

**T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖR  
(JLMBR) SİSTEMİNDE MİKROFİLTRASYON  
MEMBRANLARININ KİRLENME  
ÖZELLİKLERİNİN MEMBRAN TİPİNE VE  
GÖZENEK BOYUTUNA BAĞLI OLARAK  
İNCELENMESİ**

**Derya Yüksel İMER  
DOKTORA TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**GEBZE  
2011**



**T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖR  
(JLMBR) SİSTEMİNDE MİKROFİLTRASYON  
MEMBRANLARININ KİRLENME  
ÖZELLİKLERİNİN MEMBRAN TİPİNE VE  
GÖZENEK BOYUTUNA BAĞLI OLARAK  
İNCELENMESİ**

**Derya Yüksel İMER  
DOKTORA TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI  
Doç. Dr. Ahmet KARAGÜNDÜZ**

**GEBZE**

**2011**



## DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
29.12.2010...tarih ve 2010...sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından  
03/01/2011 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Derya Yüksel İMER'in tez  
çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul  
edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Ahmet KARAGÜNDÜZ *A. Karagündüz*

ÜYE : Prof. Dr. Bülent KESKİNLER *B. Keskinler*

ÜYE : Prof. Dr. Cumali KINACI *Cumali Kinaci*

ÜYE : Prof. Dr. İsmail KOYUNCU *I. Koyuncu*

ÜYE : Doç. Dr. Güleda ENGIN *G. Engin*

### ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../20... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

### TEZİN BAŞLIĞI: JET LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖR (JLMBR) SİSTEMİNDE MİKROFİLTRASYON MEMBRANLARININ KİRLENME ÖZELLİKLERİNİN MEMBRAN TİPİNE VE GÖZENEK BOYUTUNA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

#### YAZAR ADI: DERYA YÜKSEL İMER

Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli jet loop membran biyoreaktör (JLMBR) sisteminde işletme şartlarının (çamur yaşı ve organik yükleme) ve biyokütle özelliklerinin membran kirlenmesine olan etkileri sistematik olarak belirlenmiştir. Değişen işletim şartlarında oluşan çamurun biyolojik özellikleri MLSS (askıda katı madde), SMP (çözünmüş mikrobiyal ürünler), EPS (hücre dışı polimerik maddeler), göreceli hidrofobisite ve viskozite parametreleri ile takip edilmiştir. Reaktör altı farklı deney setinde sürekli olarak işletilmiş ve bu deney setlerinde oluşan karışım sıvısının filtrasyon performansı membran tipi (polietersülfon-PES, polikarbonat-PC, karışık ester-ME ve selüloz asetat-SA) ve gözenek boyutuna (PES ve ME membranlar için 0.45, 0.22 ve 0.10  $\mu\text{m}$ , PC membran için 0.40, 0.20 ve 0.10  $\mu\text{m}$  ve SA membran için 0.45 ve 0.22  $\mu\text{m}$ ) bağlı olarak incelenmiştir. Filtrasyon deneyleri her deney setinin sonunda reaktördeki parametrelerin dengeye ulaştığı şartlarda gerçekleştirilmiştir. İlk iki deney setinde reaktörün işletim şartları (çamur yaşı ve organik yükleme) değiştirilmiş ve filtrasyon deneyleri batık membran ve çapraz akış filtrasyon sistemlerinde farklı tipte ve gözenek boyutunda membranlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin ardından çamur yaşı sabit tutularak üç farklı organik yüklemde reaktör işletilmiş ve her organik yüklemde sonra filtrasyon deneyleri batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutuna bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Son deney setinde reaktöre filtrasyona yardımcı madde (katyonik polielektrolit ve  $\text{FeCl}_3$ ) eklenmiş ve bunun batık membran filtrasyon sisteminde membran kirlenmesine olan etkileri yine membran tipi ve gözenek boyutuna bağlı olarak incelenmiştir.

## SUMMARY

THESIS TITLE: THE INVESTIGATION OF FOULING CHARACTERISTICS OF MICROFILTRATION MEMBRANES DEPENDING ON MEMBRANE TYPE AND PORE SIZE IN JET LOOP MEMBRANE BIOREACTOR (JLMBR) SYSTEM

AUTHOR: DERYA YÜKSEL İMER

In this study, the effects of operational conditions (sludge age and organic loading) and biomass properties on membrane fouling were systematically identified in a laboratory scale jet loop membrane bioreactor system. The biological properties of the sludge were investigated by the monitoring the concentrations of MLSS (mixed liquor suspended solids), SMP (soluble microbial products), EPS (extracellular polymeric substances) and relative hydrophobicity and viscosity. The reactor was operated at six different experimental conditions and the filtration performances of the mixed liquor formed in these experiments were investigated by using various membrane types (polyethersulphone-PES, polycarbonate-PC, mixed ester-ME and cellulose acetate-CA) and pore sizes (0.45, 0.22 and 0.10  $\mu\text{m}$  pore sizes are selected for PES and ME membranes, 0.40, 0.20 and 0.10  $\mu\text{m}$  pore sizes are selected for PC membranes and 0.45, 0.22  $\mu\text{m}$  pore sizes are selected for CA membranes). Membrane filtration experiments were performed when the parameters (i.e. MLSS) reached to steady state conditions. The operating conditions (sludge age and organic loading) in the first two experimental setup were modified and the filtration experiments were performed by using various types of membranes with different pore sizes in submerged filtration and in cross-flow filtration systems. After completing these experiments, the sludge age was kept constant and the reactor was operated at three different organic loads. After each loading, the filtration experiments were performed in submerged membrane filtration system with the same membranes used in the first two experiments. In the final experimental setup, cationic polyelectrolyte and  $\text{FeCl}_3$  were added to the mixed liquor in order to enhance filtrability characteristics of sludge and the effects on filtration were investigated by using the same membrane set in a submerged microfiltration mode.

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın oluşumundan sonuca ulaşana kadar sağladığı bilgi ve fikirler için başta Sayın Hocam Prof.Dr. Bülent KESKİNLER'e sonsuz şükranlarımı sunarım. Çalışmam süresince yardımlarını benden esirgemeyen Sayın Danışman Hocam Doç.Dr.Ahmet KARAGÜNDÜZ'e sağladığı imkanlar ve desteği için gönülden teşekkür ederim. Doktora tez izleme komitemin saygıdeğer üyesi Sayın Prof.Dr.Cumali KINACI'ya tezimin ilerlemesindeki katkıları nedeniyle teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuardaki deneysel çalışmalarım sırasında desteklerini her zaman hissettiğim sevgili çalışma arkadaşlarım Proje Asistanı Seçil BAYAR ve Arş.Gör.Nadir DİZGE'ye sonsuz teşekkürler ederim. Ayrıca moral desteği için sevgili arkadaşım Arş.Gör.Dr.Şeyda ÖZÖNER'e çok teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında yardımlarını benden esirgemeyen Arş.Gör.Dr. Elif ŞENTÜRK ve Arş.Gör.Dr. Mahir İNCE'ye teşekkürlerimi sunarım.

108Y129 Proje numarası ile tez çalışmamı maddi olarak destekleyen TUBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. AFM, SEM, zeta potansiyeli ve partikül boyut dağılımı analizlerini yapan GYTE Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Adem ŞEN ve Ahmet NAZIM'a teşekkür ederim.

Son olarak beni her zaman destekleyen ve yanımda olan aileme ve eşim Berkin İMER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Derya Yüksel İMER

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1.GİRİŞ	1
1.1.Motivasyon ve Amaç	1
1.2. Kapsam	5
2.MEMBRAN SİSTEMLERİ ve KİRLENME PROBLEMİ	7
2.1. Membran Tanımlamaları	7
2.2. Membran Yapısı ve Materyalleri	11
2.3. Membran Sistemleri	15
2.4. Membran İşletim Şekilleri	17
2.4.1. Klasik (Dead-end) filtrasyon	17
2.4.2. Çapraz akış filtrasyon	17
2.4.3. Batık membran sistemleri	20
2.5. Membran Biyoreaktörlerde Kirlenme Problemi ve Kontrol Yöntemleri	22
2.5.1. Kirlenme mekanizması	22
2.5.2.Membran özelliklerinin kirlenmeye etkisi	26
2.5.3. Biyokütle özelliklerinin membran kirlenmesine etkisi	30
2.5.4. İşletme şartlarının membran kirlenmesine etkisi	32
2.6. Jet Loop Membran Biyoreaktör Sistemleri (JLMBR)	36
3. MATERYAL ve METOD	39
3.1. Jet Loop Membran Biyoreaktörü (JLMBR)	39
3.2. Filtrasyon Deneylerinde Kullanılan Sistemler	41
3.2.1. Mikrofiltrasyon membranlarının özellikleri	41
3.2.2. Batık membran filtrasyon sistemi	42
3.2.3. Çapraz akış filtrasyon (ÇAF) sistemi	49



3.3. Kullanılan Kimyasallar	51
3.4. Sentetik Atıksuyun Hazırlanması	52
3.5. Analiz Yöntemleri	53
3.5.1. KOİ ve MLSS analizleri	53
3.5.2. SMP ve EPS analizleri	53
3.5.3. Protein analizi	54
3.5.4. Karbonhidrat analizi	55
3.5.5. Göreceli hidrofobisite analizi	56
3.6. Enstrümental Analizler	57
3.6.1. Viskozite ölçümü	57
3.6.2. Partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli ölçümü	57
3.6.3. SEM analizi	57
3.6.4. AFM analizi	58
3.7. Deneysel Plan	58
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	62
4.1. Farklı İşletim Şartlarında Reaktördeki Parametrelerin Değişiminin ve Filtrasyon Performanslarının Araştırılması (Deney Set: I-II)	62
4.1.1. Reaktördeki parametrelerin değişimi	62
4.1.2. Batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutunun etkisinin araştırılması	75
4.1.2.1. Membran tipi ve gözenek boyutunun akı değişimlerine etkisinin incelenmesi	75
4.1.2.2. Membran tipi ve gözenek boyutunun filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi	83
4.1.2.3. Membranların yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	86
4.1.2.4. Süzüntüde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	92
4.1.2.5. Batık membran filtrasyonunda akı azalmalarına etki eden parametrelerin toplu olarak değerlendirilmesi	95
4.1.2.6. Membran yüzeylerinde yapılan SEM ve AFM analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	96
4.1.3. Çapraz akış filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutunun etkisinin araştırılması	104

4.1.3.1. Membran tipi ve gözenek boyutunun akı değişimlerine etkisinin incelenmesi	104
4.1.3.2. Membran tipi ve gözenek boyutunun filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi	111
4.1.3.3. Süzüntüde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	117
4.1.3.4. Membran yüzeylerinde yapılan AFM analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	120
4.2. Farklı Organik Yüklemelerde Reaktördeki Parametrelerin Değişiminin ve Filtrasyon Performanslarının Araştırılması (Deney Set: III-IV-V)	125
4.2.1. Reaktördeki parametrelerin değişimi	126
4.2.2. Batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutunun etkisinin araştırılması	133
4.2.2.1. Membran tipi ve gözenek boyutunun akı değişimlerine etkisinin incelenmesi	133
4.2.2.2. Membran tipi ve gözenek boyutunun filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi	141
4.2.2.3. Membran yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	144
4.2.2.4. Süzüntüde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	149
4.2.2.5. Batık membran filtrasyonunda akı azalmalarına etki eden parametrelerin toplu olarak değerlendirilmesi	151
4.3. Katyonik Polielektrolit İlavesinin Reaktördeki Parametrelerin Değişimine ve Batık Membran Filtrasyon Performansına Etkisinin Araştırılması (Deney Set:VI)	152
4.3.1. Uygun katyonik polielektrolit miktarının belirlenmesi	152
4.3.2. Reaktördeki parametrelerin değişimi	159
4.3.3. Katyonik polielektrolit ilavesinin batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutuna göre etkisinin araştırılması	161
4.3.3.1. Katyonik polielektrolit ilavesinin membran tipi ve gözenek boyutuna göre akı değişimlerine etkisinin incelenmesi	161
4.3.3.2. Katyonik polielektrolit ilavesinin membran tipi ve gözenek	163

boyutuna göre filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi	
4.3.3.3. Katyonik polielektrolit ilavesinden sonra membran yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	167
4.3.3.4. Süzüntü yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	171
4.3.3.5. Batık membran filtrasyonunda akı azalmalarına etki eden parametrelerin toplu olarak değerlendirilmesi	173
5. SONUÇLAR	174
6. KAYNAKLAR DİZİNİ	180
ÖZGEÇMİŞ	189

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

- MBR: Membran biyoreaktör  
EPS: Hücre dışı polimerik maddeler  
SMP: Çözünmüş mikrobiyal ürünler  
JLBR: Jet loop biyoreaktör  
JLMBR: Jet loop membran biyoreaktör  
F/M: Besi/mikroorganizma oranı  
KOİ: Kimyasal oksijen ihtiyacı  
PES: Polietersülfon  
PC: Polikarbonat  
ME: Karışık ester  
SA: Selüloz asetat  
MWCO: Molekül ağırlığı kesme değeri  
Da: Dalton  
KF: Klasik filtrasyon  
ÇAF: Çapraz akış filtrasyon  
AFM: Atomik kütle mikroskobu  
MLSS: Askıda katı maddeler  
OD: Işık yoğunluğu  
SMP<sub>p</sub>: Çözünmüş mikrobiyal ürünlerin protein kısmı  
SMP<sub>c</sub>: Çözünmüş mikrobiyal ürünlerin karbonhidrat kısmı  
EPS<sub>p</sub>: Hücre dışı polimerik maddeleri protein kısmı  
EPS<sub>c</sub>: Hücre dışı polimerik maddeleri karbonhidrat kısmı  
FDR: Akı azalma oranı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa No</u>
2.1. Membran yapıları	12
2.2. Klasik ve çapraz akış filtrasyonun ayırma mekanizması	19
2.3. Konsantrasyon polarizasyon mekanizması	20
2.4. Membran kirlenmesinin şematik gösterimi	23
2.5. Membranların hidrofobisite özelliklerinin partikül birikimine etkisi	29
2.6. Jet loop reaktörün genel şekli	37
3.1. Deneyleerde kullanılan JLMBR sisteminin şematik gösterimi	41
3.2. Deneyleerde kullanılan batık membran filtrasyon deney düzeneği	43
3.3. Batık membran filtrasyon sisteminin deneysel aşamaları	49
3.4. ÇAF sisteminin deneysel aşamaları	51
3.5. Protein kalibrasyon eğrisi	55
3.6. Karbonhidrat kalibrasyon eğrisi	56
4.1. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki KOİ değerlerinin zamanla değişimi (Deney Set: I)	63
4.2. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki KOİ değerlerinin zamanla değişimi (Deney Set: II)	64
4.3. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki MLSS konsantrasyonunun zamanla değişimi (Deney Set: I).	65
4.4. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki MLSS konsantrasyonunun zamanla değişimi (Deney Set: II)	66
4.5. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS konsantrasyonlarının zamanla değişimi (Deney Set: I) (a)	68

## SMP (b) EPS

- 4.6. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS'nin P/C oranlarının değişimi (Deney Set:I) 68
- 4.7. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS konsantrasyonlarının zamanla değişimi (Deney Set: II) (a) SMP (b) EPS 69
- 4.8. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS'nin P/C oranlarının değişimi (Deney Set:II) 70
- 4.9. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli analiz sonuçları (Deney Set:I) (a) Partikül boyut dağılımı (b) Zeta potansiyeli 74
- 4.10. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli analiz sonuçları (Deney Set:II) (a) Partikül boyut dağılımı (b) Zeta potansiyeli. 74
- 4.11. Batık membran modüllerinin aynı membran tipi ile denenmesi 76
- 4.12. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:I). 78
- 4.13. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:II) 80
- 4.14. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerlerinin birlikte gösterimi (Deney Set: I-II) 84
- 4.15. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_c$  85

- ve  $R_p$  değerlerinin birlikte gösterimi (a)  $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (Deney Set: I-II)
- 4.16. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membran yüzeyindeki kek tabakasındaki SMP analizlerinin sonuçları (Deney No:I-II) (a)  $SMP_p$  değerleri (b)  $SMP_c$  değerleri. 89
- 4.17. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran sisteminde membran yüzeyindeki kek tabakasındaki EPS analizlerinin sonuçları (Deney No:I-II) (a)  $EPS_p$  değerleri (b)  $EPS_c$  değerleri. 91
- 4.18. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda elde edilen süzüntülerdeki SMP değişimleri (a)  $SMP_p$  değişimi (b)  $SMP_c$  değişimi (Deney Set:I-II) 94
- 4.19. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda kullanılan  $0.45 \mu m$  gözenek boyutuna sahip membranların temiz ve kirli SEM resimleri (Deney Set:I) 97
- 4.20. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda kullanılan membranların temiz ve kirli AFM resimleri (Deney Set:I). 103
- 4.21. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a)  $0.45 \mu m$  gözenek boyutlu membranlar (b)  $0.22 \mu m$  gözenek boyutlu membranlar (c)  $0.10 \mu m$  gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:I). 106
- 4.22. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a)  $0.45 \mu m$  gözenek boyutlu membranlar (b)  $0.22 \mu m$  gözenek boyutlu membranlar (c)  $0.10 \mu m$  gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:II). 108
- 4.23. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerleri (Deney Set: I-II). 112

- 4.24. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait 115  
membran tipi ve gözenek boyutuna göre  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin dağılımı (a)  
 $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (c)  $R_{cp}$  değerleri (Deney Set: I-II)
- 4.25. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen 119  
çapraz akış filtrasyon sisteminde toplanan süzüntü numunelerinde zamanla  
SMP değişimi (Deney Set:I) (a) 0.45  $\mu\text{m}$  membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$   
membranlar (c) 0.1  $\mu\text{m}$  membranlar.
- 4.26. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde gerçekleştirilen çapraz 120  
akış filtrasyon sisteminde toplanan süzüntü numunelerinde zamanla SMP  
değişimi (Deney Set:II) (a) 0.45  $\mu\text{m}$  membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  membranlar  
(c) 0.1  $\mu\text{m}$  membranlar.
- 4.27. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen 125  
çapraz akış filtrasyon sisteminde kullanılan membranların temiz ve kirli  
AFM resimleri (Deney Set:I)
- 4.28. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki KOİ 127  
değerlerinin zamanla değişimi (Deney No:III-IV-V).
- 4.29. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki MLSS 128  
konsantrasyonunun zamanla değişimi (Deney No:III-IV-V).
- 4.30. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki SMP ve 129  
EPS konsantrasyonlarının zamanla değişimi (Deney Set: III-IV-V) (a)  
SMP (b) EPS.
- 4.31. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki SMP ve 130  
EPS'nin P/C oranlarının değişimi (Deney Set:III-IV-V).
- 4.32. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki III nolu 135  
deney setinin batık membran filtrasyon sisteminine ait akı-zaman grafikleri  
(a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu  
membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar
- 4.33. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki IV bolu 137



- deney setinin batık membran filtrasyon sistemine ait akı-zaman grafikleri  
 (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.1  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar
- 4.34. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki V nolu 139  
 deney setinin batık membran filtrasyon sistemine ait akı-zaman grafikleri  
 (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar
- 4.35. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık 142  
 membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerleri (Deney Set: III-IV-V).
- 4.36. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık 144  
 membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin dağılımı (a)  $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (Deney Set: III-IV-V).
- 4.37. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık 147  
 membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki SMP analizlerinin sonuçları (Deney No:III-IV-V) (a)  $SMP_p$  değerleri (b)  $SMP_c$  değerleri.
- 4.38. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık 148  
 membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki EPS analizlerinin sonuçları (Deney No:III-IV-V) (a)  $EPS_p$  değerleri (b)  $EPS_c$  değerleri.
- 4.39. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık 150  
 membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre toplanan süzüntü numunelerindeki SMP değişimleri (a)  $SMP_p$  değişimi (b)  $SMP_c$  değişimi (Deney Set:V-VI)
- 4.40. Farklı konsantrasyonlarda polielektrolit eklenmiş çamurların SVI ve 153  
 göreceli hidrofobisite ölçüm sonuçları.

- 4.41. Farklı polielektrolit konsantrasyonlarında çamurun üst sıvısındaki  $OD_{600}$  değişimi. 155
- 4.42. Farklı polielektrolit konsantrasyonlarında çamurun üst sıvısındaki SMP ve EPS değişimleri (a) SMP (b) EPS. 156
- 4.43. Farklı polielektrolit konsantrasyonlarında çamurun klasik filtrasyon sistemindeki filtrasyon performansları (Membran tipi: SA 0.45, Filtrasyon basıncı: 1 bar). 158
- 4.44. JLMBR'ye sürekli polielektrolit ilavesinde JLMBR sistemindeki partikül boyut dağılım analiz sonuçları (Deney Set:VI). 160
- 4.45. JLMBR sistemine katyonik polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait akı-zaman grafikleri (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (Deney No:VI). 162
- 4.46. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerlerinin birlikte gösterimi (Deney Set: V-VI). 165
- 4.47. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin birlikte gösterimi (a)  $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (Deney Set: V-VI). 166
- 4.48. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki SMP analizlerinin sonuçları (a)  $SMP_p$  değerleri (b)  $SMP_c$  değerleri (Deney No:V-VI). 169
- 4.49. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki EPS 170

analizlerinin sonuçları (Deney No:V-VI) (a)  $EPS_p$  değerleri (b)  $EPS_c$  değerleri.

4.50. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra 172 gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre elde edilen süzüntülerdeki SMP değişimleri (a)  $SMP_p$  değişimi (b)  $SMP_c$  değişimi (Deney Set:V-VI).

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa No</u>
1.1. Çalışmanın kapsamı	6
2.1. Akı ifadeleri ve kanunları	8
2.2. Bazı membran sistemlerinin sürücü kuvvetleri	9
2.3. Membranların yapısal özellikleri ve önemleri	13
2.4. Basınç sürücülü membran proseslerindeki basınç ve akı değerleri	16
2.5. Çapraz akış ve klasik filtrasyon ayırma verimlerinin karşılaştırılması	18
2.6. Filtrasyon sistemlerinin avantaj ve dezavantajları	21
3.1. JLMBR’de kullanılan membran modülünün özellikleri	41
3.2. Filtrasyon deneylerinde kullanılan mikrofiltrasyon membranlarının genel özellikleri	42
3.3. Deneyler sırasında kullanılan sentetik atıksuyun bileşimi	52
3.4. JLMBR’de gerçekleştirilen deneylerin tablosu	61
3.5. Polielektrolit deneylerinde kullanılan katyonik polimerin özellikleri	60
4.1. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki Pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:I)	72
4.2. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki Pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:II)	73
4.3. Farklı işletme şartlarında JLMBR sistemindeki parametrelerin deney setlerine göre ortalama değerleri.	75
4.4. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık	82

- membran filtrasyon sistemine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:I-II)
- 4.5. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda hesaplanmış olan spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ) ve gözenek ( $R_p$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:I-II) 88
- 4.6. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membranların SMP tutma verimleri (Deney Set:I-II) 95
- 4.7. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membran tiplerine göre  $f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  değerleri (Deney Set:I-II). 96
- 4.8. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonundaki membranların AFM analizlerindeki  $R_a$  değerleri (Deney Set:I) 99
- 4.9. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sistemine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:I-II) 109
- 4.10. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonunda hesaplanmış olan spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ), gözenek ( $R_p$ ) ve konsantrasyon polarizasyon ( $R_{cp}$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:I-II) 116
- 4.11. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sisteminde membranların SMP tutma verimleri (Deney Set:I-II) 118
- 4.12. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sistemindeki membranların AFM analizlerindeki  $R_a$  değerleri (Deney Set:I) 121
- 4.13. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki III nolu 131

- deney setinin MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:III)
- 4.14. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki IV nolu 132 deney setinin MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:IV).
- 4.15. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki V nolu 132 deney setinin MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:V).
- 4.16. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sistemindeki parametrelerin 133 deney setlerine göre ortalama değerleri. (Deney Set:III-IV-V).
- 4.17. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık 140 membran filtrasyon sistemine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:III-IV-V).
- 4.18. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık 145 membran filtrasyon sistemine ait spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ) ve gözenek ( $R_p$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:I-II).
- 4.19. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık 150 membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membranların SMP tutma verimleri (Deney Set: III-IV-V).
- 4.20. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık 151 membran filtrasyon sistemine membran tiplerine göre  $f(\alpha \times R_p \times SMP_t - k_{kek} \times MLSS \times V_t)$  değerleri (Deney Set:III-IV-V).
- 4.21. JLMBR sisteminde polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra 160 reaktördeki parametrelerin ortalama değerleri.
- 4.22. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen 164 batık membran filtrasyon deneylerine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:V-VI).

- 4.23. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ) ve gözenek ( $R_p$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:V-VI) 168
- 4.24. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membranların SMP tutma verimleri (Deney Set: V-VI). 171
- 4.25. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membran tiplerine göre  $f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  değerleri (Deney Set:V-VI). 173

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Motivasyon ve Amaç

Membran biyoreaktör sistemleri (MBR), evsel ve endüstriyel atıksuların arıtımında yaygın olarak kullanılan, aktif çamur sistemi ile biyolojik parçalanmanın, membran filtrasyonu ile katı-sıvı ayırımının gerçekleştirildiği kombine arıtma sistemleridir. Membran biyoreaktör teknolojisinin klasik arıtma sistemlerine göre birçok avantajı vardır. Alan ihtiyacının az olması, yüksek çıkış suyu kalitesi (dolayısıyla bazı durumlarda dezenfeksiyona ihtiyaç duyulmaması), yüksek hacimsel ve farklı organik yüklemelere izin vermesi, çamur üretiminin az olması ve çöktürme tankına ihtiyaç duyulmaması en önemli avantajlarıdır. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı ise membran kirlenmesi problemidir. Membran kirlenmesi, çözülmüş ve partiküler maddelerin membran yüzeyinde ve içinde birikmesi dolayısıyla membran performansının düşmesi ve filtrasyon zamanının artmasıdır. MBR sistemlerindeki biyolojik materyallerin çok farklı ve değişken özelliğe sahip olması nedeniyle kirlenme problemi bu sistemlerde oldukça karmaşıktır. Son 10 yılda, literatürde bu konu ile ilgili birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, değişken sayısının farklılığı nedeniyle membran kirlenmesini önleyecek bir yaklaşım henüz tam olarak belirlenmemiştir.

Membranların biyolojik materyal tarafından kirlenmesi yani biyokirlilik, öncelikle çalışılan aktif çamurun özelliklerine bağlıdır. Aktif çamur ortamı askıda katı maddeler, kolloidler ve çözülmüş maddeler olarak üç kısma ayrılabilir. Bunların ayrı ayrı membran kirlenmesine olan etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda, askıda katı maddelerin kek tabakasının oluşmasında, çözülmüş maddelerin ve kolloidlerin ise membranların gözeneklerinin tıkanmasında sorumlu olduğu bulunmuştur. Membran biyokirlenmesinin aşamaları şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Çözülmüş maddelerin ve kolloidlerin membran yüzeyine ve gözeneklerine adsorbe olması,
- 2) Çamur floklarının membran yüzeyinde birikmesi,
- 3) Membran yüzeyinde kek tabakasının oluşması,



- 4) Kesme kuvvetleri ile kirleticilerin yüzeyden kopmaları,
- 5) Uzun süreli işletimde, kirlenme tabakasının içeriğinin değişmesi (bakteri türlerinin ve biyopolimerlerin içeriğinin değişmesi).

Aktif çamurdaki askıda katıların, kolloidlerin ve çözünmüş maddelerin partikül boyutlarına bağlı olarak, membran kirlenmesi fiziksel olarak temizlenebilen, kimyasal olarak temizlenebilen ve geri dönüşümsüz kirlenme olarak üçe ayrılabilir. Eğer kolloidlerde olduğu gibi kirleticinin boyutu membran gözenek boyutuna yakın ise veya çözünmüş maddelerde olduğu gibi membran gözenek boyutundan küçük ise gözenek tıkanması meydana gelir. Gözenek tıkanması genellikle kimyasal olarak membranın temizlenmesini gerektirir. Eğer kirleticinin boyutları membran gözenek boyutundan büyükse, bu partiküller membran yüzeyinde kek tabakası oluşturur. Kek kirlenmesi fiziksel olarak temizlenebilen bir kirliliktir. Eğer membran kimyasal ya da fiziksel olarak hiçbir yöntem ile temizlenemiyorsa, bu kirlenme kalıcı ya da geri dönüşümsüz kirlenme olarak isimlendirilir.

Membranların biyokirlenme süreçlerinde, bakteriler tarafından salgılanan hücre dışı polimerik maddelerin (EPS) aktif rol oynadığı birçok çalışmada ispatlanmıştır. EPS bağlı ya da çözünmüş olarak ikiye ayrılmaktadır. Bağlı EPS, bakteri tarafından salgılanan ve hücre yüzeyinde yani hücreye bağlı bir şekilde bulunan proteinler, polisakkaritler, nükleik asitler, yağlar, humik asitler vb. metabolik materyallerin hepsini tanımlar. Çözünmüş EPS, çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) olarakta bilinmektedir ve bakterinin gelişimi ya da ölümü sırasında çözelti içerisine salgılanan organik maddeleri tanımlamaktadır. Bu bileşenlerin etkisinin incelendiği çalışmalarda, EPS'nin çamur floklarını bir arada tutan ana bileşen olmasının yanında MBR sistemlerindeki anahtar kirlilik parametresi olduğu bildirilmiştir. EPS ile spesifik kek direnci arasındaki yakın ilişki bir çok çalışmada bulunmuştur. SMP'nin kirlenme üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalarda ise EPS'nin kirlilik üzerine doğrudan bir etkisinin olmadığı SMP'nin membran yüzeyinde kolaylıkla adsorbe olduğu için ana kirletici bileşen olduğu belirtilmiştir. Membran materyali ve gözenek boyutunun kirlenme mekanizmasına etkisinin incelendiği çalışmalarda ise, hem SMP'nin hemde EPS'nin membran yüzeyindeki tabakanın ilk oluşumu sırasında önemli etkilere sahip olduğu bildirilmiştir. Bunun yanında diğer biyolojik

parametrelerinde (MLSS konsantrasyonu, göreceli hidrofobisite, viskozite, partikül boyut dağılımı vb.) kirlenme üzerine dolaylı veya doğrudan etki yaptığı da bulunmuştur. Yukarıda bahsedildiği gibi biyolojik ortamlarda değişken parametre çok fazla olduğu için membran biyokirlenmesi üzerine hangi parametrenin net etkisinin olduğu tam olarak açıklanamamıştır.

Son yıllarda, MBR çalışmaları, klasik biyolojik arıtım sistemlerine alternatif oluşturmaktadır. Bunun yanında gelişen teknoloji ile yeni reaktör tasarımları da geliştirilmekte ve atıksu arıtımında başarıyla uygulanabilmektedir. Bu doktora tez çalışmasında, bu reaktörlerden biri olan jet loop membran biyoreaktör (JLMBR) sistemi seçilmiştir. Jet loop biyoreaktörler (JLBR) yüksek verimli kompakt reaktörlerdir. Bu reaktörler yüksek oksijen transferi, karıştırma verimi ve türbülans sağladıkları için yüksek organik madde içeriğine sahip suların arıtımında oldukça başarılıdır. Reaktörün temel prensibi, yüksek hızlı sıvı jetinin kinetik enerjisini kullanarak gaz fazına girmesi ve iki fazın birbiri içinde homojen dağılmasıdır. Sıvı jetinin yarattığı yüksek kesme kuvvetleri, çok ince hava kabarcığı oluşturmakta böylece yüksek yüzey alanları ve gaz transfer hızı olmaktadır ve ideal reaktör koşulları sağlanmaktadır. Oksijen transferi, aerobik mikroorganizmalar için metabolik aktiviteyi etkileyen en önemli hidrodinamik parametredir, bu nedenle biyoreaktörlerin verimleri mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir çözülmüş oksijeni sağlayabilme kapasitesi olarak tanımlanır. Jet loop biyoreaktörlerin yüksek oksijen sağlama kapasitesi organik maddenin yüksek olduğu atıksulardaki arıtım verimlerinin klasik sistemlere göre daha yüksek olmasını sağlar.

Jet loop biyoreaktörlerin en büyük dezavantajı çamurun çökme özelliklerinin kötü olmasıdır. Karışım sıvısının maruz kaldığı yüksek sıvı hızı, kesme kuvvetlerinin büyük olması ve yüksek besi/mikroorganizma (F/M) oranı, çamurun flok oluşumunu engeller. Jet loop reaktörlerden alınan çamur örneklerinde yapılan mikroskopik analizlerde, flok oluşumunda önemli rolü olan filamentli bakterilerin bulunmadığı gözlenmiştir. Dolayısıyla flok oluşumu düşük olduğu için, bu reaktörlerde oluşan çamurun çökme özellikleri klasik sistemlere göre kötüdür. Bu dezavantajı gidermek için jet loop reaktörler bir membran ünitesi ile birleştirilerek kullanılmakta ve jet loop membran biyoreaktörler (JLMBR) olarak adlandırılmaktadır. JLMBR sistemleri

iki sınıfa ayrılmaktadır; batık (submerged) ve dışarı akışlı (external side-stream) jet loop membran biyoreaktörler. Jet loop biyoreaktörler gibi yüksek performanslı sistemlerde membran ayırım tekniklerinin kullanılması arıtım performansını arttırmaktadır. Membranın kullanılması yüksek bakteri konsantrasyonunda çalışmaya imkan verir ve klasik çöktürme sistemiyle ayrılamayan arıtılmış sudaki biyokütle membranla ayrılmış olur.

Literatürde genellikle endüstriyel atıksuların arıtımda kullanılan JLMBR sistemlerinde, alan ve ekipman ihtiyacının az olması, arıtılması gereken çamur miktarının klasik aktif çamur sistemlerine göre daha az olması, KOİ giderimine ilave olarak çeşitli modifikasyonlarla nitrifikasyon ve denitrifikasyon yoluyla azot gideriminin de yapılmasının mümkün olması nedeniyle bu reaktörler değişik karakterdeki atıksuların arıtımında kullanılabilirler. Özellikle arıtım süresinin kısa sürmesi, kurulum, işletim maliyetleri ve enerji ihtiyaçlarının az olması nedeniyle alan sıkıntısının yaşandığı bölgelerde daha az hacim sağlayan JLMBR sistemi yüksek verimlerde kullanılabilir.

Bu doktora tezinde, jet loop membran biyoreaktörde (JLMBR) farklı işletim şartlarında ve organik yüklemelerde atık su arıtım verimi, oluşan çamurun biyolojik özellikleri, membran kirlenme mekanizmasının incelenmesi ve filtrasyon yardımcı madde ilavesinde membran kirlenmesinin araştırılması amaçlanmıştır. İlk aşamada, farklı işletim şartlarında (farklı organik yükleme ve çamur yaşı) çalıştırılan JLMBR'de arıtım performansı, çamur özellikleri ve membran kirlenme mekanizması incelenmiştir. İkinci aşamada sabit çamur yaşında, değişen organik yüklemelerde arıtım performansı, çamur özellikleri ve membran kirlenme mekanizması batık membran sisteminde araştırılmıştır. Son aşamada ise filtrasyon yardımcı madde ilavesinin (katyonik polielektrolit) membran kirlenmesine etkileri incelenmiştir.

İlk aşamada, JLMBR sistemi iki farklı sürekli işletim modunda çalıştırılmıştır; düşük organik yükleme-yüksek çamur yaşı ve yüksek organik yükleme-düşük çamur yaşı. Bu aşamalarda çamur yaşı ve giriş KOİ değeri değiştirilmiş, bu koşullarda çeşitli biyokütle parametrelerinin (MLSS, SMP, EPS, göreceli hidrofobisite, viskozite, partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli) değişimi incelenmiştir. Arıtım

performansı KOİ parametresi ile takip edilmiştir. Membran kirlenme mekanizmasının araştırılması için iki farklı filtrasyon sistemi (batık membran ve çapraz akış filtrasyon) kullanılmıştır. Deneyler, reaktör şartları dengeye ulaştığında gerçekleştirilmiştir. İki farklı filtrasyon sisteminde, farklı polimerik malzemeye sahip membran tiplerinde ve farklı gözenek boyutunda, membranların kirlenme özellikleri incelenmiştir. Membran malzemeleri, polietersülfon (PES), polikarbonat (PC), karışık ester (ME) ve selüloz asetat (SA) olarak seçilmiştir. Gözenek boyutları PES ve ME membranlar için 0.45, 0.22 ve 0.10  $\mu\text{m}$ , PC membran için 0.40, 0.20 ve 0.10  $\mu\text{m}$  ve SA membran için 0.45 ve 0.22  $\mu\text{m}$  seçilmiştir. Batık membran deneylerinde, filtrasyon bittikten sonra membran yüzeyindeki kek tabakasında ve süzüntüde biyolojik parametrelerin analizleri yapılmıştır. Çapraz akış filtrasyon deneylerinde ise filtrasyon süresince belirli sürelerde alınan süzüntü numunelerinde analizler yapılmıştır.

Doktora tezinin ikinci aşamasında, ilk deney sisteminden seçilmiş olan çamur yaşında, değişen organik yüklemelerde JLMBR sistemi sürekli çalıştırılmıştır. Farklı organik yüklemelerin, çamur özelliklerine etkisini görebilmek için günlük olarak yine biyolojik parametreler (MLSS, SMP, EPS, göreceli hidrofobisite, viskozite) ve arıtım performansları takip edilmiştir. Bu aşamada, membran kirlenme mekanizması sadece batık membran sisteminde incelenmiştir. İlk aşamada seçilen bütün membranlar burada da kullanılmıştır. Yine filtrasyon süresi sonunda membran yüzeyindeki kek tabakasında ve süzüntüde biyolojik parametrelerin analizleri yapılmıştır.

Doktora tezinin son aşamasında ise, sabit çamur yaşı ve organik yüklemelerde filtrasyon yardımcı madde (katyonik polielektrolit) ilavesinin, reaktördeki parametrelerin değişimine ve dolayısıyla membran kirlenmesine olan etkileri batık membran sisteminde, bütün membran tipi ve gözenek boyutlarında araştırılmıştır.

## 1.2. Kapsam

Doktora tez çalışmasında, üç farklı aşama ve altı farklı deney setinde çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın kapsamı Çizelge 1.1'de sunulmuştur.

Çizelge 1.1. Çalışmanın kapsamı.

Aşama No	Bulgular ve Tartışma Kısmında İlgili Başlık No	Amaç	Kapsam
1	4.1	Farklı işletim şartlarında, atıksu arıtım performansının ve çamurun biyolojik özelliklerinin belirlenmesi. Membran kirlenme mekanizmasının farklı filtrasyon sistemlerinde, farklı gözenek boyutu ve tipteki membranlarda araştırılması.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deneysel Seti: I. <math>KOİ_{giriş}=1000±128</math> mg/L. Çamur yaşı= Sonsuz. JLMBR sistemi 81 gün sürekli olarak işletilmiştir. Batık membran ve çapraz akış filtrasyon sisteminde 11 adet membran denenmiştir. Akı grafikleri çıkarılmış, direnç hesapları yapılmıştır.</li> <li>• Deneysel Seti: II. <math>KOİ_{giriş}=5100±230</math> mg/L. Çamur yaşı= 3 gün. JLMBR sistemi 64 gün sürekli olarak işletilmiştir. Batık membran ve çapraz akış filtrasyon sisteminde 10 adet membran denenmiştir. Akı grafikleri çıkarılmış, direnç hesapları yapılmıştır.</li> <li>• İki deney setinde de, reaktörde yapılan analizler; reaktöre giriş ve çıkış debilerinin ölçümleri, havalandırma ve geri devir debisi kontrolü, sıcaklık, ÇO, pH ölçümü, MLSS, <math>KOİ_{giriş}</math>, <math>KOİ_{çıkış}</math>, SMP, EPS, göreceli hidrofobisite, viskozite, partikül boyutu dağılımı ve zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır.</li> <li>• Batık membran sisteminde membran yüzeyindeki kek tabakasında SMP, EPS ve su içeriği analizleri yapılmıştır. Filtrasyon sonunda süzüntüde SMP analizleri yapılmıştır. İlk deney setinde membranların SEM ve AFM analizleri gerçekleştirilmiştir.</li> <li>• Çapraz akış filtrasyon sisteminde zamana karşı numune alınmış, SMP analizleri yapılmıştır.</li> </ul>
2	4.2	Sabit çamur yaşında, farklı organik yüklemelerde atıksu arıtım performansının, çamur özelliklerinin ve batık membran sisteminde membran kirlenmesinin farklı gözenek boyutu ve tipteki membranlarda araştırılması.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deneysel Seti: III. <math>KOİ_{giriş}=2053±68</math> mg/L. Çamur yaşı= 3 gün. JLMBR sistemi 13 gün sürekli olarak işletilmiştir.</li> <li>• Deneysel Seti: IV. <math>KOİ_{giriş}=3068±28</math> mg/L. Çamur yaşı= 3 gün. JLMBR sistemi 14 gün sürekli olarak işletilmiştir.</li> <li>• Deneysel Seti: V. <math>KOİ_{giriş}=4110±68</math> mg/L. Çamur yaşı= 3 gün. JLMBR sistemi 11 gün sürekli olarak işletilmiştir.</li> <li>• Deneysel sistemlerde reaktörde yapılan analizler; reaktöre giriş ve çıkış debilerinin ölçümleri, havalandırma ve geri devir debisi kontrolü, sıcaklık, ÇO, pH ölçümü, MLSS, <math>KOİ_{giriş}</math>, <math>KOİ_{çıkış}</math>, SMP, EPS, göreceli hidrofobisite, viskozite ölçümleri yapılmıştır.</li> <li>• Batık membran sisteminde 11 adet membran kullanılmıştır. Akı grafiklerinin çıkarılması, direnç hesaplarının yapılması, membran yüzeyindeki kek tabakasında SMP, EPS ve su içeriği analizleri ve filtrasyon sonunda süzüntüde SMP analizleri gerçekleştirilmiştir.</li> </ul>
3	4.3	Filtrasyon yardımcı madde (katyonik polielektrolit) ilavesinin çamur özelliklerine etkileri ve bu şartlarda membran kirlenmesinin farklı tip ve boyutlardaki membranlarda belirlenmesi.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deneysel Seti: VI. <math>KOİ_{giriş}=4110±68</math> mg/L. Çamur yaşı= 3 gün. Kesikli çalışmada optimum polielektrolit konsantrasyonu belirlenmiştir. Bu konsantrasyonda, JLMBR'ye peristaltik pompa ile sürekli polielektrolit ilave edilmiştir. Reaktörde yapılan analizler; reaktöre giriş ve çıkış debilerinin ölçümleri, havalandırma ve geri devir debisi kontrolü, pH ölçümü, MLSS, göreceli hidrofobisite, viskozite, partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır.</li> <li>• Batık membran sisteminde 11 adet membranın incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Akı grafiklerinin çıkarılması, direnç hesaplarının yapılması, membran yüzeyindeki kek tabakasında SMP, EPS ve su içeriği analizleri ve filtrasyon sonunda süzüntüde SMP analizleri gerçekleştirilmiştir.</li> </ul>

## 2. MEMBRAN SİSTEMLERİ ve KİRLENME PROBLEMİ

### 2.1. Membran Tanımlamaları

Membran sistemlerinin ana bileşeni olan membranlar, yarı geçirgen bir yapıya sahiptirler. Membranın ve çalışılan çözeltinin özelliğine göre, partiküllerin bazıları membrandan geçebilmekte bazıları ise yüzeyde tutunmaktadır. Bu süreç iki model ile açıklanmaktadır; çözünme-difüzyon ve gözenek-akış modeli. Çözünme-difüzyon modeli, süzülecek olan maddelerin membran materyalinde çözünmesi ve konsantrasyon değişimiyle de membrandan geçmesi olarak açıklanır. Difüzyon hızlarının ve çözünürlüklerinin farklı olması ile maddeler birbirlerinden ayrılırlar. Gözenek-akış modelinde ise maddelerin basınç sürücülü konvektif akış ile gözeneklerden taşındığı kabul edilir. Ayırım burada süzülecek maddelerin bazısının gözeneklerden geçmesi, bazısının ise gözeneklerde kalması ile gerçekleşir. Günümüzde membran sistemlerinin birçoğunda gözenek-akış modeli kullanılmaktadır. Çözünme-difüzyon modeli daha çok ters osmoz, pervaporasyon ve gazların polimerik filmlerde taşınmasının açıklanmasında tercih edilmektedir [Baker, 2004].

Membranın performansı iki parametre ile ifade edilir; seçicilik ve akı. Akı, birim alan ve zamanda membrandan geçen hacim olarak tanımlanır. Hacimsel olarak ifade edilen akının birimi genellikle  $L/m^2sa$ ,  $L/m^2gün$  ve  $cm^3/cm^2sa$  olarak verilir. Akı genel olarak basınca, sıcaklığa, çapraz akış hızına, filtre edilecek ortamın içeriğine ve çözeltideki partikül madde miktarına bağlıdır [Koyuncu, et al., 2004]. Membran ve filtre edilecek bileşenler arasındaki fiziksel ve kimyasal ilişkilere bağlı olarak, membranlar bileşenlere göre farklı davranışlar gösterir. Membrandaki taşınma, çözeltideki bileşenlerin sürücü kuvvet ile gerçekleşir. Bundan dolayı, süzüntü akışı yani akı, sürücü kuvvete bağlı olarak aşağıdaki formüle göre hesaplanır [Mulder, 1996];

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

$dX/dx$ , sürücü kuvveti ifade eder.

$A$ ; akı ve sürücü kuvvete bağlı bir katsayıdır ve Çizelge 2.1'e göre değişiklik gösterir.

Çizelge 2.1. Akı ifadeleri ve kanunları [Mulder, 1996].

Akı	Eşitlik	Kanun
<b>Kütlesel Akı</b>	$J_m = -D \cdot \frac{dC}{dx}$	Fick
<b>Hacimsel Akı</b>	$J_v = -L_p \cdot \frac{dP}{dx}$	Darcy
<b>Isısal Akı</b>	$J_h = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$	Fourier
<b>Momentum Akısı</b>	$J_n = -\nu \cdot \frac{dV}{dx}$	Newton
<b>Elektriksel Akı</b>	$J_i = -\frac{1}{R} \cdot \frac{dE}{dx}$	Ohm

Membrandaki sürücü kuvvetler konsantrasyon, sıcaklık, basınç ve elektrik potansiyeli olabilir. Çeşitli membran sistemlerindeki sürücü kuvvetler ile çözelti ve süzüntü fazları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Membran seçiciliği ise, tutunma ( $R$ ) ve ayırma faktörlerinden ( $\alpha$ ) biri kullanılarak ifade edilir. Çözücü (genellikle su) ve çözünen içeren bir çözeltinin filtrasyonunda seçicilik genelde tutunma ile ifade edilir. Çözünen madde kısmen veya tamamen membran yüzeyinde kalabilir. Matematiksel olarak tutunma aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.2)$$

$C_f$ , Filtre edilecek çözeltideki çözünen konsantrasyonu.

$C_p$ , Süzüntüdeki çözünen konsantrasyonu.

$R$ , Tutunma. Birimsiz bir ifade olduğu için burada konsantrasyonun birimi önemli değildir.  $R$ 'nin değeri %100 (çözünen maddenin tamamen tutunduğu durumda) ile

%0 (çözünen maddenin hepsinin membrandan geçebildiği durumda) arasında değişir. [Mulder, 1996].

Çizelge 2.2. Bazı membran sistemlerinin sürücü kuvvetleri [Mulder, 1996].

Membran sistemi	Fazlar		Sürücü Kuvvet
	Çözelti	Süzüntü	
Mikrofiltrasyon	Sıvı	Sıvı	$\Delta P$
Ultrafiltrasyon	Sıvı	Sıvı	$\Delta P$
Nanofiltrasyon	Sıvı	Sıvı	$\Delta P$
Ters osmoz	Sıvı	Sıvı	$\Delta P$
<b>Pizodializ (Basınçlı diyaliz)</b>	Sıvı	Sıvı	$\Delta P$
<b>Gaz ayırımı</b>	Gaz	Gaz	$\Delta P$
<b>Buhar süzme</b>	Gaz	Gaz	$\Delta P$
Pervaporasyon	Sıvı	Gaz	$\Delta P$
Elektrodiyaliz	Sıvı	Sıvı	$\Delta E$
Membran elektroliz	Sıvı	Sıvı	$\Delta E$
Diyaliz	Sıvı	Sıvı	$\Delta C$
<b>Difüzyon diyaliz</b>	Sıvı	Sıvı	$\Delta C$
<b>Membran kontaktörler</b>	Sıvı	Sıvı	$\Delta C$
	Gaz	Sıvı	$\Delta C/\Delta P$
	Sıvı	Gaz	$\Delta C/\Delta P$
Termo osmoz	Sıvı	Sıvı	$\Delta T/\Delta P$
Membran distilasyonu	Sıvı	Sıvı	$\Delta T/\Delta P$

P:basınç, E: elektrik potansiyeli, C:konsantrasyon, T:sıcaklık.



Eğer gaz veya organik sıvıların karışımları filtre edilecek ise, bu durumda membran seçiciliği ayırma faktörü ( $\alpha$ ) ile ifade edilir. A ve B maddelerini içeren bir çözeltinin filtrasyonunda  $\alpha$  şu şekilde hesaplanabilir [Mulder, 1996];

$$\alpha_{A/B} = \frac{y_A/y_B}{x_A/x_B} \quad (2.3)$$

$y_A$  ve  $y_B$ : Süzüntüdeki A ve B maddelerinin konsantrasyonları.

$x_A$  ve  $x_B$ : Filtre edilecek çözeltideki A ve B maddelerinin konsantrasyonları.

