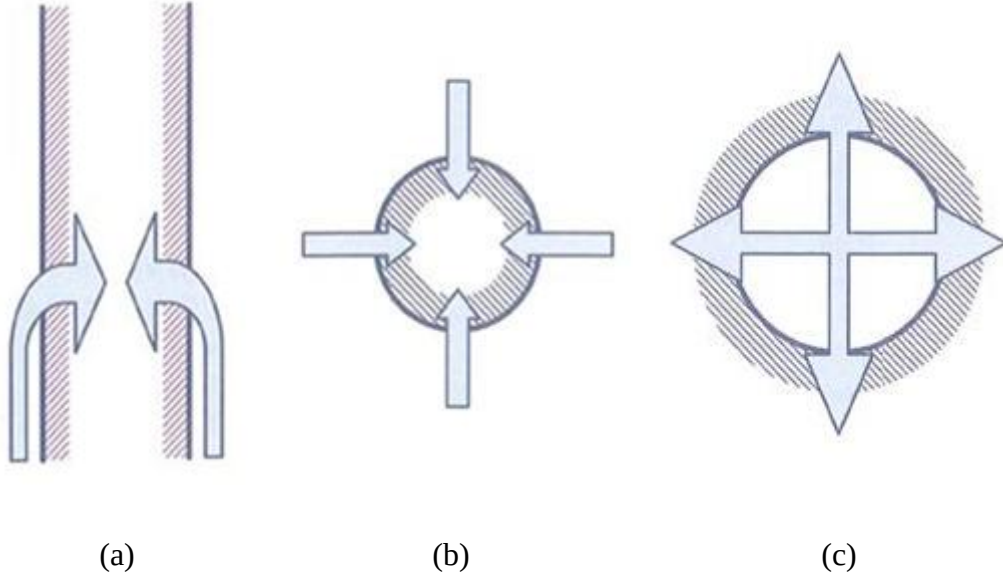
Çizelge 2.4’te bazı membran konfigürasyonlarının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Membran konfigürasyonları (Judd,S., Judd,C.,2006).

Konfigürasyon	Maliyet	Türbülans arttırma	Geri yıkama yapılabilir mi?	Uygulamalar
Plaka ve çerçeve	Yüksek	Normal	Hayır	Elektrodiyaliz, <i>UF, RO</i>
Sprial sargılı	Düşük	Zayıf	Hayır	RO/NF, UF
Tübüler	Çok yüksek	Çok iyi	Hayır	Çapraz akışlı MF/UF, yüksek TAKM olan sularda, NF
Boşluklu fiber	Çok düşük	Çok zayıf	Evet	MF/UF, RO

Koyu renkle yazılanlar: en önemli alternatif uygulamalar İtalik yazı tipi ile yazılanlar: MBR konfigürasyonları ifade etmektedir.

Şekil 2.8’de membran konfigürasyonlarındaki akış yolları gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Membran konfigürasyonlarında akış şekilleri (a) plaka ve çerçeve modül (b) tübüler modül (c) boşluklu fiber modülü (Judd,S., Judd,C.,2006).

2.5 Membran Performansı ile İlgili Genel Tanımlar

Membran performansını değerlendirebilmek için akı ve giderme verimi incelenmelidir.

Kütle, enerji, momentum, hacim ve elektriğin taşınımı yalnızca itici bir kuvvet uygulandığında gerçekleşebilir. Taşıma genellikle Kütle, enerji, momentum ve hacim miktarıyla verilen bir akı olarak ifade edilir (Mulder, 1996):

$$J = -A \cdot \frac{dX}{dx} \quad (2.1)$$

İtici kuvveti eksenî taşıma yönü boyunca X gradyanı (konsantrasyon, sıcaklık, hız, basınç ya da gerilim) olarak ifade edilir. A orantı sabiti, bilinen farklı taşıma çeşitleriyle alakalı bilinen bir çok fiziksel terimler ile ilgili olgusal katsayıdır (Beier, 2008). Farklı akı ve katsayılar için denklemler Çizelge 2.5' te verilmektedir.

Çizelge 2.5 : Olgusal katsayılar ve akı için : itici kuvveti, akı denklemleri, SI birimleri ve farklı taşınım çeşitleri için yaygın kullanılan isimleri (Beier, 2008).

Taşınım	İtici Kuvvet	Akı denklemleri	Olgusal Katsayı	Akı birimi	Yaygın ismi
Kütle	Konsantrasyon gradyanı	$J_m = -D \cdot \frac{dc}{dx}$	Difüzyon katsayısı D [m ² /s]	$\left[\frac{kg}{m^2.s} \right]$	Fick difüzyon kanunu
Enerji/Sıcaklık	Sıcaklık gradyanı	$J_h = -K \cdot \frac{dT}{dx}$	Isıl iletkenlik k[J/s.K.m]	$\left[\frac{J}{m^2.s} \right]$	Fourier ısı iletimi kanunu
Momentum	Hız gradyanı	$J_n = -\mu \cdot \frac{dV}{dx}$	Dinamik viskozite μ [Pa.s]	$\left[\frac{kg.(m.s)}{m^2.s} \right]$	Newton'un viskozite kanunu
Hacim	Basınç gradyanı	$J_v = -L_p \cdot \frac{dP}{dx}$	Geçirgenlik katsayısı L _p [m ² /(Pa.s)]	$\left[\frac{m^3}{m^2.s} \right]$	Darcy kanunu
Elektriksel	Gerilim gradyanı	$J_e = -\sigma \cdot \frac{dE}{dx}$	Elektriksel iletim σ [C ² /(s.J.m)]	$\left[\frac{C}{m^2.s} \right]$	Ohm kanunu

Akı

Akı, birim zamanda membranın birim alanından geçen akım miktarı olarak tarif edilir. Akı m³/m².sn ve ya l/m².sa gibi birimlerle ifade edilmektedir. Filtrasyon başlangıcında temiz su akısı Darcy kanununa göre aşağıdaki ilişki ile ifade edilmektedir (Eren, 2006).

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R_m} \quad (2.2)$$

Burada,

J : Akı,

ΔP : Membrandaki basınç farkı,

μ : Akışkanın Viskozitesi,

R_m : Membran hidrolik direnci,

olarak tanımlanmaktadır. Denklemden de anlaşılacağı üzere membran filtrasyonda, membrandan geçen süzüntü akımı, membrana uygulanan basınç (ΔP) ile doğru orantılıdır.

Giderme Verimi

Giderme verimi, membran sisteminde membran tarafından tutulan kısmın bir ölçüsüdür ve % olarak ifade edilmektedir. Membranlarda giderme verimi R ile gösterilir ve boyutsuzdur. Bu ifade 0 ile 1 arasında değişmektedir. “0” bütün çözülmüş maddelerin membranda geçtiğini “1” ise membranın hiçbir madde geçişine izin vermediğini göstermektedir (Koyuncu, 2001).

Membran proseslerde iki çeşit giderme verimi söz konusudur. Bunlar global (gözlenen) giderme verimi ve lokal (gerçek) giderme verimidir. Global giderme verimi, elde edilen süzüntü akımı konsantrasyonu ile besleme akım konsantrasyonu arasındaki giderme verimini ifade ederken (R_0), (2.3) lokal giderme verimi, elde edilen süzüntü akımı konsantrasyonu ile çözeltinin membran yüzeyindeki konsantrasyonu arasındaki ilişkiden hesaplanarak belirlenen giderme verimini ifade etmektedir (R_g) (2.4).

$$R_0 = \frac{(c_f - c_p)}{c_f} = 1 - \frac{c_p}{c_f} \quad (2.3)$$

$$R_g = \frac{(c_m - c_p)}{c_m} = 1 - \frac{c_p}{c_m} \quad (2.4)$$

Burada,

c_p : Süzüntü akımı konsantrasyonu,

c_f : Besleme suyu konsantrasyonu,

c_m : Membran yüzeyindeki konsantrasyonu,

ifade etmektedir.

2.6 Membran Tıkanması ve Membran Kirliliğinin Giderilmesi

Arıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan membran sistemleri, katı-sıvı faz ayırımı gerektiren diğer sistemlerde de kullanılmaktadır. Fakat uygulanan tüm proseslerde olduğu gibi membran proseslerinde de kullanımı kısıtlayıcı bazı durumlar mevcuttur. Bu kısıtlayıcı durumlardan en önemlisi membran kirlenmesi ve

tıkanmasıdır. Membran kirlenmesi ve tıkanmasının sonucunda, membrandan geçen su miktarı azalır yani akı düşer. Membran kirlenmesi, proseste sudan veya gaz ortamdan ayrılması istenen kattı haldeki ya da çözünmüş haldeki maddelerin membran yüzeyinde birikmesi sonucu meydana gelir. Bu maddeler kirlenme süresince, membran yüzeyinde birikebildiği gibi; membranın gözeneklerine bağlanabilir ya da adsorbe olabilir (Zhou ve Smith, 2002).

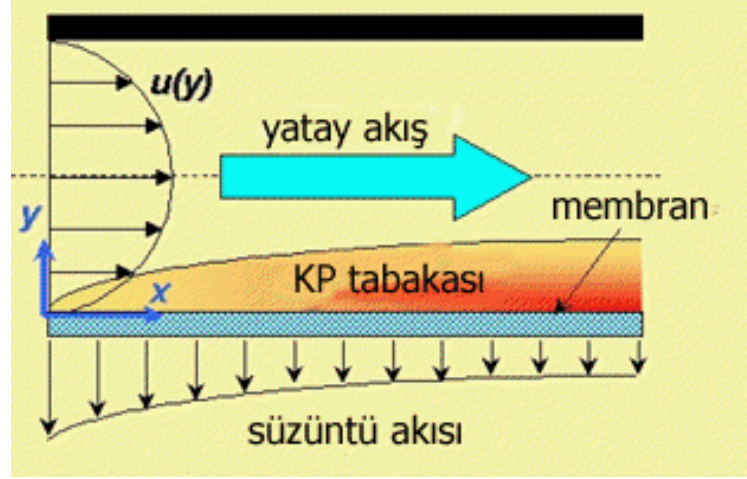
Literatürde akı azalmasına yol açan 5 farklı mekanizma tanımlanmaktadır (Aydiner, 2006). Bunlar;

- Konsantrasyon polarizasyonu,
- Biyolojik kirlenme,
- İnorganik çökme,
- Organik kirlenme,
- Kek tabakası oluşumudur.

Konsantrasyon polarizasyonu:

Membran tıkanması, konsantrasyon polarizasyonu ile başlar. Membran filtrasyonu esnasında çözünmüş katılar membran yüzeyinde ve yakınlarında yoğunlaşmaya başlarlar. Bu yoğunlaşan tabakaya sınır bölgesi adı verilebilir. Bu sınır bölgesi kütle transferi için bir direnç oluşturmaya başlar (Rif). Bu bölgedeki yoğunluk bir süre sonra o kadar artar ki bir jel tabakası oluşmaya başlar. Bu jel tabakası özellikle filtre edilen çözeltide protein varsa oluşur (Rg). Bu aşamadan sonra bazı moleküller por açıklıklarını tıkar, bazıları ise por içinde adsorbe olurlar. Bunların neticesinde sırasıyla R_p ve R_{ef} oluşur (Mulder, 1996). Tüm bu dirençlerin yanında membranın kendi direnci olan R_m unutulmamalıdır.

Şekil 2.9’da konsantrasyon polarizasyonunun şeması verilmiştir.



Şekil 2.9. Konsantrasyon polarizasyonu (Eren, 2006).

Biyolojik kirlenme:

Biyolojik kirlenme, biyolojik malzemenin kontrol dışı bir şekilde membran yüzeyinde birikmesidir. Bu birikme sonucunda membran prosesinin verimi düşer. Membran yüzeyindeki bu birikim (biyofilm), ölü ve canlı mikroorganizmaları, bununla birlikte bu mikroorganizmaların oluşturduğu hücre dışı polimerik ürünleri (polisakkarit, yağ, protein vb.) bir tabaka halinde içerir. Temiz membrana ilk bağlanan canlı mikroorganizmalar yapışkan bir forma sahip olan hücre dışı polimerik maddeleri (EPS) üretir. Üretilen EPS zaman içerisinde membran yüzeyinde oluşan bu tabakaya diğer hücrelerin de birikmesini sağlar. Membran yüzeyinde oluşan sulu jel ve viskoz tabakaya bu polimerler sebep olmaktadır (Ridgway ve Flemming, 1996).

İnorganik çökme:

İnorganik çökme, membran prosesindeki sıvı fazın içerisinde bulunan tortu oluşturunucular nedeniyle meydana gelmektedir (Judd, 2001). Konvansiyonel aerobik sistemlerde, membran üzerinde kalsiyum karbona tortusu gözlemlenmiştir. Bu tür tortuların kontrolü ve giderimi oldukça zordur (Yiğit, 2007).

Organik kirlenme:

Organik kirlenme, çözünmüş organik maddelerin ve makromoleküllerin membran yüzeyinde ve porlarında birikmesi ile oluşur.

Kek tabakası oluşumu:

Membrana tutulması istenen parçacıkların, membran porlarından büyük olması durumunda porların tıkanması olası değildir. Fakat bu parçacıklar, membran yüzeyinde birikir. Bu birikme kek tabakasını meydana getirir. Bu durumda, membran gözenek yapısı zarar görmez (Dizge, 2011).

Membran kirlendiğinde veya tıkanıldığında, ortaya çıkan en önemli problem akı azalmasıdır. Akının azalması prosesi negatif yönde etkileyecektir. Kirlenen veya tıkanan membranın temizlenmesi ile azalan akı tekrar arttırılabilir. Bu temizleme işlemi fiziksel veya kimyasal olabilmektedir.

Fiziksel temizleme genellikle, geri yıkama ile (akımın ters yöne çevrilmesi) ya da yumuşatma (relaxation-membran hava kabarcıkları ile temizlenirken süzülmenin durdurulması) ile yapılır. Bu iki yöntem birlikte kullanılabilir ve geri yıkama hava ile kombine edilerek genişletilebilir. Kimyasal temizleme ise, mineral veya organik asitlerle, kostik sodayla; genelde MBR'lerde sodyum hipokloritle yapılabilmektedir. Bu temizleme yöntemi, yerinde (in situ-yerinde temizleme) ya da alan dışında (ex situ) yapılabilmektedir. Alternatif olarak, düşük konsantrasyonda kimyasal temizleme reaktanı geri yıkama suyuna eklenerek, kimyasal genişletilmiş geri yıkama yöntemi elde edilebilmektedir.

Fiziksel temizleme birkaç temel nedenden dolayı, kimyasal temizlemeye göre daha zahmetsizdir. Fiziksel temizleme genel olarak, kimyasal temizlemeden daha hızlı bir prostestir, kimyasal maddeye ihtiyaç duyulmaz ve kimyasal içerikli atık üretmez. Ayrıca membran bozulmasına sebep olma olasılığı düşüktür. Diğer yandan, kimyasal temizlemeye göre daha az etkilidir. Fiziksel temizleme ile, genellikle geri çevrilebilir ya da geçici kirlilik adı verilen, membran yüzeyinde birikmiş iri katılar giderilir. Kimyasal temizleme ile, genellikle geri çevrilemez ya da kalıcı kirlilik adı verilen daha dirençli maddeler giderilir. Membranın normal bir işletimiyle meydana gelen kirlilikten sonra, baştaki saf membran permabilitesi bir daha elde edilemediğinden; membranda geri çevrilemez kirlilik olarak tanımlanabilen artık bir direnç bulunur. Bu da yıllar boyunca oluşan ve sonuçta membranın ömrünü belirleyen kirliliktir (Judd,S., Judd,C.,2006).

2.7 Membran Biyoreaktörler (MBR)

Klasik bir membran bioreaktör (MBR), biokütleyi tutmak için kullanılan membran ayırma prosesi ile birleştirilmiş klasik bir aktif çamur prosesi içermektedir. Etkili por çapı 0,1 μm 'den daha düşük olabildiğinden, MBR'lar etkili olarak berrak ve büyük oranda dezenfekte bir akış üretebilmektedirler. Ek olarak, MBR biyokütleyi daha konsantre hale getirmektedir ve bunun sonucunda gerekli tank hacmi azalır ve biyolojik arıtımın verimliliği de yükselir. Bu nedenle MBR'lar, biyolojik arıtmada giderilebilen organik madde ve amonyak gibi çözünmüş bileşenlerin giderimi bakımından, daha yüksek saflıkta arıtılmış su üretimine eğilimlidir. Hatta, biyokütlenin çöktürülmesi gereksiniminin giderilmesiyle, MBR'dan geçen debi, çökmek üzere olan katılar yoluyla çıkış suyu kalitesini etkileyemez (Judd,S., Judd,C.,2006).

MBR'larda genelde mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon membranlarından üretilen modüller kullanılmaktadır. Arıtma sırasında zamanla fiberler üzerinde oluşan kek/kirlenme tabakası bu gözenekleri daha da küçültmekte ve su/biyokütle ayrımını, askıda katı madde ve mikroorganizma giderme verimini artırmaktadır. Bir MBR ünitesinin görünüşü Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.10. Bir MBR ünitesinin üstten görünüşü (Delikanlı, 2013).

MBR ürünlerinin gelişimi 1960 yıllarına dayanmaktadır. Bu gelişimin tarihsel özeti Çizelge 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 : MBR gelişimi ve ticarileştirilmesinin özeti (Judd,S., Judd,C.,2006).

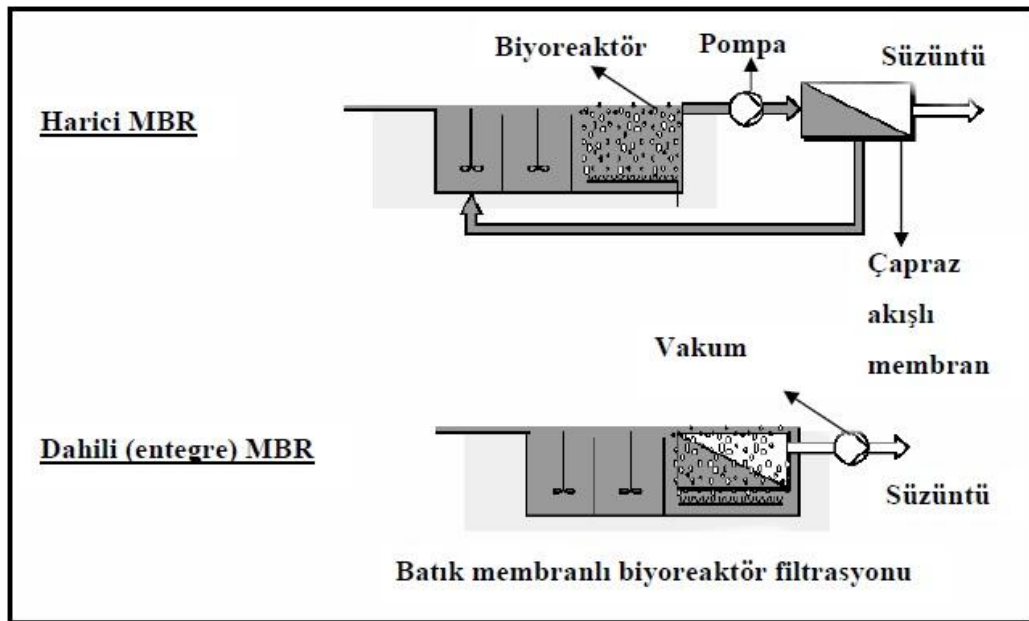
Zaman	Olay
1960'ların sonu	• Dorr-Oliver ilk harici (sidestream) flat-sheet MBR'ı geliştirdi.
1970'lerin başı	• Thetford Sistemleri harici multitüp Cycle-Let prosesini ABD'de suların yeniden kullanımı için ticarileştirdi.
1980'lerin başı	• TechSep, Japonya'da suların yeniden kullanımı için harici flat-sheet Pleiade'i ticarileştirdi.
1980'lerin ortaları	• Nitto-Denko dahili flat-sheet MBR için Japon patenti aldı. • Tokyo Üniveritesi dahili boşluklu fiber MBR ile deneyler yaptı.
1990'ların başları ve ortaları	• Kubato dahili flat-sheet MBR'ı Japonya'da ticarileştirdi. • Weir Envig , 'Membralox' membranları temel alarak harici ADUF sistemini ticarileştirdi. • Zenon, düşey dahili boşluklu fiber (hollow fiber) 'ZeeWeed' teknolojisini Kuzey Amerika ve Avrupa'da ticarileştirdi; 1993'teThetford'u satın aldı. • Wehrle, harici multitüp biomembran sistemini ticarileştirdi. • Mitsubishi Rayon, dahili ince boşluklu fiber 'Sterapore' membran temelli MBR'ı ticarileştirdi (yatay yönlü).
2000'lerin başları	• USF, düşey dahili boşluklu fiber 'MemJet' sistemini ticarileştirdi. • Huber, döner flat-sheet (FS) MBR'ı ticarileştirdi. • Norit X-Flow harici airlift multitüp sistemini geliştirdi. • Puron düşey dahili boşluklu fiberi ticarileştirdi ve Koch tarafından satın alındı. • Kolon ve Para (Kore), düşey dahili boşluklu fiber MBR'ı tanıttı. • Toray, FS MBR'ı tanıttı. • Mitsubishi Rayon, düşey dahili boşluklu fiber MBR'ı tanıttı. • Asahi Kasei, düşey dahili boşluklu fiber MBR'ı tanıttı.

MBR piyasasını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Günümüzde genel olarak bu piyasayı en çok etkilediği bilinen faktörler;

- Hem atık su arıtımını hem de endüstriyel atık deşarjlarını etkileyen yeni ve daha sıkı kanunlar,
- Yerel su yetersizliği,
- Atık su teknolojisinde ve özellikle geri dönüşümdeki gelişmeleri arttırmaya yönelik devlet teşviklerinin tanıtımı,
- Yatırım maliyetlerindeki düşüş,
- MBR teknolojisine olan güvenin artması ve MBR teknolojilerinin kabullenilmesindeki artıştır (Judd,S., Judd,C.,2006).

2.7.1 MBR teknolojisi

Uygulanmakta olan MBR sistemleri harici (sıvı/biyokütle ayrımının çapraz akışlı membran filtrasyonu ile ayrı bir ünite de gerçekleştiği) ve dahili-entegre (sıvı/biyokütle ayrımının biyoreaktör içinde batık membranlar ile gerçekleştiği) olmak üzere 2 ana konfigürasyondadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. MBR türleri (Yiğit, 2007).

Dahili batık MBR'ler, harici MBR'lere göre daha düşük işletme akılarında çalışır. Düşük akıda çalıştıkları için daha fazla geçirimsizliğe sahiptirler. Düşük akıda çalışmasından dolayı, dahili MBR'lerde membran tıkanması veya kirlenmesi

nispeten daha yavaştır. Bununla birlikte dahili MBR’lerde membran tıkanmasının engellemesi amacıyla daha yoğun bir havalandırma işlemi gerçekleştirilir. Ayrıca dahili MBR’lerde düşük akı ile çalışıldığından, sabit süzüntü alınan bir proses düşünüldüğünde daha fazla membran yüzeyine ihtiyaç duyulur. Daha fazla membran yüzeyi gereksinimi ise, daha fazla ilk yatırım maliyeti gerektirir. (Judd, 2002).

Konfigürasyon seçeneğine karar vermek spesifik uygulamaya bağlı olsa da genellikle dahili MBRlar daha sık uygulanmaktadır. İki konfigürasyonun karşılaştırılması Çizelge 2.7’ de sunulmuştur (Yiğit, 2007).

Çizelge 2.7 : Dahili ve harici MBR’lerin karşılaştırılması (Yiğit, 2007).

Dahili/Entegre MBR	Harici MBR
Yüksek havalandırma masrafı	Düşük havalandırma masrafı
Düşük pompaj masrafı	Yüksek pompaj masrafı
Düşük akı (büyük alan gereksinimi)	Yüksek akı (küçük alan gereksinimi)
Daha az temizleme ihtiyacı	Daha sık temizleme ihtiyacı
Düşük işletme maliyeti	Yüksek işletme maliyeti
Yüksek ilk yatırım maliyeti	Düşük ilk yatırım maliyet

Yüksek havalandırma masrafına sahip olan dahili MBR’lerde, farklı amaçlar için iki tür havalandırma şekli kullanılmaktadır. Reaktör tabanına konumlandırılmış difüzörler yardımı ile havuza kaba hava kabarcıkları verilir. Bu havalandırma şekli ile havuzda bulunan mikroorganizmaların oksijen ihtiyacının giderilmesi hedeflenir. Diğer havalandırma şekli ise; ince hava kabarcıklı havalandırmanın membran yüzeyine uygulanmasıdır. Bu işlem ile, membran yüzeyinde biriken maddelerin giderilmesi hedeflenir. Bu da tıkanmayı geciktirecektir. Bu sayede akının azalması engellenebilir (Yiğit, 2007).

2.7.2 MBR ve klasik aktif çamur sisteminin karşılaştırılması

Ülkemizde atıksu arıtma tesislerinde genellikle klasik aktif çamur sistemi kullanılmaktadır. (Ağtaş, 2014). Klasik aktif çamur sistemi ile son zamanlarda gelişmekte olan MBR teknolojisi karşılaştırıldığında bazı avantaj ve dezavantajlar ortaya çıkmaktadır.

Klasik aktif çamur sistemlerinde askıda katı madde (MLSS, mixed liquor suspended solids) konsantrasyonları genellikle 2000-4000 mg/L arasında değişmektedir. MBR'lerde ise bu konsantrasyon değeri 12000-15000 mg/L seviyelerine kadar ulaşabildiğinden, MBR'lerde arıtım için gerekli hidrolik bekleme süresi (HRT), klasik aktif çamur sistemlerine göre daha kısadır. Havuz hacmi hesabında kullanılan HRT değeri MBR'lerde daha küçük olduğundan, gerekli havuz hacmi de daha küçük olur. Bu da tesislerdeki ilk yatırım maliyetini düşürür, ayrıca küçük hacimli havuzların işletimi nispeten daha kolaydır (Judd,S., Judd,C.,2006; Judd, 2001). Havuzların hacminin küçük olması, tesisin kurulacağı alan ihtiyacını azaltır. Buna ek olarak alan ihtiyacından ve buna bağlı olarak ilk yatırım maliyetinden tasarruf edilen bir başka nokta da, MBR'lerde son çökeltim havuzuna ihtiyaç olmamasıdır (Yiğit, 2007).

Daha önce de bahsedildiği üzere, MBR'lerde MLSS konsantrasyonu klasik aktif çamur sistemlerine göre oldukça yüksektir. MLSS konsantrasyonunun yüksek olması, çamur yaşı (solids retention time, SRT) nın da yüksek olmasını sağlar. Çamur yaşının 20 günü geçmesiyle beraber, mikroorganizmaların yaptığı içsel solunumun etkisiyle, havuz içerisinde oluşan yeni biyokütle azalır. Böylece bertaraf edilmesi gereken atık biyokütle miktarı azalır. Bu da atık biyokütlenin bertarafı için gereken maliyeti düşürür. Yüksek SRT değerlerinin sistem için diğer bir avantajı ise, arıtılması istenen atıksularda zaman zaman mevcut olan sentetik toksik organik maddelerin biyolojik olarak ayrışmasını sağlayan özel mikroorganizmaların yüksek SRT değerlerinde daha etkin çalışmasıdır. Yüksek MLSS değerleri ile çalışıldığında, sistem yüksek organik yüklemeleri tolere edebilir. Bu nedenle MBR sistemlerine, klasik aktif çamur sistemine verilenden daha yüksek değerlerde organik yükleme yapılabilir. Ayrıca yüksek biyokütle konsantrasyonları, zaman zaman meydana gelebilecek şok toksik yüklemelere karşı daha dirençli olabilmektedir (Yiğit, 2007).

MBR'lerin klasik aktif çamur sistemine göre bir başka avantajı ise, biyokütle/su ayrımının yapılabilmesi için tasarlanan son çöktürme havuzuna ihtiyaç duyulmamasıdır. Çünkü MBR'lerde bu ayrım membran yardımı ile fiziksel filtrasyon yapılarak gerçekleştirilir. Bu nedenle klasik sistemlerde çökelemeyen ve bu nedenle problem yaratan biyokütle (filamentli floklar veya *Nocardia* türü mikroorganizmalar) MBR'lerde sorun teşkil etmemektedir (Ağtaş, 2014).

MBR'lerden alınan çıkış sularının bulanıklık değerleri de oldukça düşük olup, 0,5 NTU'dan daha küçük değerlere sahiptir ve oldukça berrak bir görünümüleri vardır. Düşük AKM değerlerine de (1-3 mg/L) sahip olan çıkış suyu, bu özelliklerinden dolayı özellikle A.B.D.'de sulamada (rekreasyon, tarımsal, inşaat alanları, vb.), endüstriyel ve diğer alanlarda (yangın söndürme, proses suları, tuvalet pisuarları, vb.) kullanılmaktadır (Ağtaş, 2014).

MBR'lerin genel olarak avantajlı olmasının yanı sıra, klasik aktif çamur sistemlerine göre bazı zor tarafları da bulunmaktadır. MBR sistemlerinde arıtımın tek bir havuzda gerçekleşmesi, mekanik açıdan ve sistemi kontrol etme yönünden konvansiyonel sistemlere göre daha karmaşık olmasına sebep olur. Bu sorun %100 otomasyon sistemlerinin kullanılması ile tolere edilebilir. Buna ek olarak MBR sistemlerinde kullanılan membran zamanla tıkanır ve akı azalır. Tıkanmanın önlenmesi ve giderilmesi amacıyla membran yüzeyine basınçlı hava/su ve bazı kimyasallar (sitrik asit, sodyum hipoklorit vb.) uygulanır (Judd, 2002a).

2.7.3 Evsel ve endüstriyel atıksu arıtımında MBR uygulamaları

Evsel atıksu arıtımında MBR kullanımı, klasik yöntemlere göre daha pratiktir denilebilir. MBR'lerin kompakt olma ve klasik bir sisteme göre daha kaliteli bir çıkış suyu üretebilme gibi avantajları düşünüldüğünde, arıtma sistemlerinde kullanımı daha uygun olabilmektedir. Özellikle atıksu arıtım tesisleri için yeterli alan bulunmadığı durumlarda, oldukça kullanışlı bir seçenektir (Ağtaş, 2014).

MBR'lerin kullanılmaya başlandığı ilk zamanlarda membran ünitelerinin yüksek maliyetli olması, kentsel atıksu arıtımında kullanımı küçük ölçeklerle sınırlı kalmıştır. Hollanda'da yapılan bir çalışmada, evsel atıksuların aerobik bir membran sistemi ile arıtımı denenmiş ve başarı elde edilmiştir. Ama proses, yüksek basınç ve havalandırma maliyetlerinden dolayı uygulanabilir bulunmamıştır (Muller ve diğ., 1995).

Avrupa'da 2007 yılının sonuna kadar 500.000 m³/günden fazla debi arıtan 130 evsel MBR tesisi işletime alınmıştır. Bu sayıya Almanya'da bulunan ve 100.000 m³'lük debi (185.000 eşdeğer nüfus) arıtan 13 adet MBR tesisi de dahildir (Frechen ve diğ., 2007). Çizelge 2.8'de dünya genelinde bulunan en büyük MBR tesisleri ve bu tesislerin bazı özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 2.8 : Dünya genelinde bulunan en büyük MBR tesisleri ve bu tesislerin bazı özellikleri (<http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/>).

Kurulum	Konum	Teknoloji sağlayıcı firma	İşletime alınma tarihi	Günlük pik debi (megalitre /gün)	Ortalama pik debi (megalitre/g ün)
Henriksdal, Sweden	Stockholm, İsviçre	GEWPT	2016-2019	864	536
Seine Aval	Acheres, Fransa	GEWPT	2016	357	224
Canton WWTP	Ohio, ABD	Ovivo USA	2015-2017	333	159
Euclid, OH, ABD	Ohio, ABD	GEWPT	2018	250	83
9th and 10th WWTP	Kunming, Yunnan, Çin	OW	2013	250	-
Shunyi	Beijing, Çin	GEWPT	2016	234	180
Macau	Macau Special Administrative Region, Çin	GEWPT	2017	210	210
Wuhan Sanjintang WWTP	Hubei Province, Çin	OW	2015	200	-
Jilin WWTP (Phase 1, upgrade)	Jilin Province, Çin	OW	2015	200	-
Caotan WWTP PPP project	Xian, Shaanxi, Çin	OW	-	200	-
Brussels Sud	Brussels, Belçika	GEWPT	2017	190	86
Macau	Çin	GEWPT	2014	189	137
Riverside	California, ABD	GEWPT	2014	186	124
Brightwater	Washington, ABD	GEWPT	2011	175	122

Çizelge 2.8 (Devam) : Dünya genelinde bulunan en büyük MBR tesisleri ve bu tesislerin bazı özellikleri (<http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/>).

