

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AVCI BAKTERİ BDELLOVİBRİO BACTERİOVORUS'UN ATIKSU
ARITIMINDA KULLANILAN MEMBRANLARIN TEMİZLENMESİNDE
BİYOLOJİK YÖNTEM OLARAK KULLANIMI

ÇİSEL ŞENGEZER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2015

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AVCI BAKTERİ BDELLOVİRİO
BACTERİOVORUS'UN ATIKSU ARITIMINDA
KULLANILAN MEMBRANLARIN
TEMİZLENMESİNDE BİYOLOJİK YÖNTEM OLARAK
KULLANIMI

ÇİSEL ŞENGEZER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. MELEK ÖZKAN

GEBZE
2015

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

USE OF PREDATOR

BACTERIUM, BDELLOVIBRIO BACTERIOVORUS,

AS A BIOLOGICAL METHOD FOR CLEANING OF

MEMBRANES USED FOR WASTEWATER

TREATMENT

ÇİSEL ŞENGEZER

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. MELEK ÖZKAN

GEBZE

2015



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/06/2015 tarih ve 2015/41 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan ÇİSEL ŞENGEZER'in tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Melek ÖZKAN

ÜYE

: Doç. Dr. Fatma Neşe KÖK

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Pınar ERGENEKON

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Membran biyoreaktörler (MBR) membran proses ve askıda büyüyen sistemleri birleştiren ve son zamanlarda atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir. MBR kullanımındaki en önemli problemlerden biri membranın kirlenmesi sonucu membrane ömrünün kısılması ve işletme maliyetlerinin artmasıdır. Membranların temizlenmesinde fiziksel ve kimyasal bir çok metod kullanılmaktadır. Kimyasal temizleme teknolojileri membranı temizlerken çevreye kimyasal atıklar bıraktıklarından dolayı temiz teknolojiler olarak görülmemektedirler. Henüz araştırma ve geliştirme aşamasında olan biyolojik temizleme stratejileri daha işlevsel, çevreye zararsız ve daha ekonomik olmaları nedeniyle gelecek vaatmektedirler. Bu tez çalışmasında, avcı bakteri *Bdellovibrio bacteriovorus*'un bakterileri parçalama aktivitesi membran yüzeyindeki biyofilm tabakayı temizleme ajanı olarak denenmiş ve bu bakterinin biyolojik temizleme metodu olarak kullanılabilme potansiyeli incelenmiştir. *B. bacteriovorus* diğer Gram (-) bakteri türlerini serbest veya bağlı formda besin olarak kullanabilen bir bakteri türüdür. *B. bacteriovorus*'un filtrasyon sırasında birçok bakteri türünün oluşturduğu biyofilm tabakayı temizlediği bilinmektedir. Bu tez çalışmasında farklı çamur yaşları (ÇY veya SRT) ve farklı hidrolik alıkonma (HRT) sürelerindeki aktif çamurlar farklı por boyutlarına sahip poli eter sülfon (PES) membranlardan dead-end hücresi (reaktör) kullanılarak filtre edilmiş ve kirlenen membranlar *B. bacteriovorus* ile temizlenmiştir. Bu avcı bakteri ile temizlendiklerinde MP005 ve UP150 membranlarının akılarında kontrol membranına kıyasla sırasıyla 3,2 L/m².h (LMH) ve 6,5 LMH'lık bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Atıksu hidrofobisitesinin *B. bacteriovorus* aktivitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Düşük hidrofobisiteye (33±6,3 %) sahip aktif çamurun süzüldüğü membran avcı bakteri ile temizlendiğinde membran kararlı akısında kontrole kıyasla 2,8 LMH'lık bir artış olduğu gözlemlenmiştir. *B. bacteriovorus* aktivitesinin MBR sistemlerinde kullanılan membranların temizlenmesi amacıyla yararlanılabilecek bir potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir. Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir (112Y156).

Anahtar Kelimeler : Membran Teknolojileri, Biyolojik Temizleme Yöntemleri.

SUMMARY

Membrane bioreactors (MBRs) are now prevalent favorable treatment technologies that combines membrane processes and suspended growth bioreactors and they are widely used for wastewater treatment. The most important problem of using MBRs is the fouling, which is caused by accumulation of the microorganisms and other organic and inorganic products on the membrane surface, and this shortens the life span of the membrane and increases operation cost. Physical and chemical methods are being used for the membrane cleaning. Chemical cleaning technologies are not regarded as clean because of dumping chemicals to the environment for the name of membrane cleaning. Biological control strategies are known to be more economical and environmentally friendly but these technologies are at research and development stage. In this thesis, activity of the predator bacterium, *Bdellovibrio bacteriovorus*, was tested on bacterial biofilm formed on the membrane surface and its potential as a biological cleaning strategy was introduced. This bacterium uses other Gram(-) bacteria as food in free or attached form. Wastewater sludge with different hydraulic retention time and sludge age was filtered through Poly(ether)sulphone (PES) membranes with different pore sizes using dead end reactor. When cleaned with *B. bacteriovorus*, 3,2 L/ m².h (LMH) and 6,5 LMH improvement (as compared to control) in the stable filtration values was obtained for MP005 microfiltration membrane and UP150 ultrafiltration membrane, respectively. Hydrophobicity of the wastewater sludge was found to be an important parameter for the activity of *B. bacteriovorus*. The predator bacteria was more efficient in the cleaning of the membrane used for filtration of the wastewater sludge with low hydrophobicity (33±6,3 %). 2,8 LMH improvement was achieved as compared to the control membrane in case of low hydrophobicity. *B. bacteriovorus* activity was shown to have a potential to be used as a cleaning agent for MBRs. This study was supported by TÜBİTAK (112Y156).

Key Words: Membrane Technologies, Biological Cleaning Technologies.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmasının konu tespitinden tamamlanmasına kadar geçen sürede her türlü bilgi ve deneyimleri ile bana yönveren ve ayrıca maddi manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Melek ÖZKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel aşamalarda yardım, destek ve tecrübelerini esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Faruk CAN ve eşi Tülay CAN'a, Hilal YILMAZ'a ve Merve AKAY ÇELİK'e teşekkür ederim.

Tezimin oluşumu ve düzenlenmesinde hiçbir zaman isteklerimi geri çevirmeyen ve her türlü destekleriyle motivasyonumu sağlayıp cesaretlendiren sevgili arkadaşlarım Arş. Gör. Çiğdem BALÇIK CANBOLAT ve Arş. Gör. Cevdet DOĞAN'a teşekkür ederim.

112Y156 No'lu Proje ile tezimi destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimin başlamasına vesile olan ve her aşamasında destek ve deneyimlerini benden esirgemeyen ÇAŞUR ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tezimin her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve bir an olsun yalnız bırakmayan öncelikle canım aileme, Merve Sezen KURT'a, Cansu SAKA'ya ve İsmail DOĞRU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. ATIKSU ARITIMI VE MEMBRAN SİSTEMLER	3
2.1. Membran Prosesler	4
2.1.1. Basınç Sürücülü Membran Prosesler	5
2.1.1.1. Mikrofiltrasyon Membranlar	6
2.1.1.2. Ultrafiltrasyon Membranlar	6
2.1.1.3. Nanofiltrasyon Membranları	7
2.1.1.4. Ters Osmoz (RO)	7
2.2. Filtrasyon Teknikleri	8
2.3. Membran Biyoreaktörler (MBR)	9
2.3.1. Membran Biyoreaktörlerin Avantaj ve Dezavantajları	10
2.4. Membran Kirlenmesi	11
2.4.1. Konsantrasyon Polarizasyonu	12
2.4.2. Kek Oluşumu	13
2.4.3. Por Tıkanması ve Por Daralması	14
2.4.4. Biyolojik Kirlenme	16
2.5. Membran Kirliliğini Etkileyen Parametreler	18
2.5.1. Membran Karakteristiği	18
2.5.2. Biyokütle Karakteristiği	19
2.5.3. Flok Karakteristiği	21
2.5.3.1. Flok Boyutu	21

2.5.3.2. Hidrofobisite	21
2.5.3.3. EPS ve SMP	22
2.5.4. İşletme Koşulları	23
2.5.4.1. Havalandırma ve Çapraz Akış Hızı	23
2.5.4.2. Çamur Yaşı (ÇY veya SRT)	24
2.6.Membran Temizleme Metodları	24
2.6.1. Temizleme Metodları	25
2.6.1.1. Fiziksel Temizleme Yöntemleri	26
2.6.1.2. Kimyasal Temizleme Yöntemleri	28
2.6.1.3. Fiziko-Kimyasal Temizleme Yöntemleri	29
2.6.1.4. Biyolojik Temizleme Yöntemleri	30
3. MATERYAL VE METOD	36
3.1. <i>E. coli</i> ve <i>Bdellovibrio Bacteriovorus</i> 'un Üretimi	36
3.2.Dead-End Sistem Membran Çalışmaları	36
3.3. <i>Bdellovibrio Bacteriovorus</i> 'un Aktif Çamura Eklenmesinin Çamur Parametrelerine ve Membran Kirlenmesine Etkisi	40
3.4.Atıksu Parametrelerinin Ölçümü	40
3.4.1. AKM Ölçümü	40
3.4.2. KOİ Ölçümü	41
3.5.Çökeltide ve Süzüntüde Karbonhidrat ve Protein Tayini	41
3.5.1. Protein Analizi	42
3.5.2. Karbonhidrat Analizi	42
3.5.3. Hidrofobisite Ölçümü	42
3.6.Atıksu Beslenmesi	43
3.7.Yüzey Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	45
4.1. <i>Bdellovibrio Bacteriovorus</i> üretimi	45
4.2. <i>Bdellovibrio Bacteriovorus</i> 'un Temizleme Etkisinin Membran Gözenek Büyüklüğü ile İlişkisi	45
4.2.1. MP005, MP010 ve UP150 Membranların Yüzeyinde Oluşan Mikrobiyel Tabakanın SEM Analizi	53

4.3.Çamur Hidrofobisitesinin, Karbonhidrat ve Protein İçeriğinin <i>Bdellovibrio Bacteriovorus</i> ile Temizleme İşlemine Etkisi	57
4.4. <i>Bdellovibrio Bacteriovorus</i> 'un Çamura Eklenmesinin Membran Filtrasyon Üzerindeki Etkisi	62
5. SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
A	: Membran alanı (m ²)
AKM	: Askıda katı madde
ÇO	: Çözünmüş oksijen
ÇY	: Çamur yaşı
EPS	: Hücre dışı polimerik maddeler
HRT	: Hidrolik bekleme süresi (saat)
J	: Akı (LMH)
J ₁	: Başlangıç akısı
J _k	: Kararlı akı
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
LMH	: Litre/m ² .saat
MATH	: Microbial adhesion to hydrocarbon
MBR	: Membran biyoreaktör
MF	: Mikrofiltrasyon
MWCO	: Moleküler ağırlık engelleme sınırı
PES	: Polieter sülfon
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SMP	: Çözünmüş mikrobiyal hücre ürünleri
SRT	: Çamur alıkonma süresi (saat)
UF	: Ultrafiltrasyon
V _t	: Toplam süzüntü hacmi (mL)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1:	Membran prosesin çalışma prensibi. 5
2.2:	Süzülen madde, gözenek çapı ve membran prosesleri arasındaki ilişki. 6
2.3:	a) Klasik filtrasyon b) Filtrasyon sırasında oluşan kek tabakasının zamanla değişimi. 8
2.4:	a) Çapraz akış filtrasyon b) Filtrasyon sırasında oluşan kek tabakasının zamanla. 9
2.5:	Konsantrasyon polarizasyonunun şematik gösterimi. 13
2.6:	Kek yapısı. 13
2.7:	Kek tabakasının şekilsel gösterimi. 14
2.8:	(a) Tam gözenek tıkanması, (b) Ara seviye tıkanma (c) Standart gözenek tıkanması, (d) Kek oluşumu. 15
2.9:	Por daralmasının oluşum şekilleri. 16
2.10:	EPS'nin bağlı EPS ve SMP fraksiyonu. 22
2.11:	Membran kirlenmesi ve temizlenme metodları. 26
2.12:	Geri yıkama. 27
2.13:	B. bacteriovorus yaşam döngüsü. 33
3.1:	Sterlitech Dead-end sistem düzeneği. 37
3.2:	Dead-end sistem işletim sisteminin şematik gösterimi. 37
3.3:	Filtrasyon işlem basamakları. 38
4.1:	HM tamponunda B. bacteriovorus'un aktivitesi. 45
4.2:	B. bacteriovorus ile temizlenen PES MP005 membranına ait akı değerleri. (Jk: kararlı akı, Vt: toplam süzüntü hacmi, LMH: L/m ² .sa) 47
4.3:	Kontrol PES MP005 membranına ait akı değerleri. 47
4.4:	B. bacteriovorus ile temizlenen PES MP010 membranına ait akı değerleri. 48
4.5:	Kontrol PES MP010 membranına ait akı değerleri. 49
4.6:	B. bacteriovorus ile temizlenen PES UP150 membranına ait akı değerleri. 50
4.7:	Kontrol PES UP150 membranına ait akı değerleri. 50
4.8:	MP005 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi. ($\Delta J_k = J_{kn} - J_{k1}$, Jk: kararlı akı, J1: ilk atıksu filtrasyonu akısı, Vt: toplam süzüntü hacmi). 51
4.9:	MP010 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi. 52

4.10:	UP150 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi.	52
4.11:	B. bacteriovorus ile temizlenen MP005 membranının SEM görüntüsü.	54
4.12:	Kontrol MP005 membranının SEM görüntüsü.	54
4.13:	B. bacteriovorus ile temizlenen UP150 membranının SEM görüntüsü.	55
4.14:	Kontrol UP150 membranının SEM görüntüsü.	55
4.15:	B. bacteriovorus ile temizlenen MP010 membranının SEM görüntüsü.	56
4.16:	Kontrol MP010 membranının SEM görüntüsü.	56
4.17:	SRT 10 gün B. bacteriovorus PES MP005 membranına ait akı değerleri.	59
4.18:	SRT 10 gün Kontrol PES MP005 membranına ait akı değerleri.	59
4.19:	SRT 10 gün MP005 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi.	60
4.20:	SRT 20 gün B. bacteriovorus PES MP005 membranına ait akı değerleri.	60
4.21:	SRT 20 gün Kontrol PES MP005 membranına ait akı değerleri.	61
4.22:	SRT 20 gün MP005 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi.	61
4.23	Çamura B. bacteriovorus eklenmesinin MP005 membran ile filtrasyona etkisi. (B. bacteriovorus: B. bacteriovorus içeren çamur ile filtrasyon, Kontrol: kontrol grubu, J: akı (L/m ² .sa))	63

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Membran proseslerin sürücü kuvvetlere göre sıralanması.	4
2.2: Mikroorganizmaları membran yüzeyine tutunmasını etkileyen faktörler.	17
2.3: Membran temizliğinde kullanılan kimyasallar ve temizleme mekanizmaları.	28
3.1: Atıksuyu beslemek için hazırlanan sentetik besiyer içeriği.	43
4.1: Dead-end filtrasyon deneylerinde kullanılan aktif çamurların özellikleri.	46
4.2: Dead-end filtrasyon deneylerinde kullanılan aktif çamurların özellikleri.	57
4.3: Çamur yaşına bağlı olarak hidrofobisite ve karbonhidrat ve protein içeriği.	58
4.4: <i>B. bacteriovorus</i> 'un çamur parametrelerine etkisi (EPS-SMP Karbonhidrat analizleri).	64
4.5: <i>B. bacteriovorus</i> 'un çamur parametrelerine etkisi (EPS-SMP Protein analizleri).	64
4.6: <i>B. bacteriovorus</i> 'un çamur parametrelerine etkisi (AKM-KOİ analizleri).	64

1. GİRİŞ

Evsel ve endüstriyel atıksu deşarjları ve kirlenmiş yağmur suları çevrede olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Atıksu arıtımında fiziksel, kimyasal, fiziko-kimyasal ve/veya biyolojik olmak üzere birçok farklı teknik kullanılmaktadır [Topare et al., 2011]. Son zamanlarda atıksu arıtımında membran sistemler özellikle de membran biyoreaktörler (MBR) yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bilindiği üzere MBR'lar membran proseslerin askıda büyüyen sistemlerle kombinasyonuna dayanmaktadır. Atıksu arıtımında MBR prosesler, yüksek çıkış suyu kalitesi sağlamaları ve membran maliyetlerini azaltmaları gibi avantajlarından dolayı artan bir popülerlik kazanmaktadır [Malaeb et al., 2013]. Membran sistemlerde en önemli problem filtrasyon sırasında oluşan kirliliğe bağlı olarak akıda meydana gelen azalmadır [Chang and Kim, 2005]. Atıksu filtre edildikçe partiküller ve bakteriyel hücreler membran yüzeyi üzerinde birikmektedir. Filtrasyon sonucu oluşan kirlenme ve biyofilm tabakası membran akısının azalmasına sebep olmaktadır. Oluşan biyofilm aynı zamanda kirlenmeyi alıkoyan ve arıtım kalitesini arttıran ikinci bir filtre mekanizması görevi de görmektedir [Hirani et al., 2014]. Ancak bu kirlenme, işletme ve membran temizleme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır, bu nedenle kontrol altında tutulmalıdır.

Fiziksel (geri yıkama, hava kabarcıklarıyla yıkama gibi) ve kimyasal metodlar (HCl, HNO₃, NaOCl gibi kimyasallar kullanılarak) membranlarda organik ve inorganik kirliliği gidermek için kullanılmaktadır. Biyolojik kontrol stratejileri hala araştırma-geliştirme aşamasındadır. Hücre dışı polimerik maddeler (EPS), protein ve DNA'nın enzimatik kontrolü, yetersayı etkisinin azaltılması (QQ: quorum quenching) inhibisyonu, mikrobiyal tutunmanın enerji ayrışmasıyla kontrolü, bakteriyofajlarla biyofilmin giderilmesi gibi başlıklar geliştirilmekte olan biyolojik kontrol stratejileri arasında sayılmaktadır [Xiong and Liu, 2010].

Membran sistemlerde en önemli problem olan kirlenmenin giderebilmesi için kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemler hem membrana hem de çevreye zarar vermektedir. Çevreye ve membrana daha az zarar vermek amacıyla biyolojik temizleme yöntemlerine yönelik çalışmaların sayısı artmıştır [Xiong and Liu, 2010].

Özellikle patojenik olan bakteri türleri tarafından oluşturulan biyofilm tabakası üzerinde etkili olan *Bdellovibrio bacteriovorus* üzerine son yıllarda birçok çalışma karşımıza çıkmaktadır. *B. bacteriovorus*'un doğadaki ana rolü tam olarak bilinmemekle birlikte bu bakteri türünün doğadaki mikrobiyal popülasyonu kontrol altında tuttuğu bir gerçektir. *B. bacteriovorus*'un *Aeromonas*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Salmonella* gibi birçok Gram (-) bakteri türünü verimli şekilde parçaladığı bilinmektedir [Dashiff et al., 2011]. Bu Gram (-) bakterilerin birçoğu patojendir ve aynı zamanda membran kirlenmesi üzerine büyük etkisi olan biyofilm oluşumunu meydana getirmektedirler. Literatürde *B. bacteriovorus*'un Gram (-) bakteri türlerinin oluşturduğu biyofilm tabakasını giderdiğine dair çalışmalar mevcuttur [Zhang et al., 2006].

Membran kirlenmesine neden olan biyofilm tabaka, Gram (-) bakterilerinin de içinde bulunduğu birçok bakteri türünü içerir. Nunez ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada *B. bacteriovorus*'un atıksularda fazla miktarda bulunan *E. coli*'yi parçalayarak sayısında düşüşe sebep olmasının yanı sıra *E. coli*'nin oluşturduğu biyofilm tabakasını da temizlediğini ortaya koymuştur [Núñez et al., 2005].

Gerçek atıksu ortamında oluşturulan biyofilm tabakası üzerinde *B. Bacteriovorus*'un etkili olup olmadığıyla ilgili henüz yapılmış bir çalışma mevcut değildir. Bu tez çalışmasında, *B. bacteriovorus*'un atıksu ortamında membran kirlenmesinde etkili olarak kullanılabilecek bir membran temizleme yöntemi olup olmadığı araştırılmıştır.

2. ATIKSU ARITIMI VE MEMBRAN SİSTEMLER

İnsanlar önceleri atıklarını yaşam alanlarından uzaklaştırmaya çalışmış, ilerleyen yıllarda atıkları sadece yaşam alanlarından uzaklaştırma ile sorunun çözülmediğini, yaşadıkları çevreyi olumsuz etkilediğini anlamışlardır. Böylece atık suların alıcı ortamı kirletmeden verilmesi gerektiği farkındalığı oluşmuş ve arıtma kavramının ilk temelleri atılmıştır. Doğal arıtma ile başlayan süreç fiziksel arıtma, aktif çamur sistemleri, anaerobik arıtma, ileri oksidasyon sistemleri ve membran sistemler ile devam etmiştir [Salt and Dinçer, 2006].

Günümüzde atık suyun ve mevcut yerin özelliklerine göre en uygun arıtma teknolojisi seçilerek atık suların arıtılarak alıcı ortama verilmesi sağlanmaktadır. Bir yandan çevreye zarar vermeden atık suların uzaklaştırılması sağlanırken diğer taraftan daha verimli ve daha ekonomik sistem arayışında membran proses uygulamaları öne çıkmaktadır [Yıldız et al., 2013]. Son yıllarda gerek deşarj standartlarının daraltılması gerekse su kaynaklarının kalitesinin bozulmasıyla suların tekrar kullanılma ihtiyacının ortaya çıkması, membran proses kullanım uygulamalarını gerekli kılmaktadır [Yıldız et al., 2013].

Atıksu arıtımının prensibi, atıksuda bulunan organik kirleticilerin, mikroorganizmalar tarafından besin ve enerji kaynağı olarak kullanılmak suretiyle atıksudan uzaklaştırılmalarıdır. Biyokimyasal süreçlerin sonunda, ayrışabilen organik madde elektron verip yükseltgenerek (oksitlenme) kararlı son ürün olan CO₂ ve H₂O'ya dönüşür. Dolayısı ile ayrışabilen organik maddelerin bir kısmı biyokütle, diğer kısmı da enerjiye dönüşür. En yaygın kullanılan yöntem aktif çamur sistemleridir [Gupta, 2004].

1960'lı yıllarda uygulanmaya başlanan membran prosesler ilk olarak deniz suyunun demineralizasyonu için kullanılmış, son 30 yılda membran teknolojilerinin gelişmesiyle membran prosesleri deniz suyu arıtımı, içme suyu eldesi ve atık su arıtımı gibi alanlarda kullanılmaya başlanılmıştır [Strathmann, 2011]. Membran prosesler geleneksel sistemlere göre enerji tasarrufu, ortalama maliyet-performans oranı ve modülerlik gibi birçok avantajlara sahiptir [Salt and Dinçer, 2006].

2.1. Membran Prosesler

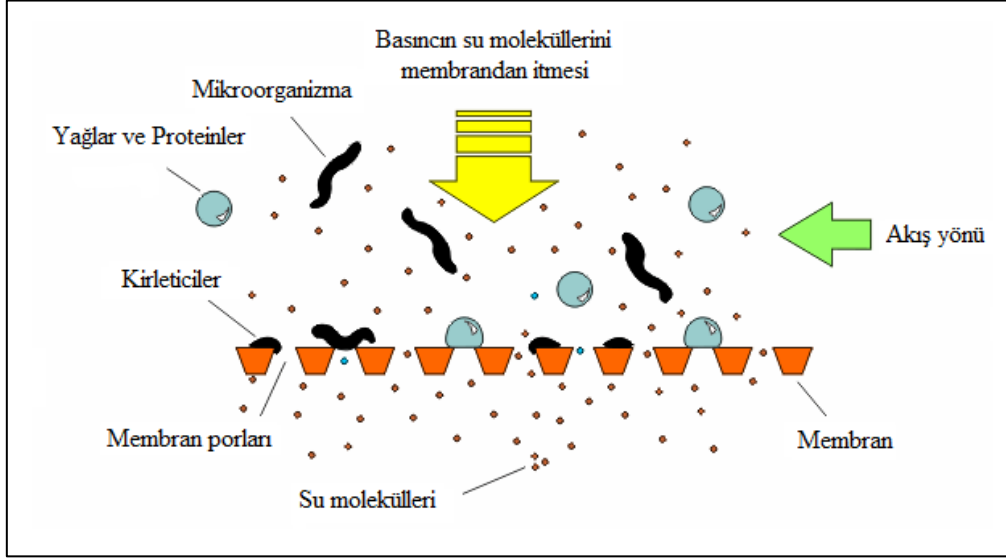
Membran prosesler önceleri deniz ve kuyu suyu arıtımı için kullanılırken, endüstrinin gelişmesine paralel olarak farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Membran prosesler, deniz ve kuyu suyu arıtımının yanı sıra, atık su arıtımı, saf su ve yumuşak su üretimi, gıda ve ilaç sanayinde üretimde ayırma işlemleri, petrokimya endüstrilerinde gaz ayırımında kullanılmaktadır [Köseoğlu, 2005].

Genel olarak membranlar, iki faz arasındaki yığın hareketine karşı seçici geçirgen yapıda olan bir bariyerdir. Membranda ayırma işlemi Tablo 2.1’de gösterildiği üzere basınç farkı (ΔP), konsantrasyon farkı (ΔC), sıcaklık farkı (ΔT) ve elektriksel potansiyel farkına (ΔE) göre yapılmaktadır [Mulder, 1996].

Tablo 2.1: Membran proseslerin sürücü kuvvetlere göre sıralanması.

Basınç farkına göre ΔP	Konsantrasyon farkına göre ΔC	Sıcaklık farkına göre ΔT	Elektrik potansiyel farkına göre ΔE
Mikrofiltrasyon (MF)	Pervaporasyon	Sıcaklığa dayalı osmoz	Elektrodiyaliz
Ultrafiltrasyon (UF)	Gaz ayrımı	Osmoz membran	-
Nanofiltrasyon (NF)	Diyaliz	Distilasyon	-
Ters osmoz (RO)	Sıvı membranlar	-	-

Ayırma işlemi gözenekli membranlar boyut, şekil ve yük ayırımına göre, gözeneksiz membranlar ise sorpsiyon ve difüzyon modeline göre kontrol ederler. Membran performansı seçicilik ve akı parametreleriyle belirlenir [Nath, 2008]. Membranlarda ayırma işleminde, sürücü kuvvetlerin etkisiyle besleme akımı iki ayrı akıma ayrılır. Membrandan geçen akım “süzüntü”, geçemeyen akım ise “konsantre” olarak adlandırılır [Kaleli, 2006]. Membran ayırma mekanizmasının basitçe işleyişi Şekil 2.1’de resmedilmiştir [Mulder, 1996].

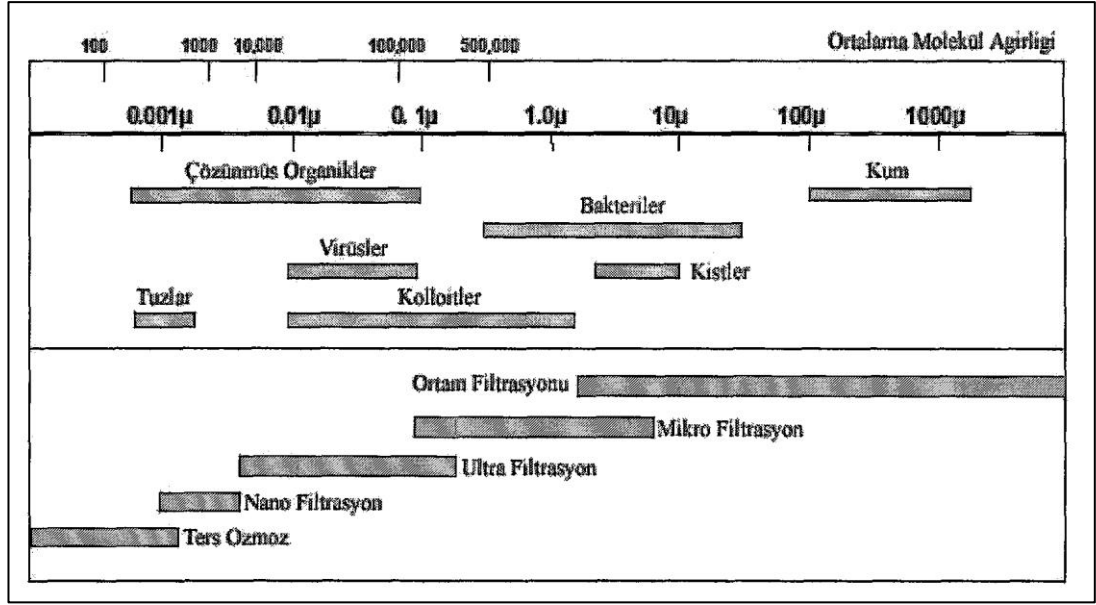


Şekil 2.1: Membran prosesin çalışma prensibi.