Eğer A maddesinin geçirimsizliği B maddesinden daha yüksek ise o zaman  $\alpha_{A/B}$  olarak gösterilir, eğer B maddesinin yüksek ise o zaman  $\alpha_{B/A}$  şeklinde gösterilir.  $\alpha_{A/B} = \alpha_{B/A} = 1$  ise hiç ayırım olmamış demektir [Mulder, 1996].

Filtrasyon süresince membran yüzeyinde ayırım ve tutunmaya bağlı olarak kek tabakası oluşacaktır. Bu kek tabakasındaki akı ise Poiseuille eşitliği ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [Todaro, 1997];

$$\frac{dV}{A \cdot dt} = \frac{\Delta P}{\mu \left[ \alpha \cdot \left( \frac{W}{A} \right) + R_m \right]} \quad (2.4)$$

$V$ : Süzüntü hacmi ( $\text{cm}^3$ )

$A$ : Filtre yüzey alanı ( $\text{m}^2$ )

$t$ : Zaman (sa)

$\Delta P$ : Filtre ortamına uygulanan basınç (Pa)

$\alpha$ : Spesifik kek direnci (m/kg)

$W$ : Kek ağırlığı (gr)

$R_m$ : Filtre ortamının direnci ( $\text{m}^{-1}$ )

$\mu$ : Dinamik viskozite (Pa.sn)

Spesifik kek direnci, kekin sıkıştırılabilirliğinin bir fonksiyonudur;

$$\alpha = \alpha' \Delta P^s \quad (2.5)$$

$\alpha'$ =sabit katsayı

$s$ ; Sıkıştırılmayan materyal için 0 değerini alır. Eğer filtre ortamının direnci ihmal edilirse Eşitlik [2.4] aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \cdot \Delta P}{\mu \cdot \alpha \left( \frac{w}{A} \right)} \quad (2.6)$$

$s$ ; Sıkıştırılabilen kekler için 1 değerini alır. Bu durumda Eşitlik [2.4] aşağıdaki gibi düzenlenir;

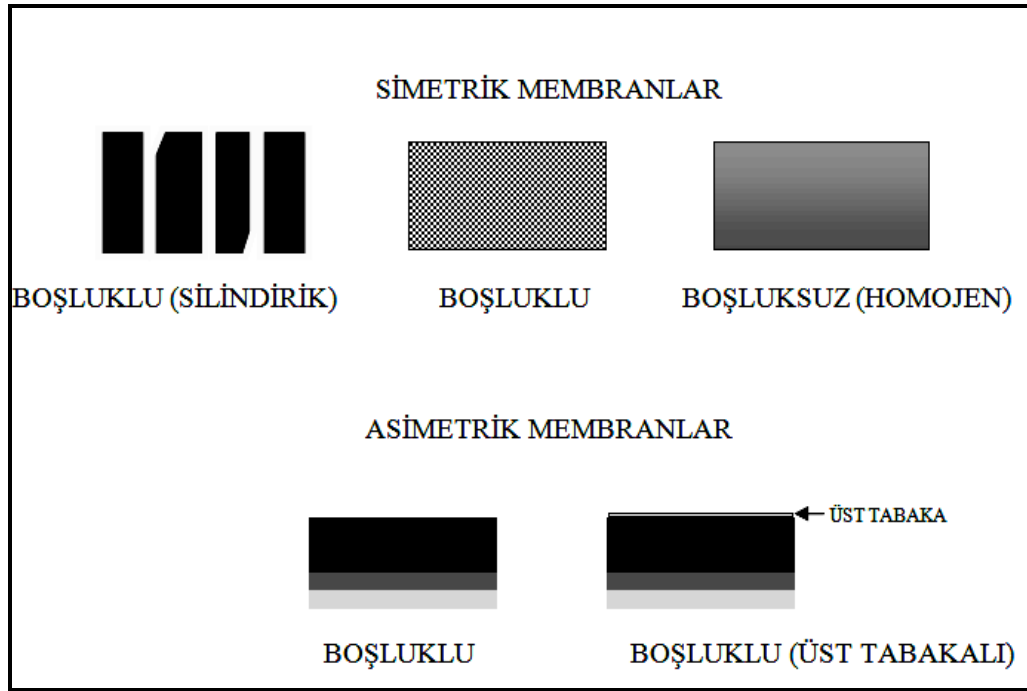
$$\frac{dV}{dt} = \frac{A}{\mu \cdot \alpha \left( \frac{w}{A} \right)} \quad (2.7)$$

Burada, kekin sıkıştırılabilir olmasının yanında kalınlığı da filtrasyon akısını etkileyen bir parametredir.  $w/A$  kekin kütlesini ifade eder. Eğer  $w/A$  azalırsa akış  $dV/dt$  artar, yani ince kek tabakası yüksek filtrasyon akışına sebep olur [Todaro, 1997].

## 2.2. Membran Yapısı ve Materyalleri

Membranlar genellikle morfolojik olarak sınıflandırılırlar. Membran yapısı ayırma mekanizmasını belirler. Membranlar ile ilgili ilk sınıflandırma doğal ve sentetik olarak yapılmıştır. Günümüzde genellikle filtrasyonda, sentetik membranlar tercih edilmektedir. Sentetik membranlarda kendi arasında iki alt gruba ayrılmaktadır; simetrik ve asimetrik membranlar (Şekil 2.1). Simetrik membranların (gözenekli ve gözeneksiz) kalınlıkları 10-200  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir ve kütle transfer direnci membran kalınlığına bağlıdır. Membran kalınlığı azaldıkça akı artmaktadır. Asimetrik membranların kalınlıkları ise 50-150  $\mu\text{m}$  aralığında olup bazıları 0.1-0.5  $\mu\text{m}$  kalınlıkta yoğun üst tabakayla üretilirler. Bu membranlar yüksek

seçiciliğe ve akı değerlerine sahiptirler. Kütle transfer direnci ince üst tabakaya bağlıdır [Mulder, 1996].



Şekil 2.1. Membran yapıları.

Membran materyalinin özellikleri, filtrasyon sisteminin tasarımında ve işletmesinde önemli bir etkiye sahiptir çünkü materyalin tipi kimyasal ve termal stabilite, adsorpsiyon ve ıslanabilirlik gibi yüzey özelliklerini etkiler. Buna ek olarak membranın yıkanması aşamasında kullanılan temizleme ajanının seçimi tamamen seçilen membran materyaline bağlıdır, çünkü bazı temizleme maddeleri membranın polimer yapısına zarar verebilir [Mulder, 1996]. Filtrasyonu yapılacak çözelti ortamının özellikleri de membran materyalinin fiziksel ve kimyasal yapısını değiştirebilir. Yoğunluk, erime noktası, sıkıştırılabilirlik veya sıcaklık gibi fiziksel özellikler, membran materyalinin fiziksel yapısını değiştirebilir. Örneğin selüloz asetat membranın kimyasal yapısı düşük veya yüksek çözelti pH'larına duyarlıdır (hidrolize olabilir). Aromatik poliamidden yapılmış olan membran, sudaki kloro karşı hassastır. Bunun yanında, membran yapımı sırasındaki ortam şartları da membran özelliklerini değiştirir, örneğin polimerin organik solvent içerisindeki jelleşme derecesi ve yüksek veya düşük sıcaklıklardaki kristalleşme membranın fiziksel yapısını etkiler [Matsuura, 1994].

Membranların ayırma performanslarını etkileyen, membranın yapısına bağlı olan özellikler aşağıdaki şekilde sıralanabilir. Bu parametrelerin filtrasyon performansına etkileri Çizelge 2.3’de özetlenmiştir [Todaro, 1997];

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

Çizelge 2.3. Membranların yapısal özellikleri ve önemleri.

Özellik	Akıya olan etkisi	Önemi
Asimetrik	Yüksek	Akı değerleri simetrik membran ile karşılaştırıldığında yüksektir.
Simetrik	Yüksek	Partiküllerin tutunması geridönüşsüz kirlenmeye sebep olabilir.
<b>Gözenek boyutu</b>	Yüksek	Yüksek tutunma verimini sağlayan, yüksek akı değerlerinin optimize edilmesi aşamasında uygun gözenek boyutunun seçilmesi önemlidir.
<b>Gözenek boyutu dağılımı</b>	Düşük	Dar gözenek boyutu dağılımı iyi bir ayırma verimi sağlar.
<b>Boşluk Oranı</b>	Yüksek	Yüksek boşluk oranına sahip membran, yüksek geçirgenliğe sahiptir. Buda doğal olarak akının artmasına sebep olur.
Zeta potansiyeli	Düşük	Membran yüzey yükleri, adsorbsiyon nedeniyle oluşan kirlenmeyi etkiler.
Hidrofobik	Yüksek	Genellikle sterilizasyon sistemlerinde avantaj sağlamaktadır. Atıksu arıtımında kirlenme problemi yüksektir.
Hidrofilik	Yüksek	Membranların ıslanabilirliği sulu çözeltilerin taşınımını arttırır. Aynı zamanda organik maddeler nedeniyle oluşan kirliliği azaltabilir.

Membran üretiminde birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Çoğunlukla sentetik polimerler tercih edilmekle birlikte, inorganik membranlar olarak isimlendirilen seramik veya mineral membranlar da kullanılabilir. En çok tercih edilen polimerik membran malzemeleri ve özellikleri şu şekildedir [Nath, 2008];

**Selüloz türevleri;** Selüloz, membran üretiminde kullanılan en önemli doğal polimerdir. Yüksek yapısal düzeni ve içerdiği hidroksil grupları arasındaki moleküler arası hidrojen bağı, selülozu çözmeye karşı dayanıklı yapmaktadır. Membran sistemlerinde en çok kullanılan selüloz türleri inorganik (nitrat) ve organik (asetat) esterlerdir. Selüloz nitrat (SN), filtrasyon için üretilen ilk sentetik polimerdir. Selüloz asetat (SA) ise daha düşük maliyeti ile selüloz nitrata alternatif olarak üretilmiştir. Selüloz asetatın en büyük avantajı, istenilen yüksek akılar için farklı gözenek boyutlarında üretilmeleridir. Selüloz triasetat (STA) ise asetil içeriği % 42.3'ten büyük olan selüloz türevi bir membrandır. Selülozik membranlar, hidrofilik membranlar olarak bilinmektedirler ve bu özellikle membran kirlenmesi için avantaj sağlamaktadır. Selülozik membranların en büyük dezavantajları ise, çalışma sıcaklık aralığının dar olması (30-40°C), düşük pH aralığı (pH 3-6) ve klorlu türlere olan düşük dayanıklılıktır [Nath, 2008].

**Aromatik poliamidler;** Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen ve organik solventlere karşı yüksek direnç özelliklerine sahip membranlardır. Yapısındaki bir amid (-CONH-) bağı ile karakterize edilirler. Selüloz asetat membranların birçok dezavantajının (pH ve sıcaklıktan etkilenme gibi) üstesinden gelirler, fakat klor türlerine olan dayanıklılıkları selülozik membranlardan daha kötüdür. Çünkü klor, poliamidin aromatik halkalarına zarar vererek membranın geçirgenliği artırıp seçiciliğini azaltır [Nath, 2008].

**Polisülfon;** Polisülfon, bisfenol-A ve dikloradifenil sülfonun yoğunlaştırılmış bir ürünüdür. Bu membranlar -SO<sub>2</sub> grubu içerirler. Polisülfon ve polietersülfon membranlar, yüksek moleküler ve boyutsal stabiliteye, sert ve dirençli bir yapıya sahiptirler. Geniş bir sıcaklık aralığında çalışmaya uygundur, polisülfon membran 75°C'ye, polietersülfon membran 125°C'ye kadar çalıştırılabilirler. Bu membranların

pH aralıkları da geniştir, pH 1-10 aralığında kullanılabilirler. Klora dayanıklılığı diğer membranlara göre daha yüksektir. Sülfon grupları elektronların aromatik gruplar içerisinde hapsolmasını sağlar bu da membranların direncini artırır. İstenilen gözenek boyutunda hazırlanabilir olması ve hem tabaka halinde hem de tübüler olarak kullanımının olması nedeniyle bu membranlar mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve ters osmoz sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedirler [Nath, 2008].

*Politetrafloroetilen (PTFE);* Teflon olarak bilinen bu membranlar, polietilenin hidrojen atomu ile florine bağlanmasıyla oluşur. Asidik, alkali ortamda ve her türlü solvent türünde kullanılabilir olması en büyük avantajıdır. -100 ile 260<sup>0</sup>C sıcaklık aralığında kullanılabilir. Hidrofobik bir yapıya sahiptir bu nedenle genellikle organik çözeltilerin ve gazların ayırımında tercih edilir [Nath, 2008].

*Polikarbonat:* Bu membranlar –OCOO- grubu içerirler. Yapıları genellikle amorfur. İnce kalınlığı (~10 µm) ve yüksek moleküler ağırlığı nedeniyle, diğer membranların hazırlanmasında da kullanılabilirler. Diğer amorf polimerlerden farklı olarak yüksek pürüzsüzlüğe ve esnekliğe sahiptir. Termoplastik yapısı nedeniyle farklı şekil ve tabakalarda hazırlanabilir. Özellikle polietilenglikol ve silikon ile birlikte hemodiyaliz membranların hazırlanmasında kullanılır [Nath, 2008].

## 2.3. Membran Sistemleri

Membran sistemleri, ayırma mekanizması (sieving mechanism) ile membranın gözenek boyutunu temel alarak askıda veya koloidal partiküllerin ayrılmasına göre sınıflandırılırlar. Gözenek boyutu genel olarak µm birimi ile ifade edilir. Çevre mühendisliğinde atık veya içme suyu filtrasyonunda en çok kullanılan membran sistemleri; mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmozdur. Filtre edilecek partiküllerin çapı 100 nm'den yüksek olduğunda büyük gözenekli membranlar kullanılır. Bu membranların hidrodinamik dirençleri düşük olur. Bunun yanında yüksek akı elde etmek için düşük sürücü kuvvetler (düşük basınç) yeterli olmaktadır. Bu prensibe sahip membran prosesleri, mikrofiltrasyon olarak isimlendirilir [Mulder, 1996]. Mikrofiltrasyon genellikle askıda katılar, bakteriler ve büyük kolloidlerin filtre edilmesinde kullanılırlar [Baker et al., 1991]. Bu

sistemlerde kullanılan membranların gözenek boyutu 0.1-0.2  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Eğer partikül boyutu 1-100 nm arasında olan makromoleküllerin ayırımı gerçekleştirilecek ise, membran yapısı daha yoğun ve membran gözenek boyutu daha küçük olmalıdır, bu durumda membranın hidrodinamik direnci artacaktır. Filtrasyon için uygulanan basınçta mikrofiltrasyon sisteminden daha yüksek olmalıdır. Bu sistemlere, ultrafiltrasyon denilmektedir [Mulder, 1996]. Bazı ultrafiltrasyon membranları yüksek organik makromoleküllerin ayırımında kullanıldıkları için genellikle gözenek boyutuna göre değil molekül ağırlığı kesme değeri (cut-off (MWCO)) ile tanımlanırlar. MWCO, dalton (Da) birimi ile ifade edilir ve membranın tutabileceği minimum atomik ağırlık değerini verir. Diğer bir deyişle, bu değer üstündeki atomik ağırlığa sahip moleküller membrandan geçemezler [EPA, 2005].

Daha düşük moleküler ağırlığa sahip moleküllerin ayırımında ise ters osmoz sistemlerine ihtiyaç duyulur. Bu sistemlerde, çok daha yoğun membranlar kullanmak gerekir. Ters osmozda kullanılan membranların MWCO değerleri 100 Da'dan küçüktür. Nanofiltrasyon da ise MWCO değerleri 200-1000 Da aralığındadır [EPA, 2005]. Mikrofiltrasyondan ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmoza gidildikçe, hidrodinamik direnç artar ve sonuç olarak daha fazla sürücü kuvvete ihtiyaç duyulur. Bu filtrasyon sistemlerinde uygulanan tipik basınç değerleri ve elde edilen akı değerleri, Çizelge 2.4'te verilmiştir [Mulder, 1996].

Çizelge 2.4. Basınç sürücülü membran proseslerindeki basınç ve akı değerleri.

Membran sistemi	Basınç aralığı (bar)	Akı aralığı ( $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{sa} \cdot \text{bar}$ )
Mikrofiltrasyon	0.1-2.0	>50
Ultrafiltrasyon	1.0-5.0	10-50
Nanofiltrasyon	5.0-20	1.4-12
Ters osmoz	10-100	0.05-1.4

## 2.4. Membran İşletim Şekilleri

### 2.4.1. Klasik (Dead-end) filtrasyon

Klasik filtrasyon (KF), 0.1-10  $\mu\text{m}$  boyut aralığındaki partiküllerin bulunduğu sıvı veya gazların ayırımında kullanılır ve genellikle mikrofiltrasyon sistemlerinde tercih edilir. Ayırım verimi çoğunlukla filtre edilecek partiküllerin boyutuna bağlıdır, bazı durumlarda ise adsorbsiyon da önemli olmaktadır. Basınç sürücülü klasik filtrasyon sisteminde, çözelti membrana doğru dikey olarak hareket ederken, partiküller veya askıda katı maddeler membran tarafından tutulur ve yüzeyde birikirler. Birikim hem membranın gözeneklerinde hem de yüzeyinde olmaktadır, akış durduğunda veya ciddi miktarda azaldığında membranın temizlenmesi veya değiştirilmesi gerekir. İdeal şartlarda, besleme çözeltisindeki bütün partiküllerin boyutunun membran gözeneklerinden büyük olup, membran yüzeyi tarafından tutunması beklenir. Fakat uygulamada, membran yüzeyindeki gözeneklerin rastgele dağılımı ve besleme çözeltisindeki maddelerin boyutlarının farklı olması bütün partiküllerin membran yüzeyi tarafından tutunmasına izin vermez. Partiküller membranın gözeneklerinin içinde veya yüzeyinde tutunarak filtrasyon akısının azalmasına sebep olurlar. Klasik filtrasyonun uygulama alanları genellikle saflaştırma, berraklaştırma, sterilizasyon ve analizlemedir. Bunun yanında klasik filtrasyonda genellikle tabaka şeklindeki membranlar tercih edilmektedirler [Scott, 2006].

### 2.4.2. Çapraz akış filtrasyon

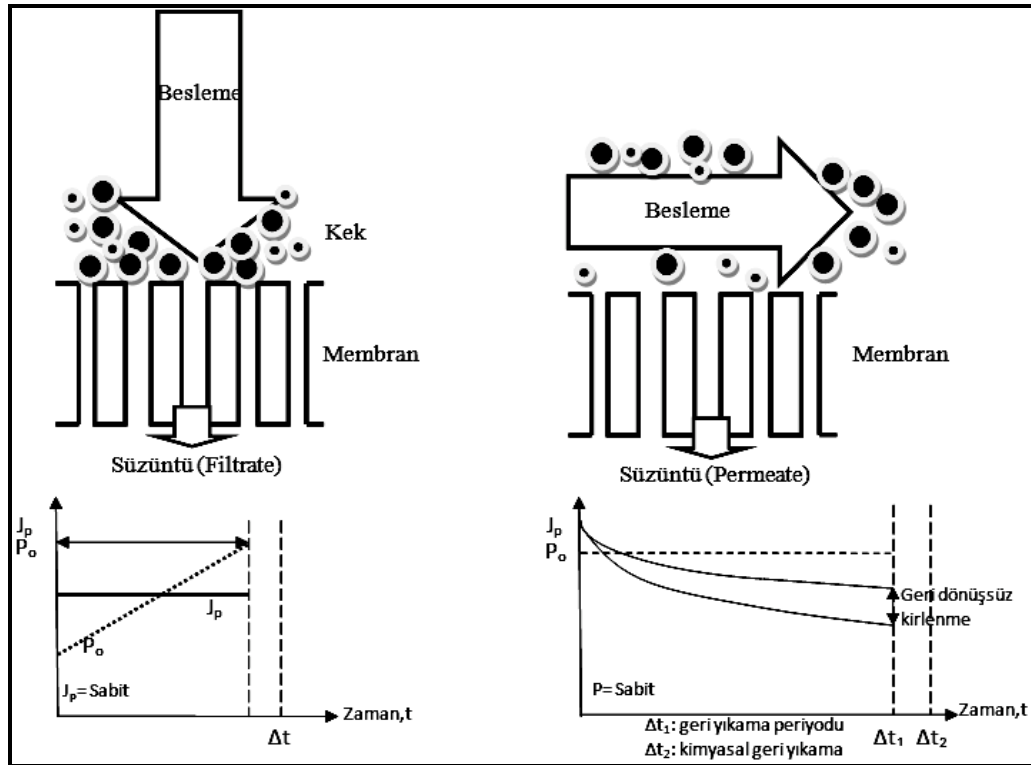
Çapraz akış filtrasyon (ÇAF), klasik filtrasyondan (KF) farklı olarak teğetsel bir akışa sahiptir. Bundan dolayı filtrasyon verimi, membranın efektif yüzey özelliklerine bağlıdır. Çizelge 2.5’de ÇAF ve KF’nin ayırma verimleri arasındaki farklar verilmiştir. Şekil 2.2’de ise iki sisteminin ayırma mekanizması gösterilmiştir [Ramesh, 1997].



Çizelge 2.5. Çapraz akış ve klasik filtrasyon ayırma verimlerinin karşılaştırılması.

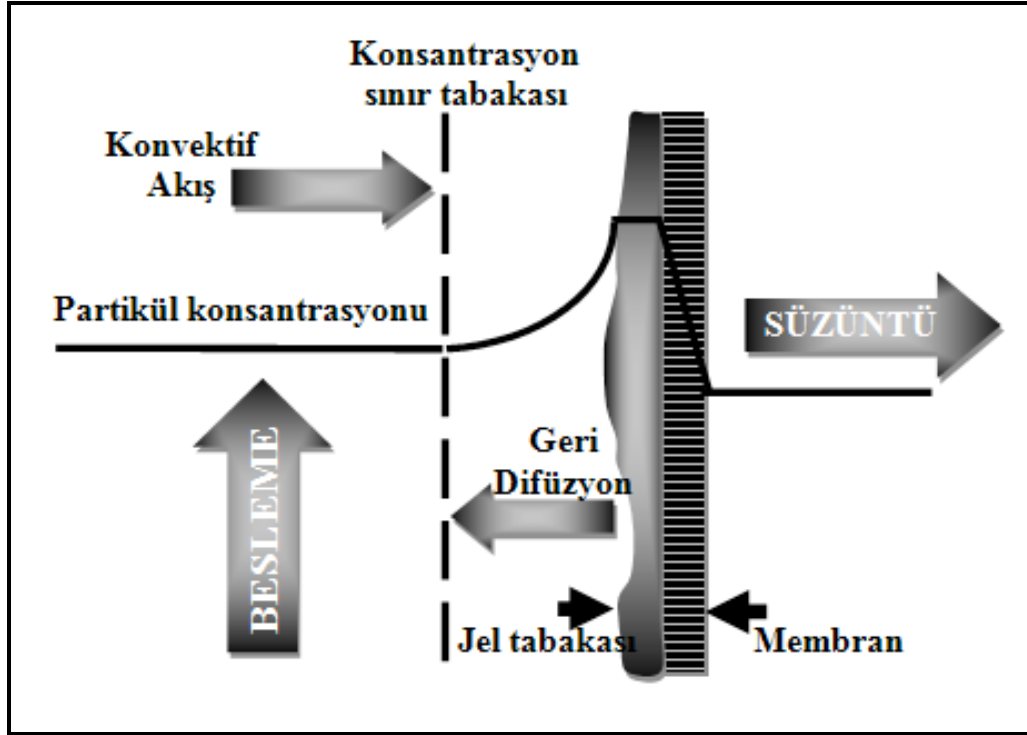
Ayrım mekanizması	Ayrım Performansı	
	ÇAF	KF
<b>Çeşitli partikül boyutuna sahip sıvının filtrasyonunda</b>	Yüksek verimli	Düşük verimli
<b>Değişen ve farklı katı konsantrasyonlarına sahip sıvıların filtrasyonunda</b>	Yüksek verimli	Genellikle tercih edilmez
<b>Katı minimizasyonunda</b>	Yüksek verimli	Çözelti düşük katı miktarına ve besleme debilerine sahip olduğunda verim yüksek
<b>Saflaştırma proseslerinde</b>	Eğer akıdaki azalmalar önlenebilirse verim yüksek	Adsorbsiyona bağlı olarak gerçekleşen kirlenme problemi engellenebilirse verim yüksek

ÇAF sisteminde, yüksek geri devir hızlarının sağladığı çapraz akış hızları membran yüzeyinde türbülansı artırır ve böylece beslemedeki katıların membran yüzeyinde birikmelerini azaltır. Bazı durumlarda, geri devir hızı filtrasyon hızınının 10 katı yüksek olabilmektedir. Bu, aynı zamanda yüzeydeki konsantrasyon polarizasyon tabakasının kontrolünü de sağlar. Yüksek kesme kuvvetleri, partikül veya moleküler difüzyon filtrasyon hızlarını artırır. KF sistemlerinde uygulanan basınç ile besleme çözeltisi membrana doğru hareket eder, membrandan geçen partikülsüz sıvı süzüntüyü, membran yüzeyinde tutulan partiküller ise kek tabakasını oluştururlar. Çapraz akış filtrasyonda ise besleme çözeltisi, filtrelenmemiş sıvı ve süzüntü olarak iki farklı akışa ayrılır. Filtre edilmemiş sıvı sisteme geri devir edilir. Filtrasyon ilerledikçe, membran yüzeyinde birikim arttıkça, buna bağlı olarak filtrasyon hızı azalır. Akı veya basınç limit değerlerine ulaştığında membranın temizlenmesi veya değiştirilmesi gerekir [Ramesh, 1997].



Şekil 2.2. Klasik ve çapraz akış filtrasyonun ayırma mekanizması.

ÇAF sisteminde en önemli aşamalardan birisi konsantrasyon polarizasyonudur. Konsantrasyon polarizasyonu, membran-sıvı arayüzeyinde yani konsantrasyon sınır tabakasında partiküllerin birikme eğilimini tanımlamada kullanılan bir terimdir (Şekil 2.3). Bu tabaka, membran yüzeyindeki sıvı hızının sıfır olduğu anda, durgun sıvı tarafından oluşturulur. Bu durumda, bu tabakanın içinde sıvı taşınımı sadece difüzyon ile gerçekleşir. Membran tarafından tutulan maddelerin, membran yüzeyinde konsantrasyonları, artan akıyla birlikte logaritmik olarak artış gösterir. Sınır tabakanın kalınlığı, sistemin hidrodinamik koşullarına göre değişir. Örneğin, türbülans arttığında bu tabakasının kalınlığı azalır. Basınç sürücülü sistemler için, yüksek akı membran yüzeyinde yüksek madde tutunmasına, yüksek konsantrasyon farkına ve hızlı difüzyona sebep olur. Denge durumunda işletilen sistemlerde, su ve bileşenlerin sıvıdan membrana ve membrandan sıvıya doğru hareket etmesine sebep olan kuvvetler denge durumundadır. Bu denge, konsantrasyon polarizasyonu ile sağlanır. Yüksek basınç uygulanan sistemlerde, konsantrasyon polarizasyonu aynı zamanda membran-çözelti arayüzeyindeki etkin osmotik basıncı da arttırır. Bundan dolayı, filtrasyon sistemleri yüksek türbülanslarda veya konsantrasyon polarizasyonun önemli olmaya başladığı akı değerinin altında işletilerek konsantrasyon polarizasyonunun etkisi azaltılabilir [Judd and Jefferson, 2003].



Şekil 2.3. Konsantrasyon polarizasyon mekanizması [Judd and Jefferson, 2003].

### 2.4.3. Batık membran sistemleri

Katı-sıvı ayırımı yapılmak istenen ortama membran modüllerinin daldırılarak düşük basınçta, filtrasyonun gerçekleştirildiği sistemlerdir. Yüksek türbülanslı çapraz akış sisteminin enerji ihtiyacı yüksek olduğu için, batık membran sistemleri bu sistemlere alternatif olabilmektedir. Membranlar direkt olarak aktif çamur tankına daldırılır ve yoğun bir havalandırma sistemi kullanılarak membran yüzeyinde çapraz akış etkisi oluşturulur. Süzüntü 0.05-0.6 bar aralığındaki transmembran basıncında, vakum ile elde edilir. Filtre edilemeyen biyokütle, reaktörün içinde kalır ve filtre edilen sıvı ise reaktörün dışına alınır. Batık membran sistemlerinin en önemli özelliği, klasik filtrasyonun tam tersine yalancı denge durumunda çalışmasıdır. ÇAF sistemi ile karşılaştırıldığında daha az enerji kullanılır. Fakat yüksek süzüntü elde etmek için yüksek membran alanlarına ihtiyaç vardır. Çizelge 2.6'da batık membran sisteminin diğer sistemlere göre avantaj ve dezavantajları verilmiştir [Wiesmann et al., 2007].

Çizelge 2.6. Filtrasyon sistemlerinin avantaj ve dezavantajları.

Filtrasyon sistemi	Avantaj ve Dezavantajlar
<b>Batık membran</b>	<p>Yalancı denge durumu</p> <p>Yüksek konsantrasyondaki askıda katı maddelerin filtrasyonunda kullanılabilir</p> <p>Düşük enerji ihtiyacı (0.3-0.7 kWh m<sup>-3</sup>)</p> <p>Düşük akı değerleri (10-30 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)</p> <p>Biyokütle için düşük stresli filtrasyon sağlar</p> <p>Yüksek yatırım, düşük işletme maliyeti</p> <p>Hava ile geri yıkama sağlanabilir</p> <p>Kısa filtrasyon aralıkları sağlar</p> <p>Periyodik olarak yıkama sistemine uygun</p>
Klasik filtrasyon	<p>Dengede olmayan işletme</p> <p>Düşük konsantrasyondaki askıda katı maddelerin filtrasyonunda kullanılabilir</p> <p>Düşük enerji ihtiyacı (0.1-0.5 kWh m<sup>-3</sup>)</p> <p>Kolay membran tıkanması</p> <p>Uzun filtrasyon aralıkları</p> <p>Periyodik olarak yıkama sistemine uygun</p>
<b>Çapraz akış filtrasyon</b>	<p>Eğer membran yüzeyinde geri dönüşümlü jel tabakası var ise denge durumunda çalıştırılabilir</p> <p>Yüksek askıda katı maddelerin filtrasyonunda kullanılabilir</p> <p>Yüksek enerji ihtiyacı (2.5-6.0 kWh m<sup>-3</sup>)</p> <p>Yüksek akı değerleri (<math>\geq 100</math> L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)</p> <p>Biyokütle için yüksek stresli filtrasyon</p> <p>Düşük yatırım, yüksek işletme maliyeti</p> <p>Periyodik olarak yıkama sistemine uygun</p>

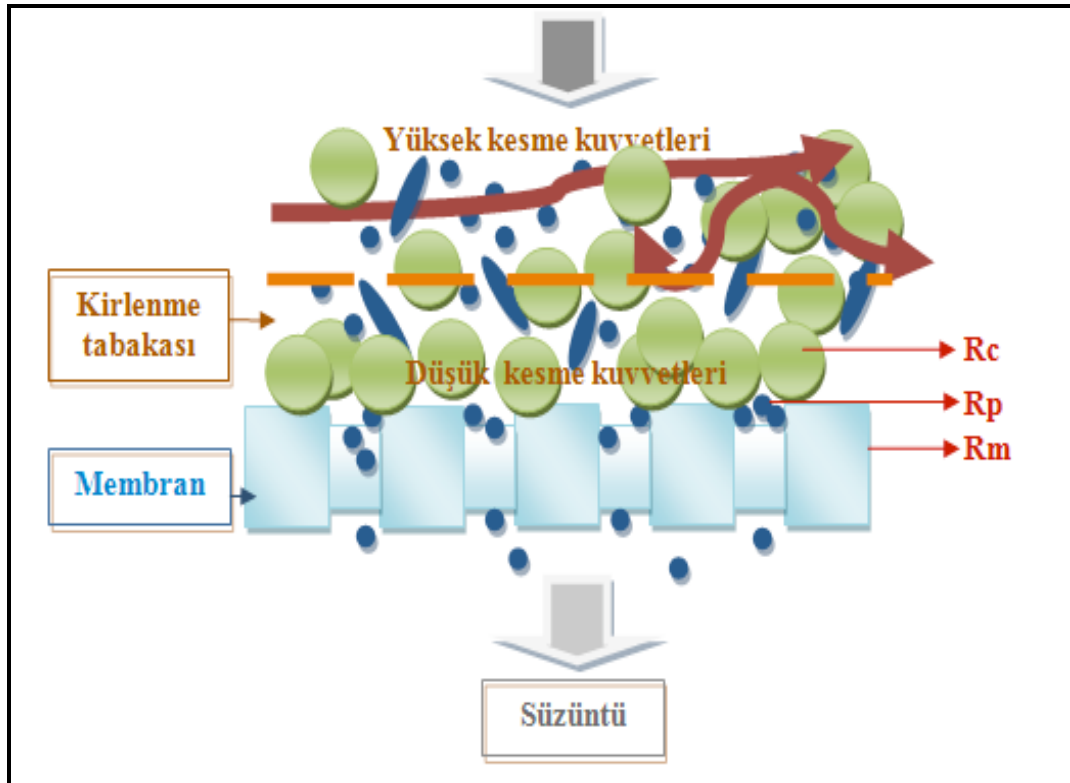
## 2.5. Membran Biyoreaktörlerde Kirlenme Problemi ve Kontrol Yöntemleri

### 2.5.1. Kirlenme mekanizması

Biyokirlenme, biyolojik materyalin kontrolsüz bir şekilde membran yüzeyinde birikmesi ve sistem performansını düşürmesidir. Membran yüzeyinde biyolojik tabakanın oluşumu, mikroorganizmaların (bakteri, mantar vb.) katı-sıvı, sıvı-sıvı ve gaz-sıvı ara yüzeylerinde membran ile olan etkileşimlerine göre gerçekleşir. Mikroorganizmaların membrana doğru taşınımı, pasif difüzyon (mikroorganizmaların Brownian hareketlerinden kaynaklanan), ağırlıkla çökme veya sıvının konveksiyonu ile gerçekleşir. Membran yüzeyindeki biyofilm, ölü ve canlı mikroorganizmaların ve onların hücre dışı polimerik ürünlerinin (polisakkarit, protein, yağ vb.) tabaka olarak birleşmesiyle oluşur. Hücrelerin temiz membrana ilk bağlanmalarından sonra üretilen yapışkan hücre dışı polimerik maddeler (EPS) zamanla bu tabakaya diğer hücrelerin birikmesini de artırır. Bu polimerler, membran yüzeyinde viskoz ve sulu jel tabakası oluştururlar. Yüksek negatif yük yoğunluğuna sahip olan bu polimerik maddeler asidik heteropolisakkaritler içerirler. EPS, antimikrobiyal ajanların (klor ve diğer mikrositler) hücre içine girişlerini yavaşlatan bariyer görevi yaptığı için, biyofilmdeki mikroorganizmaların hücre sel canlılığını ve dayanıklılığını arttırmaları. Bunun yanında, membran yüzeyindeki hidrodinamik kuvvetlerin biyofilm üzerinde yarattığı kesme yüzeylerinde hücrelerin stabilitesini artırır [Ridgway and Flemming, 1996].

Şekil 2.4’de şematik olarak gösterilmiş olan biyokirlenme problemini çözmek için, ilk olarak bu mekanizmanın tam olarak nasıl gerçekleştiğini anlamak gerekir. Bir membran prosesinde, zamanla akıdaki azalma veya basınçtaki artma kirlenmenin meydana geldiğinin bir göstergesidir. Kirlenmenin adımları şu şekilde belirtilmiştir;

- 1) **Adsorbsiyon;** Membran ile çözünen yada partiküler madde arasındaki spesifik etkileşimler nedeniyle gerçekleşir. Partiküller, membran yüzeyinde tabaka oluştururlar ve hidrolik direnci artırır. Eğer adsorbsiyon konsantrasyona bağlı gerçekleşiyorsa konsantrasyon polarizasyonu, adsorbsiyonun miktarını artırır.
- 2) **Gözenek tıkanması;** Filtrasyonun başında, partiküller uygulanan sürücü kuvvet ile temiz membranın gözeneklerine doğru hızlı bir şekilde hareket ederler. Membran gözeneklerinin tamamen ya da kısmen kapanması nedeniyle akı azalır.
- 3) **Birikme;** Filtrasyon ilerledikçe, partiküllerin birikmesi membran yüzeyinde devamlı gelişen bir tabaka yaratır. Bu mekanizma genellikle kek direnci olarak ifade edilir.
- 4) **Jel oluşumu;** Membran yüzeyindeki birikim devam ettikçe, konsantrasyon polarizasyonu, membran yüzeyinde jel oluşumuna sebep olur [Field, 2010].



Şekil.2.4. Membran kirlenmesinin şematik gösterimi.

Yukarıda adımları belirtilmiş olan kirlenme, partiküller ile membran yüzeyi arasındaki etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Bu etkileşimlere sebep olan kuvvetler ise şu şekildedir [Aimar et al., 1994];

- Van Der Waals Etkileşimleri,
- Coulomb Kuvvetleri,
- Sterik Etkiler,
- Hidrofobik ve yapısal etkileşimler.

*Van Der Waals etkileşimleri;* Partiküller arasındaki dipol-dipol etkileşimler (London ve Debye kuvvetleri) ile membran yüzeyi arasındaki çekim kuvvetini belirler.

*Coulomb kuvvetleri;* Aynı veya zıt yüklü iyonlar arasındaki elektrostatik kuvvetleri tanımlar. Yüklü iyonlar yüklü bir yüzeye temas ettiğinde iyonlar yüzeye doğru hareket eder ve bir tabaka oluşturur. Bu difüzyon tabakası da diğer partiküllerin yüzeyde birikmesine sebep olur.

*Sterik etkiler;* Bu etkiye göre, eğer bir yüzey diğerini içine almıyorsa çok kısa bir mesafede çok yüksek bir itme kuvveti oluşur. Bu, membran ve partiküller arasındaki itmeyi ifade eder.

*Hidrofobik ve yapısal etkileşimler;* Diğer üç etkileşimden farklı olarak bu etkileşimi ifade edecek matematiksel bir formül yoktur. Ancak membranların yapısal özellikleri, filtrasyon performansını oldukça fazla etkilemektedir. Özellikle membranların hidrofilik yada hidrofobik olarak yapılması partikül-membran etkileşimini belirlemektedir.

Bu etkileşimler ile gerçekleşen, partikül-membran bağlanmasını daha iyi ifade edebilmek için kirlenmenin sebep olduğu akı azalmasının matematiksel olarak ifade edilmesi gerekir. Partikülsüz bir suyun temiz bir membrandan geçişinde akı, Darcy yasasına göre aşağıdaki gibi hesaplanır [Nath, 2008];

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (2.8)$$

$J$ : Akı ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

$\Delta P$ : Transmembran basıncı (Pa)

$\mu$ : Suyun viskozitesi (Pa.s)

$R_m$ : Temiz membranın hidrolik direnci ( $\text{m}^{-1}$ )

Eğer partiküllü bir çözelti filtre edilirse, süzüntü akısı bu eşitlikteki akıdan daha düşük olacaktır. Akı azalması, partiküllerin membran içinde veya yüzeyinde birikmesi ve direncin artmasının bir sonucudur. Membran kirlenmesi; gözenek tıkanması, konsantrasyon polarizasyonu ve kek oluşumunu içerir. Konsantrasyon polarizasyonu çapraz akış filtrasyonu için önemli iken batık membran sistemleri için ihmal edilebilir etkiye sahiptir. Konsantrasyon polarizasyonu ihmal edilirse, Eşitlik [2.9] aşağıdaki gibi yazılır [Nath, 2008];

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_p + R_c)} \quad (2.9)$$

$R_p$ : Gözenek tıkanmasının sebep olduğu direnç ( $\text{m}^{-1}$ )

$R_c$ : Kek tabakasının sebep olduğu direnç ( $\text{m}^{-1}$ )

Sabit basınçlı sistemlerde, filtrasyonun başındaki ilk akı ( $J_0$ )  $R_m$ 'ye bağlıdır,  $R_c$  ve  $R_p$  değerleri sıfırdır. Filtrasyon ilerledikçe, gözenek tıkanması ve kek oluşumuna bağlı olarak  $R_c$  ve  $R_p$  artar ve toplam direnç içerisindeki oranları da değişir. Filtrasyon, membran dirençli sistemden gözenek veya kek dirençli sisteme geçer. Her bir sistem için akıların zamanla değişimi aşağıdaki gibi hesaplanır [Nath, 2008];

- Membran dirençli sistemde;

$$J = \frac{J_0}{1 + J_0 K_m t} \quad (2.10)$$



- Gözenek tıkanması dirençli sistemde;

$$J = J_0 \exp(-K_p t) \quad (2.11)$$

- Kek dirençli sistemde;

$$J^2 = \frac{J_0^2}{1 + J_0^2 K_c t} \quad (2.12)$$

Eğer bu formüller lineerleştirilirse;

- Membran dirençli sistem için;

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} + \frac{K_m}{t} \quad (2.13)$$

- Gözenek dirençli sistem için;

$$\ln J = -K_p t + \ln J_0 \quad (2.14)$$

- Kek dirençli sistem için;

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0^2} + K_c t \quad (2.15)$$

$K_m$ ,  $K_p$  ve  $K_c$  sistem parametreleridir.

Bu eşitlikler, farklı tipte kirlenmeye maruz kalmış membranların temizleme metotlarının verimlerinin bulunmasında kullanılır. Laboratuardaki deney sistemlerinden, membranın temizleme öncesi ve sonrası toplanan veriler ile çizilen grafiklerin eğimlerinden  $K_m$ ,  $K_p$  ve  $K_c$  değerleri hesaplanır. Bu hesaplamalardan en uygun membran temizleme metodu bulunabilir [Nath, 2008].

## 2.5.2. Membran özelliklerinin kirlenmeye etkisi

Membran özellikleri, partikül-membran arasındaki etkileşimi ve dolayısıyla membranın kirlenme eğilimini belirler. Filtre edilecek bakteri ortamı ile membran temas ettirildiğinde, ilk olarak mikroorganizmalar membran yüzeyine tutunacaktır. Mikroorganizmaların buradaki ilk çoğalmaları su ortamındaki konsantrasyonlarına bağlıdır. Bunun yanında, membran malzemesinin türünde çoğalmanın verimini

etkilediği bulunmuştur. Örneğin, membran materyali ile mikroorganizma türleri arasında yapılan bir çalışmada, bakteri türlerinin hangi membranda en iyi çoğalmaya sahip oldukları araştırılmıştır. Farklı membran materyalleri, bakteri çözeltilerine daldırılmış ve adhezyon kinetikleri ölçülmüştür. Belirli bir filtrasyon süresi sonunda, membran malzemesinin yüzeyindeki biyofilm tabakasının farklı kalınlıklarından örnekler alınmıştır. Bu deneyin sonucunda, membrana yakın olan kısımdaki bakteri türlerinin tek tip olduğu fakat biyofilm tabakasının üstlerine doğru gidildikçe türlerin farklı olduğu bulunmuştur. Bu gözlem, bakterinin ilk bağlanmada hangi membran materyalini daha fazla tercih ettiğiyle ilgilidir. Daha sonraki birikme ilk bağlanan bakterilerin üzerine olacağı ve ikincil membran tabakası denilen tabaka oluşacağı için filtrasyon ilerledikçe membran materyalinin bir önemi kalmayacaktır. Bu sonuçlara göre, uygun membran materyalini seçerek ya da membran yüzeyini bazı materyaller ile kaplayarak, ilk mikrobiyal bağlanma azaltılabilir [Flemming, 2000].

Membranın biyolojik olarak kirlenmesi, membranın yapısal özellikleri ile ilişkilidir. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir [Le-Clech et al., 2006];

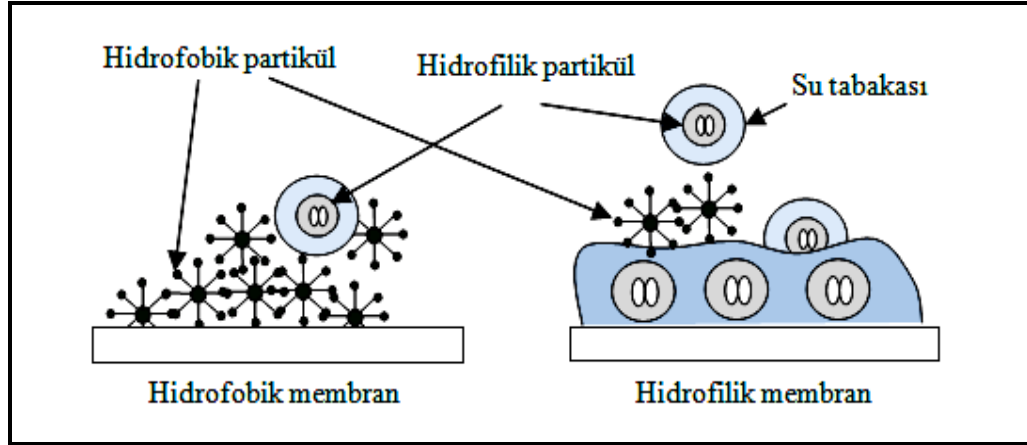
- Gözenek boyutu ve dağılımı,
- Pürüzlülük/Porozite,
- Hidrofobisite,
- Membran malzemesi.

***Gözenek boyutu ve dağılımı:*** Katı-sıvı ayırımında katıların ayırım performansı kullanılan membranın gözenek boyutuna bağlıdır. Genel olarak büyük gözenekli membranlarda kirlenmenin daha fazla olduğu bilinmektedir. Mikrofiltrasyon membranlarında konsantrasyon polarizasyonu ve gözenek kirlenmesi daha fazla gözlemlendiği için, mikrofiltrasyonda kullanılan membranlarda ultrafiltrasyon membranlarına göre kirlenme daha ciddi bir problemdir [Musale and Kulkarni, 1998]. Membranların gözenek boyutu ve dağılımı özellikle membran yüzeyindeki bölgesel akı değerlerini etkiler [Li et al., 1998]. Bunun yanında akı azalma oranları ve filtrasyon sonundaki toplam süzüntü hacimleri de gözenek boyutlarına göre değişir [Nataraj et al., 2008]. Membran gözenek boyutunun seçimi, çalışılacak olan

biyolojik ortamın partikül boyut dağılımına bağlıdır çünkü membranın gözenek boyutu kirlenme dirençlerini (kek veya gözenek dirençli sistemler) belirler.

**Pürüzlülük/porozite;** AFM (atomik kütle mikroskobu) cihazı ile ölçülebilen membranların pürüzlülüğü, partiküllerin tutunabileceği membran yüzeyindeki girinti ve çıkıntıların bir göstergesidir. Pürüzlülüğü yüksek bir membran, partiküllerin tutunabileceği derin (valley) ve yüksek (peak) noktalar içerir. Bu noktalar, bakteri tarafından salgılanan biyolojik materyalin veya bakterinin kendisinin kolayca yapışabileceği bölgelerdir. Dolayısıyla pürüzlülüğü yüksek membranlarda kirliliğin göstergesi olan basınç artışları daha yüksek olmaktadır [Jin et al., 2010]. Pürüzlülük arttıkça yüzeyin serbest enerjisi de artar, bu da moleküllerin yapışmasını artırır [Musale and Kulkarni, 1998]. Membran porozitesi ise özellikle partiküllerin adsorbsiyon mekanizmasını etkiler. Porozitesi yüksek veya gözenek boyutu küçük membranlarda yüzeyde tutunan partikül konsantrasyonu homojen olur. Çünkü yüksek poroziteye sahip membranlarda kütle transferinin etkisi daha düşüktür [Zhang et al., 2010].

**Hidrofobisite;** Membran yüzeyindeki aktif gruplar, membran materyalinin su veya diğer maddelere bağlanma verimlerini etkiler. Bu grupların hidrojen bağı ile suya bağlanma özelliği, membrana hidrofilik özellik kazandırır. Hidrofilik membranlar, hidrofobik membranlara göre daha yüksek su akılarına sahiptir. Genellikle atıksu arıtımında hidrofilik membranlar tercih edilmektedir. Membranların hidrofilik yapısı, membranın ıslanabilirliğini ve partiküllerin membrana bağlanma özelliklerini etkiler. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi hidrofobik partiküller, genellikle membran yüzeyinde kümelenmiş gruplar yaparak birikme eğilimindedirler. Hidrofilik partiküller ise kendilerini çevreleyen bir su tabakasıyla hareket ederler ve genellikle hidrofilik membranların yüzeyinde jel tabakası halinde birikirler [Tansel et. al., 2006]. Membranların hidrofobisitesi genellikle temas açısı cihazı ile ölçülür.



Şekil 2.5. Membranların hidrofofisite özelliklerinin partikül birikimine etkisi.

Filtre edilecek partiküllere göre membran seçimi kirlenme problemi azaltabilir. Örneğin hidrofofik yüzeylere adsorbe olma eğilimine sahip protein için, hidrofilik membranların (selüloz ester, poliamid gibi membranlar) kullanılması kirlenmeyi azaltabilir. Hidrofofik membranlara, bazı metotlar ile hidrofilik özellikler kazandırılması da bu membranlarda kirlenmeyi önleyebilir [Mulder, 1995].