Visalia	California, ABD	GEWPT	2014	171	85
Qinghe WRP (Phase 2)	Beijing, Çin	OW	2011	150	-
Nanjing East City WWTP (Phase 3)	Jiangsu Province, Çin	OW	2014	150	-
Yantai TaoziWan WWTP (Phase 2)	Shandong Province, Çin	OW	2014	150	-
Jilin WWPT (Phase 2)	Jilin Province, Çin	OW	2014	150	-
Qinghe	Çin	OW/MRC	2011	150	150
Carré de Reunion	Versailles region, Fransa	Koch Membrane Systems	2015	144	42
Changsha 2nd WWTP	Hunan Province, Çin	OW	2014	140	-
North Las Vegas	Nevada, ABD	GEWPT	2011	136	97
Ballenger McKinney ENR WWTP	Maryland, ABD	GEWPT	2013	135	58
Assago	Milan, İtalya	GEWPT	2016	125	55
Daxing Huangcun WRP	Beijing, Çin	OW	2012	120	-
Jinyang WWTP (Phase 1)	Shanxi Province, Çin	OW	2015	120	-
Cox Creek WRF	Maryland, ABD	GEWPT	2015	116	58
Yellow River	Georgia, ABD	GEWPT	2011	114	71
Shiyan Shendinghe	Çin	OW/MRC	2009	110	110
Aquaviva	Cannes, Fransa	GEWPT	2013	108	60
Urumqi Ganquanpu WRP	Xinjiang Uygur Autonomous Region, Çin	OW	2014	105	-

Çizelge 2.8 (Devam): Dünya genelinde bulunan en büyük MBR tesisleri ve bu tesislerin bazı özellikleri (<http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/>).

Busan City	Kore	GEWPT	2012	102	102
Wenyuhe River Water Treatment (Phase 2)	Beijing, Çin	OW-MRC	2010	100	-
Hebei Zhengdi WWTP	Hubei Province, Çin	OW	2014	100	-
ZhuHai Qianshan WWTP	Guangdong Province, Çin	OW	2016	100	-
Guangzhou	Çin	Memstar	2010	100	-
Wenyuhe	Beijing, Çin	OW/Asahi Kasei	2007	100	100
Beijiao WWTP renovation project	Ordos, Moğolistan	OW	-	100	-
Xianlin WWTP PPP project	Nanjing, Jiangsu, Çin	OW	-	100	-
Beijiao WWTP	Ordos, Moğolistan	OW	-	100	-
Zhengding new district WWTP	Zhengding, Hebei, Çin	OW	-	100	-
Chengxiang WWTP Phase I	Haiyan, Zhejiang, Çin	OW	-	100	-

GEWPT: GE Water and Process Technologies

OW: (Beijing) Origin Water

MRC: Mitsubishi Rayon Corporation

2.7.4 MBR 'lerin avantaj ve dezavantajları

MBR sistemlerinin avantajları:

- Diğer konvansiyonel arıtma sistemleriyle karşılaştırıldığında, küçük alan ihtiyacı MBR sistemlerine büyük bir avantaj kazandırmaktadır (Visvanathan ve diğ., 2000).

- MBR prosesi bulanıklık, AKM, besin maddesi ve KOİ açısından yüksek kalitede atık sağlar. MBR'ler ayrıca UF ve MF kullanarak, 0.005 - 2 µm arasında değişen düşük gözenek büyüklüğüne göre dezenfeksiyon fırsatı sunar (Dijk L. Van. ve Roncken, 1997; Le Clech ve diğ., 2006).
- MBR sistemleri ile, daha uzun çamur bekletme yaşı ve yüksek biyokütle madde konsantrasyonlarında (20000 mg/L'ye kadar) düşük çamur üretimi ve yüksek KOİ ve BOİ giderimi yapabilecek şekilde işletilebilir (Defrance ve Jaffrin, 1999).
- Membran biyoreaktörler, özel dizaynları sayesinde atıksuları hem fiziksel hem biyolojik olarak arıtabildiği için, havalandırma, çöktürme ve dezenfeksiyon gibi konvensiyonel arıtma sistemlerinde kullanılan birçok arıtma birimini ortadan kaldırabilmektedir (Gryta ve diğ., 2001; Karakulski ve diğ., 1998; Kitiş ve diğ., 2007; Rosenberger ve diğ., 2002).

MBR sistemlerinin dezavantajları:

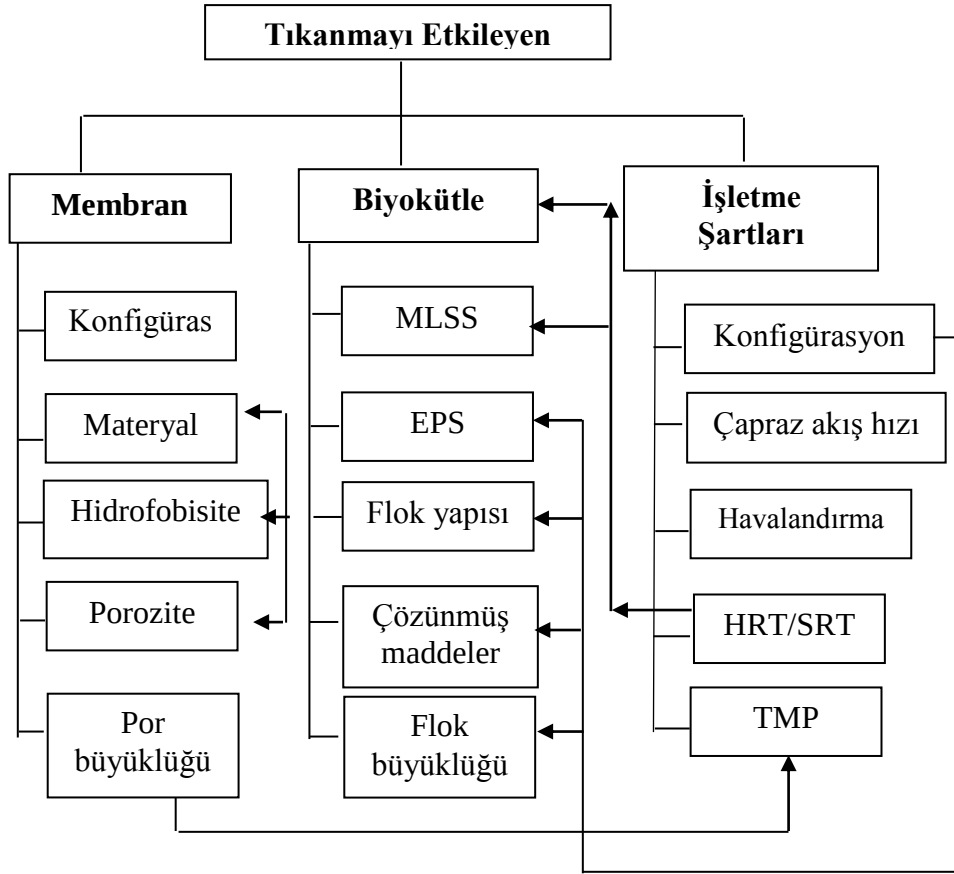
- MBR sistemlerinin en önemli dezavantajı, havalandırma, karıştırma, membran filtrelerinin periyodik olarak temizlenmesi ve değiştirilmesi için enerji gereksiniminin yüksek olmasından kaynaklanan işletme ve bakım maliyetidir.
- Eğer akı, membran alanıyla orantılı olarak yeterli seviyelere yükseltilemezse, MBR artan enerji sarfıyatı yüzünden tam kapasite çalıştırılmaz.
- Membran yüzeyinde zaman içerisinde bileşenlerin birikimi sonucunda oluşan membran tıkanması; akı değerinin düşmesine, membran süzme performansının düşmesine ve çıkış suyu kalitesinin düşmesine neden olmaktadır (Marrot ve diğ., 2004; Merz ve diğ., 2007; Metcalf & Eddy ve diğ., 2003; Stephenson ve diğ., 2000).
- Membran bioreaktörlerde tıkanma, membran dizaynı ve işletilmesi açısından için önemli bir problemdir. Çünkü tıkanmayla birlikte, temizleme gereksinimi ekstra maliyete sebep olmaktadır. Bu durum, membran işletme koşullarını ve performansını etkilemektedir (Jefferson ve diğ., 2000; Tomaszewska ve diğ., 2005).

2.7.5 MBR’lerde tıkanma problemi

MBR teknolojisinin gün geçtikçe çeşitli alanlarda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Membran sistemlerinin hızlı bir şekilde yaygınlaşmasının nedenleri arasında; membran maliyetlerin düşmesi, membran konusunda yapılan çalışmaların artması, membran üretici firmaların çoğalması gösterilebilir. Ama her arıtım teknolojisinde olduğu gibi MBR teknolojisinin de kısıtlayıcı bazı etkenleri bulunmaktadır. MBR’larda membranların işletim sırasında tıkanması MBR’ların hem kentsel hem de endüstriyel atıksu arıtımında daha yaygın uygulanmalarındaki en önemli engellerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Membranlardaki tıkanma membran permeabilitesini sınırlandırır. Diğer bir deyimle, birim transmembran basıncına karşılık membrandan geçen akının, dolayısıyla da, birim membran alanı başına arıtılmış temiz su üretiminin azalmasına neden olur (Yiğit, 2007).

Membran tıkanmaları mekanik anlamda kabaca ikiye ayrılır: geri dönüşümlü (yüzeyde oluşan jel ve kek tabakasının havalandırma veya fiziksel geri yıkama ile giderilmesi) ve geri dönüşümsüz (çözünmüş veya kolloidal maddelerin adsorbsiyon sonucu gözenek içinde birikimi ve gözeneği tıkanmasının kimyasal temizleme ile giderilmesi).

Genel olarak proses performansı ana kirleticilerin giderimi ve enerji talebi ile belirlenir. Tıkanma, membranın hidrolik performansını (permeabilite) düşürerek enerji masraflarını direk olarak etkiler. Ana kirleticilerin gideriminde ise fazla etkisi yoktur. Membran tıkanmalarına etki eden birçok etmen olmasına rağmen, direkt etki eden 3 ana etmen mevcuttur. Bunlar; işletim şartları, membranın fizikokimyasal karakteri ve biyokütle özellikleridir (Yiğit, 2007). Şekil 2.12’de MBR’lerde tıkanmayı etkileyen faktörler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.12. MBR’larda tıkanmayı etkileyen faktörler (Chang ve diğ., 2002, Judd, 2001).

Membran tıkanmasını önlemek için istenmeyen adsorbsiyon ve yapışma olaylarının önlenmesi gerekir, böylece kolloidlerin ve diğer tıkanmaya sebep olan maddelerin birikimi önlenir. Bunu sağlayabilmek içinse ileri ön arıtma (aktif karbon kullanımı, pH ayarlanması vb. gibi), membranlar yüzey modifikasyonu (nanoparçacık ekleyip yüzey hidrofiliğinin artırılması vb. gibi), kimyasal veya fiziksel temizleme yapılabilir (Ng ve diğ., 2013).

2.7.5.1 İşletme şartları

MBR’lerde tıkanma problemine etki eden faktörlerden biri MBR’nin işletme şartlarıdır. Bütün membran proseslerde olduğu gibi MBR’lerde de akı arttıkça tıkanma oranı artmaktadır. Bu sebeple işletme akısı seçerken bazı önemli noktalara dikkat edilmelidir. Bunlardan en önemlisi membran alanıdır. Membran alanının mümkün olduğunca minimize etmek hem tıkanma açısından hemde maliyet açısından avantaj sağlayabilmektedir. Yüksek akıda çalışıldığında membranların tıkanması daha kısa sürede gerçekleşir; bu da geri yıkama ve sistemin durdurulup

temizleme işleminin daha sık yapılması anlamına gelmektedir. Bütün bunlar, işletme maliyetinin artmasına neden olmaktadır (Ağtaş, 2014).

MBR’lerde çeşitli membran modülleri kullanılabilir. Özellikle düz plaka ve tübüler modüllerde MBR’lar oldukça düşük akı değerlerinde işletilebilmektedir. Bu seviyedeki akılara ‘kritik akıdan düşük akılar’ denir. Kritik akı ise, sabit akı ve transmembran basıncında sürdürülebilir membran permabilitesindeki işletim limiti olarak tanımlanabilir. MBR’ler kritik akının üzerinde bir akı değerinde işletildiğinde transmembran basıncı oldukça artar. Bu nedenle çok sık periyodik yıkama ya da temizleme yapılması gerekir (Ağtaş, 2014).

Havalandırma işlemi, MBR’lerin işletimi ve tasarımındaki en önemli parametredir denilebilir. Havalandırma, biyolojik arıtım, flokların karışması ve membran yüzeyinden kirliliklerin sıyrılması için gerekmektedir. Hava; MBR içerisindeki sıvıyı membran modül kanallarından geçirmek amacıyla kullanılmasının yanında, sıvı akış dalgalanmalarını ve yerel teğetsel kayma geçici dalgalarını tetikleyerek membran süzöntüsünü iyileştirir (Cui ve diğ., 2003).

Membran yüzeyindeki teğetsel kayma, membran yüzeyinde geniş partiküllerin birikmesini önlemektedir. Bununla birlikte, bu durum partikül çapının küpüyle orantılı olduğundan, küçük partiküller için yanal yer değiştirme hızı daha küçüktür. Bu da, ince materyaller nedeniyle daha şiddetli membran tıkanmalarına neden olmaktadır (Choo ve Lee,1998).

Çamur yaşı (SRT - solid retention time) da MBR’lerde ki tıkanmayı etkileyen işletme parametrelerinden biridir. Uzun SRT değerlerindeki işletme, aşırı çamur üretimini minimize etmektedir ama MLSS seviyesindeki artış membran kanallarında tıkanmalara, membran kirlenmelerine ve havalandırma veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bilimsel çalışmalar, SRT’nin; MLSS ve EPS fraksiyon konsantrasyonları yolu ile tıkanma eğiliminin belirlenmesinde anahtar bir parametre olduğunu göstermektedir. Bu temel üzerinde, optimum SRT; oksijen transfer verimi yeterli derecede yüksek kalırken ve membran tıkanmaları kontrol edilebilir bir seviyede tutulurken, kirlenici konsantrasyonu minimize edilerek öngörülebilmektedir. Pratikte, SRT titizlikle kontrol edilebilme eğiliminde değildir. Ayrıca, SRT’nin; tıkanma üzerinde muhtemelen, besleme akımı kalitesinden ve içerideki dalgalanmalardan daha az etkisi bulunmaktadır (Judd,S., Judd,C.,2006).

2.7.5.2 Membranın fizikokimyasal karakteri

Membranın tıkanmasına doğrudan etki eden diğer bir parametre ise membranın fizikokimyasal karakteridir. Gözenek boyutu, yüzey enerjisi, porozite, yüzey pürüzlülüğü, yüzey yükü, hidrofilik/hidrofobik olma durumu gibi özellikler membranın karakterini belirler.

Membranlar üretilirken özellikle membran yüzeyinin hidrofilik olması önem taşır. Membran materyali olan polimerlerin yüzeyleri yeterli derecede hidrofilik olacak şekilde üretim yapılır. Bu da protein vb. gibi hidrofobik maddelerin yüzeyde birikmesini ve buna bağlı olarak tıkanma problemi teşkil etmesini azaltır (Judd, 2002b).

Hidrofobik etkileşimler; çözünen maddeler, EPS'nin mikrobiyal hücreleri ve membran materyali arasında gerçekleştiğinden; membran tıkanmasının, hidrofilik membranlara göre hidrofobiklerde daha yoğun olması beklenebilmektedir (Chang ve diğ.,1999; Madaeni ve diğ.,1999; Yu ve diğ.,2005a, Yu ve diğ.,2005b). Literatürde, membran hidrofobikliğindeki değişiklikler, genellikle por çapı ve morfoloji gibi diğer membran modifikasyonları ile ilişkilendirilmiştir. Bu ilişkilendirme, membran hidrofobikliği ve tıkanma arasındaki korelasyonun tayin edilmesini zorlaştırmaktadır. Yakın zamanda yapılan bir MBR çalışmasında, örneğin; temas açısı ölçümü, MWCO (molecular weight cut off; sırasıyla 20-70 kDa membranlar) artışı ile; PES membranların belirgin hidrofobikliğinin azaldığını (55'ten 47°'ye) kanıtlamıştır (He ve diğ.,2005).

Tıkanmalar yüksek hidrofobiklikte daha şiddetli bir şekilde beklendiğinden, çalışmalar genel olarak kimyasal yüzey modifikasyonları ile membran hidrofilikliğini arttırmak üzerine yoğunlaşmıştır. MBR membran modifikasyonlarının son örnekleri; poli propilen boşluklu fiberlerin NH_3 ve CO_2 plazma arıtımı ile (Ağtaş, 2014). yüzeyin polar gruplarla işlevselleştirilmesini içermektedir. İki durumda da, membran hidrofilikliği belirgin bir şekilde yükselmiş ve yeni membranlar modifiye edilmeyenlere göre daha iyi filtrasyon performansı ve akı iyileşmesi sağlamıştır.

Por çapının membran tıkanmaları üzerindeki etkisi besleme çözeltisinin karakteristiği ile güçlü bir şekilde bağlantılıdır, özellikle partikül dağılımı önemlidir (Judd,S., Judd,C.,2006).

Klasik düşünce tarzı; geniş bir aralıktaki maddeleri tutarak daha fazla koruma sağlayan küçük porların kek direncini (ya da kirletici tabaka) arttıracak yönündedir. Bu form daha geniş porlu membranlar üzerinde oluştuğunda; katman daha kolay giderilebilmekte ve daha az kalıntı por tıkayıcı bırakmakta ya da yüzey adsorpsiyonuna neden olmaktadır (Judd,S., Judd,C.,2006). Bununla birlikte; 0,4 ile 5 mikron aralığında yapılan membran testlerinde, Gander ve diğ.,(2000) aksi yönde; daha geniş por çaplı membranlarda başlangıç tıkanması ve daha küçük porlu membranlar genişletilmiş bir zaman periyodunda kullanıldığında belirgin bir akı düşüşü gözlemlemiştir. Bu bilim insanlarının kullandığı membran izotropiktir ve yüzey hidrofilizasyonuna sahip değildir.

Membran pürüzlülüğü ve porozite; 0,2 ile 0,22 μm nominal por çapı aralığındaki 4 MF membranın paralel bir şekilde test edilmesi sonucu; gözlenen tıkanmanın değişiminin muhtemel sebepleri olarak tanımlanmıştır (Fang and Shi, 2005). Diğer 3 membran, yüksek poroz ağlarından dolayı por tıkanmasına daha eğilimliyken, Track-etched membran (yoğun yapı ve küçük ama üniform silindirik porlar), yüksek yüzey izoporozitesinden dolayı en düşük direnci göstermiştir. Membranın mikro yapısı, materyali ve por açıklığının MBR tıkanmasını belirgin ölçüde etkilediği belirtilmiştir (Fang and Shi, 2005).

2.7.5.3 Biyokütle özellikleri

MBR sistemlerinde önemli bir problem teşkil eden tıkanmaların, hemen hemen yarısının biyokütleden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Biyokütle içerisinde bulunan partiküller ve çözünmüş polimerler tıkanma problemine yol açar (Yiğit, N., 2007). Biyokütle; hücreleri, ölü hücreleri, substrat bileşenlerini, SMP'leri ve EPS'leri içermektedir. Biyokütle içerisindeki çözünmüş maddeler kısmının tıkanmayı ciddi şekilde arttırdığı bilinmektedir (Defrance ve diğ., 2000).

MBR'lerdeki membran tıkanmaları çoğunlukla EPS'ye dayandırılmaktadır (Ağtaş, 2014). EPS; biofilm, flok ve aktif çamur sıvıları gibi mikrobiyal kümeleşmelerin yapı materyalidir. EPS terimi, eğer ortamdan ekstrakte edilmiş ise eEPS şeklinde kullanılabilir. EPS, hücre yüzeyinde ya da dışında ve mikrobiyal kümeleşmenin hücrelerarası boşluklarında bulunabilen, karbonhidrat, protein, nükleik asit, yağlar ve diğer polimerik bileşikler gibi otoktan makromoleküllerin tüm sınıflarını kapsayan bir terim olarak kullanılmaktadır (Flemming ve Wingender,2001). Bunlar; hücre

tarafından salgılanmış, hücre yüzeyinden yayılmış veya hücre parçalanması ile üretilmiş çözünmeyen maddeleri içermektedir (Jang ve diğ.,2005). Değişken ve heterojen bir yapıya sahip olan EPS, içerisinde mikrobiyal hücrelerin gömülü olduğu, yüksek hidratlı jel bir ana yapı oluşturabilmektedir (Nielson ve Jahn,1999) ve bu yapı membran proseslerinde, süzüntü akımına karşı belirgin bir bariyer oluşumuna yardım etmektedir. Sonuç olarak, membrana bağlanmış biyofloklar membran yüzeyinde, biofilm oluşumu boyunca ana bir nütrient kaynağı sağlamaktadır (Flemming ve diğ., 1997).

SMP, genel olarak çöktürülmüş biyokütle olarak açıklanmaktadır. Ama bazı zor ayrışabilir besleme akımları söz konusu olduğunda, çöktürülmüş biyokütle kaçınılmaz olarak biyolojik arıtmayla arıtılamamış besleme akımı bileşenleri içerecektir. SMP, hücre parçalanması sırasında ortama verilen ve daha sonradan hücre membranına difüze olan ve sentez sırasında kaybolan ya da bazı nedenler için ekstrakte edilen çözünebilir hücresel bileşenlerle alakalıdır (Laspidou ve Rittmann, 2002; Li ve diğ., 2005a). MBR sistemlerinde, bunlar besleme substratından da kaynaklanabilmektedirler.

2.8 MBR’lerde Tıkanma (Kirlenme) Kontrolü Ve İyileştirme

Pratikte kirlenme ve tıkanma kontrolü genel olarak 5 ana strateji ile sınırlanmaktadır.

- Besleme akımına uygun ön arıtımın uygulanması,
- Uygun kimyasal ve fiziksel temizleme protokollerinin uygulanması,
- Akımın düşürülmesi,
- Havalandırmanın arttırılması,
- Karışık sıvının kimyasal ya da biyokimyasal olarak modifiyesi.

Yukarıdaki tüm stratejiler tam ölçekli MBR işletimi için uygulanabilir (Judd,S.,Judd,C., 2006).

a) Besleme akımının ön arıtımı

Besleme akımı MBR’a verilmeden önce ızgaraya tabi tutulduğunda, genellikle 6 mm’lik ızgaralar MBR için yetersiz kalmaktadır. Bu şekilde kaba ızgaralar, membran modülünün konsantre akım kanallarının tıkanma riskini arttırmaktadır. Özellikle

evsel atıksularda bulunan saç, tüy gibi materyaller, k mele ip hem membran aralıklarını hem de havalandırma açıklıklarını tıkayabilmektedir. Boşluklu fiber (hollow fiber) membranları; saç, tüy gibi materyallerin k mele mesine ve diğer kirleticilerin de membran elemanının tepesinde birikmesine elverişlidir. Sa , tüy gibi maddeler daha sonra filamentlerle birbirine ba lanarak, belirgin bir şekilde geri yıkamayla giderilemeyebilirler. Düz plaka (flat sheet) membran tıkanmaları, kirliliklerin kanal kenarlarında ve girişinde bir araya toplanması ile gerçekleşmektedir. Eğer havalandırma bu kirlilikleri gideremezse, çamur tıkanmanın üzerinde birikir ve dışta bırakılan alanın etkilenme oranı artar. Havalandırma sisteminde biriken fiberler, akış modelini ve membranlara gelen hava hacmini de i tirebilmekte ve aşındırma derecesini düşürmektedir. A ınmanın azalmasının sonucu olarak, membran tıkanması artar. Bu nedenle havalandırıcılar normalde, tıkanmaya karşı dirençli ve/veya suyla periyodik yıkamaya elverişli olarak tasarlanmalıdır (Judd,S.,Judd,C., 2006).

b) Uygun fiziksel ve kimyasal temizlik protokollerinin uygulanması

Fiziksel temizlik

S re ve sıklık prosesin durma süresini belirledi inden, bu iki parametre genel temizlemede anahtar faktör konumundadır. Geri yıkama için, önemli olan parametre geri yıkama akısıdır. Geri yıkama akısı genel olarak, i letim akısının 1-3 katıdır ve geri yıkama TMP'si ile belirlenmektedir. Sıklığı daha düşük ve daha uzun süreli geri yıkamanın (600s filtrasyon/45 s geri yıkama), daha sık ama daha kısa süreli (200 s filtrasyon/15 s geri yıkama) geri yıkamadan daha verimli olduğu bulunmuştur (Jiang ve di ., 2005). Genellikle daha sık ve daha uzun geri yıkamanın daha etkili bir temizlik sağladığı d   n lse de, muhtemel dizilimin enerji ihtiyacını düşürmek için araştırılması gerekmektedir. Bu durum, izlenen TMP değerine göre otomatik olarak geri yıkama süresini optimize eden genel bir kontrol sistemi tasarımı ile elde edilmiştir (Smith ve di .,2005). Bununla birlikte, geri yıkama akısının arttırılması daha fazla ürün kaybına neden olmakta ve net akıyı düşürmektedir.

Hava da, geri yıkamanın etkilenmesinde (Sun ve di ., 2004) veya geri yıkamanın su ile geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Sürekli sistemden elde edilen %400'e kadar net akı, hava geri yıkaması kullanılarak kaydedilmiştir. Fakat bu çalışmada her 15 dakikalık filtrasyon için, 15 dakikalık hava geri yıkaması gerekmiştir (Visvanathan

ve diğ., 1997). Hava ile geri yıkama kesin olarak etkili olsa da; anekdotal kanıtlar bazı membranların kısmi olarak kurumasına neden olduğunu göstermektedir. Bu da membranın kırılmaşmasına ve membran bütünlüğünde problemler meydana gelmesine sebep olmaktadır (Judd,S.,Judd,C.,2006).

Kimyasal temizlik

Fiziksel temizleme, geri döndürülemez kirliliğın giderilmesi için kimyasal temizlik ile tamamlanmıştır. Kimyasal temizleme bazı faktörler içermektedir. Bunlar;

- Kimyasal olarak geliştirilmiş geri yıkama (günlük olarak),
- Yüksek kimyasal konsantrasyonlarla yapılan bakım (haftalık),
- Yoğun kimyasal temizlik (yıl da bir ya da iki kez).

Haftalık bakım, yerinde (in situ) temizlik şeklinde yapılmaktadır ve membran permabilitesini korumak ve yoğun temizliğin sıklığını düşürmek için kullanılmaktadır. Bu temizleme şekli; yerinde, membranla (normal yerinde temizleme) ya da zaman zaman havada temizleme (cleaning in air-CIA) olarak bilinen, boşaltılmış membran tankı kullanılarak yapılmaktadır. Yoğun temizlik, alan dışında ya da membranların tam olarak reaktifle kaplanmasını sağlayan boşaltılmış membran tank ile yapılabilmektedir. Yoğun temizlik genel olarak, yükselen TMP'den dolayı filtrasyonun sürdürülebilir olmadığı zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Üreticiler tarafından önerilen yoğun kimyasal temizlik metotları; organik madde giderimi için hipoklorit ve inorganik skalantların giderimi için organik asit (sitrik ya da oksalik) birleşimini temel almaktadır (Judd,S.,Judd,C., 2006).

Haftalık bakım, genellikle tam bir tur için 30-60 dakikaya ihtiyaç duymaktadır. Genellikle klasik aerobik MBR'lar için, 200-500 mg/L NaOCl ortalama reaktif konsantrasyonları ile 3-7 günde bir gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 2.9'da dört MBR üreticisi için, yoğun kimyasal temizleme protokolü örnekleri verilmiştir.

Çizelge 2.9 : Dört MBR üreticisi için, yoğun kimyasal temizleme protokol örnekleri (Judd,S.,Judd,C., 2006).

Teknoloji	Çeşit	Kimyasal	Konsantrasyon(%)	Protokoller
Mitsubishi	CIP	NaOCl	0,3	Membrandan geri akış(2h)+sıvıya batırma(2h)
		Sitrik asit	0,2	
Zenon	CIA	NaOCl	0,2	Geri yıkama ve resirkülasyon
		Sitrik asit	0,2-0,3	
Memcor	CIA	NaOCl	0,01	Membranın iç tarafından, karşıt sıvıdan ve tankiçihava manifoldlarından resirkülasyon,
		Sitrik asit	0,2	
Kubota	CIP	NaOCl	0,5	Geri akış ve sıvıya batırma(2h)
		Oksalik asit	1	

CIP: yerinde temizleme

CIA: havada temizleme

c) Akının düşürülmesi

Akının düşürülmesi, her zaman kirlenmeyi azaltmaktadır ama bu durumun, membranın alan ihtiyacından dolayı sermaye giderleri üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bununla birlikte, işletim ve net akı, pik ve ortalama akı arasında ayırım yapılması zorunludur.

Membran konfigürasyonuna bakılmaksızın, evsel atıksular için 25 LMH civarında net akı değeri ve her 10-12 dakikada bir yapılan fiziksel temizlik, işletimin lehine bir durum gibi gözükmektedir. Eğer kullanılıyorsa, haftalık bakım sistemin durma süresine önemsiz bir ekleme yapmaktadır. İşletimle net akı üzerindeki en büyük etki pik yüklemeleridir. Bu da genellikle yağmur sularından dolayı oluşur. Bu nedenle artan hidrolik yüklemeler besleme akımındaki dalgalanmalarla birleştiğinde, MBR

tasarım ve işletiminde en büyük sorunlardan birini yaratmaktadır (Judd,S.,Judd,C., 2006).

d) Havalandırmanın arttırılması

Artan havalandırma oranları sürekli olarak kritik akıyı eşik değerlere kadar arttırırken, membran havalandırma yoğunluğunun arttırılması aşırı derecede pahalı bir durumdur.

0,5 mm'lik açıklıktan üniform olarak dağıtımı yapılan ince hava baloncuklarının kullanımı, benzer havalandırma oranlarına sahip 2 mm'lik açıklıktan elde edilen kaba baloncuklara göre; yüksek oranda yukarı kaldırma ve daha düşük direnç göstermişlerdir (Sofia ve diğ., 2004).

e) Kimyasal ya da biyokimyasal olarak karışık sıvının modifiyesi

Biyokütle kalitesi SRT'nin ayarlanması ile biyokimyasal olarak ya da kimyasal olarak kontrol edilebilmektedir. Pratikte, SRT; kirletici konsantrasyon kontrolü temelinde nadiren seçilmektedir. Bununla birlikte çalışmalar; az miktarda kirlenme kontrolünün, kimyasal eklemesi ile elde edilebileceğini göstermiştir (Judd,S.,Judd,C., 2006).

Koagülant/Flokülant

Ferik klorür ve alüminyum sülfat (alüm), membran tıkanma iyileştirilmesine bağlı olarak çalışması yapılmış iki bileşiktir. MBR temelli denemelerde, alüm eklemesi; SMP'nin karbonhidrat fraksiyonunun konsantrasyonunda belirgin bir düşüşe neden olmuştur ayrıca membran hidrolik performansında da gelişme gözlenmiştir (Holbrook ve diğ., 2004). Daha pahalı olmasına rağmen, ferik klorür eklemesinin alümden daha etkili olduğu belirlenmiştir. MBR'lere ferrik dozlaması, demir okside eden bakterilerin üretilmesinin geliştirilmesi için kullanılmıştır (Park ve diğ., 2005).

Adsorbent ajanları

Biyolojik arıtım sistemlerine adsorbent eklenmesi, organik bileşiklerin seviyesini düşürmektedir. PAC dozlaması (toz aktif karbon), biyolojik aktif karbon üretimine neden olmaktadır ve bu bileşik çözünür organikleri adsorbe eder ve çözer. Ayrıca yan akışlı ve batık PAC-MBR hibrit sistemleri ile yapılan karşılaştırmalı çalışmada, SMP ve EPS seviyelerinin düşürülmesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir (Kim ve Lee, 2003).