2.1.1. Basınç Sürücülü Membran Prosesler

Endüstrilerde en çok kullanılan membran sistemler basınç uygulamalı olanlardır. Bunlar por boyutlarına bağlı olarak ters osmoz (RO), nanofiltrasyon (NF) ultrafiltrasyon (UF) ve mikrofiltrasyon (MF)'dan oluşmaktadır. Bu yöntemlerde ayırma, basınç sürücü kuvvet etkisiyle molekül boyutuna veya molekül kütlesine göre olmaktadır [Kaykıoğlu, 2010].

Basınç sürücülü sistemler farklı gözenek boyutlarına sahip olduklarından farklı maddeleri tutabilme özelliğine sahiptirler. Şekil 2.2'de filtre edilen maddelerin membranlara göre alıkonma durumu belirtilmiştir [Köseoğlu, 2005].



Şekil 2.2: Süzülen madde, gözenek çapı ve membran prosesleri arasındaki ilişki.

1. Mikrofiltrasyon Membranlar

MF membranlar genellikle simetrik por yapısına sahip, por boyutu 0.1-10 µm arasında olan membranlardır. Membrana uygulanan basınç 1-3 bar civarındadır [Strathmann, 2011].

Bakterileri ve virüslerin bir kısmını, aerosolleri, toz ve partiküllerin tutulmasını sağlayan bir kaba filtre olarak düşünülebilir. MF membranların atıksu arıtımındaki en yaygın kullanımı ise NF ve RO membranlardan önce bir ön arıtım aracı olarak kullanılmasıdır. Bu sayede membranların daha ekonomik kullanımı sağlanmış olur [Koyuncu, 2001].

Mikrofiltrasyon membranları, saflaştırma, ayırma (meyve suları, şarap ve bira ham maddeleri), sterilizasyon ve konsantre etme işlemlerinde kullanılabilir [Koyuncu, 2001].

2. Ultrafiltrasyon Membranlar

Ultrafiltrasyon membranların gözenek boyutu 0.1-0.01 µm'dir. Por boyutu MF membrana göre daha düşüktür ve maddelerin tutulma seviyeleri moleküler ağırlık engelleme sınırı (MWCO) değeri ile ifade edilir. UF membranlarda tutma işlemi

moleküler büyüklüğe bağlı olmakla beraber, şekle ve iyonik yüke de bağlıdır. Genellikle makromoleküller ve kolloidler tutulur. Sisteme uygulanan basınç 1-10 bar arasındadır [Strathmann, 2011].

MF membranlar gibi NF ve RO öncesi kirlilik yükünü azaltmak için kullanılabilir. UF başlıca, gıda, içecek, metalurji, tekstil (indigo), eczacılık, otomotiv, su arıtımı vb. birçok endüstriyel alanda ve atıksuyun arıtılmasında, ön arıtma amaçlı olarak kullanılmaktadır [Koyuncu, 2001].

3. Nanofiltrasyon Membranları

Nanofiltrasyon membranları, ters osmoz gibi moleküler ağırlıkları düşük inorganik tuzların, glikoz, sakaroz gibi küçük organik moleküllerin (çapı 0,001 μm 'den büyük maddelerin gideriminde) çözüldüğüden ayrılması amacıyla kullanılmaktadır. Nanofiltrasyon membranlarının MWCO değeri, 100-300 aralığında değişmektedir. Nanofiltrasyon membranları, ters osmozdan daha düşük basınçlarda (10-20 bar) çalışmaktadır [Strathmann, 2011].

Membranlarda, Na^+ , Cl^- gibi tek değerlikli iyonların tutulma oranı düşük iken, Ca^{+2} , CO_3^{-2} gibi çok değerlikli iyonların tutulma oranı çok yüksektir. Buna ek olarak mikrokirleticilerin, herbisitlerin, insektisitlerin ve pestisitlerin, şeker ve boya maddeleri gibi düşük moleküler ağırlığa sahip mikro çözümlerin de tutulma oranları çok yüksektir. Nanofiltrasyon membranları, yüzeysel sulardan sertlik gideriminde, organik madde gideriminde, kuyu sularından toplam çözülmüş katı ve nitrat gideriminde ve ayrıca pestisit gideriminde de kullanılmaktadır [Koyuncu, 2001].

4. Ters Osmoz (RO)

Ters osmoz membranları molekül ağırlığı çok düşük olan bütün çözülmüş organik ve inorganik maddeleri çözüldüğüden ayırmak amacıyla kullanılmaktadır. Ters osmoz 0,0001 ile 0,001 μ (1-10 $^{\circ}\text{A}$) arasındaki partikülleri tutabilmektedir [Strathmann, 2011].

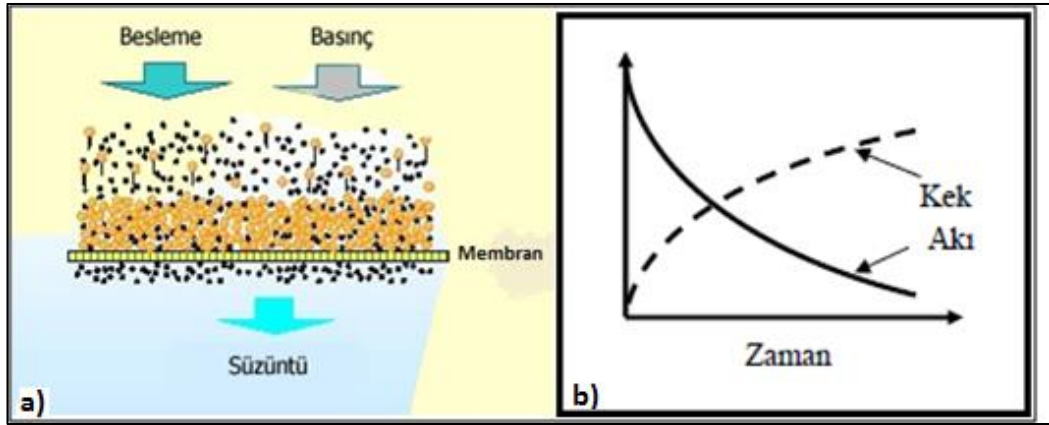
Başlangıçta sadece deniz suyu ve kuyu suyu arıtımında kullanılan ters osmoz prosesleri zamanla endüstrilerde farklı proseslerde kullanılmaya başlanmıştır. Ters

osmoz prosesi tekstil atıksularından renk giderimi, elektro kaplama endüstrisinde metal geri kazanımı, mezbaha atıksularının arıtımı, gıda endüstrisinde geri kazanım, sızıntı suyu arıtımında, kâğıt endüstrisinde renk giderimi, demir çelik endüstrisinde, madencilikte, tarımsal drenaj sularının tekrar kullanılması vb. birçok endüstride kullanılmaktadır (Koyuncu,2001).

2.2. Filtrasyon Teknikleri

Membran proseslerde genellikle klasik (dead-end) filtrasyon ve çapraz akışlı (cross-flow) filtrasyon olmak üzere iki tür filtrasyon tekniği kullanılmaktadır.

Klasik filtrasyonda, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi besleme çözeltisi membran yüzeyine dik olarak uygulanır [Cardew and Le, 1998]. Alıkonan partiküller ve çözünmüş maddeler membran yüzeyinde zamanla birikerek kek tabakası oluşturur. Akının dik uygulanması kek tabakası oluşumunu çapraz akış uygulamasına göre daha kısa sürede meydana getirir sonuç olarak akı değerinde azalma meydana gelir [Cardew and Le, 1998].

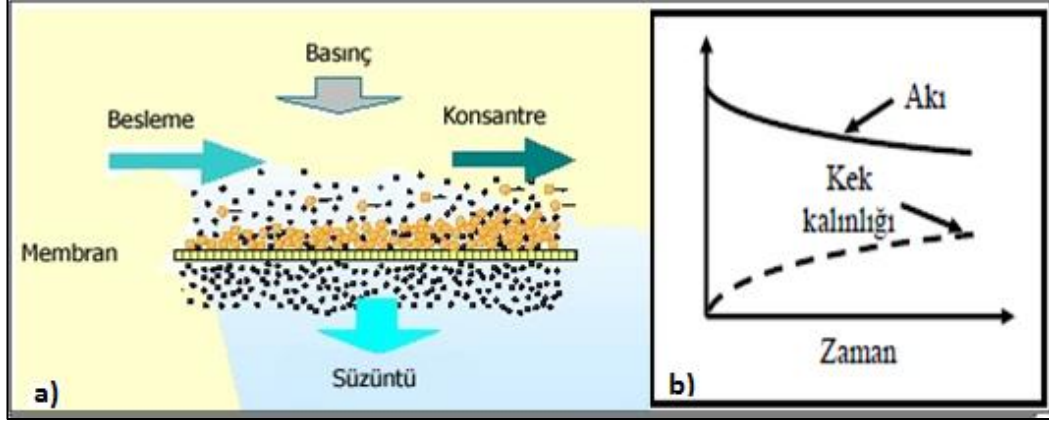


Şekil 2.3: Klasik filtrasyon ve oluşan kek tabakasının zamanla değişimi.

a) Klasik filtrasyon b) Filtrasyon sırasında oluşan kek tabakasının zamanla değişimi.

Çapraz akış filtrasyonunda ise askıda ya da çözünmüş maddelere (besleme akısına) membran yüzeyine paralel doğrultuda basınç uygulanarak molekül ağırlıklarına ve molekül büyüklüklerine göre ayrılmasını sağlayan bir ayırma tekniğidir. Çapraz akış uygulamasında kek tabakası daha geç oluşmakta ve kek

kalınlığı belli seviyelerde tutulmaktadır. Kek tabakasını belli seviyede tutması uzun dönem işletmelerde kirlenmeyi etkileyen önemli bir parametre olduğundan endüstrilerde klasik filtrasyona göre daha çok tercih edilen bir tekniktir [Ripperger and Altmann, 2002]. Şekil 2.4’de çapraz akış filtrasyonunun zamanla akıdaki değişimi gösterilmiştir [Cardew and Le, 1998].



Şekil 2.4: Çapraz akış filtrasyon ve oluşan kek tabakasının zamanla değişimi.
a) Çapraz akış filtrasyon b) Filtrasyon sırasında oluşan kek tabakasının zamanla değişimi.

2.3. Membran Biyoreaktörler (MBR)

Aerobik biyolojik arıtma sistemlerinde askıda büyüyen mikroorganizmalar, atık sularda bulunan organik maddelerin büyük bir kısmını daha az zararlı inorganik maddeler olan karbondioksit (CO_2), su (H_2O) ve yeni biyokütleyle çevirirler. Organik madde, mikrobiyal büyüme için hem karbon kaynağı hem de enerji kaynağı olarak görev yapar ve yeni hücrelerin sentezinde kullanılır [Orhon, 1997]. Atıksuların biyolojik olarak verimli bir şekilde arıtılması, bu mikroorganizmaların atıksu içerisindeki kirletici organik maddeleri verimli bir şekilde parçalayarak yeni hücreler meydana getirmesini ifade eder. Aktif çamur kültüründe genellikle bakteriler, mantarlar, protozoalar ve rotiferler bulunur. Bu mikroorganizmaların her biri hem atıksuyun özellikleri hem de aktif çamur prosesinin verimi ve işletme süreci hakkında bilgi verir. Çünkü aktif çamur içinde bulunan bakteri türleri atıksuyun özelliklerine ve çevre şartlarına bağlı olarak baskın hale geçerler [Wanner, 1994].

Membran biyoreaktörler, bir membran yardımı ile arıtılmış su ve biyokütlenin fiziksel olarak ayrıldığı süspansiyon büyüme modundaki biyokimyasal oksidasyon (aktif çamur gibi) prosesidir. Konvansiyonel aktif çamur prosesinde iki ayrı tankta gerçekleşen biyokimyasal oksidasyon (havalandırma tankında) ve su/biyokütle ayrımı (sedimentasyon ile çökeltim tankında) MBR'larda tek tankta gerçekleşmektedir [Liu et al., 2000].

Aynı tank içerisinde havalandırmayla aktif çamur homojen tutulmakta bu esnada tank içerisine gömülü olan membrana vakum uygulanarak arıtılmış su çekilmektedir. Arıtılmış su membrandan vakum yardımıyla çekildiğinden tanktan biyokütle kaçıışı olmamaktadır. Genellikle mikrofiltrasyon (yaklaşık 0,2 µm gözenek büyüklüğü) ya da ultrafiltrasyon (yaklaşık 0,01 µm gözenek büyüklüğü) membran üniteleri MBR'larda kullanılmaktadır. Arıtma sırasında zamanla membran üzerinde oluşan kek/kirlenme tabakası ek bir filtrasyon tabaka etkisi göstererek su/biyokütle ayrımını, askıda katı madde ve mikroorganizma giderme verimini arttırmaktadır [Judd, 2010].

Reaktör tabanından verilen havalandırmayla hem biyokütlenin oksijen ihtiyacı hedeflenir hem de membran yüzeyinde biriken maddelerin birikimi engellenmeye çalışılır. Membran üretim maliyetlerinin gittikçe düşmesi ve MBR uygulamalarının gün geçtikçe artmasına rağmen membranların tıkanması bu yeni teknoloji alanında üzerinde en çok çalışılan konu ve dikkate alınması gereken husustur. Membranların tıkanması pompaj ve havalandırma gereksinimlerini etkileyip sistem maliyetini önemli ölçüde arttırır [Yiğit, 2007].

2.3.1. Membran Biyoreaktörlerin Avantaj ve Dezavantajları

MBR'ların en önemli avantajlarından birisi biyokütlenin tankta tutulma işleminin çökelme özelliklerinden bağımsız olmasıdır. Dolayısıyla, konvansiyonel sistemlerde son çökeltme havuzu işletiminde problem arz eden çökelemeyen biyokütle (filamentli floklar nedeniyle) durumu MBR'larda yoktur [Ortiz et al., 2007].

MBR'lerde 12-15 g/L yüksek değerlerinde AKM (askıda katı madde) (konvansiyonel sistemlerde 2-4 g/L) ile çalışıldığından havalandırma havuzu dizaynı

için gerekli olan hidrolik bekleme süresi (HRT) azalır, dolayısıyla arazi gereksinimi ve ilk yatırım maliyeti düşürülmüş olur [Judd, 2004].

MBR'larda çamur yaşı kontrolü tanklardan biyokütle kaçıışı olmadığından konvansiyonel sistemlere göre çok daha kolaydır. Tüm biyokütle tank içerisinde tutulur [Lesjean et al., 2004]. MBR'lar yüksek AKM konsantrasyonlarında çalıştırılmalarından dolayı yüksek ÇY'larında (ÇY>20 gün) işletim yapılabilmektedir. Yüksek ÇY yeni biyokütle oluşumunu azaltır (iç solunumdan dolayı) ve bertaraf edilmesi gereken atık biyokütle miktarı azaltılmış olur. Ayrıca toksik organikleri parçalayabilen mikroorganizmaların yüksek ÇY'larında daha iyi çalışabilmeleri çok toksik yüklemelere karşı dayanıklı olmalarını sağlamaktadır [S. Chaize, 1991].

Arıtılmış su konvansiyonel sistemlere göre çok daha yüksek kalitededir. Oluşan atık çamur diğer konvansiyonel sistemlerde olduğu gibi nihai bertaraf için proses edilir ve gübre olarak tarım ve rekreasyon arazilerinde kullanılabilir. Dahili sistem MBR'larda tüm arıtma aşamaları (havalandırma, sıvı/biyokütle ayrımı ve fiziksel dezenfeksiyon) tek bir tankda gerçekleşmesi ve işletimde olan konvansiyonel aktif çamur sistemlerinin kolaylıkla MBR sistemlerine dönüştürülebilmesi sistemleri çekici hale getirmiştir [Fane, 2002].

Membranların tıkanma problemi ve membran modüllerinin yüksek yatırım maliyeti MBR proseslerin en önemli dezavantajlarıdır. Ayrıca MBR arıtma prosesinin tek tankta gerçekleşmesi sistemin mekanik kontrolü açısından konvansiyel sistemlere göre daha karmaşık görülmektedir [Yiğit, 2007].

2.4. Membran Kirlenmesi

Kirlenme membran tarafında tutulan, kolloid, tuz, makromolekül gibi partiküllerin membran yüzeyinde veya gözeneklerinde birikmesidir. Birikmenin artması akının devamlı suretle azalmasına yol açar. Meydana gelen kirlenme uygulanan sisteme göre değişir. Kirlenme en basit anlamda, yüzeyde bir katı kek oluşması, ilave bir direnç oluşturmasıdır. Kirlenme ile birlikte akıda azalma meydana gelir. Akının kararlılığı işletme maliyeti açısından önemlidir [Yıldız, 2000].

Kirleticilerin membran gözenekleri içinde veya membran yüzeyi üzerinde birikmesi, bağlanması veya adsorpsiyonu membranın kirlenmesine yol açar [Zhou

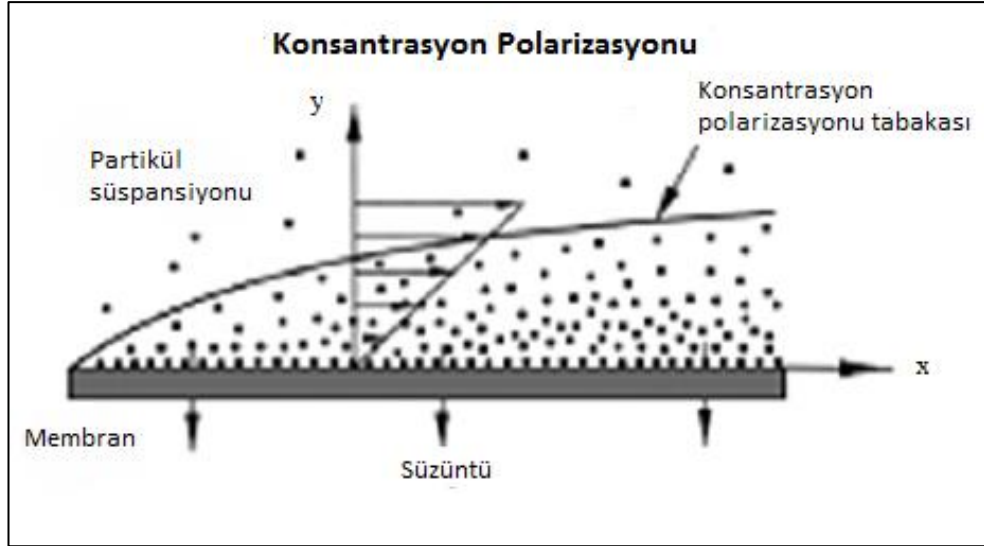
and Smith, 2002]. Membran kirlenmesi nedeniyle meydana gelen akı azalması, kütle taşınımı olayına bağlı olarak, membran gözenekleri veya yüzeyinde biriken maddeler nedeniyle zamana bağlı olarak süzüntü akısı miktarındaki azalmadır. Literatürde akı azalmasında etkili olan 5 farklı mekanizma tanımlanmaktadır [Aydiner, 2006]. Bunlar;

- i) konsantrasyon polarizasyonu
- ii) kek tabakası oluşumu (cake layer)
- iii) por tıkanması (pore blockage)
- iv) por daralması (pore constriction)
- v) biyolojik (biofouling) kirlenmedir.

Membran sistemlerde kirlenme membran akısının azalmasına, membran karakter ve yapısının değişmesine neden olur. Ayrıca besleme sıvısının içeriğini ve prosesin operasyon süresini de etkileyerek işletme maliyetlerini artmasına sebep olmaktadır [Strathmann, 2011].

2.4.1. Konsantrasyon Polarizasyonu

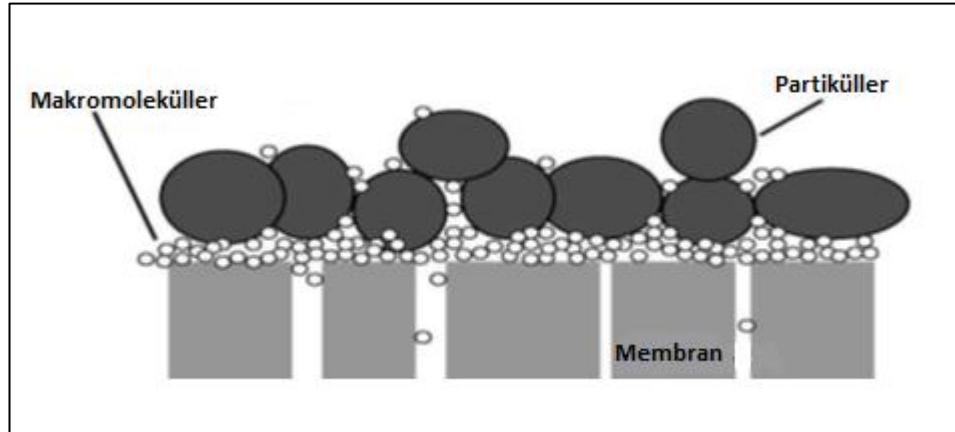
Atıksuyun filtrasyonu sırasında içermiş olduğu maddelerin membrana doğru sürüklenmesi ile membran yüzeyinde membran gözenek boyutundan daha büyük moleküller tutulmaktadır. Zaman ilerledikçe, membrandan geçemeyen maddelerin membran üzerinde birikmesi sonucu, membrana yakın bölgelerde besleme çözeltisinden çok daha fazla derişime sahip bir ortam oluşur ve membran yüzeyine yaklaştıkça bu derişim artarak membran üzerinde maksimuma ulaşır. Bu durum membran yüzeyinden ana çözeltiye bir geri akım oluşturur. Bu olaya “konsantrasyon polarizasyonu” adı verilir. Konsantrasyon polarizasyonunu Şekil 2.5’de şematik olarak gösterilmiştir [Chen et al., 2004].



Şekil 2.5: Konsantrasyon polarizasyonunun şematik gösterimi.

2.4.2. Kek Oluşumu

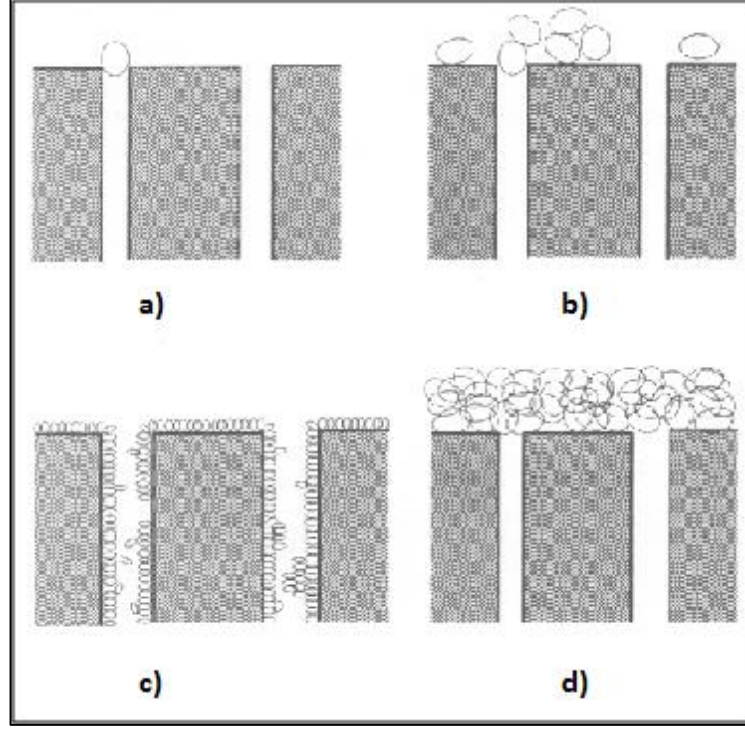
Kek oluşumu; partiküllerin filtrasyon sırasında porların tıkanmasının ardından partiküllerin üst üste yığılmasıyla hiç boş yer kalmayacak şekilde Şekil 2.6'de gösterildiği üzere tabaka oluşturmasıdır [Bowen et al., 1995].



Şekil 2.6: Kek yapısı.

Kek filtrasyonu, membranda süzülme için ek bir direnç oluşturur. Kek tabakası birçok ve farklı kimsyasal inert veya aktif kolloid madde içerir. İlk aşamada inert kolloidlerin meydana getirdiği Şekil 2.7'de oluşumu anlatılan kek tabakası birçok

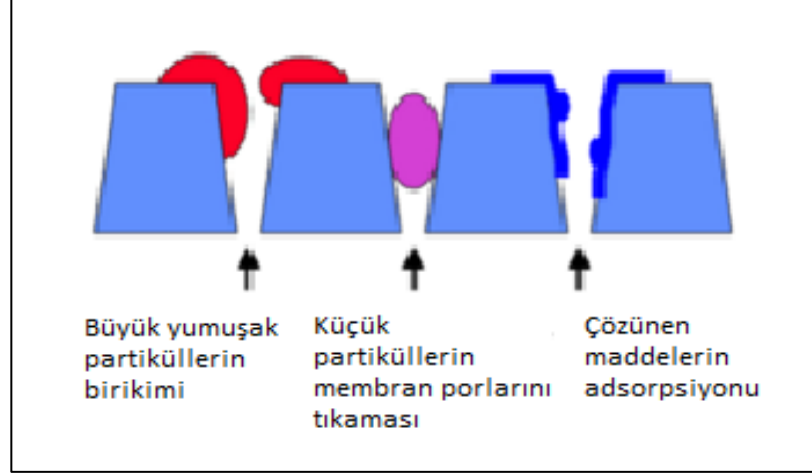
geçebilmektedir [Wu et al., 2011]. Tıkanma tam gözenek tıkanması, ara seviye tıkanma, standart gözenek tıkanması ve kek filtrasyonu olarak dört başlık altında incelenebilir (Şekil 2.8), [Bowen et al., 1995], [Yildiz et al., 2003].



Şekil 2.8: Membranda tıkanma şekilleri a) Tam gözenek tıkanması, b) Ara seviye tıkanma c) Standart gözenek tıkanması, d) Kek oluşumu.

Filtrasyonun ilk aşamalarında, kek tabakası tamamiyle oluşmamıştır. Kolloidal ve çözülmüş maddeler bir engel görevi gören kek tabakası oluşmadan korunmasız olan membran porlarına yerleşirler. Kek tabakası oluşmaya başladıkça, por daralma direncinin artmasında zamanla azalma görülür. Kek tabakası tarafından makromoleküller tutulur. Bu durum kek tabaka ön filtrasyon etkisi (pre-filter effect) olarak adlandırılır. Makromoleküller tutulurken daha küçük boyuttaki kolloidal maddeler ve çözülmüş materyaller porların içine girerek buralarda tutunurlar ve por daralmasına yol açarlar. Kek tabakasının por daralmasına bir ön filtrasyon görevi gördüğü durum da mevcuttur. Tabaka zamanla sıkışıp daha sıkı ve kararlı hale geldiği durumda daha fazla çözülmüş madde alıkonulur ve böylece por daralmasına sebep olan çözülmüş madde miktarında azalma görülür [Wu et al., 2011].

Geri dönüşümsüz tıkanma genel olarak kek tabaka oluşumu kaynaklı değil por daralması kaynaklı meydana gelmektedir [Zhu et al., 2012]. Şekil 2.9’da tipik bir por daralması görülmektedir.



Şekil 2.9: Por daralmasının oluşum şekilleri.

2.4.4. Biyolojik Kirlenme

Atıksu arıtımında mikroorganizmaların %99,9’u giderilse bile kalan hücreler besleme suyundaki besi maddeleri sayesinde büyümeye ve çoğalmaya devam eder. Bu nedenle biyolojik kirlilik membran proseslerin en önemli bölümünü oluşturur. Biyolojik kirlilik organik kirliliğin canlı kısmı olarak düşünülebilirken, mikrobiyal hücrelerin artıklarından kaynaklanan organik maddelerin sebep olduğu kirlilik ise kirliliğin cansız kısmını oluşturur [Nguyen et al., 2012]. Tüm membran kirliliğine %45’ten daha fazla oranda katkıda bulunan biyolojik kirlilik nanofiltrasyon ve ters osmoz membranlardaki kirliliğin ana problemi olarak bilinmektedir [Komlenic, 2010], [Vrouwenvelder and van der Kooij, 2003].