*Membran malzemesi;* Kimyasal ve sıcaklık dayanıklılıklarının yüksek olması nedeniyle, seramik membranlar en yüksek performansa sahip membranlardır. Fakat yüksek maliyeti nedeniyle tercih edilmemektedirler. MBR’larda tercih edilen membranlar genellikle polimerik yapıdadırlar. En çok kullanılan polimerik membran tipleri, polisülfon (PS), polieter (PE), polivinilflorid (PVDF), selüloz asetat (CA) ve polikarbonattır (PC). Membran tipinin filtre edilecek çözeltiliye uygun seçilmesi gerekir. Hangi membranın daha verimli olduğunu bulmak için aynı koşullarda farklı tipte membranlar denenmelidir. Yapılan bir çalışmada, PE ve PVDF membranlar aynı ortamda denenmiş, PVDF membran PE membrana göre daha az kirlenmiştir [Yamato et al., 2006]. PC, PES ve PVDF’nin denendiği bir çalışmada ise PES membranın diğer membranlara göre daha yüksek gözenek kirlenmesine sahip olduğu bulunmuştur [Fang and Shi, 2005]. Görüldüğü gibi seçilecek olan membran tipi, sahip olduğu yüzey özelliklerine göre MBR sistemlerindeki kirlenmede farklı davranışlar göstermektedir.

### 2.5.3. **Biyokütle özelliklerinin membran kirlenmesine etkisi**

Membranların biyolojik kirlenmesini etkileyen en önemli faktör biyokütlenin özellikleridir. Biyokütle konsantrasyonu (MLSS), flok boyutu, çamurun viskozitesi, göreceli hidrofobisitesi ve biyolojik materyalin konsantrasyonu (SMP, EPS) en önemli biyolojik parametrelerdir.

**Biyokütle konsantrasyonu;** MLSS'in membran kirlenmesine olan etkilerinin incelendiği bazı çalışmalarda yüksek biyokütle konsantrasyonunun membran kirlenmesini arttırdığı, bazılarında ise azalttığı bulunmuştur. Bir çalışmada,  $MLSS < 6000$  mg/L olduğunda kirlenmenin azaldığı,  $MLSS > 15000$  mg/L olduğunda kirlenmenin arttığı, aradaki değerlerde değişmediği gözlemlenmiştir [Ramesh et al., 2006]. MLSS konsantrasyonundaki artış özellikle çamurun viskozitesini artırır. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada, MLSS konsantrasyonu 4200 mg/L'den 25000 mg/L'ye çıkarıldığında viskozite değeri 1.30 mPa.s'den 6.0 mPa.s'ye çıkmıştır [Wu et al., 2007]. MLSS konsantrasyonunun kirlenme üzerine etkilerinin araştırıldığı bir MBR sisteminde MLSS konsantrasyonunun artmasıyla kirlenmenin arttığı bulunmuştur [Sombatsompop et al., 2006].

**Flok boyutu;** Çamurun flok boyutunun küçük olması, çamurun çökmesini engeller, dolayısıyla çamurun çökemeyen kısmında bulanıklık ve kolloidlerin konsantrasyonu artar. Bu da kirlenme üzerine çok büyük etkiye sahiptir. Özellikle bu kısımdaki kolloidler membranın gözeneklerini tıkayarak gözenek kirlenmesine sebep olurlar. Aktif çamurun askıda katı, kolloid ve çözünen maddeler olarak ayrılıp filtre edildiği bir çalışmada askıda katıların kirlenmeye olan etkisinin %24, kolloidlerin %50 ve çözünmüş kısmının %26 olduğu bulunmuştur [Meng and Yang, 2007].

**Viskozite ve göreceli hidrofobisite;** Bu özelliklerin dolaylı yoldan membran kirlenmesini etkiledikleri bildirilmiştir. Yüksek göreceli hidrofobisiteye sahip çamur floklarının membran yüzeyinde daha çabuk biriktikleri belirtilmiştir. Özellikle EPS'nin protein kısmında bulunan hidrofobik aminoasitlerin flokların hidrofobisitesini arttırdığı, karbonhidrat kısmının ise bir etkisinin olmadığı bulunmuştur [Meng et al., 2006].

*SMP ve EPS konsantrasyonu*; SMP ve EPS'nin membran kirlenmesinde en önemli bileşenler olduğu bilinmektedir. Bu polimerik materyaller sadece bakterilerin metabolik faaliyetleri sırasında değil, ölümleri sırasında da ortama karışırlar. Ölü bakteri ile canlı bakterinin EPS üretimlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, ölü hücrelerinde EPS salgıladıkları görülmüştür. EPS yapışkan bir yapıya sahip olduğu için hücreleri bir arada tutar ve membran yüzeyinde oluşan biyofilm yapısının bütünlüğünü korur. Membranın herhangi bir şekilde temizlenmesi sırasında EPS türlerinin bağlanma enerjilerinin koparılması gerekir. Bu enerji zayıf fizikokimyasal bağlardan oluşmaktadır. Bağlanma enerjisi, EPS moleküllerinin sahip olduğu fonksiyonel gruplar arttıkça artar. Bu nedenlerle, membranların temizlemeleri sırasında bu bağların stabilitelerini bozan kimyasalların kullanılmaları gerekir [Hillis, 2000]. Bu kimyasallar kirleticilerin yapılarını değiştirerek birbirleri ve membran yüzeyindeki kirletici tabakayla olan etkileşimlerini azaltırlar [Koyuncu et al., 2008]. EPS ve SMP'nin çamur ortamında ölçümü için, ilk olarak bu maddeleri bakteri ortamından ayırmak gerekir. Bunun için kullanılan standart bir yöntem yoktur. Literatürde kullanılan yöntemler, fiziksel veya kimyasal ekstraksiyon ile bu maddeleri ortamdan ayırarak ölçmeyi içerir. Fiziksel ekstraksiyon yöntemleri; ultrasonikasyon, santrifüj, katyon değiştirici reçine ve ısıtma, kimyasal ekstraksiyon yöntemleri ise alkali ajanlar, EDTA ve aldehit çözeltileri gibi kimyasallarla ekstraksiyondur [Comte et al., 2006]. Çözünmüş EPS ya da diğer bir deyişle SMP, çamurun fiziksel ekstraksiyonu sonucunda ayrılan ilk kısmını oluşturur. Bağlı EPS ise bu ekstraksiyondan sonra, bakteri ortamından ek işlemler uygulanarak ayrılır [Comte and Guibaud, 2006]. EPS protein, karbonhidrat, nükleik asit, yağ ve humik asitler içerir. Fakat bunların arasında, en önemli olanları protein ve karbonhidrattır [Jang et al., 2007]. Bu nedenle, çamurun fiziksel-kimyasal ekstraksiyonundan sonra protein ve karbonhidrat ölçümleri yapılarak bu türlerin analizi gerçekleştirilir. Protein analizi için genelde, Lowry ve Bradford metotları, karbonhidrat analizi için ise Dubois yöntemi kullanılmaktadır. Aktif çamurdaki EPS konsantrasyonları, atıksuyun türüne ve organik yükleme oranına, çamur yaşı, MLSS konsantrasyonu, reaktördeki mekanik stres ve F/M oranına göre değişim göstermektedir [Zhang et al., 2008].

#### 2.5.4. İşletme şartlarının membran kirlenmesine etkisi

Membran biyoreaktörlerde, işletme şartları biyolojik flokların yapısını ve yüzey özelliklerini değiştirdiği için dolaylı yoldan membran kirlenmesine etki etmektedir. Genellikle optimize edilmesi gereken işletme parametreleri membran filtrasyon basıncı, havalandırma, çapraz akış hızı, çamur yaşı, hidrolik bekletme süresi, sıcaklık, pH ve iyonik şiddet gibi parametrelerdir. Bu ayarlamaların dışında, batık membran sisteminde, son zamanlarda oldukça çalışma alanı bulmuş olan membran kirlenmesini azaltan filtrasyona yardımcı maddelerin (polimer veya inorganik maddelerin (koagülant/flokulant)) tipinin ve konsantrasyonunun belirlenmesi de işletme şartları arasında sayılmaktadır.

*Filtrasyon basıncı;* Çözünen maddelerin membranda tutunmaları uygulanan basınçtan etkilenmektedir. Yüksek basınçlarda partiküllerin membran yüzeyinde tutunmaları yüksektir, düşük basınçlarda ise tutunma azalır böylece filtrasyonun seçiciliği azalır [Prasad, 2010]. MBR sistemleri, basınç ya da akı sabit tutularak çalıştırılır. Sabit basınçlı sistemlerde, filtrasyonun başında akı azalması çok hızlı olmaktadır. Bu sistemlerde, filtrasyonun başında özellikle SMP gibi küçük boyutlu partiküllerin, membranı geri dönüşsüz olarak kirlettiği bildirilmektedir. Sabit akıli sistemlerde ise, filtrasyon süresince basınç değerleri izlenir. Basınçtaki hızlı artış kirlenmenin gerçekleştiğini gösterir [Le-Clech et al., 2006]. Bu nedenle bu sistemler genellikle kritik akı değerinin altında işletilirler [Zhang, 2006]. Kritik akı, membran basıncının yükseldiği değer altındaki akı değeri veya zamanla akı azalmasının meydana gelmediği akı değeri olarak bilinmektedir [Wang et al., 2006, Chen et al., 1997]. Kritik akı değerinin altında işletilen sistemler en uygun çalışma şekli olarak bilinmektedir. Bu değerlerde membran yüzeyinde kek tabakasından ziyade jel tabakasının oluştuğu bildirilmiştir Bu nedenle membranlar kritik akının altında uzun süre temizleme yapılmadan çalıştırılabilmektedir [Wang and Wu, 2009].

*Havalandırma;* Batık membran sistemlerinde membran yüzeyine uygulanan havalandırmanın üç önemli görevi vardır; biyokütleyle oksijen sağlamak, ortamdaki aktif çamuru homojen olarak karıştırmak ve membran yüzeyinde kirlenmeye sebep olan tabakayı sıyırmak [Le-Clech et al., 2006]. Özellikle batık membran

sistemlerinde havalandırma hızının optimum değere ayarlanması önemlidir. Çünkü eğer havalandırma yüzeyde biriken keki temizlemek için yeterli değilse, kek tabakası kalınlaşacak ve sistemdeki akı kayıpları çok yüksek olacaktır. Buna karşın havalandırma hızı yüksek ise kek tabakası tamamen sıyrılıyorsa, bu seferde membranı SMP ve küçük partiküllerden koruyan kek tabakasının oluşumu engellenecek ve yine akı kayıpları gözlenecektir. İdeal olarak, havalandırma yüksek akı değerlerinin sağlandığı kek kalınlığına göre belirlenmelidir [Wang and Wu, 2009].

**Çapraz akış hızı;** Yan akışlı batık membran ve çapraz akış filtrasyon sistemlerinde önemli bir işletme parametresi olan çapraz akış hızının artırılması kirlenmeyi azaltır. Fakat hızı arttırmak için kullanılan sirkülasyon pompaları hücrelerin parçalanmasına ve biyolojik materyalin reaktör içine dağılmasına sebep olurlar. Bu nedenle bu değerlerinde optimize edilmesi gerekir. Bir çalışmada, ultrafiltrasyon (MWCO 30 kDa) ve mikrofiltrasyonda (gözenek boyutu 0.3 µm) yüzeydeki kirlenmeyi önlemek için 2-3 m/s değerinde çapraz akış hızının yeterli olduğu bulunmuştur [Le-Clech et al., 2006].

**Çamur yaşı ve hidrolik bekletme süresi;** MBR'larda çamur yaşı ve hidrolik bekletme süreleri, reaktördeki biyolojik özellikleri değiştirdiği için önemli işletme parametreleridir. Çamur yaşı mikroorganizmaların büyüme hızlarını, hidrolik bekletme süresi ise kirleticilerin arıtma hızlarını belirler. Batık membran sistemlerinde çamur yaşı genelde klasik sistemlere göre çok yüksek olmaktadır. Buna bağlı olarak biyokütle konsantrasyonları 10.000-60.000 mg/L'ye kadar çıkmaktadır. Bu yüksek değerler arıtım verimlerini olumlu yönde etkiler (çıkış  $KO_2 \leq 50$  mg/L, azot arıtımı  $\geq 80\%$ , fosfat  $< 0.5$  mg/L) [Ramesh et al., 2006]. Çamur yaşının membran kirlenmesine olan etkisi tam olarak açıklanamadığından MBR'larda optimum çamur yaşı değeri kullanılan sistemlere göre değişiklik göstermektedir. Bazı çalışmalarda, yüksek çamur yaşlarında EPS üretiminin azaldığı dolayısıyla kirlenmenin azaldığı bulunmuşken, diğer çalışmalarda kirlenmeye ters oranda etki ettiği veya hiç etkisinin olmadığı belirtilmiştir [Masse et al., 2006]. Çamur yaşı ve hidrolik bekletme süresinin etkisinin incelendiği bir çalışmada [Jang et al., 2006], çamur yaşının kirlenme üzerinde daha çok etkiye sahip olduğu



bulunmuştur. Düşük (23 gün) ve yüksek (40 gün) çamur yaşında işletilen bir MBR sisteminde, düşük çamur yaşında EPS konsantrasyonlarının yüksek olduğu dolayısıyla çamurun filtre edilebilirliğinin, çökme ve susuzlaştırma özelliklerinin kötü olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında, membran yüzeyinde yapılan analizlerde düşük çamur yaşında, yüzeyde biriken EPS'nin protein kısmının yüksek çamur yaşındakinden 40 kat fazla, karbonhidrat kısmında 5 kat fazla olduğunu görmüşlerdir [Al-Halbouni et al., 2008]. Yine çamur yaşının etkilerinin incelendiği bir çalışmada da, yüksek çamur yaşında (16 ve 20 gün) düşük çamur yaşına göre (4 ve 9 gün) çamur yüzeyinin daha hidrofobik ve daha az negatif yüklü olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, çamur yaşının arttırılmasıyla EPS'nin protein/karbonhidrat oranı da artış göstermiştir [Liao, 2001].

**Sıcaklık, pH ve iyonik şiddet;** Ortamın pH'sı ve iyonik şiddeti, mikrobiyal hücrelerin yüzey yüklerini değiştirdiği için önemlidir. Partiküllerin çöktüğü izoelektrik noktada, partiküllerin membran yüzeyinde kalmaları ve dolayısıyla kirlenme artabilir [Prasad, 2010]. Sıcaklık ise biyolojik süspansiyonun viskozitesini değiştirdiği için dolaylı yoldan kirlenmeye etki eder.

**Filtrasyona yardımcı maddeler;** Bu maddeler genellikle katyonik polimer, FeCl<sub>3</sub>, alum, nişasta gibi kimyasal maddelerdir. Ortama eklendiklerinde, bakterilerin flok boyutunu arttırarak veya bakteriyel ürünlerin ortamdan uzaklaşmasını sağlayarak filtrasyon performansını arttırmaları. 7 farklı maddenin filtrasyon performansına etkilerinin incelendiği bir çalışmada, 3 farklı katyonik polimer, chitosan, nişasta, FeCl<sub>3</sub> ve PACI tuzları kullanılmıştır. Bu maddelerin çözeltideki özellikle SMP'yi giderdikleri ve filtrasyondaki akı düşmelerini azalttığı yani filtrasyon performanslarını arttırdıkları bulunmuştur. Bütün maddeler değerlendirildiklerinde, özellikle katyonik polimerlerin kirlenme kontrolünde en yüksek katkıya sahip olduğu belirtilmiştir [Koseoglu, 2008]. Yüklü polimerler çamur ortamına ilave edildiğinde, ilk olarak polimer ile partiküller arasında adsorbsiyon mekanizması ile köprü oluşur, daha sonra yük nötralizasyonu gerçekleşir ve son olarakta flok oluşumu başlar. Polimerler uzun zincirli yapıya sahip oldukları için polimer-partikül yüzeyi adsorbsiyonu çoğunlukla geri dönüşümsüzdür. Genellikle adsorbsiyon; elektrostatik kuvvetler (zıt yüklerin çekimi, örneğin katyonik

polielektrolit negatif yüzeylere yapışır), hidrojen bağı (poliakrilamid ve polietilen oksit gibi bazı polimerler yüzeylerdeki hidrojen bağının olduğu bölgelere adsorbe olurlar, örneğin silika oksitlerin yüzeyindeki hidroksil gruplar ile poliakrilamidin amid grupları hidrojen bağı ile bağlanır) ve iyonik bağlanma ile gerçekleşir [Bolto and Gregory, 2007].

Alüminyum sülfat ( $Al_2(SO_4)_3$ ), polimerik demir sülfat (PFS) ve chitosanın denendiği başka bir çalışmada, membranların kirlenme hızları, kontrol reaktörüne göre şu şekilde sıralanmıştır; Kontrol MBR>( $Al_2(SO_4)_3$  eklenmiş MBR>chitosan eklenmiş MBR>(PFS) eklenmiş MBR. Membran yüzeyinde yapılan analizlerde, filtrasyona yardımcı kimyasalların eklendiği MBR'larda membran yüzeylerinde daha düşük protein ve karbonhidrat konsantrasyonları ölçülmüştür. Bu kimyasalların membranlarda gözenek kirlenmesini de önemli oranda azalttığı belirtilmiştir [Ji et al., 2008]. Başka bir çalışmada, katyonik polimerin MBR'da filtrasyon performansına olan etkisi araştırılmıştır. Katyonik polimer, aktif çamurun flok oluşturma özelliğini arttırmış ve membran yüzeyinde daha gözenekli biyofilm tabakasına sebep olmuştur. Dolayısıyla, filtrasyon performansını arttırmıştır. Bu kimyasalın eklenmesiyle çamurun floklaşması sırasında, süspansiyonda çözünür halde bulunan COD ve SMP'lerin floklara yapışması artmıştır. Buna bağlı olarak bağlı EPS'nin konsantrasyonu da artmıştır [Lee, 2007]. Yine katyonik polimerik maddenin membran kirlenmesine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, katyonik polimerin kullanıldığı MBR'da membran yüzeyindeki biyofilm tabakası kontrol MBR'dakinden daha kalın olmasına rağmen, membran kirlenmesi daha düşük olmuştur. Çünkü katyonik polimerin kullanıldığı sistemde biyofilm tabakasındaki kekin porozitesi daha yüksek çıkmıştır. Yine katyonik polimerin kullanıldığı MBR'da, SMP konsantrasyonu diğer sisteme göre daha düşük fakat EPS konsantrasyonu daha yüksek olmuştur [Hwang, 2007].

## 2.6. Jet Loop Membran Biyoreaktör Sistemleri (JLMBR)

Bir reaktörün optimum dizaynı, akışkanın reaktörün içindeki hareketine göre yapılır. Bazı reaktörler iki fazlı sistemler olarak tasarlanırlar. Sıvı ve gaz fazın birlikte hareket ettiği reaktörlerden bir tanesi jet loop reaktörlerdir (JLR) [Angst et al., 2001]. Jet loop reaktörler uzun yıllardır kimya endüstrisinde kullanılan, yüksek karışım ve kütle transfer verimlerine sahip kompakt reaktörlerdir. Bu reaktörler hidrolik sürücülü sistemlerdir. Reaktöre enerji girişi pompalar tarafından sağlanır. JLR sistemlerinde sıvı çevrimi ve gaz dağılımı jet akışı ile gerçekleşir. Gaz akışı, sıvı içerisinde yüksek türbülansla hareket eder böylece çok iyi karışım elde edilmiş olur [Geus and Van Dillen, 2001]. Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiş olan jet loop reaktör, iç içe geçmiş iki silindirik borudan oluşmaktadır. İç kısımda yer alan silindirik boru emme borusu (draft tüp) olarak, dış boru ise reaktör olarak isimlendirilir. Emme borusu, reaktör gövdesinin tam ortasına monte edilir. Alt tabandan ve üst kapaktan belli bir mesafede bulunur. Sıvı ve gaz, iç içe geçmiş bir jet nozzle (püskürtme başlığı) ile emme borusuna püskürtülür. Sistemde sıvı geri çevrimini sağlamak için, sıvıyı ara bir tanka oradan da tekrar reaktöre sirküle eden yüksek hızlı bir pompa kullanılır.

Jet başlığı, sıvı ve gazın birleşerek reaktörün içine girdiği ve ilk dağılımın gerçekleştiği parçadır. Sisteme aktarılan enerji miktarı bu parçanın ucundaki sıvı hızının kinetik enerjisinden ölçülür ve aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir;

$$E = Q_L \cdot \Delta P = Q_L \left( \rho \cdot \frac{v^2}{2} \right) \quad (2.16)$$

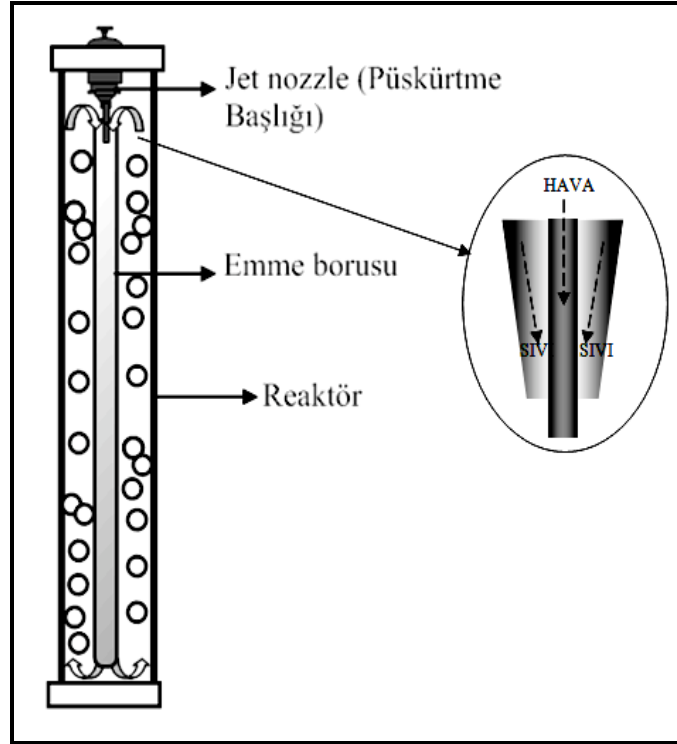
$E$ : Kinetik enerji (W)

$Q_L$ : Sıvı debisi (m<sup>3</sup>/sn)

$P$ : Basınç (atm)

$\rho$ : Sıvı yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

$v$ : Sıvı hızı (m/sn)



Şekil 2.6. Jet loop reaktörün genel şekli.

Buradaki sıvı hızı ( $v$ ), jet başlık yapısındaki sıvı ve gazın verildiği iç içe geçmiş kısımların kesit alanlarına göre değişir. Aynı sıvı ve gaz debilerinde, farklı kesit alanları kullanılarak sisteme aktarılan enerji değişir, bu kütle transferi üzerinde önemli etkilere sahiptir [Yıldız, 1999]. Jet başlık emme borusunun belli bir mesafe içindedir. Pompa ile sisteme gönderilen sıvı ve sisteme giren gaz, jet başlıktan emme borusunun içine püskürtülür. Emme borusuna hızlıca giren karışım tabana çarpar ve buradan emme borusu ve reaktör arasında kalan boşluktan yukarıya doğru hareket eder. Üst kısımlara gelmiş olan sıvı-gaz karışımının bir kısmı tekrar emme borusunun içine girer. Bir kısmı da ara tanka sirküle edilir. Bu şekilde sıvı-gaz karışımının reaktör içerisindeki kalma süreleri artar. Jet loop reaktörlerde gazın sıvı içerisindeki dağılımları çok yüksektir. Bu da özellikle aerobik arıtımda, bakterilerin oksijeni kullanma verimlerini artırır. Jet loop biyoreaktörlerin biyolojik arıtımda kullanılmaları gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yüksek türbülanslı karışım ile reaktöre sağlanan yüksek oksijen transferi bakterilerin gelişmesi için ideal şartlar sağlar, bu nedenle bu reaktörlerde organik bileşiklerin arıtım verimleri de klasik sistemlere göre daha yüksektir [Caldentey and Barz, 2005]. Literatürde jet loop biyoreaktörde arıtımı yapılmış olan atıksular şu şekildedir; şarap [Petruccioli et al., 2002] ve zeytinyağı [Eusebio et al., 2007] endüstri atıksuları, peyniraltı suyu [Farizoğlu ve Keskinler, 2006] ve sızıntı suyu [İnce ve ark., 2007]’dur.

Jet loop biyoreaktörlerin en büyük dezavantajı çamurun çökme özelliklerinin kötü olmasıdır. Karışım sıvısının maruz kaldığı yüksek sıvı hızı, kesme kuvvetlerinin büyük olması ve yüksek F/M oranı çamurun flok oluşumunu engeller. Bu dezavantajı gidermek için jet loop reaktörler bir membran ünitesi ile birleştirilerek kullanılmaktadır. Bu reaktörler jet loop membran biyoreaktörler (JLMBR) olarak adlandırılmakta ve iki sınıfa ayrılmaktadır. Biri batık (submerged), diğeri dışarı akışlı (external side-stream) jet loop membran biyoreaktörlerdir [Park and Lee, 2005]. Jet loop biyoreaktörler gibi yüksek performanslı sistemlerde membran ayırım tekniklerinin kullanılması arıtım performansını oldukça fazla arttırmaktadır. Membranın kullanılması yüksek bakteri konsantrasyonunda çalışmaya imkan sağlar ve klasik çöktürme sistemiyle ayrılamayan arıtılmış sudaki biyokütle konsantrasyonu membranla ayrılmış olur.

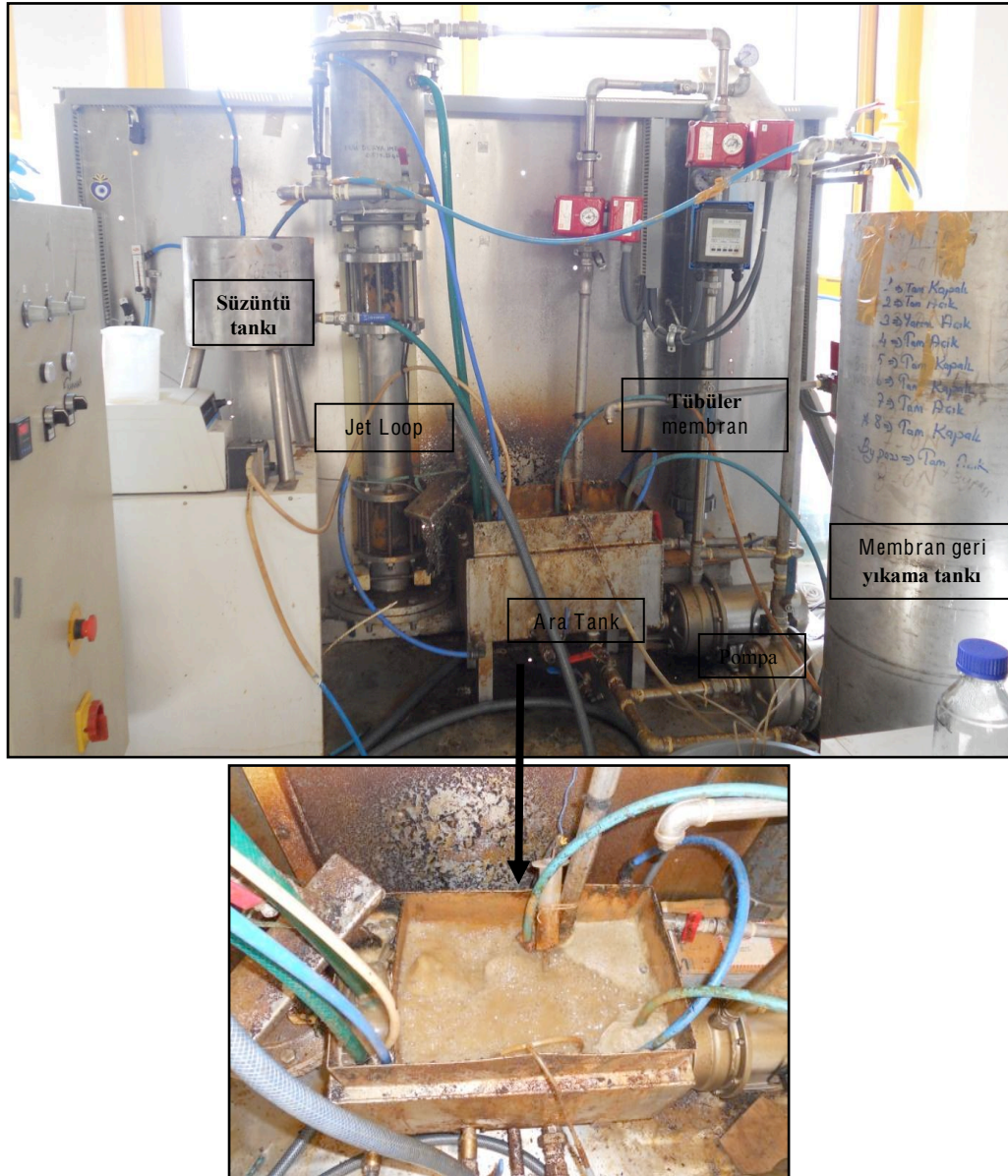
## 3. MATERYAL ve METOD

### 3.1. Jet Loop Membran Biyoreaktörü (JLMBR)

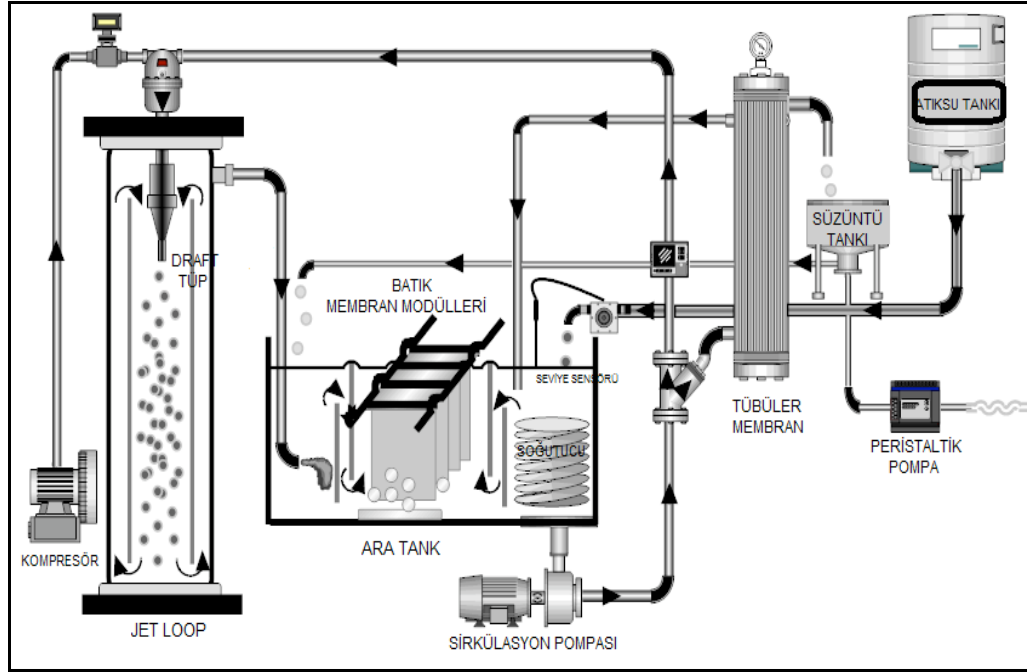
Fotoğraf 3.1 ve Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiş olan JLMBR sistemi üç ana bölümden oluşmaktadır; jet loop, ara tank ve tübüler membran modülü. Jet loop reaktörü draft tüp (emme borusu) ve jet nozzle (püskürtme başlığı) kısımlarını içermektedir. Draft tüpün yüksekliği 90 cm, iç çapı ise 5 cm’dir. Nozzle iç içe geçmiş iki parçadan oluşmaktadır. Sıvının püskürtüldüğü dış kısmın çapı 1.3 cm, havanın sıvının içine dağıldığı iç kısmın çapı ise 0.5 cm’dir. Deneyler sırasında bakteri hücrelerinin çok fazla zarar görmemesi için, JLMBR’nin geri devir debisi 30-32 L/dak’ya ayarlanmıştır. Sisteme hava kompresör ile verilmiştir. Draft tüpün içinde bulunduğu, jet loop reaktörün yüksekliği 109.5 cm ve çapı da 9 cm’dir. Sistemin reaktör gövdesi ve ara besleme tankı paslanmaz çelikten yaptırılmıştır. Dikdörtgen şeklinde olan ara tankın boyutları ise şöyledir; 48 cm×30 cm×30 cm (uzunluk×genişlik×yükseklik). Batık membran deneyleri sırasında membran modüllerinin sistemin hidrodinamik şartlarından etkilenmemesi için ara tankın içi dikdörtgen levhalarla üç bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm pompanın çamuru çekmesi için, ikinci bölüm batık membran modüllerinin daldırılması için, üçüncü bölüm ise jet looptan sirküle olan karışım sıvısının ara tanka boşaltılması için kullanılmıştır.

JLMBR sisteminde hidrolik bekletme süresini ve MLSS konsantrasyonunu istenilen değerlerde sabitlemek için yüksek alana sahip membran modülü kullanılmıştır. Kullanılan membran modülünün özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. JLMBR’nin toplam hacmi maksimum 30 L olup, besleme tankındaki seviye sensörü ile çalışma hacmi 25 ile 30 L arasında arzu edildiği gibi ayarlanabilmiştir. Besleme tankından aynı anda hem jet loop’a hem de membran modülüne akışı sağlamak için bir adet santrifüj pompa kullanılmıştır. Sentetik atıksu 200 L’lik bir tankta günlük hazırlanarak, besleme tankına girişi seviye sensörü ile sağlanmıştır. Sistemde hidrolik bekletme süresini 13.8 saatte sabitlemek için tübüler membran çıkışı bir süzüntü tankında toplanmış ve buradan peristaltik pompa ile sabit debiyle atılmıştır. Süzüntünün fazlası besleme tankına geri çevrilmiştir. İlk çalışma günlerinde membran akısı yüksek değerlerde olmakta birlikte zaman içinde membran çıkış akısı azalmıştır. Bu dengenin tespit edilmesi için haftalık periyotlarda membran çıkışı

takip edilmiş, peristaltik pompa buna göre sabit bir değere ayarlanmıştır. Peristaltik pompa ile atılan debi kadar seviye sensöründen atık su girişi olmakta, böylelikle sistem membran çıkışından bağımsız olarak ve sabit hidrolik bekletme süresinde çalışmaktadır. Membran modülünün çıkışı peristaltik pompanın değerinden küçük olduğunda fiziksel (sadece musluk suyu) yıkama ile tübüler membran yıkanmıştır. Membranın kimyasal yıkaması için %0.5'lik NaOCI kullanılmıştır. Sistemde çamur yaşını ayarlamak için ara tanktan günde belirli hacimde çamur atılmıştır.



Fotoğraf 3.1. Deneylerde kullanılan JLMBR sisteminin fotoğrafı ve ara tankın üstten görünümü.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan JLMBR sisteminin şematik gösterimi.

Çizelge 3.1. JLMBR’de kullanılan membran modülünün özellikleri.

Membran marka/model	IMT Microfiltration Tubular Membrane/(4100 MF/SB/0.2)
<b>Membran alanı</b>	3.5 m <sup>2</sup>
Membran materyali/gözenek boyutu	PES/0.2 µm
<b>Maksimum basınç/çalışma basıncı</b>	2.5 bar/0.5-1.0 bar
<b>Maksimum sıcaklık</b>	40 <sup>0</sup> C

## 3.2. Filtrasyon Deneylerinde Kullanılan Sistemler

### 3.2.1. Mikrofiltrasyon membranlarının özellikleri

Filtrasyon deneylerinde kullanılan mikrofiltrasyon membranlar GE-Osmonics firmasından temin edilmiştir. Çizelge 3.2’te kullanılan membranların özellikleri verilmiştir. PES, ME ve SA membranların kalınlıkları birbirlerine benzer iken, PC membranın kalınlığı çok azdır. Temas açısı ölçümünden elde edilen sonuçlara göre, PES, ME ve SA membranlar hidrofilik, PC daha hidrofobik özelliktedir. AFM sonuçlarından elde edilen pürüzlülük değerlerinden ise, PC hariç diğer membranların



pürüzlülüğü yüksek membranlar olduğu görülmektedir. Membranlar batık veya çapraz akış filtrasyon deneylerinden önce distile su ile yıkanmıştır.

Çizelge 3.2. Filtrasyon deneylerinde kullanılan mikrofiltrasyon membranlarının genel özellikleri.

Membran tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Kalınlık <sup>a</sup> ( $\mu\text{m}$ )	Su Akışı <sup>a</sup> ( $\text{mL}/\text{min}/\text{cm}^2$ )	Temas Açısı <sup>b</sup> ( $^\circ$ )	Pürüzlülük <sup>c</sup> (nm)
PES	0.45	110-150	58.2	<5	23.0
	0.22	110-150	33.2	<5	41.9
	0.10	110-150	11.7	<5	41.9
PC	0.40	10	33	50.3	4.9
	0.20	10	10	46.4	2.8
	0.10	6	2.5	68	10.6
ME	0.45	150	51	<5	13.8
	0.22	150	19	<5	54.9
	0.10	150	6.9	<5	61.7
SA	0.45	65-110	54.7	<5	89.1
	0.22	65-110	16.1	<5	138.6

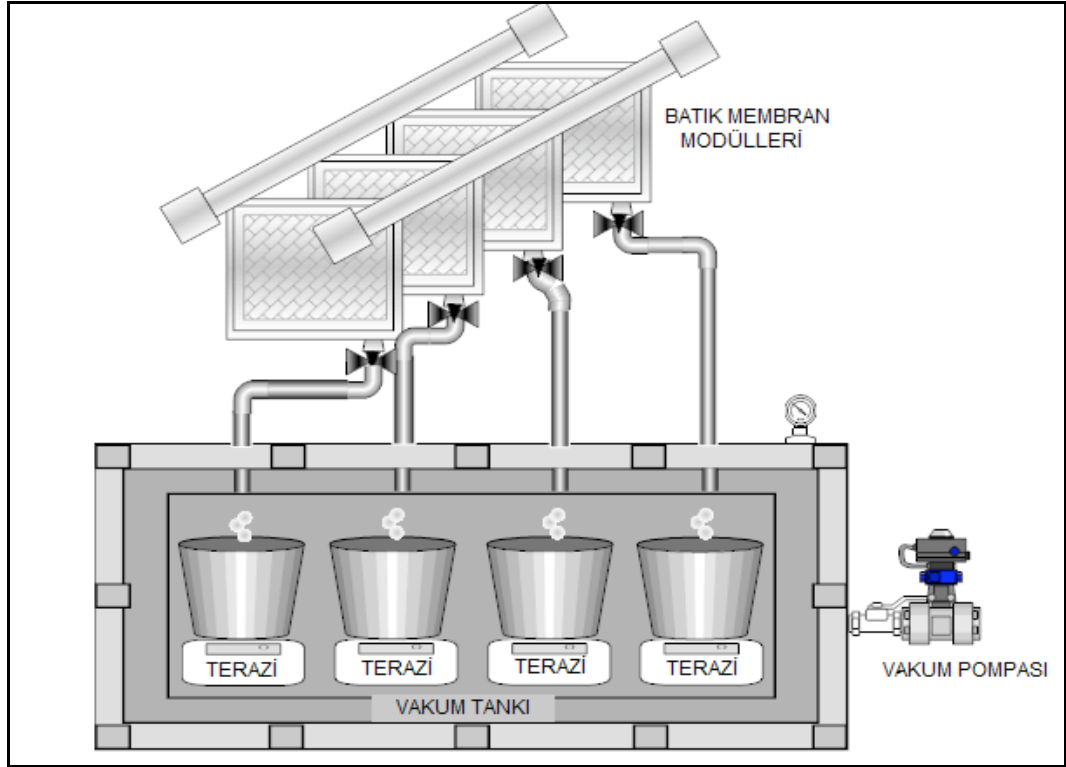
<sup>a</sup> Ürün bilgisinden alınmıştır.

<sup>b</sup> Goniometer cihazı ile ölçülmüştür.

<sup>c</sup> AFM ölçümünden elde edilmiştir.

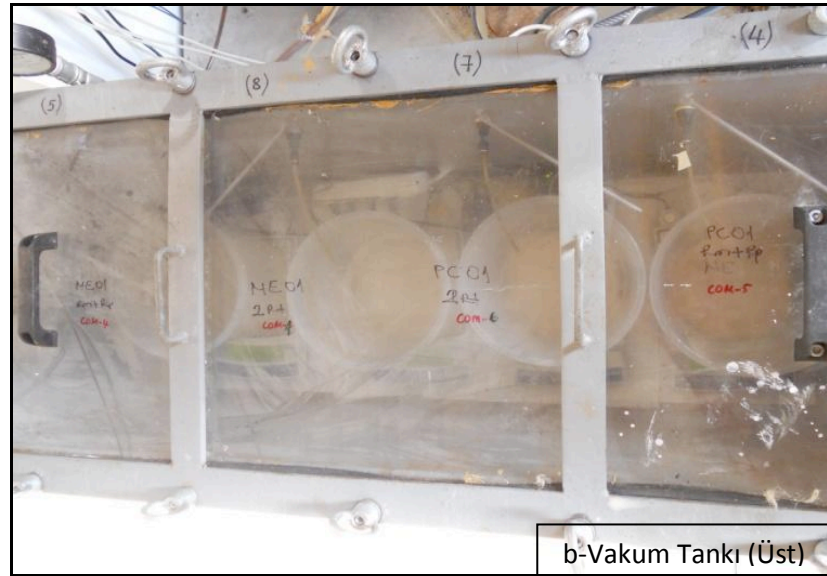
### 3.2.2. Batık membran filtrasyon sistemi

JLMBR'deki batık membran deneyleri laboratuvarımızda tasarlanan filtrasyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiş olan batık membran deney sisteminde, membranların aynı çamur ortamındaki filtrasyon performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu sistemde aynı anda dört adet membranın filtrasyon performansı izlenebilmiştir. Fotoğraf 3.2 (a)'da gösterilmiş olan dört adet batık membran modülü, JLMBR sistemindeki biyolojik parametreler dengeye geldiğinde ara tanka daldırılmıştır. Modüller boyutları  $12\text{ cm}\times 12\text{ cm}\times 2.5\text{ cm}$  (uzunluk×genişlik×yükseklik) olarak pleksiglas malzemesinden yaptırılmıştır. Her bir modülün efektif filtrasyon alanı  $50\text{ cm}^2$ 'dir.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan batık membran filtrasyon deney düzeneği.

Tasarlanan sistem ile aynı anda dört adet membran modülü ara tanka daldırılabilmiş ve elde edilen süzüntüler dört adet terazinin yerleştirildiği bir vakum tankında toplanmıştır. Fotoğraf 3.2 (b)'de gösterilmiş olan vakum tankının basıncı bütün deneyler için 0.16 bar'a (120 mmHg) ayarlanmıştır. Deneyler sabit basınçta gerçekleştirilmiş, akı değişimi izlenmiştir. Aynı anda dört adet membranın akı değerlerini hesaplayabilmek için teraziler PCI kartın yerleştirildiği bilgisayara RS232 bağlantı kabloları ile bağlanmıştır. Fotoğraf 3.3'de gösterildiği gibi datalar WinCT-RsCOM programı ile bilgisayara aktarılmış ve Windows Excel programında da hesaplamalar yapılmıştır.



Fotoğraf 3.2. Deneylerde kullanılan batık membran modülleri ve vakum tankının resimleri.



Fotoğraf 3.3. Batık membran filtrasyon deneyleri çalışma düzeni.

Deneyler sonunda membranların kirlenme profillerinin çıkarılması için akı-zaman grafikleri çıkarılmıştır. Aynı zamanda, denge akıları kullanılarak direnç değerleri hesaplanmıştır. Direnç hesaplamada kullanılan genel formül şu şekildedir;

$$R = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_{ss}} \quad (3.1)$$

$R$ : Filtrasyon direnci ( $m^{-1}$ )

$\Delta P$ : Basınç (Pa)

$\mu$ : Süzüntü viskozitesi (Pa.s)

$J_{ss}$ : Denge durumundaki akı değeri ( $m^3/m^2s$ )

Çamur filtrasyonundan önce membranların direncini bulmak için saf su filtrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde elde edilen denge akı değeri ile aşağıdaki formüle göre  $R_m$  değeri hesaplanmıştır;

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_{safsu}} \quad (3.2)$$

$R_m$ : Membran direnci ( $m^{-1}$ )

$J_{saf\ su}$ : Saf su filtrasyonunun denge akı değeri ( $m^3/m^2s$ )

Çamurun filtrasyonunda bulunan denge akısı kullanılarak toplam direnç ( $R_t$ ) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır;

$$R_t = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_d} \quad (3.3)$$

$R_t$ : Toplam direnç ( $m^{-1}$ )

$J_d$ : Çamurun filtrasyonunda bulunan denge akı değeri ( $m^3/m^2s$ )

Toplam direnç; membran, gözenek ve kek dirençlerinin toplamından oluşmaktadır;

$$R_t = R_m + R_p + R_c \quad (3.4)$$

$R_p$ : Gözenek direnci ( $m^{-1}$ )

$R_c$ : Kek direnci ( $m^{-1}$ )

$R_p$  ve  $R_c$  değerlerinin bulunabilmesi için çamur filtrasyonundan sonra membran yüzeyi fiziksel olarak temizlenmiş ve saf su filtrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu deneyin denge akı değerinden ( $R_m + R_p$ ) değeri hesaplanmıştır;

$$R_m + R_p = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_{m+p}} \quad (3.5)$$

$J_{m+p}$ : Membran yüzeyi fiziksel olarak temizlendikten sonra saf suyun filtrasyonundan elde edilen akı değeri ( $m^3/m^2s$ ).

Bunun ardından  $(R_m+R_p)$  değerinden  $R_m$  değeri çıkarılarak  $R_p$  değeri bulunmuştur.  $R_c$  ise aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır;

$$R_c = R_t - (R_m + R_p) \quad (3.6)$$

Membran, kek ve gözenek dirençlerinin toplam direnç içerisindeki % oranları ise aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır;

$$R_m(\%) = \frac{R_m}{R_t} \times 100 \quad (3.7)$$

$$R_c(\%) = \frac{R_c}{R_t} \times 100 \quad (3.8)$$

$$R_p(\%) = \frac{R_p}{R_t} \times 100 \quad (3.9)$$

DeneySEL olarak direnç değerlerinin tek tek hesaplanmasının yanı sıra, membranların yüzeyindeki kek tabakasının özelliğini veren,  $\alpha$  (spesifik kek direnci) değerleri de aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır;

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \times R_m}{\Delta P} + \frac{\mu \times \alpha \times C_{ss}}{2 \times \Delta P} \times V \quad (3.10)$$

$\alpha$ : spesifik kek direnci (m/kg)

$C_{ss}$ : besleme çözeltisindeki MLSS konsantrasyonu (kg/m<sup>3</sup>)

$V$ : birim filtrasyon alanı başına toplanan süzüntü hacmi (cm<sup>3</sup>)

Bu formüle göre  $t/V$ 'ye karşılık  $V$  grafiği çizilir. Grafiğin eğimi  $(\mu \times \alpha \times \frac{C_{ss}}{2} \times \Delta P)$ 'yi verir. Bu membran kirlenme indeksi (MFI) terimidir. Buradan basınç, viskozite ve MLSS konsantrasyonun değerleri yazılarak  $\alpha$  değeri hesaplanır.

Direnç değerlerinin yanında çamurun filtrasyonunda, membranların performanslarını birbirleri ile karşılaştırmak için akı azalma oranları (FDR) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır;

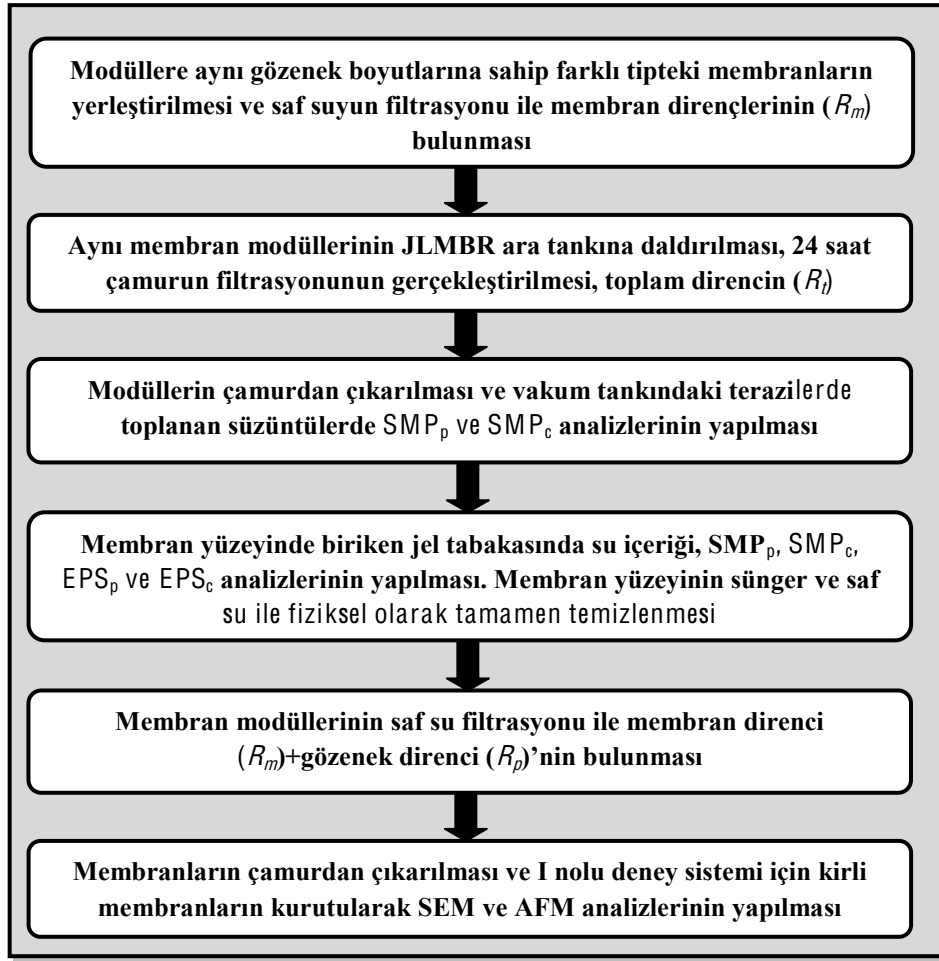
$$FDR(\%) = \left( \frac{J_o - J_d}{J_o} \right) \times 100 \quad (3.11)$$

*FDR*: Akı azalma oranı (%)

$J_o$ : Çamur filtrasyonundaki ilk akı değeri ( $m^3/m^2s$ )

$J_d$ : Çamur filtrasyonundaki denge akı değeri ( $m^3/m^2s$ )

Şekil 3.3'de batık membran deneylerinde izlenen aşamalar gösterilmiştir. Deneyler aynı gözenek boyutuna sahip farklı membran tiplerine göre yapılmıştır. Membranların ilk olarak  $R_m$  değerleri bulunmuştur. Ardından  $R_t$  değerini bulmak için aynı membranlar JLMBR ara tankındaki çamur ortamına daldırılmıştır. 24 saat çamur filtrasyonunun ardından vakum tankında toplanmış olan süzüntüden ve membran yüzeyinde birikmiş olan kek tabakasından örnekler alınmıştır. Daha sonra ( $R_m + R_p$ ) deneyi için membran yüzeyi fiziksel olarak su ve sünger ile temizlenmiş ve membranlar saf suya daldırılmışlardır. Bu deneyin sonunda hesaplanmış olan ( $R_m + R_p$ ) değerinden ilk aşamada hesaplanan  $R_m$  değeri çıkarılarak  $R_p$  değeri bulunmuştur.  $R_c$  değerini bulmak için de çamurun filtrasyonundan hesaplanmış olan  $R_t$  değerinden ( $R_m + R_p$ ) değeri çıkarılmıştır.