2.9 MBR Sistemlerinde Titreşim Uygulamaları

Batık membran modülleri ile çalışan MBR sistemleri atıksu arıtım proseslerinde yaygın bir şekilde kullanılan bir teknolojidir. Bununla beraber membran kirlenmesi hala membran sistemlerinin performansını düşüren kritik bir meseledir. Hava kabarcıklı , çapraz akışlı ve süzüntü geri yıkaması ile kayma gerilimi artırılması sıklıkla kullanılan tortu azaltma yöntemleridir. Yine de bunların sahada uygulanması çok pahalı ve uygulanabilir maliyetine göre limitli olabilmektedir. (1) MBR sistemlerin çoğu membran yüzeyündeki membran kirlenmesini önlemek için baloncuk yöntemini kullanır. Hava kabarcığı yöntemi sınırlı akı artırımını sağlar ve toplam enerji tüketiminin %70'ini oluşturur. (2) Dolayısıyla hem etkili hem de ekonomik olan başka teknolojiler vardır. Bu teknolojilerden biri de titreşimli kayma gerilimli sistemlerdir. Bu sistemlerin rotasyonel, çaprazlama ve boylamasına motor sürücülü yada manyetik itme çekmeli sürücülü olan farklı türleri vardır. Tüm bu teknikler membran yüzeyindeki kayma gerilimini geliştirme üzerine geliştirilmiştir. Partiküllerin porlardan filtrasyon solüsyonuna geri transferi sonucu daha yüksek kayma gerilimi gücü daha düşük kirlenme oranına sebep olur. Üstelik membran yüzeyinde oluşan hız kritik akıyı artırır ve kirlenmeyi azaltır.

2.9.1 MBR sistemleri için titreşim konsepti

Armando ve diğ. (1992) tarafından sunulan titreşimli kayma geliştirilmiş proses (VSEP) en çok bilinen titreşimli hareket eden membran konsepti idi. Teknoloji egzantrik ağırlıklı bir motorun burulma yayı ile sismik bir kütleye bağlanmasını içerir. Bu sistem ile yaratılan titreşimlerin frekansı 70Hz'ye kadar ulaşabilir. VSEP modüllerinin MBR sistemlere entegrasyonu ile VSEP ve MBR teknolojileri kombine bir şekilde beraber çalışabilirler. Batık MBR sistemleri için kullanılan diğer titreşim sistemleri ise frekans ayarı için hız kontrolcüsü içeren bir elektrik motorunun tanktaki membran modülüne tutturulması ile olur. Batık membranlarda kullanılan bu tarz sistemler daha çok farklı frekansların denenmesi ve farklı süspansiyonların filtrasyonu için kullanılır. Ayrıca titreşimli hareketli batık membranlar için kullanılan yeni bir teknoloji de vardır. Manyetik kaynaklı titreşim sistemleri (MMV) ilk olarak Bilad ve diğ. (2011) tarafından tanıtılmıştır. Sistem ses yazılımı ve kontrol üniteli bir manyetik titreşim motorundan oluşur ve titreşim frekansı 60Hz'ye kadar çıkabilir , genlik ise maksimum 2 mm'dir.

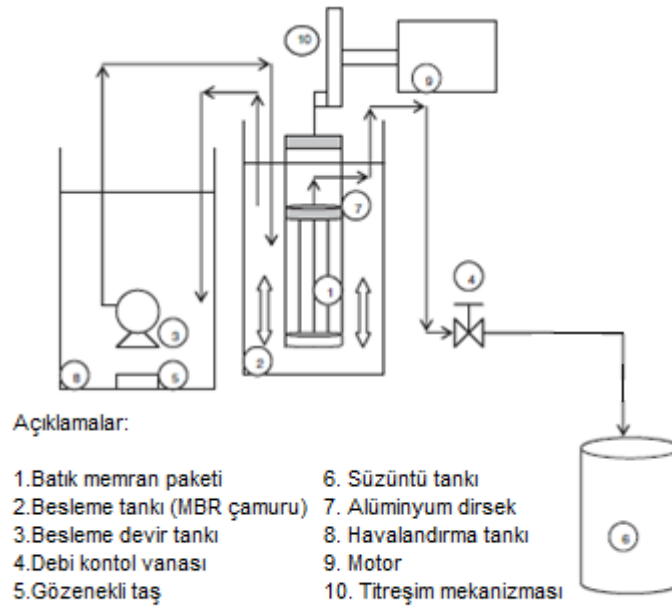
2.9.2 MBR modülleri için dizayn edilen titreşim sistemlerinin incelenmesi

Titreşim sistemli batık membranlar dönel, boylamasına yada yatay titreşim doğrultularında çalışabilirler. Bu sistemlerin frekans ve genlikleri uygulamalara ve sistem kapasitelerine göre değiştirilebilir.

Boyuna titreşim sistemleri

Uzunlamasına titreşimli sistemler boşluklu fiber (hollow fiber) yada levha membranlarla kullanılabilir. En çok ise bu sistemlerde MF ve UF membranlar kullanılmaktadır.

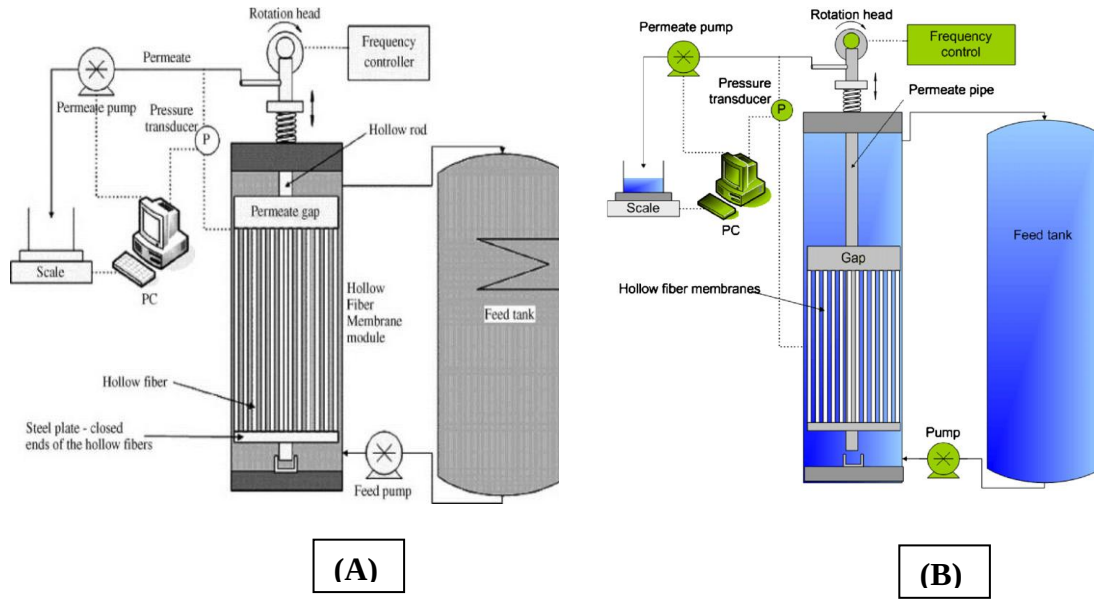
Low ve diğerlerinin (2005) kullandığı batık mbr modüllerinin boyuna titreşimli sistemleri Şekil 2.13'te görülmektedir. Sistem frekansı 30 Hz genliği ise 0.1 m'dir. Modül 1800 ve 2000 mg/l arasında MLSS içeren aktif çamura batırılmıştır. Modül 610 boşluklu fibere (hollow fiber) sahiptir ve bunlar 1.4 m uzunluğundadır. Bu modülün toplam yüzey alanı 7.24 m² dir. Frekans yada genlik ayarlanabilirliği ile ilgili ise bir bilgi bulunmamaktadır.



Şekil 2.13. Boyuna titreşimli MBR sistemi (Low ve diğ., 2005).

Beier ve diğerleri (2008) değiştirilebilir frekans ve ayarlanabilir genliği olan bir deney düzeneği kullanmıştır. 12cm uzunluğunda paralel fiberlerden oluşan toplam 256 cm² yüzey alanına sahip bir modüldür. Boşluklu fiber (hollow fiber) membranlar PES (polyethersulfone) materyalindendir ve X-Flow firmasından temin

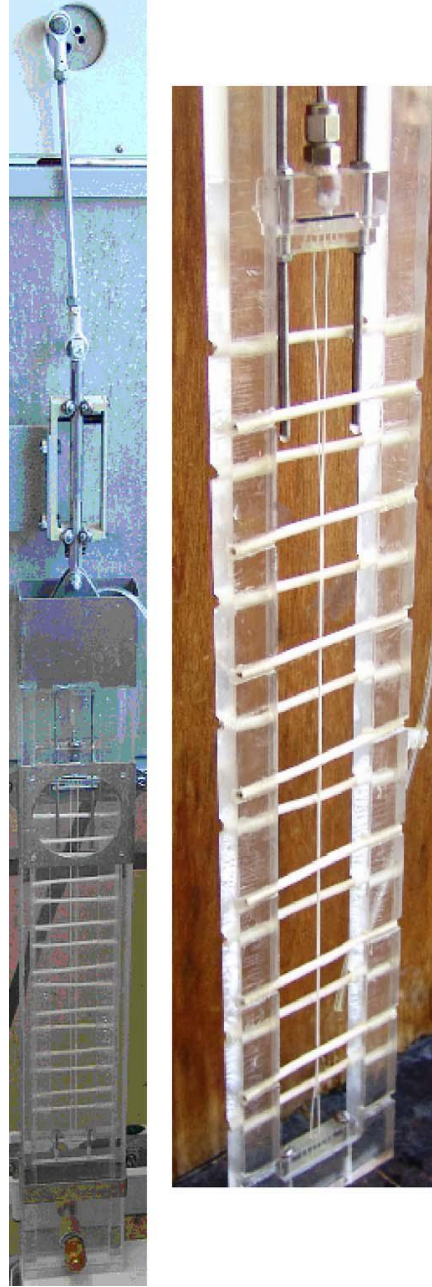
edilmiştir. Modül elektrik motoruna bağlı dönel bir başlığa bağlanmıştır. Dönel başlık ve modül arasında güçlü bir yay kullanılmıştır. 0,2 mm , 0,7 mm ve 1,175 mm ölçülerinde dönme genliğine sahip farklı dönel başlıklar vardır.. 0-30 Hz arasında frekansta çalışabilen elektrik motorlarıyla farklı frekanslarda kullanılabilirdi. Bahsedilen titreşim sistemine ait şematik görüntü Şekil 2.14-A ‘da gösterilmektedir.



Şekil 2.14.Beier et al tarafından kullanılan titreşimli sistemin şematik çizimi (A eski versiyon, B yeni versiyon).

Yeni çalışmalarında titreşim sistemi Beier ve diğerleri tarafından modifiye edilmiştir. Eski ve yeni sistem arasındaki tek fark hava kabarcıklarının module ulaşmasını engelleyen artan sıvı seviyesidir.

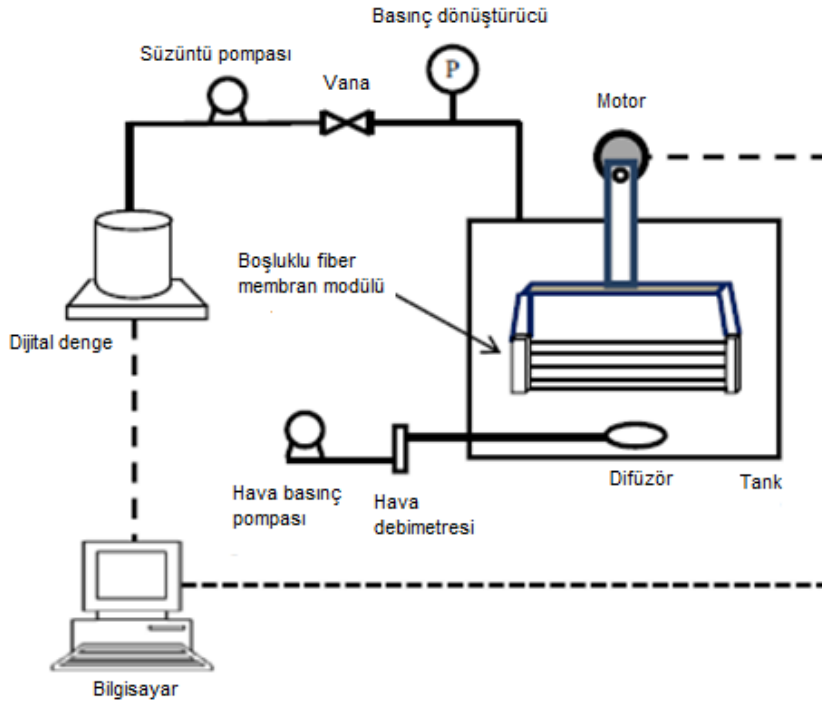
Benzer system Li ve diğ. (2013) tarafından tıkanma kontrol çalışmalarında kullanmıştır. Partikül görüntü velosimetrisi kullanılarak titreşimle ilgili çok daha geniş ve farklı fiber dizilimlerinde çalışmalar yapılmıştır. Sistemde bir doğru akım motoruyla kranklı mekanizma bulunmaktadır. Titreşim frekansı ve genlik ayarı 0-15 Hz ve 0-12 mm aralıklarında ayarlanabilmektedir. Deney düzenekleri Şekil 2.15 ‘te görülebilmektedir. Aynı düzenek Li ve diğ. (2014) tarafından enine ve boyuna titreşimlerin karşılaştırıldığı çalışmada da kullanılmıştır. Düzenek aynı makalede enine titreşimli sistemler kısmında incelenmiştir.



Şekil 2.16. Genkin ve diğerleri tarafından kullanılan laboratuvar ölçekli batık membran titreşim ünitesi.

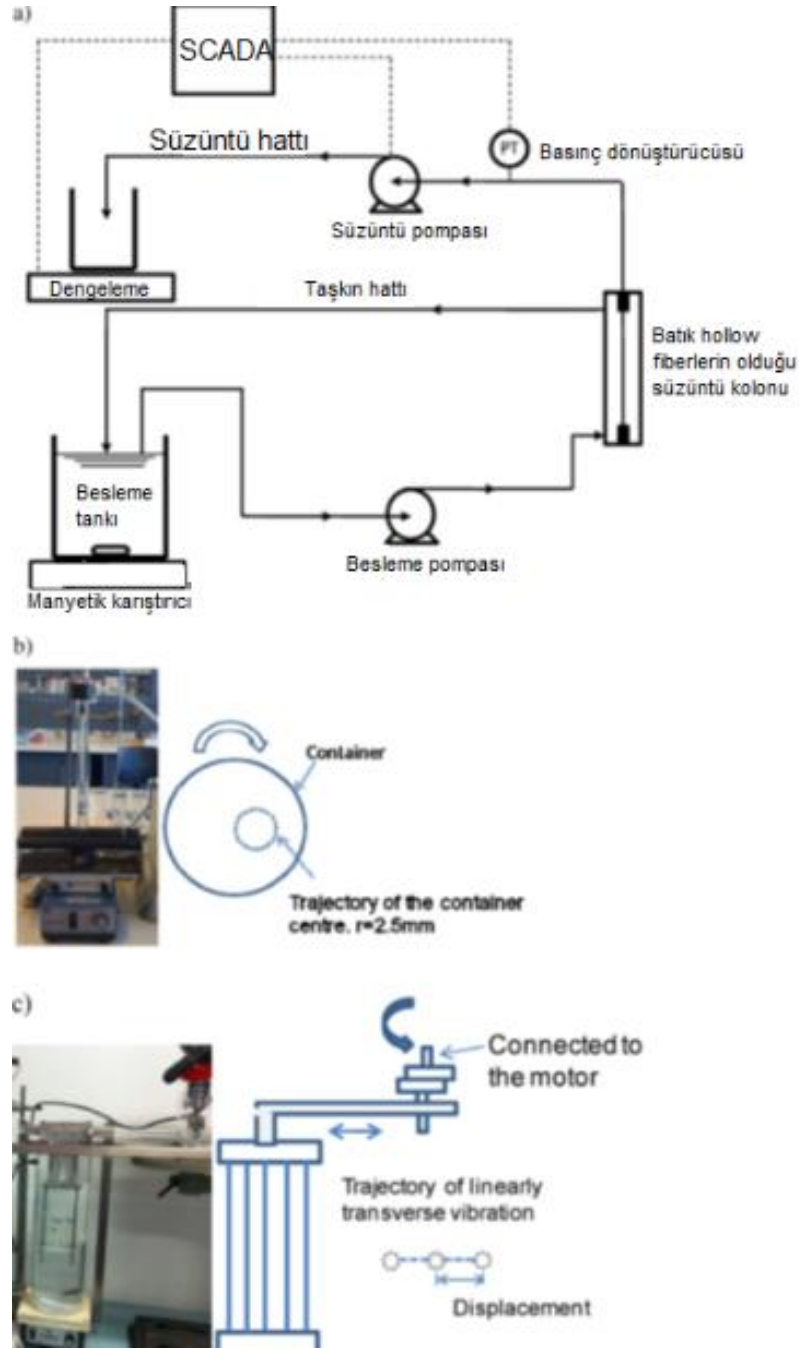
Başka bir batık membrane sistemi ise Gomaa ve diğ. (2011) tarafından uygulanmıştır. Sistem 40 litrelik bir tanka batırılmış olan MF levha membran modülünden oluşmaktadır (Şekil 2.17). Membran kırılmasını engellemek için tel örgü ile sarılmıştır ve o şekilde monte edilmiştir. Titreşim verimi ve frekans değerleri sırasıyla 0.003, 0.012, 0.02, 0.03 m ve 5, 10, 15, 18, 20, 25 Hz'dir. Titreşim frekansı hız motoru tarafından kontrol edilmiştir. Batık titreşimli membran sisteminin görünümü Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Bir takometre ve ışık emen yapışkan (sticker) ile Hz okumuştur, genlik ise mikrometre ile ölçülmüştür.

Li ve diğ. (2013), boşluklu fiber (hollow fiber) membranları pleksi tankına yatay olarak yerleştirmiş ve membran yüzeyinde enine titreşim etkisi oluşturmuştur. Modül tutucular düz akım motorun krank mekanizması vasıtasıyla gönderdiği titreşim ile salınım yapmıştır. Genlik ayarı 4 mm aralıklarla 0 ve 28 mm arasında ayarlanabilir iken, frekans ise 0-10 Hz arasında ayarlanabilmektedir. Titreşim düzeneği Şekil 2.18’de gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Li'nin enine titreşim düzeneği. (Li ve diğ. 2013).

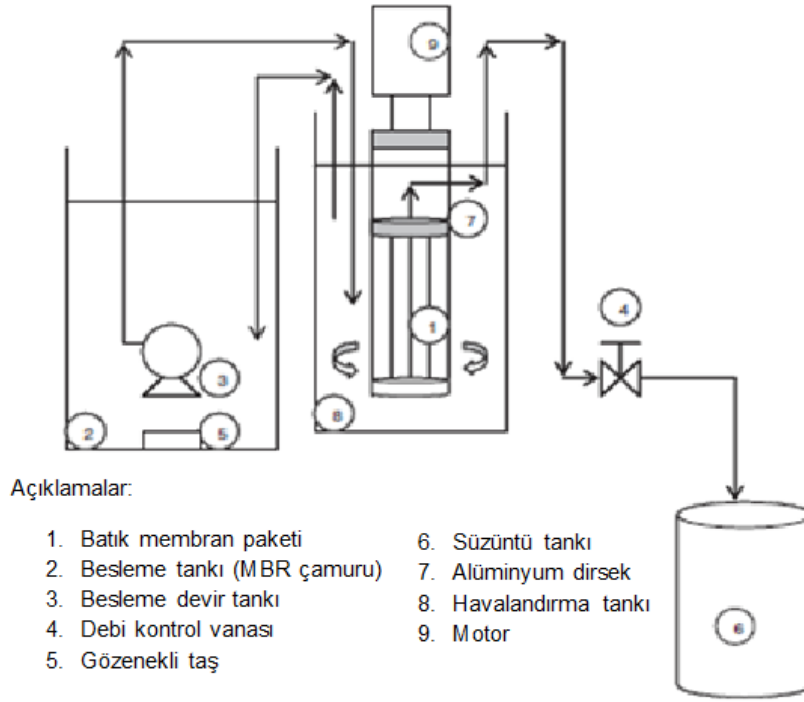
Diğer bir enine titreşimli MBR düzeneği Kola ve diğ. (2014) tarafından kullanılmıştır. Enine titreşimli membran sistemleri için iki farklı konfigürasyon kullanmışlardır. Birincisi çalkalama plakaları vasıtasıyla sıvının titreşim kazanması ikincisi ise Şekil 2.19’da görülen modülün titreştirilmesidir. Sıvının titreştirildiği metotta 2.5 mm yarıçapında silindirik hareketlerle filtre tüpü titreştirilmektedir. Sistemin titreşimi dakikada 0-2200 OPM (oscillation per minute-dakikada gerçekleşen titreşim) titreşim arasında ayarlanabilmektedir. Diğer konfigürasyon ise modülün enine titreşim konfigürasyonudur. Detaylı çizim ve enine titreşimli modül Şekil 2.20’de görülebilmektedir. Titreşim ünitesi başlığı 0,5 ile 5 mm arasında, motor frekansı ise 220 ile 3480 OPM arasında ayarlanabilmektedir.



Şekil 2.19. Anusha Kola tarafından kullanılan enine titreşim sisteminin şematik gösterimi (Kola ve diğ., 2014).

Döngüsel titreşim sistemleri

Low ve diğ. (2005)'nin yaptığı çalışmada, çapraz döngüsel titreşim sistemi, batık MBR sistemlerinin çalışma performansının geliştirilmesini amaçlamaktadır. Çapraz döngüsel, uzunlamasına ve VSEP (Titreşimli kayma gerilmesi prosesi) titreşim sistemleri birlikte karşılaştırılmıştır. Ayrıca, VSEP kurulumu harici MBR sistemi olarak yerleştirilmiştir. Çapraz döngüsel titreşim sisteminin deneysel düzeneği Şekil 2.20'de gösterilmektedir.

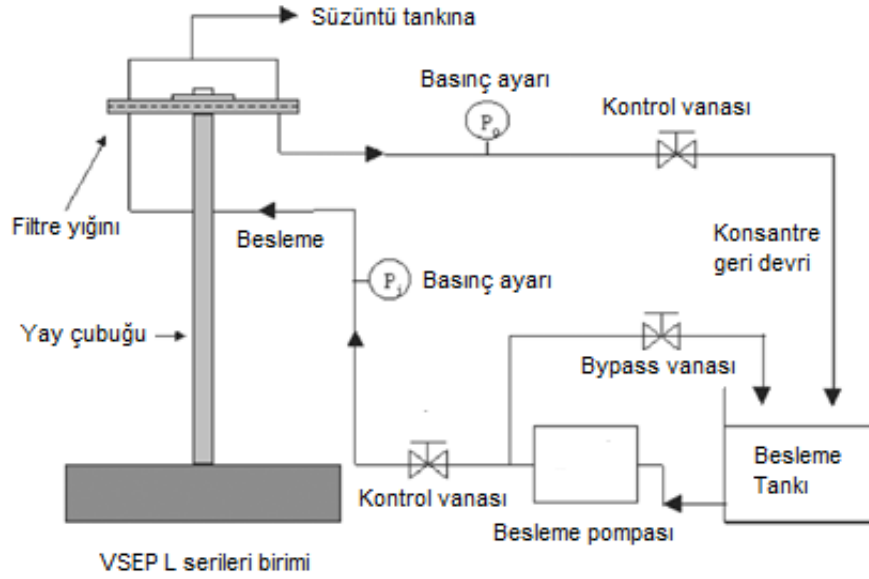


Şekil 2.20.Döngüsel titreşim düzeneği (Low ve diğ., 2005).

Sistem, uzunlukları 1.4 m olan 610 adet içi boşluklu fiber membran modül paketlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada kullnılan çapraz döngüsel titreşim sistemi, 30 rpm salınım ve 180 °C açisal genliğe sahiptir. Çapraz titreşim, membran yüzeyi üzerinde yüksek kayma gerilimi oluşturabilmek için, membran modülü üzerinde bulunan motor yardımı ile ileri geri hareket etmektedir.

Diğer Salınım Sistemleri

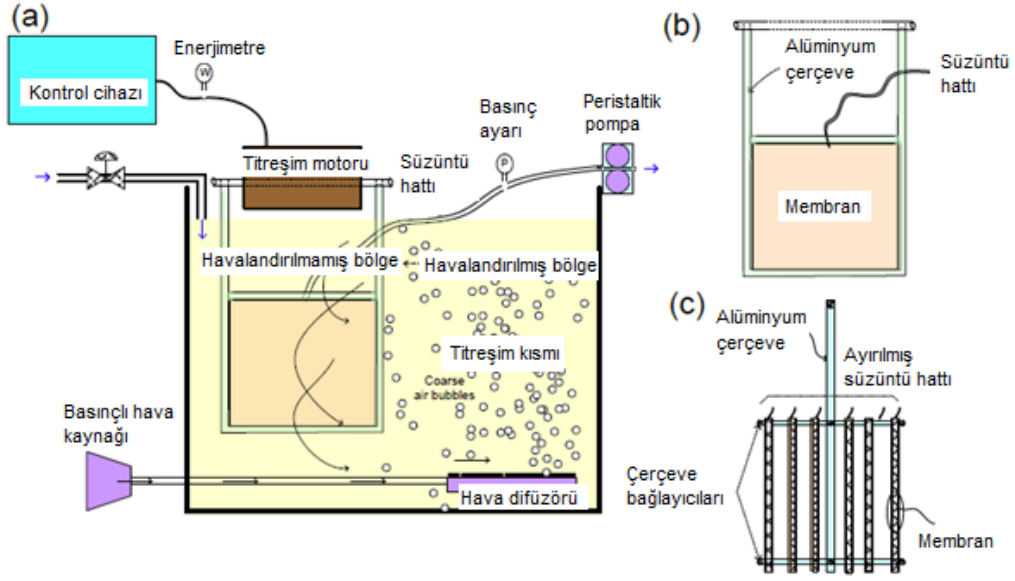
Low ve diğerleri, VSEP sistemi ile birleştirilmiş harici MBR işlemi çalışması yürütmüştür. Bu çalışmada araştırmacılar; A çapraz (dairese) salınımlı batık MBR, uzunlamasına (boydan) salınımlı ve ticari olarak temin edilebilen harici olarak çalışan bir VSEP sistemi olmak üzere 3 farklı kurulum denemişlerdir (Low ve diğ., 2005). Kullanılan VSEP sisteminde, L serisi 2.1 versiyon, tek bir halka şeklinde donatılmış 0,058 m² etkin membran alanına sahip membran kullanılmıştır. Çamur beslemesi, tek bir düz tabaka poliakrilonitril (PAN) ultrafiltrasyon membranı içeren VSEP modülü besleme tankına beslenmektedir. Deneysel sistemin şematik gösterimi Şekil 2.21’de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Harici bir MBR modülü olarak kullanılan bir VSEP sistemi (Low ve diğ., 2005).

Bu deney düzeneği, filtre yığınının bükülme salınımı tarafından üretilmektedir. Tipik VSEP modülü, 1.9 cm pik genişliğinden 3.2 cm pik genişliğine kadar sallanmaktadır. Eğer salınım frekansı yaklaşık 53 Hz olursa, kayma şiddeti yaklaşık $150,000 \text{ s}^{-1}$ olabilir. Yaklaşık 7/8 inç (2.22 cm) disk yığını, ileri geri hareket eden bir bükülme yayı üzerinde dışarıya doğru döndürülmektedir. Bu hareket, insan gözünün algılayabildiğinden daha hızlı bir hızda meydana gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan VSEP MBR 'da 5.33 m/s salınım hızı sunulan 1.9 cm genlik ve 70 Hz frekans kullanılmıştır.

Bilad ve diğ. (2011) ile Mezohegyi ve diğ. (2012), yeni bir manyetik kaynaklı membran titreşim (MMV) sistemini kullanarak titreşimli batık membran modülünü titreştirmek için farklı bir teknik uygulamışlardır. Bu salınımlı deneysel uygulamada, doğrudan batık düz levha membran modülü tankına paralel bağlı olan bir manyetik itme çekme cihazı takılmıştır. Sistemin havalandırılmalı ve havalandırmasız olarak iki farklı bölmesi vardır. Titreşim sisteminde, sürücü ve ses yazılımı tarafından kontrol edilen manyetik bir motor bulunmaktadır. Bu MBR sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.22' de gösterilmektedir. Titreşim frekansları 0 – 60 Hz aralığında ayarlanabilmekte ve titreşim genliği en fazla 2 mm ile sınırlandırılmaktadır. Gerçek titreşim gücü elektrik kablosuna bağlı, titreşim motoru ve sürücüsüne bağlanmış 2 adet AVO metreyle ölçülmüştür.



Şekil 2.22. Yeni geliştirilen indüklenmiş manyetik (MMV) MBR sisteminin şematik gösterimi. A) MMV sistemi ile donatılmış MBR sistemi. B) MMV modülünün haznesinin görünümü. C) Birden fazla membran çerçevelerinin paralel konumlandırmasını gösteren MMV modülünün yan görünümü (Bilad ve diğ. 2011, Mezohegyi ve diğ., 2012).

İncelenen titreşim sistemleri bir özet halinde aşağıdaki Çizelge 2.10'da referanslarıyla birlikte sunulmuştur.

Çizelge 2.10 : Titreşim sistemleri özet tablosu.

Titreşim	Frekans	Genlik	Salınım	Membran Türü	Kaynak
Mekanizması	Aralığı	Mesafesi	Tipi		
Motorla çalıştırılan mekanik şaft	Sabit 30 Hz	Sabit 100 mm	Uzunlamasına	Boşluklu fiber	S.C. Low ve diğ.
Motorla çalıştırılan yaylı şaft	0 - 30 Hz	0.2, 0.7, 1.175 mm	Uzunlamasına	Boşluklu fiber	Beier ve diğ.
Krank millli DC motoru	0 -15 Hz	0 - 12 mm	Uzunlamasına	Boşluklu fiber	Tian Li ve diğ.
Krank millli DC motoru	0 -10 Hz	Sabit 40 mm	Uzunlamasına	Boşluklu fiber	Genkin ve diğ.
Değişken salınımlı mekanizmalarıyla değişken hızlı motor	5, 10, 15, 18, 20, 25 Hz	3, 12, 20, 30 mm	Uzunlamasına	Düz tabaka levha	Gomaa ve diğ.
Krank millli DC motoru	0 - 10 Hz	0 - 28mm ile 4mm sıklıklarla	Enlemesine	Boşluklu fiber	Tian Li ve diğ.
Düz milli motor	220 - 3480 OPM	0.5 - 5 mm	Enlemesine	Boşluklu fiber	Anusha Kola ve diğ.
Dairesel hareketlerle sallama tabakası	0 - 2200 OPM	Sabit 2.5 mm	Enlemesine sıvı hareketi	Boşluklu fiber	Anusha Kola ve diğ.
Bir motor ile çapraz dönüşlü hareket	30 RPM	Sabit 180° geri ve dışa doğru hareket	Çapraz dönüşlü	Boşluklu fiber	S.C. Low ve diğ.
Eksantrik motorla çalıştırılan bükülme yayı	70 Hz	19 - 32 mm	VSEP L Serisi	Düz tabaka levha	S.C. Low ve diğ.
Manyetik indüklenmiş titreşim sistemi	0 - 60 Hz	Maksimum 2 mm	Manyetik indüklü	Düz tabaka levha	M. R. Bilad ve diğ. İle İle G. Mezohegyi ve diğ.