Biyolojik kirliliğin membran sistemlerde yarattığı problemleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Membran yüzeyini kaplayan biyofilm tabakası nedeniyle membran akısının azalması,

- Oluşan biyofilm direnci nedeniyle aynı proses verimi için gerekli sürücü kuvvet ihtiyacının artması,
- Artan biyofilm direnci ve azalan akıyı yenmek amacıyla daha yüksek basınç uygulanması gerektiği için enerji ihtiyacının artması [Murphy et al., 2001].

Mikrobiyal hücrelerin membran yüzeyine tutunması membran biyolojik kirlenmesinin ilk aşamasıdır ve bu biyofilm tabakasının oluşumuna yol açmaktadır. Biyofilm bakteri, alg, protozoa ve mantar gibi farklı birçok çeşitte mikroorganizmayı içerir. Başlangıçta mikrobiyal hücre tutunması elektrokinetik ve hidrofobik etkileşimler nedeniyle gerçekleşir ve genellikle bunu membran yüzeyi üzerinde absorbe olmuş organizmalar veya atık sudaki çözülebilen besi maddeleri sayesinde hücre büyümesi ve çoğalması takip eder. Mikroorganizmalar tarafından atılmış hücre dışı polimerik maddeler (EPS) hücrelerin membranının iç yapısı içerisine bağlanmasına yardımcı olur ve membran yüzeyinde mikrobiyal kolonileşmeye neden olur. Membran materyali, membran yüzey pürüzlülüğü, hidrofobisite ve membran yüzeyinin yükü mikrobiyal tutunmayı etkileyen en önemli faktörlerdir (Tablo 2.2) [Nguyen et al., 2012].

Tablo 2.2: Mikroorganizmaları membran yüzeyine tutunmasını etkileyen faktörler.

Mikroorganizma	Yüzey	Besleme Suyu
Türler	Kimyasal İçeriği	Sıcaklık
Karışık Popülasyon Oluşumu	Yüzey Yükü	pH
Popülasyon Yoğunluğu	Yüzey Gerilimi	Çözünmüş Organik Madde
Büyüme Fazı	Hidrofobisite	Çözünmüş İnorganikler
Besin	Film Tabaka	Askıda Maddeler
Hidrofobisite	Pürüzlülük	Viskozite
Yükler	Porozite	Kesme Kuvvetleri
Psikolojik Tepkiler	-	Sınır Tabaka
-	-	Akı

Membran yüzeyinde biyofilm oluşumu olarak da değerlendirilebilen biyolojik kirlenme sırasıyla; organik türlerin ve askıda partiküllerin membran yüzeyine tutunması, mikrobiyal hücrelerin şartlanmış tabakaya taşınması, hücrelerin membran yüzeyine tutunması, tutunan mikroorganizmaların büyümesi ve biyofilmin gelişmesi aşamalarını kapsar. Biyofilm büyümesinin kesme kuvvetleri tarafından sınırlandırılması kararlı kirlilik direncini oluşturur [Nguyen et al., 2012]. Kararlı kirlilik direncinin membrandan giderilmesi oldukça zordur, kararlı kirliliğin giderilmesi için uygulanan kimyasal maddeler membran temizleme maliyetini arttırmaktadır [Flemming, 1997].

2.5. Membran Kirliliğini Etkileyen Parametreler

2.5.1. Membran Karakteristiği

Membran kirliliğine etki eden parametreleri fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki grupta incelemek mümkündür [Le-Clech et al., 2006].

- Fiziksel Parametreler: Por boyutu dağılımı, porozite/pürüzlülük;

Por boyutunun membran kirlenmesi üzerine etkisi, besleme suyu karakteristiği ve özellikle partikül boyutu dağılımıyla doğrudan ilişkilidir. Partikül boyutu membran porlarından daha küçükse por tıkanması veya por daralması görülmektedir. Bu tür kirlenme daha çok daha büyük por boyutuna sahip membran sistemlerde daha önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bu da uzun dönem işletmelerde geri dönüşümsüz kirlenmeyi meydana getirmektedir [Le-Clech et al., 2006]. Ayrıca membran por boyutu ve yüzey hidrofobitesinin protein vb. yapıdaki materyallerin taşınımı üzerinde açıkça etkisi olduğu görülmüştür [Qu et al., 2014].

Membran porozitesi ve pürüzlülüğü farklı nominal por boyutlarında farklı kirlenme seviyeleri ortaya koymaktadır. Yapılan araştırmalarda geniş bir varsayım da pürüzlülüğü daha fazla olan membranların kirlenmeye daha yatkın oldukları yönündedir [Le-Clech et al., 2006], [Keerthi and N., 2014].

- Kimyasal Parametreler: Hidrofobisite, Membran Materyali;

Mikrobiyal hücre, membran ve çözünen maddeler arasındaki hidrofobik etkileşimlerden dolayı membran kirlenmesi hidrofilik membranlarda daha şiddetli görülmektedir [Le-Clech et al., 2006].

Yapılan son çalışmalar büyük por boyutu ve yüksek hidrofobisite protein vb. yapıdaki materyallerin birikimini arttırdığını ortaya koymaktadır. Hidrofobik membranlarda mikroorganizmalar tarafından salgılanan ve aynı zamanda membran kirlenmesinde çok önemli rol oynayan hücre dışı organik maddelerden kaynaklanan akı azalması ve geri dönüşümsüz kirlenme hidrofilik membrana kıyasla daha fazla görülmektedir [Qu et al., 2014]. Hidrofobisite membran kirlilik oluşumunun ilk aşamalarında önemli olmasına rağmen uzun süreli işletimlerde çok küçük bir rol oynamaktadır [Le-Clech et al., 2006].

2.5.2. Biyokütle Karakteristiği

- AKM (askıda katı madde)

AKM miktarı çamur yaşıyla bağlantılı bir parametredir. Çamur yaşı arttıkça birim hacimdeki mikroorganizma konsantrasyonu (AKM) da artmaktadır. ÇY ile ilgili bilgiler ayrıntılı olarak bölüm 9'de anlatılmaktadır. İlk bakışta AKM membran kirlenmesinde ana parametre olarak görünebilir ancak yapılan çalışmalar AKM ile membran kirlenmesi arasındaki ilişkinin oldukça kompleks bir konu olduğunu ortaya koymuştur [Le-Clech et al., 2006]. Bu konu üzerinde birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır, AKM artışının membran geçirgenliğine negatif etkisinin olduğunu Chang and Kim (2005) , pozitif etkisinin olduğunu Le-Clech et al., (2006) veya etkisinin olmadığını Hong et al., (2002) ifade etmişlerdir [Chang and Kim, 2005], [Le-Clech et al., 2006], [Hong et al., 2002]. Örneğin membran kirlenmesi ve AKM arasındaki ilişkinin araştırıldığı bir çalışmada AKM artışının kirlenmeyi azalttığı (<6 g/L) ve 8-12 g/L konsantrasyonda AKM'nin önemli bir etkiye sahip olmadığı rapor edilmiştir [Le-Clech et al., 2006].

- Viskozite

Ortamın viskozitesini etkileyen temel parametrelerin başında; AKM konsantrasyonu ve mikroorganizmaların salgıladıkları çözünmüş hücre ürünleri gelmektedir [Le-Clech et al., 2006]. Viskozitenin artması oksijenin kütle transfer verimini yani çözünmüş oksijenin miktarını doğrudan etkiler. Düşük orandaki çözünmüş oksijen miktarı kirliliğin daha da kötüye gitmesine sebep olmaktadır [Le-Clech et al., 2006]. Bilindiği gibi viskozite sıcaklıktan da etkilenir ve sıvının viskozitesi sıcaklığın artmasıyla azalır. Çamur viskozitesindeki artış, membran yüzeyine yakın olan kısımlarda hidrodinamik şartları zayıflatarak membran yüzeyinde kesme kuvveti etkisinde azalma meydana getirmektedir [Meng et al., 2007]. Bu durum membran direncinde artışa neden olur.

- Çözünmüş Oksijen

Mikroorganizmalar gerekli faaliyetleri sürdürebilmek için aktif çamur sistemlerde oksijen miktarının 2-4 mg/L civarında olması gerekmektedir. Çözünmüş oksijen (ÇO), sistemin biyolojisini örneğin biyofilm yapısını, çözünmüş mikrobiyal hücre ürünleri (SMP) miktarını ve flok boyut dağılımını etkilediği için membran kirlenmesinde aktif rol oynar [Lee et al., 2001]. Düşük seviyelerdeki çözünmüş oksijen hidrofobisiteyi düşürerek flokların bozulmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle SMP konsantrasyonundaki artış ve filtrasyondaki bozulmanın oksijen stresi kaynaklı olabileceği belirtilmektedir [Drews, 2010]. Bu konuya genel bakış, daha yüksek konsantrasyonundaki ÇO'nun daha iyi filtrasyon sağladığı yönündedir. Uzun süreli filtrasyonlar sonucunda membran yüzeyinde biriken kirlilik katmanı zamanla çoğalarak anaerobik şartlar oluşturur. Mikroorganizmaların zamanla endojen bozunmaya uğradıkları ve bozunma sonrasında açığa çıkan EPS'nin kirlenmeye neden olduğu yapılan çalışmalarca ortaya konmuştur [Zhong et al., 2006], [Le-Clech et al., 2006].

2.5.3. Flok Karakteristiği

5. Flok Boyutu

Membran kirliliği büyük ölçüde çamur flok özelliklerine bağlıdır ve çamur floklarının boyutunun kirlenmeye katkısı bu özelliklerin en başında gelmektedir [Su et al., 2013], [Sweity et al., 2011]. Shen ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları termodinamik analizlerde çamur floklarının membran yüzeyine tutunabilmesi için, membran yüzeyindeki itici enerji bariyerini aşması gerektiğini vurgulamıştır. Flok boyutunun azalması spesifik enerji bariyerini artırmaktadır ancak bu durum spesifik bağlanma enerjisini artırarak küçük flokların tutunmasını kolaylaştırır. Küçük floklar, küçük por boyutuna sahip düşük poroziteli kek tabakası meydana getirirler, bunun sonucu olarak oldukça yüksek dirençli bir hidrolik kek direnci ortaya çıkar [Shen et al., 2015].

6. Hidrofobisite

Hidrofobik floklar yüksek floklaşma eğilimindedirler ve genellikle hidrofobik membran ile düşük etkileşimdedirler. Membran kirlenmesinde flok hidrofobisitesinin direk olarak membran üzerine etkisini değerlendirmek güçtür. Çamurda ve EPS çözeltisinde yapılan hidrofobisite ölçümlerinde EPS hidrofobisitesinde meydana gelen azalmanın flok yapısının bozulmasına sebep olabileceği ortaya konmuştur. Flamentli bakterilerin aşırı çoğalmaları; EPS miktarının artmasına, zeta potansiyelinin düşmesine, düzensiz flok şekillerine ve yüksek hidrofobisiteye neden olmaktadır [Le-Clech et al., 2006].

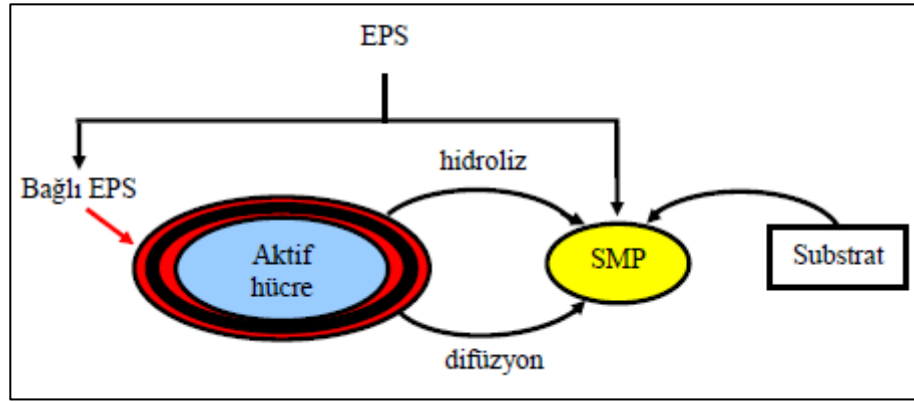
Çamur yaşınındaki artışın mikroorganizmaların hidrofobisitesinde bir artışa sebep olduğu, artan hidrofobisitenin de membran kirlenmesine katkıda bulunduğu yapılan çalışmalarca ispatlanmıştır [Lee et al., 2003].

Sonuç olarak, flok hidrofobisitesinin membran kirlenmesi üzerinde direk etkisinin olduğunu söylemek zor olsa da, filament indeksini ve EPS miktarı flok hidrofobisitesini ve zeta potansiyelini etkilediği için membran kirlenmesinde dolaylı

olarak etkisinin olduğu düşünülmektedir. Araştırmalar hidrofobisite etkisinin zeta potansiyeli ve pürüzlülükle karşılaştırıldığında çok daha az etkiye sahip olduğunu göstermektedir [Meng et al., 2006].

7. EPS (Extracellular Polymeric Substances) ve SMP (Soluble Microbial Products)

EPS (hücre dışı polimerik maddeler) hücre çeperinin dışında veya yüzeyinde bulunan proteinler, polisakkaritler, nükleik asitler, lipitler ve hümik asitleri içerir [Lin et al., 2014]. SMP (çözünmüş mikrobiyal ürünler) ise substrat metabolizması ve biyokütle parçalanmasından çözeltiliye serbest bırakılan organik bileşikler olarak tanımlanabilir [Barker and Stuckey, 1999]. Şekil 2.10'de hücrelerden kaynaklanan EPS ve SMP arasındaki ilişki görülmektedir [Le-Clech et al., 2006].



Şekil 2.10: EPS'nin bağlı EPS ve SMP fraksiyonu.

EPS, basitçe sınıflandırmamız gerekirse por daralması, jel ve kek tabaka oluşumu üzerinde oldukça büyük etkiye sahiptir [Lin et al., 2014].

SMP içeren çözünür organiklerin çoğu UF ve NF porlarına girerek buralarda birikim yaparlar ve porların kalınlaşmasına neden olurlar [Lin et al., 2014]. Dış kuvvetlerin etkisiyle SMP salınımı artabilir ve floklar parçalanarak membran kirlenmesi üzerine olumsuz etkilere sebep olabilirler. Aynı zamanda EPS flokların tutunmasını sağlayan üç boyutlu bir matristir. Bu özelliğiyle uzun süreli

filtrasyonlarda EPS de zamanla biriken maddeler artacak ve git gide kek tabakasında sıkışma meydana gelerek geri dönüşümsüz kirlenmeye sebep olan sabit kek tabakasını oluşturacaktır [Cho et al., 2005].

Çamur süspansiyonu bir çok farklı yapıda partikül ve çözünen maddeyi bünyesinde barındırır. Lin et al., (2011) çamur süspansiyonundaki küçük flokların EPS seviyeleri daha yüksek olan bakteri popülasyonlarını içerdiğini ve bunun da membran yüzeyine tutunmaya daha yatkın olduğunu belirtmiştir [Lin et al., 2011].

Kek tabakasını oluşturan etmenlerden biri olan EPS negatif yüklü fonksiyonel gruplar içerir, kek tabakasının genel yapısı ise elektro-nötr'dür. EPS'nin kek tabaka üzerinde birikmesiyle negatif yüklü iyon sayısında artma meydana gelmektedir. EPS matriksinin içerisindeki iyon dengesinin de nötr olması gerekmektedir. Kek tabakası filtrasyona maruz kaldığında, her ne kadar MF ve UF membranlar iyonları tutamasa da yine de bu iyonlar kek tabakası içerisindeki iyon farkından dolayı rahatlıkla MF-UF membrandan geçememektedirler. Sonucunda iyonlar kek tabakası tarafından tutuldukları için iyon konsantrasyonu süzüntü kısımdakinden gözle görülür bir şekilde daha fazladır [Lin et al., 2014].

2.5.4. İşletme Koşulları

8. Havalandırma ve Çapraz Akış Hızı

Havalandırma, membran yüzeyindeki kesme kuvveti ve akı sirkülasyonu için stratejik bir seçimdir. Membran sistemlerde havalandırma üç etkin rol oynar: biyokütleyle gerekli oksijeni sağlama, aktif çamurun karışmasını sağlama (süspansiyonun sirkülasyonu) ve membran yüzeyinin temizlenmesiyle kirliliğin giderilmesi. Membran yüzeyindeki teğetsel kesme kuvveti büyük partiküllerin membran yüzeyinde birikmesini engellemektedir. Buna rağmen, teğetsel kesme kuvveti etkisinin partikül yarı çapıyla alakalı olduğu ve daha fazla kirlenmeye yol açan küçük partiküller için daha düşük etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [Le-Clech et al., 2006].

Jang ve arkadaşları kitarafından yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, havalandırma hızı biyolojik flokların içerisindeki EPS bileşenlerinin

kompozisyonu ve miktarını doğrudan etkilemekte ve membran yüzeyinde biriken protein/karbonhidrat oranını da değiştirmektedir [Jang et al., 2006]. Ayrıca yoğun miktarda uygulanan havalandırma, flokların boyutunu küçülterek flok yapısına hasar verebilir ve EPS salgılanmasını tetikleyebilir [Jang et al., 2006], [Park et al., 2005].

9. Çamur Yaşı (ÇY veya SRT)

Çamur yaşı (ve çamur yaşına bağlı olarak besin/mikroorganizma oranı), biyokütle karakteristiğini kontrol eden membran kirliliği üzerinde en etkili parametrelerden biridir. Çok düşük çamur yaşlarının kirlenme özellikleri incelenmiş ve çamur yaşı 10 günden 2 güne indirildiğinde kirlenmenin 10 kat arttığı görülmüştür. Düşük çamur yaşında EPS üretim seviyesindeki artışın buna neden olabileceği düşünülmektedir [Le-Clech et al., 2006], [Cho et al., 2005].

Çamur yaşının artmasıyla (30 g/L'den 100 g/L'ye arttırıldığında) ilgili olan AKM miktarındaki artış havalandırma miktarı artsa bile kirlenmede artışa neden olabilmektedir. Çok yüksek çamur yaşının diğer bir dezavantajı ise viskozitedeki artış nedeniyle hava kabarcıklarının etkisinin azalması nedeniyle kirlenmenin artmasıdır [Le-Clech et al., 2006]. Buna rağmen yüksek çamur yaşının daha iyi biyofloklaşma meydana getirdiği ve dolayısıyla da daha düşük kirlenmeye olanak sağladığı çalışmalar da karşımıza çıkmaktadır [Van den Broeck et al., 2012].

Yapılan araştırma sonuçlarında çok kısa çamur yaşı membran performansına zarar verirken, çok uzun çamur yaşının ise fazladan membran kirlenmesine neden olabileceği ortaya konmuştur [Lee et al., 2003]. Genellikle daha düşük kirlenme oranları yüksek çamur yaşlarında gözlemlenmektedir. Dolayısıyla farklı çalışmalar farklı çamur yaşlarının farklı işletme parametrelerinde daha avantajlı olduğunu göstermiştir [Dizge, 2011].

2.6. Membran Temizleme Metodları

- Geri dönüşümlü kirlenme

Kirletici materyallerin membran yüzeyine gevşek olarak bağlanmalarından kaynaklanmaktadır. Geri dönüşümlü kirlenme rahatlatma, güçlü kesme kuvveti

etkisi veya geri yıkama gibi fiziksel metodlarla giderilebilir. Genel olarak kek tabaka oluşumu geri dönüşümlü kirlenmenin ana nedenidir. Uzun süreli işletmelerde geri dönüşümlü kirlenmenin baskın olması kötü çamur süzülebilirliği ve/veya fiziksel temizlenmenin düşük verimde gerçekleşmesiyle sonuçlanabilir bu yüzden ileri fiziksel temizleme metodları uygulanmalıdır [Wang et al., 2014].

- Geri dönüşümsüz kirlenme

Sürekli filtrasyon sırasında çözünen maddelerle oluşan güçlü kirlilik tabakası zamanla geri dönüşümlü kirlenmeden geri dönüşümsüz kirlenmeye dönüşmektedir. Örneğin; jel tabakasının uzun dönemli işletim sırasında süzüntü akısı zamanla kritik akı (sub-critical flux) değerinin altına düşer. Geri döndürülemez kirlilik fiziksel temizleme metodlarıyla giderilemeyen kirliliktir ve fiziksel olarak giderilemeyen kirlilik olarak adlandırılır [Wang et al., 2014].

- Kalıntı kirlilik

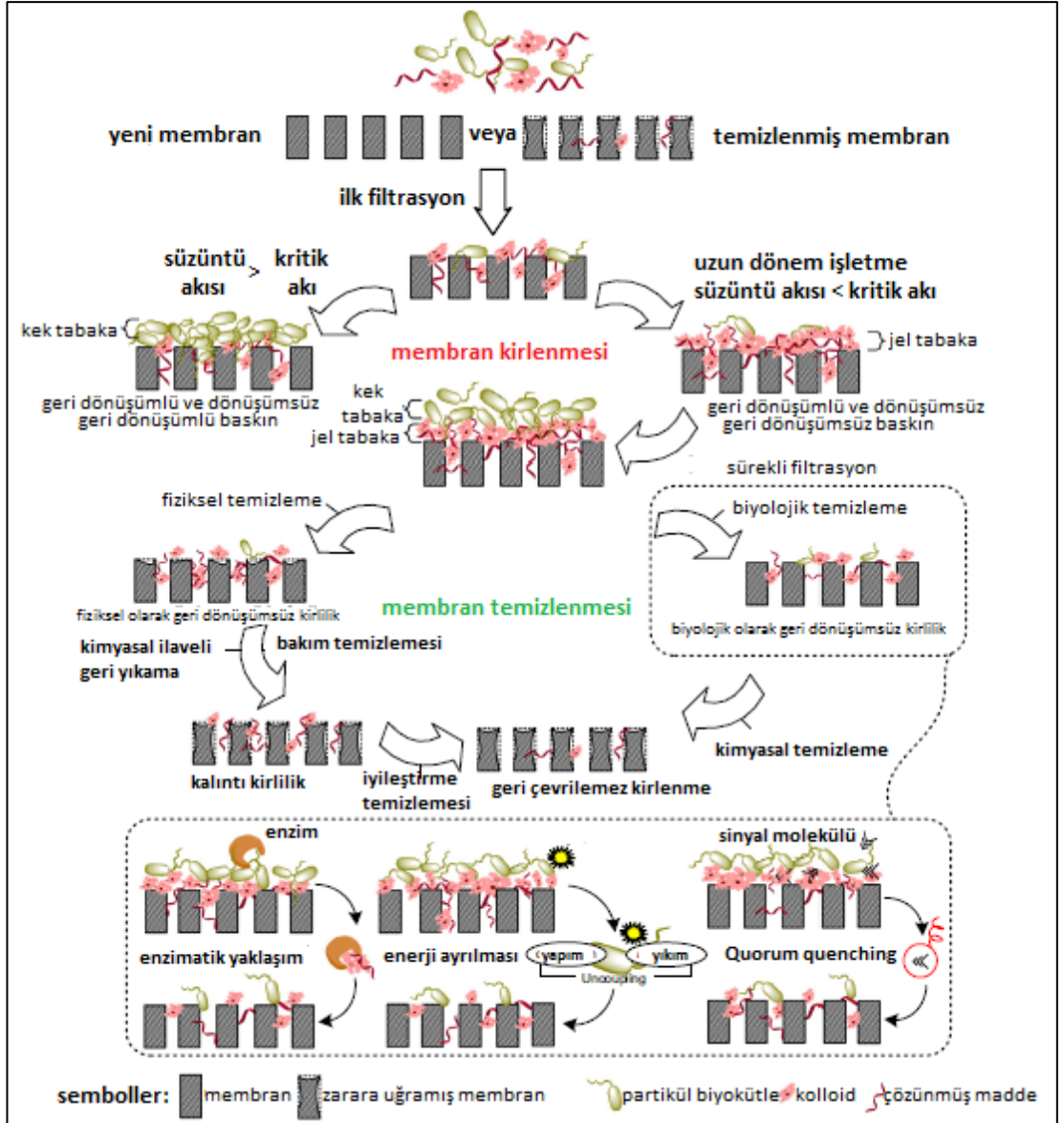
İleri kimyasal geri yıkama ya da bakım yıkamasıyla (maintenance) giderilemeyen fakat iyileştirme yıkamasıyla (recovery) giderilebilen kirliliktir [Wang et al., 2014].

- İyileştirilemeyen kirlilik

Uzun dönemli membran işletmeleri sırasında bir kez kirlenen membranın asla ham-orijinal hali permeabilitesine dönemediği kirlilik şeklidir [Wang et al., 2014].

2.6.1. Temizleme Metodları

Membran temizleme metodları genel olarak fiziksel, kimyasal, fiziko-kimyasal ve biyolojik temizleme metodları olarak 4 grupta toplanabilir. Bu metodlar kirlenerek kötüleşen permeabiliteyi iyileştirmeyi amaçlamaktadır [Wang et al., 2014]. Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.11) genel olarak kullanılan metodların yanısıra geliştirilmek üzere üzerinde çalışmalar yapılan (örneğin quorum quenching veya enzim kullanımı gibi) yeni stratejiler de gösterilmiştir [Wang et al., 2014].



Şekil 2.11: Membran kirlenmesi ve temizlenme metodları.

10. Fiziksel Temizleme Yöntemleri

Fiziksel temizlemenin en çok kullanılan metodu geri yıkamadır ki bu ya süzöntü suyunu tersten besleyerek ya da basitçe süzöntüyü durdurarak hava kabarcıklarının membranla temas etmesini sağlayan rahatlatma ile yapılmaktadır. Geri yıkama ve hava kabarcıklarının yanı sıra literatürde bir dizi strateji mevcuttur. Ultrasonikasyon, askıda katı veya taşıyıcılar eklemek, vibrasyon tekniği ve mekanik temizleme bunlardan bazılarıdır [Van Den Brink et al., 2013], [Yong et al., 2006].

Membran rahatlatma (relaxation), hidrolik yıkama, geri yıkama ve hava kabarcık metodu olarak dört farklı fiziksel temizleme yöntemi kullanılmaktadır.

- Membran rahatlatma

Membranın kesikli olarak işletilmesi demektir. Geri dönüşümlü kirlenmenin giderilmesinde sıkça kullanılan basit ve etkili bir yoldur [Shi et al., 2014].

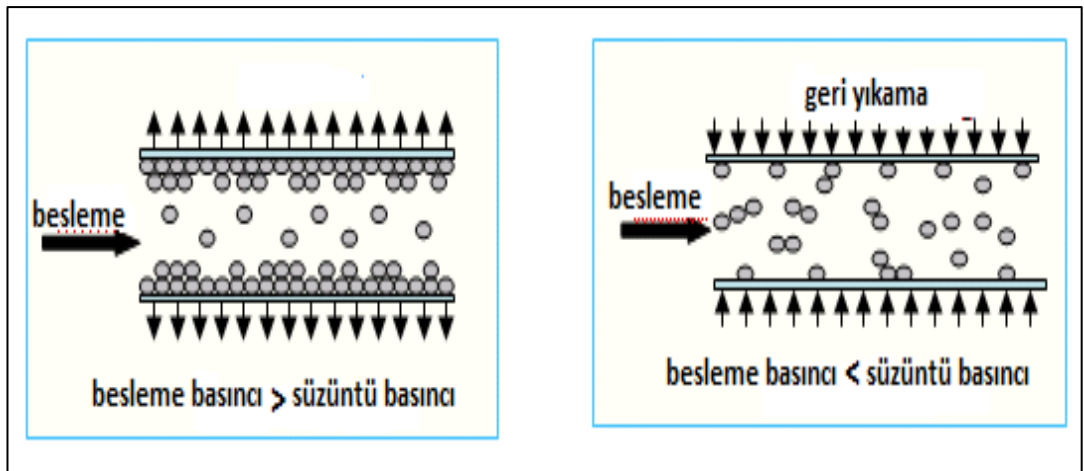
- Hidrolik yıkama

Çapraz akışın sağladığı türbülans sayesinde membran yüzeyinde biriken kirliliğin giderilmesi prensibidir [Wang et al., 2014].

- Geri yıkama

Su ile (genellikle süzüntü suyu kullanılır) süzüntü tarafından besleme tarafına ters akım uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Ters akım, membran porları arasında biriken kirleri yerinden çıkarır ve por içlerine yerleşmiş olan kek tabakasını gevşetir.

Şekil 2.12’de geri yıkamanın etkisi basitçe gösterilmiştir. Geri yıkama basıncı süzüntü en az süzüntüye uygulanan basıncın 2 katıdır [Web 1, 2015]. Uygulanma sırasında membrana zarar verme olasılığı yüksek olduğundan çok dikkat edilmelidir [Shi et al., 2014].



Şekil 2.12: Geri yıkama.