Şekil 3.3. Batık membran filtrasyon sisteminin deneysel aşamaları.

### 3.2.3. Çapraz akış filtrasyon (ÇAF) sistemi

Çapraz akış filtrasyon deneyleri için Fotoğraf 3.4’de gösterilmiş olan paslanmaz çelikten yapılmış olan sistem kullanılmıştır. ÇAF sistemi üç ana bölümden oluşmaktadır; besleme tankı, membran modülü ve sirkülasyon pompası. Sistemin toplam hacmi 10 L ve efektif membran alanı 28 cm<sup>2</sup>’dir. Sabit basınçta filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiş, akı değişimleri izlenmiştir. Filtrasyon basınçları bütün deneylerde membran modülünün giriş ve çıkışında bulunan vanalar ile 1 bar olarak ayarlanmıştır. Besleme tankındaki çamur, soğutma suyu sirkülasyonu ile sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Filtrasyon debisi 12 mL/dak olarak ayarlanmıştır. Çapraz akış filtrasyon deneylerinde, bütün membranların aynı koşullarda karşılaştırılabilmesi için filtrasyon aynı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler için akı-zaman grafikleri çizilmiş ve direnç değerleri batık membran filtrasyon deneylerinde kullanılan formüller ile hesaplanmıştır. Toplam direnç denklemine,



batık membran filtrasyon deneylerinden farklı olarak konsantrasyon polarizasyonundan kaynaklanan direnç terimi de eklenmiştir. Buna göre (4.4) eşitliği aşağıdaki gibi olmuştur;

$$R_t = R_m + R_p + R_c + R_{cp} \quad (3.12)$$

$R_{cp}$ : Konsantrasyon polarizasyon direnci ( $m^{-1}$ ).

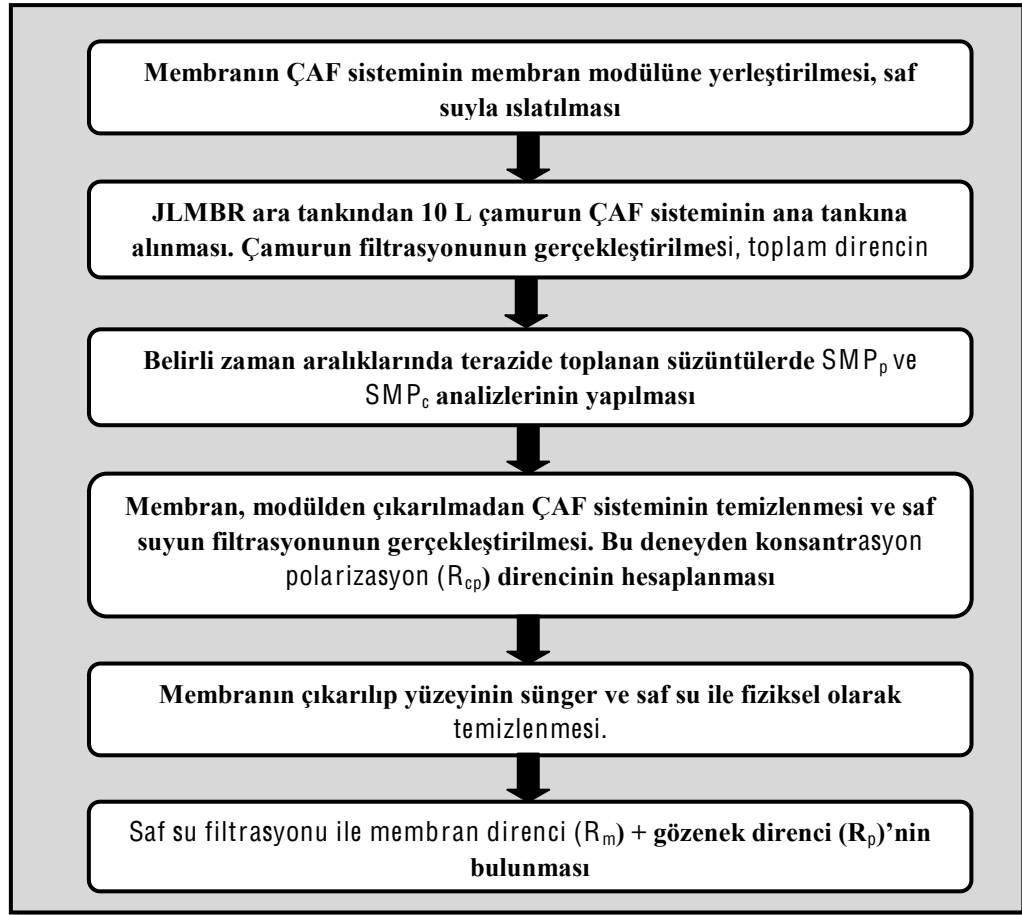
$R_{cp}$ 'nin toplam direnç içerisindeki oranı da aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$R_{cp}(\%) = \frac{R_{cp}}{R_t} \times 100 \quad (3.13)$$

ÇAF sisteminde izlenen deneysel aşamalar Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Batık membran deneylerinden farklı olarak ÇAF sisteminde membran yüzeyinde jel tabakası oluşmadığı için bu tabakada analizler yapılamamıştır. Sadece belirli zaman aralıklarında süzüntüden alınan numunelerde analizler yapılmıştır. Çapraz akış filtrasyon deneylerinde de batık membran deneylerine benzer şekilde kullanılan membranların performanslarını birbirleri ile karşılaştırırken filtrasyon sonunda akı azalma oranları (FDR) (3.11) formülüne göre hesaplanmıştır.



Fotoğraf 3.4. Deneylerde kullanılan çapraz akış filtrasyon sistemi.



Şekil 3.4. ÇAF sisteminin deneysel aşamaları.

### 3.3. Kullanılan Kimyasallar

Sentetik atıksu hazırlamak amacıyla kullanılan kimyasallardan, glikoz, üre,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4$  teknik kalitede (Tekkim), pepton Zag'dan,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$  Merck'den,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  Riedel'den temin edilmiştir. MLSS analizi için kullanılan AKM filtreleri GE Osmonics'den, EPS ve SMP analizinde kimyasal ekstraksiyonda kullanılan formaldehit (%37'lik) Merck'ten,  $\text{NaOH}$  Riedel'den temin edilmiştir. Protein analizinde kullanılan kimyasallardan, folin,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{tartarate} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , BSA ve  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  Merck'ten, karbonhidrat analizinde kullanılan fenol ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (%95-97) Sigma-Aldrich'ten temin edilmiştir. KOİ analizinde kullanılan  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HgSO}_4$  Riedel'den,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , 1,10-phenantrolin monohidrat,  $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  Merck'den temin edilmiştir. Hidrofobisite analizlerinde kullanılan n-hegzadekan Merck'den temin edilmiştir. Polielektrolit

deneylerinin yapıldığı deney sisteminde ECOPOL-517 katyonik polimer As-su firmasından satın alınmıştır.

### 3.4. Sentetik Atıksuyun Hazırlanması

Deneylerin atıksuyun özelliğinin çalışma süresince değişmemesi amacıyla JLMBR sentetik atıksu ile beslenmiştir. Kullanılan sentetik atık suyun özellikleri Çizelge 3.3'de sunulmuştur. Farklı organik yüklemelerde atıksuya eklenen kimyasalların miktarları oranlı bir şekilde değiştirilmiştir.

Çizelge 3.3. Deneyler sırasında kullanılan sentetik atıksuyun bileşimi.

Madde	Miktar (mg/L)
Glikoz	1000
Pepton	50
Üre	100
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	50
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	5.0
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	50
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50
$\text{NaHCO}_3$	250
$\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	10
$\text{NaCl}$	50
$\text{KCl}$	10
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.1
$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	7.0
$\text{ZnCl}_2$	0.25
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.45
$\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	5.0

## 3.5. Analiz Yöntemleri

### 3.5.1. KOİ ve MLSS analizleri

KOİ bazında giderim verimlerini bulmak için, JLMBR girişinde ve tübüler membran çıkışında KOİ analizi yapılmıştır. Metot olarak Standart metotlardan 5220.C kapalı reflux metodu kullanılmıştır. JLMBR sistemi sentetik atıksu ile beslendiği için reaktördeki biyokütle konsantrasyonu (MLSS) askıda katı madde (AKM) deneyi ile ifade edilmiştir. Metot olarak standart metotlardan Metot 2540.D kullanılmıştır [APHA, 1995].

### 3.5.2. SMP ve EPS analizleri

Günlük olarak JLMBR ara tankından alınan çamur numunelerinde ve batık membran deneyleri sırasında membran yüzeyindeki kek tabakasından alınan örneklerde EPS ve SMP analizleri yapılmıştır. Batık membran ve çapraz akış filtrasyon sistemlerinde elde edilen süzüntülerde ise sadece SMP analizi yapılmıştır. EPS ve SMP analizindeki en önemli nokta bu iki bileşenin hücreyi parçalamadan birbirinden ayırabilmektir. Bunun için fiziksel-kimyasal (sodyum hidroksit-formaldehit) ekstraksiyon yöntemi kullanılmıştır [Tinggang et al., 2008]. Bu metotta kullanılan formaldehit, hücre zarında bulunan nükleik asit ve proteinlerin amino, hidroksil, karboksil ve sülfid grupları ile reaksiyona girerek hücrelerin parçalanmasını engeller. Böylece hücrelerin formlarının korunmasını sağlar. NaOH ise pH'ı artırarak EPS'nin suda çözünürlüğünü artırır böylece hücreden daha fazla EPS ekstrakte edilmiş olur [Liu and Fang, 2002]. Analizin ilk aşamasında çamur düşük hızda santrifüjlenir, böylelikle bakteri hücrelerinin ortamdan uzaklaşması sağlanır. Bu işlem sonunda elde edilen üst sıvı yüksek hızda santrifüjlenir ve hücre tarafından ortama salgılanmış olan SMP fiziksel olarak sudan ayrılmış olur. Bakteri hücrelerine yapışık olarak bulunan EPS'nin ayrımı ise yukarıda anlatılmış olan kimyasalların ilavesi ile mümkün olmaktadır. SMP ve EPS'nin ayrımından sonra protein ve karbonhidrat analizleri ile bu bileşenler mL olarak bulunmuş olur.

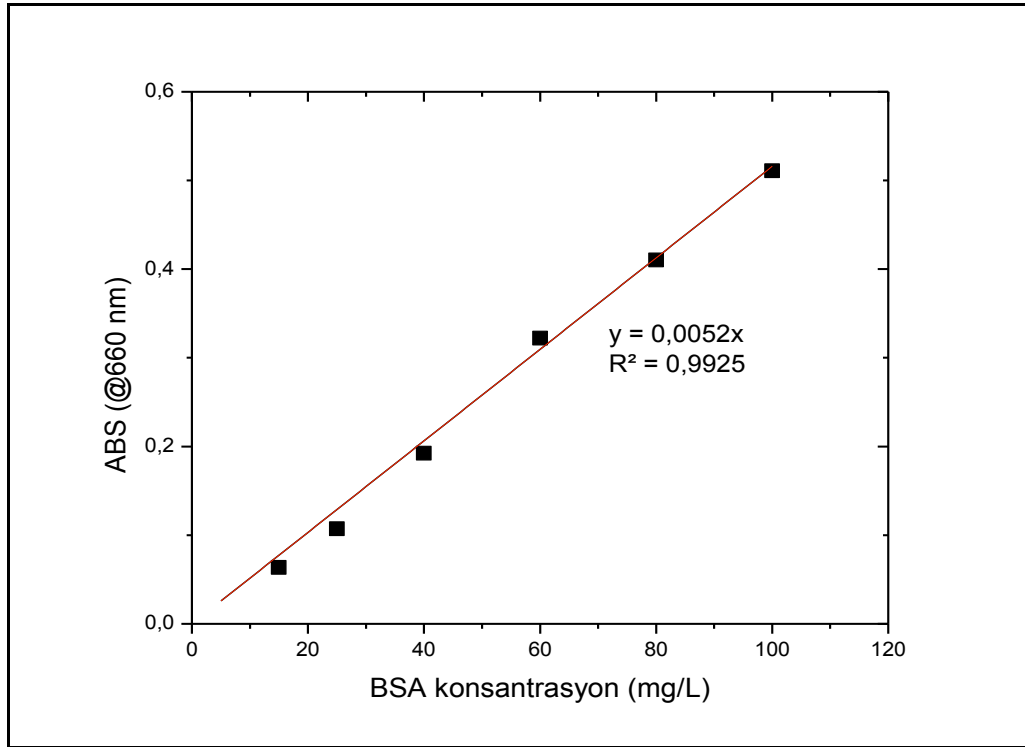
Deney yönteminde, JLMBR'de analiz yapılacak ise ara tanktan 5 mL çamur örneği alınır, eğer batık membran deneyinde membran yüzeyindeki kek tabakasında

analiz yapılacak ise kek tabakasından belli miktarda su içeriği bilinen çamur tartılarak çözelti şişesine alınır ve üzerine 5 mL saf su eklenerek analize hazırlanır. 5 mL'lik çamur örnekleri ependorf tüplerine konularak askıda katıların giderilmesini sağlamak amacıyla 4000  $\times$ g'de 4°C'de 10 dakika santrifüjlenir. Daha sonra üst faz steril bir tüpe alınır ve 13200  $\times$ g ile 4°C'de 20 dakika tekrar santrifüjlenir. Fiziksel ekstraksiyon ile elde edilmiş bu üst fazda çözünmüş protein ve karbonhidrat analizleri yapılır. Çözünmüş protein ve karbonhidratın toplamı bize ortamdaki SMP (serbest EPS)'nin değerini verir. Bağlı EPS'yi tespit edebilmek için ilk santrifüjden kalan çökelti steril destile su ile tekrar 5 mL'ye tamamlanır. 6  $\mu$ L formaldehit (%37'lik) eklenerek, karışım 4°C'de 1 saat bekletilir. Daha sonra 500  $\mu$ L NaOH (1N) eklenerek ve 4°C'de 3 saat bekletilir. Bu süspansiyon 13200  $\times$ g, 20 dakika 4°C'de santrifüjlenir. Kimyasal ekstraksiyon ile elde edilmiş üst fazda yine protein ve karbonhidrat analizi yapılır. Bu değerlerin toplamı da bağlı veya ekstrakte edilmiş EPS'nin değerini verecektir. Protein analizi için Lowry metodu ve karbonhidrat analizi için fenol sülfirik asit metodu [Dubois et al., 1956] kullanılmıştır.

### 3.5.3. Protein analizi

Lowry metotunda, analizde kullanılmak üzere üç ana çözelti hazırlanmıştır (A, B ve C çözeltileri). Çözelti A için, 2.86 g NaOH ve 14.31 g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> saf suda çözülür ve 500 mL'ye tamamlanır. Çözelti B için, 1.42 g CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O 100 mL saf suda çözülür. Çözelti C için ise, 2.85 g Na<sub>2</sub>tartarate.2H<sub>2</sub>O 100 mL saf suda hazırlanır. Lowry solüsyonu, bu üç çözeltinin 100:1:1 (A:B:C) oranı ile karıştırılarak ve analizin yapılacağı gün hazırlanır. 0.5 mL örneğe 0.7 mL Lowry çözeltisi eklenir, hızlıca karıştırıldıktan sonra 20 dakika oda sıcaklığında ve karanlıkta bekletilir. Bu sırada folin çözeltisi hazırlanır. 5 mL 2N Folin 6 mL saf su ile karıştırılır. 0.5 mL örneğe 0.1 mL folin çözeltisi eklenir. Hızlıca karıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında ve karanlıkta 30 dakika bekletilir. Bu sürenin sonunda numuneler, protein içeriklerine bağlı olarak açık maviden koyu maviye doğru renklenirler. Ölçümler GBC Cintra 20 marka UV spektrofotomere, 660 nm dalga boyunda aynı koşullarda hazırlanan şahite karşı okunur. Ölçümlerin tekrarlanabilirliği için her numunedan iki adet hazırlanıp okumaları gerçekleştirilmiştir.

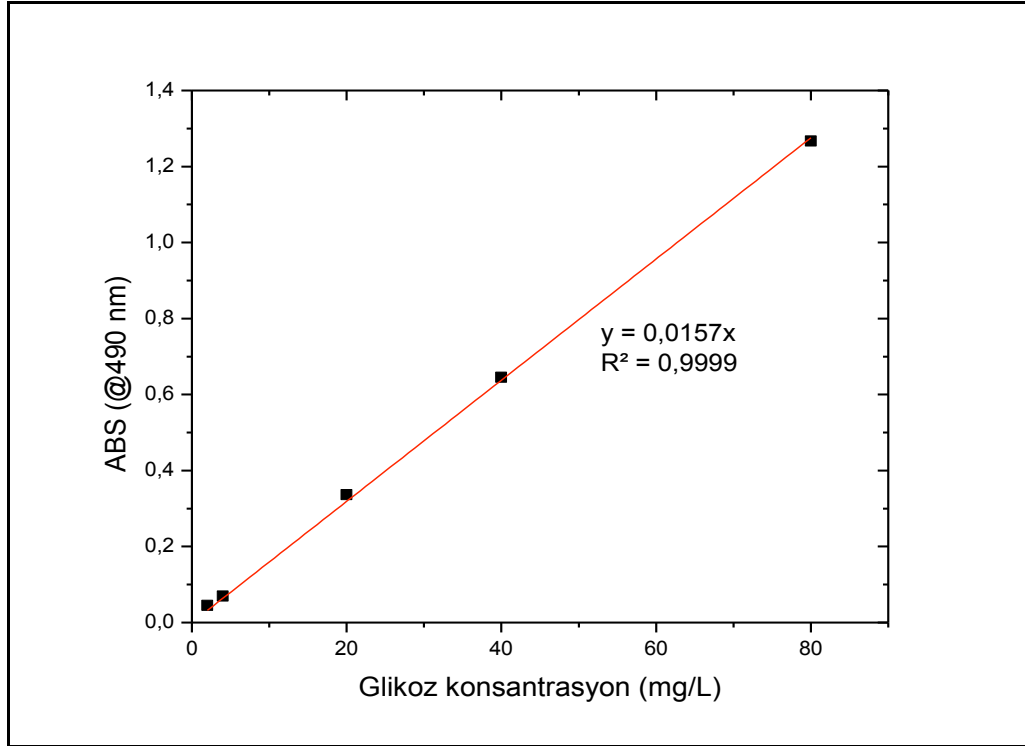
Protein kalibrasyonunda standart protein çözelti olarak Bovin Serum Albumin (BSA) kullanılmıştır. Standart proteinden 5-50 mg/L aralığındaki konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır. UV Spektrofotometre’de 660 nm’de okunan absorbans değerlerine karşı konsantrasyon grafiği çizilmiştir. Kalibrasyon grafiği Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Protein kalibrasyon eğrisi.

#### 3.5.4. Karbonhidrat analizi

Karbonhidrat analizi için “fenol-sülfürik asit metodu” (Dubois) modifiye edilerek kullanılmıştır. Analizde %80’lik fenol çözeltisi ve derişik %95-97’lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmıştır. 1 mL numuneye 25 µL %80’lik fenol ve 2.5 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ekleyip 30<sup>0</sup>C’de 15 dakika su banyosunda bekletilmiştir. Numunelerin rengi içerdikleri karbonhidrat miktarına bağılı olarak açık sarıdan koyu sarıya doğru değışmiştir. Oluşan renk UV Spektrofotometre’de 490 nm dalga boyunda okunmuştur. Kalibrasyonda standart çözelti olarak glikoz kullanılmıştır. Standart glikozdan 2-80 mg/L aralığındaki konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır. Şekil 3.6’da kalibrasyon eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Karbonhidrat kalibrasyon eğrisi.

### 3.5.5. Göreceli hidrofobisite analizi

Göreceli hidrofobisite analizi için MATH (Microbial Adhesion To Hydrocarbons) yöntemi kullanılmıştır [Sanin et al., 2003]. Bu yöntemin prensibi, mikroorganizmaların yüzey hidrofobisitelerine bağlı olarak seçilen bir hidrokarbona yapışmasıdır. Bu çalışmada n-hekzadekan kullanılmıştır. Bakteri ortamında bulunan elektrostatik etkilerden kaynaklanabilecek hataları minimuma indirmek için, solüsyon Tris-HCl tamponu (pH=7.1) ile 2-3 kere yıkanır. Bu amaçla 1 mL sulu çamur 10 mL'ye Tris tamponu ile tamamlanır, 3000 rpm'de 20 dakika santrifüjlenir, üst sıvı dökülüp tekrar Tris tamponu eklenir, bu işlem 3 kere tekrar edilir. Bu yıkama işlemi bittikten sonra 3 mL bakteri süspansiyonu karıştırılarak 10 mm'lik UV küvetine konur ve 600 nm dalga boyunda ilk OD (optical density) değeri okunur, daha sonra 0.3 mL n-hekzadekan eklenir, 2 dakika vorteks cihazında hızlıca karıştırılır, 15 dakika bekletilir ve 600 nm'de son OD değeri okunur. Sonuç aşağıdaki formüle göre yüzde olarak hesaplanır;

$$\text{Göreceli hidrofobisite}(\%) = 100 \cdot \left( 1 - \frac{OD_{ilk}}{OD_{son}} \right) \quad (3.13)$$

## 3.6. Enstrümental Analizler

### 3.6.1. Viskozite ölçümü

Viskozite ölçümleri Broksfield DV-A Viskozitemetre cihazında gerçekleştirilmiştir. JLMBR'nin ara tankından alınan 10 mL çamur numunesi viskozite cihazının ölçüm kabına yerleştirilmiştir. Su banyosu ile çamurun sıcaklığı sabit tutulmuş, spindle'in deviri 30 rpm'e ayarlanmıştır. Cihazda her zaman ilk olarak destile suyun viskozitesi ölçülmüş, buna göre cihaz doğrulandıktan sonra numunenin okunmasına geçilmiştir.

### 3.6.2. Partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli ölçümü

İşletim periyotlarında, JLMBR'nin ara tankından alınan numunelerde partikül boyutu ve zeta potansiyeli ölçümü yapılmıştır. Ölçümler için Malvern marka Mastersizer 2000 model cihaz kullanılmıştır. Her numunenin üç kere okuması yapılmıştır.

### 3.6.3. SEM analizi

Filtrasyon deneylerine geçilmeden önce, membranların temiz olarak SEM resimleri çekilmiştir. Kullanılmış membranların SEM analizi için ise, I nolu deney seti sonundaki batık membran deneyinde, kullanılmış olan 0.45 µm gözenek boyutuna sahip membranlar seçilmiştir. SEM analizi için Philips marka XL30 SFEG model cihaz kullanılmıştır. Temiz membranlarda ölçüm direk kesilen kuru numunelerde yapılmıştır. Kullanılmış membranlardan ise örnekler membranın orta kısımlarından kesilmiş, 0.1 M fosfat tamponunda (pH 7.2) hazırlanmış olan %3.0'lık glüteraldehit çözeltisinde 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra bu çözeltinin içinden çıkarılan membranlar etanol (%95) ile suyundan arındırılmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur. Hem kirli hem de temiz membranlar altın ile kaplanarak SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.



### 3.6.4. AFM analizi

Membranların yüzey özelliklerinin, özellikle de pürüzlülüklerinin belirlenmesi için temiz ve kullanılmış membranlarda AFM analizi, Digital Instruments marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Kullanılmış membranlar için yine I nolu deney seti sonrasında yapılan batık membran filtrasyon deneyinde kullanılan membranlar seçilmiştir. AFM ölçümünden önce, temiz ve kullanılmış membranlar distile su ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur. Örnekler cam filmin üzerine sabitlenmiş ve  $10.0 \mu\text{m} \times 10.0 \mu\text{m}$ 'lik alan  $6.104 \text{ Hz}$  ile taranmıştır. Elde edilen resimler Nanoscope 3.0 ile analizlenerek sonuçlar yorumlanmıştır.

## 3.7. Deneysel Plan

Tez çalışması kapsamında, JLMBR'de sürekli işletim şartında üç aşamada yapılan deneyler Çizelge 3.4'de verilmiştir. Birinci aşamada, JLMBR'deki işletim parametreleri değiştirilmiştir. Bu aşamada I ve II nolu deney seti çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, çamur yaşı sabit tutulup organik yüklemeler değiştirilmiş ve III, IV ve V nolu deney seti çalışmaları yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise belirlenen çamur yaşı ve organik yüklemelerde JLMBR'ye sürekli polielektrolit ilavesi yapılmış ve VI nolu deney seti çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bütün deneyler sırasında reaktörün hidrolik bekletme süresi  $13.8$  saatte sabit tutulmuştur. JLMBR'de sürekli deneylere başlamadan önce, İzmit/Tütünçiftlik Evsel Atıksu Arıtma Tesisinin havalandırma havuzundan alınan aşı ile reaktör kesikli olarak çalıştırılmıştır.  $40$  günlük kesikli çalışmadan sonra, sistem I nolu deney setindeki işletim şartlarına ayarlanarak sürekli çalışmaya geçirilmiştir. Bu şartlarda, JLMBR sistemi  $81$  gün sürekli olarak çalıştırılmıştır. Reaktör, II nolu deney setinin işletim şartlarına geçirilmeden önce, MLSS konsantrasyonunun yükselmesi için  $20$  gün kesikli olarak beslenmiştir. MLSS konsantrasyonu istenilen değerlere geldikten sonra II nolu deney setinin işletim şartlarına geçilmiştir ve bu şartlarda JLMBR  $64$  gün sürekli olarak çalıştırılmıştır. İki işletim şartında da, çamurun filtrasyon performansları hem batık membran hem de çapraz akış filtrasyon sisteminde araştırılmıştır.

İşletim şartlarının değiştirildiği deneylerden sonra, organik yüklemenin değiştirildiği deneylere geçilmiştir (III, IV ve V nolu deney setleri). Bu deneylerde

reaktör, sabit çamur yaşına ayarlanmıştır, filtrasyon performansı sadece batık membran filtrasyon sisteminde araştırılmıştır. JLMBR III nolu deney seti için 13 gün, IV nolu deney seti için 14 gün ve V nolu deney seti için 11 gün sürekli olarak çalıştırılmıştır. Son olarak polielektrolit ilavesinin etkisinin incelendiği VI nolu deney seti için V nolu deney sonunda JLMBR'ye sürekli olarak polielektrolit beslemesi yapılmış ve filtrasyon performansı batık membran filtrasyon sisteminde incelenmiştir. Polielektrolit olarak Ecopol-517 marka katyonik polimer kullanılmıştır. Bu polimerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir. JLMBR'ye sürekli polielektrolit dozlaması yapmadan önce kesikli ortamda optimum polielektrolit miktarı belirlenmiştir. Çamura sadece polielektrolit eklendiğinde, floklaşma verimli olmadığından ve viskozite çok arttığından, FeCl<sub>3</sub> ilavesinde yapılmıştır. FeCl<sub>3</sub>'ten 4000 mg/L ve polielektrolitten 2000 mg/L konsantrasyonda stoklar hazırlanmıştır. JLMBR'nin ara tankından beş tane behere 400 mL çamur alınmış ve MLSS konsantrasyonları belirlenmiştir. Bir beher kontrol olarak kullanılmış, hiçbir kimyasal ilavesi yapılmamıştır. Diğer dört behere 10 mL stok FeCl<sub>3</sub> eklenmiştir. Polielektrolitin stok çözeltisinden de beherlere 20-30-50-100 mL ilave edilmiştir. Beherlerdeki polielektrolit miktarları MLSS'ye oranlandığında, 14-20-32-58 mgpoli/gMLSS olmuştur. Hidrofobisite analizi ve klasik filtrasyon sisteminde filtrasyon performanslarını bulmak için çamurlardan numune alınmıştır. Numuneler klasik filtrasyon sisteminde 0.45 µm gözenek boyutuna sahip selüloz asetat membran kullanılarak 1 bar'da 30 dakika filtre edilmişlerdir. Çamurların kesikli karışırtmalarının sonunda polielektrolitli çamurlar ve kontrol çamur SVI analizi için 30 dakika bekletilmek üzere Imhoff hunilerine alınmıştır. Bu sürenin sonunda üst sıvıdan OD<sub>600</sub>, SMP ve EPS analizleri için numuneler alınmıştır. Klasik filtrasyondaki filtrasyon performanslarına ve yapılan analizlerin sonuçlarına göre, polielektrolitin optimum konsantrasyonu bulunmuştur. Bu konsantrasyonda polielektrolit ve FeCl<sub>3</sub> peristaltik pompa ile belli debide JLMBR sistemine beslenmiştir. Filtrasyon performansı batık membran sisteminde incelenmiştir. Membran deneyleri devam ederken polielektrolit ve FeCl<sub>3</sub> ilavesine de devam edilmiştir.

Çizelge 3.5. Polielektrolit deneylerinde kullanılan katyonik polimerin özellikleri.

Ticari Adı	ECOPOL 517 A Katyonik Poliakrilamid
Renk	Beyaz
Görünüm	Granüler katı
Yoğunluk	0.75g/cm <sup>3</sup>
Koku	Yok
%1'lik çözeltisinin pH	4.5
Suda çözünürlüğü	Yoğun viskoz çözelti özelliğine sahip

Çizelge 3.4. JLMBR’de gerçekleştirilen deneylerin tablosu.

Deney başlığı	Deney Set	İşletme Periyodu (gün)	KOI <sub>giriş</sub> (mg/L)	Çamur Yaşı (gün)	İncelenen Filtrasyon sistemi	Yapılan analizler		Filtrasyon Basıncı (bar)	Kullanılan Membranlar
						Süzüntü	Kek tabakası		
<u>1.Aşama deneyler</u> Farklı işletim şartlarında reaktördeki parametrelerin değişiminin ve filtrasyon performanslarının araştırılması	I	81	1000±128	Sonsuz	BATIK	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub> EPS <sub>p</sub> ,EPS <sub>c</sub>	0.16	PES (0.45-0.22-0.10) PC (0.40-0.20-0.10) ME (0.45-0.22-0.10) SA (0.45-0.22-0.10)
					ÇAF	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	-	1	
	II	64	5100±230	3	BATIK	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub> EPS <sub>p</sub> ,EPS <sub>c</sub>	0.16	PES (0.45-0.22-0.10) PC (0.40-0.20-0.10) ME (0.22-0.10) SA (0.45-0.22-0.10)
					ÇAF	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	-	1	
<u>2.Aşama deneyler</u> Farklı organik yüklemelerde reaktördeki parametrelerin değişiminin ve filtrasyon performanslarının araştırılması	III	13	2053±68	3	BATIK	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub> EPS <sub>p</sub> ,EPS <sub>c</sub>	0.16	PES (0.45-0.22-0.10) PC (0.40-0.20-0.10) ME (0.45-0.22-0.10) SA (0.45-0.22-0.10)
	IV	14	3068±28	3	BATIK	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub> EPS <sub>p</sub> ,EPS <sub>c</sub>	0.16	PES (0.45-0.22-0.10) PC (0.40-0.20-0.10) ME (0.45-0.22-0.10) SA (0.45-0.22-0.10)
	V	11	4110±68	3	BATIK	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub> EPS <sub>p</sub> ,EPS <sub>c</sub>	0.16	PES (0.45-0.22-0.10) PC (0.40-0.20-0.10) ME (0.45-0.22-0.10) SA (0.45-0.22-0.10)
<u>3.Aşama deneyler</u> Polielektrolit ilavesinde reaktör ve filtrasyon performanslarının incelenmesi	VI	2	4110±68	3	BATIK	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub>	SMP <sub>p</sub> ,SMP <sub>c</sub> EPS <sub>p</sub> ,EPS <sub>c</sub>	0.16	PES (0.45-0.22-0.10) PC (0.40-0.20-0.10) ME (0.45-0.22-0.10) SA (0.45-0.22-0.10)

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

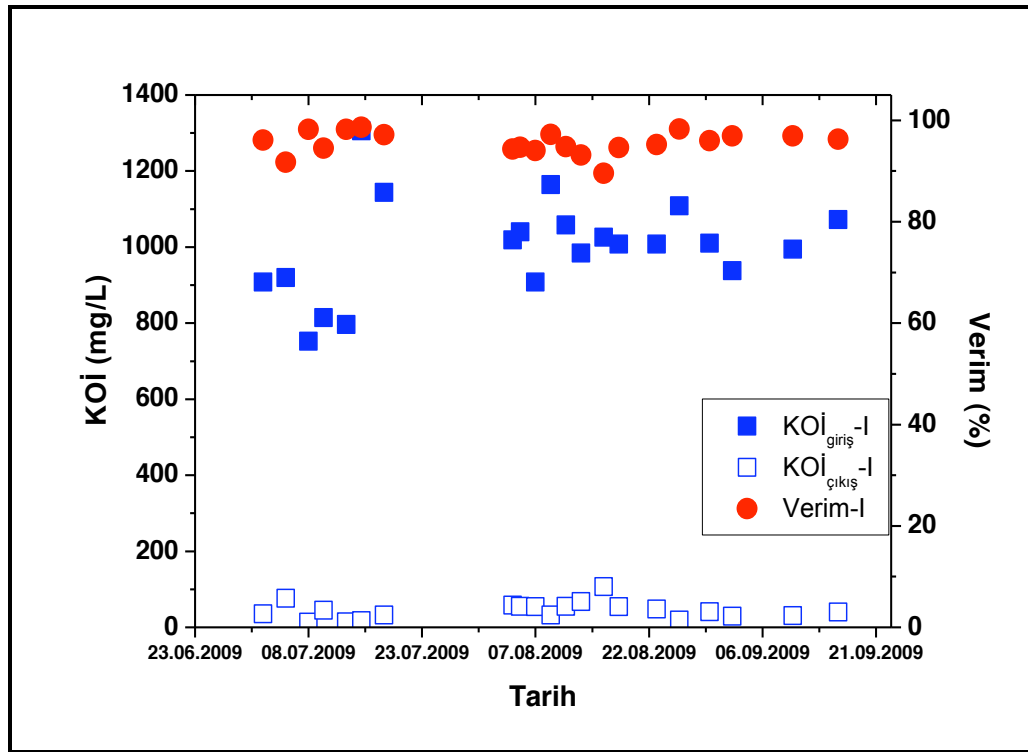
### 4.1. Farklı İşletim Şartlarında Reaktördeki Parametrelerin Değişiminin ve Filtrasyon Performanslarının Araştırılması (Deney Set: I-II)

Tez çalışmasının ilk aşamasında, işletim şartlarının reaktördeki parametrelerin değişimine ve dolayısıyla filtrasyon performanslarına olan etkilerini incelemek için, JLMBR iki farklı çamur yaşı ve iki farklı organik yüklemeye işletilmiştir. I nolu deney setinde reaktör, sonsuz çamur yaşı ve  $1000 \pm 128$  mg/L giriş KOİ konsantrasyonu ile 81 gün sürekli olarak çalıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda batık membran ve çapraz akış filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve ardından II nolu deney setine geçilmiştir. II nolu deney setinde reaktör 3 gün çamur yaşı ve  $5100 \pm 230$  mg/L giriş KOİ konsantrasyonu ile 64 gün sürekli olarak çalıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda yine batık membran ve çapraz akış filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu iki deney setinin deneysel sonuçları üç başlık altında verilmiştir; reaktördeki parametrelerin değişimi, batık membran filtrasyon performansı ve çapraz akış filtrasyon performansı. Bu başlıklar altında, deneysel sonuçlar iki setin birbiriyle ve literatürde yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırmasıyla değerlendirilmiştir.

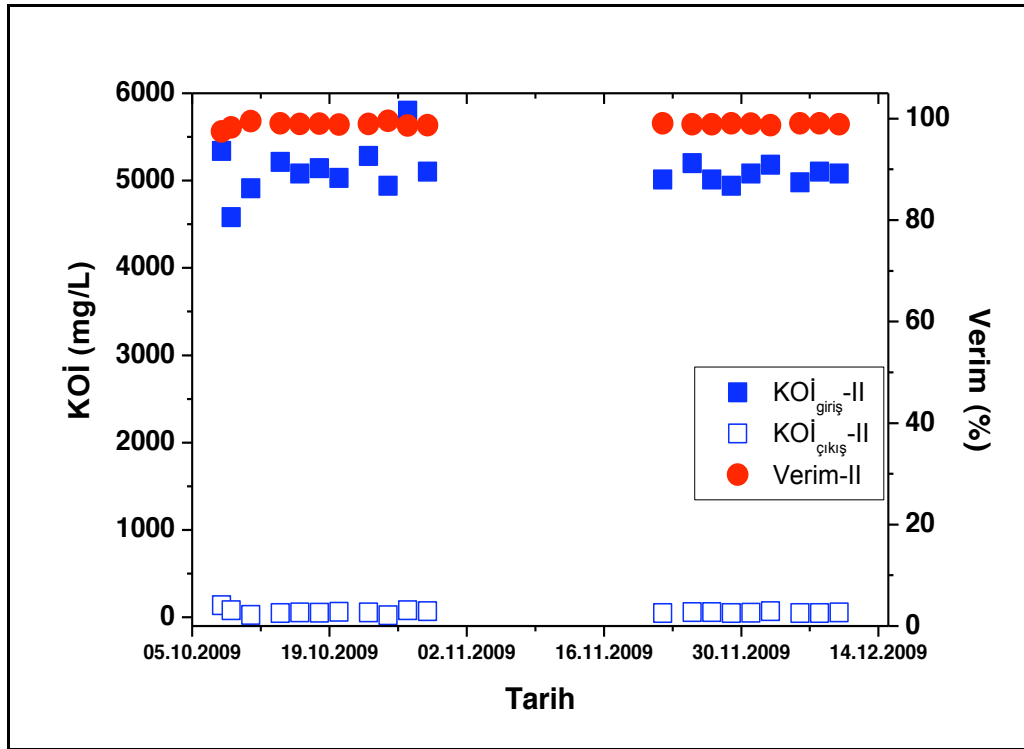
#### 4.1.1. Reaktördeki parametrelerin değişimi

**KOİ değişimi;** İlk deney setinde, JLMBR'de çamur yaşı sonsuz ve sentetik atıksuyun giriş KOİ konsantrasyonu da ortalama  $1000 \pm 128$  mg/L'ye ayarlanmıştır. Bu durumda organik yükleme  $1.7 \pm 0.2$  kgKOİ/m<sup>3</sup>gün olarak hesaplanmıştır. Tübüler membran çıkışındaki KOİ değeri ortalama  $44 \pm 23$  mg/L ve buna göre KOİ giderim verimi ise  $95.5 \pm 2.3$  değerlerinde olmuştur. Şekil 4.1'de I nolu deney seti sırasında KOİ giderim verimleri ile giriş ve çıkış KOİ arasındaki değişimler gösterilmiştir. KOİ giderim verimi açısından reaktörün arıtım performansı çok yüksektir. İkinci deney setinde çamur yaşı düşürülmüş organik yükleme ise arttırılmıştır. Çamur yaşı 3 gün ve sentetik atıksuyun giriş KOİ konsantrasyonu da ortalama  $5100 \pm 230$  mg/L'ye ayarlanmıştır. Bu durumda organik yükleme  $8.9 \pm 0.1$  kgKOİ/m<sup>3</sup>gün olarak

hesaplanmıştır. Tübüler membran çıkışındaki KOİ değeri ortalama  $57.9 \pm 8.6$  mg/L ve buna göre KOİ giderim verimi ise  $\%98.9 \pm 0.2$  değerlerinde olmuştur. Artan organik yükleme ile JLMBR'nin arıtım performansı da artmıştır. Şekil 4.2' de II nolu deney seti sırasında KOİ giderim verimleri ile giriş ve çıkış KOİ arasındaki değişimler gösterilmiştir. Literatürde JLMBR sisteminin kullanıldığı çalışmalarda, çok yüksek KOİ giderim verimleri elde edilmiştir. Örneğin peynir altı suyunun arıtım performansının çalışıldığı bir çalışmada,  $22.2 \text{ kgKOİ/m}^3\text{gün}$  organik yüklemede, KOİ olarak  $\%97$ 'lik bir arıtım verimi elde edilmiştir [Farizoglu et al., 2004].



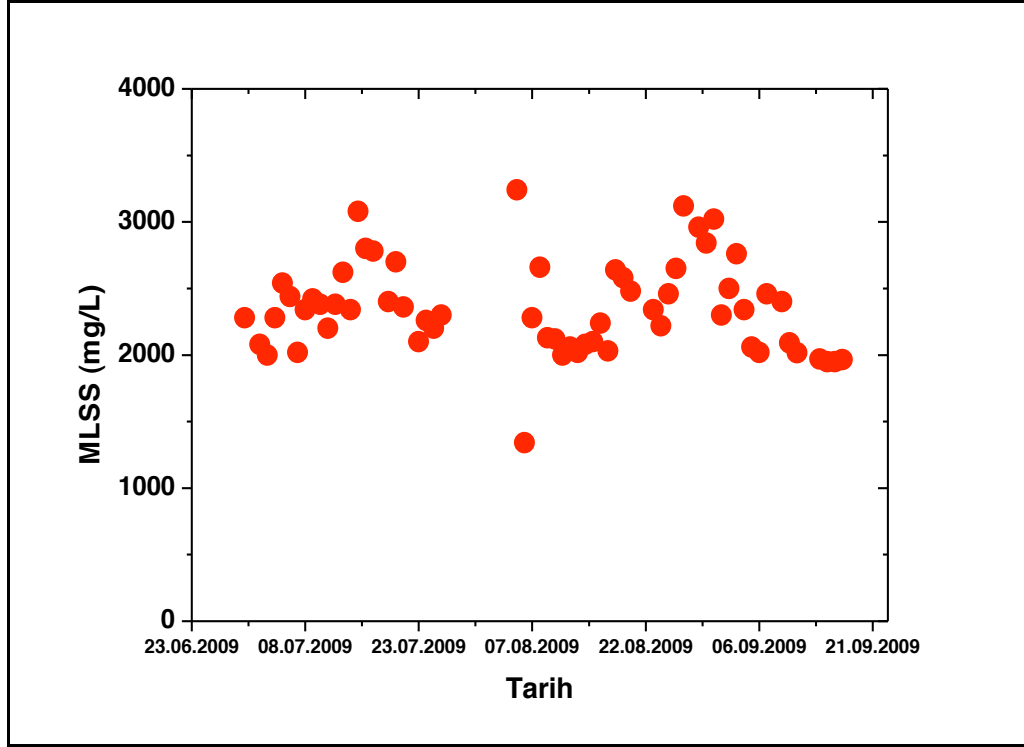
Şekil 4.1. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemede JLMBR sistemindeki KOİ değerlerinin zamanla değişimi (Deney Set: I).



Şekil 4.2. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki KOİ değerlerinin zamanla değişimi (Deney Set: II).

*MLSS değişimi;* MLSS konsantrasyonu I nolu deney setinde ortalama  $2347 \pm 344$  mg/L değerinde olmuştur. Bu deney setinde, sisteme yapılan organik yüklemenin düşük olması nedeniyle MLSS değerleri literatürdeki JLMBR sisteminin kullanıldığı çalışmalardan daha düşük olmuştur. Jet loop reaktör ile yapılan çalışmalarda genelde MLSS konsantrasyonu 5000-15000 mg/L aralığında çalışılmıştır [Farizoğlu and Keskinler, 2006, Park and Lee, 2005]. Bu deney setinde çamur yaşını ayarlamak MLSS konsantrasyonlarını daha da düşürdüğü için bu dönemde çamur yaşı sonsuz olarak ayarlanmış yani sistemden hiç çamur atılmamıştır. Zamanla reaktördeki MLSS konsantrasyonunun değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir. II nolu deney setinde ise artan organik yükleme ile reaktördeki MLSS konsantrasyonu da artmıştır. Bu deney sisteminde MLSS konsantrasyonu ortalama  $10813 \pm 1687$  mg/L değerinde olmuştur. Zamanla MLSS konsantrasyonundaki değişim Şekil 4.4'de verilmiştir. İlk deney sisteminde düşük olan MLSS konsantrasyonu nedeniyle ayarlanamayan çamur yaşı artan MLSS değeri ile birlikte bu çalışma sisteminde 3 güne ayarlanabilmiştir. Deney setlerinin F/M oranlarına bakıldığında, I nolu deney seti için F/M oranı ortalama  $0.72$  kgKOİ/kgMLSSgün, II nolu deney seti için de F/M ortalama  $0.82$  kgKOİ/kgMLSSgün olarak hesaplanmıştır. Klasik MBR sistemlerinde genellikle F/M oranı  $0.3-0.1$  kgKOİ/kgMLSSgün

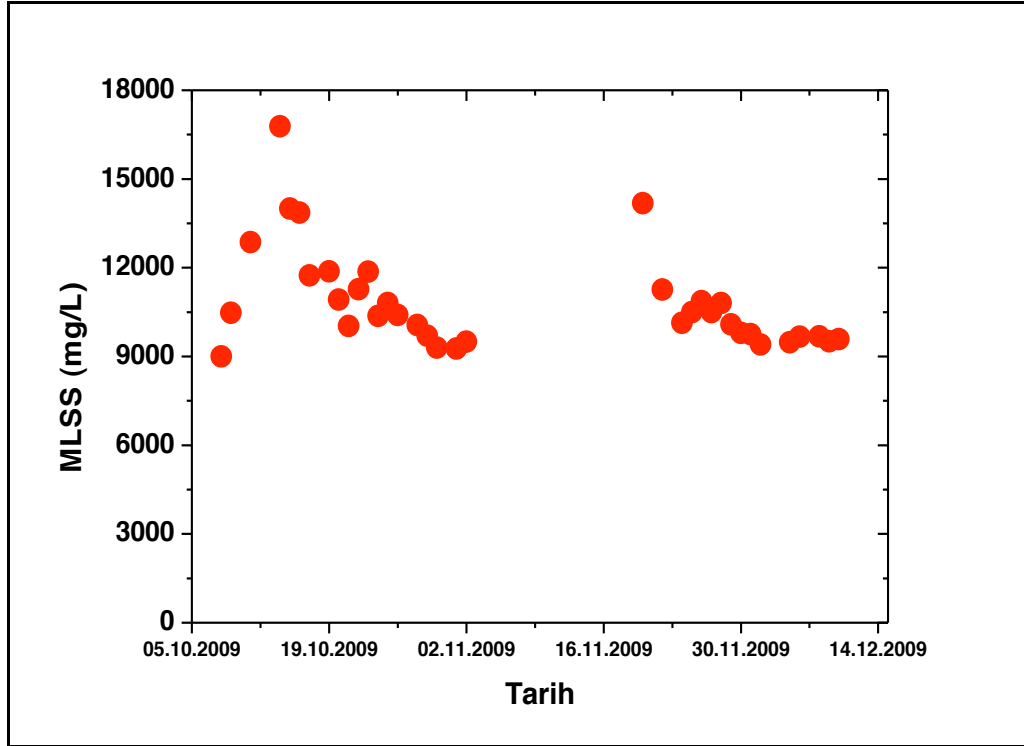
arasındadır [Grelrier et al., 2006]. JLMBR'deki F/M oranı klasik sistemlerden daha yüksektir. Azalan çamur yaşı, artan organik yükleme ile F/M oranı da artış göstermiştir.



Şekil 4.3. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemede JLMBR sistemindeki MLSS konsantrasyonunun zamanla değişimi (Deney Set: I).

**SMP ve EPS değişimi;** JLMBR'de çamurun SMP ve EPS değişimleri sürekli olarak takip edilmiştir. Sadece, reaktörde hidrolik bekleme süresini sabitlemek için kullanılan tübüler membranın geri yıkama zamanında, bu analizler gerçekleştirilmemiştir. SMP bakteriyel hücrelerin ortama salgıladıkları çözünmüş ürünler oldukları için bakteri konsantrasyonundan bağımsız olarak mg/L birimi ile verilmiştir. EPS konsantrasyonu da mg/L olarak ölçülmüş, fakat bakteri hücrelerine yapışık olarak bulunduğu için, bakteri kütlelerine oranlanarak mg protein veya karbonhidrat/g MLSS olarak verilmiştir.