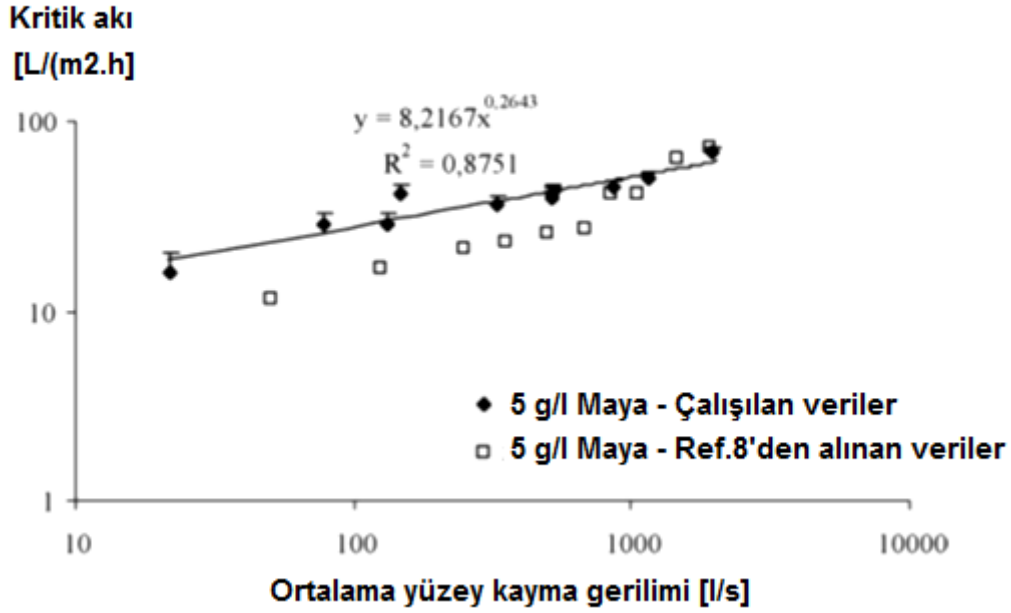
2.9.3 Titreşimli MBR modül sistemlerinde gerçekleştirilmiş filtrasyon çalışmaları

Dinamik filtrasyon sistemleri, çeşitli deneysel akışkanların filtrasyonunda kullanılmıştır. Yeni geliştirilen titreşim modül sistemlerinin farklı uygulamaların sonucu sunulmuş ve bu sonuçlardan bazılarının veri ve grafikleri birlikte karşılaştırılmıştır. Kritik akı, membran geçiş basıncı ve kirlenme oranı gibi parametreler farklı akışkanlar ile çeşitli titreşim koşullarında gerçekleştirilmiştir.

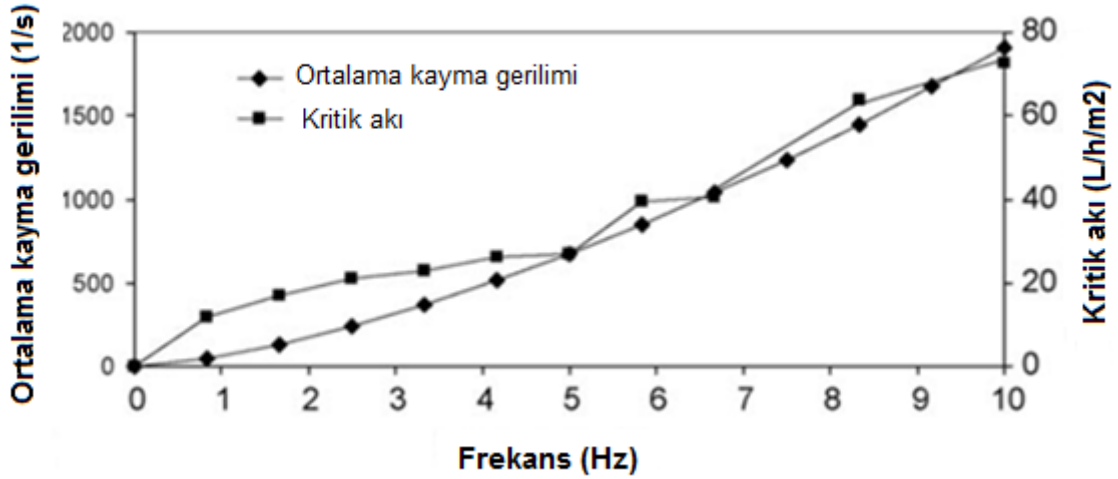
Organik Maya Süspansiyonlarının Filtrasyonu

Atık suların arıtılmasında literatüre bakıldığında, MBR sistemlerinin konfigürasyonlarının yaygın şekilde deneyleri mevcuttur ve bu deneyler genellikle maya hücresi ve biyokütle süspansiyonlarının filtrasyonu ile ilgilidir. Kritik akı kavramı, prensipte bir tabaka oluşumunu engellemek amacı ile yaygın olarak kullanılan rehber değer niteliğindedir. Sonraki yıllarda, belirli bir süre aralığında akı sabit tutulduğu zaman, sadece makul bir TMP artışındaki akı için rehber seviye olarak “alt kritik akı” ifadesi kullanılabilecek bir terim olmuştur.

MBR’ların geçirgenliğini artırmak ve kirliliklerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım, hava kabarcıklarının kullanımı ve membran yüzeyine gaz püskürtülmesidir. Membran modülü salınımı yapan MBR tanklarında, membran yüzeyindeki kayma gerilmesi ayrıca tıkanmayı azaltmak için de kullanılmaktadır. Titreşimli MBR sistemleri, maya hücrelerinin süspansiyonlarının filtrasyonu ile çeşitli araştırmacılar tarafından test edilmiştir. (Gomaa ve diğ. 2011, Beier ve diğ. 2006, Li ve diğ. 2014, Genkin ve diğ. 2006, Kola ve diğ. 2012). Şekil 2.23 ve 2.24’te Beier ve diğ. ile Genkin ve diğ. çalışmalarının kritik akı değerleri verilmiştir.



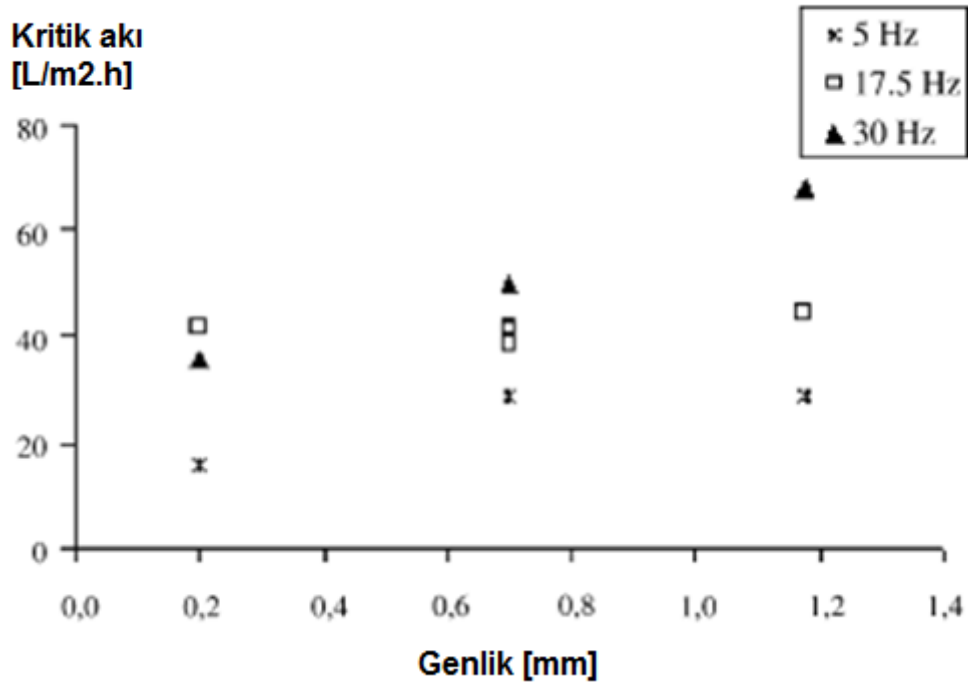
Şekil 2.23. Kritik akının ortalama yüzey kayma gerilimi ve ortalama zaman fonksiyonu log-log grafiği. +4 L/(m².h) hata payı her noktayla alakalıdır. Referans verileri [18] de bulunmaktadır.



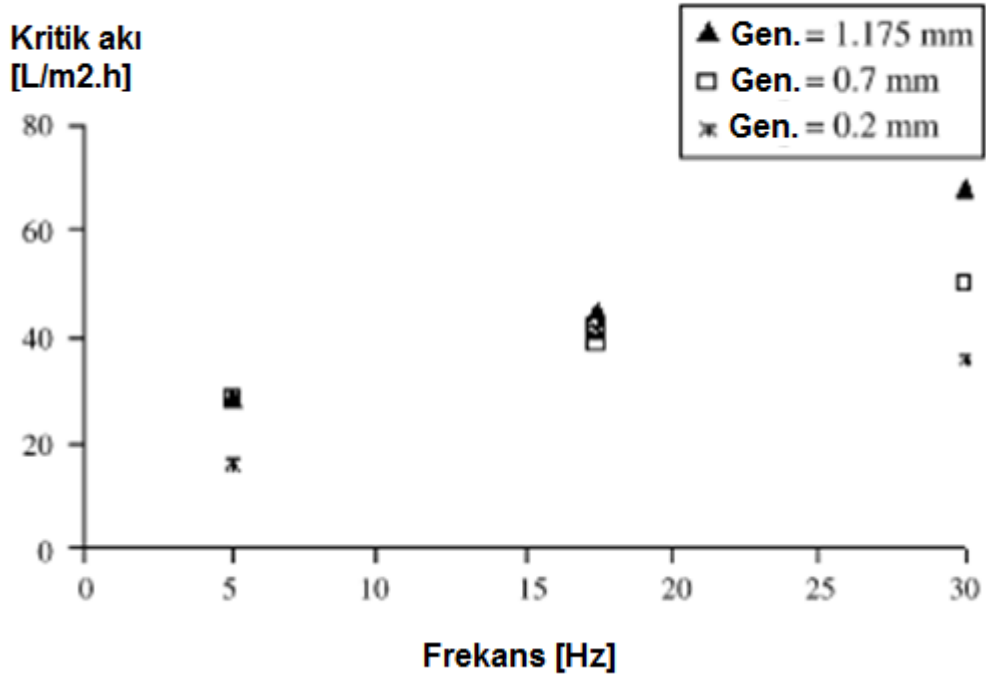
Şekil 2.24. Referans 18 'in titreşimsel biriminde gösterildiği üzere, frekansın kritik akı ve ortalama kesme gerilmesi üzerindeki etkileri.

Farklı çalışmalardaki kritik akı değerleri kendi aralarında karşılaştırıldığında, kesme oranı parametre benzerliklerini anlamak için yararlı olabilir. Beier ve diğerlerinin çalışmasında, ortalama yüzey kesme oranı farklı frekanslar (5, 17.5, 30 Hz) ve farklı genlikler (0.2, 0.7, 1.175 mm) ayarlanarak maya hücresi filtrasyonu test edilmiştir. (Beier ve diğ., 2006) Genkin

ve diğ. (2006)'nin yaptığı araştırmada, daha düşük frekanslarda (0-10 Hz) ve 40 mm'den büyük genliklerde benzer kesme oranı uygulanmıştır. Her iki çalışmada da yıkanmamış maya süspansiyonu konsantrasyonu 5 mg/L olarak kullanılmıştır. Her iki araştırmada da, münferit frekans ve genlik terimlerine kıyasla, kesme oranının, organik maya süspansiyonlarının filtrasyonunun kritik akısını belirlediğini gösteren, hemen hemen aynı deney sonuçlarına ulaşmıştır. Fakat, titreşim sistemlerinde frekans ve genlik, filtrasyon performansı üzerinde ayrı bir etkiye sahiptir. Örneğin, Beier ve diğerlerinin yaptıkları araştırmada, kesme hızı, frekansın 3/2 kuvvetine ve genliğin 1 kademe yükseltilmiş hali ile orantılıdır. Bu demektir ki: frekanstaki 6 katlık bir artış (30 Hz / 5 Hz), kesme oranını, genlikteki 6 katlık (1.175 / 0.2) bir artışa göre daha fazla artırmaktadır. Böylece, kritik akı, genliğin 6 kat arttırılmasına göre, frekansın 6 kat artırılmasıyla daha fazla artış göstermelidir. Bu aslında, Şekil 2.25'te gösterilen "5 Hz eğrisi" ile "30 Hz eğrisi" arasındaki ortalama uzaklığın, Şekil 2.26'da gösterilen "0.2 mm eğrisi" ile "1.175 mm eğrisi" arasındaki ortalama uzaklıktan daha büyük olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.25. Titreşim frekansının 3 farklı seviyedeki genlik değerleri için kritik akının bir fonksiyonu (Beier ve diğ. 2006).



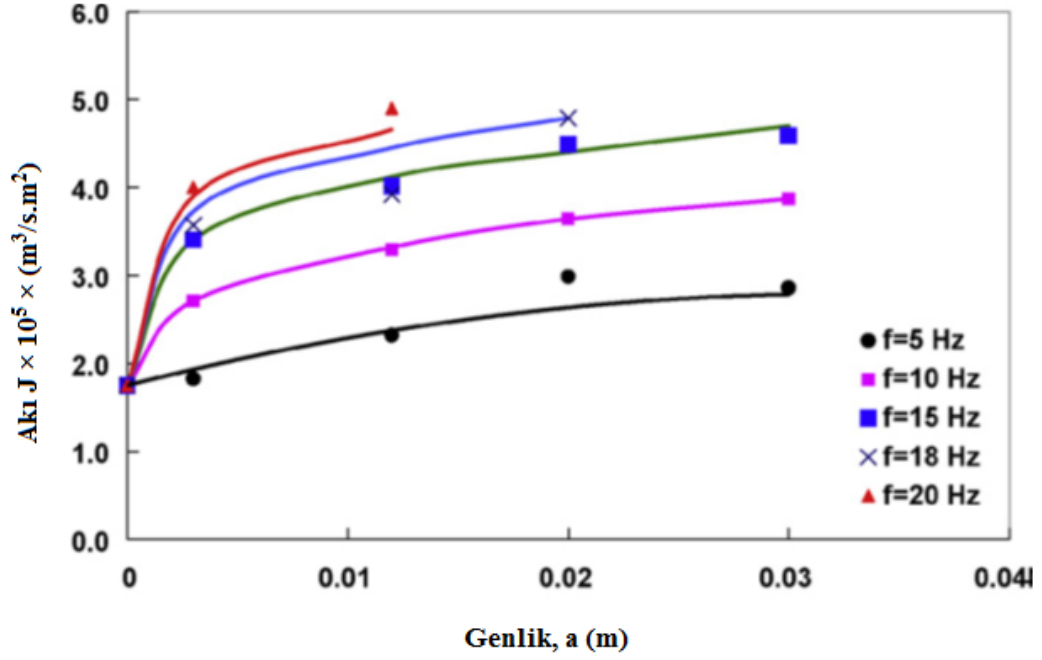
Şekil 2.26. Titreşim genliğinin 3 farklı seviyedeki frekans değerleri için kritik akının bir fonksiyonu. (Beier ve diğ. 2006)

Bir diğer çalışmada, frekans ve genliğin akı geliştirilmesine bağlı olup olmadığı tartışılmıştır. Gomaa ve diğ. (2010), salınım genliği ve frekansın kendi membran yoğunlaştırılması deneylerindeki maya süspansiyonunun filtrasyon akısına etkileri üzerinde çalışmışlardır. Diğer çalışmalardan farklı olarak Gomaa ve diğerleri, deneylerinde düz plaka mikrofiltrasyon membranı kullanmışlardır. Membran yüzeyindeki kek tabakası oluşumu, kek kalınlık oranı ile genlik ve frekans etkisi karşılaştırılmıştır.

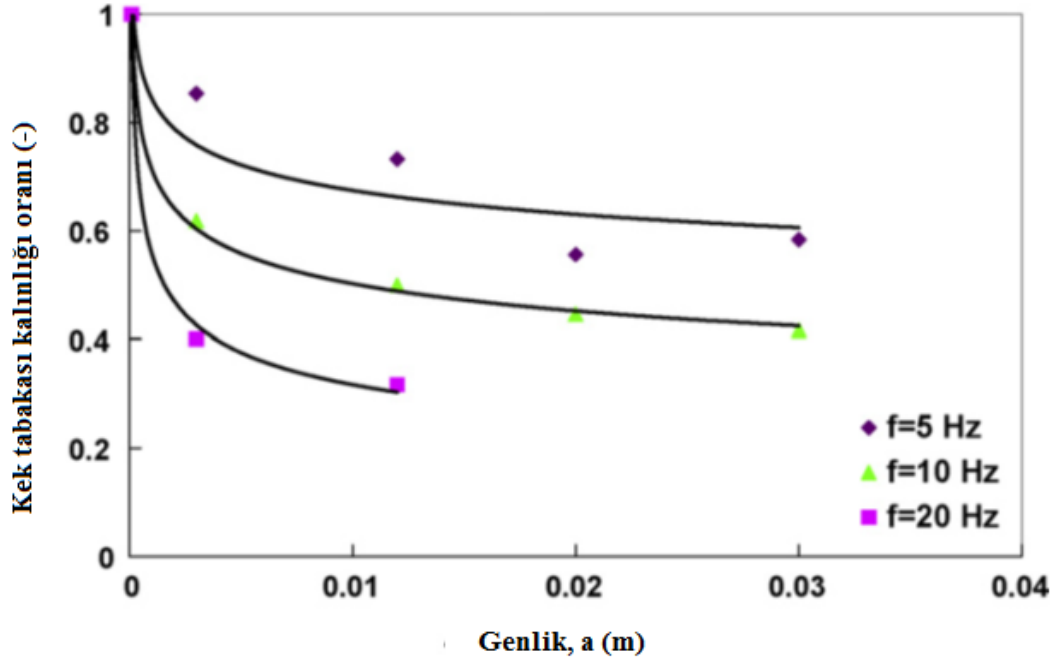
Şekil 2.27’de görüldüğü gibi genlik salınımının filtrasyon akısı üzerindeki etkisi yüksek frekanslarda daha belirgindir. Beklenildiği gibi, böylesine bir artış biriken kek kalınlığının azaltılması ile ilgilidir (Şekil 2.28). Örneğin, 0.012 m genlik ve 20 Hz frekansta salınım yapan membran yüzeyinin kek kalınlığı, salınım yapmayan membran yüzeyine kıyasla %30 daha az olmasıyla sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, aynı şekilde görüldüğü gibi, belli bir frekans değeri için, genlik değerinin yükselmesi kek kalınlığı üzerinde önemli bir etki göstermemektedir, ve bu durum kek uzaklaştırılması daha düşük titreşim genliklerinde de elde edilebilir.

Titreşim frekansının filtrasyon akısındaki artış üzerindeki etkisi Şekil 2.27’de gösterilmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, titreşim kesme incilmesi sebebiyle membran

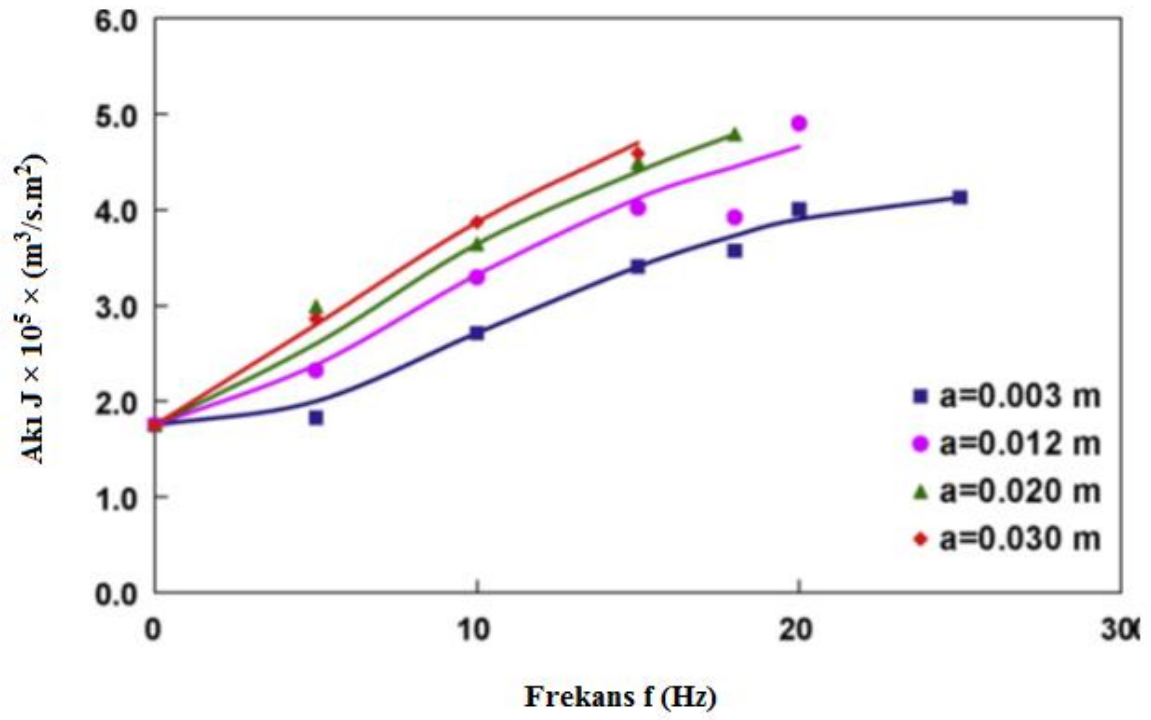
yüzeyinde oluşturulan kek tabakası etkilenmektedir (Şekil 2.28). Titreşim genliğinin etkileri karşılaştırıldığında, artan titreşim frekansı artan titreşim genliğinden daha etkilidir.



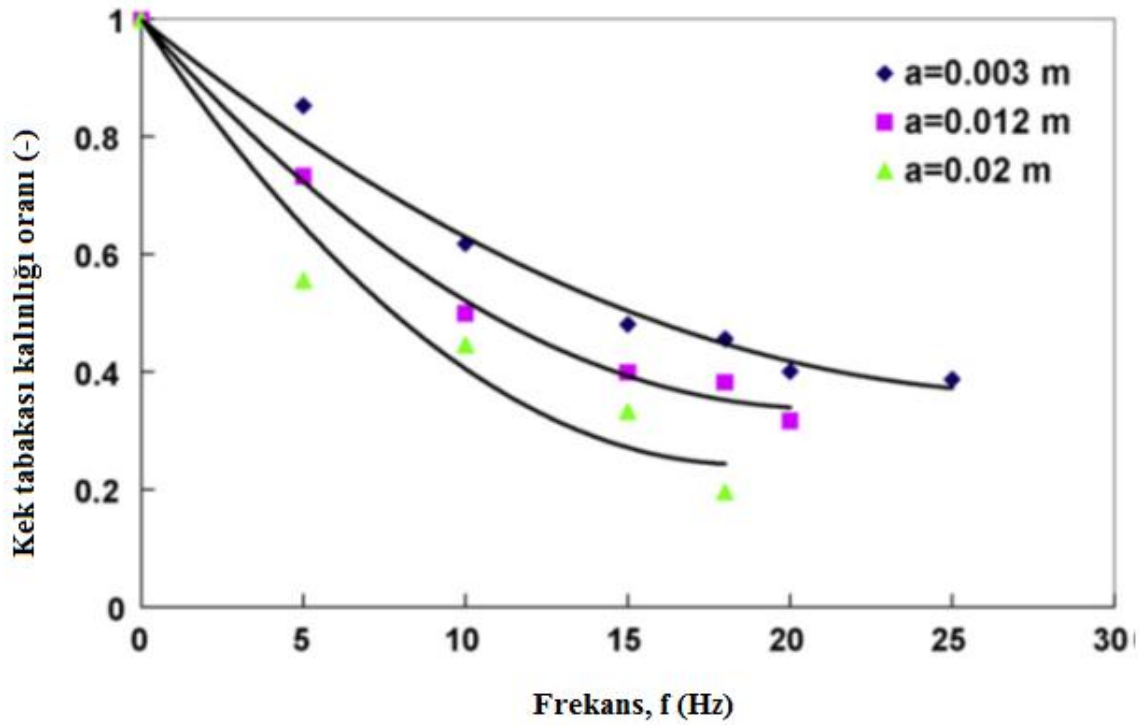
Şekil 2.27. Titreşim genliğinin filtrasyon akısı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).



Şekil 2.28. Titreşim genliğinin kek tabakası kalınlığı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).

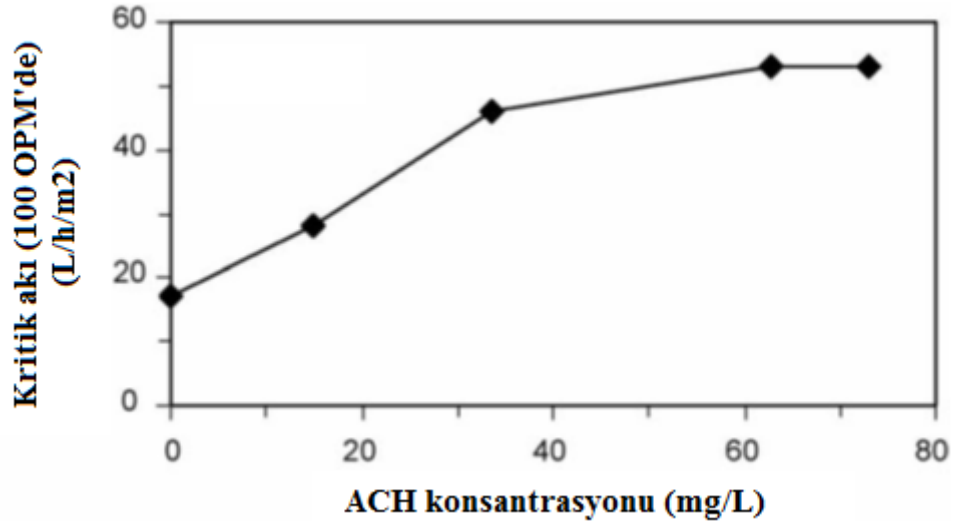


Şekil 2.29. Titreşim frekansının filtrasyon akısı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).



Şekil 2.30. Filtrasyon frekansının kek tabakası kalınlığı üzerindeki etkisi. (Gomaa ve diğ. 2011).

Genkin ve diğ. (2006), maya çözeltisi filtrasyonu boyunca 10 Hz frekansta ve 4 cm genlik ile kullanılan titreşimli batık içi boşluklu fiber membran sistemlerinde kritik akı ile ilgili önemli bir gelişmeyi ispat etmişlerdir. Ayrıca, kritik akı performanslarının koagülant etkilerine karşı hassas olduklarını bulmuşlardır. Kogülant ilavesiyle (34 mg/L alüminyum klorhidrat, ACH), kritik akının, titreşim frekansı 1.7 Hz 'de ve sabit 4 cm genlikte, 17 'den 46 L/m².h 'e artış gösterdiği bulunmuştur. ACH koagülantının eklenmesi ile özellikle etkili düşük frekanslarda (1.7 Hz) kritik akıda %170 ilerleme kaydedilmiştir. Aynı zamanda, kogülant eklenen 1.7 Hz 'de kritik akı 6.7 Hz 'de kogülant kullanılmayan kritik akı ile yaklaşık olarak aynı değerdedir. Şekil 2.31'de görüldüğü üzere ACH'nin kritik akıya katkısı son derece hassastır, 1,7Hz'de kritik akıyı %170 artırırken, 10Hz'de sadece %8 artırmaktadır.

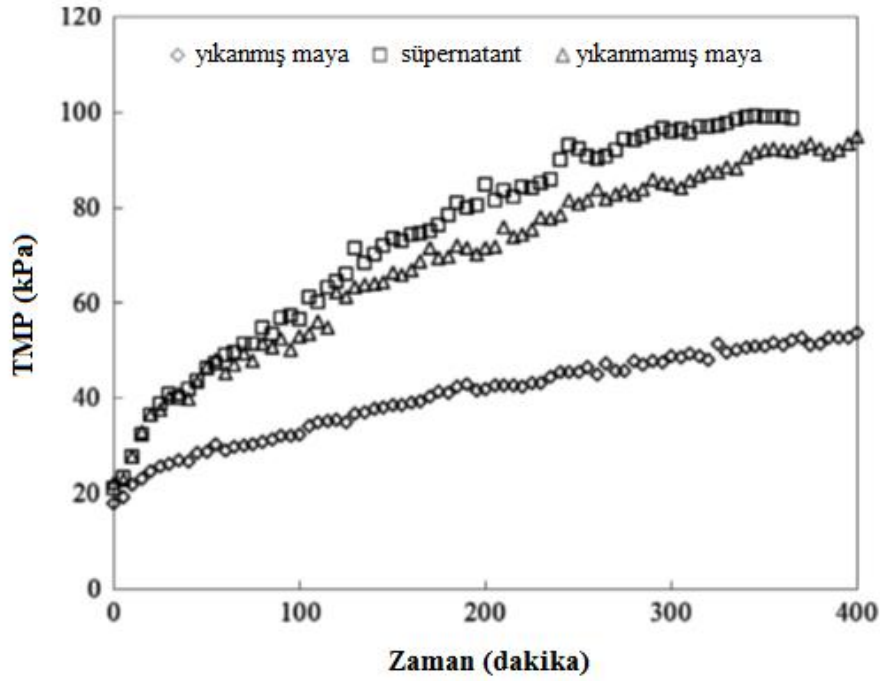


Şekil 2.31. 1.7Hz(opm) frekansta koagülant konsantrasyonunun kritik akıya etkisi (Genkin ve diğ. 2006).

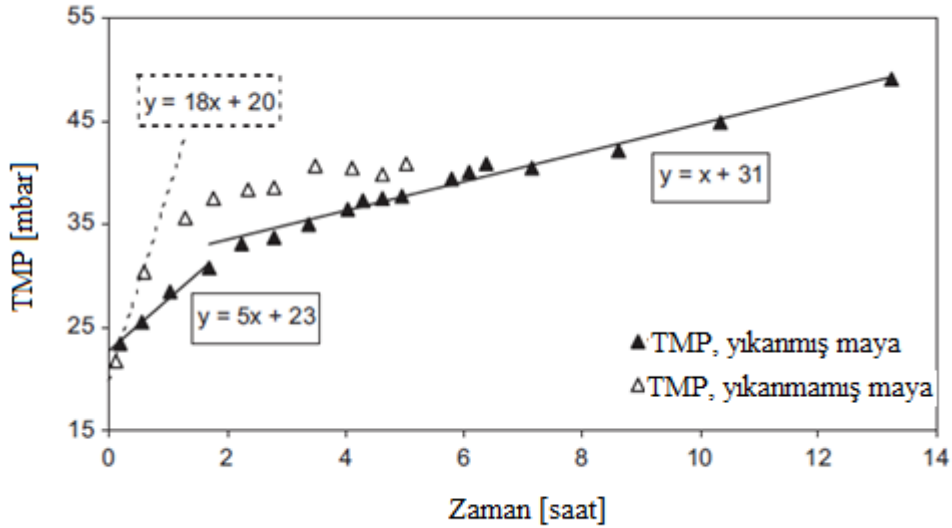
Beier ve diğ. (2008) göstermiştir ki bu başlıkta daha önce de bahsedildiği gibi 0,2'den 1,175mm'ye kadar mesafede yerleştirmelerde dönen krankla 5 ile 30Hz arasında frekans uygulanan dikey titreşimli membran modülünün kritik akı değerlerinde büyük gelişmeler vardır. Kritik akı sonuçları Genkin ve diğ. (2006) ile karşılaştırmaya uygundur. Ayrıca kritik akının ortalama membran kayma gerilimi ile arttığı anlaşılmıştır. Gomaa ve diğ. (2010) daha güncel olan araştırmalarında hollow fiber yerine levha membran kullanan titreşim sistemlerinin maya filtrasyonunda tıkanma konusunda umut veren sonuçları vardır (25Hz'e kadar olan frekanslar ve 30mm'ye kadar genlik değerlerinde).

Son yıllarda yıkanmış maya süspansiyonunun titreşimli sistemlerde kritik akı değerleri üzerine çalışılmıştır. Beier & Johnsson ile Tian Li ve diğ. maya hücre süspansiyonlarından EPS yıkaması konusunda benzer prosedürler kullanmışlardır ve benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Yıkanmamış maya milli-Q suyu ile santrifüjlenmiştir ve sonrasında (Süpernatant) üst faz çıkartılmıştır.