- Havalandırma

Hava kullanılan temizleme metodları, yüzey yıkamasında ve geri yıkamada tercih edilmektedirler. Hidrolik yıkama ile kıyaslandığında havalandırmanın hava kabarcıklarının daha yüksek türbülans sağlaması nedeniyle daha verimli bir proses olduğu rapor edilmiştir [Shi et al., 2014].

11. Kimyasal Temizleme Yöntemleri

Kimyasal temizleme; kimyasal araçlar kullanılarak geri dönüşümsüz kirliliğin giderilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu kimyasallar özellikle sistemdeki mikroorganizmaların giderimini de sağlaması açısından dezenfektan olarak kullanılan oksidantlardır [Wang et al., 2014]. Genellikle kullanılan kimyasallar; asitler, alkaliler, oksidantlar ve yüzey aktif maddelerdir. Tablo 2.3'de kullanılan bu kimyasallar ve temizleme mekanizmaları verilmiştir [Shi et al., 2014].

Tablo 2.3: Membran temizliğinde kullanılan kimyasallar ve temizleme mekanizmaları.

Kimyasal	Yaygın örnek	Genel işlevi
Asitler	Güçlü: HCl, HNO ₃ Zayıf: H ₃ PO ₄ , sitrik asit	pH düzenlemesi, inorganik çökeltilerin çözünmesi, makromoleküllerin parçalanması
Alkaliler	Güçlü: NaOH, KOH Zayıf: Na ₂ CO ₃	pH düzenlemesi, yüzey yüklerinin değişimi, proteinlerin ve polisakkaritlerin hidrolizi,
Oksidantlar	NaClO, H ₂ O ₂	Organiklerin oksidasyonu: dezenfeksiyon,
Yüzey aktif maddeler	Anyonik: SDS Katyonik: CTAB Noniyonik: Tween 20	Kirlilik tabakası oluşumunu geciktirmek

Asitler; metal oksit veya hidroksitler ve inorganik tuzların çökeltilerini gidermede kullanılmaktadır [Trägårdh, 1989]. Özellikle nitrik asit (HNO₃) kalsiyum çökeleklerini gidermede kullanılır aynı zamanda HNO₃ kuvvetli oksidanttır ve organik ve biyolojik kirliliği gidermede kullanılmaktadır [D'souza and Mawson, 2005]. Ancak

kuvvetli asitlerin dezavantajı korozift olmaları ve membran materyaline zarar vermeleridir. Bu yüzden asitli yıkamalarda genellikle zayıf asitler tercih edilmektedir. [Zeman and Zydney, 1996]. Genellikle zayıf asit olarak fosforik asit (H_3PO_4) ve sitrik asit gibi bazı organik asitler tercih edilmektedir. Kuvvetli asitlere göre daha az koroziftirler ancak zayıf asitlerin bazı reaksiyon ürünlerinin çözünürlükleri düşüktür ve tekrar çökelti oluşturabilmektedirler [Zeman and Zydney, 1996].

Alkaliler; sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) protein ve karbonhidratları daha küçük yapıli aminlere ve şekerlere dönüştürmektedirler. Bu durum da membran yüzeyi ve kirletici arasındaki bağların azalmasına ve temizleyici maddenin membran yüzeyi üzerinde kütle transferinin artmasına sebep olmaktadır. Zayıf bazlar daha az kostiktirler ve kuvvetli bazlara oranla ortalama pH'a sahiptirler. Zayıf bazlara örnek olarak bazı deterjanların yapısında bulunan polifosfatlar verilebilir. Zayıf bazların dezavantajı +2 yüklü metal iyonlarıyla çözünmeyen tuzlar oluşturmalarıdır [D'souza and Mawson, 2005].

Oksidantlar; sodyum hipoklorit (NaOCl), hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi oksidanlar güçlü temizleyicilerdir ve en önemli rolleri tüm patojen mikroorganizmaları dezenfekte etmeleridir. Su ve atıksu arıtımında biyofilm oluşumunu gidermek için kullanılmaktadırlar [Brepols et al., 2008]. Ancak bu kuvvetli oksidantların membran yüzeyini de okside etmeleri ve membran polimerlerinin ayrışmasına sebep olmaları membran ömrünü kısaltmaktadır [Shi et al., 2014].

12. Fiziko-Kimyasal Temizleme Yöntemleri

Fiziko-kimyasal temizleme, daha iyi verim almak için fiziksel metodların kimyasal araçlarla birlikte kullanılması prensibidir. Örneğin; geri yıkama suyuna düşük konsantrasyonlarda kimyasal ilavesi gerçekleştirilerek giderimin verimi arttırılabilir [Buzatu et al., 2012]. Kimyasal ilaveli geri yıkamanın ardından genellikle normal geri yıkama işlemi uygulanır [Shi et al., 2014]. Başka bir örneği de ultrasonikasyon işlemine kimyasal ilave edilerek yine aynı şekilde verim arttırmak amaçlanmıştır [Cai et al., 2009]. Bu şekilde verimi arttırmak için kombine edilen metodlar genellikle yüksek enerji ihtiyacı gerektirir [Shi et al., 2014].

13. Biyolojik Temizleme Yöntemleri

Fiziksel ve kimyasal metodlar membran kirlenmesini gidermek için etkili metodlardır ancak membran yapısına zarar verebilir, mikroorganizmaların yaşama koşullarını etkileyebilir ve kimyasal olarak zararlı yan ürünler meydana getirebilirler [Lin et al., 2013]. Bu olumsuzlukları içeren temizleme yöntemlerine yumuşak bir alternatif olarak biyolojik temizleme metodları karşımıza çıkmaktadır. Biyolojik metodlar birçok avantajlarıyla günümüzde araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir [Wang et al., 2014].

Biyolojik temizleme membran kirliliğini gidermek için biyoaktif ajanlar içeren temizleme karışımlarının kullanımı olarak tanımlanabilir. Biyolojik temizlemede öne çıkan üç yaklaşım mevcuttur. Bunlar; enzimatik yaklaşım, enerji üretiminin engellenmesi (energy coupling), yetersayı etkisi azaltımı (QQ: quorum quenching)'tir. Avcı bakteri kullanımı ise son zamanlarda dördüncü yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır [Wang et al., 2014].

2.6.1.1.1. Enzimatik Temizleme

Enzimatik temizleme biyolojik metodlar arasında kullanılan en yaygın metottur. Enzimatik ajanlar membran yüzeyi üzerindeki kirlenmeyi verimli bir şekilde parçalayabilen oldukça özel biyolojik yapılardır [Yang et al., 2006].

Bilindiği üzere enzimler özel hedefler için tasarlanan seçici katalizörlerdir [Shi et al., 2014]. Örneğin proteazların membran yüzeyindeki protein ve protein yapıları maddeleri, aljinat liyazın mikroorganizmalar tarafından üretilen çözünür aljinatı, amilazların ise hümitik asitlerce zengin biyofilm tabakayı verimli şekilde giderdikleri rapor edilmiştir [Chen and Columbia, 2011], [Argüello et al., 2005]. Özellikle proteazın membran temizleme için iyi bir aday olduğu onaylanmıştır, çünkü protein membran kirliliğine katkıda bulunan önemli bir bileşendir ve metabolizlamada çok yönlü olarak bulunmaktadır [Wang et al., 2009].

Enzimatik temizlemenin birçok avantajı bulunmaktadır. Enzimatik reaksiyonlar düşük sıcaklıklarda ve ılımlı pH'larda gerçekleştiğinden enzimatik temizleme işlemi çoğu membrana zarar vermez ve dolaylı olarak membran ömrünün uzamasını

sağlar. Özellikle yüksek sıcaklık, pH ve kuvvetli kimsayasallardan etkilenen membranlar için bu temizleme yöntemi uygundur [Wang et al., 2014].

Enzim reaksiyonları gerekli kimyasal miktarını azalttıkları için tercih edilmektedirler. Ayrıca biyolojik olarak parçalanabilir olduklarından çevreye de zarar vermezler. Ancak enzimler kullanılan kimyasallara göre oldukça pahalıdırlar ve ılıman koşullara alışık olduklarından değişen koşullardan hızlı etkilenecek inaktif olabilirler [Shi et al., 2014].

Enzimatik temizleyiciler özellikle biyofilm giderimi için kullanılmaktadırlar çünkü bakterilerin membrana tutunmaları için gerekli olan proteinleri parçalarlar. Asit ve alkali temizleyicilerin çoğu bunu başaramaz [Shi et al., 2014].

2.6.1.1.2. Enerji Ayrışması (Energy Uncoupling)

Enerji üretiminin engellenmesi membran yüzeyinden biyofilm giderilmesi için önerilen bir başka temizleme metodudur. Biyokimyasal ayrıştırıcılar hücresel membranın içine protonları taşır, proton seviyesinin düşmesiyle ATP (adenosine triphosphate) sentezi engellenir. Etkilenen biyofilm kararlılığının enerji metabolizmasının ayrışmaması ve mikroorganizmaların dağınık halde büyümesi son yapılan araştırmalarda gözlemlenmiştir [Huijuan Xu and Liu, 2011]. Bu metodun dezavantajı ise ATP ayrıştırıcılarının çoğununun aromatiklerden oluşması ve toksik etki göstermesidir [Malaeb et al., 2013].

2.6.1.1.3. Quorum Quenching (Yetersayı Etkisi Azaltımı)

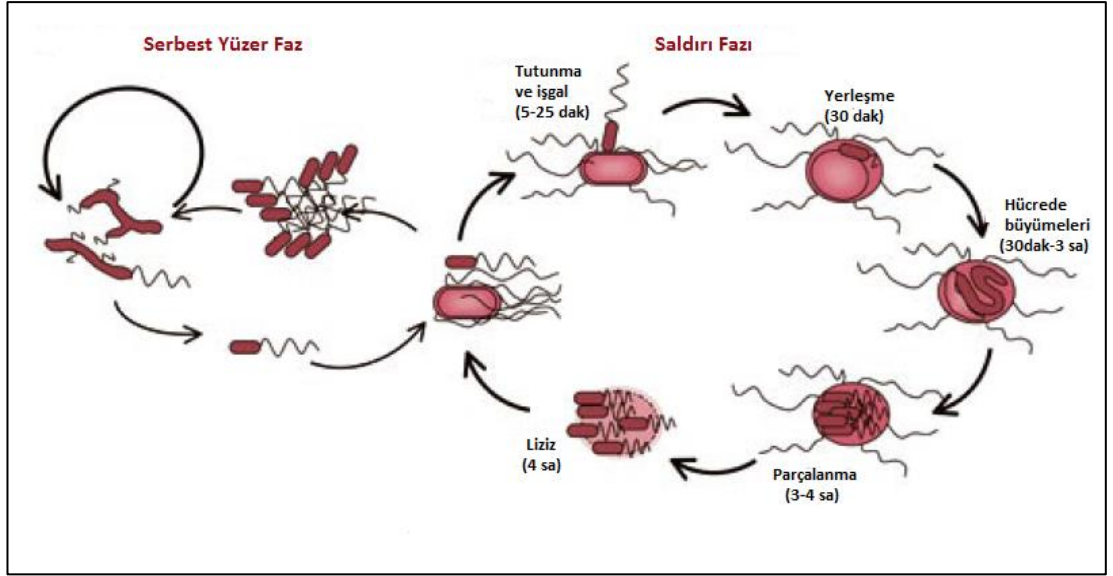
Quorum quenching, bakteriyel iletişimin enzimatik olarak engellenmesi, atıksuların arıtımında kullanılan membranların biyotıkanmasının kontrol edilebilmesine yönelik bir yaklaşımdır. Mikroorganizmalar biyofilm oluşturmak gibi grup davranışlarını ortamdaki yoğunluklarına daha doğrusu hücre sayılarına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Sayılarını ve yoğunluklarını ise oto-uyarıcı adı verilen sinyal molekülleri sayesinde belirlemektedirler [Fuqua et al., 1996]. Bakteriler bu oto-uyarıcılar sayesinde hücrelerarası iletişimlerini sağlamaktadırlar. Oto uyarıcıların konsantrasyonu hücre yoğunluğunun belli bir oranına ulaştığında, oto uyarıcılar

reseptör proteinlerle birleşip, bakterilerin grup davranışlarını harekete geçiren genlerin üretimini aktif hale getirir. Bu grup davranışlarına örnek olarak; biyoluminesans (biyo-ışık), antibiyotik üretimi, biyofilm oluşturma ve spor oluşturma verilebilir [Yu et al., 2007].

Mekanizmanın avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Enerji ayrışması ve QQ stratejileri canlı mikroorganizmalardan oluşan kirli biyofilm tabakayı temizlemek için etkilidir. Fakat inorganik ürünler, ölü hücreler ve organik/inorganik kompleksler tarafından tıkanan membran porlarını temizlemede bu mekanizmaları etkisi düşüktür [Huijuan Xu and Liu, 2011]. Ayrıca *Proteobacteria*'nın 100'den fazla türünde QQ sinyal geninin bulunduğu ancak sadece birkaç tanesinde bu genin EPS salınımını kontrol edebildiği görülmüştür. Ayrıca farklı organizmaların farklı QQ genine sahip oldukları ortaya konmuştur [Malaeb et al., 2013].

2.6.1.1.4. *Bdellovibrio Bacteriovorus*

B. bacteriovorus, boyutu 0,25-1 µm olan, büyüme ve üreme amacıyla Gram (-) hücreleri avlayan, flagellalı ve hareketli bir Gram (-) Deltaproteobakteri türüdür [Starr and Baigent, 1966]. *B. bacteriovorus* yaşam döngüsü iki fazlıdır (Şekil 2.13) serbest yüzer saldırı fazı ve av hücresi içerisinde gerçekleşen iç büyüme fazıdır [Liz Sockett, 2008]. Bu bakteriler sabit yaşam fazında avlarını parçalayabilmek için enzimler salgırlar ve parçaladıkları makromolekülleri besin olarak kullanırlar. *B. bacteriovorus* çoğunlukla avcı yaşam tarzına kilitli durumdadır [Liz Sockett, 2008]. *B. bacteriovorus* hücreleri yaşam döngülerinin ilk 10 dakikasında av hücreye yapışmakta, 25 dakikada hücre içine sızmakta ve yaklaşık üç saat sonunda av hücreyi parçalayarak dışarı çıkmaktadırlar [Lambert et al., 2006].



Şekil 2.13: *B. bacteriovorus* yaşam döngüsü.

1960'lı yılların başında *B. bacteriovorus* su kaynaklı planktonik bir tür olarak keşfedilmiş ancak biyofilm ve bakteriyel popülasyonların kontrolünde kullanılabileceği düşünülmemiştir [Stolp and Petzold, 1962]. Bu bakteriler mikrobiyal ekolojide önemli rol oynamaktadırlar ve ekosistemdeki bakteri popülasyonunu kontrol etmektedirler [Lambina, 1987].

Bu bakterinin avcılık özelliğine dair başka çalışmalar da mevcuttur. Vo yaptığı tezinde *B. bacteriovorus*'un biyofilm oluşumuna etkisini *E.coli* (Gram negatif) ve *M. luteus*'ta (Gram pozitif) incelemiş, *B. bacteriovorus* 'un *E.coli* hücrelerinin biyofilm oluşumunu engellediğini *M. Luteus*'un ise biyofilme tutunmasına engel olduğunu göstermiştir [Vo and Nunez, 2010]. *B. bacteriovorus*'un dişlerde periodontitis hastalığına neden olan bir bakteri türünü parçaladığı ve oluşturduğu biyofilm tabakayı bozduğu rapor edilmiştir [Van Essche et al., 2009]. *Alcaligenes*, *Campylobacter*, *Erwinia*, *Escherichia*, *Helicobacter*, *Pseudomonas*, *Legionella*, *Shigella* türleri ve *Helicobacter pylori* bakterilerinin *B. bacteriovorus* tarafından parçalandığı bu konuda birçok çalışması bulunan Markelova tarafından ortaya konmuştur [Markelova, 2010].

Markelova bu bakterinin biyokontrol ajanı olarak kullanım potansiyeli üzerinde durmuştur. *B. bacteriovorus*'un memeli hücreleri enfekte edemediği için

tıbbi veya endüstriyel uygulamalarda güvenle kullanılabilceği belirtilmiştir [Sockett, 2008].

B. bacteriovorus memelilerin bağırsak sitemleri, sucul ve karasal ortamlar ve kanalizasyon arıtım çukurları gibi doğada birçok yerde bulunabilir. Bu organizmalar tüm atıksu arıtım basamaklarında mevcut olan bir avcı organizmadır. Bu bakterinin atıksudaki en önemli fonksiyonu Gram (-) organizmaların sayısını düşürerek atıksuyu temizlemektir [Fry and Staples, 1976], [Schwudke et al., 2003].

Westergaard ve Kramer'ın 1978 yılında yapmış oldukları çalışmada *B. bacteriovorus*'un domestik atıksudaki *E. coli* giderimindeki fonksiyonunu araştırmış ve küçük bir role sahip olduğunu bulmuştur [Westergaard and Kramer, 1978]. Wand ve arkadaşları tarafından 2007 yılında yapılmış olan çalışmada ise *E. coli* model bakteri olarak kullanılarak *B. bacteriovorus*, protozoa gibi mikroorganizmaların kum filtrelerinde bakteri giderimine olan etkisine bakılmıştır. *B. bacteriovorus*'un giderimde rol oynadığı ve protozoalarla rekabette olduğu belirtilmiştir [Wand et al., 2007].

Zhang ve arkadaşları 2006 yılında yaptıkları bir MBR arıtım çalışmasında ise *B. bacteriovorus* hücrelerinin planktonik ortamda var olduğunu ve filtre yüzeyine geri dönüşümsüz olarak adsorplanan mikroorganizmalar arasında olmadığını bulmuştur. Filtre yüzeyine geri dönüşümsüz adsorplanmış olan birçok bakteri türü ise gram negatif bakteri grubuna girmektedir [Zhang et al., 2006]. Membran reaktörlerde membran yüzeyindeki biyofilm tabakadaki mikrobiyel komunitayı karakterize eden çalışma sayısı azdır. 2006 yılında Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada biyofilm oluşumunu başlatan bakteriler moleküler tekniklerle belirlenmiş ve bu bakterilerin çoğunlukla Alfa-proteobacteria olarak bilinen Gram(-) bakteri grubuna ait oldukları belirtilmiştir [Zhang et al., 2006]. Stolp et al, (1969) *Bdellovibrio bacteriovorus*'un *Salmonella*, *E. coli*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Serratia* gibi Gram (-) bakterileri tükettiğini göstermiştir [Stolp and Petzold, 1962]. Bu bakterinin atıksuda bulunan Gram (-) bakterileri parçalayabilmesi membran temizlemek amacıyla kullanım potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmalara ek olarak Kim ve arkadaşları çalışmalarında *E.coli* kültürüne *Bdellovibrio bacteriovorus* HD 100 ekleyerek dead-end sistemde filtrasyon etkisine bakmış ve av/avcı oranının biyofilmi giderme üzerinde etkisinin olduğunu

belirtmiştir [Kim et al., 2013]. Goldman ve arkadaşları tarafından bakteriyofaj kullanarak yapılan bir çalışmada steril edilmiş atıksu örneğine *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter johnsonii* ve *Bacillus subtilis* bakterileri tek başlarına veya kombine halde ekilmiştir ve UF membranda membran geçirgenliğinin 2.5 kat arttığı saptanmıştır [Goldman et al., 2009].

Kim ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda *E. coli* kültürü kullanmışlar ve kültürün *B. bacteriovorus* ile aşılmasının filtrasyon üzerindeki etkisine bakmışlardır [Kim et al., 2013]. Bu çalışmada gerçek atıksu kullanılmamış olması *B. bacteriovorus*'un membran temizlemek amacıyla kullanılıp kullanılmayacağı sorusunun yanıtı bırakmıştır. Bu tez çalışmasında *B. bacteriovorus*'un gerçek atıksu ortamında membran filtrasyonuna etkisine bakılmış ve bu avcı bakterinin membran temizleme ajanı olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. *E. coli* ve *Bdellovibrio Bacteriovorus*'un Üretimi

E. coli S17 ve *Bdellovibrio Bacteriovorus* Nothingam Üniversitesi öğretim üyesi Liz Sockett'ten istenmiştir. *E. coli* S17, *B. bacteriovorus*'un üretimi için av bakteri olarak kullanılmaktadır. Hücreler Nutrient agar (NA) üzerinde üretilerek saklanmışlardır.

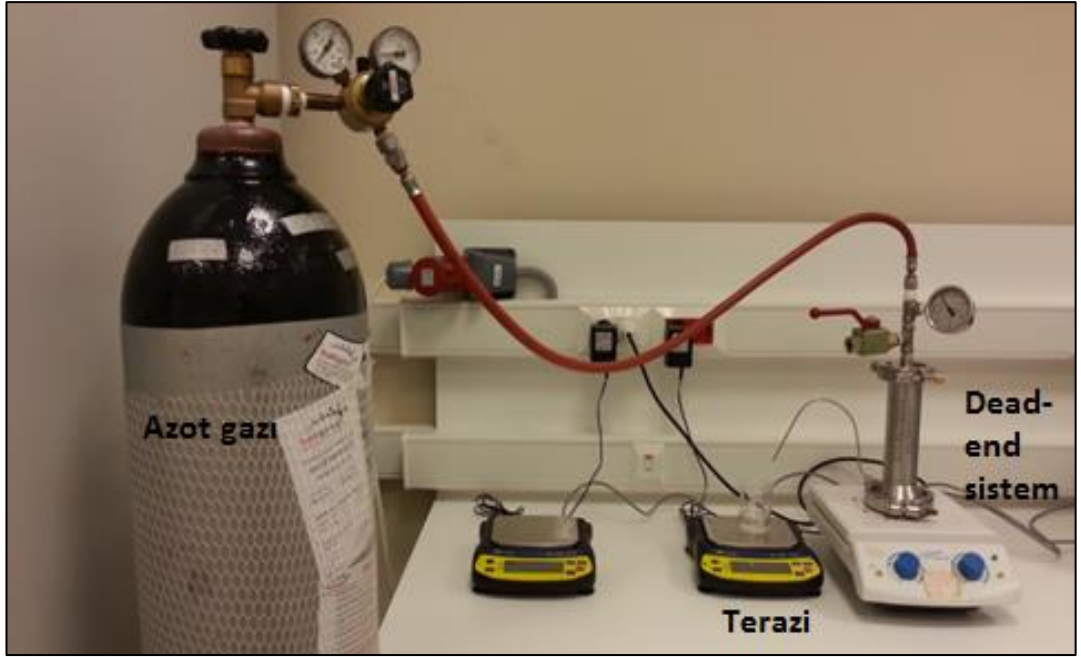
Bir gün önceden NA üzerinde üretilen *E. coli* hücreleri toplanarak hepes (HM) tamponuna OD600 absorbans değeri 0.3 - 0.4 olacak şekilde eklenir ve bu karışım üzerine önceden üretilmiş olan *B. bacteriovorus* hücreleri eklenir. Hücreler 29 °C'de 2-3 gün inkübasyona tabi tutulur, absorbans değerindeki düşme (0.1-0.05 civarına düşüş) *B. bacteriovorus* hücrelerinin *E. coli* hücrelerini parçaladığını göstermektedir. Her hazırlanan yeni kültür ile birlikte bir kontrol kültürü de başlatılır. Kontrol kültürüne aynı miktarda *E. coli* eklenir ancak *B. bacteriovorus* yerine aynı hacimde tampon eklenir.

İki ve üç günlük *B. bacteriovorus*'un aktivitesinin en yüksek değerde olduğu bulunmuştur. Aktivite hesabı denklem (3.1)'de gösterilmektedir.

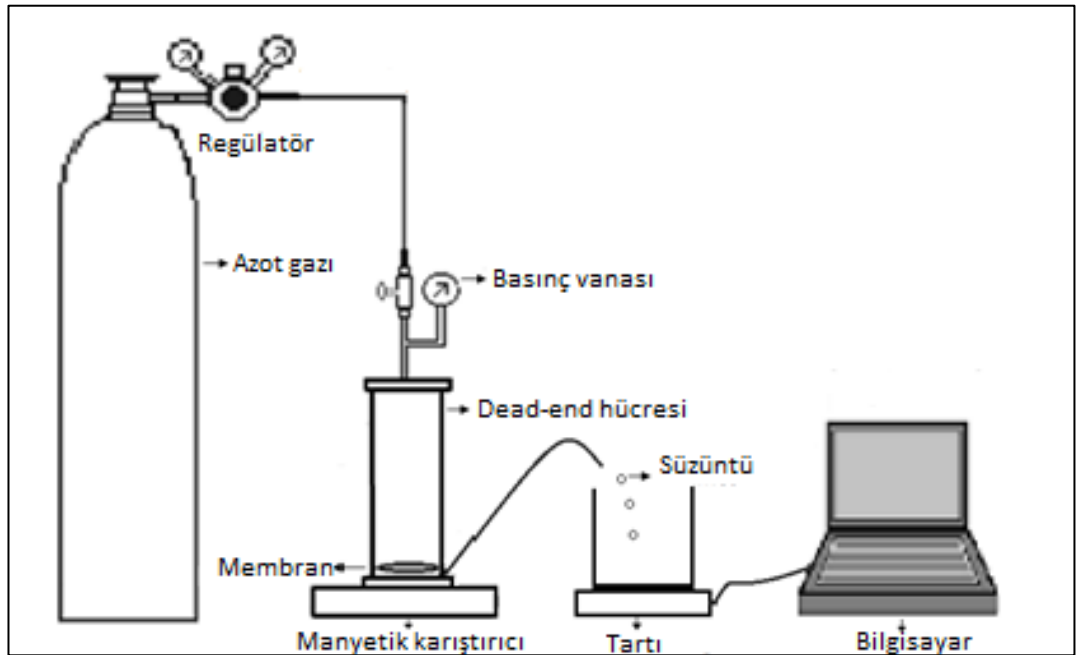
$$\% \text{ } B. \text{ bacteriovorus Aktivitesi} = \frac{\text{Kontrol OD} - B. \text{ bacteriovorus OD}}{\text{Kontrol OD}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.2. Dead-End Sistem Membran Çalışmaları

Deneylerde Sterlitech Corporation dead-end membran sistem (model HP4750, USA) kullanılmıştır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Tam karışimli hücrenin toplam hacmi 300 mL, kullanılabilen membran alanı ise 14,6 cm²'dir. Membran Dead-End hücrenin taş filtresi üzerine yerleştirilir. Hücrenin basınç regülatörlü hortumla bağlantısı yapılır. Atıksuyu membrandan filtre etmek için kullanılan sürücü kuvvet 1.5 bar basınçtaki azot gazıdır.



Şekil 3.1: Sterlitech Dead-end sistem düzeneği.



Şekil 3.2: Dead-end sistem işletim sisteminin şematik gösterimi.

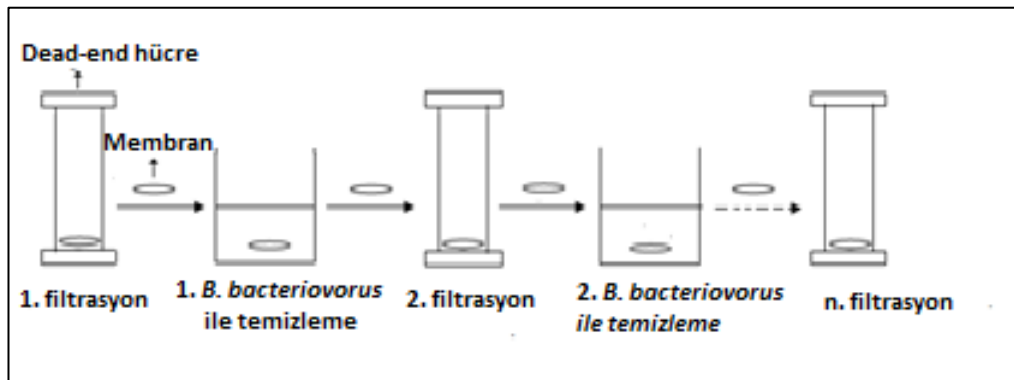
Dead end hücresindeki atıksuyun homojenliğini sağlayabilmek için hücre manyetik karıştırıcı üzerine yerleştirilmiş ve filtrasyon boyunca 500 rpm'de karıştırılmıştır. Filtrasyon sonucunda süzüntü akışı denklem (3.2) ile aşağıda belirtildiği gibi hesaplanmıştır.

$$J = Q/A \times \Delta t \quad (3.2)$$

- Q= belirli zaman periyodunda toplanan miktar (L)
- Δt = zaman (sa)
- A= kullanılan membran alanı (m²)
- J= akı (L/m².sa)

En yüksek parçalama aktivitesi 2-3 gün üretilen *B. bacteriovorus* hücrelerine ait olması nedeniyle membran temizlemek amacıyla üç günlük *B. bacteriovorus* hücreleri kullanılmıştır. Deneyde kullanılan *B. bacteriovorus* kültürü kullanılmadan önce kültürde av olarak kullanılan *E. coli* hücrelerinden kurtulmak amacıyla 1,2 µm milipore filtreden süzölmüştür. Membran Dead-End hücresinde kullanıldıktan sonra yüzeyindeki kek tabaka sıyrılır ve oda sıcaklığında 100 rpm'de 3 saat boyunca *B. bacteriovorus* hücreleri ile inkübasyonda bırakılır. Kontrol membranı olarak kullanılan ikinci membran aynı şartlarda saf suda inkubasyona bırakılır.