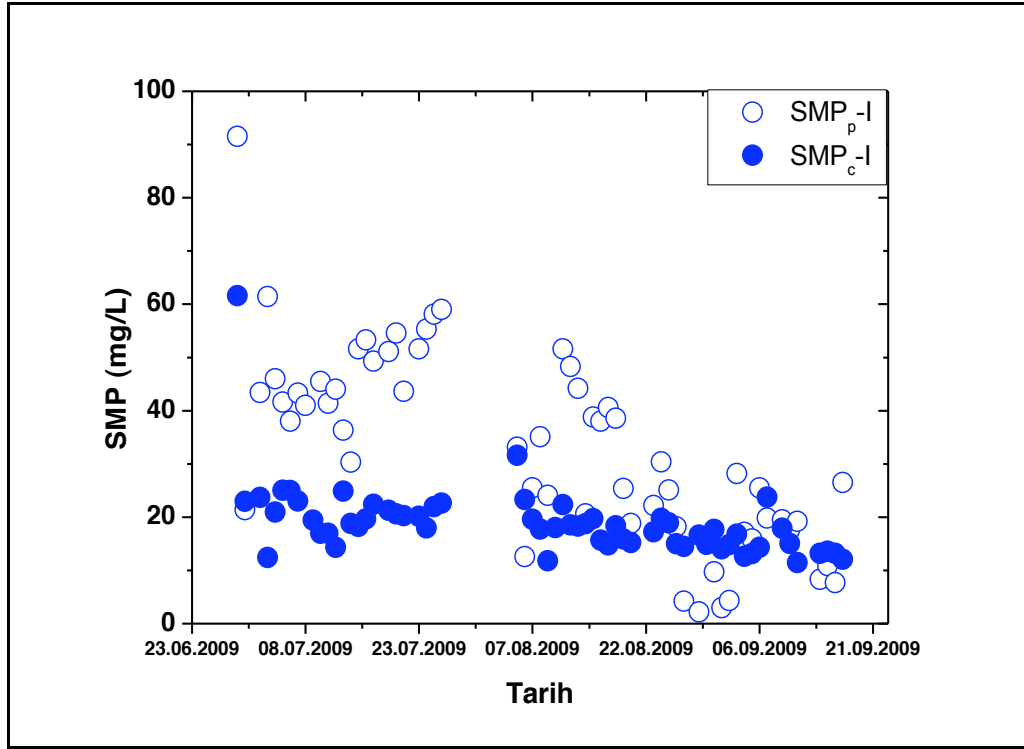


Şekil 4.4. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki MLSS konsantrasyonunun zamanla değişimi (Deney Set: II).

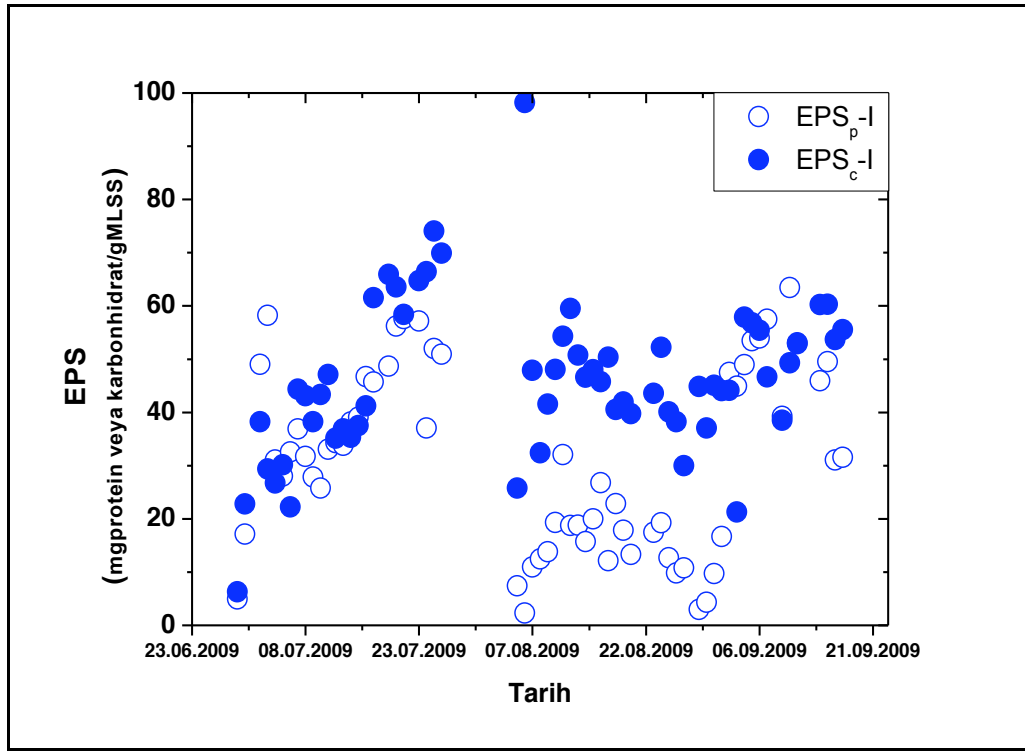
İlk deney setinde 81 günlük sürekli çalışmalar sırasındaki SMP ve EPS'nin protein ve karbonhidrat içeriklerindeki değişimler Şekil 4.5 (a-b)'de verilmiştir. Günlük SMP ve EPS değerlerine bakıldığında, bu parametrelerin sabit değerlerde kalmadığı görülmektedir. Değerlerdeki bu dalgalanmalar, JLMBR'deki türbülanslı koşullardan ve MLSS konsantrasyonu ile organik yüklemenin düşük değerlerde olmasından kaynaklanmıştır. Bu dönemde  $SMP_p$  ortalama  $32.1 \pm 16.3$  mg/L,  $SMP_c$   $18.2 \pm 4.1$  mg/L,  $EPS_p$   $31.6 \pm 17.0$  mg protein/g MLSS ve  $EPS_c$   $46.7 \pm 13.8$  mg karbonhidrat/g MLSS olarak ölçülmüştür. SMP ve EPS'nin protein ve karbonhidrat oranları (P/C) Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Genel olarak SMP'nin P/C oranı yüksek, EPS'nin P/C oranı ise düşük olmuştur. Bu çalışma döneminde düşük organik yükleme ve uzun çamur yaşı, SMP'nin protein içeriğinin, EPS'nin ise karbonhidrat içeriğinin daha yüksek olmasına sebep olmuştur.

II nolu deney setinde, 64 günlük sürekli çalışmalar sırasındaki SMP ve EPS'nin protein ve karbonhidrat içeriklerinin değişimi Şekil 4.7 (a-b)'de verilmiştir. Bu çalışma döneminde artan MLSS'e bağlı olarak SMP ve EPS'nin değişimleri daha sabit olmuştur.  $SMP_p$  ortalama  $24.9 \pm 9.0$  mg/L,  $SMP_c$  ortalama  $16.8 \pm 6.7$  mg/L,  $EPS_p$

19.8±4.6 mg protein/g MLSS ve EPS<sub>c</sub> 15.7±4.3 mg karbonhidrat/g MLSS olarak ölçülmüştür. I nolu deney setine göre SMP<sub>p</sub> değerlerinde çok bir değişiklik olmazken, EPS<sub>p</sub> ve EPS<sub>c</sub> değerlerinde azalma olmuştur. Şekil 4.8'de SMP ve EPS'nin P/C oranları verilmiştir. Bu çalışma döneminde SMP ve EPS'nin protein içerikleri karbonhidrattan daha yüksek çıkmıştır.

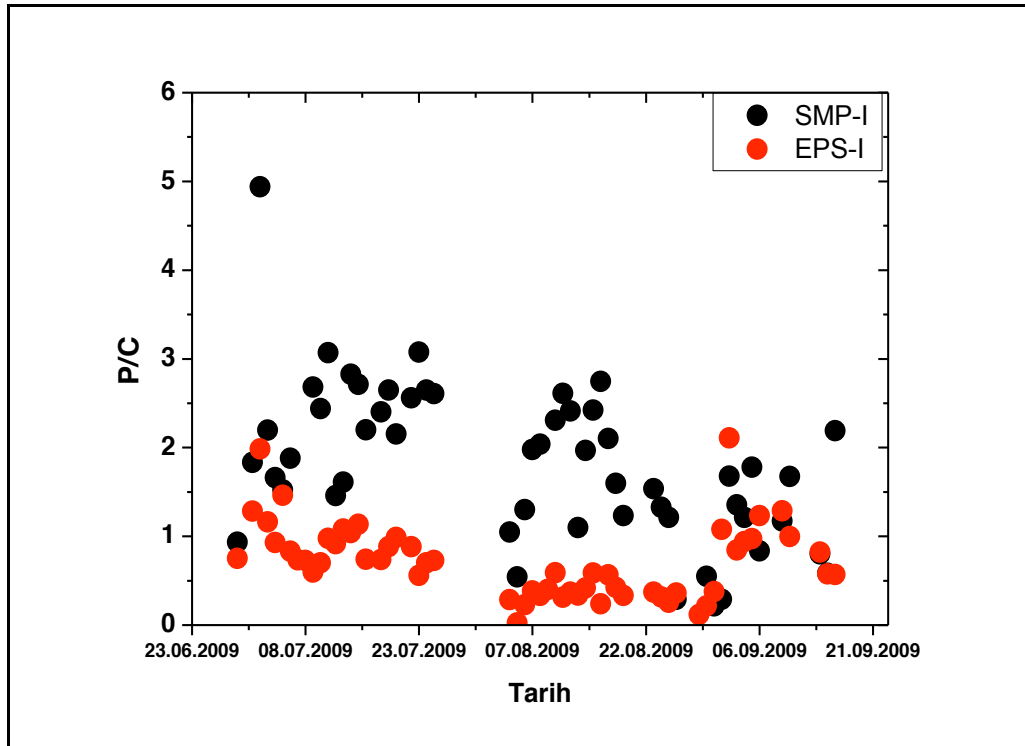


(a)

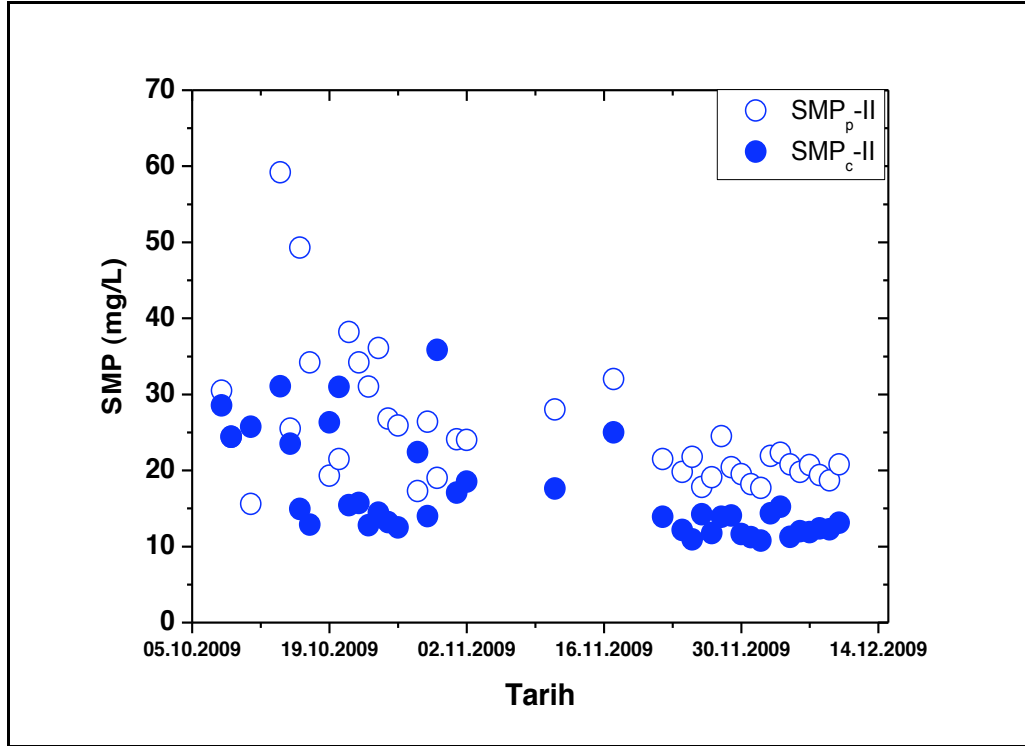


(b)

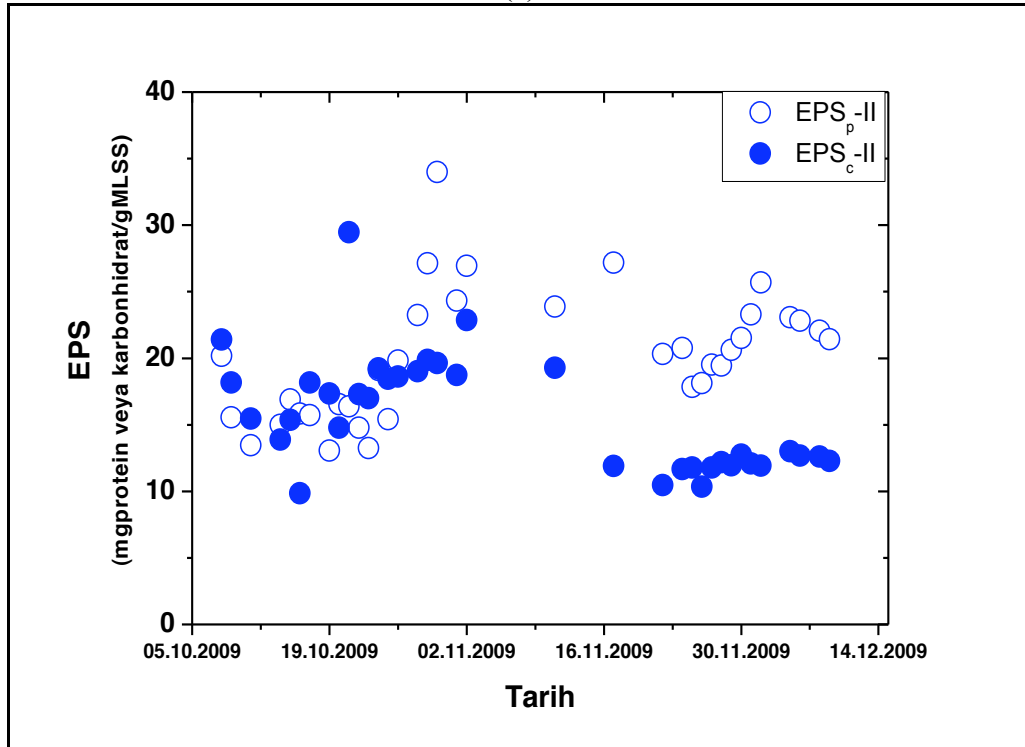
Şekil 4.5. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS konsantrasyonlarının zamanla değişimi (Deney Set: I) (a) SMP (b) EPS.



Şekil 4.6. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS'nin P/C oranlarının değişimi (Deney Set:I).

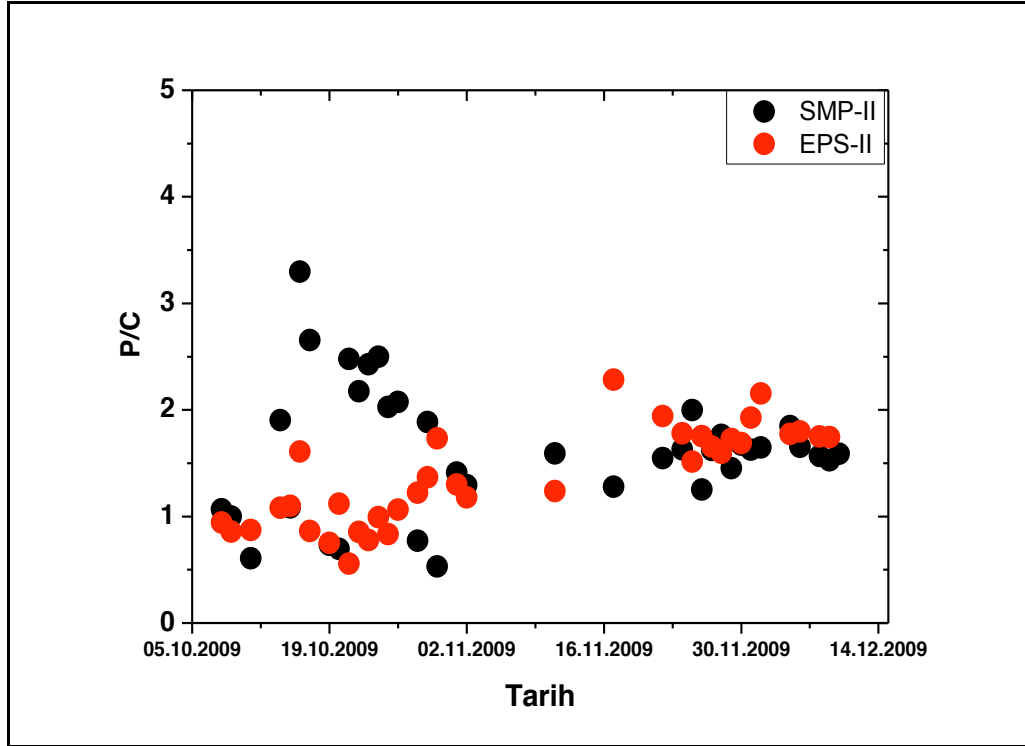


(a)



(b)

Şekil 4.7. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS konsantrasyonlarının zamanla değişimi (Deney Set: II) (a) SMP (b) EPS.



Şekil 4.8. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki SMP ve EPS'nin P/C oranlarının değişimi (Deney Set:II).

Bu sonuçlara göre organik yükün artırılması, çamur yaşının düşürülmesi ve MLSS konsantrasyonunun artması, JLMBR sistemindeki SMP değerlerinde çok ciddi bir değişikliğe sebep olmazken, EPS değerlerini oldukça düşürmüştür. Buradaki düşüş konsantrasyon olarak değilde kütsel olarak ifade edilirse eğer, artan MLSS konsantrasyonu ile birim bakteri kütlesi başına düşen ağırlıkça EPS miktarı azalmıştır. Literatürde klasik MBR'larda yapılmış olan çalışmalarda, artan çamur yaşında EPS miktarının azaldığı belirtilir, çünkü çamur yaşı arttırıldığında bu sistemlerde MLSS konsantrasyonu da artar. Buna bağlı olarak, sabit organik yüklemde artan MLSS konsantrasyonunda F/M oranı düşer, bu da organik maddenin yetersiz olduğu ortamda, EPS'nin bakteri tarafından besin gibi kullanılmasına sebep olur [Ahmed et al., 2007]. Dolayısıyla artan çamur yaşında bakteri yüzeyindeki EPS konsantrasyonu da azalır. JLMBR sisteminde ise II nolu deney seti için, aynı anda çamur yaşının düşürülmesi buna karşın organik yüklemenin arttırılması, MLSS konsantrasyonunu arttırdığı için, EPS değerlerinde azalmaya sebep olmuştur.

**Göreceli hidrofobisite ve viskozite değişimi;** I nolu deney setinde, çamurun göreceli hidrofobisitesi  $6.8 \pm 3.6$  ve viskozitesi de  $1.8 \pm 0.3$  cP olarak ölçülmüştür. Viskozite değeri MLSS konsantrasyonunun düşük olmasından dolayı saf suya (1.0 cP) yakın bir değere sahip olmuştur. Hidrofobisite değerinin düşük olması çamurun hidrofilik yani suyu seven bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. JLMBR çamurunun çökme özelliklerinin kötü olmasının nedenlerinden birisi hidrofobisite değerinin düşük olmasıdır. Literatürde bakterinin ürettiği EPS'nin protein ve karbonhidrat içeriklerinin çamurun hidrofobisitesi üzerinde etkiye sahip olduğu belirtilmektedir [Drews, 2010]. Eğer EPS'nin karbonhidrat içeriği proteinden daha yüksek ise suyu seven özellikte çamur yapısı (düşük hidrofobisite), protein içeriği yüksek ise suyu sevmeyen yani daha hidrofobik (yüksek hidrofobisite) bir çamur yapısı oluşmaktadır. I nolu deney setinde EPS'nin karbonhidrat içeriğinin proteine göre daha yüksek çıkması, çamurun hidrofobisite değerinin de düşük olmasına neden olmuştur. II nolu deney setinde ise çamurun göreceli hidrofobisitesi  $50.9 \pm 3.2$  olarak ölçülmüştür. Hidrofobisite değeri I nolu deneye göre artış göstermiştir. Yani çamur ilk deneye göre hidrofobik özellik kazanmıştır. EPS ile hidrofobisite arasındaki ilişkiye dayanarak, bu dönemde EPS'nin artan protein içeriğinin hidrofobisitenin artmasında katkısı olduğu düşünülmektedir. Jin et al., çamurun hidrofobisitesi ile çökme özellikleri arasındaki ilişkiyi şu şekilde açıklamıştır; hidrofilik moleküller polar veya yüklü iken hidrofobik moleküller apolardır. Apolar moleküller polar moleküllere göre, su ile daha az karışırlar. Dolayısıyla çamurun hidrofobikliği, su içerisinde flokların bir arada tutunmalarını sağlar [Jin, et al., 2003]. JLMBR'deki çamurun, klasik MBR sistemlerine göre çok daha düşük hidrofobisite değerlerine sahip olması, çamurun çökme özelliklerinin kötü olmasını açıklamaktadır. II nolu deney setinde ilk deney setine göre çökme özellikleri daha iyi olmuştur. Bu deney setinde artan MLSS konsantrasyonu ile viskozitesi değeri de artmış ve  $4.6 \pm 1.2$  cP olarak ölçülmüştür.

**İstatiksel Analiz;** İki deney seti için günlük MLSS konsantrasyonu ile  $SMP_p$ ,  $SMP_c$ ,  $EPS_p$  ve  $EPS_c$  konsantrasyonları, hidrofobisite ve viskozite değerleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak ifade etmek için datalar arasında Pearson korelasyon analizi yapılmıştır. Sonuçlar, Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de I nolu deney setinin korelasyon analizinde, MLSS ile  $SMP_c$ , hidrofobisite ve

viskozite değerleri arasında pozitif,  $SMP_p$  ve EPS miktarları arasında negatif korelasyon olduğu görülmektedir. En yüksek korelasyon değerleri MLSS ile  $EPS_c$  (-0.521),  $SMP_c$  ile viskozite arasında (-0.509),  $EPS_p$  ile göreceli hidrofobisite arasında (-0.518), göreceli hidrofobisite ile viskozite arasında (0.580) olarak bulunmuştur. Çizelge 4.2’de II nolu deney setinin korelasyon analizinde, MLSS ile  $SMP_c$ ,  $SMP_p$ , hidrofobisite ve viskozite değerleri arasında pozitif, EPS miktarları arasında negatif korelasyon olduğu görülmektedir. En yüksek korelasyon değerleri MLSS ile  $EPS_p$  (-0.635),  $SMP_p$  ile arasında (0.613) ve göreceli hidrofobisite arasında (0.713) olarak bulunmuştur. Artan MLSS konsantrasyonu ile biyolojik parametreler arasındaki korelasyon değerleri artmıştır.

Çizelge 4.1. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki Pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:I).

	MLSS	$SMP_p$	$SMP_c$	$EPS_p$	$EPS_c$	HYD*	VIS**
MLSS	1	-0.008	0.208	-0.202	-0.521	0.384	0.290
$SMP_p$	-0.008	1	0.414	0.320	0.079	-0.11	-0.657
$SMP_c$	0.208	0.414	1	-0.044	-0.051	-0.058	-0.509
$EPS_p$	-0.202	0.320	-0.044	1	0.244	-0.518	-0.135
$EPS_c$	-0.521	0.079	-0.051	0.244	1	-0.241	0.144
HYD*	0.384	-0.11	-0.058	-0.518	-0.241	1	0.580
VIS**	0.290	-0.657	-0.509	-0.135	0.144	0.580	1

\*HYD:Göreceli hidrofobisite için kısaltma.

\*\*VIS:Viskozite için kısaltma.

Çizelge 4.2. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki Pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:II).

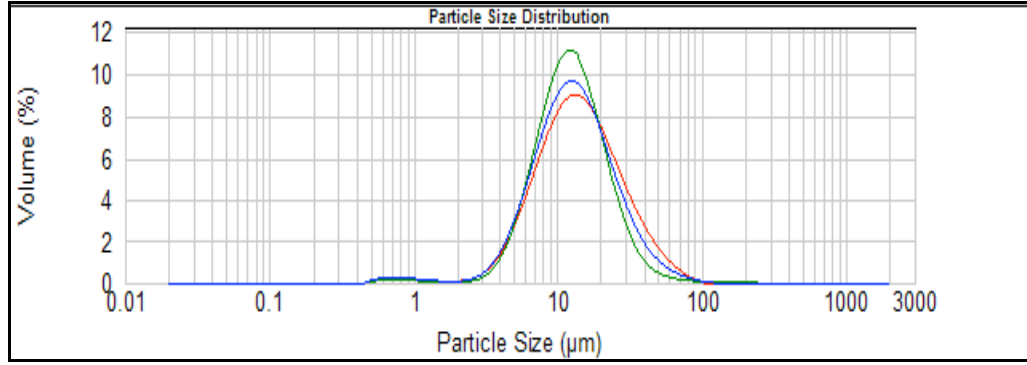
	MLSS	SMP <sub>p</sub>	SMP <sub>c</sub>	EPS <sub>p</sub>	EPS <sub>c</sub>	HYD*	VIS**
MLSS	1	0.613	0.306	-0.635	-0.182	0.703	0.472
SMP <sub>p</sub>	0.613	1	0.204	-0.334	0.213	-0.084	0.087
SMP <sub>c</sub>	0.306	0.204	1	0.027	0.289	0.296	-0.708
EPS <sub>p</sub>	-0.635	-0.334	0.027	1	0.026	-0.471	0.119
EPS <sub>c</sub>	-0.182	0.213	0.289	0.026	1	-0.130	0.128
HYD*	0.703	-0.084	0.296	-0.471	-0.130	1	0.022
VIS**	0.472	0.087	-0.708	0.119	0.128	0.022	1

\*HYD:Göreceli hidrofobisite için kısaltma.

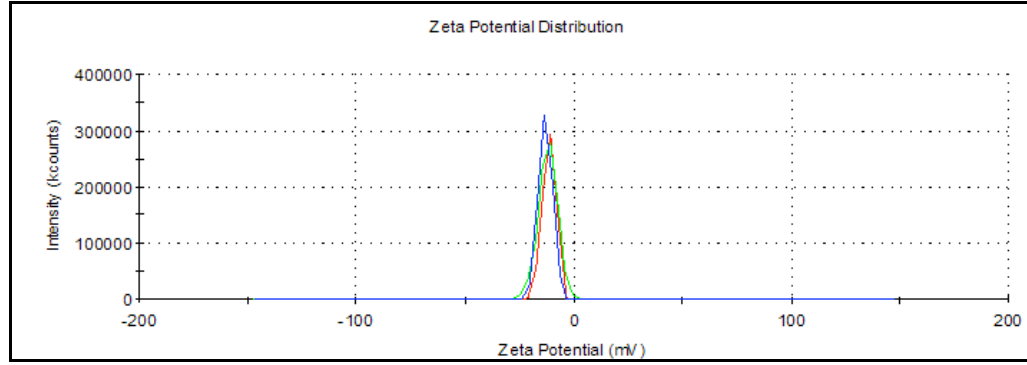
\*\*VIS:Viskozite için kısaltma.

**Partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli değişimi;** Membranların kirlenmesi ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda, çamurun partikül boyut dağılımının da kirlenmeyi etkileyen bir parametre olduğu ifade edilmektedir. Bu amaçla, reaktördeki biyolojik materyallerin (SMP, EPS) analizinin yanı sıra bu tez kapsamında çamurda, partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli analizleri de gerçekleştirilmiştir. I nolu deney setinde çamurda yapılmış olan partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli ölçüm sonuçları Şekil 4.9 (a-b)'de verilmiştir. Bu çalışma döneminde partikül boyut dağılımı 6.0-29.0 µm arasında dağılım gösterirken ortalama partikül boyutu 13.0 µm olarak ölçülmüştür. JLMBR'de çamurun reaktör içerisindeki sirkülasyonunu sağlayan yüksek hızlı pompalar çamur floklarının kırılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle partikül boyutu oldukça düşüktür. Çamurun zeta potansiyeli (-12.0) mV olarak ölçülmüştür. Bu çamurun negatif yüklü olduğunu göstermektedir. II nolu deney sistemindeki partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli ölçümünün sonuçları Şekil 4.10 (a-b)'de verilmiştir. Bu deney sisteminde artan MLSS konsantrasyonu ile partikül boyutu azalmıştır. Partikül boyutu 1.0-13.7 µm arasında değişirken, ortalama partikül boyutu 5.7 µm olarak ölçülmüştür. Çamurun zeta potansiyeli ise (-10.2) mV olarak ölçülmüştür. Zeta potansiyel değeri ilk deney sistemine göre artış göstermiştir. Klasik MBR sistemlerinde ortalama partikül boyutu 50-100 µm aralığındadır [Zhang et al., 2006, Wang et al.,2008]. Literatürde, JLMBR'de partikül boyut analizinin yapıldığı bir çalışma olmadığı için değerler klasik MBR sistemleri karşılaştırılırsa eğer, JLMBR'deki çamurun partikül boyutu oldukça düşüktür.



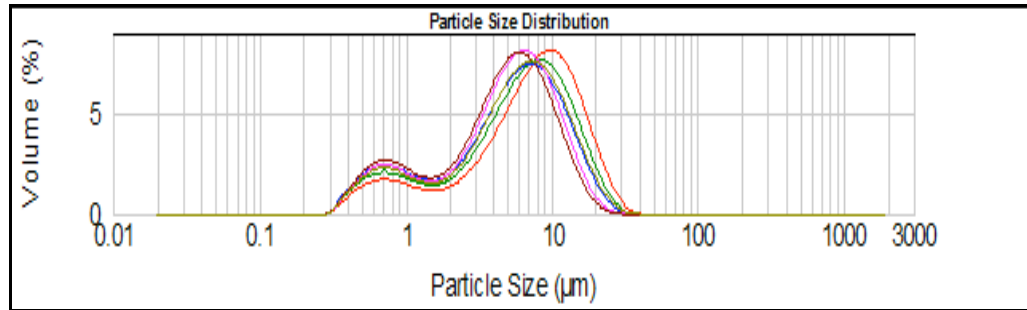


(a)

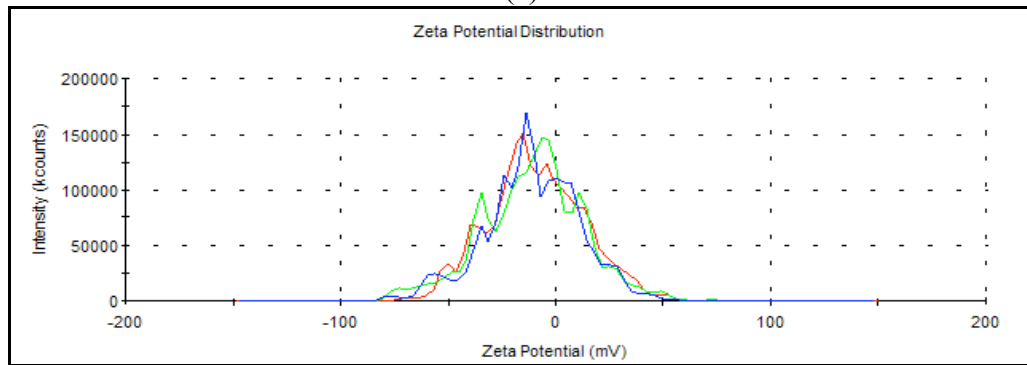


(b)

Şekil 4.9. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sistemindeki partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli analiz sonuçları (Deney Set:I) (a) Partikül boyut dağılımı (b) Zeta potansiyeli.



(a)



(b)

Şekil 4.10. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde JLMBR sistemindeki partikül boyut dağılımı ve zeta potansiyeli analiz sonuçları (Deney Set:II) (a) Partikül boyut dağılımı (b) Zeta potansiyeli.

Sonuç olarak azalan çamur yaşı ve artan organik yüklemde reaktördeki parametrelerin değişimi Çizelge 4.3’de sunulmuştur. Çamur yaşının azaltılması ve organik yüklemenin artırılmasıyla, MLSS ile göreceli hidrofobisite ve viskozite değerleri artmış, EPS miktarları ve partikül boyut dağılımı azalmıştır. SMP değerleri çok fazla değişmemiştir.

Çizelge 4.3. Farklı işletme şartlarında JLMBR sistemindeki parametrelerin deney setlerine göre ortalama değerleri.

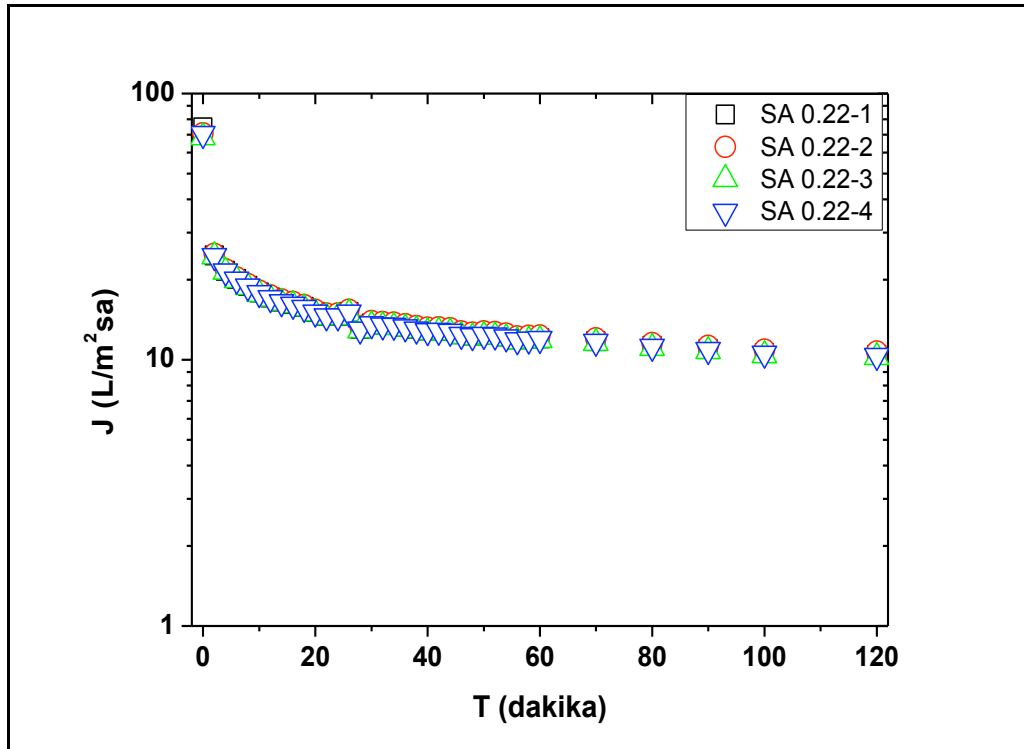
Parametre	Deney set: I	Deney set: II
KOİ <sub>giriş</sub> (mg/L)	1000±128	5100±230
KOİ giderim verimi (%)	95.5±2.3	98.9±0.2
MLSS (mg/L)	2347±344	10813±1687
F/M (kgKOİ/kgMLSSgün)	0.72	0.82
SMP <sub>p</sub> (mg/L)	32.1±16.3	24.9±9.0
SMP <sub>c</sub> (mg/L)	18.2±4.1	16.8±6.7
EPS <sub>p</sub> (mgprotein/gMLSS)	31.6±17.0	19.8±4.6
EPS <sub>c</sub> (mgkarbonhidrat/gMLSS)	46.7±13.8	15.7±4.3
Göreceli hidrofobisite (%)	6.8±3.6	50.9±3.2
Viskozite (cP)	1.8±0.3	4.6±1.2
Partikül boyut dağılımı (µm)	6.0-29.0	1.0-13.7
Zeta potansiyeli (mV)	(-12.0)	(-10.2)

#### 4.1.2. Batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutunun etkisinin araştırılması

##### 4.1.2.1. Membran tipi ve gözenek boyutunun akı değişimlerine etkisinin incelenmesi

Batık membran deneylerinde farklı membranların denenmesine başlamadan önce membran modüllerinin şekli ve tank içerisindeki yerleşimlerinden doğacak farklılıkları gözlemlemek için bütün modüllere 0.22 µm gözenek boyutuna sahip SA membranlar yerleştirilmiş ve akı değerleri 120 dakika takip edilmiştir. Bu deneye ait

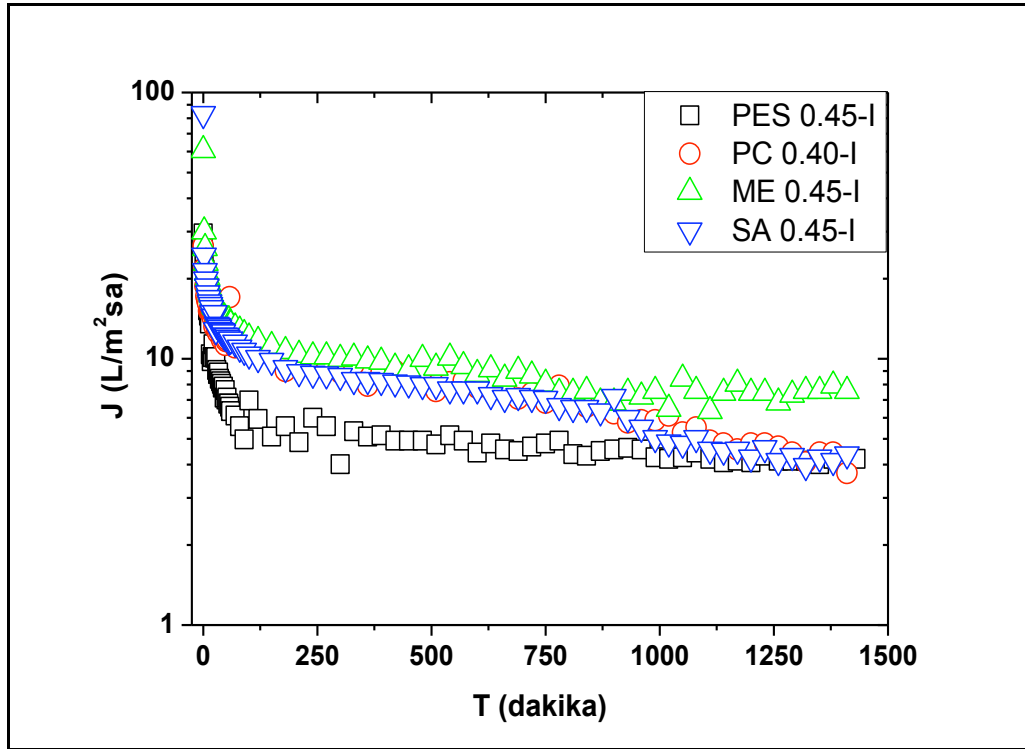
akı-zaman grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, membranların yerleştirildiği modüllerin yapılarından veya JLMBR’nin ara tankına yerleştirilmelerinden kaynaklanabilecek deneysel hatalar gözlenmemiştir. Kullanılan bütün modüller aynı özellikte yaptırılmış ve ara tankın içerisinde de homojen karışan bir çamur ortamında filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.



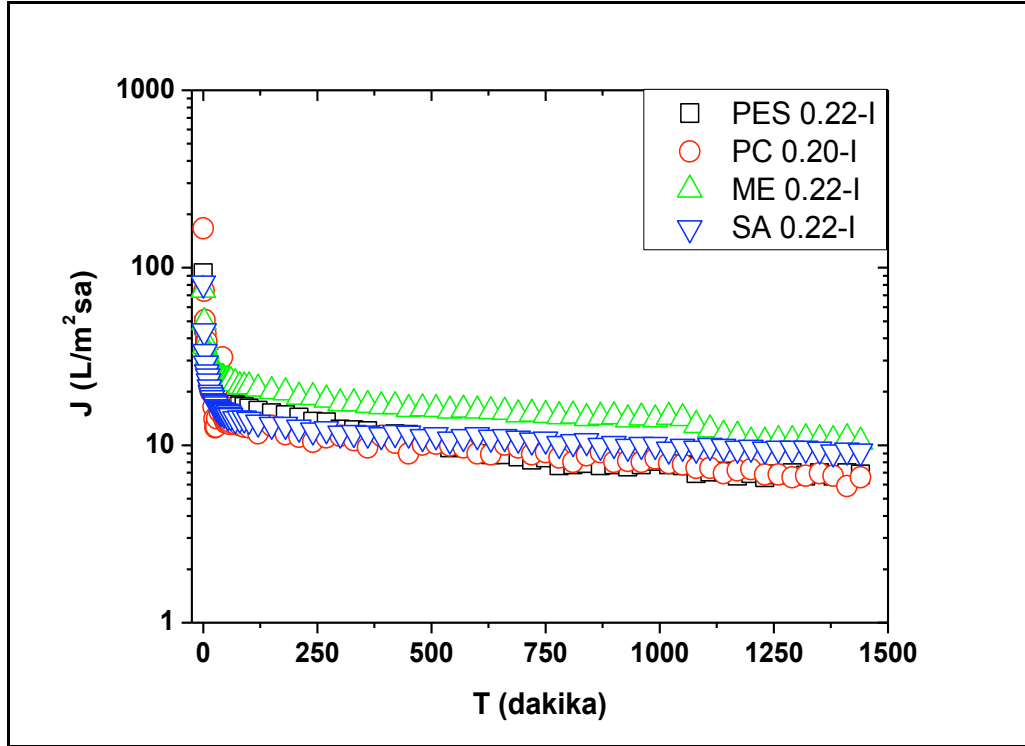
Şekil 4.11. Batık membran modüllerinin aynı membran tipi ile denenmesi.

Bu deneyden sonra, I nolu deney setinin batık membran deneylerinin yapılması için, modüllere dört farklı  $0.45 \mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip membranlar yerleştirilmiş ve ilk batık membran filtrasyon deneyi başlatılmıştır. Deneylere daha sonra  $0.22$  ve  $0.10 \mu\text{m}$  gözenekli membranlarla devam edilmiştir. Batık membran sisteminde gerçekleştirilmiş olan 24 saatlik filtrasyonun sonucunda elde edilmiş olan akı-zaman grafikleri Şekil 4.12 (a-c)’de verilmiştir. Filtrasyonun ilk 30 dakikasında akıda hızlı bir düşüş gerçekleşmiştir. Daha sonra akıdaki düşüş yavaşlayarak dengeye ulaşmıştır. Filtrasyonun sonlarında bütün membran tiplerinde genel olarak denge akı değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Çizelge 4.4’den bu deney setine ait membranların  $J_0$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerine bakıldığında; bu deney setinde en yüksek  $J_0$   $0.10 \mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda,  $J_d$  değerleri ise  $0.22 \mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda gözlenmiştir.  $0.45 \mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranların  $J_0$ ,  $J_d$  ve  $V_t$

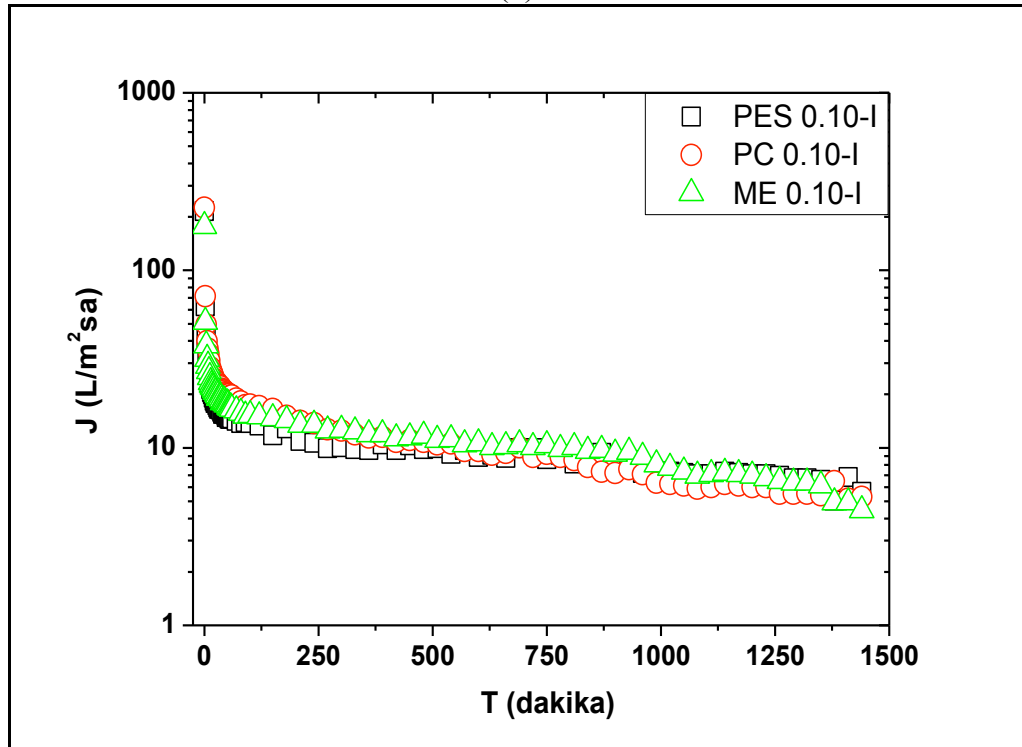
değerleri en düşük olmuştur. En yüksek  $J_0$  değeri ( $226 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) PC 0.10, en yüksek  $J_d$  değeri ( $11 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) ve  $V_t$  değeri ( $1811 \text{ cm}^3$ ) ME 0.22 membranlarda elde edilmiştir. En yüksek FDR değeri (%97.6) PC 0.10, en düşük FDR (%82.6) değeri PC 0.40 membranda hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre I nolu deney setinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.22, en kötü performansı gösteren membran ise PES 0.45 membranlar olmuştur.



(a)



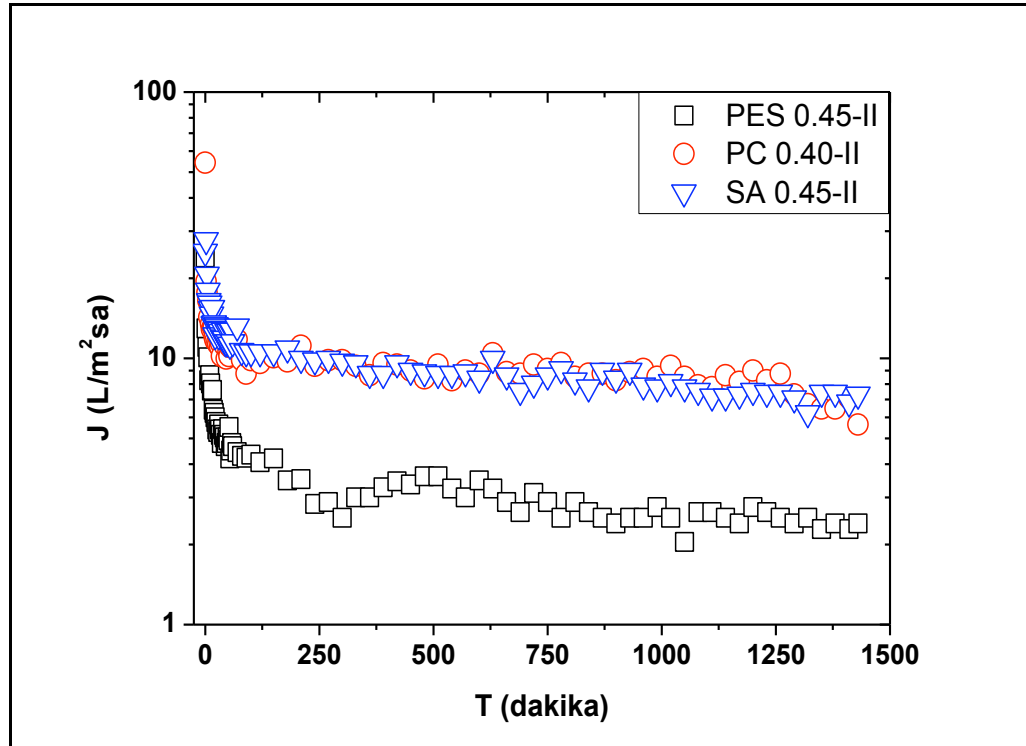
(b)



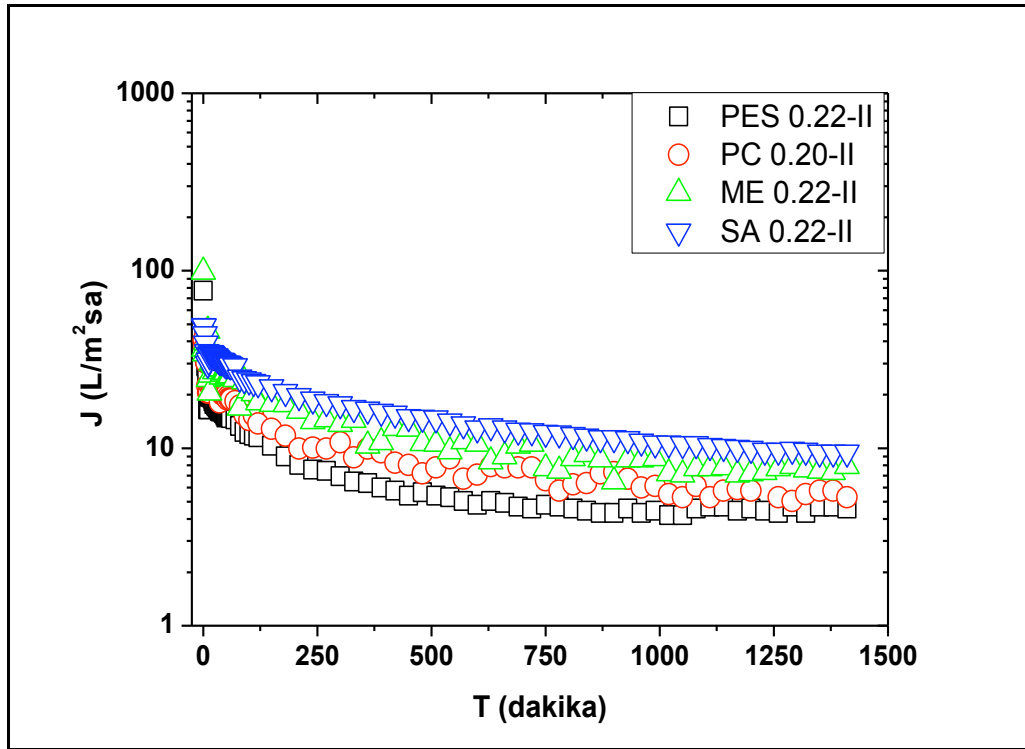
(c)

Şekil 4.12. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45 µm gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22 µm gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10 µm gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:1).