Li ve diğ. (2013) 25 LMH sabit akı ve enine titreşim ile membrane filtrasyonu testi gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler 4g/L yıkanmış maya, 4g/L yıkanmamış maya ve 1g/L supernatant ile 400 dk süre ile gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde 18 cm uzunluğunda 5 mm aralıklı 5x5 lik membrane modülü kullanılmıştır. TMP değerleri şekil 555'te karşılaştırılmıştır. 2Hz gibi ufak bir frekans ve 16mm genlikteki titreşimle 400 dakikalık sürede 35.7kPa değerini veren yıkanmış maya süspansiyona oranla yıkanmamış maya süspansiyonu 72.7kPa değerini vermiştir. Kontrast olarak bakıldığında yüzeydeki üst faz su buhar basıncında 1g/l gibi düşük konsantrasyon değerlerinde bile 77.9 kPa gibi büyük değerleri almıştır. TMP'nin farkı yüzeydeki üst fazdan gelen hücre artıkları ve makromoleküllerin varlığı membrane tıkanmasında dominant etki yapmaktadır. Hücre artıkları ve makromoleküller önemli EPS komponentleridir. EPS membran poru kapanmasına sebep olabilen ana faktör olarak kabul edilmiştir. Beier ve Jonsson (2008) benzer yıkanmış/yıkanmamış maya deneyini 0.7mm genlikte titreşim ve 25Hz frekansta 30 LMH değerinde akı ile yapmışlardır. Li'nin kullandığı ile aynı olan 4g/l maya süspansiyonu kullanılmıştır. Bu iki çalışma arasında tek fark titreşim doğrultusu ve kullanılan membranlar olmuştur. Li (2013) ile Beier & Johnsson (2008)'in kullandığı frekans ve genlikten gelen kayma oranı 320 and 880s⁻¹ olmuştur. Tian Li daha dar olan 0.1 mikron boyutunda fiber kullanırken, Beier ve Johnsson (2008) 0.5 mikron por boyutunda hollow fiber kullanmıştır. Yıkanmış ve yıkanmamış maya süspansiyonları için farklı TMP değerleri atanmıştır. Bunun sebebi farklı por boyutları kullanılmış olmasıdır. Li'nin deney sonuçları Beier'in deney sonuçlarından 10 kat daha yüksek çıkmıştır. Şekil 2.32 ve Şekil 2.33 de detaylı TMP sonuçları görülmektedir.



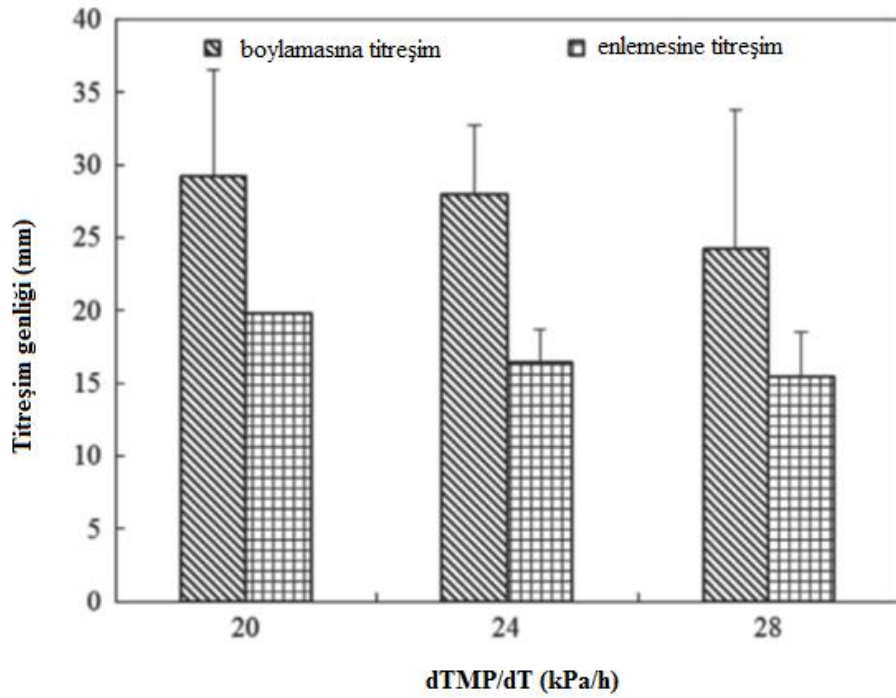
Şekil 2.32. Yıkanmamış maya, yıkanmış maya süspansiyonları ve yüzey fazı değerleri (yıkanmış ve yıkanmamış maya süspansiyonları 4g/l , yüzey fazı konsantrasyonu 1g/l . 5x5 fiber demeti, fiber uzunluğu 18cm , süzüntü akısı 25 LMH , enine titreşimli, titreşim genliği 16mm, titreşim frekansı 2Hz) (Li ve diğ. 2013).



Şekil 2.33. Yıkanmış ve yıkanmamış maya hücreleri için yarı kritik akı filtrasyonu boyunca TMP değeri (30L/m2 h) . besleme: 4g/l kuru hücre ağırlığı. Modül titreşimi 25Hz 0.7mm genlik 880s-1 ortalama kayma gerilimi yüzeyi. Lineer gerilim çizgileri tıkanma oranını gösteriyor. (Beier ve Jonsson, 2008).

Enine ve boyuna titreşimli sistemlerin maya süspansiyonu filtrasyonu karşılaştırması Li ve diğ. (2013) tarafından yapılmıştır. Enine titreşimli maya filtrasyonu karşılaştırması ayrıca Kola ve diğ. (2012) tarafından da yapılmıştır. Titreşim sistemleri arasındaki tek fark membran modüllerinin yerleştirilmesinden ileri gelmektedir. Li yatay yerleştirilmiş modül kullanırken Anusha modülü dikey yerleştirmiştir.

Titreşimsiz filtrasyon akısı 10 LMH olarak bulunmuştur. Titreşimle ise (10Hz 600 opm) 35 LMH değeri alınmıştır. 10Hz'deki kritik akı gelişimi %250 gibi büyük bir oranda olmuştur. Beier ve diğ. 0,2den 1,175mm'ye kadar uygulanan genlik ve 5ten 30Hz frekansa kadar 5g/l 'lık maya süspansiyonu filtrasyonunda 81–325% değerleri arasında akı artışları rapor etmiştir. Partikül ve makromolekül tıkaçıcıların arasındaki farkı görmek için bentonite (inorganik çözünmeyen partikül) ve alginate (model poliakarid) beslemeleride araştırılmıştır. Şekil 3.a 500mg/l'lik bentonite filtrasyonu boyunca sıvı titreşimi destekli kritik akı değerlerini göstermektedir. 4g/l 'lık maya solüsyonu için titreşimli sıvı (10Hz 2,5mm mesafe) ile kritik akı 35 LMH bulunurken enine titreşimli membrane modülünde yine aynı frekans değerinde 40 LMH değeri bulunmuştur. Bu sonuçlar iki farklı titreşim tekniğinin etkilediği kritik akı değerlerini göstermektedir. Şekil 2.34 4g/l ekmek mayasının kritik akı değerlerini gösterilmektedir.



Şekil 2.34. Enine ve boyuna titreşimli membranların tıkanma oranı (5x5 fiber demetleri, fiber uzunluğu 18cm, süzüntü akısı 25LMH , titreşim frekansı 1Hz ve yıkanmamış maya süspansiyonu 4g/l.) (Li ve diğ. 2013).

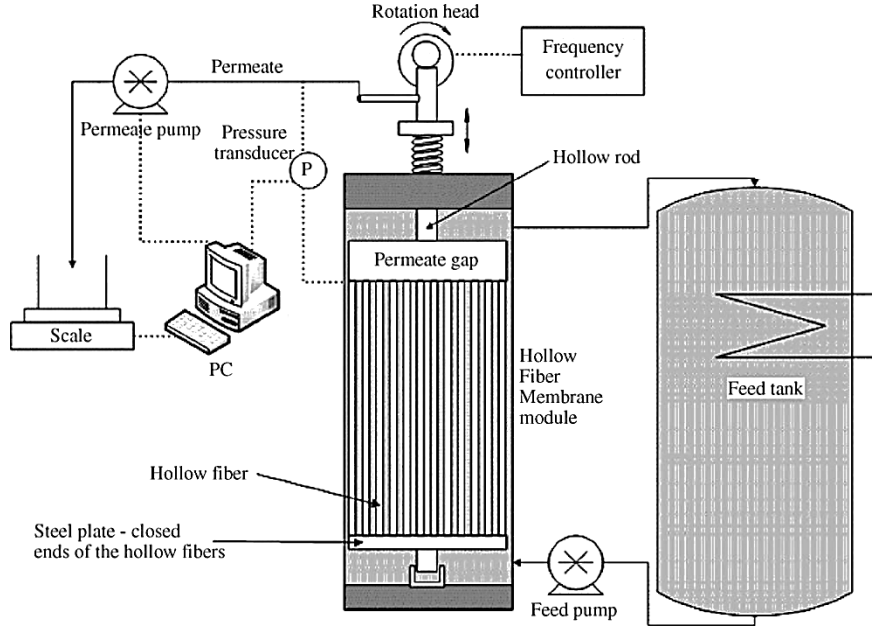
Söz konusu çalışmada deney düzeneği fiberlerin konumu haricinde tamamen özdeşdir. Böylece iki model titreşim arasında karşılaştırmaya yapmak mümkün olmuştur. İki deneyde de 25 LMH kalıcı akı değerinde 5x5 demetler halinde aynı membrane modüller kullanılmıştır. Şekil 2.34’de 1Hz gibi çok düşük bir frekans değerindeki tıkanma oranlarını göstermektedir.

Açıkça görülmektedir ki enine titreşimli model boyuna titreşimli modelden çok daha iyi verim vermektedir. Enine titreşimle fiber yüzeyinde oluşan hareket ile membran tıkanması azalmaktadır. Buna ilaveten enine titreşimle yüzeyde artan kayma gerilimi ile oluşan vorteksler vasıtasıyla ikinci bir akış kanalı oluşabilmektedir. Fakat boyuna titreşimli membranla karşılaştırıldığında yüksek titreşim ve genlikte oluşan fazla stres ve hareketten dolayı enine membranlarda kırılma riski daha fazladır. Fiberlerde oluşan hareketten ileri gelen potansiyel tehlike daha önceki çalışmalarda değinilmiştir. (Yamanoi ve diğ. 2010; Mezohegyi ve diğ., 2012) Bu yüzden uygulamadan önce hasar potansiyeli incelenmelidir.

Tez kapsamında laboratuvar ölçekli olarak kullanılan modüllerin tasarım ve dizaynına ilham kaynağı olan titreşim sistemleri mekanik ve manyetik olarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Mekanik motorlu sistem

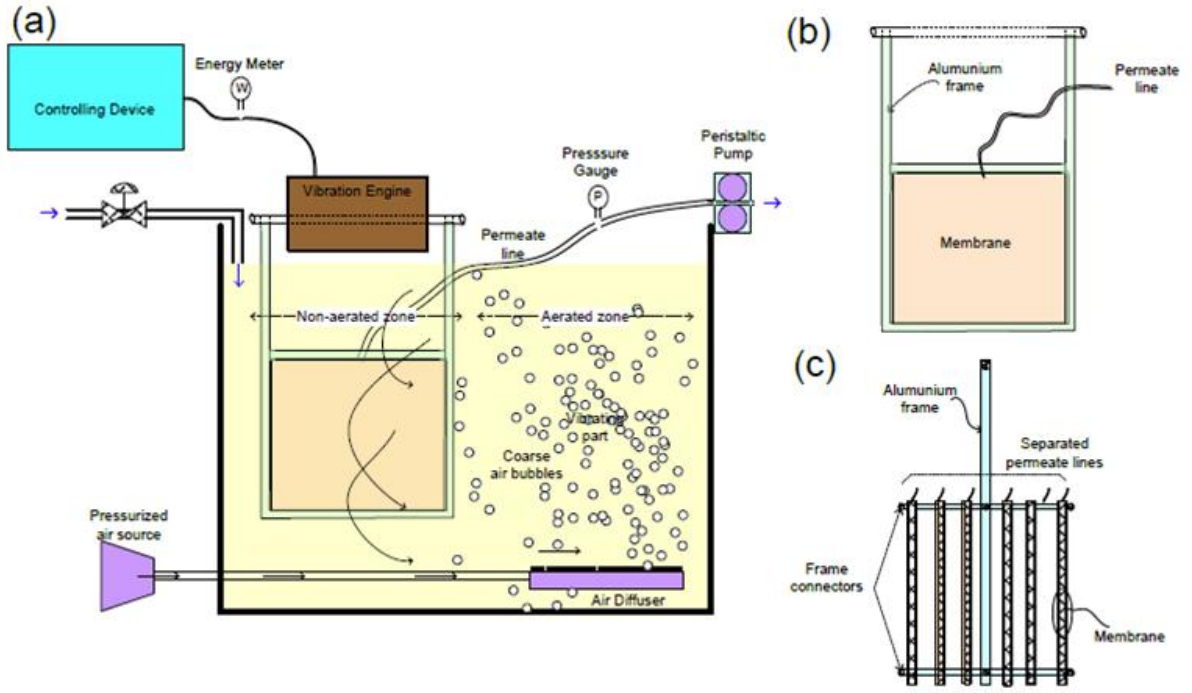
Mekanik motorlu sistem dizaynı için öncelikle bilimsel literatürde bulunan bazı titreşim sistemleri incelenmiş ve uygun tasarım yapılmıştır. Literatürde Beier (2006), Low (2005) ve Gomaa (2010) batık membran sistemlerinin dikey olarak titreştirilmesi konusunda çalışmalar yapmışlardır. Hazırladıkları sistemler genel olarak normal bir elektrik motoru ve bu motora bağlı şaft bağlantısı ve mil yardımıyla modülün tank içerisinde aşağı yukarı hareket ettirilmesi şeklindedir. Örnek olarak Şekil 2.35’ te Beier ve diğ. (2006) tarafından laboratuvar deneyi amaçlı kullanılan titreşim sistemli batık MBR düzeneği sunulmuştur.



Şekil 2.35.Deney amaçlı kullanılan bir titreşim sistemli batık MBR düzeneği şeması (Beier ve diğ., 2006).

Manyetik motorlu sistem

MBR arıtma sistemleri için geliştirilmiş manyetik motorlu sistemin dünyadaki tek ve ilk örneği Bilad ve diğ. (2011) tarafından dizayn edilmiş sistemdir .Bu araştırmacıların sisteminde manyetik motor olarak; amfi devresi ile sürülebilen ileri geri hareketli bir parça kullanıldığı açıklanmıştır. Amfi devresi ile çalıştırılan bu parça amfi devresinden gönderilen sinüs dalgası ile hareket ettirilmektedir. Sinüs dalgası ise bir bilgisayar yazılımı yardımı ile üretilmekte ve amfi devresine gönderilmektedir. Bilad ve arkadaşları tarafından dizayn edilen sistemin şeması Şekil 2.36’da verilmiştir.



Şekil 2.36.Manyetik titreşim sistemi ve MBR sistemi (a), kullanılan düz plaka membran modülü (b), çoklu membrandan oluşan modülün yandan görünümü(c).

3. MATERYAL-METOD

Bu tez kapsamında titreşimuygulamaları evsel atıksu arıtımı amaçlı kurulmuş olan membran biyoreaktörde gerçekleştirilip, membranların tıkanmasının kontrol altına alınabilmesi denenmiştir. Bu kapsamda farklı titreşim kaynaklarının kullanıldığı laboratuvar ölçekli bir MBR işletilmiş ve takibi yapılmıştır. Materyal-Metod kısmında öncelikle atıksu ve çamur karakterizasyonları ile sistem tanıtımı anlatılacak, sonrasında işletme esnasında yapılan deneyler anlatılacaktır.

3.1 Atıksu Kaynağı ve Karakterizasyonu

Laboratuvar ölçekli MBR çalışmalarında besleme çözeltisi olarak sentetik atıksu kullanılmıştır. Sentetik atıksu kompozisyonu Agtas ve diğ.'nin (2015) çalışmasından yararlanılarak belirlenmiştir. Besleme çözeltisi konsantre olarak hazırlanmış ve musluk suyu ile seyreltilerek sisteme sürekli olarak beslenmiştir. Kullanılan sentetik atıksu kompozisyonu Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Sentetik atıksu kompozisyonu (Agtas ve diğ., 2016)

Kimyasallar	Konsantrasyon (mg/L)
Glikoz	715
Üre	85
KH_2PO_4	70
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	70
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	70
Na_2CO_3	145
NaCl	70
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	15

Çizelge 3.1'e göre hazırlanan sentetik atıksuyun karakterizasyonu Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Sentetik atıksu karakterizasyonu

Parametre	Birim	Değer
KOİ	mg/L	540 ± 44
Çözünmüş KOİ	mg/L	450 ± 45
Toplam Katı Madde (TKM)	mg/L	975 ± 110
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	250 ± 35
Toplam Azot (TN)	mg/L	82 ± 7.5
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	mg/L	55 ± 6
NH ₄	mg/L	26.8 ± 1.2
NO ₂	mg/L	0.13 ± 0.04
NO ₃	mg/L	0.10 ± 0.05
Toplam Fosfor (TP)	mg/L	11.9 ± 0.8
pH	-	7.5 ± 0.1
Bulanıklık	NTU	115 ± 10

3.2 Çamur Karakterizasyonu

Laboratuvar ölçekli MBR sisteminde kullanılan aşı çamuru İSKİ Paşaköy Biyolojik Arıtma Tesisi aktif çamur ünitesinin geri devir hattından alınmıştır. Aşı çamurunun karakterizasyonu Çizelge 3.3’te verilmektedir.

Çizelge 3.3 : Aşı çamuru karakterizasyonu

Parametre	Birim	Değer (Ortalama ± Std.Sapma)
KOİ	mg/L	11490 ± 64
TKM	mg/L	27000 ± 1585
Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM)	mg/L	15920 ± 839
TUKM/TKM	-	0.59 ± 0.1
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	13585 ± 378
Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM)	mg/L	8490 ± 311
UAKM/AKM	-	0.62 ± 0.1
pH	-	6.5 ± 0.7

3.3 Sistem Tanıtımı

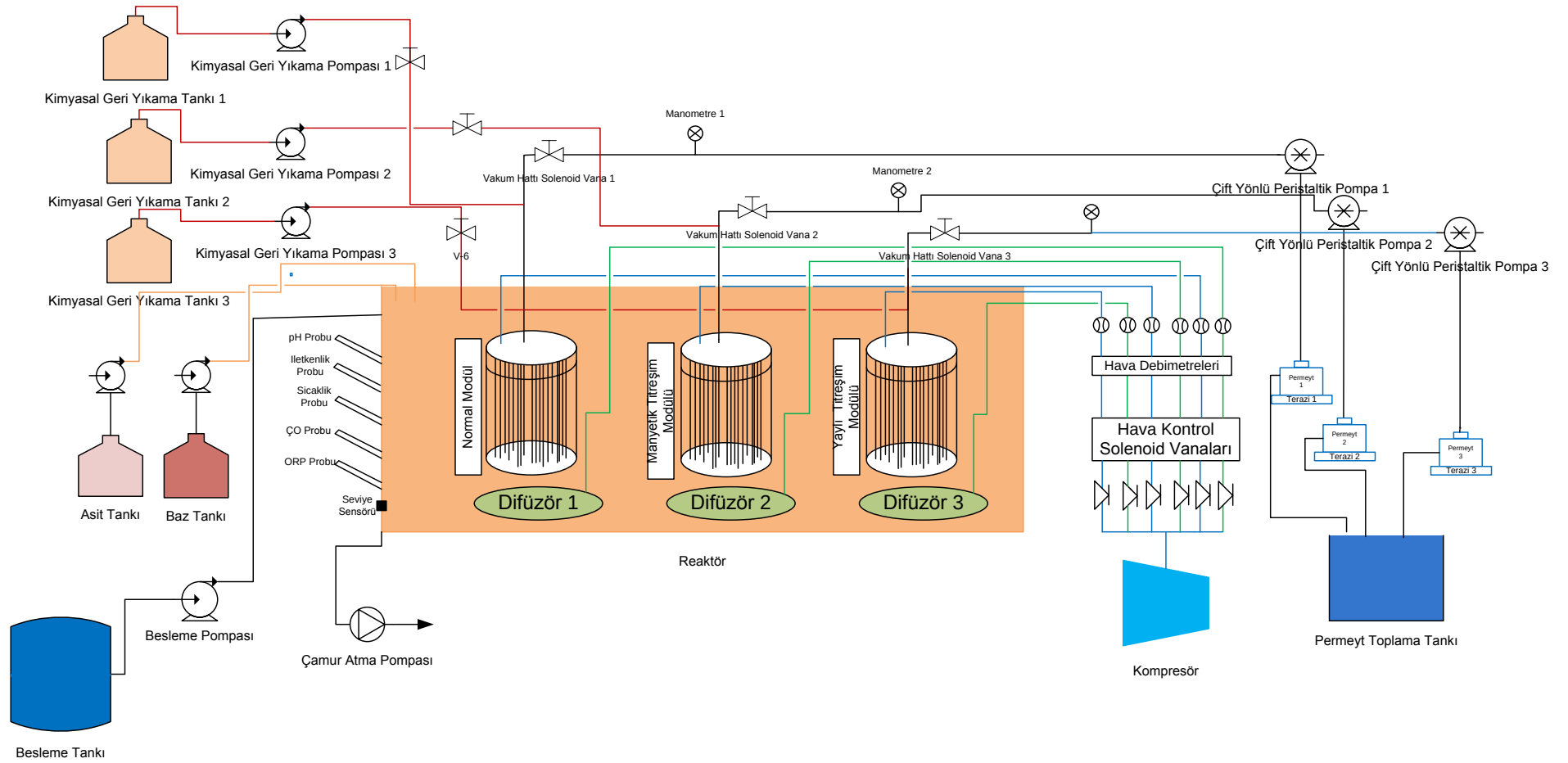
Tez kapsamında laboratuvar ölçekli sistemde kullanılan MBR prosesi tam otomasyon, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ve on-line kontrol sistemi ile kontrol edilmektedir. MBR sistemi, aynı anda üç farklı modül tipini test etmeye imkan verecek şekilde tasarlanmıştır. Proje kapsamında kullanılacak modüller aşağıda sıralanmaktadır:

- Titreşimsiz boşluklu fiber (hollow fiber) membran modülü (kontrol amaçlı)
- Manyetik alan kullanılarak titreşim uygulanan boşluklu fiber (hollow fiber) membran modülü
- Mekanik titreşim uygulanan boşluklu fiber (hollow fiber) membran modülü

Bu modüllerde, Philos marka 0.04 µm gözenek çaplı ultrafiltrasyon membranı kullanılmıştır. Üç farklı tipteki membran modülü aynı reaktör içerisine yerleştirilmiştir. MBR sisteminin görünümü Şekil 3.1 ve 3.2’de verilmiştir. MBR sisteminin teknik özellikleri ise Çizelge 3.4’te özetlenmektedir.

Çizelge 3.4 : MBR sisteminin teknik özellikleri

Birim	Değer
Besleme tankı kapasitesi	300 L
Peristaltik pompa debisi	1-250 mL/dk
Reaktör boyutları	Genişlik: 30 cm, Uzunluk: 90 cm, Derinlik: 60 cm
pH, ORP, O ₂ problemleri	316 paslanmaz



Şekil 3.1 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin akım şeması



Şekil 3.2 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin genel görünümü.

Çözünmüş oksijen probu, reaktör içerisindeki oksijen seviyesini anlık olarak ölçebilmektedir (Şekil 3.3). MBR içerisinde istenen oksijen konsantrasyonu SCADA sistemine girilmektedir. Oksijen konsantrasyonu istenen değerin altına düştüğünde, reaktör içerisinde bulunan difüzörler devreye girerek reaktörü havalandırmakta ve oksijen istenilen konsantrasyona geldiğinde havalandırıcılar otomatik olarak durmaktadır.



Şekil 3.3 : Çözünmüş oksijen probunun görünümü.

MBR'nin altını tamamen kaplayan difüzörlere verilen hava basıncı hava hattına bağlı olan vanalarla ayarlanmaktadır. Havalandırma vanalarının görünümü Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4 : Havalandırma vanalarının görünümü.

pH probu, MBR içerisindeki anlık pH değerlerini ölçmektedir (Şekil 3.5). Reaktör içerisinde olması istenen pH aralığı, probun bağlı olduğu SCADA vasıtasıyla ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.5 : pH probunun görünümü.

MBR sistemindeki ORP probunun görünümü Şekil 3.6' da verilmektedir. ORP probu ile sistemdeki oksidasyon ve redüksiyon gücünün ölçüsü olan ORP online olarak izlenebilmektedir.



Şekil 3.6 : ORP probunun görünümü.

MBR sisteminde bulunan sıcaklık probu ile reaktör içerisindeki sıcaklık değeri ölçülebilmektedir. Sıcaklık probunun görünümü Şekil 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.7 : Sıcaklık probunun görünümü.

MBR’de basıncın ölçülerek istenilen değerde sabitlenmesini sağlamak amacıyla Keller marka (23E model) dıştan diyaframlı basınç ölçer kullanılmıştır . Basınç transmitteri 0.2-1000 bar aralığındaki basınca dayanıklı olup, 0-100 bar aralığında ölçüm yapabilmektedir. Ölçülen

veriler, 4-20 mA aralığında online olarak SCADA yazılımına aktarılabilir. Basınç ölçerlerin görünümü Şekil 3.8’de verilmektedir.



Şekil 3.8 : Basınç ölçerlerin görünümü.

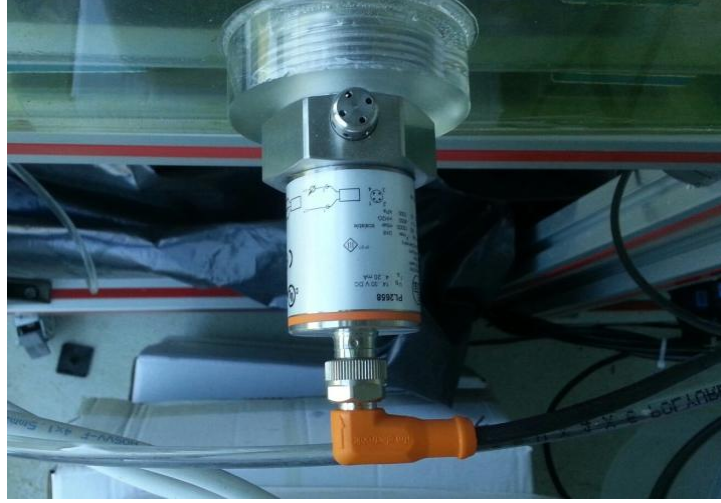
MBR sisteminde iletkenlik değerinin online ölçümünün yapılabilmesi için bir adet iletkenlik probu bulunmaktadır. İletkenlik probunun görünümü Şekil 3.9’da verilmektedir.



Şekil 3.9 : İletkenlik probunun görünümü.

Sistemdeki seviyenin ölçümü, seviye sensörleri kullanılarak sağlanmıştır. Bu sensörler yardımı ile reaktördeki seviye anlık olarak ölçülebilmektedir. Çamur seviyesi istenilen seviyeyi geçtiğinde, seviye sensörü otomatik olarak bu durumu algılayarak taşma sinyalini

devreye sokmakta ve sisteme besleme yapılmasını durdurmaktadır. Seviye sensörünün görünümü Şekil 3.10’da verilmektedir.



Şekil 3.10 : Seviye sensörünün görünümü.

MBR sisteminde elde edilen süzüntü hassas terazi üzerinde bulunan kaplarda toplanmaktadır. Bu terazi yardımı ile süzüntü miktarı kayıt altında tutulmaktadır. Toplanan süzüntü miktarı birim zaman ile orantılanarak debi değeri elde edilmektedir.

Membrandan çekilen süzüntü miktarının ayarlanması debimetrelerle yapılabildiği gibi, vakum pompalarının kapasiteleri ile de ayarlanabilmektedir. Bu yöntemde, SCADA sisteminde vakum pompasının istenilen kapasitede çalışması sağlanarak debi ayarlanabilmektedir. MBR sisteminde, her membran modülü için bir adet olmak üzere toplamda üç adet vakum pompası bulunmaktadır. Süzüntülerin toplandığı teraziler ve vakum pompalarının görünümü sırasıyla Şekil 3.11 ve 3.12’de verilmektedir.



Şekil 3.11 : Terazilerin görünümü.

Vakum pompaları membrandan süzüntüyü çekmenin yanı sıra, belirli aralıklarla (10 dakikada 1 sefer: 9,5 dk süzme, 0,5 dk geri yıkama) süzüntü suyunu kullanarak membranlara geri yıkamanın yapılmasında da kullanılmaktadır. SCADA sistemine girilen belirli sürede, vakum pompası normal çalışma yönünün tersine çalışarak vakum yerine yıkama işlemini gerçekleştirmektedir. Böylece tıkanmaların bir kısmı önlenmekte ve membranın süzme verimi istenilen seviyelerde kalmaktadır. Besleme ve vakum pompaları peristaltik olup, 1-250 mL/dk debi değerini sağlayacak kapasitededir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 : Vakum pompalarının görünümü.

Laboratuvar ölçekli sistemde, vakum pompalarıyla aynı özellikte olan bir adet besleme pompası bulunmaktadır. Şekil 3.13’te besleme pompası görülmektedir.

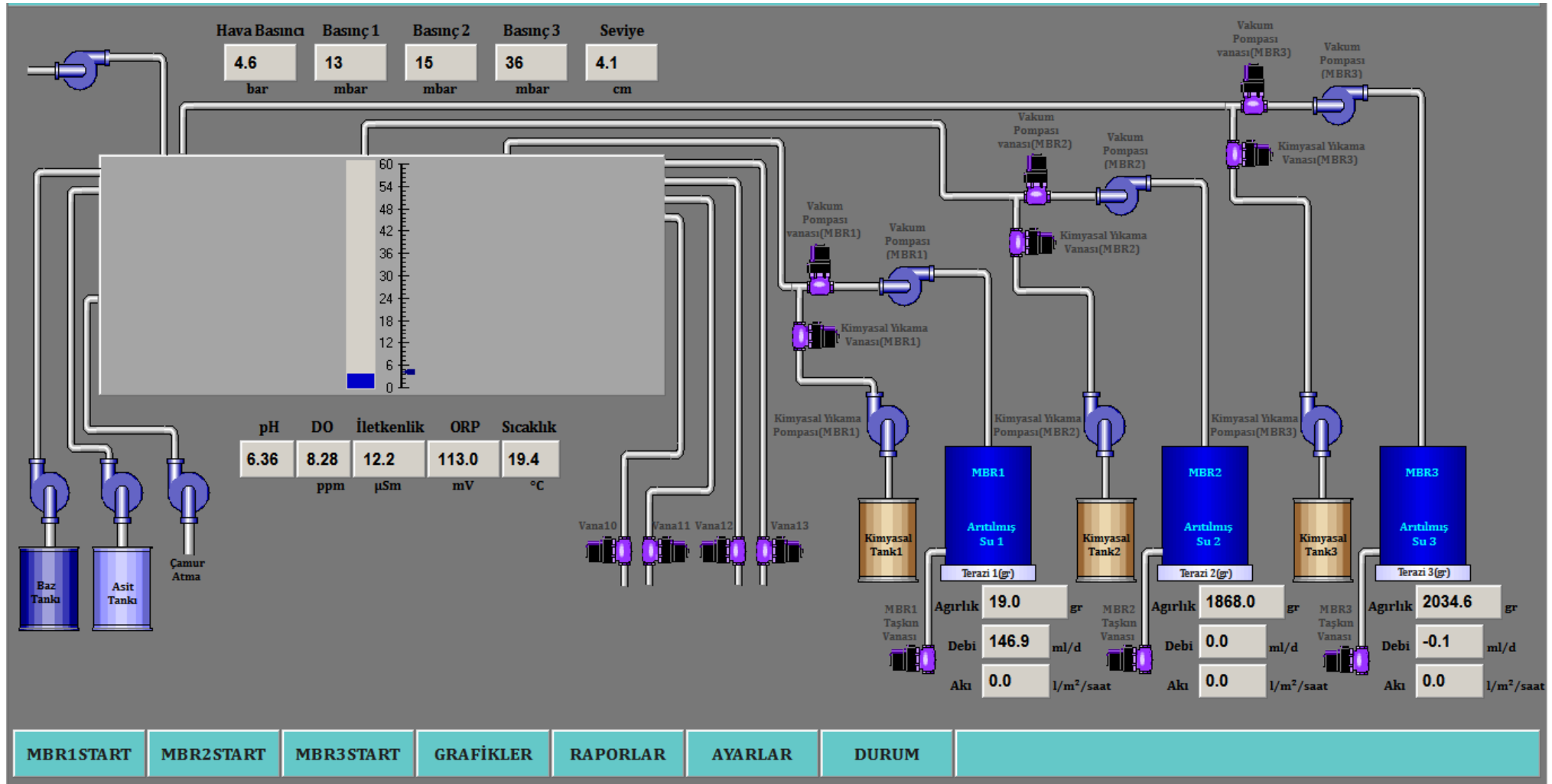


Şekil 3.13 : Besleme pompasının görünümü.