Temizleme işleminin ardından membranlardan tekrar çamur filtrasyonu yapılır ve tekrar temizleme işlemi uygulanır. Deneyler setleri en az 6 filtrasyondan oluşmaktadır. Deney adımlarını gösteren işletim şeması Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Filtrasyon işlem basamakları.

Yapılan filtrasyon sonuçları iki şekilde değerlendirildi.

i) Her membran için filtrasyonlar arasındaki akı farkı denklem (3.2)'de gösterildiği gibi membranların ilk atıksu geçirildiği akıları membran karakteristiği olarak algılandı ve diğer filtrasyonlardan bu akı farkı çıkarılarak grafik oluşturulmuştur. İşlem sonucunda akı farkının daha büyük pozitif değerde olması (veya daha az negatif değerde olması) kirlenmenin yani membran tıkanmasının daha az olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilmiştir.

ii) Denklem (3.3) kullanılarak aynı koşulların uygulandığı kontrol membranı ve *B. bacteriovorus* ile temizlenmiş membranların akılarının karşılaştırılıp, akıların sabit akı formuna geldikleri ortalama akıları üzerinden yorum yapılmıştır.

$$\Delta J_k = J_{k_n} - J_{k_1} \quad (3.3)$$

- ΔJ_k = 1. ve n. filtrasyonlar arasındaki kararlı akı farkı
- J_{k_n} = n. filtrasyonun kararlı akısı
- J_{k_1} = ilk filtrasyonun kararlı akısı

Yapılan deneylerde çamur yaşı ve hidrolik bekleme süreleri farklı aktif çamurlar kullanılmış ve filtrasyonu gerçekleştirilen aktif çamurun AKM ve KOİ değerlerine bakılmıştır.

Çamur yaşı, reaktördeki toplam çamurun hergün 1/20'si atılarak SRT 20 gün olarak ayarlanmıştır. Benzer işlem SRT 10 gün olan çamur için toplam hacmin 1/10'u atılarak ayarlanmıştır. Hidrolik bekleme süresi ise, reaktördeki çamur çöktürüldükten sonra reaktördeki üstsivinin 1/2'si boşaltılarak aynı hacimdeki sentetik besiyer ile beslenerek HRT 48 saate ayarlanmış benzer işlem HRT 96 saat için de uygulanmıştır.

HRT 48 saat ve SRT 10 gün olan aktif çamurun ortalama AKM konsantrasyonu 3000-3500 mg/L iken HRT 96 saat ve SRT 20 gün olan aktif çamurun ortalama AKM konsantrasyonu ise 2000-2500 mg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Dead-end sistemden kontrol ve *B. bacteriovorus* membranlarından aynı hacimde (250 mL çamur) çamur geçirilmektedir. MF ve UF membran tercih

edildiğinden sürücü kuvvet 1,5 bar olarak uygulanmıştır. Kullanılan membran türleri MP005 (por boyutu 0,05 µm) polietersülfon (PES), MP010 (por boyutu 0,1 µm) PES ve UP150 (por boyutu 150 kDa=kilodalton) PES membranlardır.

B. bacteriovorus'un filtrasyon üzerindeki etkisi direk olarak *B. bacteriovorus* hücrelerinin atıksuya eklenmesi ve filtrasyon işleminden sonra kirletilen membranın temizlenmek üzere ayrı bir haznede *B. bacteriovorus* solüsyonunda temizlenmesi olmak üzere 2 farklı şekilde incelenmiştir.

3.3. *Bdellovibrio Bacteriovorus*'un Aktif Çamura Eklenmesinin Çamur Parametrelerine ve Membran Kirlenmesine Etkisi

Avcı bakterinin aktif çamura eklenmesinin membran kirlenmesine etkisini incelemek amacıyla *B. bacteriovorus* belli oranlarda aktif çamur içerisine eklenmiştir. İki set halinde yapılan deney 1 lt'lik beherde 250 mL çamur numunesi olacak şekilde gerçekleştirildi. Beherlerlerin ikisine çamurun 1/6'sı oranında *B. bacteriovorus* diğer ikisine ise 1/6 oranında HM tamponu eklendi (kontrol) ve 3 saat inkübasyona bırakıldı. Ardından aktif çamurlarda AKM, KOİ, karbonhidrat ve protein değerleri ölçüldü. Her beher ayrı ayrı dead-end sisteme yerleştirilen MP005 membranlardan filtre edildi ve kararlı akı değerleri karşılaştırıldı.

3.4. Atıksu Parametrelerinin Ölçümü

3.4.1. AKM Ölçümü

Havalandırılan çamur iyice karıştırıldıktan sonra 10 ml alınır ve 0.45 por çapına sahip önceden desikatörde nemi alınmış filtre kâğıdından süzülür. Süzüntü kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ölçümü için kullanılır. Filtre kağıdı 105 °C de 1 saat bekletilir ve tartım yapılır, filtrenin boş değeri bu değerden çıkartılarak AKM miktarı hesaplanır. AKM hesabı denklem (3.4)'de gösterilmiştir.

$$\text{Hesaplama} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{son tartım-ilk tartım (mg)}}{\text{süzülen hacim (L)}} \quad (3.3)$$

3.4.2. KOİ Ölçümü

AKM sonucu elde edilen süzüntüde Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) tayini yapılır. KOİ>400 olduğunu tahmin ettiğimiz numunelere muhakkak seyreltme yapılır.

İki cam tüpe 2,5 mL numune (2x2,5mL), diğer ikisine 2,5 mL saf su (2x2.5mL) eklenir. Tüplerin her birisine 1.5 mL parçalama çözeltisi (potasyum dikromat), 3,5 mL sülfirik asit reaktifi eklenir ve kapakları sıkıca kapatılır. Daha sonra tüpler 150 °C' de 2 saat termoreaktöre konur. İki saat sonra alınan numuneler oda sıcaklığına soğutulur. Tüpler titrasyonun kolay yapılması için cam beherlere boşaltılır. İçerisine 0,10 mL (2 damla) ferroin indikatörü ilave edilir. Standardize edilmiş 0.025 M demir amonyum sülfat (FAS) ile titre edilirken karıştırılır. Mavi-yeşilden kırmızımsı kahveye döndüğü an eklenen FAS miktarı not edilir. KOİ hesaplaması denklem (3.5)'de gösterilmiştir.

$$KOİ \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) \cdot M \cdot 8000}{mL \text{ numune}} \quad (3.4)$$

- A = Şahit için kullanılan FAS, mL
- B = Numune için kullanılan FAS, mL
- M = FAS' ın molaritesi, 0,025 M
- 8000=oksijenin miliequivalent ağırlığı x 1000 mL/L

3.5. Çökeltide ve Süzüntüde Karbonhidrat ve Protein Tayini (EPS ve SMP Analizi)

5 mL çamur numunesi alınır, 4000 rpm'de 4 C°de 10 dakika santrifüj yapılır. Üstte kalan sıvı ayrı bir tüpte SMP analizi için ayrılır. Kalan çökelti saf suyla eski hacmine tamamlanır ve vortex cihazı kullanılarak karıştırılır ve üzerine % 37'lik formaldehit çözeltisi eklenir. 1 saat 4 C°de bekletilir. 1 saatin sonunda 1N'lik 500 µL NaOH çözeltisi eklenir ve 3 saat daha 4 C°de bekletilir. 13200 rpm'de 4 C°de 20 dakika santrifüj yapılır. Santrifüj sonunda üstte kalan sıvı EPS analizi için kullanılır.

3.5.1. Protein Analizi

UV cihazının sıfırlanması için 2 adet cam tüp içine 1'er mL saf su eklenir ve sonraki adımlarda numunelere uygulanan bütün işlemler bu tüplere de uygulanır. 2'şer adet cam tüpe 1'er mL SMP ve EPS numunelerinden konulur. Her bir tüpe 1400 µL Lowry çözeltisi eklenir. 20 dakika karanlıkta bekletilir. 15. dakikada Folin karışımı hazırlanmaya başlanır. 20. dakikanın sonunda her bir tüpe 200 µL Folin karışımından eklenir. 30 dakika karanlıkta bekletilir. 30 dakika sonunda UV cihazında 660 nm'de absorbansları ölçülür. Daha önce yapılmış olan kalibrasyon grafiğindeki absorbans değerlerinden numunenin içinde bulunan protein miktarı tayin edilir.

3.5.2. Karbonhidrat Analizi

UV cihazının sıfırlanması için 2 adet cam tüp içine 1'er mL saf su eklenir ve sonraki adımlarda numunelere uygulanan bütün işlemler bu tüplere de uygulanır. 2'şer adet cam tüpe 1'er mL SMP ve EPS numunelerinden konulur. Her bir tüpe %80'lik Fenol çözeltisi eklenir. Daha sonra her bir tüpe derişik sülfürik asit (H₂SO₄) eklenir. 15 dakika bekletilir. Son 5 dakikada soğuması için su dolu bir beherin içine konulur. 15 dakika sonunda UV cihazında 490 nm'de absorbansları ölçülür. Daha önce yapılmış olan kalibrasyon grafiğindeki absorbans değerlerinden numunenin içinde bulunan protein miktarı tayin edilir.

3.5.3. Hidrofobisite Ölçümü

Aktif çamurda hidrofobisitenin ölçümü Rosenberg'in tanımladığı MATH testi (microbial adhesion to hydrocarbon) ile belirlenmiştir [Rojas and Kumar, 2012]. 1 mL'lik aktif çamur örneği 15 mL'lik falkonlara koyulur ve 9 mL TRIS HCl eklenir. 3000 rpm'de 20 dak santrifüj edilir. Falkonunda 2 farklı faz meydana gelir (çöken çamur ve üst sıvı fazı). Üst sıvı fazı dipte toplam 1 mL kalacak şekilde boşaltılır. Tekrar 9 mL TRIS HCl ile tamamlanır ve santrifüj edilir. Bu işlem 3 kez tekrarlanır. 3. kez santrifüjden alınan 10 mL'lik sıvı+katı ayırım bu kez dibinde 3 mL kalacak şekilde bırakılır. 3 mL'lik süspansiyon homojen olması için çalkalanır ardından 600 nm'de ilk

OD (optical density) okuması yapılır. İlk okumadan sonra 0,3 mL hegzadekan 3 mL süspansiyon içerisine karıştırılır ve 2 dakika vortekslenir. Ardından 600 nm’de 15 dak sonundaki OD miktarı okunur ve son OD olarak kayda alınır. Hesaplanması eşitlik (3.4)’de verilmiştir.

$$\% \text{ Hidrofobisite} = \left(1 - \frac{\text{son OD}}{\text{ilk OD}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

3.6. Atıksu Beslenmesi

Tüm deneyleri için sistem atıksu özelliklerini stabil tutabilmek amacı ile sentetik atık su ile beslenmiştir. Hazırlanan sentetik atıksuyun özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1: Atıksuyu beslemek için hazırlanan sentetik besiyer içeriği.

Madde	Miktar (mg/L)
Glikoz	1000
Pepton	77
Üre	154
KH ₂ PO ₄	77
K ₂ HPO ₄	7.7
(NH ₄) ₂ SO ₄	77
MgSO ₄ .7H ₂ O	77
NaHCO ₃	38
CaCl ₂ .2H ₂ O	15.4
NaCl	77
KCl	15.4
CuSO ₄ .5H ₂ O	0.15
MnSO ₄ .7H ₂ O	10.8
ZnCl ₂	0.38
CoCl ₂ .6H ₂ O	0.69
FeCl ₃ .6H ₂ O	15.4

3.7. Yüzey Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

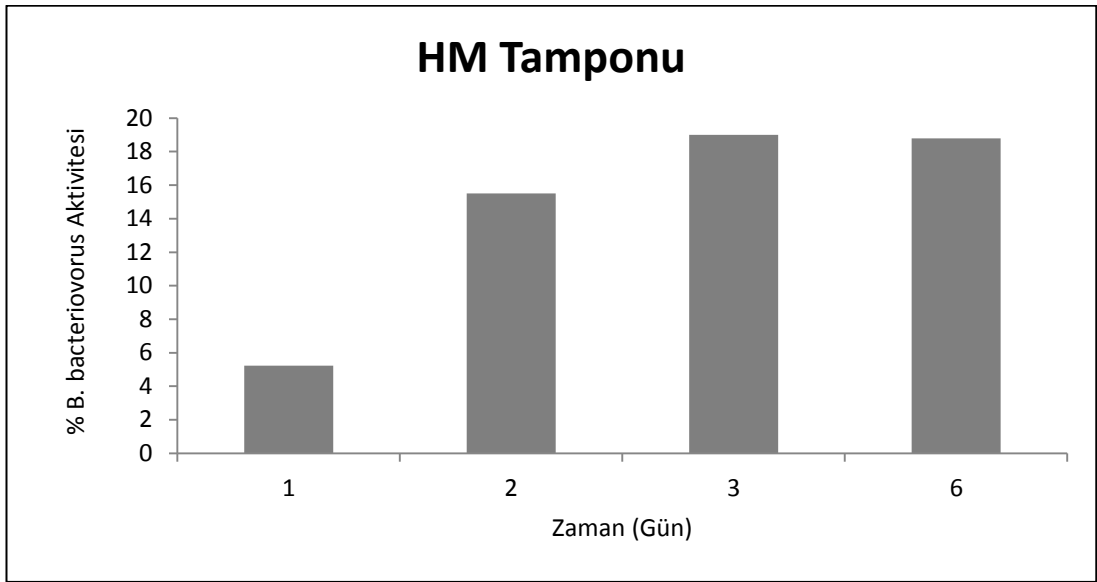
En az 6 kez dead-end sistemde filtrasyona tabi tutulan membranlar (kontrol ve *B. bacteriovorus* ile temizlenmiş) üzerlerindeki kek tabaka sıyrılarak, SEM analizi yapılana kadar % 4'lük gluteraldehit solüsyonunda +4 °C'de bekletilmiştir. Ardından gluteraldehit solüsyonundan çıkartılan membranlar petri kaplarına alınmış ve nemli kalmaları için yanlarına bir miktar ıslak pamuk bırakılmıştır.

Membran yüzeyindeki mikroorganizma yapılaşması TÜBİTAK MAM bünyesinde bulunan SEM cihazıyla belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. *Bdellovibrio Bacteriovorus* üretimi

Tez çalışmasında öncelikle *B. bacteriovorus* aktivitesinin zamana göre değişimi incelenmiştir. Avcı bakterilerin yüksek aktivite göstermesi membran yüzeyinin etkin temizliği için önemlidir. HM tamponunda *E. coli* hücrelerini parçalayarak üreyen *B. Bacteriovorus* hücrelerinin aktivitesindeki değişim Şekil 4.1’de görülmektedir. Membran temizliği için 3 gün süresince üretilmiş *B. bacteriovorus* hücreleri tercih edilmiştir.



Şekil 4.1: HM tamponunda *B. bacteriovorus*'un aktivitesi.

4.2. *Bdellovibrio Bacteriovorus*'un Temizleme Etkisinin Membran Gözenek Büyüklüğü ile İlişkisi

Üç farklı por büyüklüğüne sahip (0,1 μm , 0,05 μm ve 150 kDa) PES membranları Dead end sistemde çamur filtrasyonu için kullanılmıştır. Her membran ile yaklaşık 7-9 filtrasyon yapılmıştır ve sürücü kuvvet 1,5 bar (10^5 Pa) ayarlanmıştır. Filtrasyonda kullanılan aktif çamurun AKM değerinin 3000 mg/L civarında olduğu

gözlemlenmiştir. Bu deneyde kullanılan aktif çamurun partikül boyutu ve çamur yaşı Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Dead-end filtrasyon deneylerinde kullanılan aktif çamurların özellikleri.

Atıksu	AKM (mg/L)	Partikül Boyutu (µm)	HRT (saat)*	SRT (gün)*
Havalandırmalı kesikli sistem	3000	80-95 µm	48	20

*HRT: Hidrolik alıkonma süresi (saat), SRT: Sistemde çamurun kalma süresi (gün)

Her filtrasyondan sonra membranların yüzeyindeki kek tabaka sıyrıldıktan sonra membran *B. bacteriovorus* ile oda sıcaklığında 3 saat inkübasyona bırakılmıştır. Kontrol membranı ise tamponda inkübe edilmiştir. Üç farklı por boyutuna sahip membranla yapılan deneylerde 3 gün üretilmiş *B. bacteriovorus* kültür kullanılmıştır.

Filtrasyon sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek adına, yapılan filtrasyonlardan alınan akı sonuçları iki şekilde değerlendirilmiştir.

i) *B. bacteriovorus* ile temizlenmiş membranın kararlı akı değerinin aynı koşullarda çalıştırılan kontrol membranının (tampon ile temizlenmiş membran) kararlı akısı ile kıyaslanması.

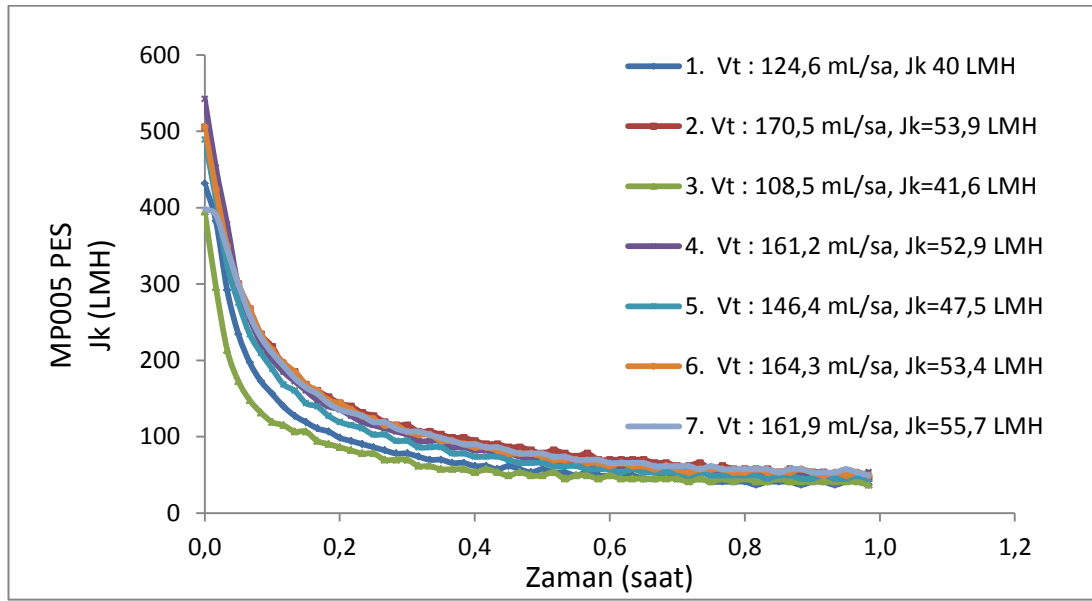
ii) Her membran için ilk filtrasyon ve sonraki filtrasyonlar arasındaki kararlı akı farkının değerlendirilmesi (denklem (4.1)).

$$\Delta Jk = Jk_n - Jk_1 \quad (4.1)$$

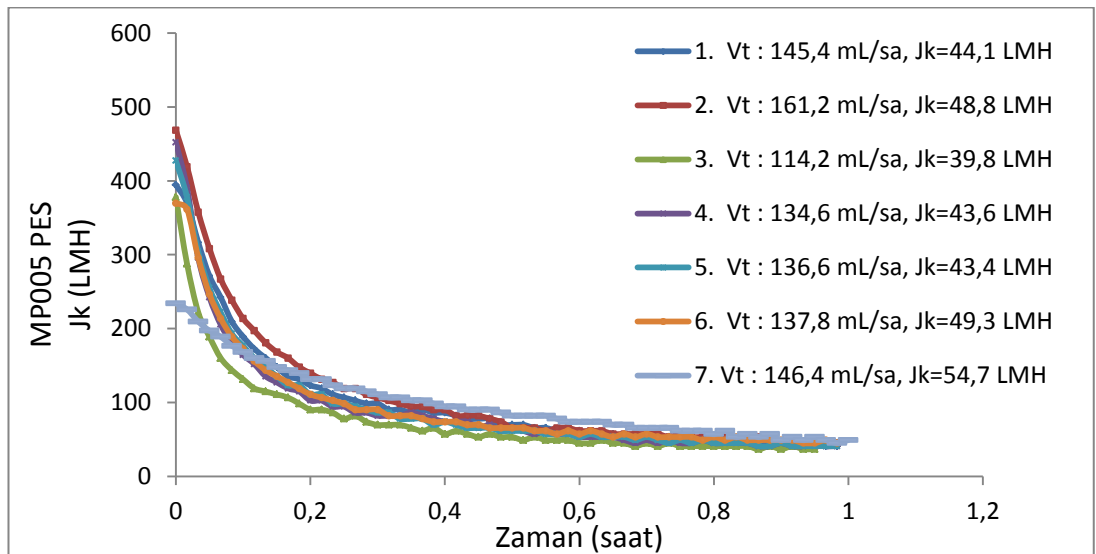
- ΔJk = 1. ve n. filtrasyonlar arasındaki sabit akı farkı
- Jk_n = n. filtrasyonun sabit akısı
- Jk_1 = ilk filtrasyonun sabit akısı

Bu bölümde alınan sonuçlar birinci yaklaşıma göre değerlendirilmiştir.

Şekil 4.1'de MP005 membranı ile yapılan filtrasyon deneylerine ait akı değerleri görülmektedir. Tüm filtrasyonlarda *B. bacteriovorus* ile yıkanan membranda (Şekil 4.2) alınan kararlı akı değerlerinin kontrol membranından (Şekil 4.3Şekil 4.3) daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla avcı bakteri *B. bacteriovorus* ile yapılan temizleme işlemi sonucunda membran yüzeyindeki bakteri tabakasında azalma sağlanmış ve bu da filtrasyonun verimini artırmıştır.



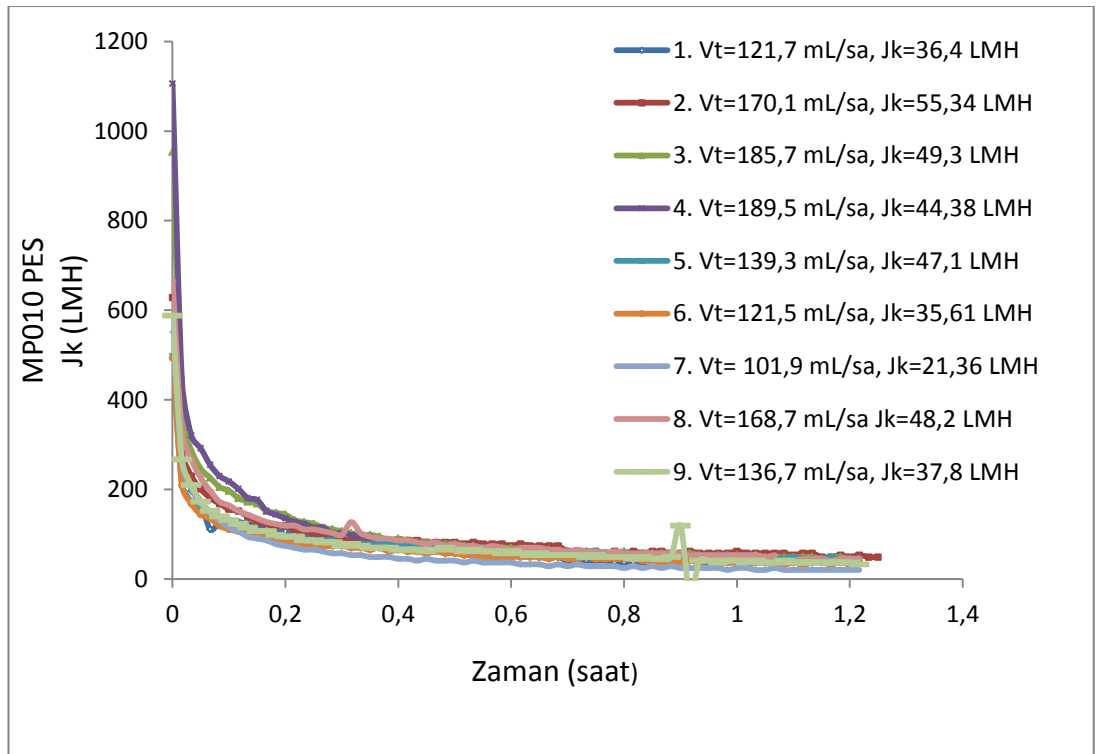
Şekil 4.2: *B. bacteriovorus* ile temizlenen PES MP005 membranına ait akı değerleri. (Jk: kararlı akı, Vt: toplam süzüntü hacmi, LMH: L/m².sa)



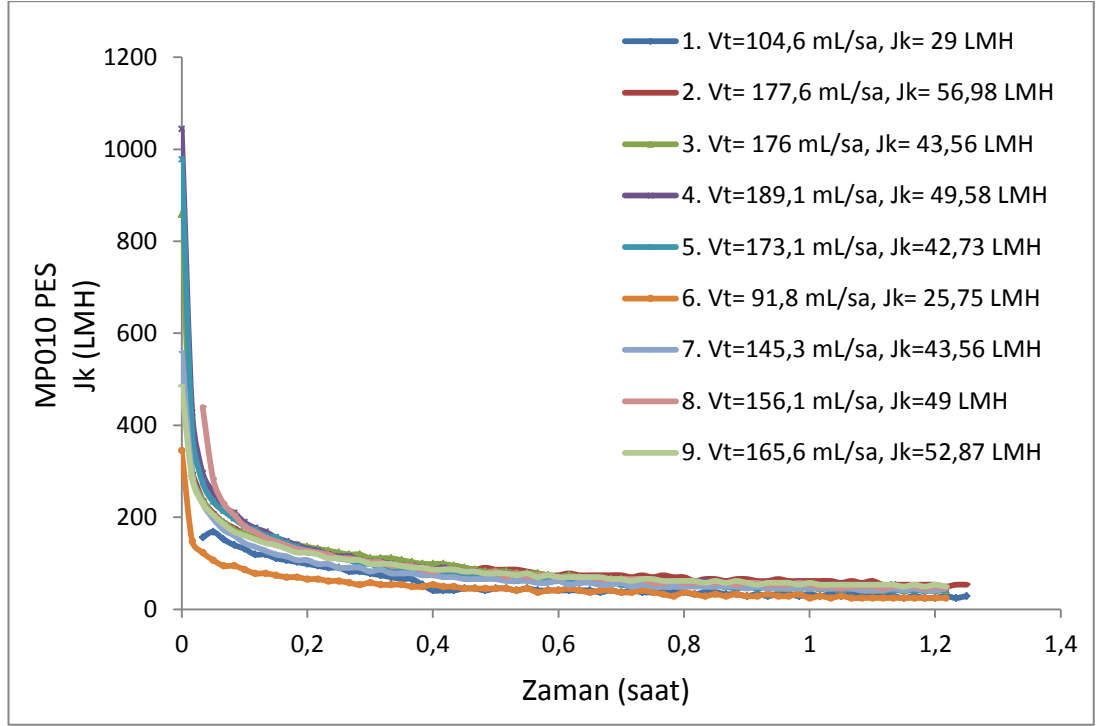
Şekil 4.3: Kontrol PES MP005 membranına ait akı değerleri.

MP005 (por büyüklüğü 0,05 μm) membranı ile alınan verimli sonuçlar MP010 (por büyüklüğü 0,1 μm) ile elde edilememiştir (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'deki sonuçlara baktığımızda *B. bacteriovorus* ile temizlenen (Şekil 4.4) membrandaki kararlı akıların Şekil 4.5'de görülen kontrol membranından daha yüksek olmadığını görmekteyiz.

SEM analizi sonucunda *B. bacteriovorus* ile temizlenen MP010 yüzeyinde daha az bakteri görülmesine rağmen bu etki akıya yansımamıştır. 0,1 μm 'lik por çapı bakterilerin veya mikrobiyel bazı kalıntıların sıkışmasına elverişli olabilir; bu porların içinde bulunan maddelere *B. bacteriovorus*'un kolay ulaşamamış olabileceği düşünülmüştür.