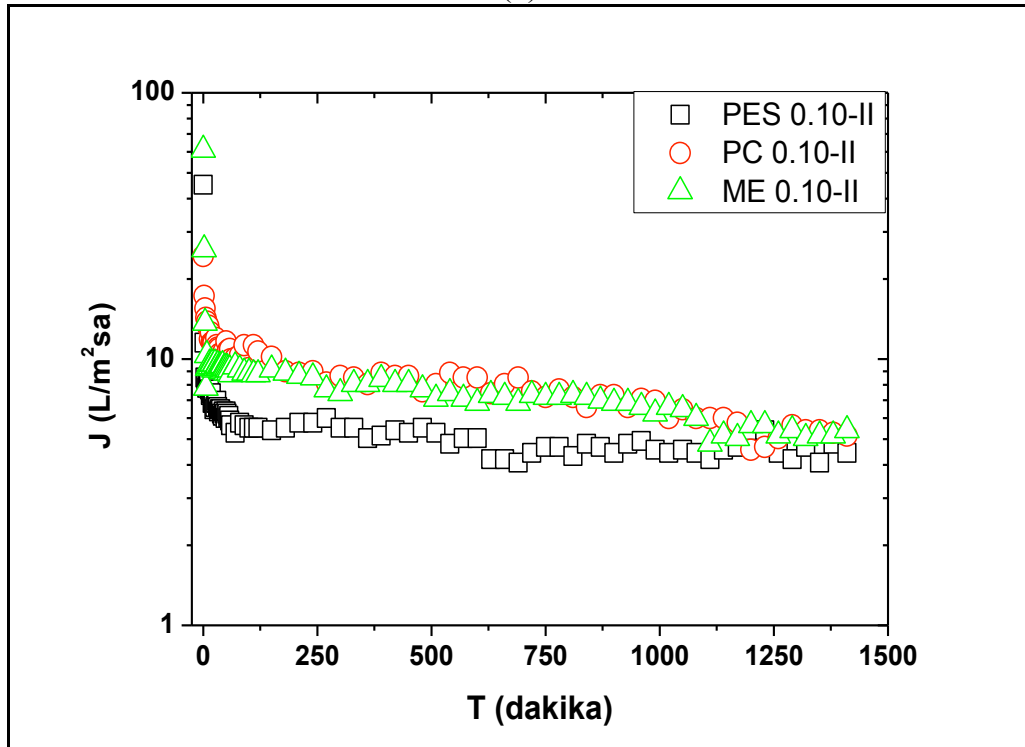
II nolu deney setindeki batık membran deneyleri, ilk deney setinde kullanılan membranlar ile gerçekleştirilmiştir. Sadece 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip ME membranın alımında bir sorun olduğu için bu deneylerde kullanılamamıştır. Deneyler yine 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlardan 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlara doğru gerçekleştirilmiştir. Bu deney setine ait akı-zaman grafikleri Şekil 4.13 (a-c)'de verilmiştir. Bu deney sisteminde de filtrasyonun sonlarında bütün membran tiplerinde denge akı değerleri birbirine yakın çıkmıştır. İlk deney setinden daha düşük akı değerleri elde edilmiştir. Çizelge 4.4'den bu deney setine ait membranların  $J_0$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerine bakıldığında; bu deney setinde membranlar arasındaki farklılıklar gözenek boyutlarına göre değil malzemenin tipine göre olmuştur. Örneğin, en yüksek denge akıları 0.45 ve 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip membranlarda SA membranda, 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutunda ME membranda elde edilmiştir. En yüksek  $J_0$  değeri (98  $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ ) ME 0.22, en yüksek  $J_d$  değeri (10  $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ ) ve  $V_t$  değeri (1727  $\text{cm}^3$ ) SA 0.22 membranlarda elde edilmiştir. İlk akı değerleri ilk deney setine göre düşmüştür. En yüksek FDR değeri (%94.4) PC 0.20, en düşük FDR (%82.0) değeri PES 0.10 membranda hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre bu deney setinde en iyi performansı gösteren membran SA 0.22, en kötü performansı gösteren membran ise PES 0.45 membranlar olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.13. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:II).

İki deney setinin batık membran filtrasyon performansları karşılaştırıldığında; II nolu deney setinde, PC 0.40, SA 0.45 ve SA 0.22 membranlar hariç denge akı değerleri ilk deney setine göre düşmüştür. Süzüntü hacimlerine bakıldığında, II nolu deney sisteminde özellikle 0.1 µm gözenek boyutundaki membranlarda hacimler düşmüştür. II nolu deney setinde, ilk deney setine göre artış gösteren parametreler MLSS, hidrofobisite ve viskozitedir. Azalan parametreler ise  $EPS_p$  ve  $EPS_c$  konsantrasyonlarıdır. SMP konsantrasyonlarında çok bir değişiklik olmamıştır. Bu parametrelerin membran biyokirlenmesine olan etkilerinin incelendiği çalışmalarda, düşük çamur yaşında SMP ve EPS miktarları fazla olduğunda, filtrasyon performansının düştüğü belirtilmiştir [Al-Halbouni et al., 2008]. Aynı zamanda hidrofobisite ve viskozite değerlerinin artmasının da kirlenmeyi arttırdığı bulunmuştur [Meng et al., 2006]. Bu sonuçlara göre II nolu deney setindeki batık membran filtrasyon performansının düşmesine sebep olan parametreler MLSS, hidrofobisite ve viskozite değerlerinin artması,  $EPS_p$  ve  $EPS_c$  değerlerinin düşmesidir. Düşük  $EPS_p$  ve  $EPS_c$  değerlerinde küçük partiküllerin membran yüzeyini tıkaması daha kolay olmaktadır.



Çizelge 4.4. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sistemine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:I-II).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$J_0^*$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )		$J_d^{**}$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )		FDR (%)		$V_t^{***}$ ( $\text{cm}^3$ )	
		I	II	I	II	I	II	I	II
PES	0.45	30	24	4	3	85.8	89.5	594	328
PC	0.40	27	54	5	7	82.6	86.9	892	1063
ME	0.45	61	-	8	-	87.5	-	1061	-
SA	0.45	83	28	4	7	94.9	90.6	876	1038
PES	0.22	93	77	7	5	92.7	88.9	1138	741
PC	0.20	166	41	7	6	96.0	94.4	1144	1001
ME	0.22	75	98	11	7	85.8	85.5	1811	1333
SA	0.22	82	49	9	10	88.5	78.7	1327	1727
PES	0.10	215	45	6	4	97.4	82.0	1132	589
PC	0.10	226	24	5	5	97.6	91.5	1182	900
ME	0.10	177	61	6	5	96.7	91.3	1228	845

$J_0^*$  : Filtrasyon deneylerinde membranların ilk akı değerini ifade etmektedir.

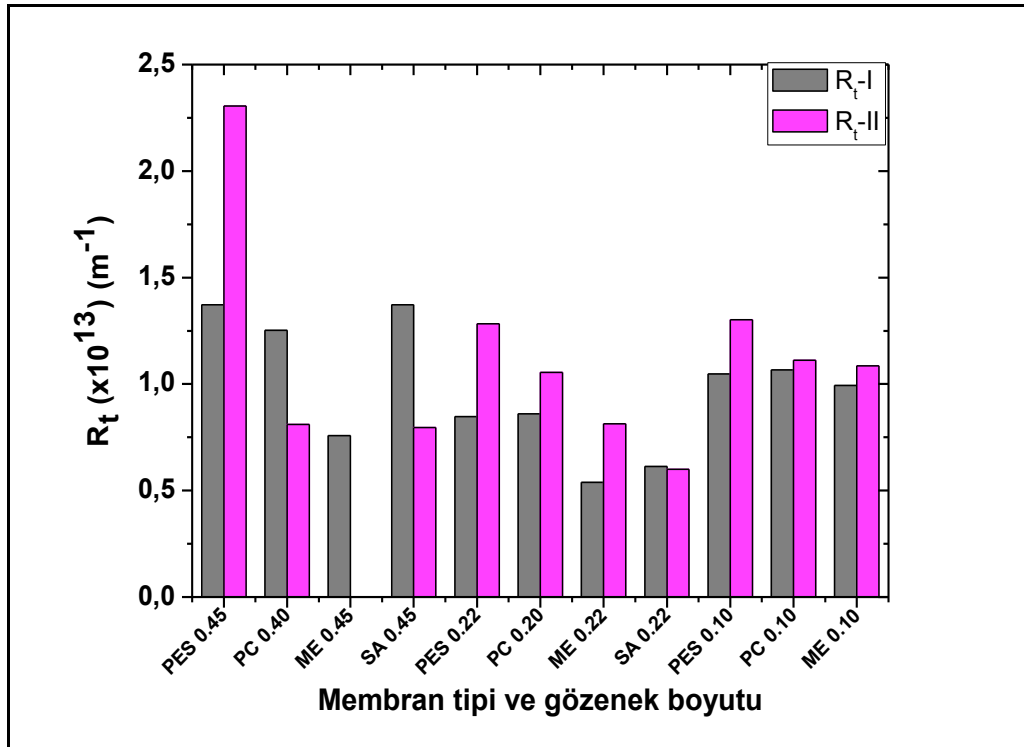
$J_d^{**}$  : Filtrasyonun son 1 saatindeki akı değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.

$V_t^{***}$  : 24 saatlik filtrasyon sonunda toplanan süzüntü hacmini ifade etmektedir.

#### 4.1.2.2. Membran tipi ve gözenek boyutunun filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi

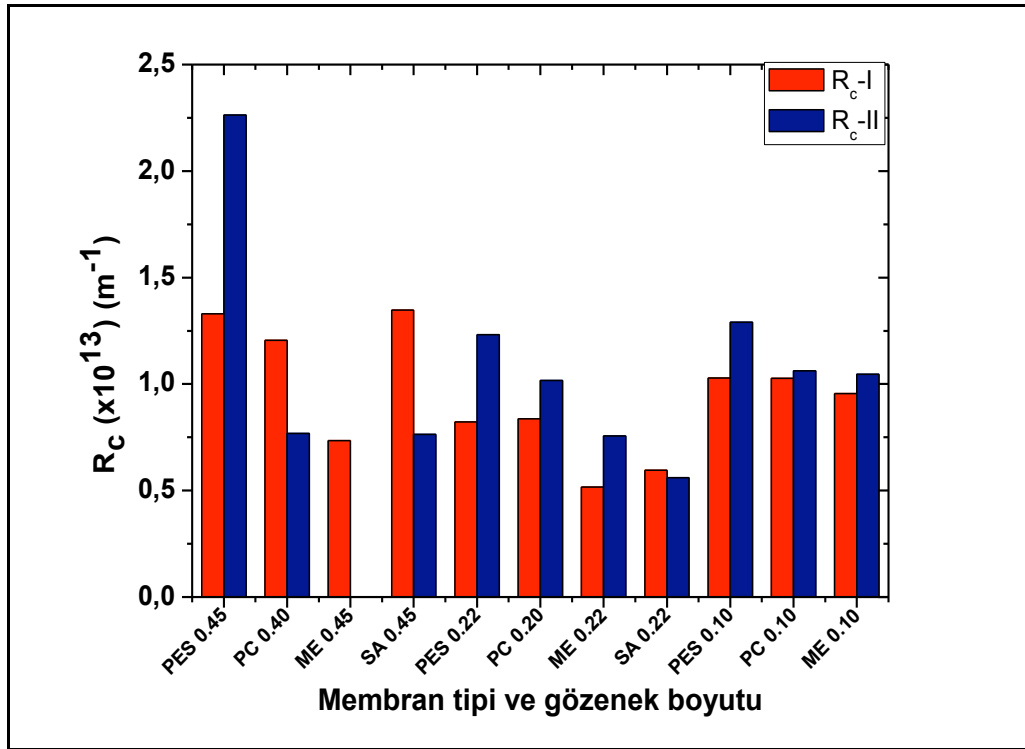
Farklı işletim şartlarında çalıştırılmış olan JLMBR sistemindeki çamurun batık membran filtrasyon deneylerinden hesaplanmış olan direnç değerleri grafik ve çizelge olarak verilmiştir. İki deney seti için hesaplanmış olan  $R_t$ ,  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin grafiği birlikte çizilmiştir. Bu şekilde organik yüklemenin artması ve çamur yaşının düşürülmesi ile direnç değerlerinin değişimi takip edilebilmektedir. Toplam direnç değerleri ( $R_t$ ) çamur filtrasyonunun son 1 saatindeki akı değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Kek ( $R_c$ ) ve gözenek dirençleri ( $R_p$ ) membranların fiziksel olarak temizlenmesinden sonra saf suyun filtrasyonunda elde edilmiş denge akı değerleri ile hesaplanmıştır.

Deney setlerinin  $R_t$  değerleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi I nolu deney setinde, 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip membranların direnç değerleri diğer membranlara göre daha düşük olmuştur. Akı değerleri ve toplanan süzüntü hacimlerinde en yüksek 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip membranlarda gözlenmiş olması nedeniyle I nolu deney setinde, JLMBR çamurunun batık membran filtrasyonu için en uygun membranların 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip membranlar olduğu söylenebilir. II nolu deney setinin  $R_t$  değerleri ilk deney setine göre artış göstermiştir. En yüksek  $R_t$  değerleri ilk deney sistemine benzer şekilde, PES membranlarda gözlenmiştir. Çizelge 'den membranların  $R_t$  değerlerine bakıldığında; I nolu deney setinde en yüksek  $R_t$  değerine ( $1.4 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES ve SA 0.45 membranlar, II nolu deney setlerinde ise en yüksek  $R_t$  değerine ( $2.31 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.45 membran sahip olmuştur.

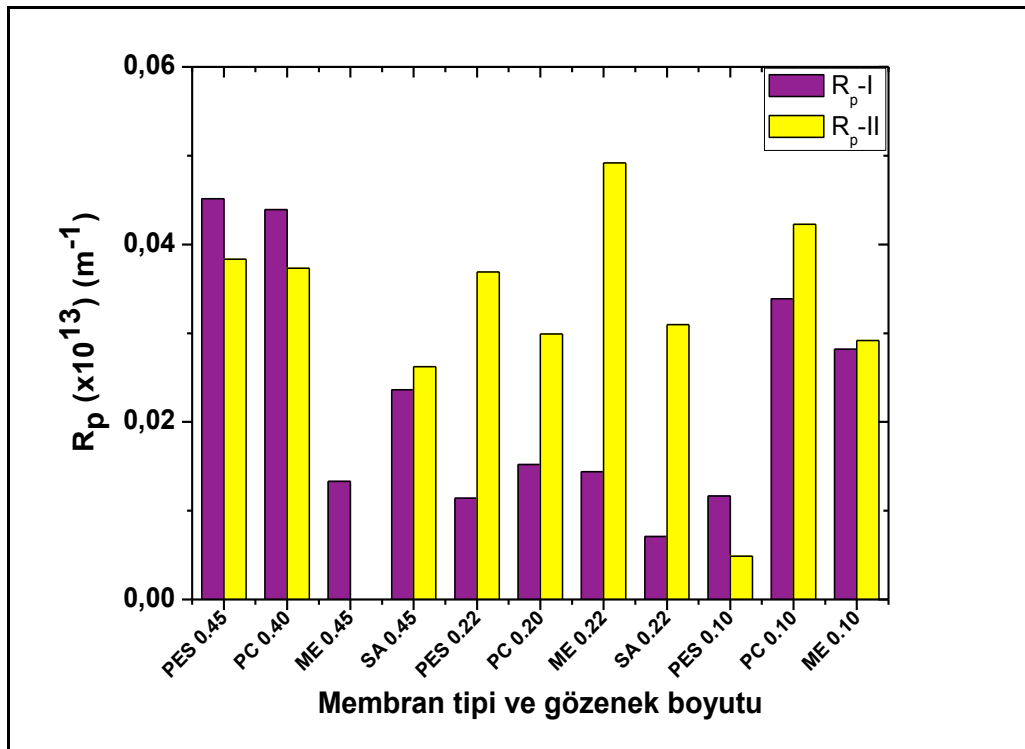


Şekil 4.14. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerlerinin birlikte gösterimi (Deney Set: I-II).

Şekil 4.15 (a-b)'de ise deney setlerinde kullanılan membranların gözenek ve kek direnç değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.15 (a)'da görülebileceği gibi, I nolu deney setinde, toplam dirence benzer şekilde kek dirençleri en düşük 0.22  $\mu\text{m}$ 'lik membranlarda elde edilmiştir. Gözenek dirençleri kek direncinin yanında ihmal edilebilir seviyede olmasına rağmen, 0.45  $\mu\text{m}$ 'lik membranlarda diğer membranlara göre daha yüksek olmuştur. İkinci deney setinde, MLSS konsantrasyonunun artması nedeniyle membran yüzeyinde daha fazla partikülün birikmesi, kek tabakasının etkisini de arttırmıştır. Oluşan bu ikincil membran tabakası da membranın gözenek boyutunun etkisini azaltmıştır. Dolayısıyla II nolu deney setinde membranların gözenek boyutunun etkisi ilk deney setine göre daha az olmuştur. Çizelge 'den membranların  $R_c$  değerlerine bakıldığında; I nolu deney setinde en yüksek  $R_c$  değerine ( $1.3 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES ve SA 0.45 membranlar, II deney setinde ise en yüksek  $R_c$  değerine ( $2.26 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.45 membran sahip olmuştur.  $R_p$  değerlerine bakıldığında; I nolu deney setinde en yüksek  $R_p$  değerine ( $0.045 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.45 membran ve II nolu deney setinde ise en yüksek  $R_p$  değerine ( $0.049 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.10 membran sahip olmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.15 Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyonuna ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin birlikte gösterimi (a)  $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (Deney Set: I-II).

İki deney seti için MFI ve  $\alpha$  değerlerine bakıldığında artan MLSS konsantrasyonu ile membranların MFI değerleri, 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda PES 0.45 membran hariç ve 0.2  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda artmış, 0.1  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda ise ME 0.10 hariç diğer membranlarda azalmıştır. Membranların  $\alpha$  (spesifik kek direnci) değerlerine bakıldığında, PES 0.45 membran hariç diğer membranlarda MLSS konsantrasyonunun artması ile azalmıştır. Membranların yüzeyinde oluşan dinamik membran tabakasının özelliğini veren en önemli parametre  $\alpha$  (spesifik kek direnci) değeridir.  $\alpha$  değeri bütün sistem parametrelerini sabit tutarak membranların kirlenme özelliklerini kıyaslamayı sağlar. Kek tabakasında biriken madde miktarının yanı sıra kek tabakasının boşluk oranı da  $\alpha$  değerlerini etkiler. II nolu deney sisteminde  $\alpha$  değerlerinin düşük olması, bu deney setinde membran yüzeyinde biriken kek tabakasının boşluk oranının daha fazla olduğunu göstermektedir. II nolu deney sisteminde MLSS konsantrasyonunun artması, bununla birlikte, kek tabakasının daha sulu olmasına sebep olan EPS birikimi membran yüzeylerinde daha fazla boşluk oranına sahip kek tabakasının oluşmasına sebep olmuştur. I nolu deney setinde en yüksek  $\alpha$  değeri ( $3.2 \times 10^{13}$  m/kg) SA 0.45 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.36 \times 10^{13}$  m/kg) SA 0.22 membranda elde edilmiştir. II nolu deney setinde en yüksek  $\alpha$  değeri ( $4.7 \times 10^{13}$  m/kg) PES 0.45 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.09 \times 10^{13}$  m/kg) PC 0.40 membranda elde edilmiştir.

#### **4.1.2.3. Membran yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki analiz sonuçlarının değerlendirilmesi**

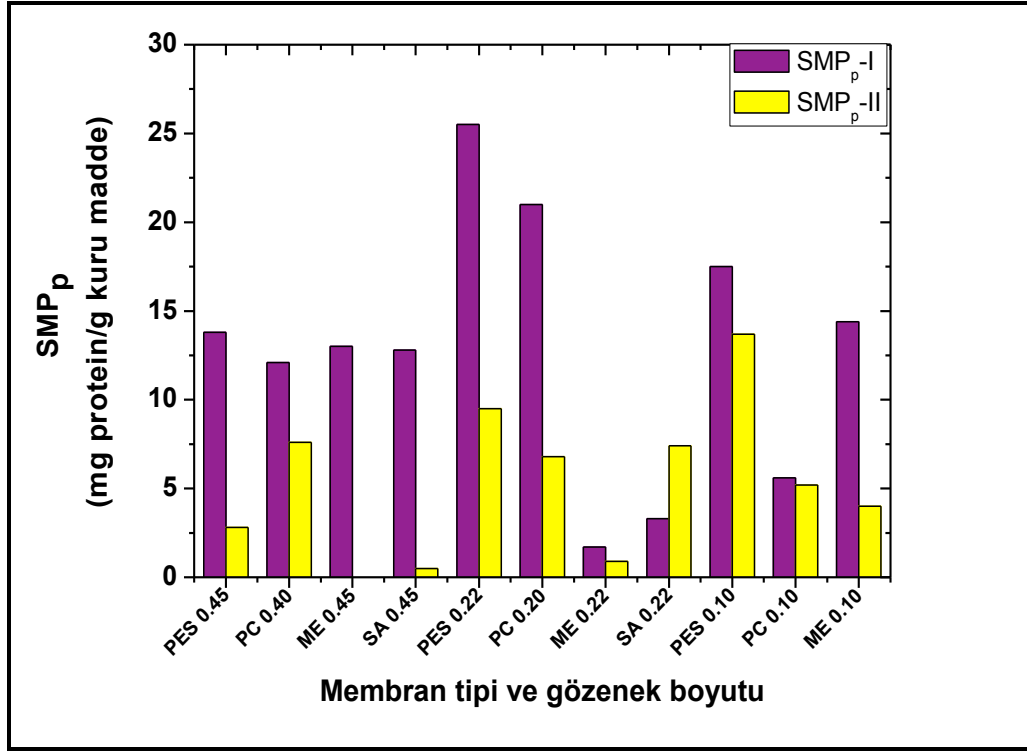
İki deney seti için gerçekleştirilmiş olan batık membran filtrasyon deneylerinde elde edilen akı ve direnç değerlerine bakıldığında, deneylerin aynı çamur ortamında yapılmış olmasına rağmen, membranların filtrasyon performansları arasında farklılıklar görülmektedir. Bu farklılığın sebebini bulmak için, membran yüzeyinde oluşmuş olan sabit kek tabakasında SMP, EPS ve su içeriği analizleri yapılmıştır. SMP ve EPS analizlerinin sonuçları yine protein ve karbonhidrat cinsinden, mg/L olarak ölçülmüş, su içeriği analizinden elde edilmiş çamurun MLSS değerine oranlanarak mg protein veya karbonhidrat/g MLSS olarak verilmiştir. İki deney sisteminin, SMP ve EPS analizlerinin sonuçları grafiksel olarak Şekil 4.16 (a-b) ve

4.17 (a-b)'de sunulmuştur. İki sistem içinde membran yüzeylerindeki SMP ve EPS miktarları membran tipine ve gözenek boyutuna göre farklılık göstermiştir. Bunun iki nedeninin olduğu düşünülmektedir. Birincisi, membranlar filtre edilecek çamur ortamına daldırıldıkları anda ortamda bulunan bakteriler membranın yapısına bağlı olarak membran yüzeyini kaplayacaklardır. Oluşan bu ilk bağlanmada, bakteri türleri ile membran tipi arasındaki etkileşim kuvvetlerinin farklı olması nedeniyle, hem bakteri çeşitliliği hem de üretilecek olan bakteriyel ürünlerin (SMP ve EPS) miktarları ve protein/karbonhidrat oranları da farklı olacaktır. Bu farklılığın ikinci nedeni olarak, filtre edilecek ortamda bulunan SMP bileşenleri, filtrasyon sırasında membran yüzeyinde birikecek ve bir tabaka oluşturacaktır. Aynı zamanda yüzeyde biriken bakteri, miktarına ve çeşitliliğine bağlı olarak SMP'yi besin olarak kullanacaktır. Bunun sonucunda, membran yüzeyinde bakterilerin bir kısmı SMP'yi hızlıca tüketirken, bir kısmı yavaş tüketecektir. Buna bağlı olarak, bakterinin EPS üretimi de değişiklik gösterecektir. Bu nedenlerden dolayı, membranlar aynı MLSS, SMP ve EPS miktarına sahip çamur ortamında kullanılmış olmalarına rağmen yüzeyde biriken bileşenlerin konsantrasyonları birbirlerinden farklı olmuştur.

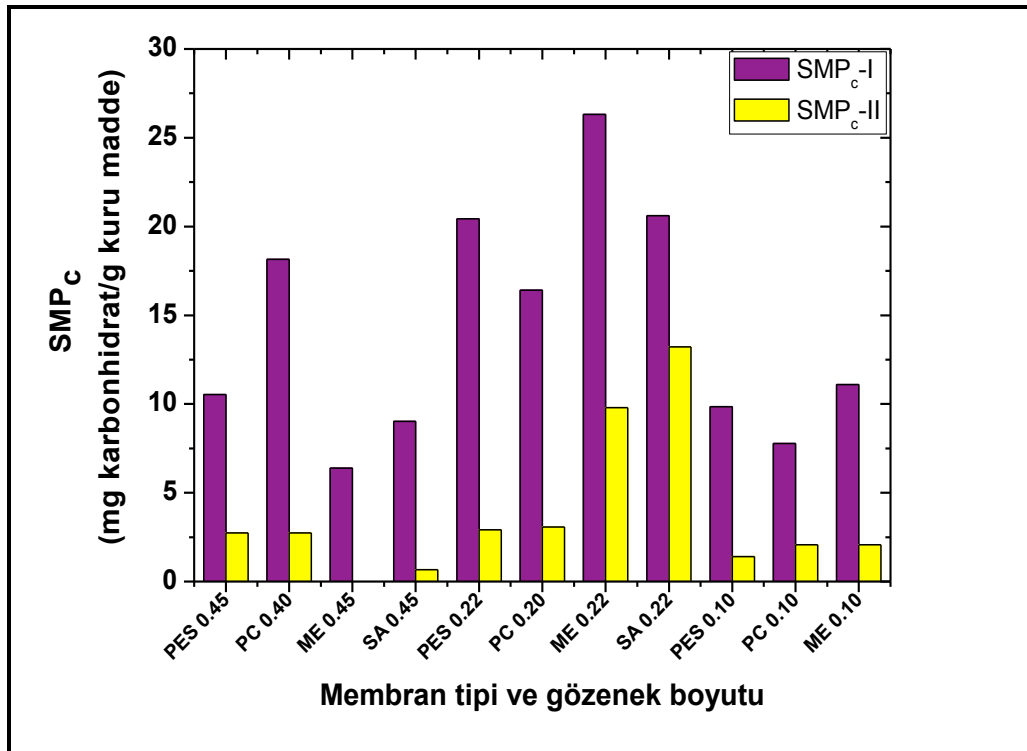
İki deney sisteminde kek tabakasındaki SMP değerlerine bakıldığında, Şekil 4.16 (a) ve (b)'den görülebileceği gibi kek tabakasındaki  $SMP_p$  ve  $SMP_c$  miktarları ilk deney setinde ikinci deney setine göre çok daha fazla çıkmıştır. Reaktör ilk deney setinde düşük organik yükleme ile sonsuz çamur yaşında çalıştırılmıştır. Reaktörden hiç çamur atılmadığı için ortamdaki bakteriler oldukça fazla hücre dışı materyaller salgılamışlardır. Bu nedenle membran yüzeylerinde I nolu deney setinde SMP miktarları daha fazla olmuştur. I nolu deney setinde,  $SMP_p$ 'nin en çok birikim yaptığı membran PES 0.22 en düşük ME 0.22,  $SMP_c$ 'nin en çok birikim yaptığı membran ME 0.22 en düşük ME 0.45 membran olmuştur. II nolu deney setinde ise  $SMP_p$ 'nin en çok birikim yaptığı membran PES 0.10 en düşük SA 0.45,  $SMP_c$ 'nin en çok birikim yaptığı SA 0.22, en düşük SA 0.45 membranlar olmuştur.

Çizelge 4.5. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda hesaplanmış olan spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ) ve gözenek ( $R_p$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:I-II).

Membran tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	MFI ( $\times 10^6$ )		$(\alpha)$ Spesifik kek direnci ( $\text{m/kg})\times 10^{13}$		$R$ ( $\times 10^{13}$ ) ( $\text{m}^{-1}$ ) (%)							
		I	II	$\alpha$ -I	$\alpha$ -II	$R_t$ -I	$R_t$ -II	$R_m$ -I	$R_m$ -II	$R_p$ -I	$R_p$ -II	$R_c$ -I	$R_c$ -II
PES	0.45	1.58	15.9	2.2	4.7	1.4	2.31	0.005 (0.4)	0.005 (0.2)	0.045 (3.3)	0.038 (1.7)	1.3 (97.0)	2.26 (98.1)
PC	0.40	1.85	0.32	2.5	0.09	1.3	0.81	0.005 (0.4)	0.005 (0.7)	0.044 (3.5)	0.037 (4.6)	1.2 (96.3)	0.8 (94.7)
ME	0.45	0.47	-	0.65	-	0.76	-	0.006 (0.8)	-	0.013 (1.8)	-	0.73 (96.9)	-
SA	0.45	2.32	0.52	3.2	0.15	1.4	0.8	0.005 (0.4)	0.005 (0.6)	0.024 (1.7)	0.026 (3.3)	1.3 (98.3)	0.76 (96.1)
PES	0.22	0.86	1.86	1.2	0.55	0.85	1.28	0.01 (1.7)	0.01 (1.1)	0.011 (1.3)	0.037 (2.9)	0.82 (97.1)	1.23 (96.0)
PC	0.20	0.80	1.31	1.1	0.39	0.86	1.05	0.009 (1.0)	0.009 (0.8)	0.015 (1.8)	0.029 (2.8)	0.84 (97.3)	1.02 (96.3)
ME	0.22	0.32	0.79	0.44	0.23	0.54	0.81	0.007 (1.2)	0.007 (0.8)	0.014 (2.7)	0.049 (6.1)	0.52 (95.8)	0.76 (93.1)
SA	0.22	0.27	0.41	0.36	0.12	0.61	0.6	0.008 (1.2)	0.008 (1.3)	0.007 (1.2)	0.031 (5.2)	0.6 (97.2)	0.56 (93.6)
PES	0.10	0.88	0.88	1.2	0.26	1.0	1.3	0.007 (0.7)	0.007 (0.6)	0.012 (1.1)	0.049 (0.4)	1.0 (98.2)	1.29 (99.1)
PC	0.10	1.4	1.29	1.9	0.38	1.1	1.11	0.007 (0.7)	0.007 (0.6)	0.034 (3.2)	0.042 (3.8)	1.0 (96.2)	1.06 (95.6)
ME	0.10	1.1	1.26	1.5	0.37	0.99	1.08	0.009 (0.9)	0.009 (0.9)	0.028 (2.8)	0.029 (2.7)	0.96 (96.3)	1.05 (96.4)



(a)



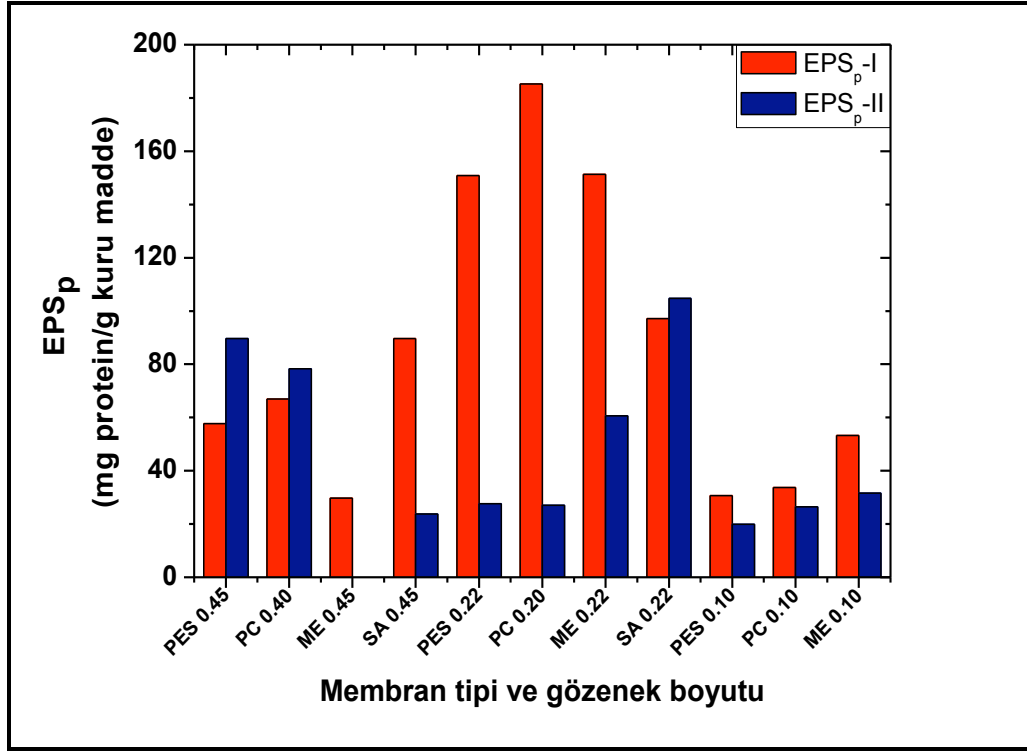
(b)

Şekil 4.16. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membran yüzeyindeki kek tabakasındaki SMP analizlerinin sonuçları (Deney No:I-II) (a) SMP<sub>p</sub> değerleri (b) SMP<sub>c</sub> değerleri.

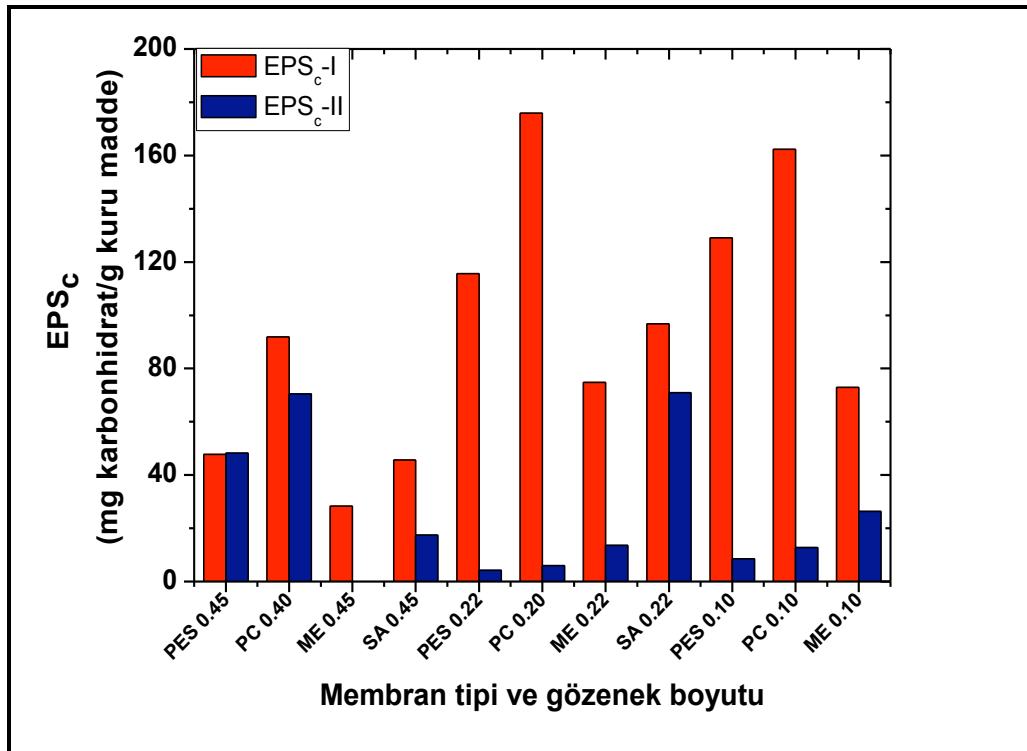


Kek tabakasında yapılmış olan EPS analiz sonuçlarına bakıldığında, Şekil 4.17 (a) ve (b)'den görülebileceği gibi kek tabakasındaki EPS miktarları da ilk deney setinde ikinci deney setine göre oldukça fazla olmuştur. I nolu deney setinde  $EPS_p$  ve  $EPS_c$ 'nin en çok birikim yaptığı membran PC 0.20, en düşük ME 0.45 olmuştur. II nolu deney setinde ise  $EPS_p$ 'nin en çok birikim yaptığı membran SA 0.22, en düşük PES 0.10 ve  $EPS_c$ 'nin en çok birikim yaptığı membran PC 0.4, en düşük PES 0.22 membran olmuştur.

Görüldüğü gibi, iki deney sisteminde de SMP ve EPS'nin biriktiği veya diğer bir deyişle tercih ettiği membran farklı olmuştur. Konuyla ilgili benzer bir çalışmada, PE (polietilen) ve PVDF (polivinilflorid) membranlar aynı çamur ortamında kullanılmışlar, filtrasyon sonunda membran yüzeyinde yapılan analizlerde bakteriyel ürün miktarlarının farklı olduğunu bulmuşlardır [Yamoto et al., 2006]. Membranların, çamurun içerisindeki bakterilerin salgıladığı organik maddelere olan ilgisinin değişim gösterdiğini belirtmişlerdir. Membranların denge akı değerleri benzer çıkmasına rağmen,  $\alpha$  değerlerinin farklı çıkması membran yüzeyinde biriken kek tabakasının özelliğinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Kek tabakasında yapılan SMP ve EPS analizleri de bu tabakanın özelliklerinin membran tipine göre değiştiğini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.17. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran sisteminde membran yüzeyindeki kek tabakasındaki EPS analizlerinin sonuçları (Deney No:I-II)

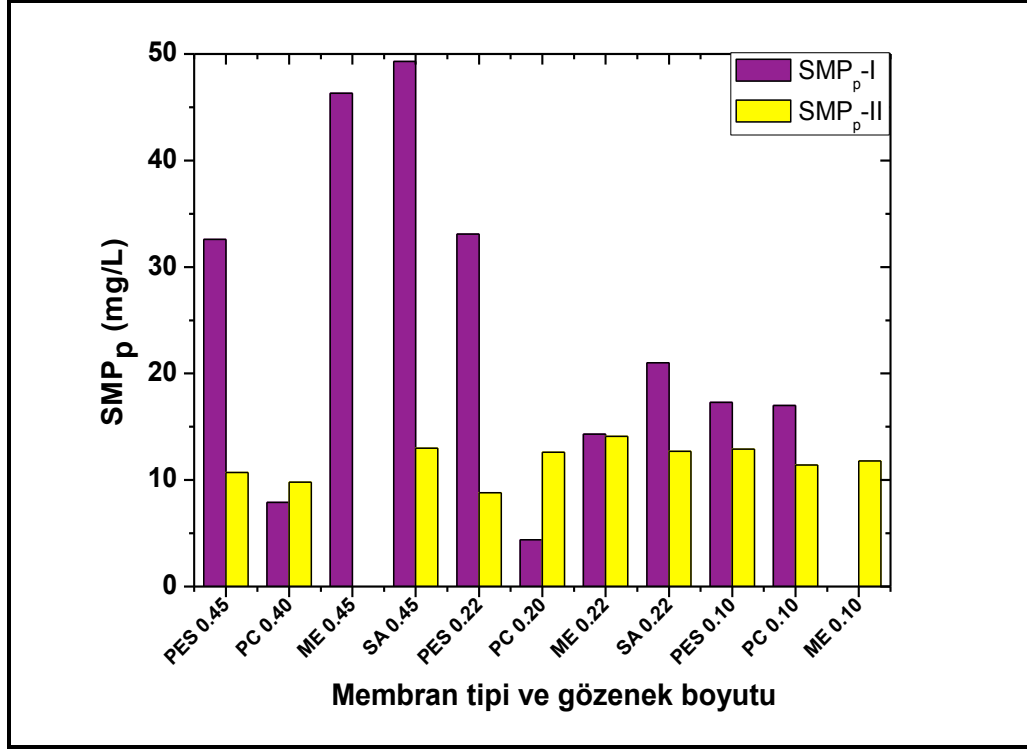
(a) EPS<sub>p</sub> değerleri (b) EPS<sub>c</sub> değerleri.

Genel olarak bakıldığında, ilk deney setinde ME membranların SMP'ye karşı, PC membranların da EPS'ye karşı ilgileri diğer membranlara göre daha yüksek olmuştur. PC membran, ME membrana göre daha hidrofobik bir yapıya sahiptir. Literatürde EPS'nin hidrofobik yüzeylerde birikip o yüzeylere hidrofilik özellik kazandırdıkları belirtilmiştir [Tansel et al., 2008]. Bunun yanında membran yüzey özelliklerinin EPS ve SMP tutunmasındaki etkisinin incelendiği çalışmalarda, özellikle yüzeyin pürüzlülük özelliklerinin EPS ve SMP'nin tutunmasında önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir [Tansel et al. 2006, Musale and Kalkarni, 1998]. Pürüzlülüğü yüksek olan membranların yüzeylerinde bakterilerin ve salgıladığı ürünlerin kolayca tutunabilecekleri girinti ve çıkıntılar bulunmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada pürüzlülüğü PC membrandan yüksek olan ME membranda SMP'nin tutunumu daha kolay olmaktadır. PC membranın yüzey pürüzlülüğü diğer membranlardan çok düşüktür ve bunun yanında sahip olduğu silindirik gözenek yapısı ve yüzeydeki gözenek dağılımının az olması nedeniyle SMP'nin birikimi daha az olmaktadır. II nolu deney setinde, SMP birikimleri yine pürüzlülüğü yüksek olan PES ve SA membranlarda olmuştur. EPS birikimlerine bakıldığında, EPS<sub>c</sub>'nin birikimi yine PC membranda yüksek olmuştur.

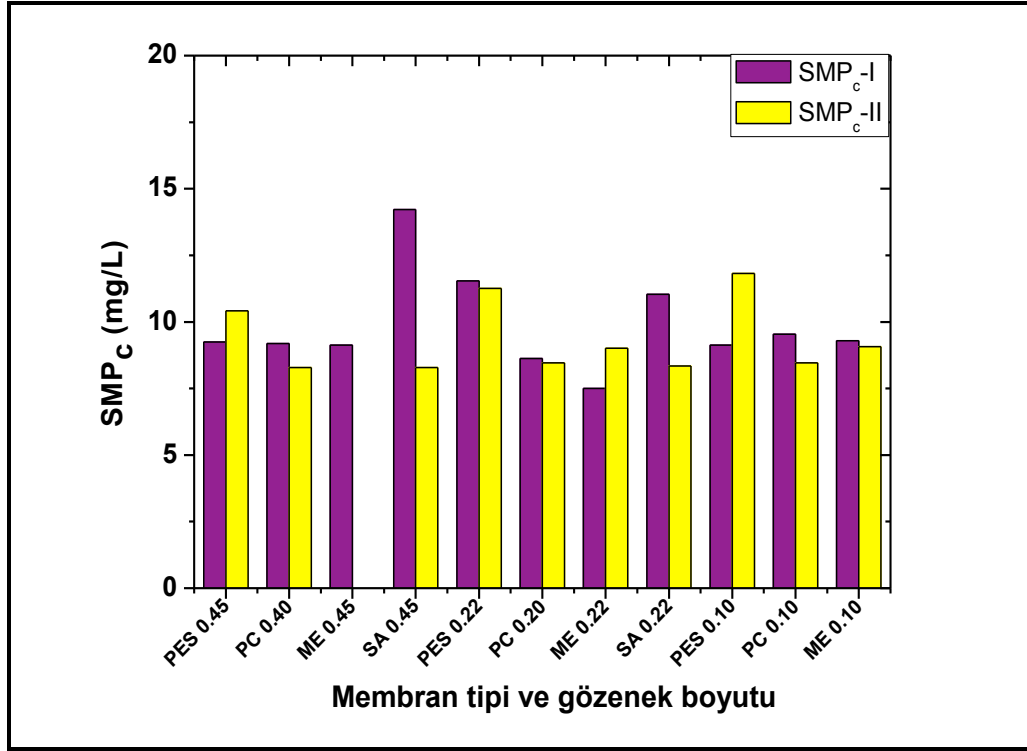
#### 4.1.2.4. Süzüntüde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Kek tabakasındaki analizlerin yanı sıra süzüntü numunelerinde de analizler yapılmıştır. Şekil 4.18 (a-b)'de görülebileceği gibi süzüntüdeki SMP değerleri çamurdaki değerlerden daha düşüktür. Bu sonuç SMP'nin bir kısmının membrandan geçemediğini göstermektedir. I nolu deney setinde süzüntülerde genel olarak SMP'nin protein içerikleri karbonhidrattan daha yüksek çıkmıştır. En yüksek SMP<sub>p</sub> ve SMP<sub>c</sub> değerleri SA 0.45 membranın süzüntüsünde, en düşük SMP<sub>p</sub> ve SMP<sub>c</sub> değerleri ise ME 0.10 membranın süzüntüsünde ölçülmüştür. Kek tabakasındaki analizlerde ME membranın SMP tutma özelliğine sahip olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla bu membranın süzüntüsünde SMP'nin düşük konsantrasyonda olması beklenen bir durumdur. Büyük gözenekli membranlarda proteinin süzüntüye geçmesi daha fazla olmuştur. Yine kek tabakasındaki analizlerde büyük gözenekli membranların yüzeyinde EPS'nin protein içeriğinin karbonhidrattan daha yüksek çıkmış olması da buna sebep olmuş olabilir. II nolu deney setinde de benzer şekilde süzüntülerde genel olarak SMP'nin protein içerikleri karbonhidrattan daha yüksek

çıkıştır. Süzüntüdeki değerler I nolu deney sistemine göre daha düşük çıkıştır. En yüksek  $SMP_p$  değerleri ME 0.22 membranın süzüntüsünde, en düşük PES 0.22 membranın süzüntüsünde ölçülmüştür. En yüksek  $SMP_c$  değerleri ise PES 0.10 membranın süzüntüsünde, en düşük PC 0.40 ve SA 0.45 membranların süzüntüsünde ölçülmüştür. Bu deney sisteminde kek tabakasındaki analizler ile süzüntüdeki analizler arasında, ilk deney sistemindeki gibi bir ilişki gözlenememiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.18. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda elde edilen süzüntülerdeki SMP değişimleri (a)  $SMP_p$  değişimi (b)  $SMP_c$  değişimi (Deney Set:I-II).

Filtre edilen çamurdaki SMP ile membranların süzüntüsünde ölçülen SMP miktarları oranlanarak iki deney seti için membranların SMP tutma verimleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.6'da sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlara göre I nolu deney setinde, en fazla  $SMP_p$  tutan membran ME 0.10, en az SA 0.45, en fazla  $SMP_c$  tutan membran ME 0.22, en az SA 0.45 membran olmuştur. Bu membranların filtrasyon performanslarına bakıldığında, SA 0.45 membran en düşük  $J_d$  ve en yüksek FDR değerine, ME 0.10 ve 0.22 membranlar ise en yüksek  $J_d$  ve en düşük FDR değerlerine sahip olmuştur. Diğer bir deyişle, ME membranının filtrasyon performansı SA membrana göre daha yüksek olmuştur. Dolayısıyla filtrasyon performansları ile membranlarda tutunan SMP arasında bir ilişki vardır. Protein ya da karbonhidrat tutma verimleri ile membranların gözenek boyutları karşılaştırıldığında, PC membran hariç diğer membranların  $SMP_p$  veya  $SMP_c$  tutma verimleri gözenek boyutuna göre değişmiştir. PC membranların ise üç gözenek boyutu için de protein tutma verimi karbonhidrat tutma veriminden oldukça yüksektir. II nolu deney setinde ise en fazla  $SMP_p$  tutan membran PES 0.22, en az PES 0.10, en fazla  $SMP_c$  tutan membran PC 0.40 ve SA 0.45, en az PES 0.10 membran olmuştur. En fazla  $SMP_p$  tutan membran

olan PES 0.22'nin ilk akı değeri ve FDR değerleri diğer membranlara göre daha düşük olmuştur. Yani membranın  $SMP_p$ 'yi tutması ilk akı değerini düşürmüştür, buna rağmen akı azalma oranı diğerlerine göre daha düşük olmuştur.