MBR’de istenilen çamur seviyesi değeri SCADA sistemine girilerek reaktörde seviye kontrolü yapılabilmektedir. Reaktörden membran yardımı ile süzüntü suyu çekildikçe, seviye girilen değerin altına düşmekte ve sistem otomatik olarak besleme pompalarını çalıştırmaktadır. Besleme pompaları seviye tekrar istenilen değere gelene kadar çalışmasını sürdürmekte ve istenen yükseklik sağlandığında besleme pompaları otomatik olarak durmaktadır.

Proje kapsamında kullanılan laboratuvar ölçekli MBR sistemi SCADA sistemine bağlıdır ve tüm kontroller bu SCADA sistemi ile yapılabilmektedir. MBR sisteminde, filtrasyon ve geri yıkama olmak üzere iki farklı proses bulunmaktadır. SCADA’nın ana ekranı Şekil 3.14’te görülmektedir.

SCADA ekranında tüm sistem şeması ekranda görülebilmekte ve üniteler ile ilgili işletme parametreleri gerektiğinde bu ekrandan değiştirilebilmektedir. Geri yıkama, kimyasal dozlama, vanaların açılıp kapanması ve basıncın ayarlanması gibi bütün işlemler SCADA kontrol sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.14 : MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü.

3.4 Membran Modüllerinin Tanıtımı

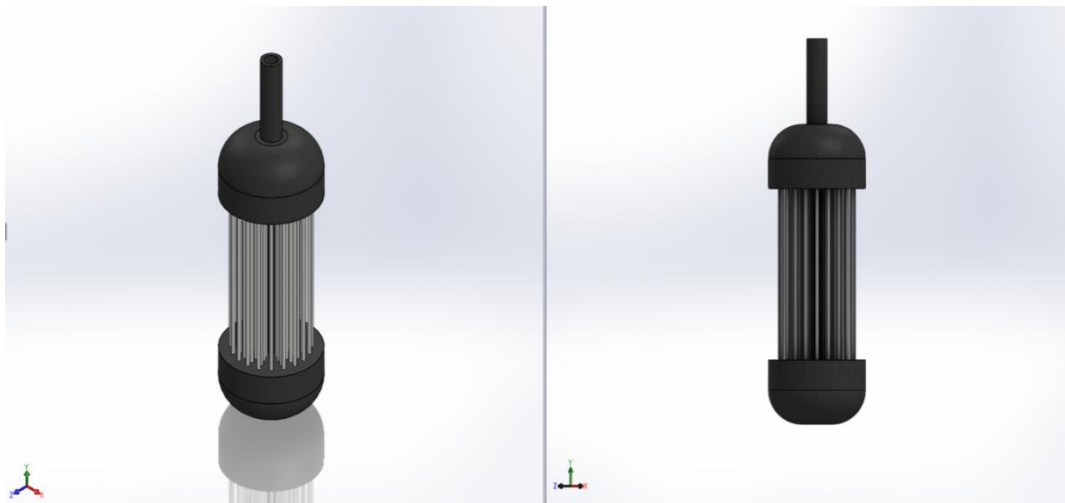
3.4.1 Membran modüllerin fiziksel özellikleri ve dizaynı

Öcelikle membran modüllerinin Solidworks Profesyonel 2013x64 sürümü ile 3 boyutlu (3B) tasarımları yapılmıştır. Modüllere ait özellikler Çizelge 3.5’te verilmektedir.

Çizelge 3.5 : Modül özellikleri

Parametre	Özellikler
Membran çapı (mm)	2
Membran yüzey alanı (m ²)	0,0006
Toplam hollow fiber membran sayısı	80
Toplam membran alanı (m ²)	0,048
Modül uzunluğu (cm)	17,5
Modül çapı (cm)	5,8
Geri yıkama durumu	var
İçeriden hava sıyırma durumu	Var

Modüllerin üst tarafından içeriye doğru havalandırma borusu bulunmakta olup, fiberlerin merkezine hava sıyırma amaçlı olarak yerleştirilmiştir. Vakumla süzüntü toplanması ile ilgili bağlantı, modülün üst tarafından yapılmıştır. Modülün üç boyutlu olarak farklı açılardan görünümü Şekil 3.15’te verilmektedir.



Şekil 3.15 : Modülün üç boyutlu görünümleri.

3.4.2 Membran modüllerin hazırlanması

Boşluklu fiber (hollow fiber) membranlar iki baştan plastik parçalara epoksi yapıştırıcı ile dikilmiş olup, alt taraf tamamen kapatılmış, üst taraf ise süzuntu alınacağından dolayı açık bırakılmıştır.

Membranların modül içerisine yerleştirilmeden önce ön hazırlık aşaması yapılmaktadır. Bu aşamada membranlar dizilerek düzgün bir yuvarlak şekil elde edilmesi amaçlanmaktadır. Membran dizilimi sonrası membranların genel görünümü Şekil 3.16’da verilmektedir.



Şekil 3.16 : Boşluklu fiber (hollow fiber) membranların dizilimleri.

Membranlar uç noktalarından bir destek parçası (delikli disk) üzerine teker teker dizilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra iki disk arasında 10 cm kalacak şekilde ayarlama yapılmıştır. Membranlar uçlarından çekilerek gerdirilmiş ve modül üst ve alt parçalarına yerleştirilmek üzere fazlalıklar kırpılmıştır. Uç noktaları bantlanarak modül gövdesi içerisine membranlar yerleştirilmiştir. Yapıştırma işlemi esnasında karşılaşılan en büyük problem; yapıştırıcının membran içerisine girmesi ve iç boşluğu (hollow) doldurmasıdır. Bu durumun önüne geçilmesi için bu modüllerin üretiminde farklı bir teknik ile vakumun uygulanacağı üst kısımda poliüretan yapıştırıcı ile iki disk arasına yapılan enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Böylece membran süzuntu uçları poliüretan yapıştırıcı ile dış ortamdan ayrılmıştır.

Modüllerin alt kısımlarında ise süzöntü toplanması söz konusu olmadığından, bu taraf epoksi yapıştırıcı ile sızdırmaz bir şekilde körülenmiştir. Yapıştırıcı alt kısma döküldükten sonra 1 gün süreyle kuruması beklenmiştir.

Yapıştırma işlemlerinden tamamlanmış, vakum hattı ve havalandırma hattının bağlantıları yapılmış bir modülün görünümü Şekil 3.17’de verilmektedir.



Şekil 3.17 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır laboratuvar ölçekli MBR modülü.

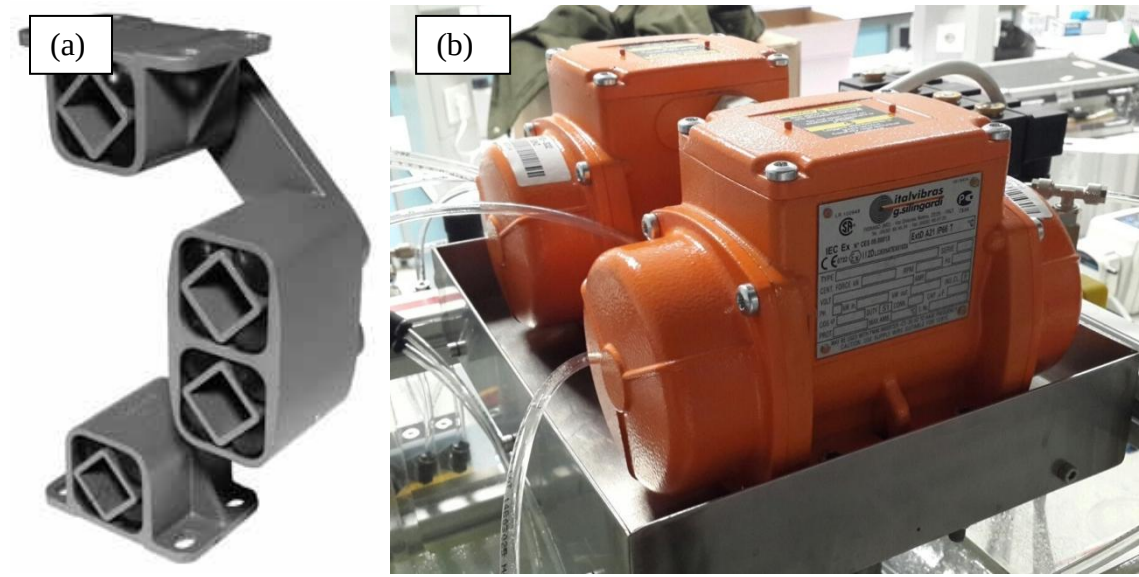
Modüllerin üretiminde, bilgisayarda yapılan tasarım ile birebir uyumlu olmasına özen gösterilmiştir. Buna rağmen, gerçekte üretilmiş modüller ile bilgisayar tasarımı arasında %1-2 civarında bir farklılık gözlenmiş olup, bu farklılık kabul edilebilir bir seviyede kalmıştır.

3.5 Titreşim Sistemleri

Tez kapsamında MBR içerisindeki modüllere titreşim uygulanması amacıyla, mekanik motorlu ve manyetik motorlu sistemler olarak iki farklı sistem dizayn edilmiştir.

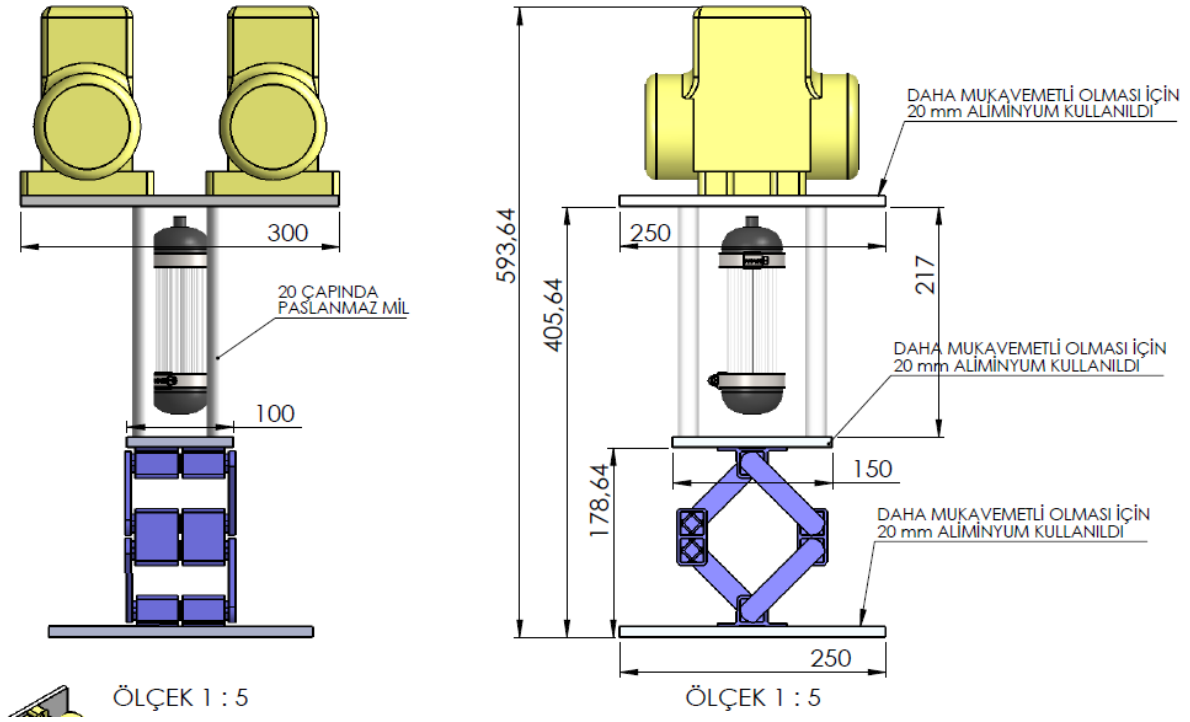
3.5.1 Mekanik motorlu sistem

Tez kapsamında kullanılmak üzere tasarlanıp üretilen mekanik motolu titreşim sistemi, salınım yayları üzerine oturtulmuştur. Mekanik titreşim oluşturmakla görevli motor ise endüstrilerde titreşim oluşturma amaçlı kullanılan vibrasyon motoru olarak seçilmiştir. Sistemde iki adet vibrasyon motoru (Italvibras MVSİ 3/100-S02) ve 4 adet titreşim salınım yayı (Rosta AB15 marka) kullanılmıştır. Sistemde aşağı-yukarı yönde titreşim hareketinin sağlanabilmesi amacıyla iki adet motordan biri ters yönde çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.18’de sistemde kullanılan yay ve motorun görünümeleri verilmektedir.



Şekil 3.18 : Özel salınım yayı (a) ve iki kutuplu titreşim motoru (b).

Mekanik titreşim sistemi alüminyum ve çelik parçalar birlikte kullanılarak oluşturulmuştur. Dört adet mil arasına üç boyutlu tasarım yardımıyla modül yerleştirilmiş, modül üst ve alt tarafına alüminyum tablalar koyulmuştur. Üst tabla motorlar için, alt tabla ise salınım yayları için kullanılmıştır. Sistemin teknik detayları Şekil 3.19’da gösterilmektedir.



Şekil 3.19 : Mekanik titreşim sisteminin teknik detayları.

Mekanik titreşim sisteminde kullanılan vibrasyon motorunun teknik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.6’da verilmektedir.

Çizelge 3.6 : Mekanik titreşim sisteminde kullanılan vibrasyon motorunun teknik özellikleri

Parametre	Değer
Kutup sayısı	2
Mekanik koruma standardı	IP66
Ağırlık (kg)	5,60
Sıcaklık dayanım sınıfı (° C)	120
Maksimum güç (W)	180
Santrifüj kuvveti (kg)	121
Faz sayısı	3

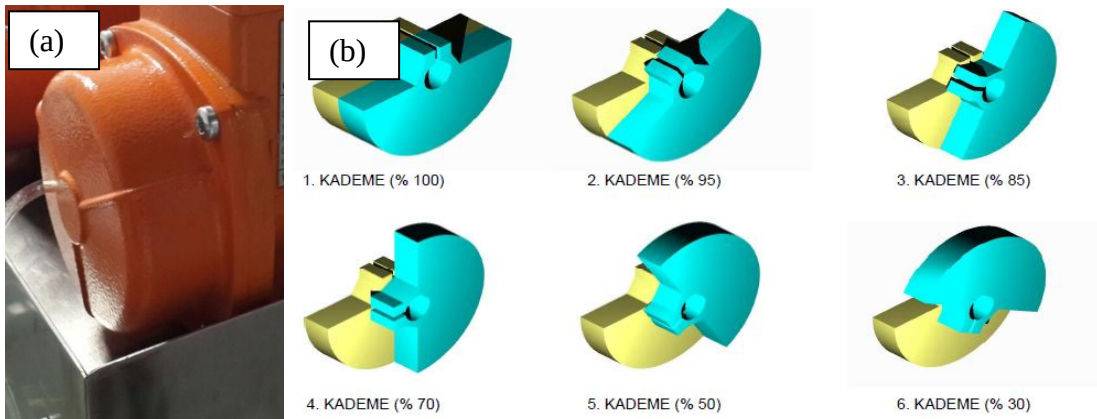
Mekanik titreşim sisteminde farklı frekans ve genlik değerleri uygulanabilmektedir.; Frekans değerleri 5-50 Hz, genlik ise 0.1-8 mm aralığında değiştirilebilmektedir. Motorlar zaman rölesine bağlı olup istenilen bir zaman programında çalıştırılabilmektedir. Vibrasyon

motorlarının sürülmesi ve kontrolünü sağlayan panoya ait görüntü Şekil 3.20’de verilmektedir.



Şekil 3.20 : Mekanik titreşim sisteminin elektrik panosu.

Sistemde genlik ayarı motorlarda bulunan kutuplar sayesinde yapılabilmektedir. Bunun için motorların kutuplarında bulunan ağırlıkların birbirlerine göre olan konumları manuel olarak değiştirilebilmektedir. Şekil 3.21’de motor kutbu ve genlik ayarı için gerekli şematik bilgi verilmektedir.



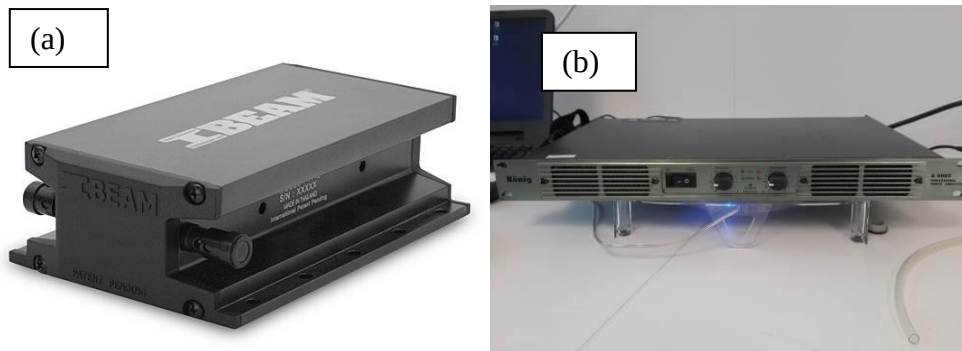
Şekil 3.21 : Motor kutbu (a) ve kutup içerisindeki ağırlıkların birbirlerine göre farklı konumları (b).

3.5.2 Manyetik motorlu sistem

Tez kapsamında kullanılan manyetik titreşim sistemi, Bilad ve diğ. (2012) tarafından kullanılan sistemin benzeridir. Frekans aralığı mekanik motorlu sisteme göre daha fazla olup, 20–150 Hz arasında değiştirilebilmektedir. Genlik ise, sistemde kullanılan titreştirici manyetik motorun teknik yapısından dolayı ayarlanamamakta ve frekans değişimine göre genlikte ufak farklılıklar oluşmaktadır. Bu nedenle literatürde bulunan sistemde frekans ve genlik ile akı karşılaştırılması yerine, manyetik motorun çektiği elektriksel güç ile akı değişiminin karşılaştırılması yapılmıştır.

Manyetik motor olarak sistemde I-BEAM VT200 titreştirici kullanılmış olup, bu manyetik titreştirici motor, 100 Watt gücünde bir amplifikatör ile sürülmüştür. Oluşturulmak istenen frekans ise NCH Tone Generator isimli bilgisayar yazılımı tarafından üretilen sinüs dalgası ile oluşturulmaktadır. Manyetik motorların titreşim prensibi aşağı-yukarı şeklindedir.

Sistemde iki adet manyetik titreştirici motor kullanılmış olup, bunlar tek bir amfi devresi ile sürülmektedir. Manyetik titreştirici motor ve titreştiriciyi süren amfi devresinin görüntüleri Şekil. 3.22’de verilmektedir. Manyetik titreşim sistemi alüminyum tablalar ve çelik miller ile oluşturulmuştur. Tasarım aşamasında öncelikle üç boyutlu olarak bilgisayar ortamında boyutlandırma yapılmıştır. Osilasyon sistemi olarak alt alüminyum tablaya vidalanmış dört adet Rosta AB15 yayları kullanılmıştır. Sistemin teknik detayları Şekil 3.23’te verilmektedir. Üç boyutlu tasarımda iki adet osilasyon yayı yerleştirilmiş olup, yapım esnasında denge problemi yaşanması sebebiyle yay sayısı dörde çıkarılmıştır. Yine üç boyutlu tasarımda bir adet olarak düşünülmüş manyetik titreştirici motor uygulamada ikiye çıkarılmıştır.



Şekil 3.22 : Manyetik titreştirici motor (a) ve sürücü devresi (b).

ORP, sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen ve iletkenlik değerleri de bu tez kapsamında verilecektir.

3.6.1 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)

Besleme atıksuyunda, reaktörün içerisinde ve çıkış arıtılmış süzöntü sularında periyodik olarak KOİ ölçümü yapılmıştır. Ölçüm standart metotlara göre gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan kimyasallar :

Standart potasyum dikromat çözeltisi : 33.3 g civa sülfat ($HgSO_4$) 500 ml distile suda çözülerek üzerine 167 ml derişik sülfürik asit ilave edilir. Soğuduktan sonra, önceden 2 saat süreyle 103 °C de kurutulmuş olan 4.903 g potasyum dikromat bu çözeltiliye eklenir ve distile suyla litreye tamamlanır.

Gümüşlü sülfürik asit reaktifi : 5.5 gümüş sülfat (Ag_2SO_4) üzerine 1 kg sülfürik asit ilave edilir ve gümüş sülfatın asit içerisinde tamamen çözünmesi için 1-2 gün beklenir.

Feroin indikatör çözeltisi : 0.695 g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ suda çözülür 1,485 g 1,10 fenantrolin monohidrat ilave edilerek çözünene dek karıştırılır, distile suyla 100 ml'ye tamamlanır.

Standart demir amonyum sülfat çözeltisi (DAS) (0.025 N): 98 g $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ distile suda çözülür. Üzerine çalkalayarak azar azar 20 ml derişik sülfürik asit eklenir, soğutulur ve distile su ile 1000 ml'ye tamamlanır. Bu çözelti, kullanıldığı her gün, standart dikromat çözeltisine karşı ayarlanmalı ve normalitesi bulunmalıdır. Standardizasyon işlemi aşağıdaki şekilde yapılır :

Standardizasyon: 10 ml standart $K_2Cr_2O_7$ çözeltisi 4 mol/L sülfürik asit çözeltisi ile 100 ml ye seyreltilir ve DAS ile titre edilir. Bu titrasyon sonucunda standart DAS'ın normalitesi aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$\text{Standart DAS'ın normalitesi} = (V_1 \times N_1) / V_2 = (10 \times 0.24) / V_2$$

V_1 = Dikromat hacmi (ml)

V_2 = DAS sarfiyatı (ml)

N_1 = Standart potasyum dikromat çözeltisinin normalitesi (0.24 N)

Kullanılan araç-gereçler

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| – 50 ml'lik cam KOİ tüpü | – Otomatik pipet |
| – KOİ tüpleri için kapak | – Tablalı elektrikli ısıtıcı |

Deneyin yapılışı

KOI deneyi için numuneler reaktör içinden, süzüntü sularından ve besleme çözeltisinden alınmıştır. Alınan numuneler iyice karıştırılır daha sonra numunenin 2,5 mL'si bir pipet yardımı ile 50 ml'lik KOİ tüpüne aktarılır. Ölçüm yapmak istenilen deney tüplerinden her numune için en az iki adet (1 asil grup + 1/2 kontrol grubu) ve şahit numunesi olarak da aynı şartlarda sadece saf su kullanılarak hazırlanmış numune grupları hazırlanmalıdır. Tüplerdeki numunelerin üzerine sırasıyla 1.5 ml standart dikromat çözeltisi ve 3.5 ml gümüşlü sülfürik asit reaktifi konur ve kapakları kapatılır. Hazırlanan tüpler tablalı elektrikli ısıtıcıya yerleştirilerek 150°C'de 120 dakika kaynama işlemi gerçekleştirilir. Kaynama işlemi bittikten sonra oda sıcaklığında soğuması beklenen tüpler erlenlere alınır ve üzerine Ferroin indikatör çözeltisi damlatılarak, Standart demir amonyum sülfat çözeltisi (DAS) ile titre edilir. Titrasyonda sarfedilen DAS miktarıyla gerekli hesaplamalar yapılarak KOİ değeri belirlenmiş olur.

Hesaplama

$$KOİ = ((a-b) \times N \times 8 \times 1000) / (V \text{ örnek})$$

a: Şahidin demir amonyum sülfat (DAS) sarfıyatı (ml)

B: Numunenin demir amonyum sülfat (DAS) sarfıyatı (ml)

N: Demir amonyum sülfat (DAS) çözeltisinin normalitesi

3.6.2 Askıda katı madde-uçucu askıda katı madde (AKM-UAKM)

Reaktörlerdeki AKM ve UAKM değerleri belirli aralıklarla izlenmiştir. Bu amaçla gravimetrik ölçüm yöntemi kullanılmıştır.

Kullanılan araç ve gereçler

- | | |
|---|---|
| – Etüv (2 °C duyarlılığında termostatlı), | – Süzme seti |
| – Desikatör | – Analitik terazi (0.1 mg duyarlılığında) |
| – Alüminyum kap | – Cam elyaf filtreler |
| – Pens | |

Deneyin yapılışı

Filtre süzme setine yerleştirilir. Bir yandan vakum uygulanarak filtre birkaç kez distile suyla yıkanır. Filtrede hiç su kalmayınca kadar vakum uygulanması sürdürülür ve yıkama suları dökülür. Bu filtre, etüvde 103-105°C’de bir saat kurutulur ve havadaki nemden etkilenmemesi ve tam kuruması için desikatörde tutulur. Sabit tartıma gelmiş olan filtre, dikkatli bir şekilde desikatörden alınarak tartılır.

Tahmini AKM değerine göre iyice karıştırılmış örnekten, mezür ile 50 ml ya da daha çok numune alınır ve vakum uygulanarak filtreden süzülür. Mezürün kenarlarında, bulaşmış kalıntı kalmamasına dikkat edilir. Mezürün kenarlarına bulaşan kalıntılar, distile su ile yıkanarak filtre edilir.

Filtre, bir pens yardımıyla aparattan dikkatle alınır ve bir alüminyum kaba konur. En az 1 saat süreyle etüvde 103-105°C’de kurutma yapılır. Desikatörde soğutulup tartılır.

Filtre ve üzerindeki kalıntı, daha sonra 30 dakika süreyle fırında 500-550°C’de yakılır. Desikatörde soğutulup tartılır.

Hesaplama

$$\text{AKM (mg/L)} = (A-B) \times 1000 / (\text{Örnek hacmi (ml)})$$

$$\text{UAKM (mg/L)} = (A-C) \times 1000 / (\text{Örnek hacmi (ml)})$$

A = filtre + kalıntı ağırlığı (mg)

A = filtre + kalıntı ağırlığı (mg)

B = filtre darası (mg)

C = filtre darası + inorganik kalıntı ağırlığı (mg)

3.6.3 Toplam katı madde- toplam uçucu katı madde (TKM-TUKM)

Reaktörlerdeki TKM ve TUKM değerleri belirli aralıklarla izlenmiştir. Bu amaçla gravimetrik ölçüm yöntemi kullanılmıştır.

Kullanılan araç ve gereçler

- | | |
|---|---|
| – Etüv (2 °C duyarlılığında termostatlı), | – Analitik terazi (0.1 mg duyarlılığında) |
| – Desikatör | – Cam elyaf filtreler |
| – Süzme seti | – Kroze |

Deneyin yapılışı

Deneyde kullanılacak krezeler kalıntı kalmayacak şekilde yıkanır , etüvde 103-105°C’de bir saat kurutulur ve havadaki nemden etkilenmemesi ve tam kuruması için desikatörde tutulur. Sabit tartıma gelmiş olan kroze, dikkatli bir şekilde desikatörden alınarak tartılır.

Tahmini TKM değerine göre iyice karıştırılmış örnekten, mezür ile 50 ml ya da daha çok numune alınır ve süzme işlemine tabi tutulmadan krozeye aktarılır. Mezürün kenarlarında, bulaşmış kalıntı kalmamasına dikkat edilir.

Numuneleri koyulan krezeler en az 1 saat süreyle etüvde 103-105°C’de kurutma yapılır. Desikatörde soğutulup tartılır.

Kroze ve içerisindeki kalıntı, daha sonra 30 dakika süreyle fırında 500-550°C’de yakılır. Desikatörde soğutulup tartılır.

Hesaplama

$$\text{TKM (mg/L)} = (A-B) \times 1000 / (\text{Örnek hacmi (ml)})$$

$$\text{TUKM (mg/L)} = (A-C) \times 1000 / (\text{Örnek hacmi (ml)})$$

A= kroze + kalıntı ağırlığı (mg)

C = krozenin ağırlığı + inorganik kalıntı ağırlığı (mg)

B= krozenin ağırlığı (mg)

3.6.4 Toplam kjeldahl azotu (TKN)

Besleme atıksuyunda, reaktörlerin içerisinde ve çıkış arıtılmış süzöntü suyunda gerekli zamanlarda TKN ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan kimyasallar

Hazım Ayıracı: 134 g K₂SO₄ ve 7,3 g CuSO₄ yaklaşık 800 mL suda çözülür. Üzerine 134 mL dikkatlice konsantre sülfirik asit eklenir. Hazırlanan çözelti oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulduktan sonra bir litreye seyreltilir, karıştırılır ve kristalleşmesini önlemek için yaklaşık 20 °C’de saklanır.

Sodyum Hidroksit – Sodyum Tiyosülfat Ayıracı (Nötralizasyon Ayıracı): 500 g NaOH ve 25 g Na₂S₂O₃.5H₂O suda çözülür ve bir litreye seyreltilir.

Karışık İndikatör Çözeltisi: 200 mg metil kırmızısı indikatörü, 100 mL %95’lik etil veya isopropil alkolde çözülür. 100 mg metilen mavisi, 50 ml %95’lik etil veya isopropil alkolde

çözülür. Kullanım süresi bir ay olan karışık indikatör çözeltisi, söz konusu çözeltilerin birleştirilmesi sonucunda elde edilir.

Absorbsiyon Çözeltisi (Borik Asit Çözeltisi): 20 g H_3BO_3 suda çözülür ve bir litreye seyreltilir.

Standart Sülfirik Asit titrasyon Çözeltisi (0.02 N): 200 mL 0.1 N standart sülfirik asit 1000 mL'ye seyreltilir. 15 ml 0.05 N Na_2CO_3 ile titre edilerek standardize edilir.

Kullanılan araç-gereçler

Hazım Cihazı: 800 mL kapasiteli borosilikat camdan yapılmış balonlar kullanılarak numunenin 375-385 °C'de ısıtılarak hazım işleminin gerçekleştirilmesini sağlayacak havalandırmalı ısıtıcı kullanılır. Ayrıca cam TKN balonu, cam taşı, erlen, kesik uçlu pipet, mezür, karıştırıcı cihazı, manyetik karıştırıcı ve titrasyon ünitesi kullanılır.

Deneyin yapılışı

Öncelikle numune sayısı kadar TKN balonu alınır. Balonların içine mezür yardımı ile 150 mL distile su ilave edilir. Cam balonların hepsine 3'er adet cam taşı atılır. Numunelerden pipet yardımı ile 10'ar mL alınarak balonlara eklenir. Hazım cihazı açılarak ısıtıcı seviyesi son seviye olan 3 seviyesine getirilir. Cihazın havalandırması ve su tesisatı açılır. Balonların hepsine 50'şer mL hazım ayırıcı eklenerek cihaza yerleştirilir. Yaklaşık 30-45 dakika sonra, balonlarda beyaz duman çıkışı görülür. Şişenin dibinde ise yeşil-berrak sıvı-jel bulunur. Şişenin bombe kısmında duman kalmadığı görüldüğünde cihazın ısıtıcı kısmı kapatılır. Balonların yaklaşık 20 dakika soğuması beklenir. Balonların soğuduğu, içerisindeki jel tabakasının katılaşması ile anlaşılabilir.

Balonlar ısıtıcıdan çıkarıldıktan sonra hepsine mezür yardımı ile 350 mL distile su eklenir. Ardından hepsine 50 mL nötralizasyon ayırıcı eklenerek cihazın üst tarafında bulunan 2. ısıtıcı kademesine yerleştirilir. Bu kademenin altında erlenlerin yerleştirilmesi için de bir bölüm bulunmaktadır. Numune sayısı kadar erlen alınarak içlerine 50 mL borik asit koyulur ve üzerine 3 damla karışık indikatör eklenir. Erlenler de cihaza yerleştirilerek cihaz tekrar çalıştırılır. Erlenlerin cihaza yerleştirildiği kısımda bulunan cam çubuklar erlenlerdeki sıvının içerisine batacak şekilde yerleştirilir. Yarım saat kadar beklenir. Erlenlerin içerisindeki sıvı seviyesi 250 mL olduğunda cihaz kapatılır.