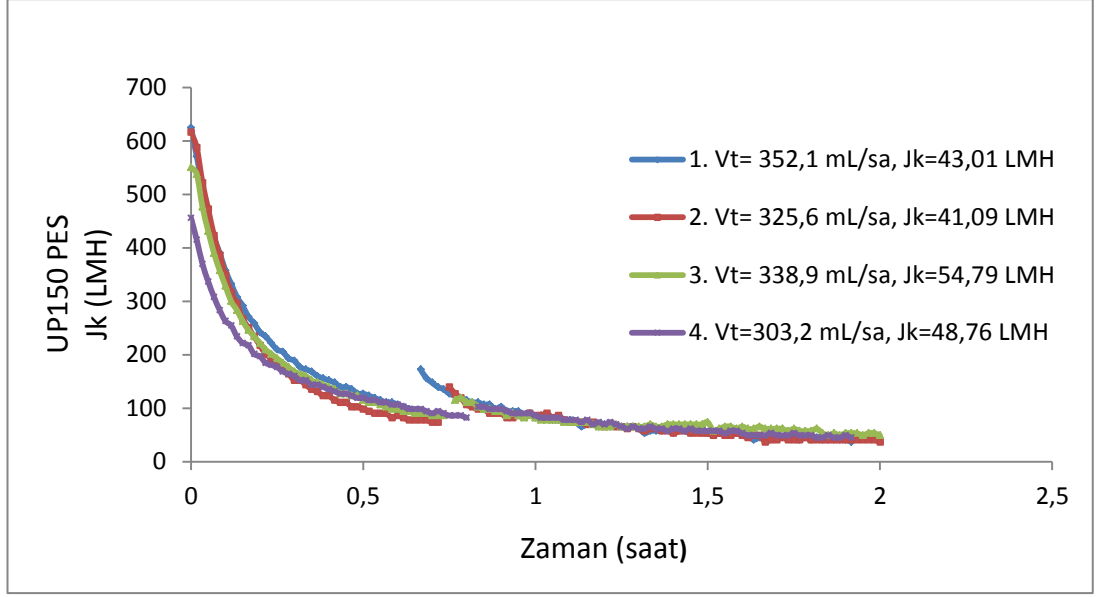


Şekil 4.4: *B. bacteriovorus* ile temizlenen PES MP010 membranına ait akı değerleri.

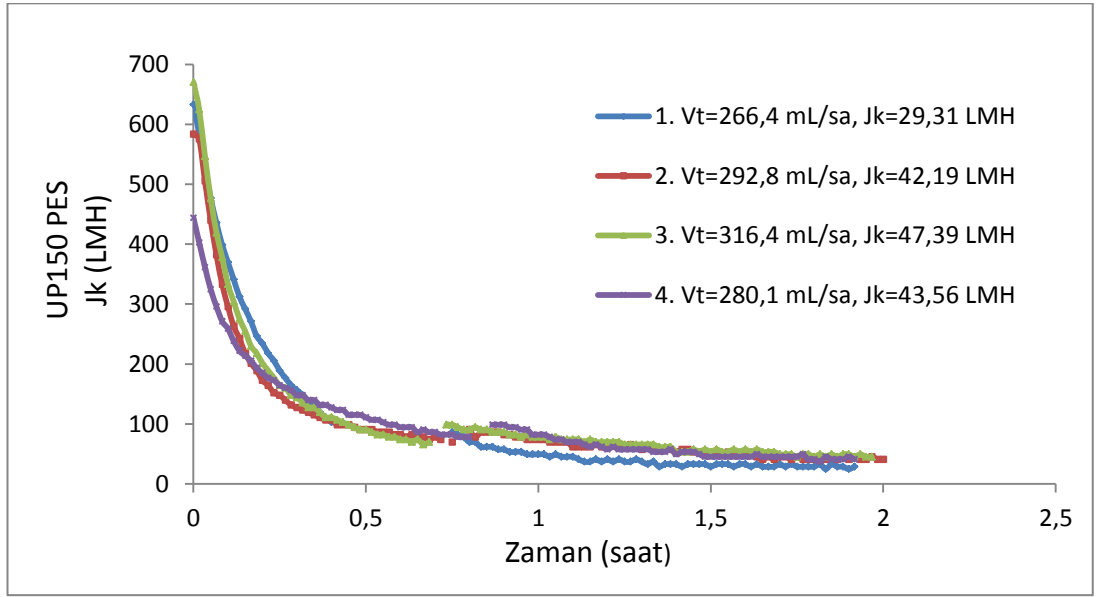


Şekil 4.5: Kontrol PES MP010 membranına ait akı değerleri.

Son olarak *B. bacteriovorus* ile temizleme işleminin etkisi PES UP150 ultra filtrasyon membranında denenmiştir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7). Bu membran yapısı itibari ile 150 KDa'luk por boyutuna sahip maddeleri filtre etmeye elverişlidir. UP150 membranı ile yapılan filtrasyon deneylerinde *B. bacteriovorus* ile temizlenen membranda kararlı akının MP005'te olduğu gibi kontrole kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'ün, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 ile kıyaslanmasında). Por büyüklüğü veya membranın fiziksel yapısı *B. bacteriovorus* aktivitesi için önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmıştır.



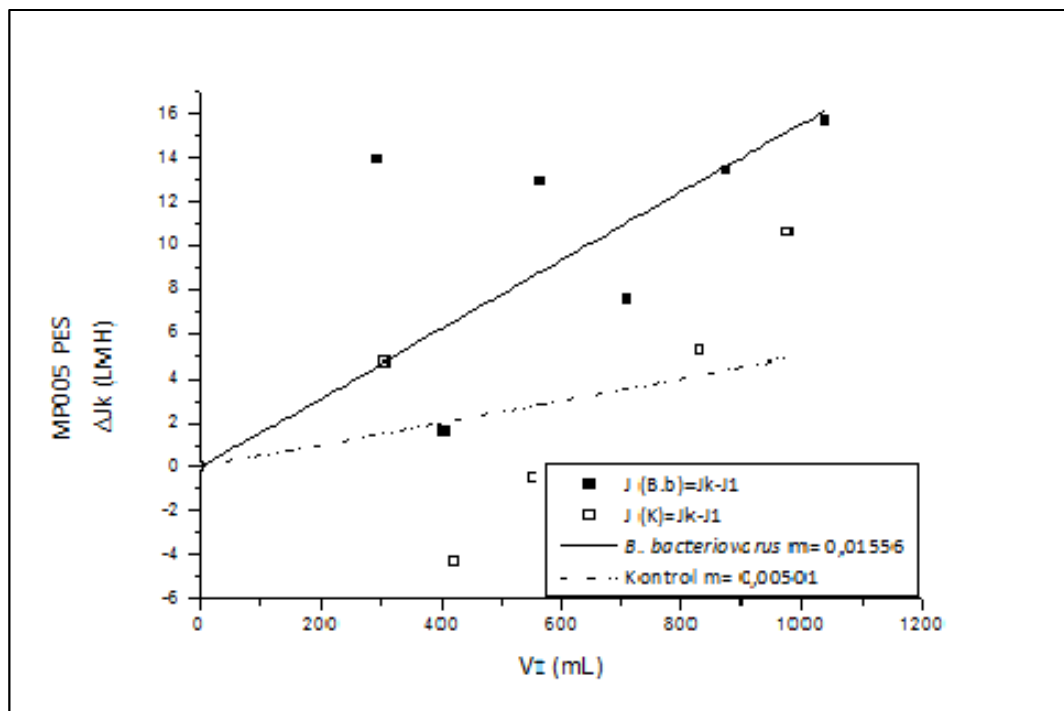
Şekil 4.6: *B. bacteriovorus* ile temizlenen PES UP150 membranına ait akı değerleri.



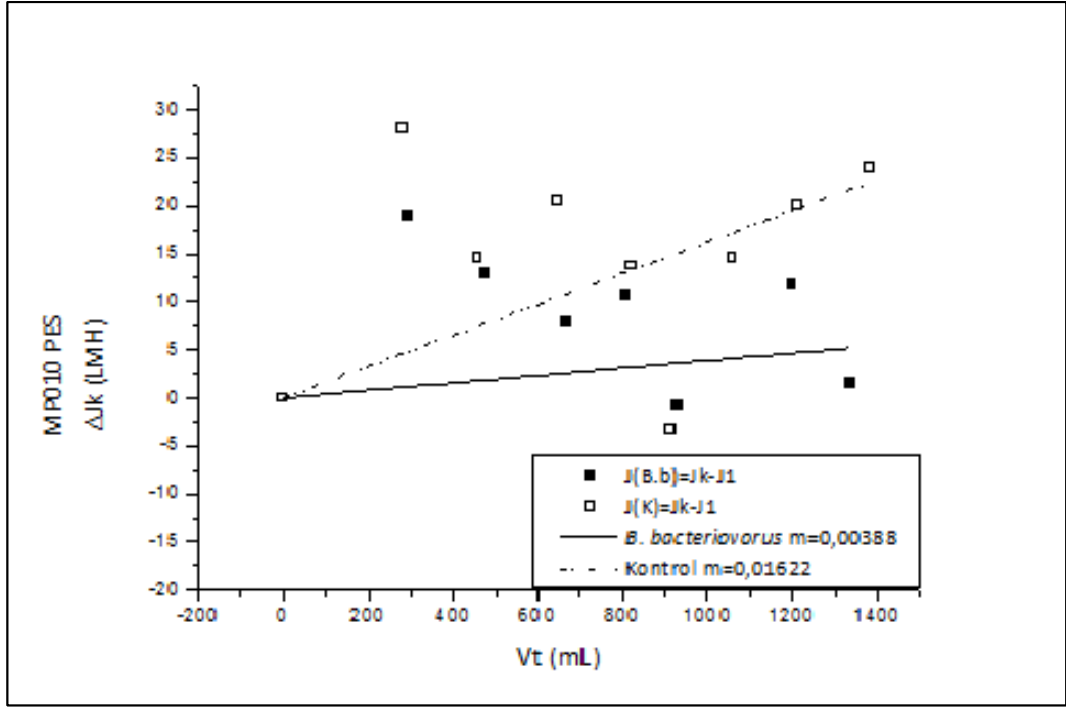
Şekil 4.7: Kontrol PES UP150 membranına ait akı değerleri.

Yukarıda alınan deney sonuçları farklı bir yaklaşımla incelenmiş, her membran için elde edilen ilk filtrasyonunda alınan kararlı akı değeri sonraki filtrasyonlarda alınankararlı akı değerlerinden çıkarılmış ve elde edilen ΔJk değerleri süzüntü hacmine göre grafiklendirilmiştir. Bu grafiklerde ΔJk değerlerinin yükseliş ve düşüş trendlerinin net gözlemlenebilmesi için grafiklere eğim çizgileri eklenmiş ve bu çizgilerin eğim değerleri kıyaslanmıştır. İlk filtrasyona kıyasla alınan bu akı farklarının

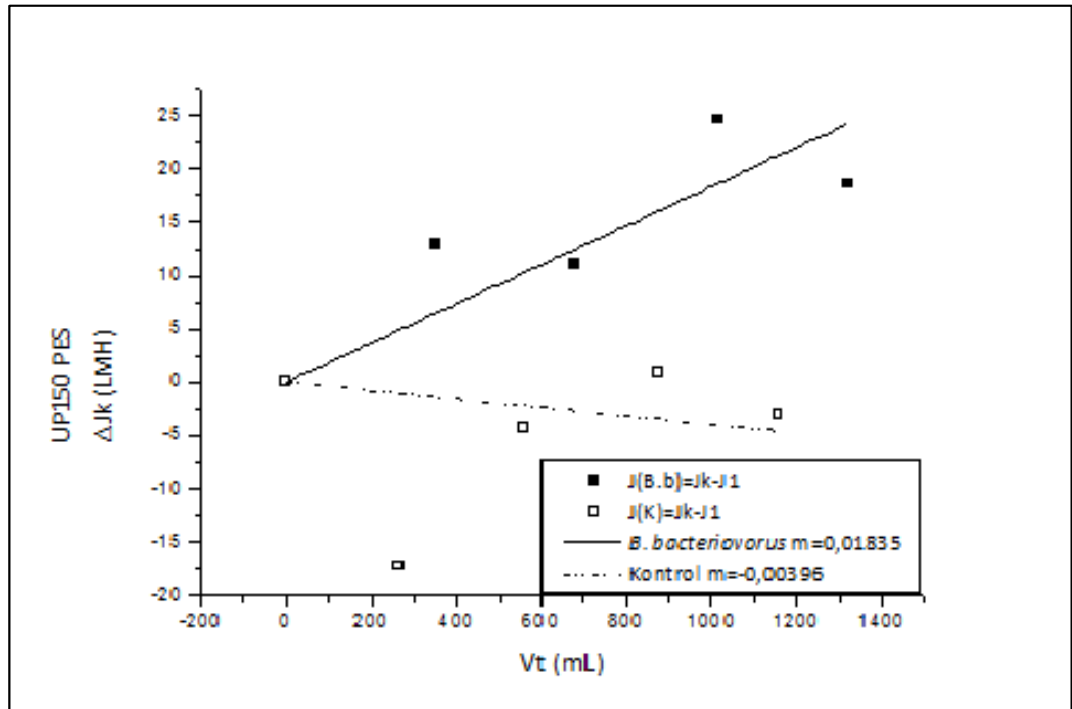
(ΔJ_k) daha pozitif bir değerde olması eğrinin pozitif eğimini artırmaktadır. Dolayısıyla *B. bacteriovorus* ile temizlenen deney membranının ΔJ_k değerlerine ait eğimin kontrole kıyasla daha yüksek olması bu biyolojik temizleme işleminin verimli olduğunu göstermektedir. Aşağıda bu yaklaşıma göre çizilen grafikler görülmektedir. MP005 ve UP150 kullanıldığında (Şekil 4.8 ve Şekil 4.10) *B. bacteriovorus* ile temizlenen membranın ΔJ_k değerlerinin kontrollerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. MP010 membranında ise kontrolüne kıyasla membran daha fazla tıkanmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.8: MP005 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi. ($\Delta J_k = J_k - J_{k1}$, J_k : kararlı akı, J_{k1} : ilk atıksu filtrasyonu akısı, V_t : toplam süzöntü hacmi).



Şekil 4.9: MP010 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi.

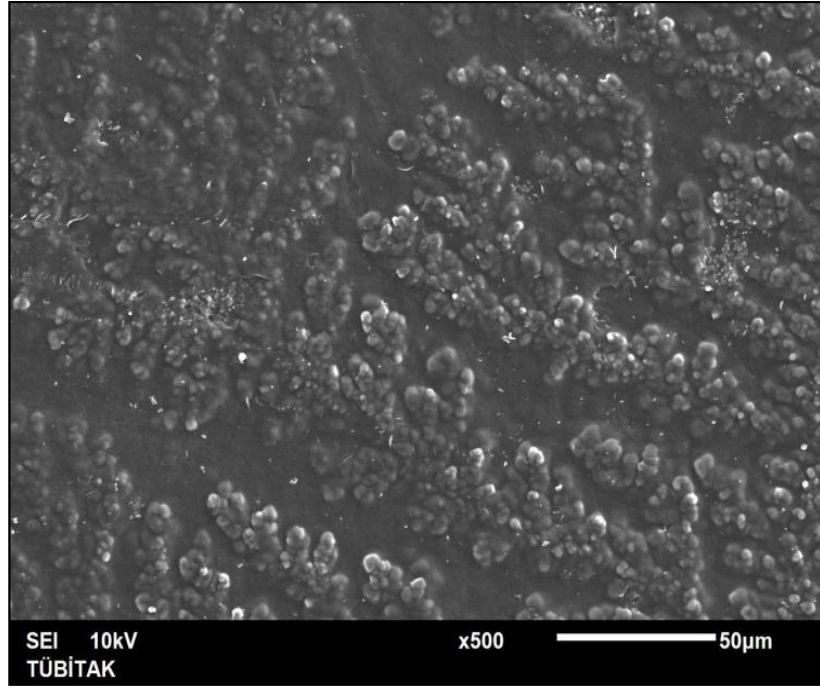


Şekil 4.10: UP150 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi.

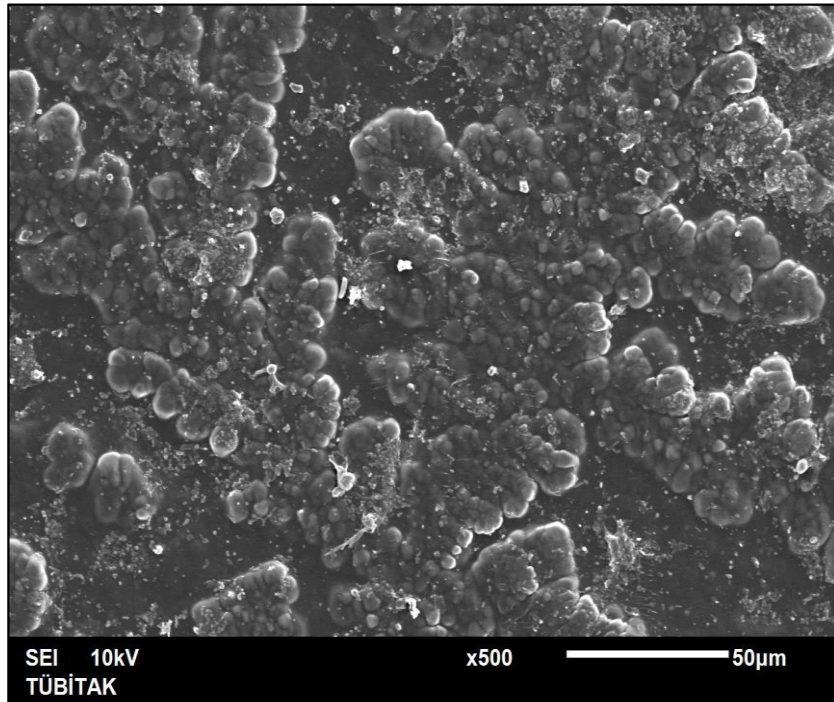
Farklı membranlarla yapılan deneyler sonucunda avcı bakteri ile membran temizlenmesinin başarısının membranların gözenek büyüklüğüne bağlı olduğu görülmüştür. Küçük gözeneklere sahip PES UP150 ve PES M005 membranlarında olumlu sonuçlar alınırken 0.1 “µm” PES M010 kullanıldığında alına sonuçlar verimsizdir. 0.1 “µm” büyüklüğündeki gözenekler yüksek basınç altında diğer bakterilere kıyasla daha küçük bir boyuta sahip olan *B. bacteriovorus*'un sıkışması için elverişli olabilir. Bu bakterinin gözenekleri tıkaması sonucu akıda düşüş olduğu düşünülmektedir.

4.2.1. MP005, MP010 ve UP150 Membranların Yüzeyinde Oluşan Mikrobiyel Tabakanın SEM Analizi

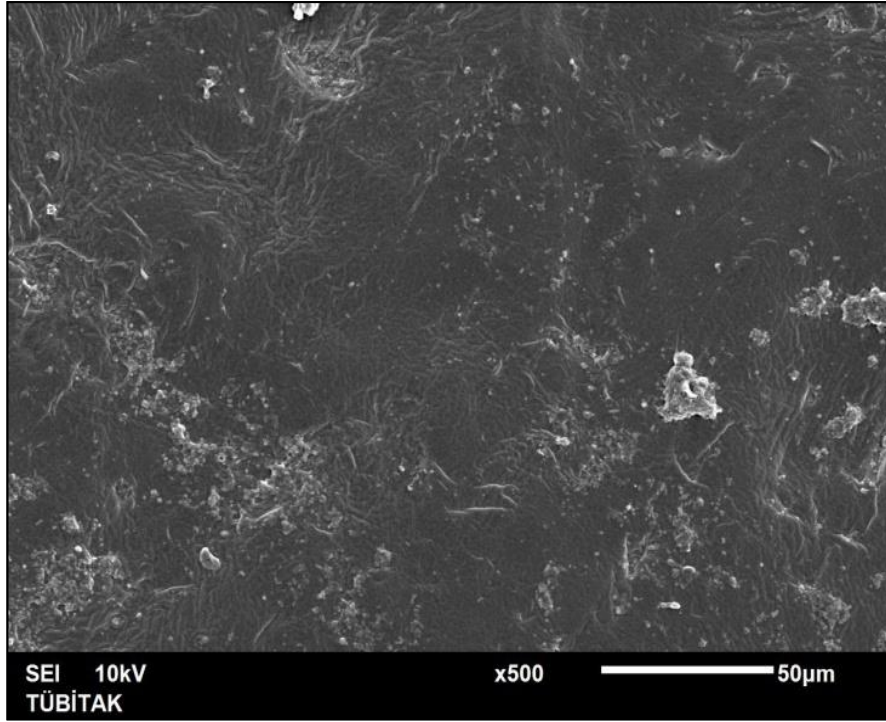
Yukarıdaki filtrasyon deneylerinde kullanılan MP005, MP010 ve UP150 membranları SEM incelemesi sonuçları aşağıdaki fotoğraflarda görülmektedir (Şekil 4.11-Şekil 4.16). MP005 yüzeyinde *B. bacteriovorus* ile yıkanan membranda bakteri yoğunluğunun daha az olduğu görülmüştür (Şekil 4.11). Diğer membran tipleri için MP005 kadar kesin bir sonuca varılamamıştır. MP010'da da deney membranları (*B. bacteriovorus* ile temizlenen membranlar) üzerinde nispeten kontrole kıyasla daha az bakteri olduğu söylenebilir. Ancak daha önceki bölümde de tartışıldığı gibi MP010'un *B. bacteriovorus* ile temizlenmesi akıda bir iyileşmeye neden olmamıştır. UP150 (Şekil 4.13) yüzeyindeki bakteri sayısı *B. bacteriovorus* ile temizlenen membranda daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kontrol membranında daha dar bir alanda çok daha fazla bakteri olduğu görülmektedir.



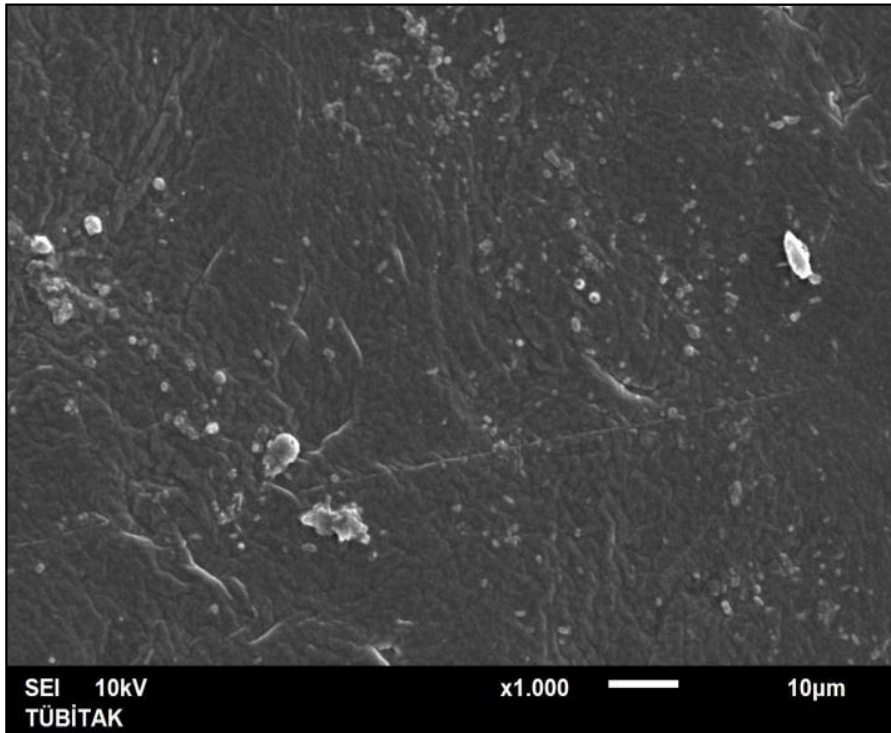
Şekil 4.11: *B. bacteriovorus* ile temizlenen MP005 membranının SEM görüntüsü.



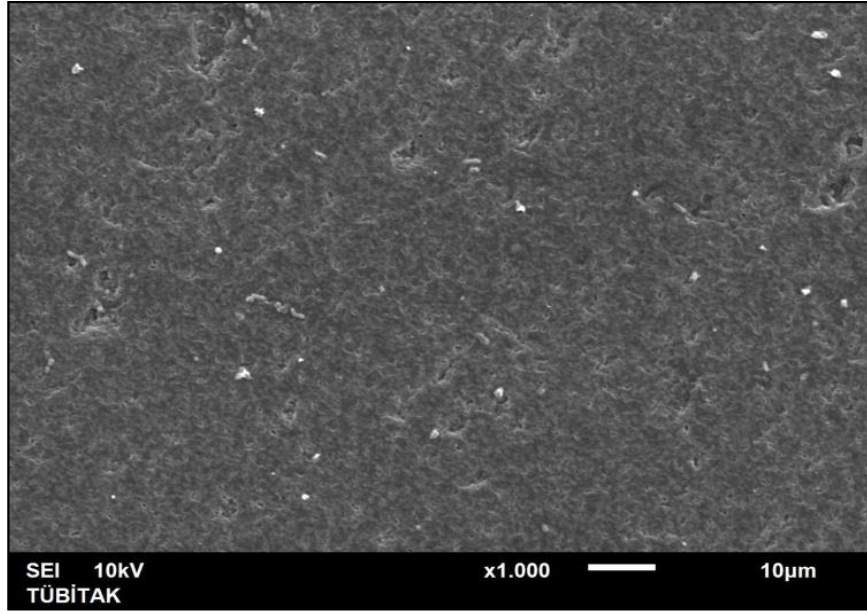
Şekil 4.12: Kontrol MP005 membranının SEM görüntüsü.



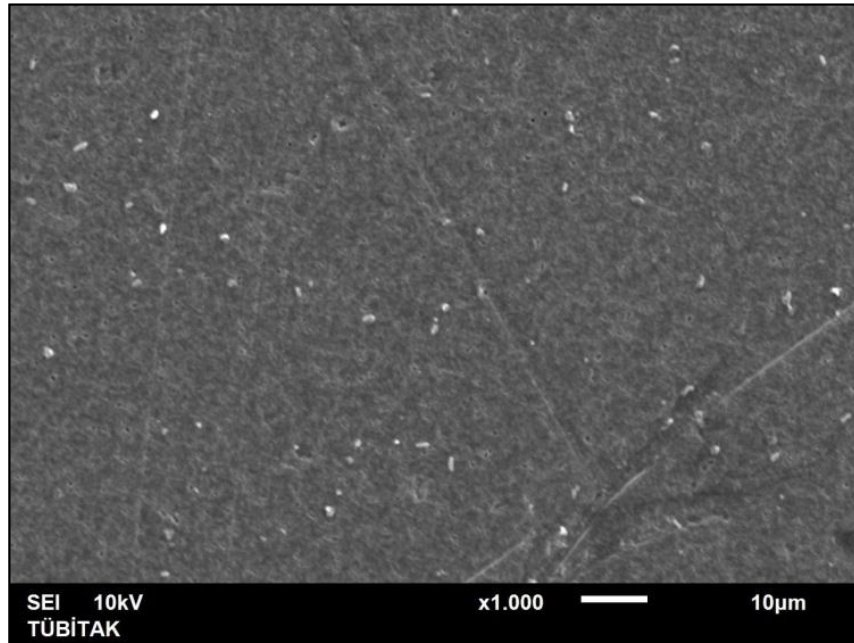
Şekil 4.13: *B. bacteriovorus* ile temizlenen UP150 membranının SEM görüntüsü.



Şekil 4.14: Kontrol UP150 membranının SEM görüntüsü.



Şekil 4.15: *B. bacteriovorus* ile temizlenen MP010 membranının SEM görüntüsü.



Şekil 4.16: Kontrol MP010 membranının SEM görüntüsü.

4.3. Çamur Hidrofobisitesinin, Karbonhidrat ve Protein İçeriğinin *Bdellovibrio Bacteriovorus* ile Temizleme İşlemine Etkisi

Çamur parametrelerinin biyolojik temizleme işlemine olan etkisinin incelenmesi amacıyla farklı çamur yaşlarına sahip aktif çamurlar laboratuvarında kesikli sistemde işletilen reaktörlerde yapılan 20 günlük besleme işlemi ile elde edilmiştir. Ölçülen parametreler Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Yüksek hidrofobisiteye ait aktif çamur elde etmek için yalnızca çamur bekleme süresini yükseltmek yeterli olmamış, aynı zamanda hidrolik bekleme süresinin de yükseltilmesi gerekmiştir. Bu çamurların MP005 membranından Dead-end sistemde filtrasyonu sonucu kirlenen membranlar *B. bacteriovorus* ile temizlenmiş ve temizleme işleminin filtrasyona etkisi kararlı akıların kıyaslanması suretiyle ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 4.17-Şekil 4.22’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: Dead-end filtrasyon deneylerinde kullanılan aktif çamurların özellikleri.