Çizelge 4.6. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membranların SMP tutma verimleri (Deney Set:I-II).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	SMP tutma verimi (%)			
		$SMP_p$		$SMP_c$	
		I	II	I	II
PES	0.45	36.8	52.0	49.4	31.6
PC	0.40	84.7	56.1	49.7	45.6
ME	0.45	10.3		50.0	
SA	0.45	4.5	41.7	22.1	45.6
PES	0.22	25.1	66.7	37.0	19.6
PC	0.20	90.0	52.3	52.9	39.6
ME	0.22	67.6	46.6	59	35.6
SA	0.22	52.5	51.9	39.8	40.4
PES	0.10	57.4	41.1	38.3	17.6
PC	0.10	58.1	47.9	35.5	41.0
ME	0.10	100.0	46.1	37.1	36.7

#### 4.1.2.5. Batık membran filtrasyonunda akı azalmalarına etki eden parametrelerin toplu olarak değerlendirilmesi

Değişen şartlarda işletilen JLMBR sisteminde oluşan çamurun filtrasyon özellikleri farklı membran tipi ve gözenek boyutu kullanılarak batık membran sisteminde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan membranların aynı şartlarda denenmiş olmalarına rağmen denge akı ve direnç değerlerinin farklı olduğu gözlenmiştir. Bu amaçla membran yüzeyinde oluşan kek tabakasında analizler yaparak bu farklılığın nedenleri araştırılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda membranların denge akı değerlerine en fazla etki eden parametrelerin  $V_t$ , MLSS konsantrasyonu,  $\alpha$ ,  $R_p$  ve kek tabakasındaki SMP miktarlarının olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin akıya etkileri, 11 tane membran için tek tek değerlendirilmesi zor olduğundan, hepsi bir arada değerlendirilerek  $J_d$  ile aralarında istatistiksel korelasyon

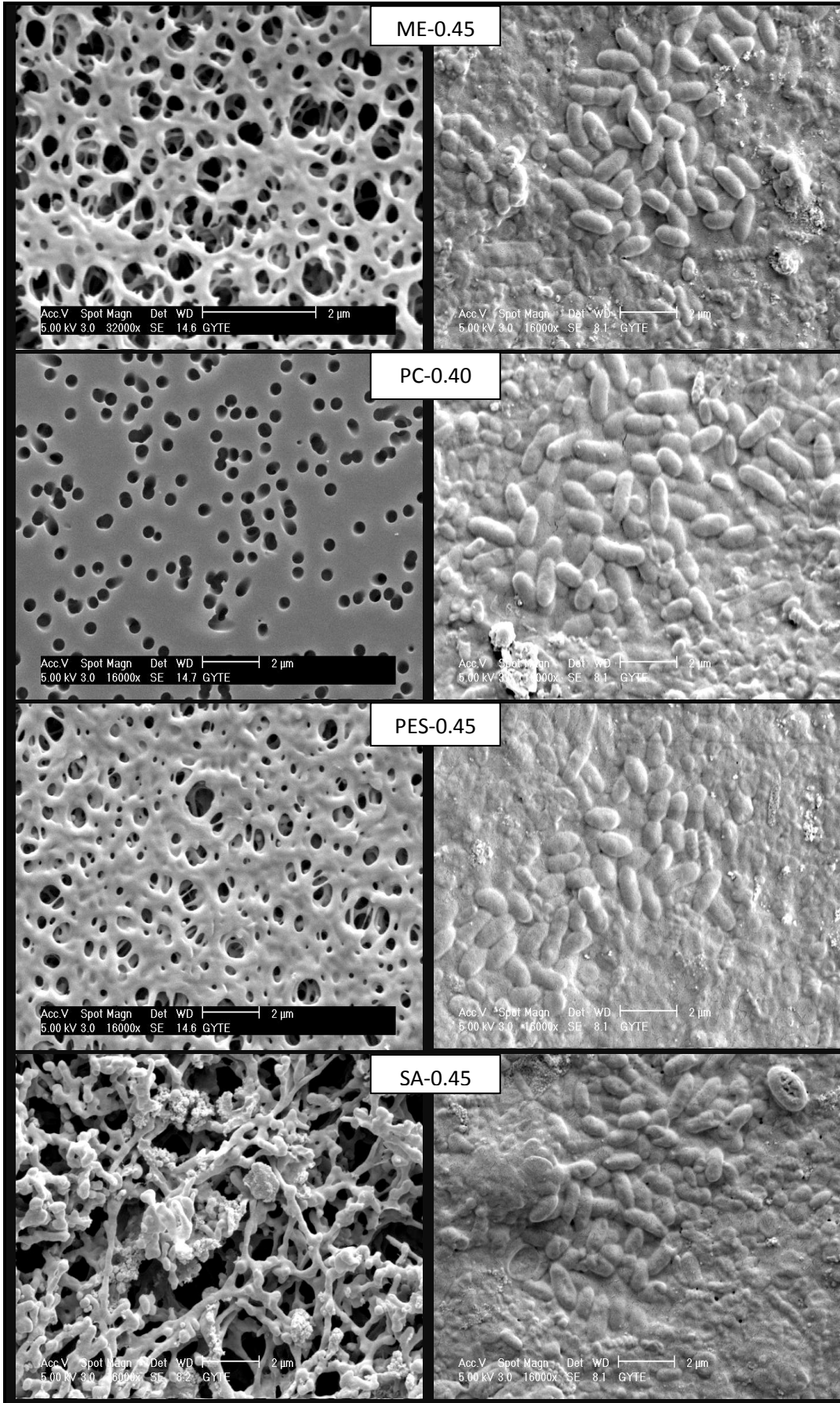
yapılmıştır. Çizelge 4.7’de membran tiplerine göre hesaplanmış olan  $f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  birimsiz sabiti ile  $J_d$  değerleri ile birlikte verilmiştir. Bu değerlerin yüksek olduğu durumda  $J_d$  değeri genelde düşük, bu değer düşük olduğu durumda ise  $J_d$  değerinin yüksek olduğu görülmektedir.  $J_d$  ile bu değer arasında yapılan korelasyonun sonucunda, korelasyon sabitleri I nolu deney seti için (-0.65), II nolu deney seti içinde (-0.28) olarak bulunmuştur. Buradan da görülebileceği gibi, iki değer arasında negatif korelasyon çıkmıştır.

Çizelge 4.7. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membran tiplerine göre  $f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  değerleri (Deney Set:I-II).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$		$J_d$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )	
		Set:I ( $\times 10^{26}$ )	Set:II ( $\times 10^{26}$ )	I	II
PES	0.45	3.3	3.5	4	3
PC	0.40	7.0	0.5	5	7
ME	0.45	0.4		8	
SA	0.45	3.3	0.1	4	7
PES	0.22	1.6	2.0	7	5
PC	0.20	1.7	1.2	7	6
ME	0.22	0.7	1.8	11	7
SA	0.22	0.2	1.5	9	10
PES	0.10	1.0	0.1	6	4
PC	0.10	2.4	1.1	5	5
ME	0.10	3.1	0.6	6	5

#### 4.1.2.6. Membran yüzeylerindeki SEM ve AFM sonuçlarının değerlendirilmesi

I nolu deney setinin batık membran filtrasyonundan önce ve sonra membran yüzeylerinde SEM ve AFM analizleri yapılmıştır. SEM analizinden elde edilen resimler Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Soldaki resimler temiz, sağdaki resimler kirli membranların SEM görüntüleridir. Temiz membranların SEM resimlerinden görülebileceği gibi seçilen membranların yüzey yapıları birbirlerinden farklıdır.



Şekil 4.19. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda kullanılan 0.45 µm gözenek boyutuna sahip membranların temiz ve kirli SEM resimleri (Deney Set:I)



PC membranın yüzeyindeki gözenek dağılımı silindirik, gözenek sayısı az ve gözenekler arasında bağlantılar yoktur. ME ve PES membranların yüzeydeki gözenek dağılımları benzer olmasına rağmen PES membranın yüzeyinde daha yoğun gözenek dağılımı vardır. SA membranın yüzeyindeki gözenekler ağısı bir yapıya sahiptir. Filtrasyondan sonraki SEM görüntülerine bakıldığında, bütün membranlarda yoğun bir kek tabakasının olduğu görülmektedir. Özellikle bakteriyel hücrelerden daha küçük olan metabolik ürünlerin yüzeyi tamamen kapladığı bu tabakanın üzerinde de hücrelerin biriktiği görülmektedir. Bu birikim hücre popülasyonunun özelliklerine dolayısıyla salgıladıkları hücre dışı materyallere bağlıdır.

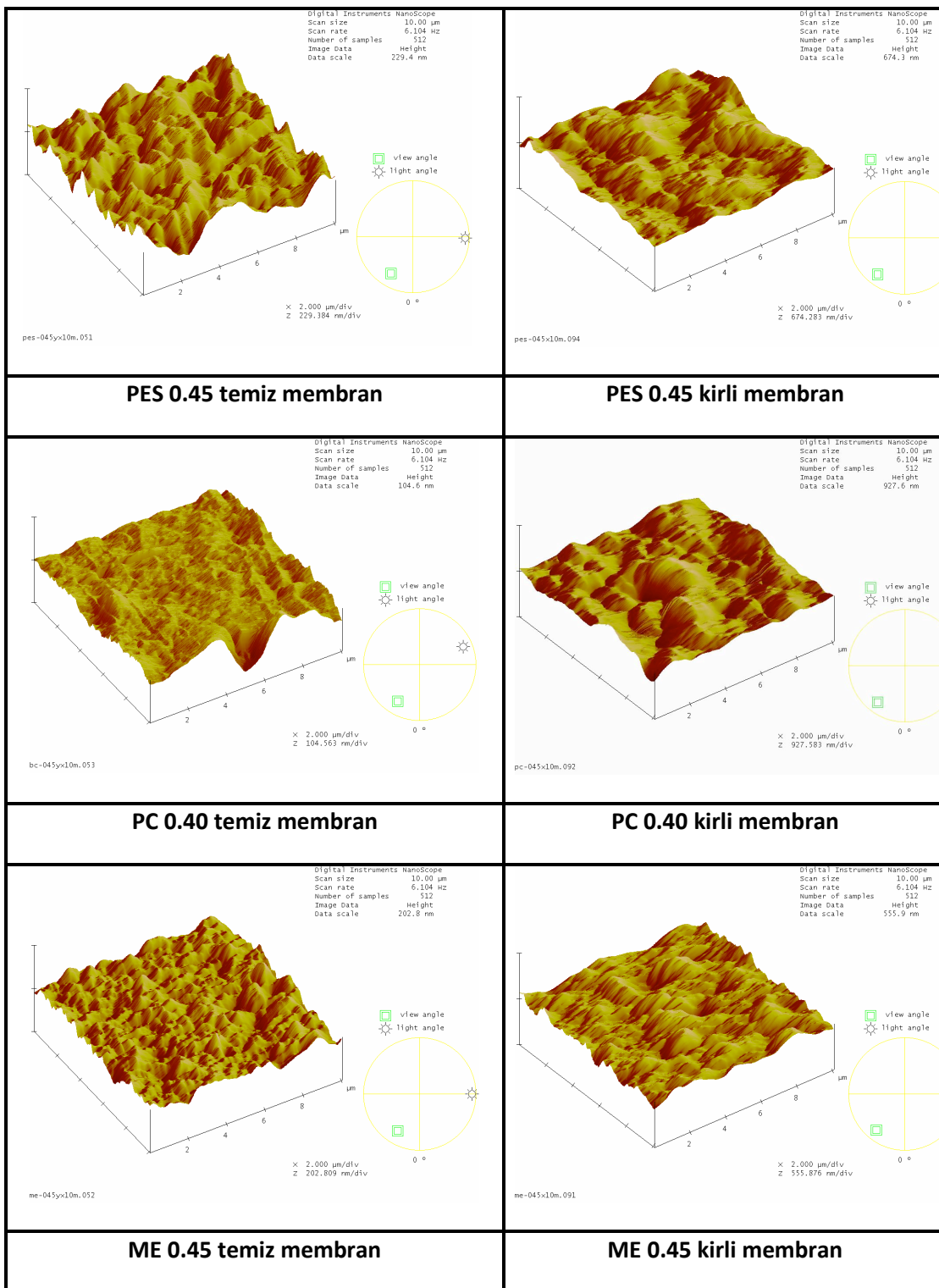
Membranların AFM analizlerinin sonuçları ise Şekil 4.20’de verilmiştir. Soldaki resimler temiz, sağdaki resimler kirli membranların AFM resimleridir. Temiz membranların AFM analizlerinden görülebileceği gibi PES, ME ve SA membranların yüzeylerinde bakterilerin veya metabolik ürünlerinin tutunabileceği girinti ve çıkıntılar PC membrana göre daha yüksektir. SEM resimleri birbirine benzer olan ME ve PES membranların AFM resimlerindeki girinti ve çıkıntılarının dağılımı da benzer çıkmıştır. Özellikle SA membranın yüzeyinde çok geniş noktalar vardır. Filtrasyon sonunda kirli membranlarda yapılmış olan AFM analizinde bütün membranların yüzeylerindeki tabakanın değiştiği ve birbirlerine benzer dağılım gösterdiği bulunmuştur. AFM analizlerinde ölçülen ve membranların ortalama pürüzlülüğünü gösteren  $R_a$  değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Temiz membranların  $R_a$  değerlerine bakıldığında en düşük  $R_a$  değerleri bütün gözenek boyutlarında PC membranda, en yüksek değerler ise SA membranda ölçülmüştür. Dolayısıyla en pürüzsüz membranların PC olduğunu, en pürüzlü membranların ise SA ve ME’nin olduğunu söyleyebiliriz.

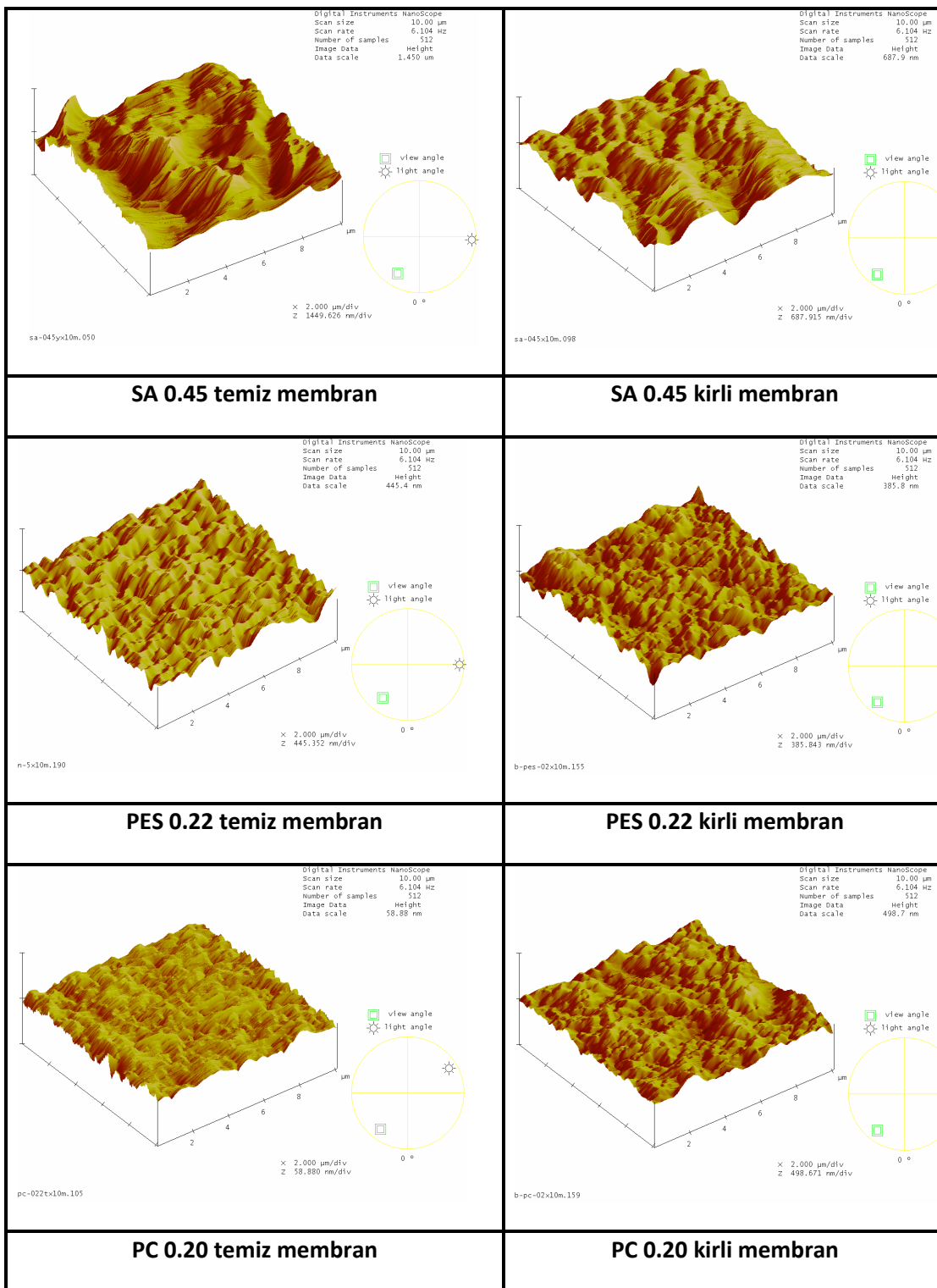
Pürüzlü membranlar daha fazla yüzey alanlarına sahiptir ve bu da bakterilerin kolayca tutunabileceği bölgeler yaratır [Kochkodan et al., 2006]. Genel olarak pürüzlülüğü yüksek membranların kirlenme potansiyellerinin daha yüksek olduğu bilinmektedir. Fakat bu çalışmada JLMBR filtrasyonunda ME membranlar pürüzlü yüzeye sahip olmalarına rağmen en yüksek performanslara sahip olmuşlardır. Bu da JLMBR gibi literatürdeki klasik MBR’lardan çok farklı biyolojik yapıya sahip reaktörlerde membranların farklı özellikler göstermesine sebep olabilmektedir.

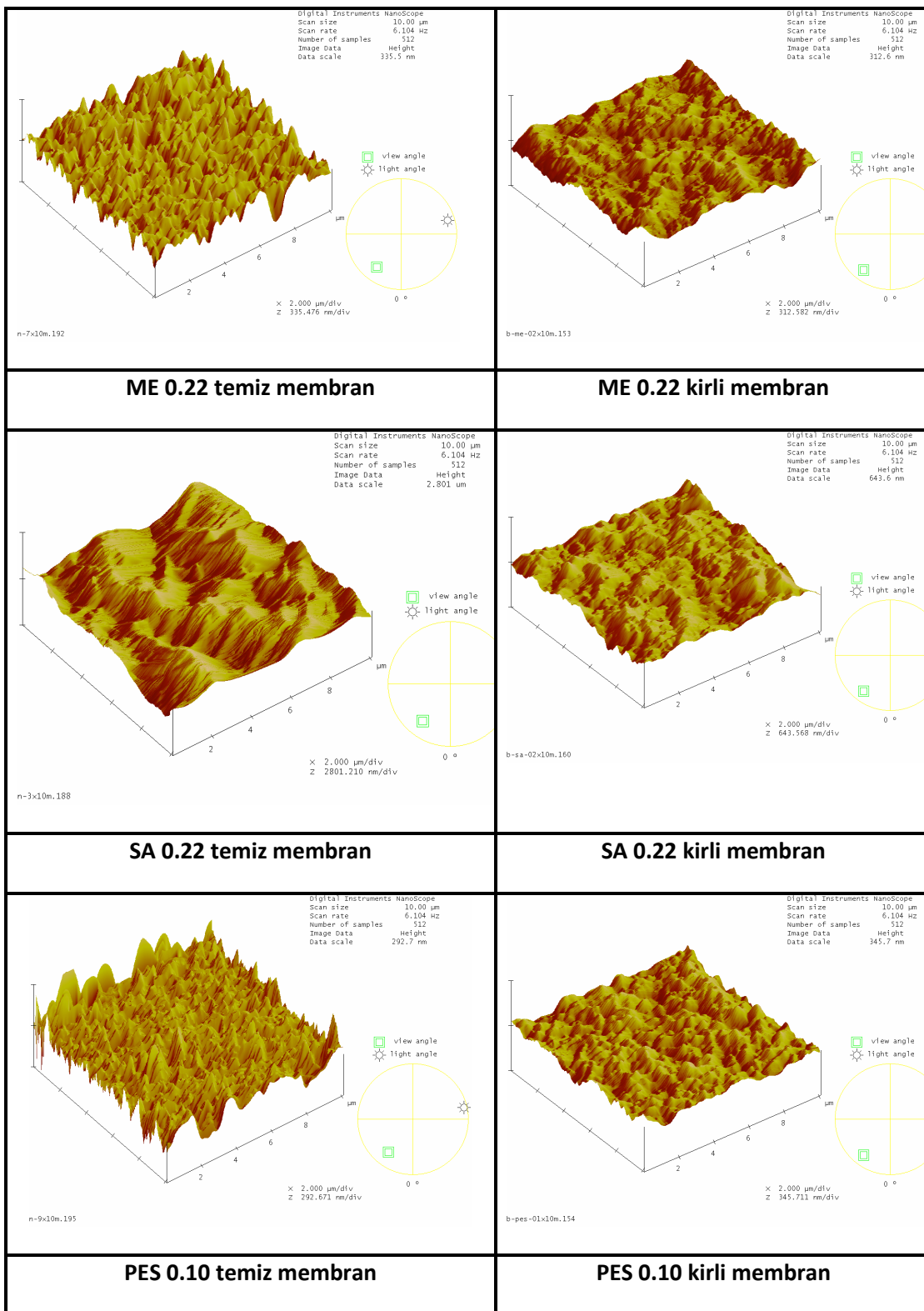
Dolayısıyla membran tipinin filtre edilecek biyolojik ortama uygun seçmek önemli bir adımdır. Filtrasyondan sonraki  $R_a$  değerlerine bakıldığında, en iyi performansa sahip ME membranların en düşük  $R_a$  değerlerine sahip olduğu, pürüzlülüğü en düşük olan PC membranların ise en yüksek değerler sahip olduğu bulunmuştur. Literatürde membran yüzeyine bağlanmış olan bakteri ve EPS'nin membranın pürüzlülüğünü arttırdığı belirtilmiştir [Malaisamy et al., 2010]. Dolayısıyla kek tabakasında yapılmış olan analizlerde EPS birikiminin en fazla PC membranlarda olması bu membranın pürüzlülüğünü arttırmıştır.

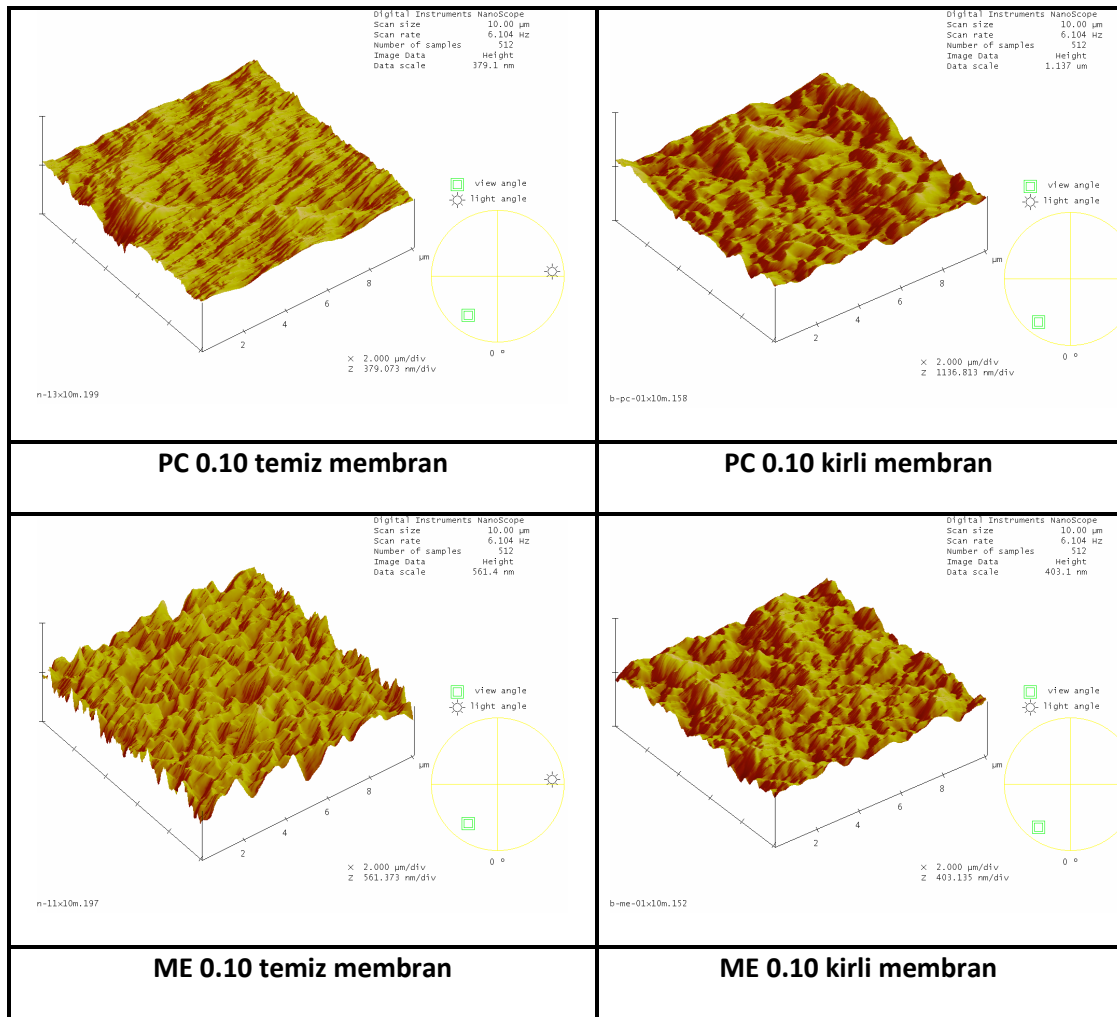
Çizelge 4.8. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonundaki membranların AFM analizlerindeki  $R_a$  değerleri (Deney Set:I).

Membran Tipi	<b>BOŞ MEMBRAN</b>	<b>KİRLİ MEMBRAN</b>
	$R_a$ (nm)	$R_a$ (nm)
PES 0.45	22.9	24.1
PC 0.40	4.9	32.9
ME 0.45	13.8	20.5
SA 0.45	89.2	35.3
PES 0.22	41.9	22.6
PC 0.20	2.8	23.2
ME 0.22	54.9	13.6
SA 0.22	138.6	30.9
PES 0.10	41.9	21.56
PC 0.10	10.6	48.9
ME 0.10	61.7	22.3









Şekil 4.20. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemelerde gerçekleştirilen batık membran filtrasyonunda kullanılan membranların temiz ve kirli AFM resimleri (Deney Set:I).

İşletim şartlarının (farklı çamur yaşı ve organik yükleme) batık membran filtrasyon performansına etkisinin incelendiği iki deney setinde elde edilen sonuçları toplamak gerekirse eğer, JLMBR sisteminde uzun çamur yaşı ve düşük organik yüklemeye şartları; düşük MLSS ve yüksek EPS konsantrasyonu, düşük hidrofobisite ve viskozite ile yüksek partikül boyutu ve zeta potansiyeli değerlerine sebep olmuştur. Bu şartlar altında, batık membran filtrasyonunda hem membran tipinin hem de gözenek boyutu önemli olmaktadır. Çünkü membran yüzeyinde yeterince kek tabakası oluşmadığından partikül-membran etkileşimi daha fazla olmaktadır. Membran tipi, bakterinin MLSS konsantrasyonuna ve SMP ile EPS'nin miktar ve içeriklerine bağlı olarak değişik filtrasyon davranışları göstermişlerdir. I nolu deney setinde kek tabakasında biriken  $SMP_c$  ve  $EPS_p$  filtrasyona olumlu etki yapmıştır. En iyi performansı gösteren membran yüksek pürüzlülüğe ve hidrofilik yapıya sahip

olan ME membran, en kötü performansı gösteren membran ise ME membran ile benzer özelliklere sahip PES membran olmuştur. Birbirine yapısal olarak benzeyen iki membranın filtrasyon performanslarının birbirlerinden bu kadar farklı çıkması ilginç bir sonuçtur. Membranın yapısal özelliklerinin yanı sıra, yapıldığı malzemenin cinsinin etkisinin de yüksek olduğu görülmektedir. ME membran JLMBR'deki biyolojik süspansiyona karşı PES membrana göre daha dirençli olmuştur. İlk deney seti için en uygun membran gözenek boyutu da 0.22  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. II nolu deney setinde azalan çamur yaşı ve artan organik yükleme, ilk deney setine göre yüksek MLSS ve düşük EPS konsantrasyonuna, yüksek hidrofobisite ve viskozite ile düşük partikül boyutu ve zeta potansiyeli değerlerine sebep olmuştur. Bu deney setinde batık membran filtrasyon performansı düşmüştür. İlk deney setine göre membran tipi gözenek boyutuna göre daha önemli olmuştur. Artan MLSS konsantrasyonu nedeniyle filtrasyonun hemen başında membran yüzeyinde oluşan yoğun kek tabakası membranın gözenek boyutunun etkisini azaltmıştır. Bu deney sistemindeki kek tabakasında da  $\text{SMP}_c$  ve  $\text{EPS}_p$ 'nin miktarının fazla olması filtrasyona olumlu etki yapmıştır. En yüksek performansa sahip membran tipi SA ve ME, en kötü performansa sahip membran tipi ise yine PES olmuştur.

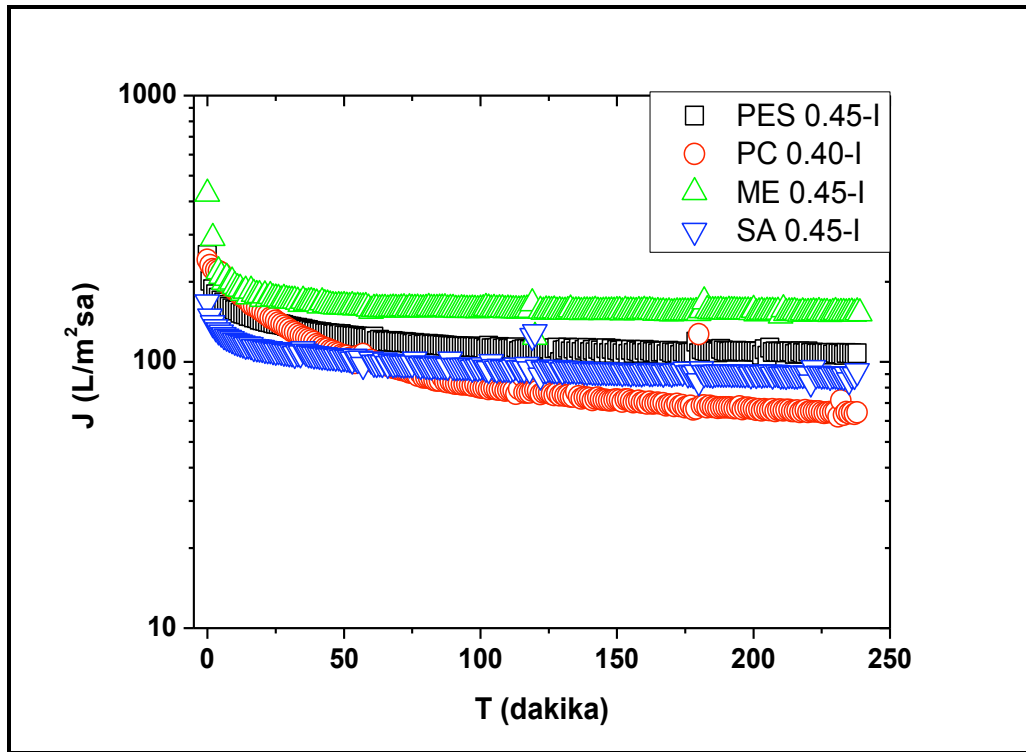
### **4.1.3. Çapraz akış filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutunun etkisinin araştırılması**

#### **4.1.3.1. Membran tipi ve gözenek boyutunun akı değişimlerine etkisinin incelenmesi**

İki deney sisteminde de batık membran filtrasyon deneylerinden hemen sonra çapraz akış filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Membranların gözenek boyutlarına göre çizilmiş olan akı-zaman grafikleri, I nolu deney seti için Şekil 4.21 (a-c)'de ve II nolu deney seti için Şekil 4.22 (a-c)'de gösterilmiştir. Akı-zaman grafikleri yine üç bölgeden oluşmaktadır; filtrasyonun ilk dakikalarında partiküllerin temiz membranın gözeneklerini tıkaması ile akının hızlıca düştüğü bölge, daha sonra membran yüzeyinde kek tabakasının oluşumu ile akının daha yavaş azaldığı bölge ve kek tabakasının sabit kalınlığa ulaşması ile akı değerlerinin çok fazla değişmediği denge bölgesi [Song, 1998]. Grafiklerden görülebileceği gibi iki deney setinde de

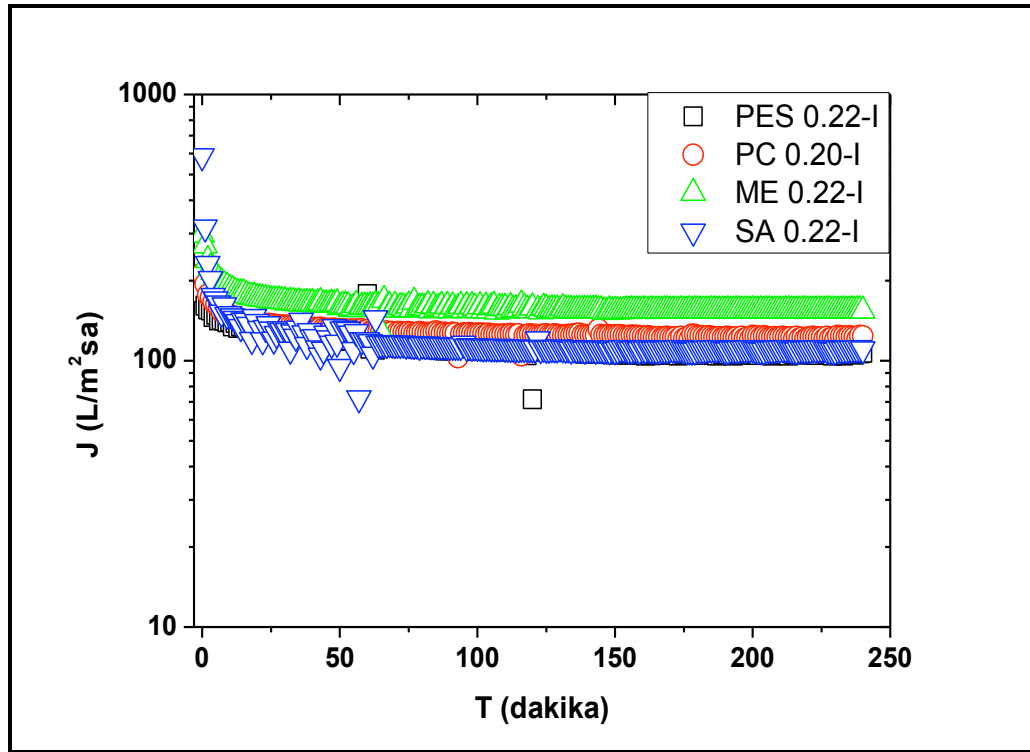
bütün membranlar için 4 saat filtrasyon, denge şartlarına ulaşmak için yeterli olmuştur. İki deney setinde de bütün gözenek boyutlarında en yüksek akı değerleri batık membran deneylerine benzer şekilde ME membranlarda en düşük akı değerleri ise PC membranlarda görülmüştür. Batık membran deneylerinde kötü performans göstermiş olan PES membranlar, ÇAF sisteminde de PC membrandan sonra en düşük akı değerlerine sahip membran olmuştur.

I nolu deney sisteminin akı-zaman grafiği membran gözenek boyutlarına göre Şekil 4.21 (a-c)'de verilmiştir. Çizelge 4.9'dan bu deney setine ait membranların  $J_0$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerine bakıldığında; gözenek boyutu azaldıkça  $J_d$  değerleri artmış ve membranların gözenek boyutlarına göre  $J_0$  değerleri birbirlerinden çok farklı çıkmıştır. En yüksek  $J_0$  değeri ( $587 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) SA 0.22, en yüksek  $J_d$  değeri ( $154 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) ve en yüksek  $V_t$  değeri ( $1800 \text{ cm}^3$ ) ME 0.22 ve ME 0.45 membranlarda elde edilmiştir. En yüksek FDR değeri (%81.1) SA 0.22, en düşük FDR (%32.0) değeri PES 0.10 membranda hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre bu deney setinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.45 ve 0.22, en kötü performansı gösteren membran ise PC 0.40 membranlar olmuştur.

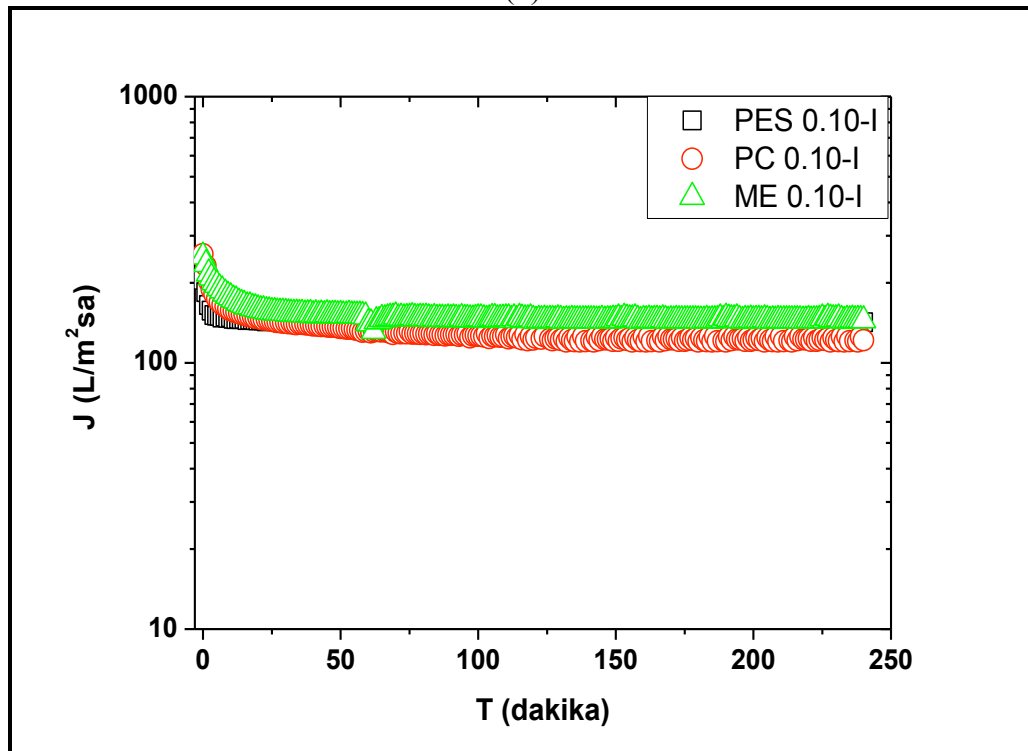


(a)





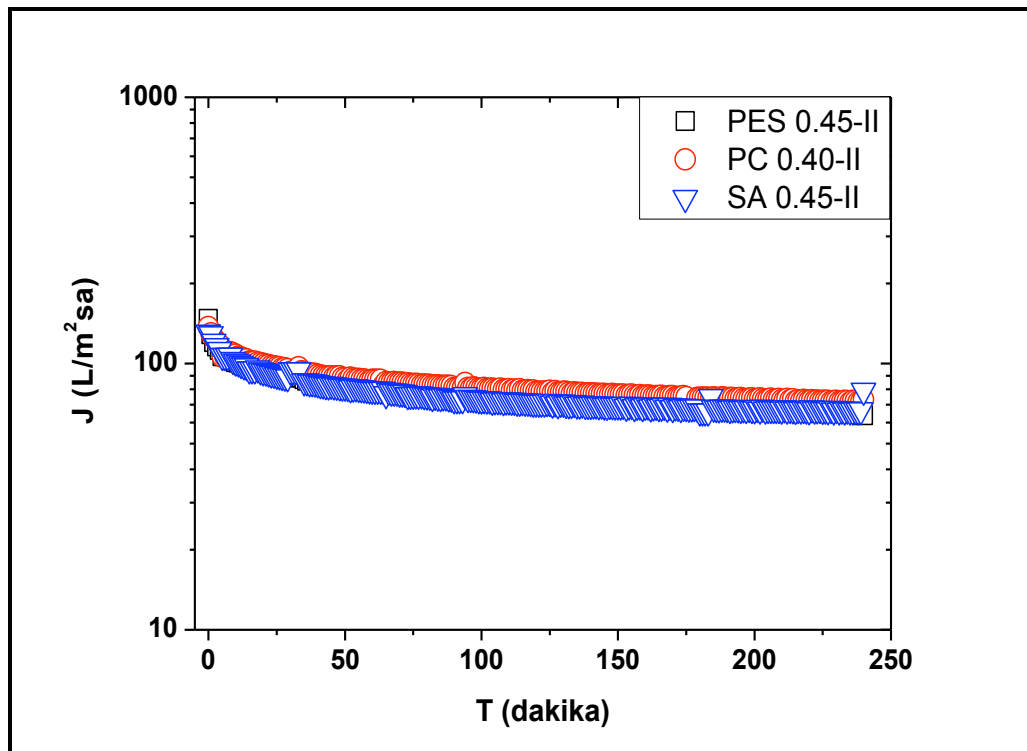
(b)



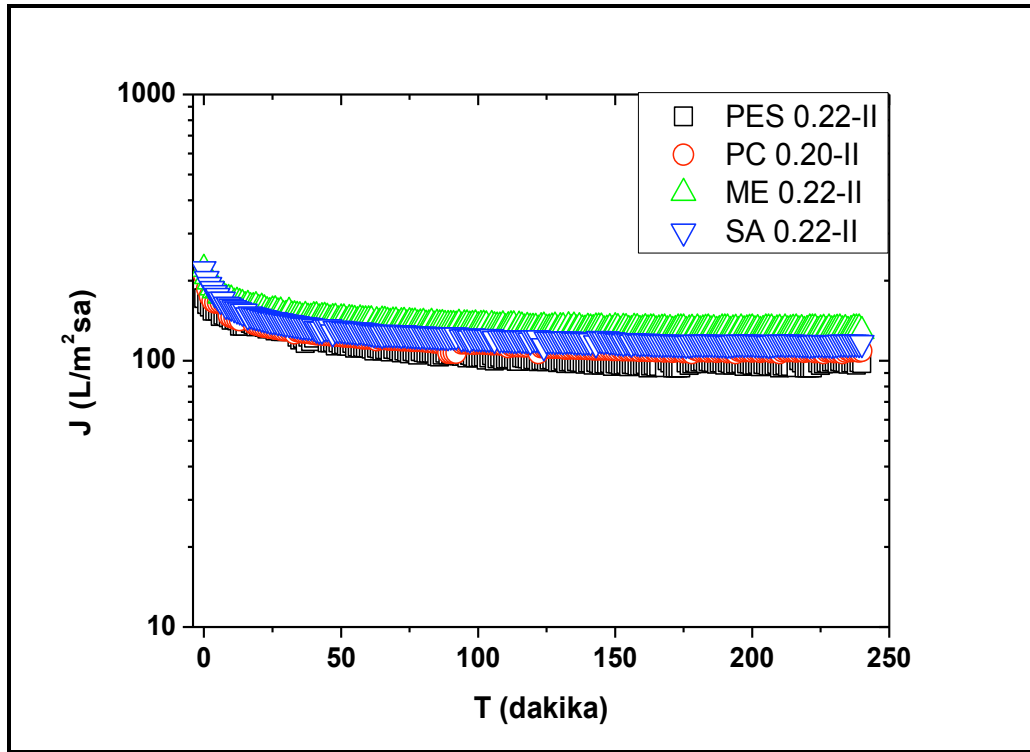
(c)

Şekil 4.21. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:I).

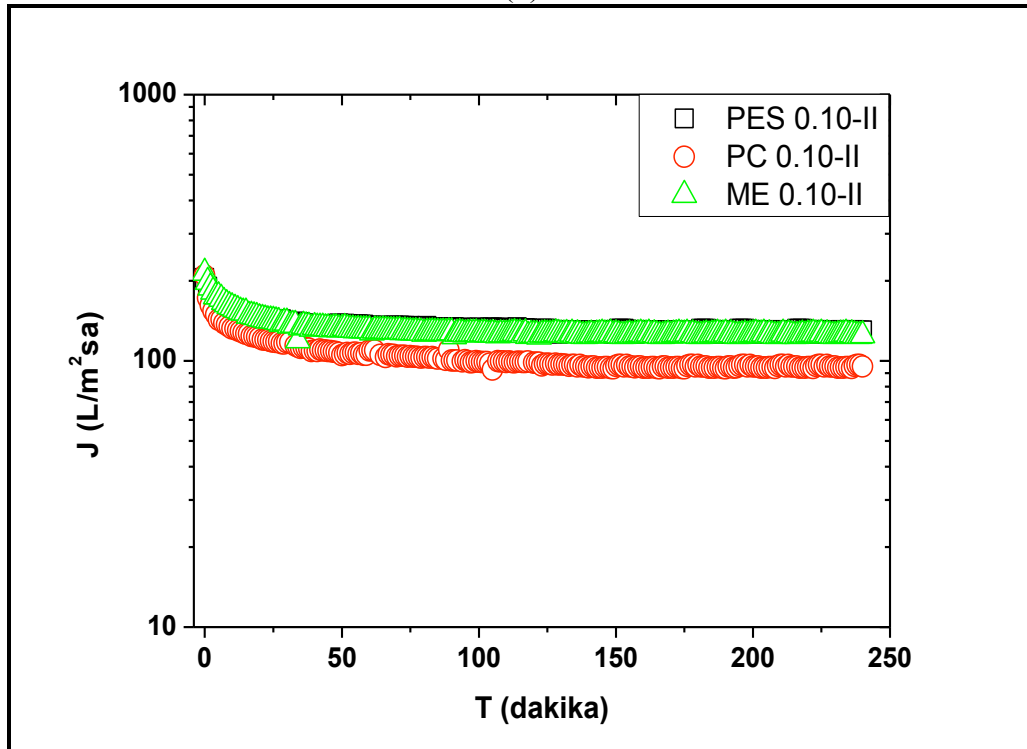
II nolu deney sisteminin akı-zaman grafiği membran gözenek boyutlarına göre Şekil 4.22 (a-c)'de verilmiştir. Çizelge 4.9'dan bu deney setine ait membranların  $J_0$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerine bakıldığında; en yüksek  $J_0$  değeri ( $221 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) SA ve ME 0.22, en yüksek  $J_d$  değeri ( $131 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) ve en yüksek  $V_t$  değeri ( $1556 \text{ cm}^3$ ) ME 0.22 membranlarda elde edilmiştir. En yüksek FDR değeri (%54.6) PC 0.10, en düşük FDR (%36.8) değeri PES 0.10 membranda hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre bu deney setinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.22, en kötü performansı gösteren membran ise SA 0.45 membranlar olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.22. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (Deney Set:II).

Çizelge 4.9. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sistemine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:I-II)

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$J_0^*$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )		$J_d^{**}$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )		FDR (%)		$V_t^{***}$ ( $\text{cm}^3$ )	
		I	II	I	II	I	II	I	II
PES	0.45	252	147	109	67	57	54	1335	862
PC	0.40	242	137	67	73	72	47	1037	925
ME	0.45	427	-	154	-	64	-	1798	-
SA	0.45	168	130	90	68	46	48	1099	852
PES	0.22	180	171	107	99	41	42	1271	1266
PC	0.20	212	209	122	108	42	48	1440	1324
ME	0.22	297	221	154	131	48	41	1800	1556
SA	0.22	587	221	111	117	81	47	1345	1422
PES	0.10	205	205	139	130	32	37	1581	1506
PC	0.10	256	210	122	95	52	55	1457	1160
ME	0.10	251	214	145	125	42	42	1676	1462

$J_0^*$ : Filtrasyon deneylerinde membranların ilk akı değerini ifade etmektedir.

$J_d^{**}$ : Filtrasyonun son 1 saatindeki akı değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.

$V_t^{***}$ : 24 saatlik filtrasyon sonunda toplanan süzüntü hacmini ifade etmektedir.