Erlenler cihazdan alınarak titrasyon yapılmak üzere karıştırıcıya koyulur ve içlerine manyetik karıştırıcı yerleştirilir. Titrasyon ünitesi açılır ve erlenlerdeki sıvıların rengi açık mor renge dönene kadar titrasyon yapılır. Her erlen için sarfiyat not edilir.

Hesaplama

$$\text{mgN/l} = (A \times N \times 14 \times 1000) / V$$

A = Numune için titrasyonda harcanan
H₂SO₄ miktarı (mL)

N = H₂SO₄ çözeltisinin normalitesi
V = numune hacmi (mL)

3.6.5 Toplam fosfor (TP)

Toplam fosfor analizi Standart Metot'a (APHA, 2005) göre; Hach-lange marka LCK 350 kodlu kitlerle, DR 5000 Hach Spektrofotometrede, 507 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

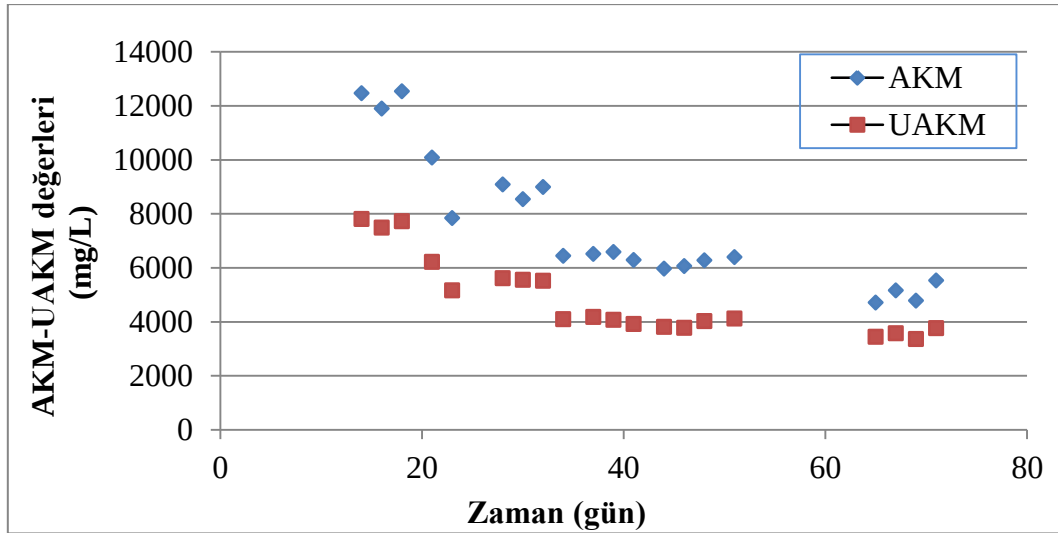
4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

4.1 MBR'nin Rutin İzleme Sonuçları

Bu çalışma periyodu boyunca reaktör içi; pH, sıcaklık, ORP, iletkenlik, çözülmüş oksijen değerleri online olarak ölçülmüştür ve belli aralıklarla reaktör içi AKM-UAKM ölçümleri yapılmıştır. 1. ve 2. aşama işletme günleri boyunca bu parametrelerde belirgin bir fark gözlenmediğinden, bütün sonuçlar birlikte verilmiştir.

4.1.1 AKM-UAKM

Reaktör içi AKM ve UAKM değerleri belli aralıklarla takip edilmiştir. Çalışma boyunca ölçülen AKM ve UAKM değerleri Şekil 4.1'de verilmiştir.

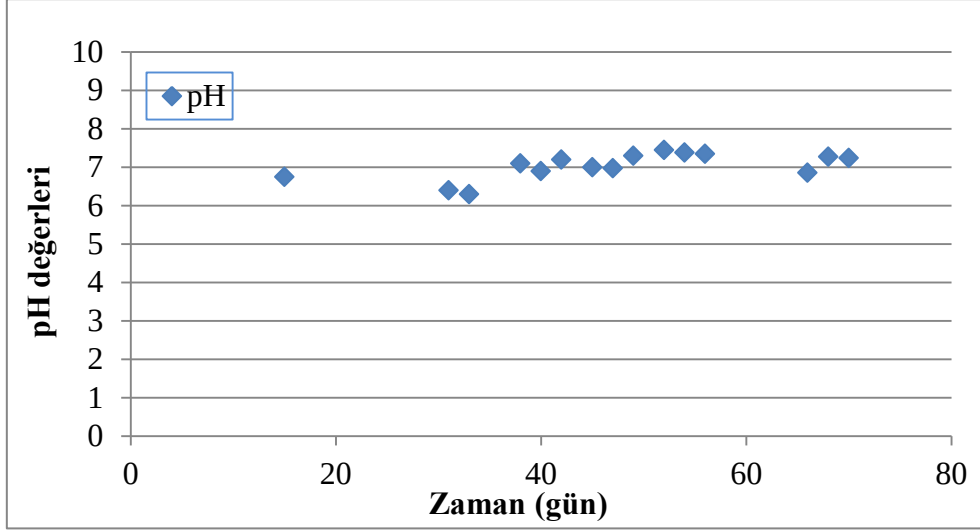


Şekil 4.1 : İşletme boyunca reaktör içi AKM-UAKM profili.

İşletme boyunca çok sık yaşanan elektrik kesintileri sebebiyle çok sık geri yıkama yapılmak zorunda kalınmış ve bu nedenle reaktörde meydana gelen seyrelmeler dolayısıyla AKM ve UAKM konsantrasyonlarında düşüş meydana gelmiştir. MBR içindeki çamurun UAKM/AKM oranında işletme boyunca önemli bir değişim gözlenmemiştir. 2. Aşamada aynı koşullar altında işletim olmasına rağmen her bir modülde daha düşük TMP değerlerinin gözlemlenmesi çamur AKM konsantrasyonunda 2. Aşamada gözlenen azalma ile ilişkilendirilebilir.

4.1.2 pH

İşletme süresince elde edilen pH grafiği Şekil 4.2'de verilmektedir.

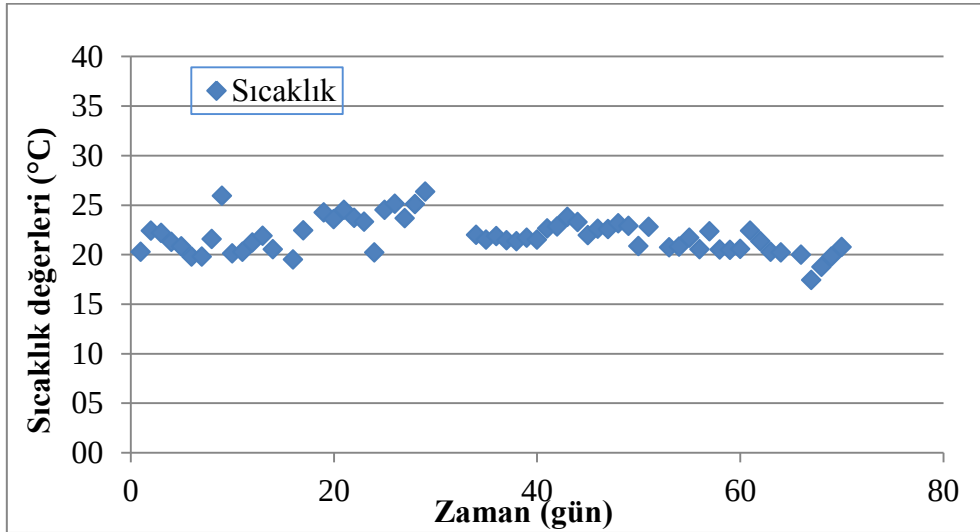


Şekil 4.2 : pH profili.

İşletme boyunca reaktör içinde ölçülen pH değerleri incelendiğinde; geniş bir salınım olmadığı, pH'ın 6-7.5 arasında değiştiği gözlenmiştir. Buda MBR'lerde arıtım açısından uygun bir aralıktır.

4.1.3 Sıcaklık

İşletme süresince elde edilen sıcaklık grafiği Şekil 4.3'te verilmektedir.

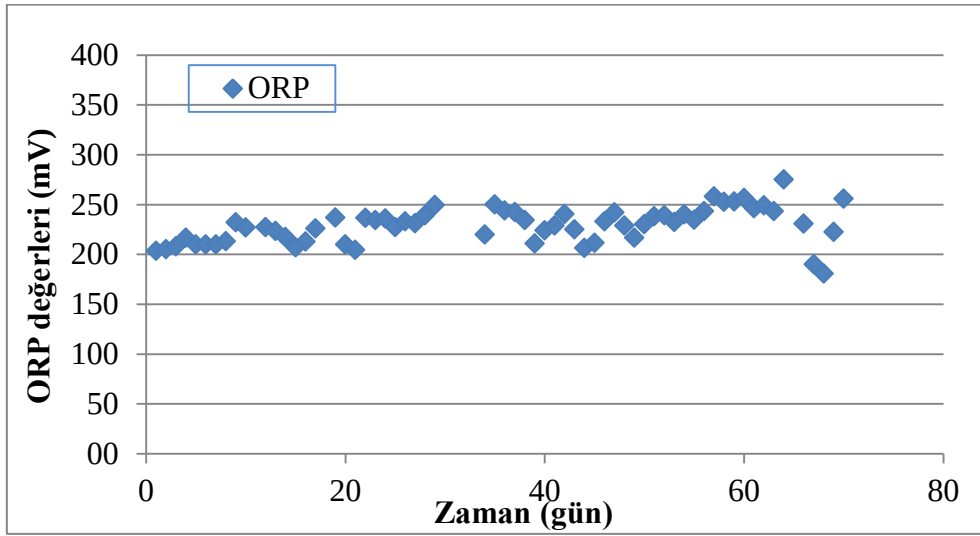


Şekil 4.3 : Sıcaklık profili.

İşletme boyunca reaktör içinde ölçülen sıcaklık değerleri incelendiğinde; geniş bir salınım olmadığı, sıcaklığın 18-25 °C arasında değiştiği gözlenmiştir. Buda MBR'lerde arıtım açısından uygun bir aralıktır.

4.1.4 ORP

İşletme süresince elde edilen ORP grafiği Şekil 4.4'te verilmektedir.

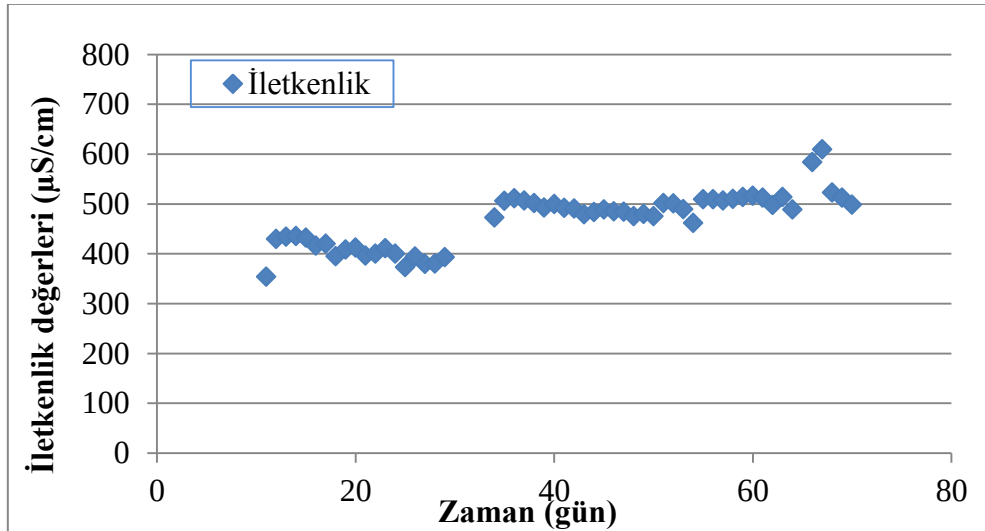


Şekil 4.4 : ORP profili.

İşletme boyunca ORP değerleri 180 mV ile 280 mV arasında değişmiştir. Bu sayede etkili bir aerobik arıtma gerçekleştirilebilmiştir.

4.1.5 İletkenlik

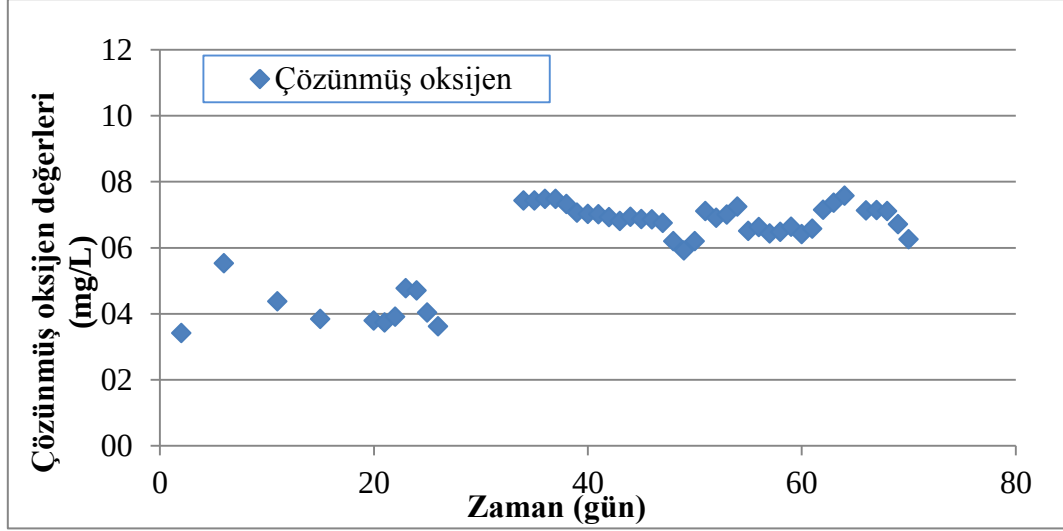
İşletme süresince elde edilen iletkenlik grafiği Şekil 4.5'te verilmektedir.



Şekil 4.5 : İletkenlik profili.

4.1.6 Çözünmüş oksijen

İşletme süresince elde edilen çözünmüş oksijen grafiği Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6 : Çözünmüş oksijen profili.

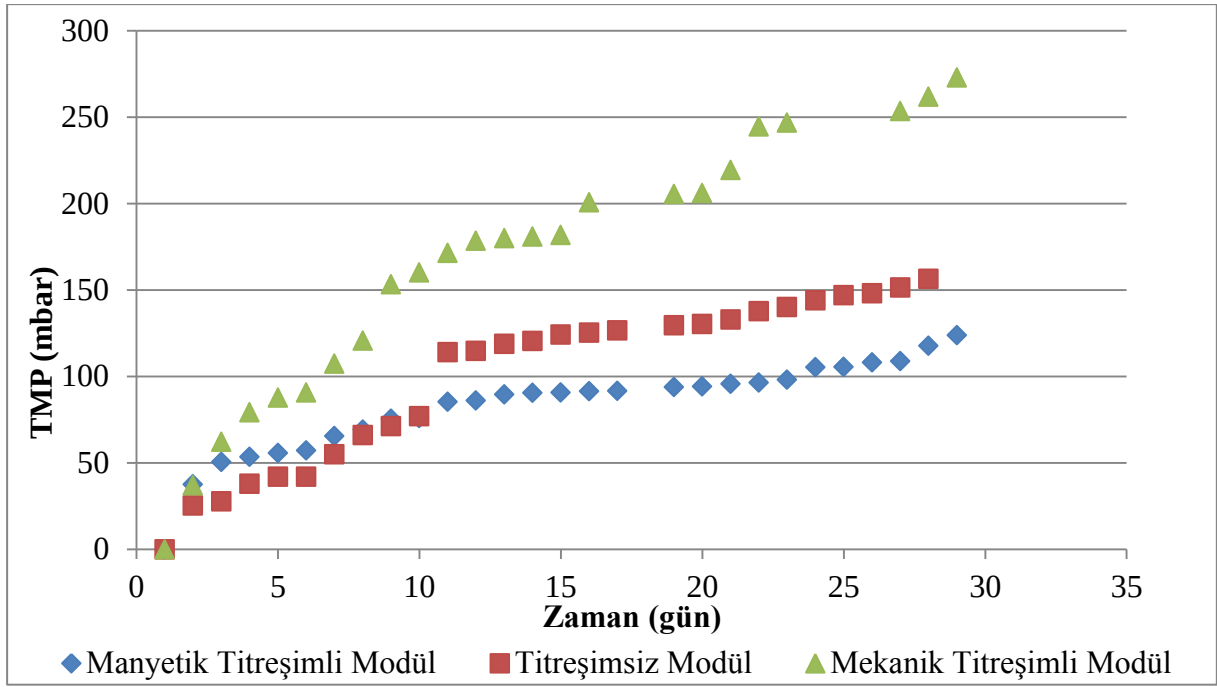
İşletme boyunca reaktör içinde ölçülen çözünmüş oksijen değerleri incelendiğinde; geniş bir salınım olduğu gözlenmiştir. Bu durum, MBR içerisine yerleştirilen düzeneğin difüzörden verilen hava kabarcıklarının ulaştığı alanların kısıtlanması sonucu, havalandırmanın yüksek değerlerde verilmesinden kaynaklanmaktadır.

4.2 Filtrasyon Performansı

Tez kapsamında, laboratuvar ölçekli MBR çalışmalarında üç adet membran modülü aynı işletme koşulları altında işletilmiş olup, titreşim kaynağındaki değişimin filtrasyon performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 1. Aşamada manyetik ve mekanik sistemlerin frekans değerleri sırasıyla 30 ve 5 Hz'dir. İkinci aşamada ise elde edilen sonuçlara bağlı olarak, manyetik sistemin frekans değeri sabit tutularak, mekanik sistemin frekans değeri 30 Hz'e arttırılmıştır.

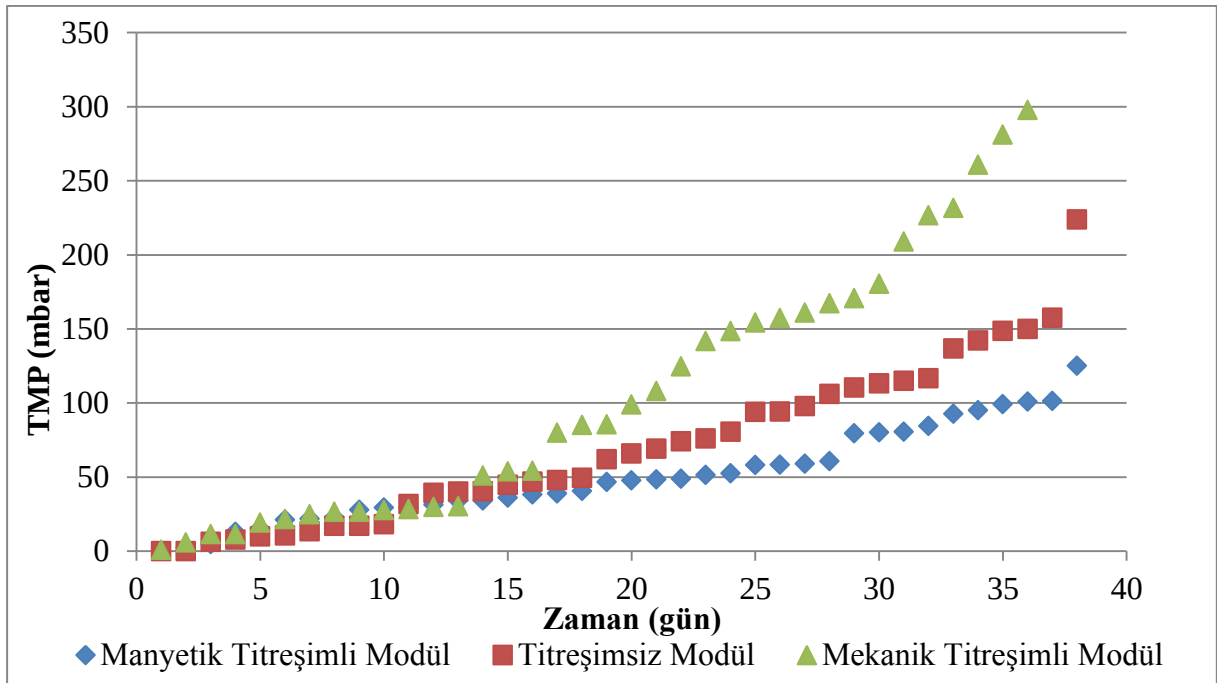
4.2.1 TMP profilleri

Laboratuvar ölçekli sistemin işletimi boyunca, akı değeri sabit tutulmuş ve TMP değerleri sürekli izlenmiştir. Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerin 1.aşama işletim süresi boyunca TMP değişimi Şekil 4.7' de verilmektedir.



Şekil 4.7 : 1. Aşama için titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modünün TMP değişimleri.

Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerin 2. aşama işletim süresi boyunca TMP değişimi Şekil 4.8' de verilmektedir.



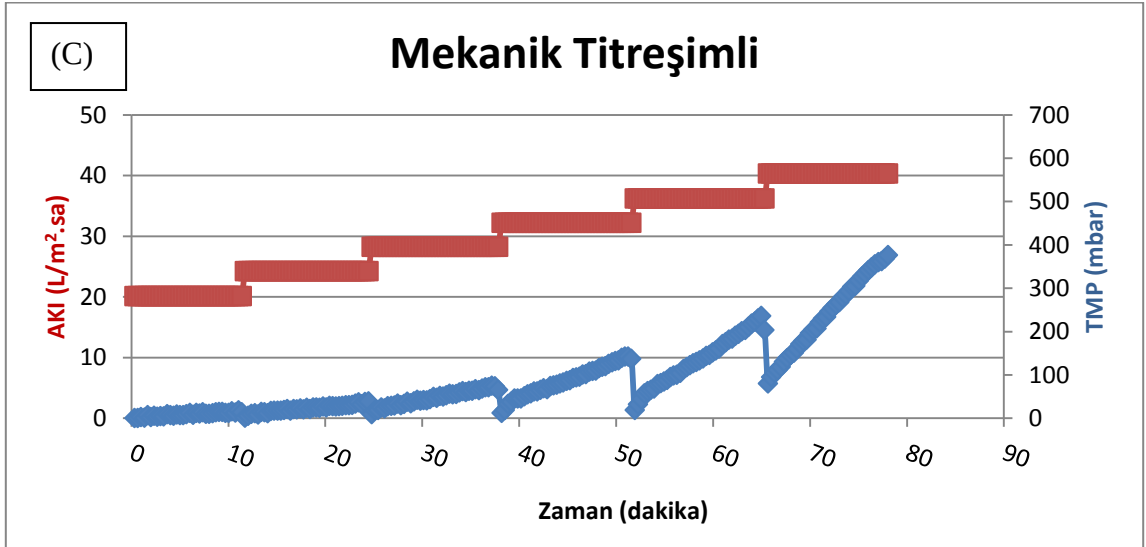
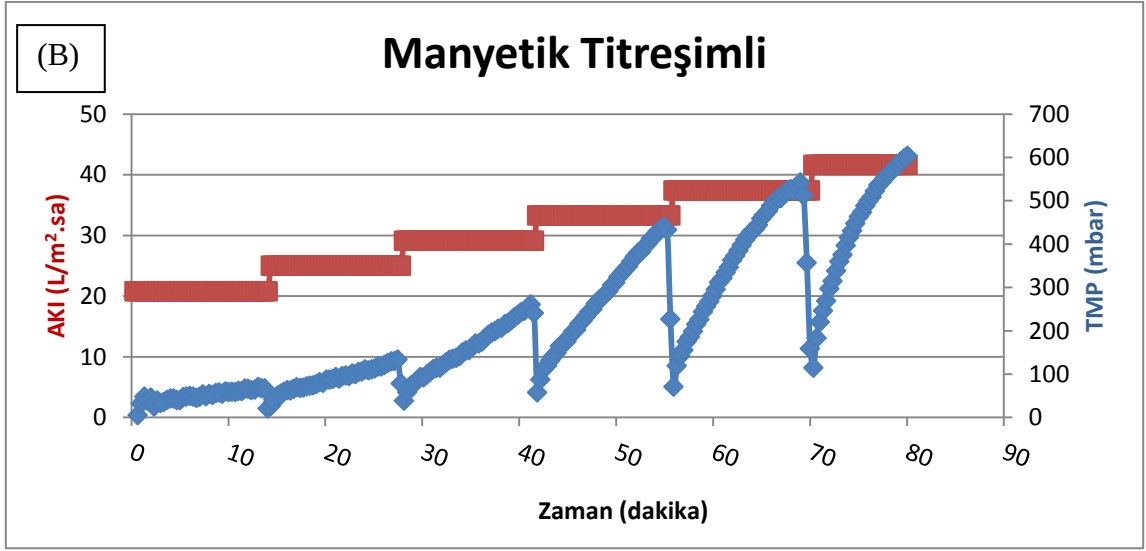
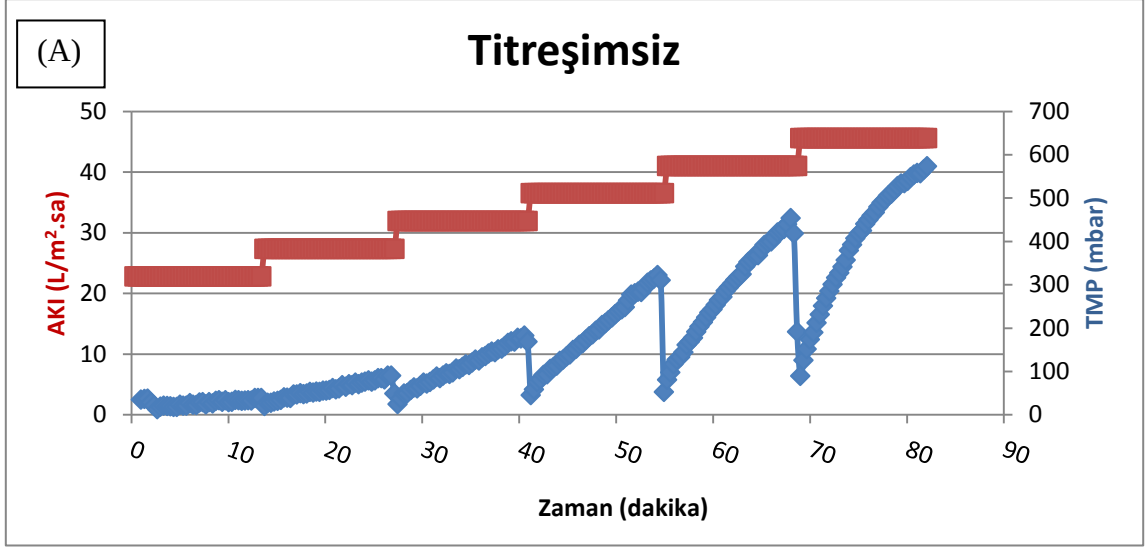
Şekil 4.8 : 2. Aşama için titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modünün TMP değişimleri.

Filtrasyon performansı açısından değerlendirildiğinde, manyetik titreşimli modülün en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Mekanik titreşimli sistemlerde elde edilen TMP değerleri

titreşimsiz (kontrol) sistemdeki değerlerden daha yüksektir. Mekanik titreşimli sistemde yüksek TMP değerlerinin elde edilmesi, bu titreşim türünün kek tabakasına bağlı tıkanmayı engelleyecek şekilde olması ve buna bağlı olarak por tıkanmasının artması ile ilişkilendirilebilir. Manyetik titreşim türünün ise kek tabakasını mekanik titreşim kadar etkilemediği ve por tıkanmasını geciktirdiği düşünülmektedir.

4.2.2 Kritik Akı Deney Sonuçları

Kritik akı deneyi reaktördeki çamur ile gerçekleştirilmiş ve işletme akısı kritik akı deney sonuçlarına göre belirlenmiştir. Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşim uygulanan membran modülerinde elde edilen kritik akı grafikleri sırasıyla Şekil 4.9’da verilmektedir.



Şekil 4.9 : Kritik akı deneyinin sonuçları: (A) Titreşimsiz modül, (B) Manyetik titreşimli modül (C) Mekanik titreşimli modül.

Üç modül için kritik akı değerleri Çizelge 3.8’de verilmektedir.

Çizelge 3.8 : Modüllerin kritik akı deney sonuçları.

Modül	Kritik akı, L/m².sa
Titreşimsiz Modül	36,5
Manyetik titreşimli Modül	33,3
Mekanik titreşimli Modül	32,2

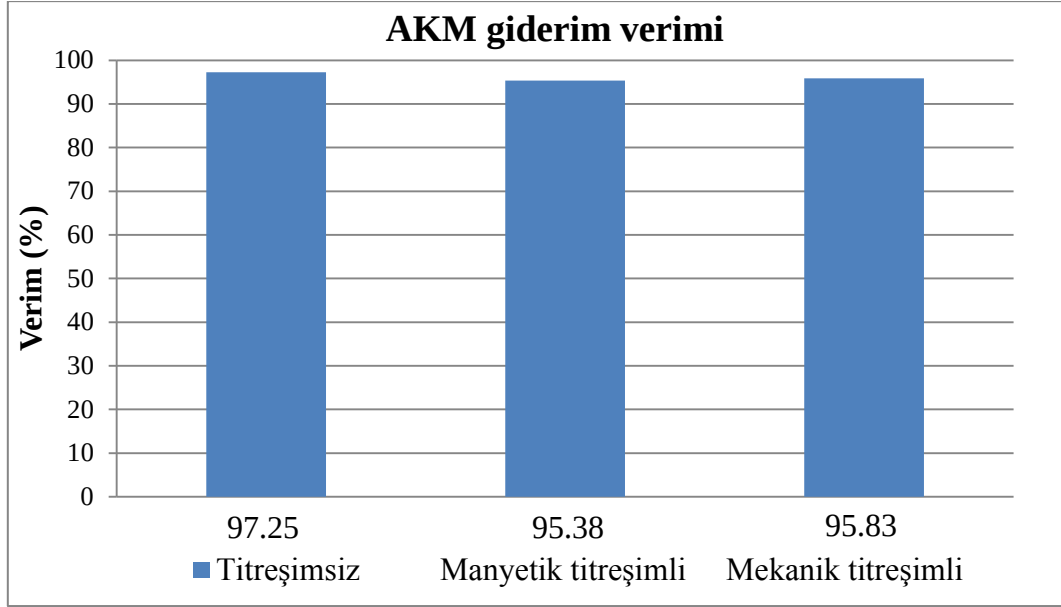
Kritik akı değerleri üç modül için 32-37 L/m².sa arasında belirlenmiştir. Farklı titreşim uygulanan modüller için kritik akı değerleri arasında önemli bir fark görülmemiştir. Kritik akının üstünde çalıştırılan MBR sistemlerinin kısa sürede tıkanıdığı bilinmektedir. Bu sebeple, sorunsuz işletme sağlayabilmek ve membranlar tıkanmadan basıncı değişimlerini daha rahat izleyebilmek amacıyla, yukarıda belirlenen kritik akılar göz önünde bulundurularak sistemin işletilmesinde akı değeri 25 L/m².sa olarak seçilmiştir.

4.3 Uzun Süreli Deneysel İşletme Verim Sonuçları

Tez kapsamında, kullanılan MBR’nin işletme süresi boyunca, üç modülün her bir süzüntü akımında belirli aralıklarda KOİ, AKM, TKN ve TP deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, üç modülün süzüntüsünde belirli aralıklarla bulanıklık ölçümü yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında 1. ve 2. Aşama verim sonuçlarının birbirine paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple sonuçlar verilirken 1. ve 2. Aşama sonuçlarının birlikte ortalaması alınarak verim hesaplamaları yapılmıştır.

4.3.1 AKM sonuçları

Tez kapsamında, kullanılan MBR’nin işletim süresi boyunca, reaktörlerden alınan çıkış suyu numunelerine belirli aralıklarla AKM deneyi yapılmıştır. Her üç modülün giderim verimi sonuçları Şekil 4.10’da verilmiştir.