Atıksu	AKM(mg/L)	Partikül Boyutu (µm)	HRT* (saat)	SRT* (gün)	Hidrofobisite (%) ve EPS protein (mg/L)
Havalandırmalı kesikli sistem	2900	80-95 µm	48	10	33±6,3 % 15,73 mg/L
Havalandırmalı kesikli sistem	1600	80-95 µm	96	20	48±8,1 % 25,68 mg/L

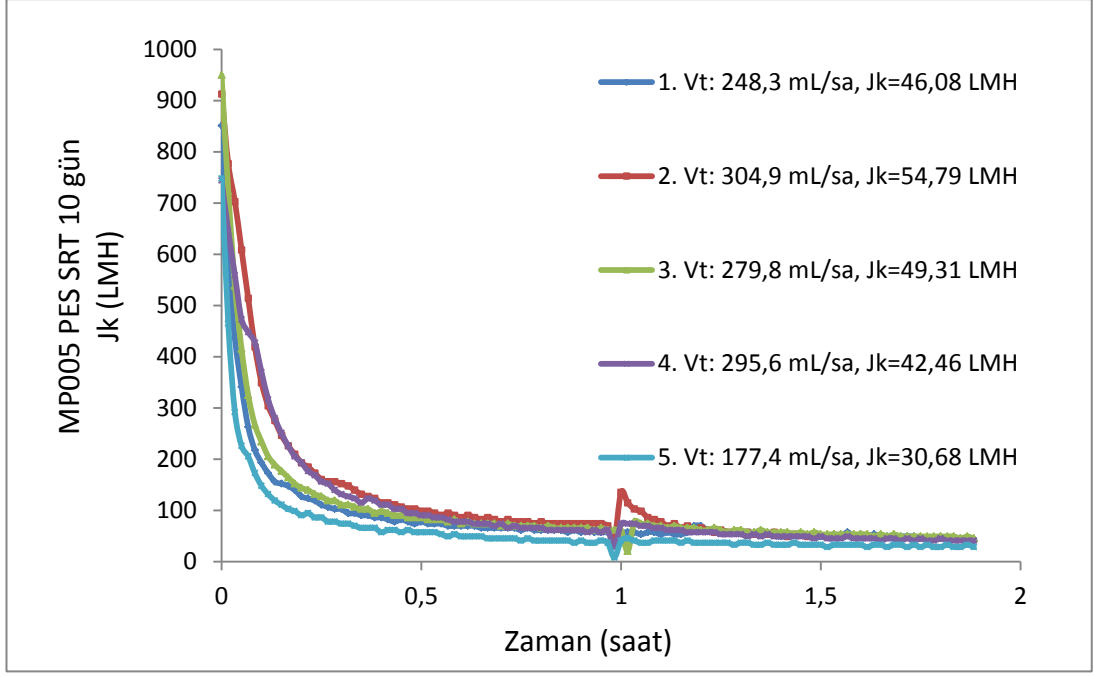
*HRT: Hidrolik alıkonma süresi (saat), SRT: Sistemde çamurun kalma süresi (gün)

Yaptığımız ölçümlerde çamur yaşı 10 gün olan çamurda iki hafta boyunca ölçülen ortalama hidrofobisitenin 20 günlük çamurdan daha düşük olduğu görülmüştür (Tablo 4.2). Ancak çamur yaşının değiştirilmesi yalnızca hidrofobisiteyi değil karbonhidrat ve protein EPS ve SMP değerlerini de etkilemiştir (Bu parametrelerin birbirine bağlı olması nedeniyle Tablo 4.3’de çamur yaşının etkisi şeklinde başlıklandırılmıştır). Genç olan çamurda protein ve karbonhidrat EPS değerleri daha düşük bulunurken, SMP değerlerinde artış görülmüştür.

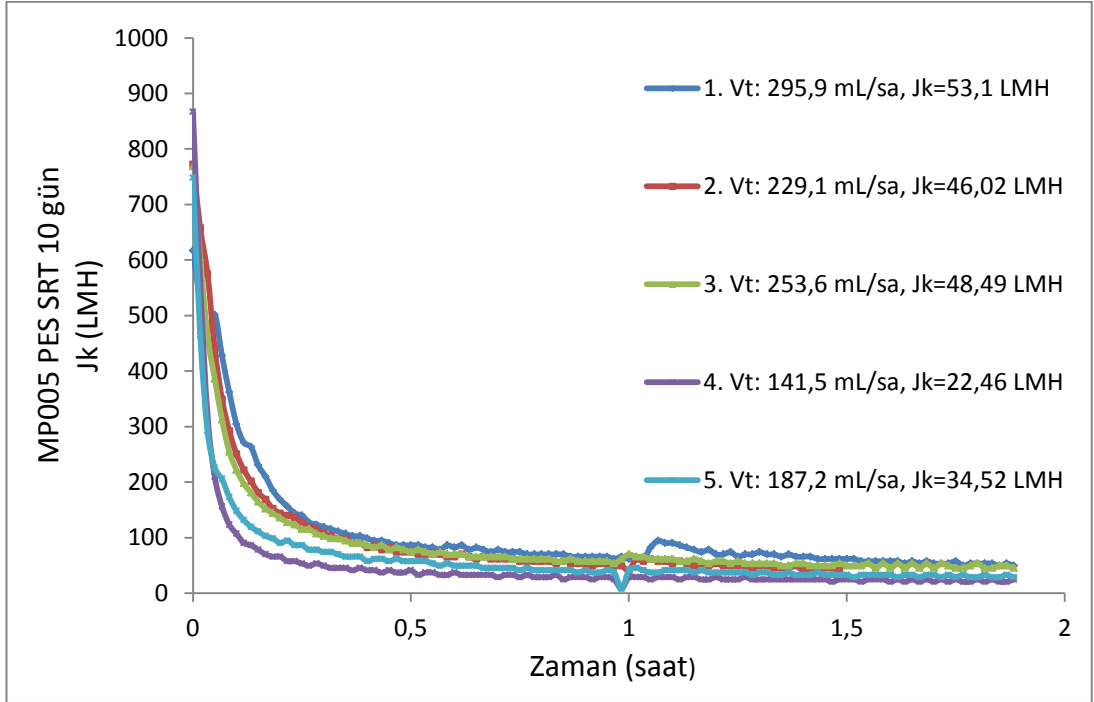
Tablo 4.3: Çamur yaşına bağlı olarak hidrofobisite ve karbonhidrat ve protein içeriği.

Çamur yaşı 10 gün (%33 ortalama hidrofobisite)				Çamur yaşı 20 gün (%48 ortalama hidrofobisite)			
Karbonhidrat(mg/L)		Protein(mg/L)		Karbonhidat(mg/L)		Protein(mg/L)	
SMP	EPS	SMP	EPS	SMP	EPS	SMP	EPS
13	135,5	7,6	39,2	10,6	159,5	3,6	59,6

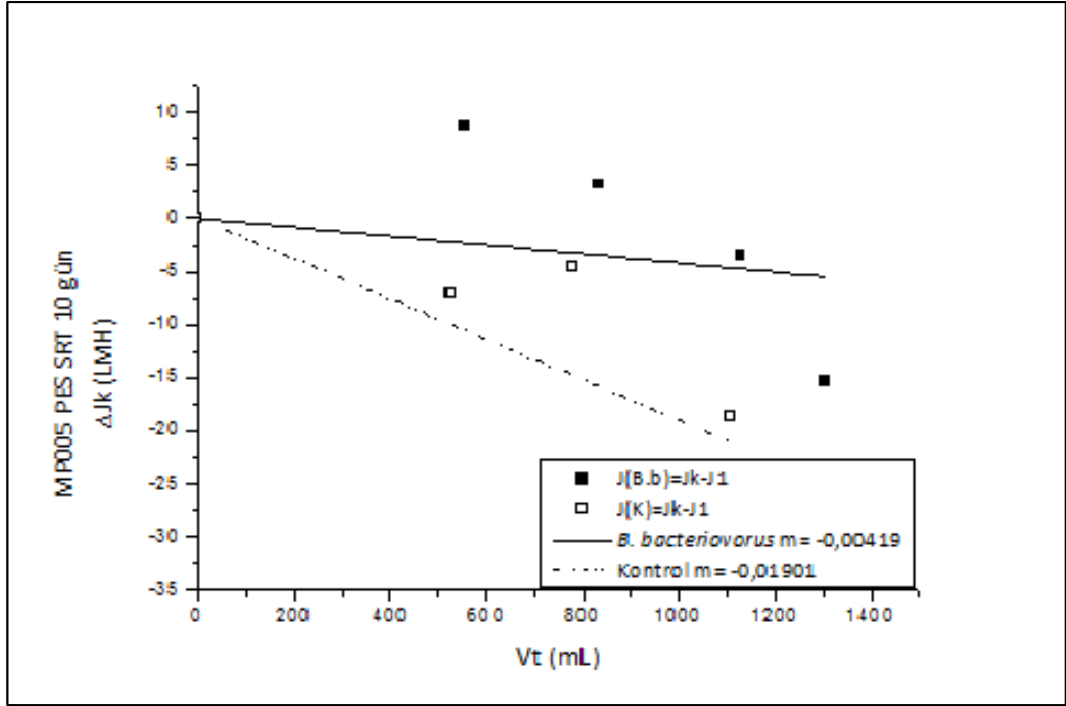
Çalışmamızda, atık su karakteristiklerinin membran yüzeyindeki bakteri tabakasını temizleme performansı üzerinde etkisi olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.19 ve Şekil 4.22). SRT ve HRT seviyeleri sırasıyla 20 ve 4 güne çıkarıldığında, çamur hidrofobitesi ve "EPS" değerleri yükselmiştir. Bu durumda, çamurda bulunan bakterilerin besin/mikroorganizma oranı düşmüş dolayısıyla çamur zamanla yaşlanmıştır. Hidrofobisitenin daha düşük olduğu genç çamurun filtre edildiği membranın (Şekil 4.22) "*B. bacteriovorus*" ile temizlenmesi membran performansında iyileşme sağlamıştır (deney membranının kararlı akısı kontrol membranından daha yüksektir). Membranın kararlı akısındaki artış Şekil 4.19'da görülmektedir. Hidrofobisitesi yüksek olan çamur kullanıldığında *B. bacteriovorus* ile temizleme işlemi daha az başarı sağlamıştır (Şekil 4.22). *B. bacteriovorus* besin olarak genç bakterileri tercih edeceğinden genç çamurda daha başarılı sonuçlar elde edilmesi beklenen bir sonuçtur.



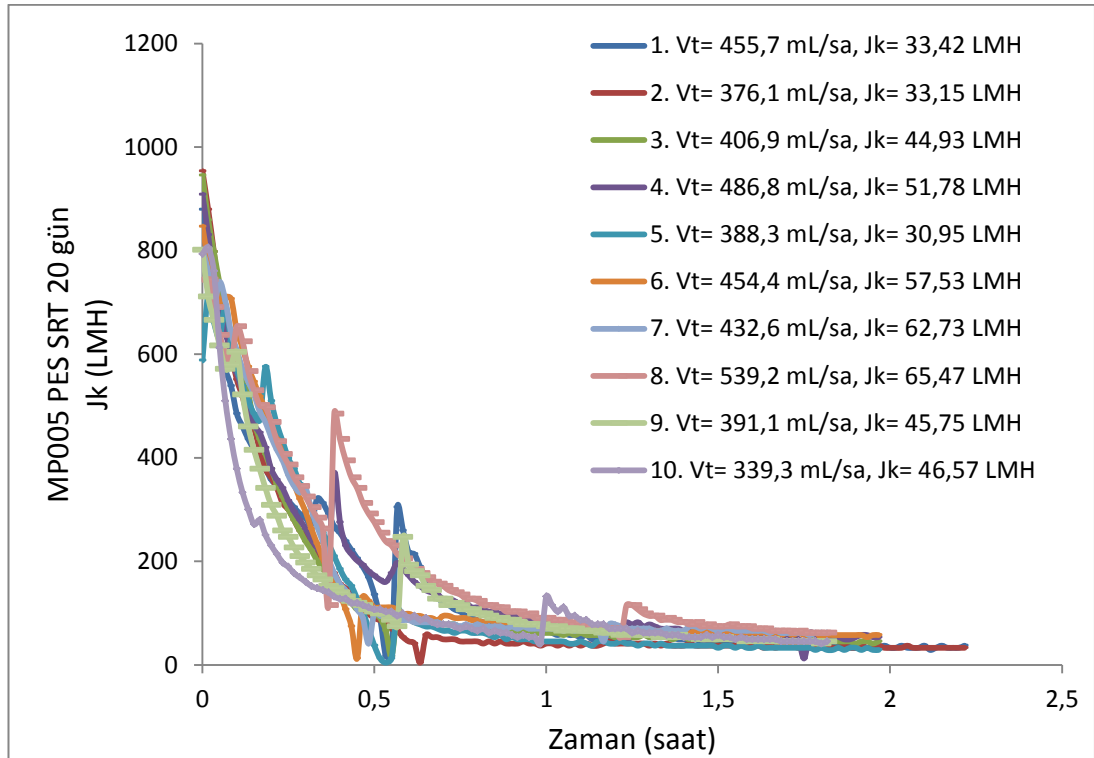
Şekil 4.17: SRT 10 gün *B. bacteriovorus* PES MP005 membranına ait akı değerleri.



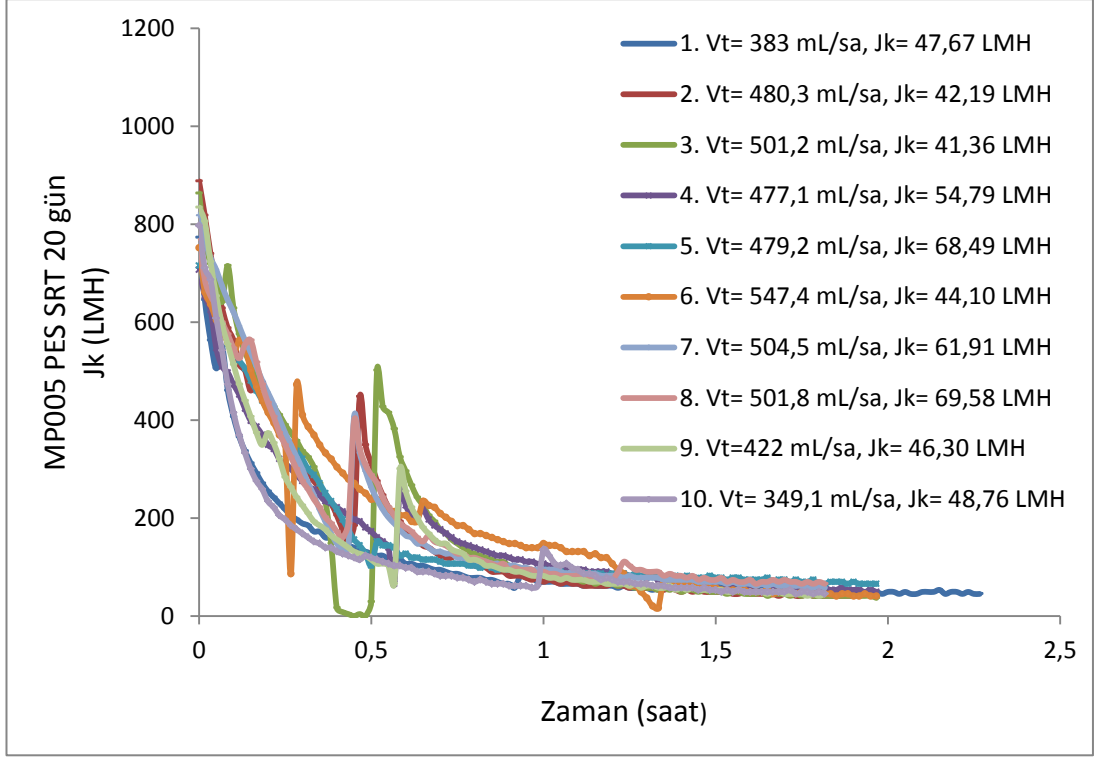
Şekil 4.18: SRT 10 gün Kontrol PES MP005 membranına ait akı değerleri.



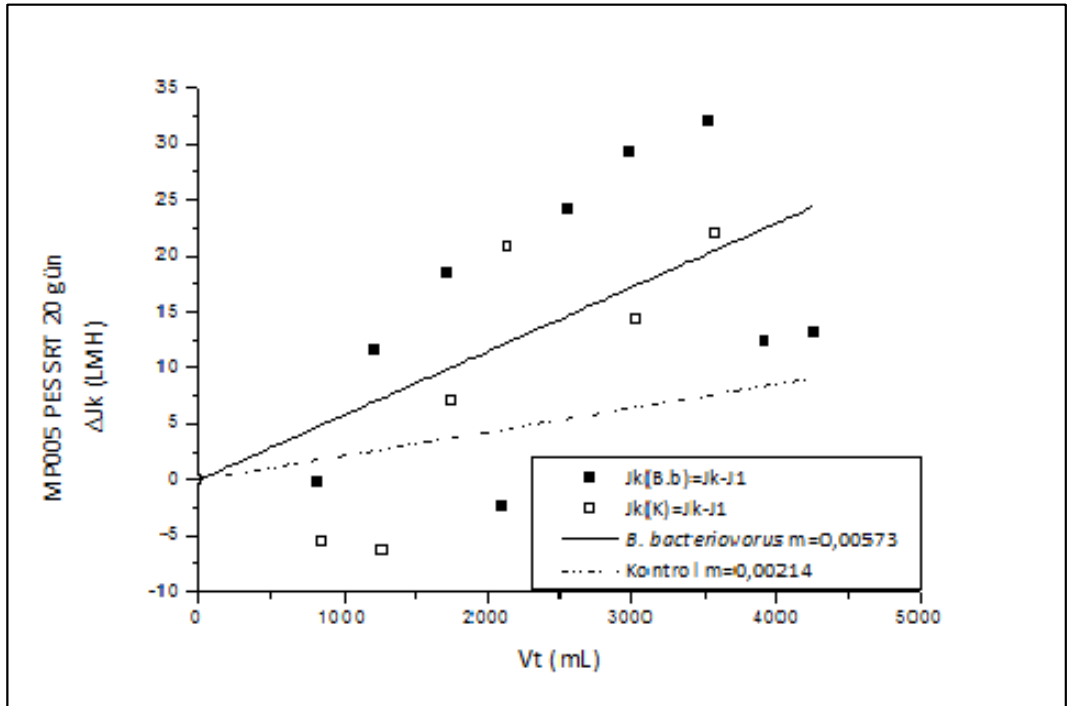
Şekil 4.19: SRT 10 gün MP005 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi.



Şekil 4.20: SRT 20 gün B. bacteriovorus PES MP005 membranına ait akı değerleri.



Şekil 4.21: SRT 20 gün Kontrol PES MP005 membranına ait akı değerleri.



Şekil 4.22: SRT 20 gün MP005 PES membranına ait akıların ikinci yaklaşıma göre değerlendirilmesi.

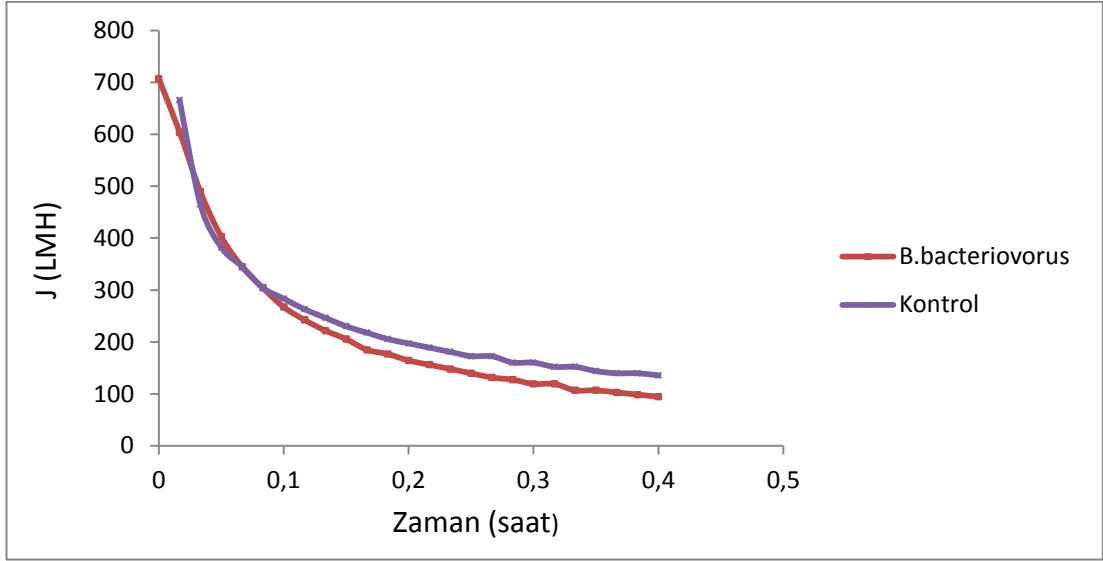
Yüksek çamur yaşı ve yüksek hidrofobisiteye sahip atıksu ile yapılan filtrasyonda *B. bacteriovorus* ile temizleme işlemi ilk yaklaşıma göre kıyaslama yapıldığında başarısız görünmesine rağmen membranların ilk filtrasyon kararlı akılarına göre (ikinci yaklaşım) kıyaslama yapıldığında başarılı görünmektedir (Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.23). Filtrasyon deneylerinde membranlardan ilk atıksu geçişinde kararlı akısı daha düşük olan membran deney membranı olarak seçilmektedir, bunun nedeni membranın yapısından kaynaklı bir akı artışının deneyi başarılı göstermesinin önüne geçmektir. Çamur yaşı 10 gün olan atık çamur ile filtrasyon bir kez daha tekrar edilmiş ve yapılan dört filtrasyon sonucunda *B. bacteriovorus* ile temizlenen membranda ortalama sabit akı değeri kontrol membranından 6,5 L/m².saat kadar daha yüksek bulunmuştur. Filtrasyondaki iyileşme çamur yaşı on gün olan çamurdaki ilk denemede %6,3, ikinci denemede ise %14,6 olarak hesaplanmıştır. Alınan sonuçlara göre genç çamur yaşı düşük olduğunda avcı bakteri kullanımı membran performansını artırabilir diyebiliriz.

Kirlenme membran tipine ve flok boyut dağılımına, çözülmüş inorganik bileşenlere, SMP ve EPS miktarı gibi çamur karakteristiğini belirleyen oluşumlara bağlıdır. Ayrıca, Van der Waals kuvvetleri tarafından sağlanan bakteriyel tutunma, elektrostatik ve asit-baz etkileşimleri de biofilm oluşumunda önemli bir role sahiptir. Bu etkileşimler ortamın ve bakterilerin fizikokimyasal özelliklerine, örneğin hidrofobisite, yüzey yükü gibi özelliklere bağlıdır.

4.4. *Bdellovibrio Bacteriovorus*'un Çamura Eklenmesinin Membran Filtrasyon Üzerindeki Etkisi

Avcı bakteri ilave edilen aktif çamur membrandan filtre edilmiş ve kararlı akı değerleri kontrol membranı (avcı bakteri yerine tampon ilave edilmiş çamur filtrasyonu yapılan membran) ile kıyaslanmıştır.

Aşağıdaki şekilde bu çamurların Dead end sistemde filtrasyonu sonucu alınan akı değerleri gösterilmiştir. Çamura *B. bacteriovorus* eklenmesinin filtrasyona bir katkısının olmadığı hatta akıyı düşürdüğü görülmüştür (mavi ve kırmızı ile gösterilen akı grafikleri). Kontrolde akı çok yüksek olduğu için reaktörün içindeki sıvı daha erken tükenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23: Çamura *B. bacteriovorus* eklenmesinin MP005 membran ile filtrasyona etkisi. (*B. bacteriovorus*: *B. bacteriovorus* içeren çamur ile filtrasyon, Kontrol: kontrol grubu, J: akı (L/m².sa))

Çamurun içine avcı bakteri ilave edilmesi kararlı akıda düşüşe neden olmuştur. Bu sonucun *B. bacteriovorus*'un bakterileri parçalaması sonucu açığa çıkan bakteri kalıntılarının membran gözeneklerini tıkaması nedeniyle elde edilmiş olabileceği düşünülmüştür. Bunun yanısıra ortama 2 günde bir çamurun içine yüksek miktarlarda *B. bacteriovorus* kültürü eklenmesi büyük ölçekli çalışmalarda işlevsel olmayacaktır. Tüm bu bulgular membran performansını artırmak amacıyla *B. bacteriovorus* hücrelerinin çamurun içine ilave edilmesinin uygun bir yöntem olmadığını göstermektedir. Sonuçlar (Tablo 4.4 ve Tablo 4.5) incelendiğinde *B. Bacteriovorus* eklenen çamurda EPS ve SMP'de bulunan karbonhidrat ve protein miktarlarının düşük olduğu görülmektedir.

Daha sonra bu atıksuların membrandan filtre edilmesi sonucunda membran yüzeyinde biriken karbonhidratlı maddeler ölçülmeye çalışılmıştır. Membran yüzeyindeki maddeler ultrasonikasyon ile solusyona alındıktan sonra bu solusyon EPS ölçümü için kullanılmıştır. Buna göre *B. bacteriovorus* eklenen çamurun süzülmesi membran yüzeyinde daha fazla karbonhidratlı EPS birikimi olmuştur (Tablo 4.4). Protein analizinde ise yine membran yüzeyinde daha fazla protein EPS biriktiği bulunmuştur (Tablo 4.5). Çamurda ise *B. bacteriovorus* varlığında ölçülen

protein EPS miktarında hata payı yüksek çıkmıştır ancak kontrole kıyasla fazla bir fark olduğu söylenemez. *B. bacteriovorus* eklenen aktif çamurda protein ve karbonhidrat değerlerinin kontrole kıyasla düşük olmasına rağmen membran yüzeyinde yüksek bulunmuştur. Bu durum 4000 rpm'de çökemeyen polimerik maddelerin membran porlarından geçemediği için membran yüzeyinde birikmesinden kaynaklanıyor olabilir.

Tablo 4.4: *B. bacteriovorus*'un çamur parametrelerine etkisi (EPS-SMP Karbonhidrat analizleri).

Numune	EPS(mg/L)	SMP(mg/L)
<i>B. bacteriovorus</i> (çamur)	113,05 ±3,12	6,81 ±0,61
Kontrol (çamur)	135,44 ±4,08	7,43 ±0,02
<i>B. bacteriovorus</i> (membran)	56,82	yapılmadı
Kontrol (membran)	50,80	yapılmadı

Tablo 4.5: *B. bacteriovorus*'un çamur parametrelerine etkisi (EPS-SMP Protein analizleri).

Numune	EPS(mg/L)	SMP(mg/L)
<i>B. bacteriovorus</i> (çamur)	62,28 ±9,27	107,45 ±28,8
Kontrol (çamur)	63,07 ±3,33	112,42 ±7,25
<i>B. bacteriovorus</i> (membran)	0,88	yapılmadı
Kontrol (membran)	0,33	yapılmadı

Çamurda *B. bacteriovorus* varlığı AKM ve KOİ değerlerinde belirgin bir farka neden olmamıştır (Tablo 4.6).

Tablo 4.6: *B. bacteriovorus*'un çamur parametrelerine etkisi (AKM-KOİ analizleri).

Numune	AKM(mg/L)	KOİ(mg/L)
<i>B. bacteriovorus</i> eklenmiş çamur	3385 ±219,20	782,4 ±16,97
Kontrol	3355 ±77,78	733,6 ±38,46

B. bacteriovorus'un aktif çamura ilavesi membranların erken tıkanmasına neden olmuştur. Bu durum membran yüzeyindeki protein ve karbonhidrat birikimi ile ilgili olduğu görülmüştür. Çalışmaların devamında kirlenen membranın *B.*

bacteriovorus hücreleri ile sistem dışında temizlenmesinin daha doğru bir yaklaşım olacağına karar verilmiştir.