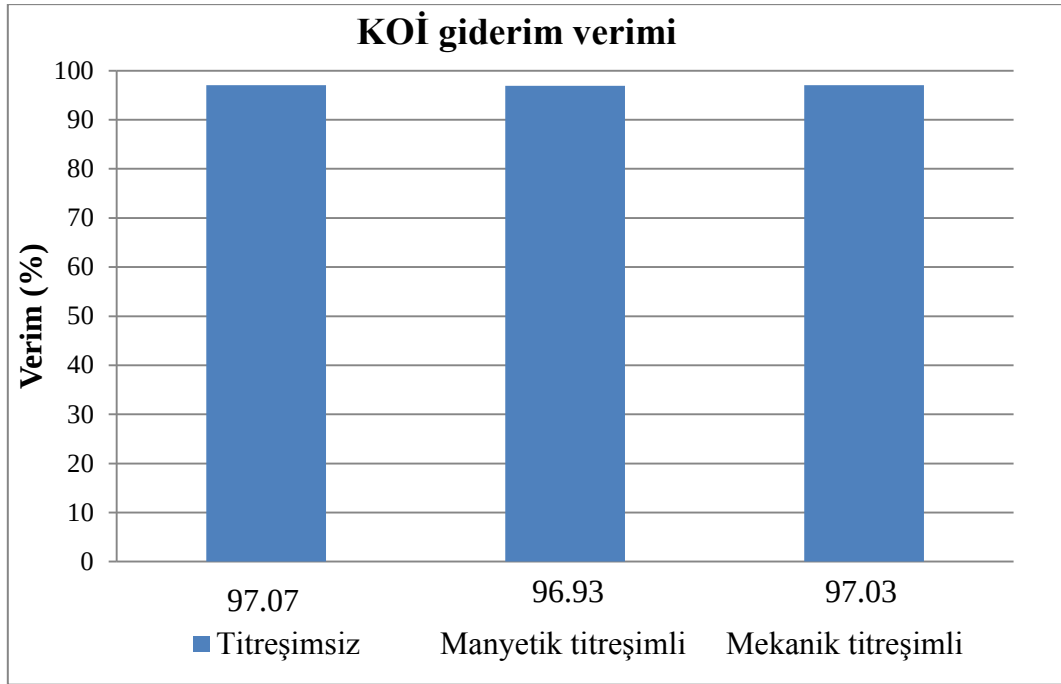


Şekil 4.10 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde AKM giderim verimi grafiği.

Yukarıda belirtildiği üzere, Titreşimsiz modül ile mekanik titreşimli ve manyetik titreşimli modülün süzöntülerine yapılan AKM deneylerinin sonuçlarına bakıldığında; AKM giderimi açısından belirgin bir fark görülmediği, üç modül için de birbirine paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.

4.3.2 KOİ sonuçları

Tez kapsamında, kullanılan MBR'nin işletim süresi boyunca, reaktörlerden alınan çıkış suyu numunelerine belirli aralıklarla AKM deneyi yapılmıştır. Deneylerin giderim verimi sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir.

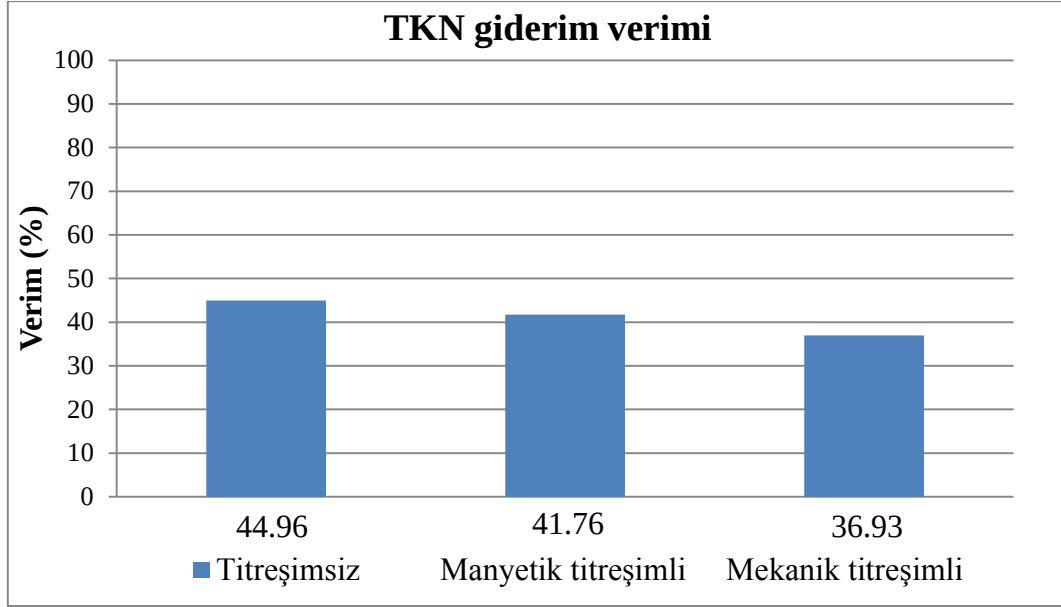


Şekil 4.11 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde KOİ giderim verimi grafiği.

Titreşimsiz modül ile mekanik titreşimli ve manyetik titreşimli modülün süzöntülerine yapılan KOİ deneylerinin sonuçlarına bakıldığında; KOİ giderimi açısından belirgin bir fark görülmediği, üç modül için de birbirine paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.

4.3.3 TKN sonuçları

Tez kapsamında, kullanılan MBR'nin işletim süresi boyunca, reaktörlerden alınan çıkış suyu numunelerine belirli aralıklarla TKN deneyi yapılmıştır. Her üç modülün giderim verimi sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.

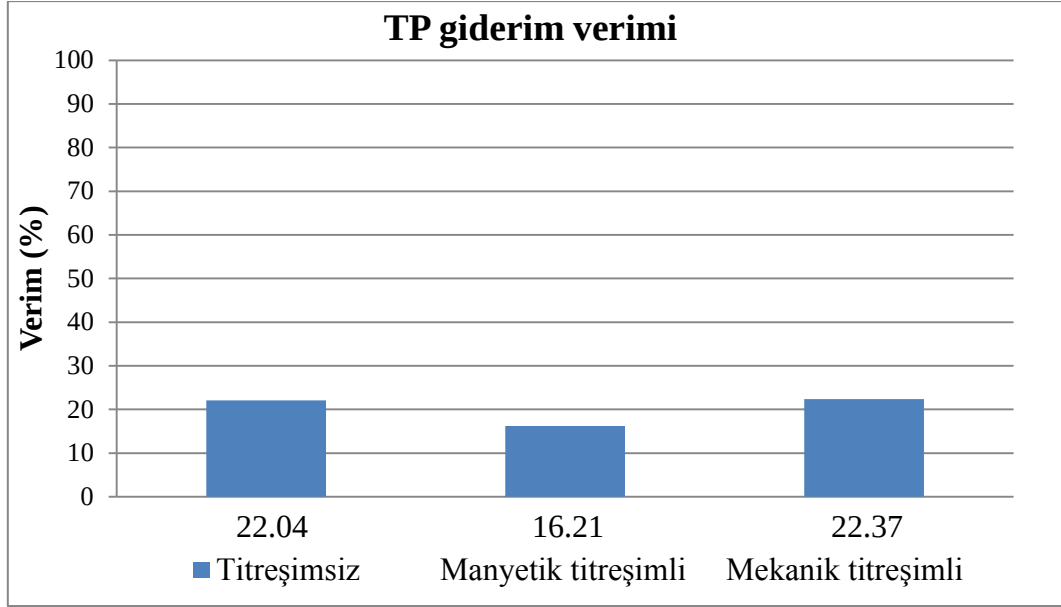


Şekil 4.12 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde TKN giderim verimi grafiği.

Titreşimsiz modül ile mekanik titreşimli ve manyetik titreşimli modülün süzöntülerine yapılan TKN deneylerinin sonuçlarına bakıldığında; TKN giderimi açısından belirgin bir fark görülmediği, üç modül için de birbirine paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.

4.3.4 TP sonuçları

Tez kapsamında, kullanılan MBR'nin işletim süresi boyunca, reaktörlerden alınan çıkış suyu numunelerine belirli aralıklarla TP deneyi yapılmıştır. Her üç modülün giderim verimleri şeklindeki sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir.

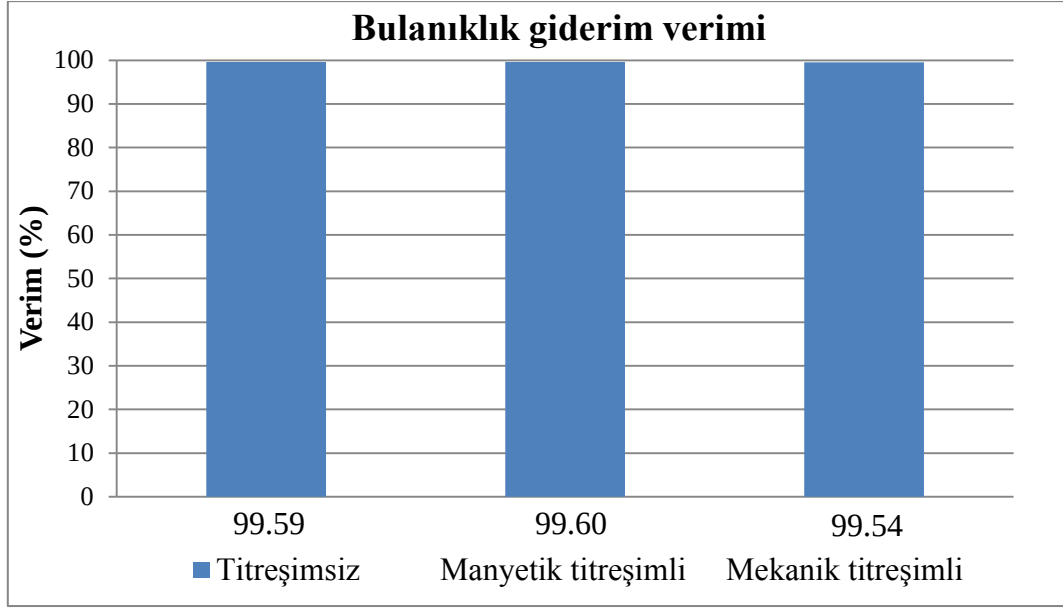


Şekil 4.13 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde TP giderim verimi grafiği.

Titreşimsiz modül ile mekanik titreşimli ve manyetik titreşimli modülün süzöntülerine yapılan TP deneylerinin sonuçlarına bakıldığında; TP giderimi açısından belirgin bir fark görülmediği, üç modül için de birbirine paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.

4.3.5 Bulanıklık sonuçları

Tez kapsamında, kullanılan MBR'nin işletim süresi boyunca, reaktörlerden alınan çıkış suyu numunelerine belirli aralıklarla bulanıklık değerleri ölçülmüştür. Her üç modülün bulanıklık giderim verimi sonuçları Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14 : Titreşimsiz modül, manyetik titreşimli modül ve mekanik titreşimli modülün süzöntülerinde TP giderim verimi grafiği.

Titreşimsiz modül ile mekanik titreşimli ve manyetik titreşimli modülün süzöntülerine yapılan bulanıklık ölçüm sonuçlarına bakıldığında; bulanıklık giderimi açısından belirgin bir fark görülmediği, üç modül için de birbirine paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında literatürde de uygulamaları yeni olan MBR'lere titreşim verilmesi uygulamaları denenmiş ve sonuçları incelenerek yorumlanmıştır. Bu bağlamda tez kapsamında MBR'lerde titreşim uygulaması olarak manyetik sürücüsü ve mekanik sürücülü motorlu titreşim sistemleri MBR içerisinde denenmiştir.

Sistem öncelikle titreşim motorlarının minimum çalışma frekanslarında çalıştırılmaya başlanmıştır (Mekanik titreşimli modül - 5 Hz, Manyetik titreşimli modül – 30 Hz). Bu şekildeki işletme 1. aşama işletmesi olarak adlandırılmış yaklaşık 1 aylık bir işletme sonucu mekanik motorlu sistemin frekansı değiştirilip her ikisi de aynı frekansa çekilmiş (Mekanik titreşimli modül - 30 Hz, Manyetik titreşimli modül – 30 Hz). ve bu çalışma periyodu da 2. aşama olarak adlandırılmıştır.

Kullanılan farklı titreşim türlerinin MBR üzerindeki TMP değişimleri izlenmiş, ve arıtma verimlerini değerlendirmek amacıyla deneyler yapılmıştır.

- Akı değerleri yaklaşık eşit olan üç modülün 1. aşama olarak adlandırılan 1 aylık işletim periyodu sonucunda TMP artışlarına bakıldığında; her üç modülün de başlangıçta basınç artışlarının yaklaşık paralel gittiği, fakat işletmenin ilk günlerinden sonra mekanik titreşimli modülün TMP artışının hızlandığı, titreşimsiz modülün onu takip ettiği, en az TMP artış hızına sahip olan modülün ise manyetik titreştirilen modülde olduğu görülmüştür.
- 2. aşama işletme periyodunda da yine aynı şekilde mekanik titreşimli modülün TMP'sinin en hızlı şekilde arttığı, manyetik titreşimli modülün TMP'sinin ise yine en yavaş şekilde arttığı görülmüştür.
- Mekanik titreşimli modüldeki basınç artışının sebebi, bu çalışmada, mekanik titreştirmenin tek boyutlu olması, membranın yüzeyinde oluşan biyofilm tabakasına zarar verdiği böylece kek tabakasına bağlı tıkanmayı engellediği, SMP'lerin gözeneklere yapışmasının engellenemediği ve bunun sonucunda da por tıkanmasını hızlandırdığı düşünülmektedir.
- Manyetik titreşimli modülün basınç artışının en az olması ise; manyetik titreşimin üç boyutlu olması sebebiyle SMP lerin gözeneklere yapışmasının engellendiği, böylece

por tıkanmasını geciktirmesiyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca yine üç boyutlu olan titreşimin kek tabakasına tıkanmayı engelleyici bir sıyırma etkisi olduğu öngörülmüştür.

- İşletme günleri sonunda yapılan membran temizliğiyle birlikte, membran üzerindeki dirençler incelenmiş; mekanik titreşimli membran modülünün por direnci kek tabakası direncinden yüksek çıkmıştır. Buna karşılık manyetik titreşimli membran modülünün kek tabakası direnci ise por direncine göre yüksek çıkmıştır. Bu da yukarıda açıklanan sonuçla paralellik göstermektedir.
- Bilad ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada direk TMP artışı olarak değil toplam membran direnci olarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Toplam direnç de TMP'nin bir fonksiyonu olduğu için buna göre değerlendirmeler yapılmıştır; bu çalışmada, titreştirilmeyen membran ile manyetik titreşim verilen membranların basınçları kıyaslandığında aralarında yaklaşık 1,5 kat gibi bir oran görülmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmaya bakıldığında da yaklaşık aynı oran görülmekte ve çalışmanın diğer bir çalışmayla paralellik gösterdiği görülmektedir.
- Tez kapsamında kullanılan mekanik motorlu sistem Low ve diğ.'nin (2005) sistemine benzerlik göstermektedir. Fakat, yapılan çalışmada daha çok akı değişimi izlenmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmada ise akı sabit tutulduğundan bu çalışmayla ilgili bir karşılaştırma yapılamamıştır.
- Yapılan verim deneylerinin her üç modül için olan sonuçlarına bakıldığında (KOİ, AKM,TP, TKN) ise; titreşimin arıtma performansı üzerinde etkisinin olmadığı görülmektedir. Gerek bulanıklık, gerek AKM değerleri de göstermektedir ki ; tıkanma oranları farklı olsa bile porlardan geçen ve süzüntü akımına ulaşan partiküllerin miktarında bir fark görülmemiştir. Aynı şekilde KOİ, TP ve TKN değerlerinde de fark görülmemiştir. Bu bağlamda titreşim mekanizmasının klasik arıtıma bir etkisi olmadığı söylenebilir.

Bu bağlamda bu konuyla alakalı yeni yapılacak çalışmalarda;

- Farklı frekans değerleri denenip ve TMP değişimi izlenmeye devam edilebilir.
- Akı sabit tutulması yerine, literatürdeki diğer çalışmaların çoğunda olduğu gibi akı değişiminin filtrasyon performansı üzerindeki etkileri incelenebilir. Bu şekilde literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslama daha rahat yapılabilir.

- Literatürde takibi sıkça yapılan kritik akı parametresinin farklı frekanslardaki değişimleri izlenebilir.
- TMP değişimlerinden yola çıkarak, toplam direnç kıyaslaması yapılabilir.
- Farklı genliklerde çalışılarak filtrasyon performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Aynı deney düzeneğinin havalandırma olmadan anaerobik ortamdaki davranışı incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Agtas, M., Ersahin, M.E., Ozgun, H., Koyuncu, I.,** (2016). Impact of module design on the performance of membrane bioreactors treating municipal wastewater, *Separation Science and Technology*, 51(5), 836-844.
- Ağtaş, M.** (2014). *Membran Biyoreaktörlerde (MBR) Tıkanmaların Önlenmesi İçin Yetersayı Etkisinin Azaltılması (Quorum Quenching) Mekanizmasının Kullanılması*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Armando, A.D., Culkin, B., Purchas, D.B.,** (1992). New Separation System Extends the Use of Membranes, in: *Proceedings Of Euromembrane*, Lavoisier, Paris, 92 (6), 459.
- Aydiner C.,** (2006). *Hibrit mikrofiltrasyon teknolojisi ile sulu ortamdan nikel giderimi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baker, R. W.,** (2004). *Membrane Technology And Applications*, John Wiley and Sons, Ltd. second Edition.
- Beier, S. and Jonsson, G.,** (2007). Separation of enzymes and yeast cells with a vibrating hollow fiber membrane module. *Separation and Purification Technology*, 53(1), 111-118.
- Beier, S. P.** (2008). *Dynamic Microfiltration Critical Flux and Macromolecular Transmission*. (Doctoral Dissertation). Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Denmark.
- Beier, S., Guerra, M., Garde, A., Jonsson, G.,** (2006). Dynamic Microfiltration With A Vibrating Hollow Fiber Membrane Module: Filtration of Yeast Suspensions. *Journal of Membrane Science*, 281(1-2), 281-28.
- Bilad, M. R., Mezohegyi, G., Declerck, P., Vankelecom, I. F.,** (2011). Novel Magnetically Induced Membrane Vibration (MMV) For Fouling Control in Membrane Bioreactors, *Water Research* 46 (2012) 63-72.
- Bruggen, B.V.D., Vandecasteele, C., Gestel, T.V., Doyen, W., Leysen, R.,** (2003). A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. *Environ. Prog.* 22(1), 46-56.
- Buonomenna, M. G.** (2013). Nano-enhanced reverse osmosis membranes. *Desalination*, 314, 73-88.
- Butcher, G. J.** (1989). Experiences with anaerobic digestion of wheat strach processing waste. *International Biodegradation*, 25, 71-77.
- Chang, I.S., Le-Clech, P., Jefferson, B., Judd, S.J.,** (2002). Membrane Fouling in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. *Environ. Eng. Sci.*, 128, 1018-1029.
- Chang, I.S., Lee, C.H. and Ahn, K.H.,** (1999) Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system: the effect of floe structure on membrane fouling. *Sep. Sci. Technol.*, 34, 1743-1758.

- Choo, K.-H. and Lee, C.-H.,** (1998). Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor. *Water Research*, 32, 3387-3397.
- Chou, W.L., Yang, M.C.,** (2005). Effect of take-up speed on physical properties and permeation performance of cellulose acetate hollow fibers. *Journal of membrane science*, 250 (1), 259-267.
- Cui, Z. F., Chang, S., Fane, A. G.,** (2003). The Use of Gas Bubbling to Enhance Membrane Processes. *Journal of membrane science* 221(1-2), 1-35.
- Defrance L., Jaffrin M.Y., Gupta B., Paullier P., Geaugey V.,** (2000). Contribution Of Various Constituents of Activated Sludge to Membrane Bioreactor Fouling. *Bioresource Technology*, 73, 105-112.
- Defrance, L. and M. Y. Jaffrin** (1999). Comparison between Filtrations at Fixed Transmembrane pressure and Fixed Permeate Flux: Application to a Membrane Bioreactor Used for Wastewater Treatment. *Journal of membrane science*, 152, 203-210.
- Delikanlı, N. E.** (2013). *Pamuklu tekstil endüstrisi atıksularının membran biyoreaktör (MBR) ile arıtılması ve renk giderimi.* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Dijk L. Van. and G. C. G. Roncken** (1997). Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment: The State of the Arts and the New Developments. *Water Science and Technology*, 35, 35-41.
- Dizge, N.** (2011). *Mikrofiltrasyon membranların kirlenme özelliklerinin membran tipine ve gözenek boyutuna bağlı olarak klasik aktif çamur sisteminde incelenmesi.* (Doktora Tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.
- EPA, United States Environmental Protection Agency** (2005). Membrane filtration guidance manual, EPA 815-R-06-009.
- Eren, B.,** (2006). Yapay Sinir Ağları Ile Membran Proses Verimine Etki Eden Parametrelerin Analizi. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Fang, H.H.P. and Shi, X.,** (2005). Pore Fouling Of Microfiltration Membranes By Activated Sludge. *Journal of membrane science*, 264, 161-166.
- Flemming, H.C. and Wingender, J.,** (2001). Relevance of Microbial Extracellular Polymeric Substances (Epss) - Part I: Structural and Ecological Aspects. *Water Science and Technology*, 43, 1-8.
- Flemming, H.C., Schaule, G., Griebbe, T., Schmitt, J. and Tamachkiorowa, A.** (1997) Biofouling - the achilles heel of membrane processes. *Desalination*, 113, 215-225
- Frechen, F.B., Schier, W., Linden, C.,** (2007). Pre-treatment of municipal MBR applications. *Desalination*, 231, 108-114.
- Gander, M.A., Jefferson, B. and Judd, S.J.,** (2000). Membrane Bioreactors For Use In Small Wastewater Treatment Plants: Membrane Materials And Effluent Quality. *Water Science and Technology*, 41, 205-211.

- Genkin, G., Waite, T., Fane, A., Chang, S.,** (2006). The Effect of Vibration and Coagulant Addition on the Filtration Performance of Submerged Hollow Fibre Membranes. *Journal of Membrane Science*, 281, 726–734.
- Goh, P.S., Ismail, A.F., Ng, B.C.,** (2013). Carbon nanotubes for desalination: performance evaluation and current hurdles. *Desalination*, 308, 2-14.
- Gomaa, H. G. and Rao, S.,** (2011). Analysis of Flux Enhancement At Oscillating Flat Surface Membranes. *Journal of Membrane Science*, 374, 59–66.
- Gryta, M., Karakulski, K., Morawski, A. W.,** (2001). Purification of Oily Wastewater by Hybrid UF/MD. *Water Research*, 35, 3665-3669.
- He, Y., Xu, P., Li, C. and Zhang, B.** (2005) High-concentration food wastewater treatment by an anaerobic membrane bioreactor. *Water Research*, 39, 4110-4118.
- Holbrook, R.D., Higgins, M.J., Murthy, S.N., Fonseca, A.D., Fleischer, E.J., Daigger, G.T., Grizzard, T.J., Love, N.G. and Novak, J.T.** (2004) Effect of alum addition on the performance of submerged membranes for wastewater treatment. *Water Env. Res.*, 76, 2699-2702.
- Jang, N., Ren, X., Choi, K. and Kim, I.S.,** (2005). Comparison of Membrane Bio- Fouling in Nitrification and Denitrification for the Membrane Bio-Reactor (MBR), Proceedings of IWA, Aspire, Singapore.
- Jefferson, B., Laine, A.L., Judd, S. J., Stephenson, T.,** (2000). Membrane Bioreactors and Their Role in Wastewater Reuse. *Water Science and Technology*, 41, 197-204.
- Judd, S.J.,** (2002a). The Development of the Membrane Bioreactor Technology for Sewage Treatment in the UK. School of Water Sciences, Cranfield University, UK.
- Judd, S. and Judd, C.,** (2006). The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. Elsevier, Oxford, US.
- Judd, S.J.,** (2001). A Review Of Fouling Of Membrane Bioreactors In Sewage Treatment. *Water Science and Technology*, 49, 229-235.
- Judd, S.J.,** (2002b). Submerged Membrane Bioreactors: Flat Plate or Hollow Fibre?. *Filtration and Separation*, 39(5), 30-31.
- Karakulski, K., Morawski, W.A., Grzechulska, J.,** (1998). Purification of Bilge Water by Hybrid Ultrafiltration and Photocatalytic Processes. *Separation and Purification Technology*, 14, 163-173.
- Kim, J.S. and Lee, C.H.** (2003) Effect of powdered activated carbon on the performance of an aerobic membrane bioreactor: comparison between cross-flow and submerged membrane systems. *Water Env. Res.*, 75, 300-307.
- Kitiş, M., Köseoğlu, H., Gül, N., Ekinci, F.Y.,** (2007). Membrane Bioreactors in Wastewater Treatment and Reuse. V. *National Conference of Environmental Engineering*. Türkiye, Isparta, Süleyman Demirel Üniversitesi, Ekim1-4.
- Kola, A., Ye, Y., Ho, A., Le-Clech, P., Chen, V.,** (2014). Transverse vibration as novel membrane fouling mitigation strategy in anaerobic membrane bioreactor applications, *Journal of Membrane Science*, 455, 320–329.
- Koyuncu, İ.** (2001). *Nanofiltrasyon Membranları ile Tuz Gideriminde Organik İyon Etkisi*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Köseoğlu, H.** (2011). *Kimyasal Eklentiler ile Membran Biyoreaktör Proseslerinde Tıkanma Kontrolü*. (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Lapidou, C.S. and Rittmann, B.E.** (2002) A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass. *Water Res.*, 36, 2711-2720.
- Le Clech, P., Chen, V., Fane, T.A.G.,** (2006). Review Fouling in Membrane Bioreactors used in Wastewater Treatment. *Journal of membrane science* , 284, 17-53.
- Li, H., Yang, M., Zhang, Y., Liu, X., Gao, M. and Kamagata, Y.** (2005) Comparison of nitrification performance and microbial community between submerged membrane bioreactor and conventional activated sludge system. *Water Sci. Technol* ,51, 193-200.
- Li, T., Law, A.W.K., Cetin, M., Fane, A. G.,** (2013). Fouling Control of Submerged Hollow Fibre Membranes by Vibrations. *Journal of Membrane Science*, 427, 230–239.
- Li, T., Law, A.W.K., Cetin, M., Fane, A. G.,** (2014). Submerged hollow fibremembrane filtration with transverse and longitudinal vibrations. *Journal of Membrane Science*, 455, 83–91.
- Low, S. C., Juan, H.H., Siong, L.K.,** (2005). A combined VSEP and MBR system. *Desalination*, 183, 353–362.
- Madaeni, S.S., Fane, A.G. and Wiley, D.E.** (1999) Factors influencing critical flux in membrane filtration of activated sludge. *J. Chem. Technol Biotechnol.*, 74, 539-543.
- Marrot, B., Martinez, A.B., Moulin, P., N., Roche, N.,** (2004). Industrial Wastewater Treatment in a Membrane Bioreactor: A Review. *Environmental*, 23, 59-68.
- Merz, C., Scheumann, R., El Hamouri, B., Kraume, M.,** (2007). Membrane Bioreactor Technology for the Treatment of Greywater from a Sports and Leisure Club. *Desalination*, 215, 37-43.
- Metcalf & Eddy,** (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York, USA, McGraw- Hill Companies Inc.
- Mezohegyi, G., Bilad, M. R., Vankelecom, I. F.,** (2012). Direct sewage up-concentration by submerged aerated and vibrated membranes, *Bioresource Technology*, 118, 1–7.
- Mulder, M.** (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*, Academic Publishers.
- Muller, E.B., Stouthamer, A.H., Verseveld, H.W., Eikelboom, D.H.,** (1995). Aerobic Domestic Wastewater Treatment In A Pilot Plant With Complete Sludge Retention By Cross-Flow Filtration. *Water Research*, 29, 1179-1189.
- Ng, L.Y., Mohammad, A.W., Leo, C.P., Hilal, N.,** (2013). Polymeric Membranes Incorporated With Metal/Metal Oxide Nanoparticles: A Comprehensive Review. *Desalination*, 308, 15-33.
- Nielson, P.H. and Jahn, A.** (1999) Extraction of eps. In Wingender, J., Neu, T.R. and Flemming, H.C.E. (eds.) *Microbial Extracellular Polymeric Substances*. Springer- Verlag-eds, Berlin.
- Park, D., Lee, D.S. and Park, J.M.** (2005) Continuous biological ferrous iron oxidation in a submerged membrane bioreactor. *Water Sci. Technol* ,51, 59-68.

- Pendergast, M. M. and Hoek, E. M. V.,** (2011). A Review Of Water Treatment Membrane Nanotechnologies. *Energy & Environmental Science* , 4 (6), 19-46.
- Ramesh, R. B.** (1997). Fermentation And Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, And Equipment. USA, Noyes Publications.
- Ridgway, H. F. and H. C. Flemming** (1996). Water Treatment Membrane Processes. South Africa, McGraw-Hill.
- Ripperger, S. and Altmann, J.,** (2002). Crossflow Microfiltration – State Of The Art. *Separation and Purification Technology*, 26, 19-31.
- Rosenberger, S., Kruger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U., Kraume, M.,** (2002). Performance of a Bioreactor with Submerged Membranes for Aerobic Treatment of Municipal Wastewater. *Water Research* , 36, 413-420.
- Scott, K.** (2006). Handbook of Industrial Membranes. England, Elsevier Advanced Technology.
- Smith, P.J., Vigneswaran, S., Ngo, H.H., Ben-Aim, R. and Nguyen, H.** (2005) Design of a generic control system for optimising back flush durations in a submerged membrane hybrid reactor. *J. Membrane Sci.*,255, 99-106
- Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., Brindle, K.** (2000). Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, IWA. Second Edition.
- Sun, Y., Huang, X., Chen, F. and Wen, X.** (2004) A dual functional filtration/ aeration membrane bioreactor for domestic wastewater treatment, Proceedings of Water Environment - Membrane Technology Conference, Seoul, Korea.
- Taşıyıcı, S.** (2009). Batık Membran Sistemleri İle İçme Suyu Arıtımı: Membran Tıkanıklığını Azaltmak İçin Farklı Yöntemlerin Kullanılması. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tomaszewska, M., Orecki, A., Karakulski, K.,** (2005). Treatment of Bilge Water Using a Combination of Ultrafiltration and Reverse Osmosis. *Desalination*, 185, 203-212.
- Türken, T.** (2013). Gümüş Nanopartiküller İle Kompozit İnce Boşluklu Fiber (Hollow Fiber) Membran Üretimi, Karakterizasyonu Ve Uygulaması. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Visvanathan, C., Aim, B.R., Parameshwaran, K.,** (2000). Membrane Separation bioreactors for wastewater treatment. *Critical reviews in Environmental Engineering and Technology*, 30, 1-4.
- Visvanathan, C., Yang, B.S., Muttamara, S. and Maythanukhraw, R.** (1997) Application of air backflushing technique in membrane bioreactor. *Water Sci. Technol.*, 36, 259-266.
- Yiğit, N. Ö.** (2007). Membran Biyoreaktörü ile (MBR) Evsel Atıksu Arıtımı. (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Yu, H.Y., Hu, M.X., Xu, Z.K., Wang, J.L. and Wang, S.Y.** (2005b) Surface Modification Of Polypropylene Microporous Membranes to Improve Their Antifouling Property in Mbr: NH₃ Plasma Treatment. *Sep. Purif. Technol.*, 45, 8-15.
- Yu, H.-Y., Xie, Y.-J., Hu, M.-X., Wang, J.-L., Wang, S.-Y. and Xu, Z.-K.** (2005a) Surface Modification of Polypropylene Microporous Membrane to Improve Its

Antifouling Property in MBR: CO₂ Plasma Treatment. *J. Membrane Sci.*, 254, 219-227.

Zhou H., Smith, D.W. (2002). Advanced technologies in water and wastewater treatment, *J. Environ. Eng. Sci.*, 1, 247-264.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Merve YILMAZ
Doğum Tarihi ve Yeri : Bakırköy – 12.09.1191
E-posta : merwedurmusgmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 2013
- **Yükseklisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı (Halen)