5. SONUÇLAR

B. bacteriovorus Gram (-) bakterilerle beslenen avcı bir bakteri türüdür ve bakteriyel populasyon dengesini sağladığı için önemli bir bakteri cinsidir. Literatürde yapılan çalışmalarda *B. bacteriovorus*'un parçalama aktivitesi çoğunluğu patojenik olan birçok Gram(-) bakteri üzerinde gösterilmiştir [Dashiff et al., 2011]. Patojen Gram (-) bakteriler tarafından oluşturulan biyofilmlerin de *B. bacteriovorus* tarafından başarılı bir şekilde parçalandığı rapor edilmiştir. Aktif çamur Gram (-) ve Gram (+) bakteriler ile birçok farklı mikroorganizmayı içeren dinamik bir yapıdır. Membran yüzeyinde biyofilm tabaka oluşumunu başlatan bakterilerin çoğunlukla Gram (-) bakteriler olduklarına dair çalışmalar mevcuttur.

Bir yüzeye tutunmak ve biyofilm komünitesinin bir parçası olmak bakterilere korunma avantajı sağlamaktadır. Biyofilmi parçalayabilme kapasitesi olan *B. bacteriovorus* için bu durum askıda bulunan hücreleri parçalamaktan daha zor olmaktadır. Özellikle atıksu arıtımının bazı uygulamalarında biyofilm oluşumuna ihtiyaç duyulsa da gemi gövdeleri, membranlar, su boruları gibi yerlerde biyofilm oluşumu ciddi ve masraflı problemler yarattığı için istenmeyen bir durumdur. Bu istenmeyen durumlardan biri de membran biyoreaktörlerde kullanılan membranların yüzeyinde oluşan biyofilm tabakanın yarattığı kirlenmeye bağlı tıkanma problemidir. Membranlar fiziksel veya kimyasal yöntemlerle temizlenerek tekrar kullanılabilir veya kullanım ömrü uzatılabilir. Biyolojik temizleme stratejileri ise halen araştırma ve geliştirme aşamasındadır.

Bu tez çalışmasında *B. bacteriovorus*'un atıksuların arıtımı için kullanılan membran biyoreaktörlerdeki membranların yüzeylerinde oluşan ve membranın tıkanmasına neden olan biyofilm tabakanın temizlenmesinde kullanılma potansiyeli araştırılmıştır. Üç farklı por çapına sahip PES membran kullanılarak yapılan deneylerde por çapının *B. bacteriovorus* temizleme aktivitesini etkileyen önemli bir parametre olduğu görülmüştür. MP005 PES (0.05 µm por çapına sahip membran) ve UP150 (150 kDa altındaki proteinleri geçirebilen por büyüklüğüne sahip) PES membranı ile yapılan çalışmalarda *B. bacteriovorus* ile temizleme işleminden sonra akıda iyileşme görülürken PES MP010 (0.1 µm por çapı) membranında başarılı

sonuçlar alınmamıştır. Daha büyük por çapının, bakterilerin girmesine ve yerleşmesine daha elverişli olabileceği ve *B. bacteriovorus*'nun bu porlarda bulunan bakterileri paralayamamış olabileceği düşünülmüştür. SEM analizi sonucunda M005 ve M010 membran yüzeylerinde *B. bacteriovorus* ile temizleme işleminden sonra bakteri sayısında azalma görülmüştür. Ancak membran tıkanması yalnızca membranın yüzeyinde biriken bakterilerin neden olduğu bir sorun değildir. Biriken hücre kalıntıları ve inorganik kalıntılar da membran kirlenmesine neden olmaktadır. Nitekim MP010 membranının *B. bacteriovorus* ile temizleme işleminden sonra yüzeyindeki bakterilerin azalmasına rağmen filtrasyon performansının iyileşmemesi de bu bilgiyi destekleyici bir bulgudur.

Yapılan deneyler sonucunda *B. bacteriovorus* aktivitesi üzerinde etkili olan diğer bir parametrenin ise çamur yaşı olduğu görülmüştür. Yüksek amur yaşı (SRT 20 gün, HRT 4 gün) ve yüksek hidrofobisiteye sahip atık çamur kullanıldığında bu biyolojik temizleme işleminin başarısı düşmüştür. Çamur yaşı 10 gün olan çamurla yapılan deneylerde ise başarılı sonuçlar alınmış %9-%15'e varan oranlarda membran akısında iyileşme saptanmıştır. Çamurun EPS (protein) değerlerinin hidrofobisite ile bağlantılı olduğu, yüksek çamur yaşına sahip çamurda EPS (protein) değerlerinin de yüksek olduğu görülmüştür. Yalnızca çamurda bulunan bakteriler değil bu bakterilerin ürettikleri ekstrasresel polimerik maddeler (EPS) veya çözünebilir mikrobiyel rnler (SMP) de biyofilm oluşumu için önemli parametrelerdir ve bu ürünler membran yüzeyindeki kirlenme probleminin başlıca sebebi olarak kabul edilebilmektedirler. Biyolojik kirlenme öncelikle EPS gibi substratların membran yüzeyinde birikmesiyle başlamaktadır [Tansel et al., 2006]. Bazı membran çalışmalarından toplanan verilere göre SMP'nin kirlenme ile doğrudan ilişkili olmadığı gösterilmiştir. Karbonhidratların ise membran kirlenmesinde ufak bir rol oynadığı düşünülmektedir [Drews, 2010]. EPS ve SMP gibi biyolojik parametrelerin tümü çamurda bulunan mikroorganizmaların çeşidine, yaşına ve aktivitelerine göre değişim göstermektedir. Membran yüzeyinde oluşan biyofilm tabakada bulunan bakterilerin *B. bacteriovorus* tarafından parçalanıp paralanamayacakları yani membranın bu avcı bakteri tarafından temizlenip temizlenemeyeceği çamurun yaşı (hücrelerin yaşı), hidrofobisitesi, EPS ve SMP değerlerine bağlılık göstermektedir.

Çamur yaşı, hidrofobisite ve EPS değerleri birbirine bağlı olarak değişim gösteren parametrelerdir.

Literatür incelendiğinde *B. bacteriovorus*'un biyofilm oluşarak tıkanmış membran yüzeyinde kullanım potansiyeli ile ilgili çalışma sayısı yok denecek kadar azdır. Kim ve arkadaşları 2013 tarafından yapılan bir çalışmada membrandan yalnızca *E. coli* hücre solusyonu geçirilmiştir ve *B. bacteriovorus* içeren *E. coli* solusyonunun membrandan daha yüksek bir hızla aktığını dolayısıyla *B. bacteriovorus*'un MBR'da membran performansını artırmak amacıyla kullanılabileceğini rapor etmişlerdir [Kim et al., 2013]. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaları destekleyici başka bir çalışma Goldman ve arkadaşları tarafından bakteriyofajlar kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada bakteriyofajların steril edilmiş atıksuya aşılınmış *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter johnsonii* ve *Bacillus subtilis* üzerindeki parçalayıcı etkisini incelemişler ve bakteriyofaj varlığında akıda %40'a varan bir iyileşme görmüşlerdir [Goldman et al., 2009]. Virüsler yalnızca spesifik oldukları bakterileri parçalayabilmeleri nedeniyle daha dar bir konakçı sınırına sahiptirler. *B. bacteriovorus* geniş bir konakçı listesine sahip olması nedeniyle membran temizliğinde virüs kullanımına kıyasla daha avantajlı olabilir. Bu tez çalışmasında gerçek atıksu kullanılmıştır; atıksu steril edilmemiş ve içinde bulunan doğal mikroorganizmaları ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca basınçlı sistemde (Dead-end hücresi) filtre edilen aktif çamur membran yüzeyinde daha sıkışık bir biyofilm tabaka oluşmasına neden olmaktadır. Bu zor şartlarda oluşan biyofilm tabakanın *B. bacteriovorus* tarafından parçalanması tek bir bakteri türünün parçalanmasından daha zor olacaktır. Goldman ve arkadaşları tarafından yapılmış olan çalışmadaki %40 performans artışını sağlayamamızın nedeni çok çeşitli mikroorganizmaların oluşturduğu bu biyofilm tabakasıdır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalardan alınan sonuçlar *B. bacteriovorus* avcı bakterisinin membran yüzeyindeki biyofilm tabakanın temizlenmesi için geliştirilebilecek bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Kullanılan avcı bakteri solüsyonundaki hücrelerin sayısının artırılması temizleme işleminin başarısını da artırabilir. Bu metod kimyasal temizleme yöntemleriyle birlikte kullanılabilir ve membran temizlemek için gerekli olan kimyasal madde ilavesini azaltılabilir.

KAYNAKLAR

Argüello M. A., Álvarez S., Riera F. A., Álvarez R., (2005), "Utilization of Enzymatic Detergents to Clean Inorganic Membranes Fouled by Whey Proteins", *Separation and Purification Technology*, 41 (2), 147-154.

Aydiner C., (2006), "Hibrit Mikrofiltrasyon Teknolojisi ile Sulu Ortamdan Nikel Giderimi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Barker D. J., Stuckey D. C., (1999), "A Review of Soluble Microbial Products (SMP) in Wastewater Treatment Systems", *Water Research*, 33 (14), 3063-3082.

Bowen W., Calvo J., Hernandez A., (1995), "Steps of Membrane Blocking in Flux Decline During Protein Microfiltration", *Journal of Membrane Science*, 101 (1), 153-165.

Brepols C., Drensla K., Janot A., Trimborn M., Engelhardt N., (2008), "Strategies for Chemical Cleaning in Large Scale Membrane Bioreactors", *Water Science & Technology*, 57 (3), 457-463.

Buzatu P., Zsirai T., Aerts P., Judd S. J., (2012), "Permeability and Clogging in an Immersed Hollow Fibre Membrane Bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 421-422 (0), 342-348.

Cai M., Wang S., Zheng Y., Liang H., (2009), "Effects of Ultrasound on Ultrafiltration of Radix Astragalus Extract and Cleaning of Fouled Membrane", *Separation and Purification Technology*, 68 (3), 351-356.

Cardew P. T., Le M., (1998), "Membrane Processes: A Technology Guide", 1st Edition, Royal Society of Chemistry.

Chang I.-S., Kim S.-N., (2005), "Wastewater Treatment Using Membrane Filtration Effect of Biosolids Concentration on Cake Resistance", *Process Biochemistry*, 40 (3), 1307-1314.

Chen D., Columbia M., (2011), "Enzymatic Control of Alginate Fouling of Dead-End MF and UF Ceramic Membranes", *Journal of Membrane Science*, 381 (1-2), 118-125.

Chen J. C., Li Q., Elimelech M., (2004), "In-Situ Monitoring Techniques for Concentration Polarization and Fouling Phenomena in Membrane Filtration", *Advances in Colloid and Interface Science*, 107 (2-3), 83-108.

Cho J., Song K. G., Yun H., Ahn K. H., Kim J., Chung T., (2005), "Quantitative Analysis of Biological Effect on Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactor", *Water Science & Technology*, 51 (6), 9-18.

D'souza N., Mawson A., (2005), "Membrane Cleaning in the Dairy Industry: A Review", *Critical reviews in food science and nutrition*, 45 (2), 125-134.

Dashiff A., Junka R., Libera M., Kadouri D., (2011), "Predation of Human Pathogens by The Predatory Bacteria *Micavibrio Aeruginosavorus* and *Bdellovibrio Bacteriovorus*", *Journal of applied microbiology*, 110 (2), 431-444.

Dizge N., (2011), "Mikrofiltrasyon Membranların Kirlenme Özelliklerinin Membran Tipine ve Gözenek Boyutuna Bağlı Olarak Klasik Aktif Çamur Sisteminde İncelenmesi", Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

Drews A., (2010), "Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures", *Journal of Membrane Science*, 363 (1–2), 1-28.

Fane A. G., (2002), "Membrane Bioreactors: Design & Operational Options", *Filtration & Separation*, 39 (5), 26-29.

Flemming H.-C., (1997), "Reverse Osmosis Membrane Biofouling", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14 (4), 382-391.

Fry J., Staples D., (1976), "Distribution of *Bdellovibrio Bacteriovorus* in Sewage Works, River Water, and Sediments", *Applied and environmental microbiology*, 31 (4), 469-474.

Fuqua C., Winans S. C., Greenberg E. P., (1996), "Census and Consensus in Bacterial Ecosystems: The Luxr-LuxI Family of Quorum-Sensing Transcriptional Regulators", *Annual Reviews in Microbiology*, 50 (1), 727-751.

Goldman G., Starosvetsky J., Armon R., (2009), "Inhibition of Biofilm Formation on UF Membrane by Use of Specific Bacteriophages", *Journal of Membrane Science*, 342 (1), 145-152.

Gupta R. S., (2004), "Introduction to Environmental Engineering and Science", 2nd Edition, Government Institutes Division, ABS Group Inc.

Hirani Z. M., Bukhari Z., Oppenheimer J., Jjemba P., LeChevallier M. W., Jacangelo J. G., (2014), "Impact of MBR Cleaning and Breaching on Passage of Selected

Microorganisms and Subsequent Inactivation by Free Chlorine", *Water Research*, 57 313-324.

Hong S. P., Bae T. H., Tak T. M., Hong S., Randall A., (2002), "Fouling Control in Activated Sludge Submerged Hollow Fiber Membrane Bioreactors", *Desalination*, 143 (3), 219-228.

Huijuan Xu, Liu Y., (2011), "Control and Cleaning of Membrane Biofouling by Energy Uncoupling and Cellular Communication", *Environmental Science & Technology*, 45 (2), 595-601.

Iritani E., Katagiri N., Ishikawa Y., Cao D.-Q., (2014), "Cake formation and particle rejection in microfiltration of binary mixtures of particles with two different sizes", *Separation and Purification Technology*, 123 (0), 214-220.

Jang N., Ren X., Choi K., Kim I., (2006), "Comparison of Membrane Biofouling in Nitrification and Denitrification for The Membrane Bioreactor (MBR)", *Water Science & Technology*, 53 (6), 43-49.

Judd S., (2004), "A review of fouling of membrane bioreactors in sewage treatment", *Water Science & Technology*, 49 (2), 229-235.

Judd S., (2010), "The MBR book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment", 2nd Edition, Elsevier.

Kaleli B., (2006), "Atıksuların İleri Arıtımında Membran Proseslerinin Kullanımının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.

Kaykıoğlu G., (2010), "Biyolojik Ön Arıtmalı Membran Sistemler ile Tekstil Atıksularının Geri Kazanımı", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Keerthi, N. B., (2014), "Fouling and Mitigation Strategies in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment", *Research Journal of Chemistry and Environment*, 18 (6), 84-93.

Kim E.-H., Dwidar M., Mitchell R. J., Kwon Y.-N., (2013), "Assessing The Effects of Bacterial Predation on Membrane Biofouling", *Water Research*, 47 (16), 6024-6032.

Komlenic R., (2010), "Rethinking The Causes of Membrane Biofouling", *Filtration & Separation*, 47 (5), 26-28.

Koyuncu İ., (2001), "Nanofiltrasyon Membranları ile Tuz Gideriminde Organik İyon Etkisi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Köseoğlu H., (2005), "Hibrit Siyanürleme ve Yüksek Basıncılı Membran Prosesiyle Madencilik Atıksularında Gümüş Geri Kazanımı - Sentetik Su Deneyleri", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Lambert C., Morehouse K. A., Chang C.-Y., Sockett R. E., (2006), "Bdellovibrio: Growth and Development During The Predatory Cycle", *Current opinion in microbiology*, 9 (6), 639-644.

Lambina V. A., Ledova, L.A., Churkina, L.G., (1987), "The Role of Bdellovibrio in The Regulation of Microbial Cenoses and in The Self-Purification of Domestic Wastewaters", *Mikrobiologiya*, 56 860-864.

Le-Clech P., Chen V., Fane T. A. G., (2006), "Fouling in Membrane Bioreactors Used in Wastewater Treatment", *Journal of Membrane Science*, 284 (1-2), 17-53.

Lee J., Ahn W.-Y., Lee C.-H., (2001), "Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor", *Water Research*, 35 (10), 2435-2445.

Lee W., Kang S., Shin H., (2003), "Sludge Characteristics and Their Contribution to Microfiltration in Submerged Membrane Bioreactors", *Journal of Membrane Science*, 216 (1-2), 217-227.

Lesjean B., Rosenberger S., Schrotter J.-C., Recherche A., (2004), "Membrane-aided biological wastewater treatment — an overview of applied systems", *Membrane Technology*, 2004 (8), 5-10.

Lin H., Gao W., Leung K., Liao B., (2011), "Characteristics of Different Fractions of Microbial Flocs and Their Role in Membrane Fouling", *Water Science and Technology*, 63 (2), 262.

Lin H., Peng W., Zhang M., Chen J., Hong H., Zhang Y., (2013), "A Review on Anaerobic Membrane Bioreactors: Applications, Membrane Fouling and Future Perspectives", *Desalination*, 314 (0), 169-188.

Lin H., Zhang M., Wang F., Meng F., Liao B.-Q., Hong H., Chen J., Gao W., (2014), "A Critical Review of Extracellular Polymeric Substances (Eps) in Membrane Bioreactors: Characteristics, Roles in Membrane Fouling and Control Strategies", *Journal of Membrane Science*, 460 (0), 110-125.

Liu R., Huang X., Wang C., Chen L., Qian Y., (2000), "Study on Hydraulic Characteristics in A Submerged Membrane Bioreactor Process", *Process Biochemistry*, 36 (3), 249-254.

Liz Sockett L. H., Andrew Fenton, Richard Woods, Care, Lambert, Chien-Yi Chang, Robert, Atterbury, Rob Till, Marilyn Whitworth, Mike Capeness, Rowena Fung, Rashidah Ahmad, David Milner, Tom Lerner & Simon King, (2008), "An inside job: *Bdellovibrio bacteriovorus*", *Microbiology Today*, 184-187.

Malaeb L., Le-Clech P., Vrouwenvelder J. S., Ayoub G. M., Saikaly P. E., (2013), "Do Biological-Based Strategies Hold Promise to Biofouling Control in MBRs?", *Water Res*, 47 (15), 5447-5463.

Markelova N. Y., (2010), "Predacious Bacteria, *Bdellovibrio* with Potential for Biocontrol", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 213 (6), 428-431.

Meng F., Shi B., Yang F., Zhang H., (2007), "New Insights Into Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactor Based on Rheology and Hydrodynamics Concepts", *Journal of Membrane Science*, 302 (1-2), 87-94.

Meng F., Zhang H., Yang F., Li Y., Xiao J., Zhang X., (2006), "Effect of filamentous Bacteria on Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 272 (1), 161-168.

Mulder M., (1996), "Basic Principles of Membrane Technology", 1st Edition, Springer Science & Business Media.

Murphy A. P., Moody C. D., Riley R. L., Lin S. W., Murugaverl B., Rusin P., (2001), "Microbiological Damage of Cellulose Acetate RO Membranes", *Journal of Membrane Science*, 193 (1), 111-121.

Nath K., (2008), "Membrane Separation Processes", First ed. PHI Learning Pvt. Ltd.
Nguyen T., Roddick F. A., Fan L., (2012), "Biofouling of Water Treatment Membranes: A Review of The Underlying Causes, Monitoring Techniques and Control Measures", *Membranes (Basel)*, 2 (4), 804-840.

Núñez M. E., Martin M. O., Chan P. H., Spain E. M., (2005), "Predation, Death, and Survival in a Biofilm: *Bdellovibrio* Investigated by Atomic Force Microscopy", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 42 (3), 263-271.

Orhon D., (1997), "Modeling of Activated Sludge Systems", 1st Edition, CRC Press.

Ortiz M., Raluy R. G., Serra L., (2007), "Life Cycle Assessment of Water Treatment Technologies: Wastewater and Water-Reuse in a Small Town", *Desalination*, 204 (1–3), 121-131.

Park J.-S., Yeon K.-M., Lee C.-H., (2005), "Hydrodynamics and Microbial Physiology Affecting Performance of a New MBR, Membrane-Coupled High-Performance Compact Reactor", *Desalination*, 172 (2), 181-188.

Qu F., Liang H., Zhou J., Nan J., Shao S., Zhang J., Li G., (2014), "Ultrafiltration Membrane Fouling Caused By Extracellular Organic Matter (EOM) From *Microcystis Aeruginosa*: Effects of Membrane Pore Size and Surface Hydrophobicity", *Journal of Membrane Science*, 449 (0), 58-66.

Ripperger S., Altmann J., (2002), "Crossflow Microfiltration – State of The Art", *Separation and Purification Technology*, 26 (1), 19-31.

Rojas J., Kumar V., (2012), "Effect of Polymorphic Form on The Functional Properties of Cellulose: A Comparative Study", *Carbohydrate Polymers*, 87 (3), 2223-2230.

S. Chaize A. H., (1991), "Membrane Bioreactor on Domestic Wastewater Treatment Sludge Production and Modeling Approach", *Water Science & Technology*, 23 (7-9), 1591-1600.

Salt Y., Dinçer S., (2006), "An Option for Special Separation Operations: Membrane Processes", 4th Edition, Sigma.

Schwudke D., Linscheid M., Strauch E., Appel B., Zähringer U., Moll H., Müller M., Brecker L., Gronow S., Lindner B., (2003), "The Obligate Predatory *Bdellovibrio bacteriovorus* Possesses a Neutral Lipid A Containing α -D-Mannoses That Replace Phosphate Residues Similarities and Differences Between The Lipid As and The Lipopolysaccharides of The Wild Type Strain *B. Bacteriovorus* HD100 and Its Host-Independent Derivative HI100", *Journal of Biological Chemistry*, 278 (30), 27502-27512.

Shen L.-g., Lei Q., Chen J.-R., Hong H.-C., He Y.-M., Lin H.-J., (2015), "Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor: Impacts of Floc Size", *Chemical Engineering Journal*, 269 (0), 328-334.

Shi X., Tal G., Hankins N. P., Gitis V., (2014), "Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review", *Journal of Water Process Engineering*, 1 (0), 121-138.

Sockett L., (2008), "An Inside Job: *Bdellovibrio Bacteriovorus*", *Microbiol Today*, 35 184-187.

Starr M. P., Baigent N. L., (1966), "Parasitic Interaction of *Bdellovibrio Bacteriovorus* with Other Bacteria", *Journal of bacteriology*, 91 (5), 2006.

Stolp H., Petzold H., (1962), "Untersuchungen Über Einen Obligat Parasitischen Mikroorganismus Mit Lytischer Aktivität Für Pseudomonas-Bakterien", *Journal of Phytopathology*, 45 364-390.

Strathmann H., (2011), "Introduction to Membrane Science and Technology", 1st Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Su X., Tian Y., Li H., Wang C., (2013), "New Insights Into Membrane Fouling Based on Characterization of Cake Sludge and Bulk Sludge: An Especial Attention to Sludge Aggregation", *Bioresource Technology*, 128 (0), 586-592.

Sweity A., Ying W., Ali-Shtayeh M. S., Yang F., Bick A., Oron G., Herzberg M., (2011), "Relation Between EPS Adherence, Viscoelastic Properties, and MBR Operation: Biofouling Study with QCM-D", *Water Research*, 45 (19), 6430-6440.

Tansel B., Sager J., Garland J., Xu S., Levine L., Bisbee P., (2006), "Deposition of Extracellular Polymeric Substances (EPS) and Microtopographical Changes on Membrane Surfaces During Intermittent Filtration Conditions", *Journal of Membrane Science*, 285 (1), 225-231.

Topare N. S., Attar S., Manfe M. M., (2011), "Sewage/Wastewater Treatment Technologies: A Review", *Scientific Reviews & Chemical Communications*, 1 (1), 18-24.

Trägårdh G., (1989), "Membrane Cleaning", *Desalination*, 71 (3), 325-335.

Van Den Brink P., Vergeldt F., Van As H., Zwijnenburg A., Temmink H., van Loosdrecht M. C. M., (2013), "Potential of Mechanical Cleaning of Membranes from a Membrane Bioreactor", *Journal of Membrane Science*, 429 (0), 259-267.

Van den Broeck R., Van Dierdonck J., Nijskens P., Dotremont C., Krzeminski P., van der Graaf J. H. J. M., van Lier J. B., Van Impe J. F. M., Smets I. Y., (2012), "The Influence of Solids Retention Time on Activated Sludge Bioflocculation and Membrane Fouling in a Membrane Bioreactor (MBR)", *Journal of Membrane Science*, 401-402 (0), 48-55.

Van Essche M., Quiryne M., Sliepen I., Van Eldere J., Teughels W., (2009), "*Bdellovibrio Bacteriovorus* Attacks *Aggregatibacter Actinomycetemcomitans*", Journal of dental research, 88 (2), 182-186.

Vo P., Nunez M., (2010), "*Bdellovibrio bacteriovorus* Predation in Dual-Species Biofilms of *E. coli* Prey and *M. Luteus* Decoys", Lisans Tezi, Mount Holyoke College.

Vrouwenvelder J. S., van der Kooij D., (2003), "Diagnosis of Fouling Problems of NF and RO Membrane Installations by a Quick Scan", Desalination, 153 (1–3), 121-124.

Wand H., Vacca G., Kusch P., Krüger M., Kästner M., (2007), "Removal of Bacteria by Filtration in Planted and Non-Planted Sand Columns", Water Research, 41 (1), 159-167.

Wang Z., Ma J., Tang C. Y., Kimura K., Wang Q., Han X., (2014), "Membrane Cleaning in Membrane Bioreactors: A Review", Journal of Membrane Science, 468 (0), 276-307.

Wang Z., Wu Z., Tang S., (2009), "Characterization of Dissolved Organic Matter in A Submerged Membrane Bioreactor by Using Three-Dimensional Excitation and Emission Matrix Fluorescence Spectroscopy", Water Research, 43 (6), 1533-1540.

Wanner J., (1994), "The Implementation of Bulking Control in The Design of Activated Sludge Systems", Water Science & Technology, 29 (7), 193-202.

Web 1, (2015), <http://www.hi-fre.eu/index.php?id=2>, (Erişim Tarihi: ^27.5.2015).

Westergaard J., Kramer T., (1978), "A Pilot Study on The Lytic Activity of *Bdellovibrio* in Wastewater", Water Res, 12 (8), 627-630.

Wu, Jun He, Chengda Jiang, Xinyue Zhang M., (2011), "Modeling of The Submerged Membrane Bioreactor Fouling by The Combined Pore Constriction, Pore Blockage and Cake Formation Mechanisms", Desalination, 279 (1–3), 127-134.

Xiong Y., Liu Y., (2010), "Biological Control of Microbial Attachment: A Promising Alternative for Mitigating Membrane Biofouling", Applied microbiology and biotechnology, 86 (3), 825-837.

Yang W., Cicek N., Ilg J., (2006), "State of The Art of Membrane Bioreactors: Worldwide Research and Commercial Applications in North America", Journal of Membrane Science, 270 (1–2), 201-211.

Yiğit N. Ö., (2007), "Membran Biyoreaktörü ile Evsel Atıksu Arıtımı", Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Yıldız A. H., (2000), "Membran Arıtma Sistemleriyle Florürün Arıtılması", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Yıldız S., Namal O. Ö., Çekim M., (2013), "Atık Su Arıtma Teknolojilerindeki Tarihsel Gelişimler", SÜ Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi,

Yong Q., Chen J., Zhang F., (2006), "Membrane Fouling Control in A Submerged Membrane Bioreactor With Porous, Flexible Suspended Carriers", Desalination, 189 (1-3), 292-302.

Yu H.-Y., Xu Z.-K., Lei H., Hu M.-X., Yang Q., (2007), "Photoinduced Graft Polymerization of Acrylamide On Polypropylene Microporous Membranes for The Improvement of Antifouling Characteristics in A Submerged Membrane-Bioreactor", Separation and Purification Technology, 53 (1), 119-125.

Zeman L. J., Zydney A. L., (1996), "Microfiltration and Ultrafiltration: Principles and Applications", 1st Edition, M. Dekker.

Zhang K., Choi H., Dionysiou D. D., Sorial G. A., Oerther D. B., (2006), "Identifying pioneer bacterial species responsible for biofouling membrane bioreactors", Environmental Microbiology, 8 (3), 433-440.

Zhong J., Chua H. C., Zhou J., Fane A. G., (2006), "Factors Affecting The Membrane Performance in Submerged Membrane Bioreactors", Journal of Membrane Science, 284 (1-2), 54-66.

Zhou H., Smith D. W., (2002), "Advanced Technologies in Water and Wastewater Treatment", Journal of Environmental Engineering and Science, 1 (4), 247-264.

Zhu H., Wen X., Huang X., (2012), "Characterization of Membrane Fouling in a Microfiltration Ceramic Membrane System Treating Secondary Effluent", Desalination, 284 (0), 324-331.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Çanakkale’de doğdu. Çanakkale İbrahim Bodur Lisesi’nde lise eğitimini gördü. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında mezun oldu. 2012 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.