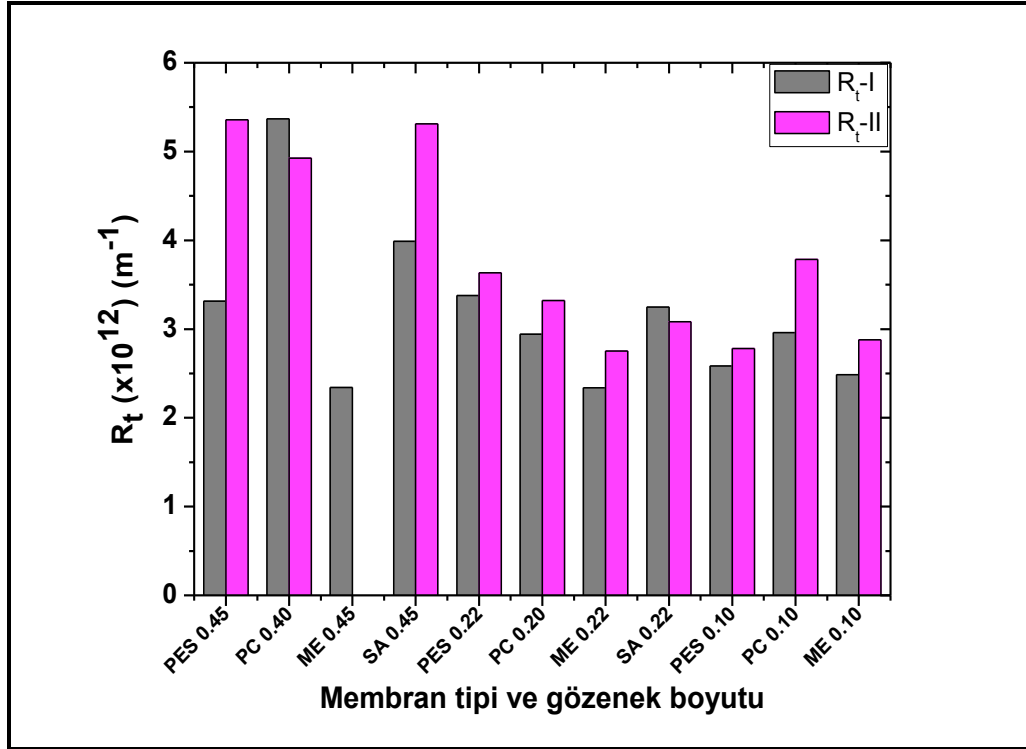
Filtrasyon değerlerindeki bu farklılıkların nedeni, membranların yapısal özelliklerinin birbirinden farklı olmasıdır. ÇAF sisteminde membran yüzeyine teğetsel bir akış uygulanmaktadır, dolayısıyla membran tipi batık membrandan çok daha önemli olmaktadır. Çünkü batık membran filtrasyonunun başlarında oluşan ikincil membran tabakası ÇAF sisteminde oluşmamaktadır. Membranın özellikle pürüzlülük değeri ve gözenek yapısı önemli faktörlerdir [Dizge et al., 2010]. PC membran hariç kullanılan diğer membranların pürüzlülükleri yüksektir. PC'nin denge akı değerleri ve süzüntü hacimleri düşük, FDR değerleri yüksek olmuştur. Çözeltide bulunan kolloidler ve partiküller, uygulanan çapraz akış hızı ile PC'nin sahip olduğu silindirik gözenek yapısını diğer membranlara göre daha fazla tıkamıştır. Aynı zamanda PC'nin kullanılmadan önceki SEM fotoğrafından da görülebileceği gibi yüzeydeki gözenek sayısı diğer membranlara göre oldukça düşüktür. Gözenek sayısı azaldıkça membran yüzeyinin optimum kullanımı da azalmaktadır. Bu nedenlerle ÇAF sisteminde PC membran daha fazla kirlenmiştir. ME membranın pürüzlülüğü SA membrandan düşük, PES membrandan yüksektir, ürün bilgisinden alınmış olan su akı değerleri, PES ve SA membranlardan daha düşüktür. Aynı zamanda ME membran kullanılan membranlar arasında en fazla kalınlığa sahip membrandır. Bunlara rağmen ME membran hem batık membran hem de ÇAF deneylerinde en yüksek performansa sahip membran olmuştur. Bununda organik yapıda olan bu membranların bakterilere karşı olan dirençlerinin farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İki deney setinin filtrasyon değerleri karşılaştırıldığında II nolu deney setinde artan MLSS ve EPS konsantrasyonları akı değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. SMP değerleri ilk deney setine göre çok değişmemiştir. SMP'nin ÇAF sistemlerinde akı azalmasından sorumlu olduğunu belirten çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada iki deney sisteminde SMP konsantrasyonları benzer olmasına rağmen, akı değerleri ve FDR değerleri değişiklik göstermiştir. Bu da SMP'nin tek başına akının azalmasından sorumlu olmadığı özellikle MLSS'in etkisinin yüksek olduğunu göstermektedir. Artan MLSS ile filtre edilecek partikül miktarının artması, membran yüzeyinde oluşacak tabakanın yoğunluğunun artmasına sebep olmuş, bu da orada biriken partiküllerin boyutuna da bağlı olarak zamanla filtrasyon veriminin düşmesine yol açmıştır.

#### 4.1.3.2. Membran tipi ve gözenek boyutunun filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi

ÇAF sistemlerinde, membran yüzeyindeki kesme kuvvetlerinin etkisi, partiküllerin rastgele hareketlerine sebep olan Brownian kuvvetlerinden çok fazladır [Nataraj et al., 2008]. Bu nedenle membran yüzeyine tutunan bakteri ve ürünlerinin, uygulanan kesme kuvvetleri ile uzaklaştırılmaları, membran ile bu maddeler arasındaki ilişkiye bağlıdır. Filtrasyonun başında, uygulanan yüksek basınçla çözeltideki kolloidler ve partiküller hızlı bir şekilde membran gözeneklerine doğru hareket eder. Filtrasyon ilerledikçe gözenekler kapanır, biriken partiküller ve kolloidler çapraz akış hızı ile kolayca kopamazlar [Wang et al., 2008]. Partiküllerin birikmesi, daha büyük moleküllerin yüzeyde kek tabakasını oluşturmaya sebep olur. Kek tabakası sabit bir değere ulaştıktan sonra uygulanan basıncın etkisi kaybolur. Bu mekanizmalar gözenek direnci, kek direnci ve konsantrasyon polarizasyonu direnci ile ifade edilir.

İki deney setinde de filtrasyonunun son 20 dakikasındaki akı değerlerin ortalaması alınarak, hesaplanmış olan toplam direnç ( $R_t$ ) değerleri Şekil 4.23'de verilmiştir. Direnç değerleri batık membran sisteminden daha düşük olmuştur. Bunun nedeni, membran yüzeyine paralel uygulanan yüksek hız ve yüksek basınçtır. ÇAF sisteminde membranların gözenek boyutu önemli bir parametredir. I nolu deney setinde membranların gözenek boyutlarına göre en düşük  $R_t$  değerleri PES membran için 0.10  $\mu\text{m}$ , PC membran için 0.20  $\mu\text{m}$ , ME ve SA membran için 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlarında gözlenmiştir. Dolayısıyla ilk deney seti için 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutundaki membranların ÇAF sistemi için uygun olmadığı görülmektedir. II nolu deney sistemindeki direnç değerleri ilk deney setine göre artmıştır. Artan MLSS konsantrasyonunda kek tabakasındaki partiküllerin sayısı daha fazla olduğu için, membran yüzeyindeki direnç artmıştır. Çizelge 4.10'dan membranların  $R_t$  değerlerine bakıldığında; I nolu deney setinde en yüksek  $R_t$  değerine ( $5.37 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) PC 0.40 membran, II nolu deney seti için ( $5.36 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.45 membran sahip olmuştur. PES ve PC membranlar bu deney setlerinde en kötü performansa sahip membranlar olmuştur.



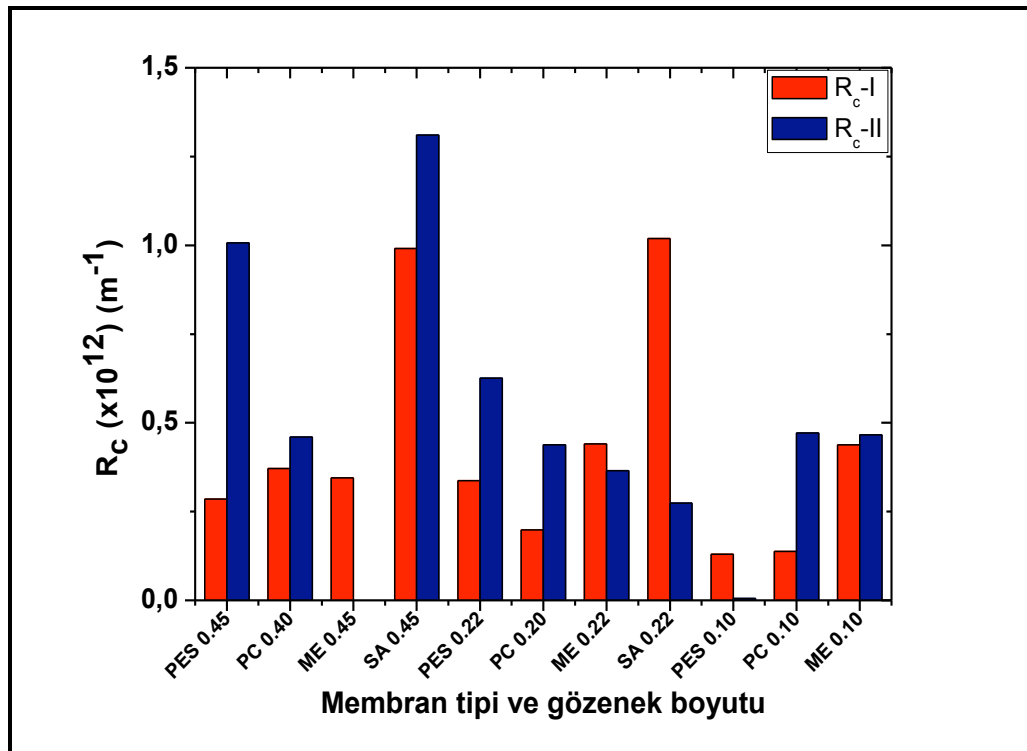
Şekil 4.23. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerleri (Deney Set: I-II).

Şekil 4.24 (a-c)'de membranların kek ( $R_c$ ), gözenek ( $R_p$ ) ve konsantrasyon polarizasyonu ( $R_{cp}$ ) direnç değerleri gösterilmiştir. Batık membran filtrasyon sisteminden farklı olarak toplam direnç içerisinde konsantrasyon polarizasyon direnci de eklenmiştir. Ayrı ayrı direnç değerlerine bakıldığında, I nolu deney setinde bütün membranlarda gözenek direncinin diğer dirençlere göre daha yüksek olduğu görülebilir. Bu çalışma döneminde, MLSS konsantrasyonunun düşük ve EPS konsantrasyonlarının yüksek olması nedeniyle küçük boyutlu partiküller membranın gözeneklerini tıkamıştır ve yüzeyin fiziksel olarak temizlenmesi sırasında da verimli bir şekilde temizlenememiştir. Düşük MLSS konsantrasyonlarında membran yüzeyinde yeterli kek tabakasının oluşmaması membranın gözeneklerini partiküllere açık duruma getirir. Membran kirlenmesi ile ilgili yapılmış olan bir çalışmada, membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının membran yüzeyini ve gözeneklerini bakteriyel ürünlerden koruduğunu, azalan kek dirençlerinde geri dönüşsüz kirlenmenin arttığını belirtmişlerdir [Bae and Tak, 2005]. II nolu deney setinde artan MLSS ve düşen EPS konsantrasyonlarıyla birlikte gözenek dirençleri azalmıştır. Bu sonuç, membran yüzeyinde oluşacak kek tabakasının belli bir değere kadar gözeneklerdeki kirlenmeyi önlediğini göstermektedir. Bu deney setinde, konsantrasyon polarizasyon dirençleri diğer dirençlere göre daha yüksek olmuştur.

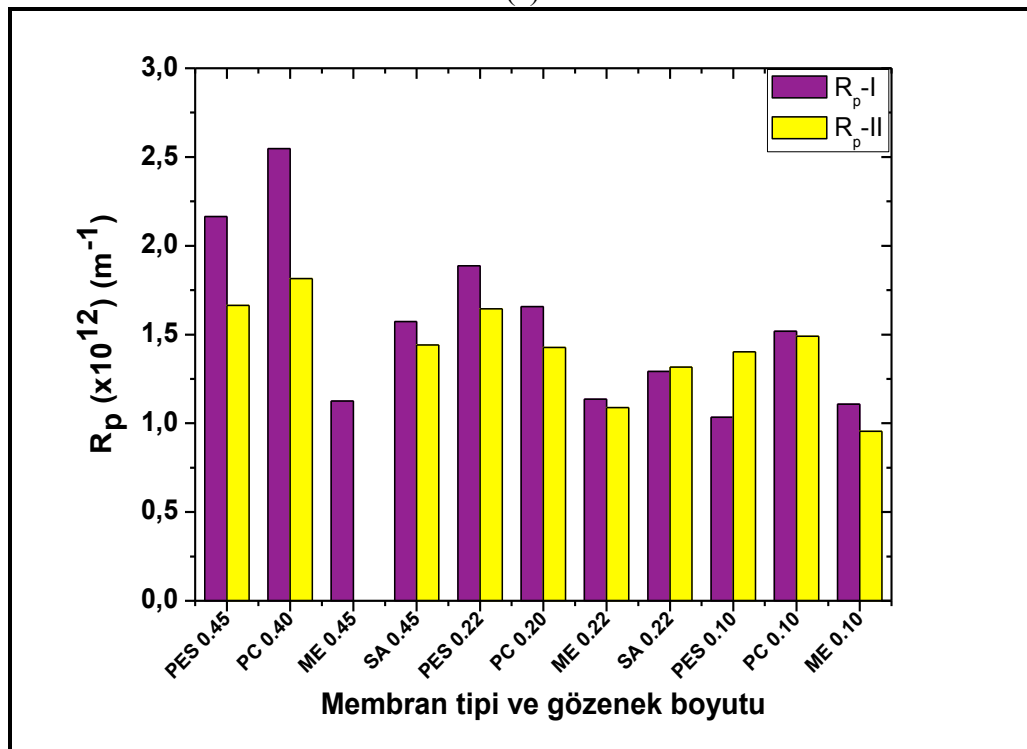
Özellikle 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda  $R_{cp}$  değerleri ilk deney sistemine göre yaklaşık 2 kat artmıştır. Artan MLSS konsantrasyonu ile membran yüzeyindeki sabit kek tabakasının kalınlığı da artar. Bu artış, konsantrasyon polarizasyonuna sebep olan küçük partiküllerin geri difüzyon hızını arttırır. Çizelge 4.10'dan I nolu deney setinin direnç değerlerine bakıldığında, en yüksek  $R_t$  ( $5.37 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ),  $R_p$  ( $2.55 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) ve  $R_{cp}$  ( $2.40 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) değerleri PC 0.40 membranda hesaplanmıştır. En yüksek  $R_c$  değeri ise ( $1.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) SA 0.45 ve SA 0.22 membranlarda elde edilmiştir. Dirençlerin toplam direnç içerisindeki oranlarına bakıldığında, en yüksek  $R_p$  oranı (%65.3) PES 0.45, en yüksek  $R_c$  oranı (%31.4) SA 0.22 ve en yüksek  $R_{cp}$  oranı (%52.1) PES 0.10 membranlarda gözlenmiştir. Genel olarak bakıldığında  $R_p$  oranları  $R_c$  ve  $R_{cp}$  oranlarından daha yüksek çıkmıştır. Bu çalışma setinde gözenek direncinin etkisinin yüksek olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.10'dan II nolu deney setinin direnç değerlerine bakıldığında, en yüksek  $R_t$  değeri ( $5.36 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.45, en yüksek  $R_p$  ( $1.82 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) ve  $R_{cp}$  ( $2.56 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) değeri PC 0.4 membranda hesaplanmıştır. En yüksek  $R_c$  değeri ise ( $1.31 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ) SA 0.45 membranda elde edilmiştir. Direnç değerleri ilk deney sistemi ile çok benzer çıkmıştır. Dirençlerin toplam direnç içerisindeki oranlarına bakıldığında, en yüksek  $R_p$  oranı (%50.4) PES 0.10, en yüksek  $R_c$  oranı (%24.7) SA 0.22 ve en yüksek  $R_{cp}$  oranı (%52.0) PC 0.40 membranlarda gözlenmiştir. Genel olarak bakıldığında bu deney setinde  $R_{cp}$  oranları  $R_p$  ve  $R_c$  oranlarından daha yüksek çıkmıştır. Bu çalışma setinde konsantrasyon polarizasyonu direncinin etkisinin yüksek olduğu söylenebilir.

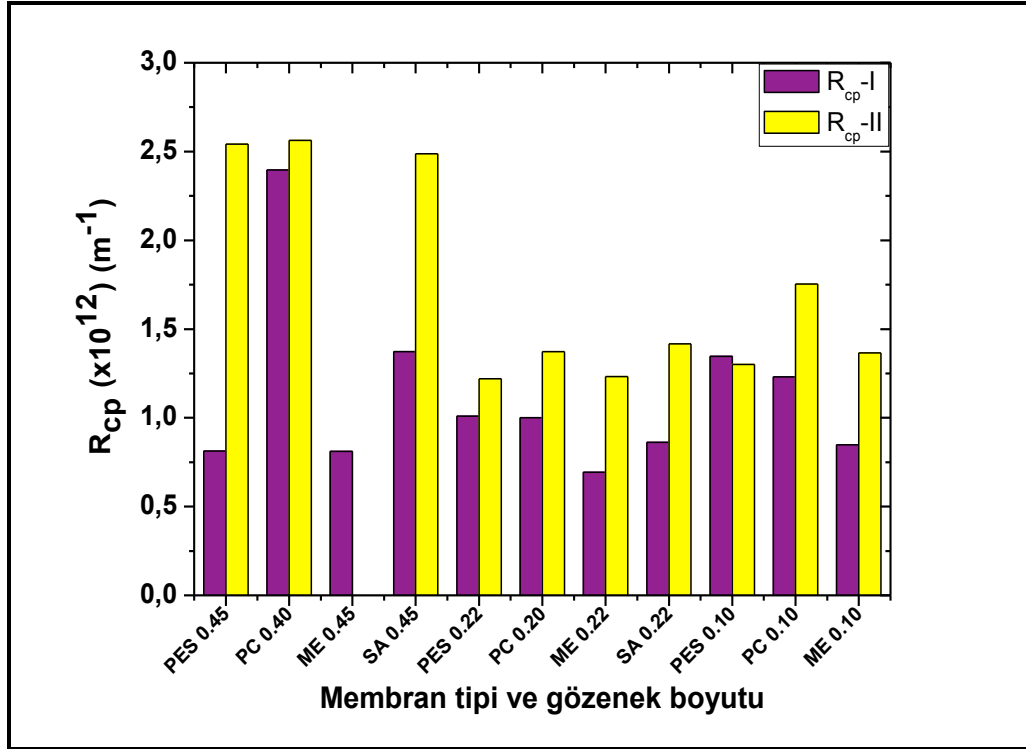




(a)



(b)



(c)

Şekil 4.24. Farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonuna ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin dağılımı (a)  $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (c)  $R_{cp}$  değerleri (Deney Set: I-II).

Çizelge 4.10'dan membranların MFI ve  $\alpha$  değerlerine bakıldığında, artan organik yükleme ve azalan çamur yaşında membranların MFI değerlerinin arttığı, buna karşın  $\alpha$  değerlerinin düştüğü görülmektedir. I nolu deney setinde en yüksek  $\alpha$  değeri ( $0.89 \times 10^{12}$  m/kg) SA 0.45 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.064 \times 10^{12}$  m/kg) PES 0.10 membranda elde edilmiştir. MFI değerlerine bakıldığında, en yüksek ( $5.10 \times 10^4$ ) PC 0.40 membranda ve en düşük ( $0.075 \times 10^4$ ) PES 0.10 membranda hesaplanmıştır.

II nolu deney setinde en yüksek  $\alpha$  değeri ( $0.52 \times 10^{12}$  m/kg) PES 0.45 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.06 \times 10^{13}$  m/kg) ME 0.10 membranda elde edilmiştir. MFI değerlerine bakıldığında, en yüksek ( $2.81 \times 10^4$ ) PES 0.45 membranda ve en düşük ( $0.26 \times 10^4$ ) PES 0.10 membranda hesaplanmıştır.

Çizelge 4.10. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyonunda hesaplanmış olan spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ), gözenek ( $R_p$ ) ve konsantrasyon polarizasyon ( $R_{cp}$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:I-II).

Membran tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	MFI ( $\times 10^4$ )		$(\alpha)$ Spesifik kek direnci ( $\text{m/kg})\times 10^{12}$		$R$ ( $\times 10^{12}$ ) ( $\text{m}^{-1}$ ) (%)									
		I	II	$\alpha$ -I	$\alpha$ -II	$R_t$ -I	$R_t$ -II	$R_m$ -I	$R_m$ -II	$R_p$ -I	$R_p$ -II	$R_c$ -I	$R_c$ -II	$R_{cp}$ -I	$R_{cp}$ -II
PES	0.45	0.78	2.81	0.67	0.52	3.31	5.36	0.051 (1.5)	0.051 (0.9)	2.16 (65.3)	1.66 (31.1)	0.29 (8.6)	1.01 (18.8)	0.81 (24.5)	2.54 (47.5)
PC	0.40	5.10	2.18	4.3	0.40	5.37	4.92	0.054 (1.0)	0.054 (1.1)	2.55 (47.5)	1.82 (36.9)	0.37 (6.9)	0.50 (9.3)	2.40 (44.6)	2.56 (52.0)
ME	0.45	0.21	-	0.18	-	2.34	-	0.064 (2.7)	-	1.12 (48.0)	-	0.35 (14.7)	-	0.81 (34.6)	-
SA	0.45	1.04	2.48	0.89	0.46	4.0	5.31	0.051 (1.3)	0.051 (1.0)	1.57 (39.4)	1.44 (27.1)	0.99 (24.8)	1.31 (24.7)	1.40 (34.4)	2.49 (46.8)
PES	0.22	0.59	1.23	0.5	0.23	3.38	3.63	0.144 (4.3)	0.144 (4.0)	1.89 (55.9)	1.64 (45.3)	0.34 (10.0)	0.63 (17.2)	1.0 (29.9)	1.22 (33.6)
PC	0.20	0.37	0.76	0.31	0.14	2.94	3.32	0.086 (2.9)	0.086 (2.6)	1.66 (56.4)	1.43 (42.9)	0.2 (6.7)	0.44 (13.2)	1.0 (34.0)	1.37 (41.3)
ME	0.22	0.2	0.38	0.17	0.07	2.34	2.75	0.067 (2.9)	0.067 (2.4)	1.14 (48.6)	1.09 (39.5)	0.44 (18.8)	0.37 (13.3)	0.69 (29.7)	1.23 (44.8)
SA	0.22	0.67	0.63	0.57	0.12	3.25	3.08	0.075 (2.3)	0.075 (2.4)	1.29 (39.8)	1.32 (42.7)	1.0 (31.4)	0.27 (8.9)	0.86 (26.5)	1.42 (46.0)
PES	0.10	0.075	0.26	0.064	0.05	2.58	2.78	0.073 (2.8)	0.073 (2.6)	1.03 (40.0)	1.40 (50.4)	0.13 (5.0)	0.0056 (0.2)	1.34 (52.1)	1.30 (46.8)
PC	0.10	0.47	0.96	0.4	0.18	2.96	3.78	0.070 (2.4)	0.070 (1.9)	1.52 (51.3)	1.49 (39.4)	0.14 (4.7)	0.47 (12.4)	1.23 (41.6)	1.75 (46.3)
ME	0.10	0.18	0.30	0.15	0.06	2.49	2.88	0.094 (3.8)	0.094 (3.3)	1.11 (44.5)	0.96 (33.2)	0.44 (17.6)	0.47 (16.2)	0.85 (34.1)	1.37 (47.4)

#### 4.1.3.3. Süzüntüde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

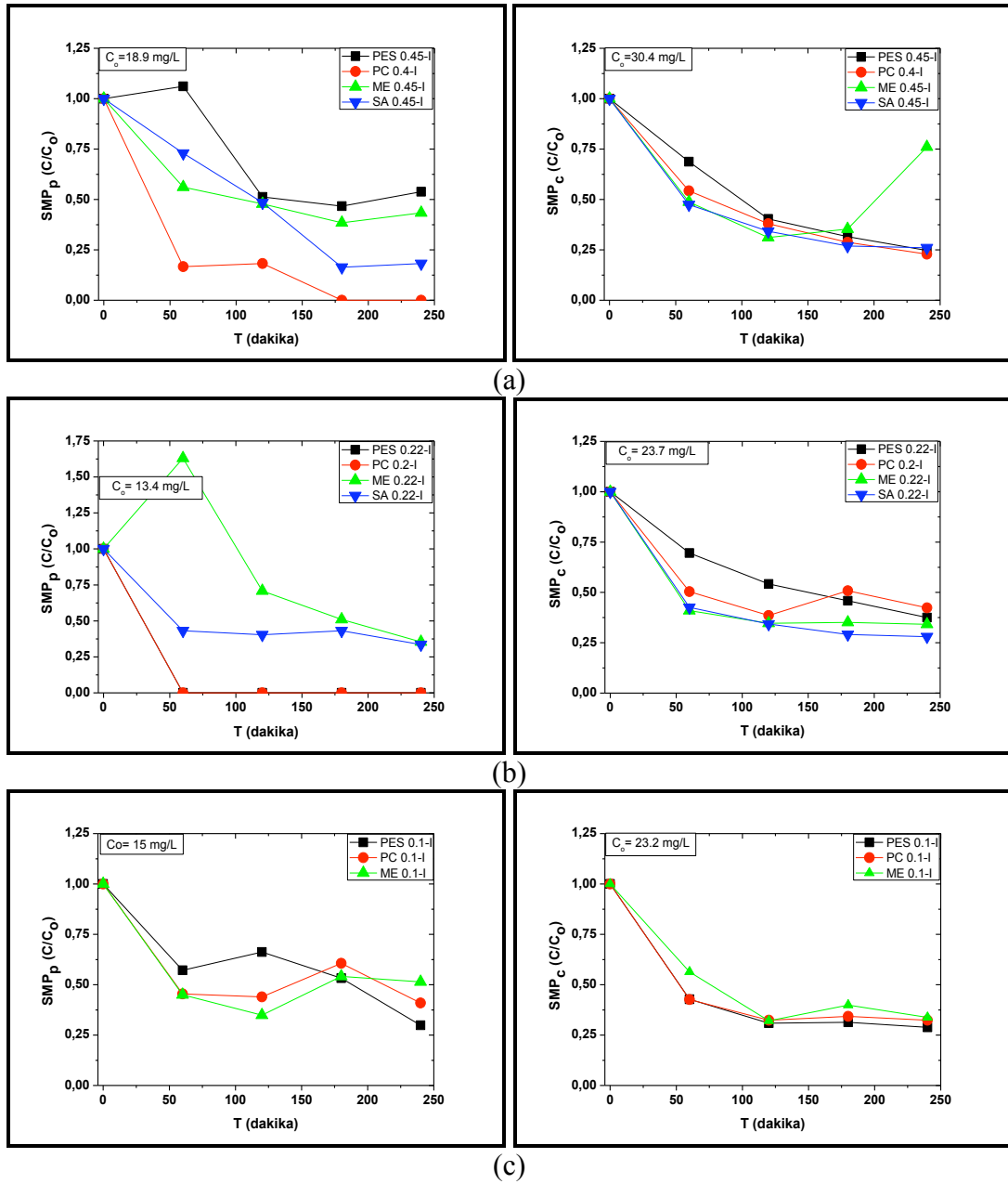
ÇAF deneylerinde membran yüzeyinde kek tabakası oluşmadığından analiz yapılmamış fakat belirli zaman aralıklarında alınan süzüntü örneklerinde SMP analizleri yapılmıştır. I nolu deney setinde elde edilmiş olan SMP analiz sonuçları gözenek boyutlarına göre Şekil 4.25 (a-c)'de verilmiştir. Bütün membranlarda hem  $SMP_p$  hem de  $SMP_c$  filtrasyon ilerledikçe azalmıştır. Filtrasyonun başında membranların boş olan gözeneklerinden  $SMP_p$  ve  $SMP_c$  süzüntüye geçmiştir fakat zamanla gözeneklerdeki tutunmalar nedeniyle geçişler durmuş dolayısıyla süzüntüde SMP konsantrasyonunda düşmüştür. II nolu deney setinde yapılmış olan SMP analizlerinin sonuçları ise Şekil 4.26 (a-c)'de gösterilmiştir. Bu çalışma sisteminde örnek alma süresi kısaltılmış, daha kısa zaman aralıklarında örnekler alınmıştır. İki deney sisteminde de membranlarda aynı verimlerde SMP tutunmaları olmuştur. İki deney seti içinde, filtrasyonun sonunda SMP'nin tutunma verimlerini (%) gösteren  $[(C_o - C_{son})/C_o] \times 100$  değerleri ise iki deney sistemi için de Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11'den görülebileceği gibi ilk deney sisteminde en yüksek  $SMP_p$  tutunumu  $0.45 \mu m$  gözenekli membranlarda PC,  $0.22 \mu m$  gözenekli membranlarda PES ve PC,  $0.10 \mu m$  gözenekli membranlarda ise PES membranlarda olmuştur. En yüksek  $SMP_c$  tutunumu ise  $0.45 \mu m$  gözenekli membranlarda yine PC,  $0.22 \mu m$  gözenekli membranlarda SA ve  $0.10 \mu m$  gözenekli membranlarda ise yine PES membranlarda olmuştur. Buradan da görülebileceği gibi ilk deney sistemindeki en düşük akı ve süzüntü hacimleri değerleri ve en yüksek gözenek dirençleri bu membranlarda olmuştur. SMP tutunumunun bu membranlarda fazla olması SMP'nin süzüntüye geçmeden membranın gözeneklerinde veya yüzeyinde tutunmuş olabileceğini göstermektedir. Bu tutunmada çapraz akış sisteminde filtrasyon performansını kötü yönde etkilemiştir. Batık membran filtrasyonun da SMP'nin kek tabakasında tutunması filtrasyon performanslarını artırırken ÇAF sisteminde azaltmıştır. Çünkü ÇAF sisteminde ortamdaki SMP bileşenleri yüksek hızla membranın gözeneklerine doğru hareket eder. Batık membran filtrasyonunda ise membran yüzeyindeki kesme kuvvetlerinin ÇAF sisteminden daha düşük olması nedeniyle SMP membranın yüzeyindeki kek tabakasında tutunur, gözenekleri tıkanması ÇAF sisteminden daha düşük olur.

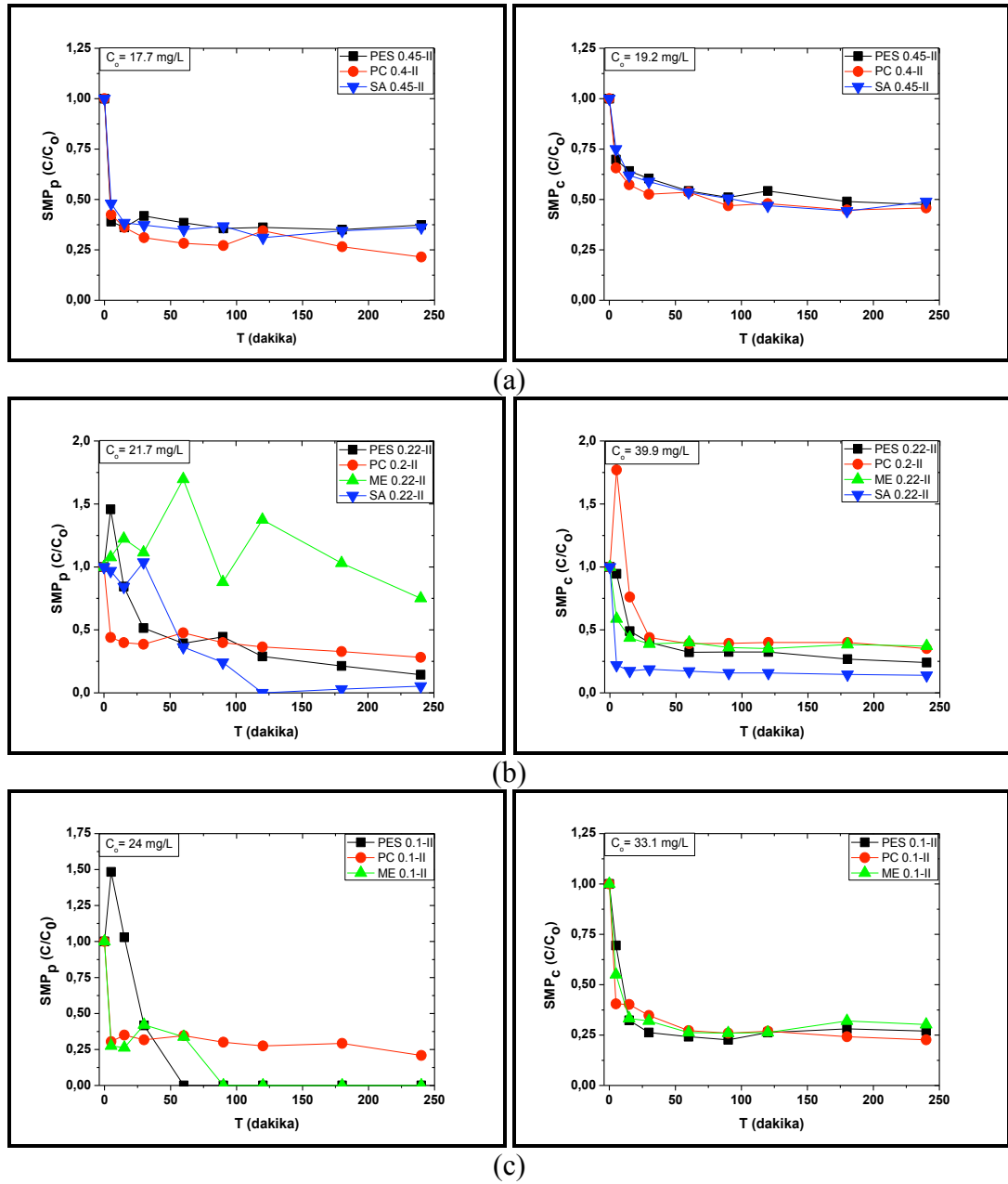
II nolu deney setinde, en yüksek  $SMP_p$  tutunumu  $0.45 \mu\text{m}$  gözenekli membranlarda yine PC,  $0.22 \mu\text{m}$  gözenekli membranlarda SA,  $0.10 \mu\text{m}$  gözenekli membranlarda ise PES ve ME membranlarda olmuştur. En yüksek  $SMP_c$  tutunumu ise  $0.45 \mu\text{m}$  gözenekli membranlarda yine PC,  $0.20 \mu\text{m}$  gözenekli membranlarda SA ve  $0.10 \mu\text{m}$  gözenekli membranlarda ise PC membranlarda olmuştur. Yine bu deney sisteminde de PC membranlarda  $SMP$  tutunumu bu membranlardaki gözenek direncinin yüksek olmasını açıklamaktadır.

Çizelge 4.11. Farklı işletme şartlarında JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sisteminde membranların  $SMP$  tutma verimleri (Deney Set:I-II).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	SMP tutma verimi (%)			
		$SMP_p$		$SMP_c$	
		I	II	I	II
PES	0.45	46.2	62.7	75.3	52.6
PC	0.40	100.0	78.5	77.1	54.2
ME	0.45	56.7		23.9	
SA	0.45	81.8	63.8	73.9	51.0
PES	0.22	100.0	85.5	62.5	75.9
PC	0.20	100.0	71.8	57.6	64.9
ME	0.22	49.0	25.0	65.9	62.9
SA	0.22	56.8	94.7	72.0	86.0
PES	0.10	46.8	100.0	71.2	73.0
PC	0.10	39.4	79.2	67.6	77.3
ME	0.10	45.9	100.0	66.3	69.8



Şekil 4.25. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sisteminde toplanan süzöntü numunelerinde zamanla SMP değişimi (Deney Set:I) (a) 0.45 µm membranlar (b) 0.22 µm membranlar (c) 0.1 µm membranlar.



Şekil 4.26. Kısa çamur yaşı ve yüksek organik yüklemde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sisteminde toplanan süzöntü numunelerinde zamanla SMP değişimi (Deney Set:II) (a) 0.45 µm membranlar (b) 0.22 µm membranlar (c) 0.1 µm membranlar.

#### 4.1.3.4. Membran yüzeylerinde yapılan AFM analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

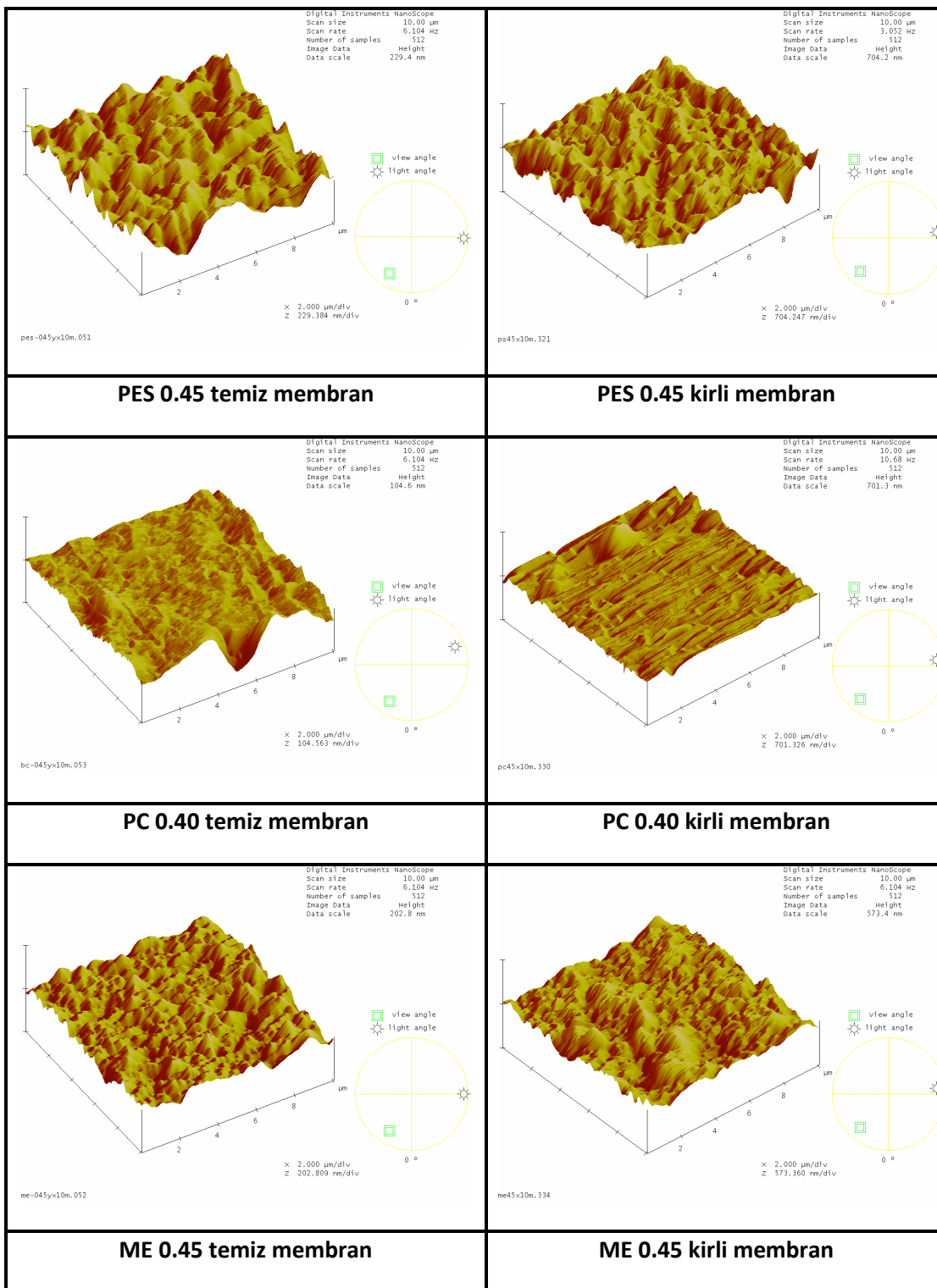
Çapraz akış filtrasyon sisteminde I nolu deney setine ait membranların AFM analizlerinin sonuçları Şekil 4.27’de verilmiştir. Soldaki resimler temiz, sağdaki resimler kirli membranların AFM resimleridir. Batık membran filtrasyon sisteminde

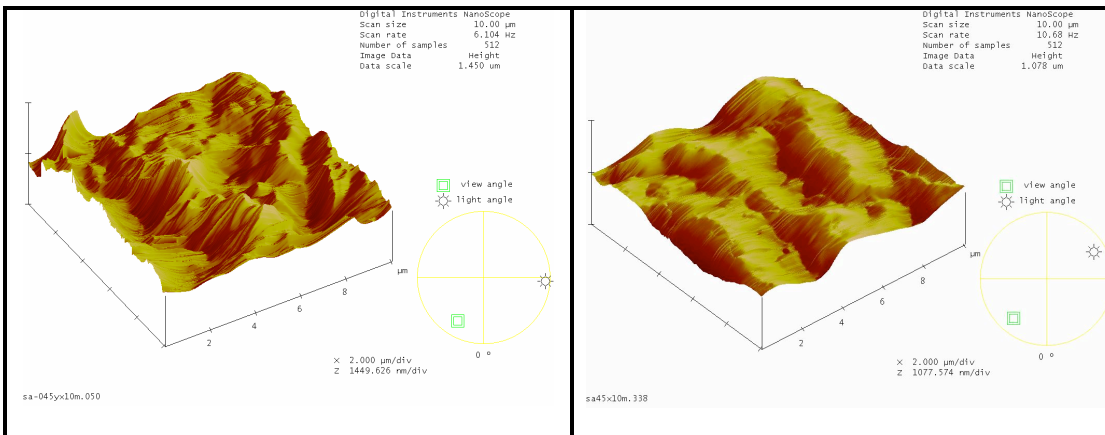
yapılmış olan AFM analizlerinde de belirtildiği gibi PES, ME ve SA membranların yüzeylerinde bakterilerin veya metabolik ürünlerinin tutunabileceği girinti ve çıkıntılar PC membrana göre daha yüksektir. AFM analizlerinde ölçülen ve membranların ortalama pürüzlülüğünü gösteren  $R_a$  değerleri Çizelge 4.12’de özetlenmiştir. Temiz membranların  $R_a$  değerlerine bakıldığında en düşük  $R_a$  değerleri bütün gözenek boyutlarında PC membranda, en yüksek değerler ise SA membranda ölçülmüştür. Filtrasyondan sonraki  $R_a$  değerlerine bakıldığında, batık membran filtrasyonundaki değerlere çok yakın çıktığı görülmektedir. Batık membran filtrasyonundan farklı olarak SA membranların  $R_a$  değeri çok yüksek çıkmıştır. Bu membranların I nolu deney setindeki filtrasyon deneylerinde  $R_c$  değerleri diğer membranlara göre çok yüksek çıkmıştır. Bunun yanında  $R_p$  ve  $R_{cp}$  değerleri de diğer membranlara göre daha az olmuştur. Membran yüzeyindeki kek tabakası gözeneklerin kirlenmesini önlemiştir. Süzüntü de yapılmış olan SMP analizlerinde de bu membranların SMP tutma kapasiteleri diğer membranlara göre yüksek çıkmıştır. Bundan dolayı bu membranlar I nolu deney setinde ÇAF sistemi için performansı en yüksek membranlar olmuştur.

Çizelge 4.12. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sistemindeki membranların AFM analizlerindeki  $R_a$  değerleri (Deney Set:I).

Membran Tipi	BOŞ MEMBRAN	KİRLİ MEMBRAN
	$R_a$ (nm)	$R_a$ (nm)
PES 0.45	22.963	33.3
PC 0.40	4.857	34.8
ME 0.45	13.823	29.3
SA 0.45	89.107	66.0
PES 0.22	41.883	31.0
PC 0.20	2.753	18.0
ME 0.22	54.917	29.3
SA 0.22	138.630	115.0
PES 0.10	41.912	24.8
PC 0.10	10.617	27.8
ME 0.10	61.699	31.2

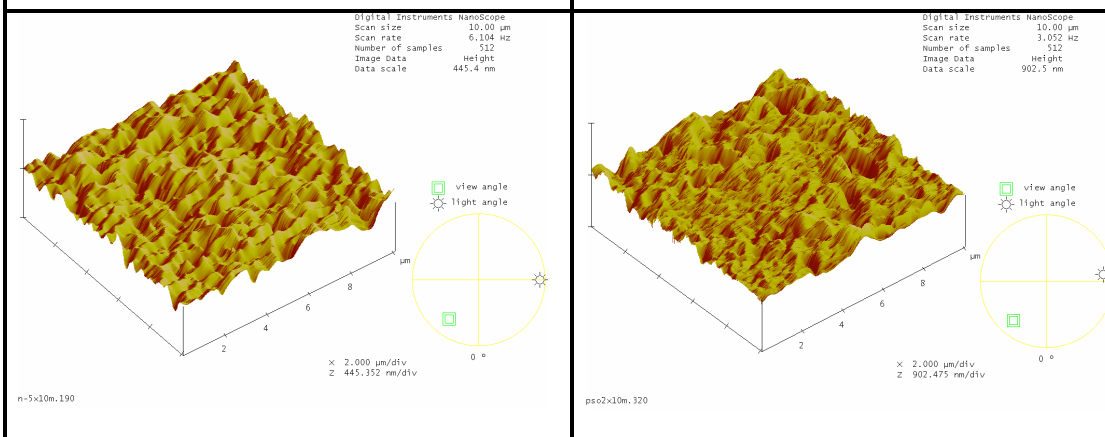






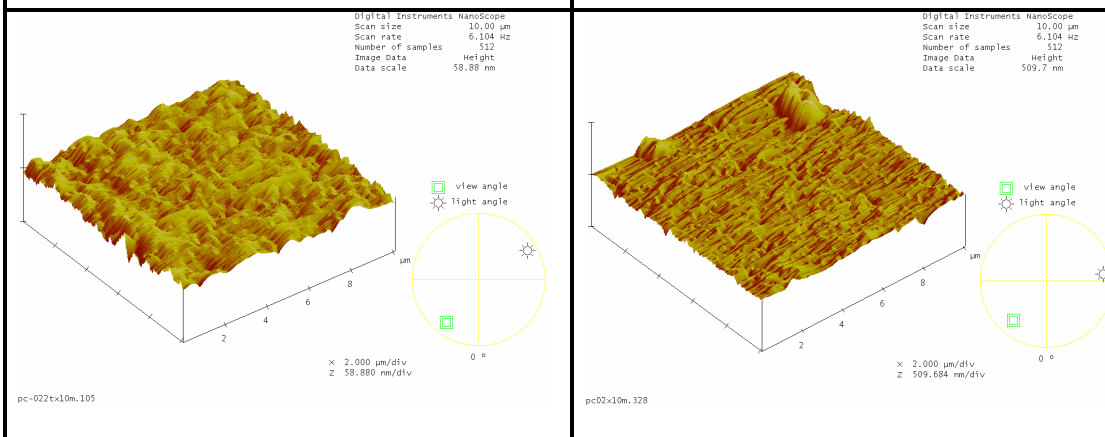
**SA 0.45 temiz membran**

**SA 0.45 kirli membran**



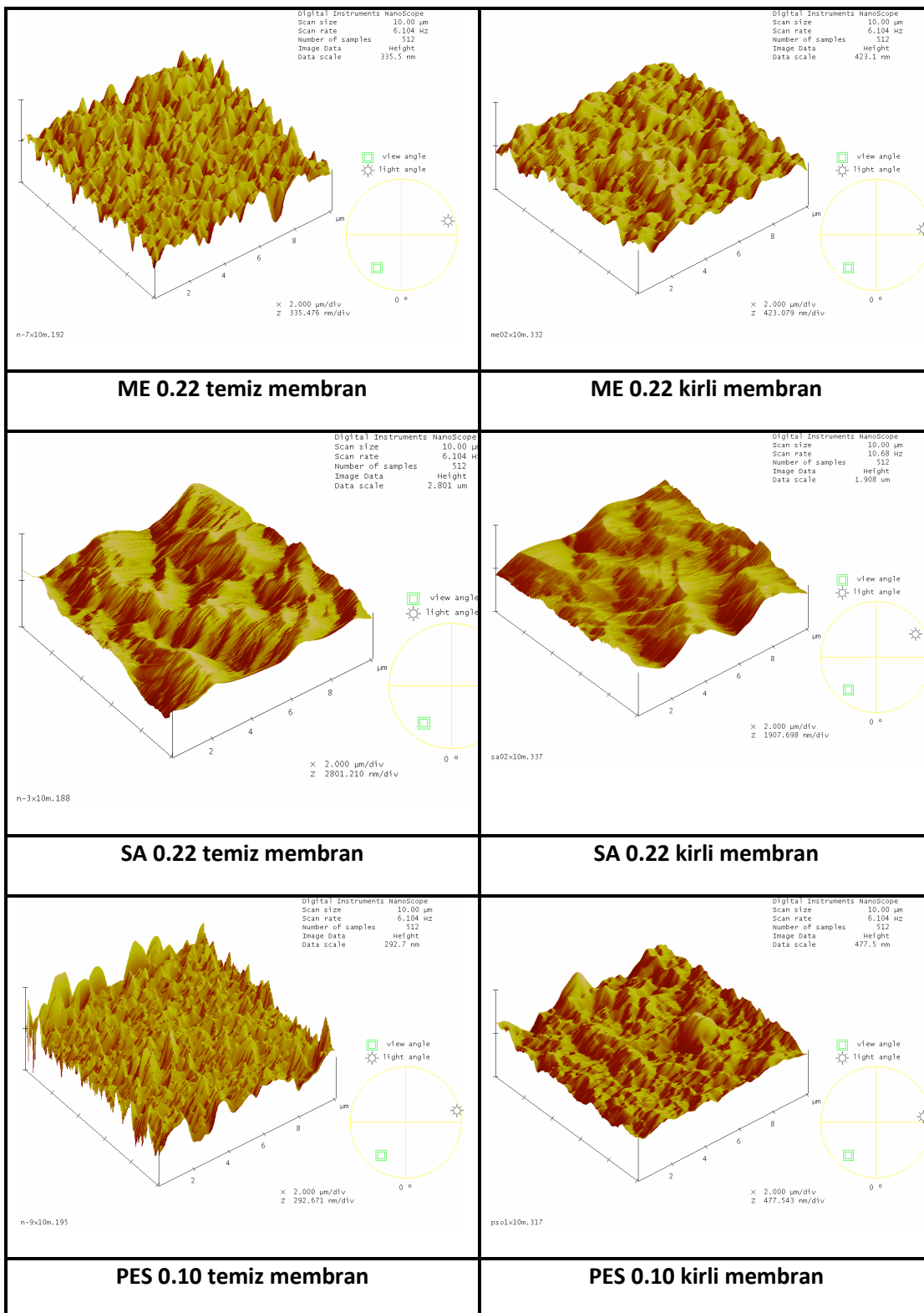
**PES 0.22 temiz membran**

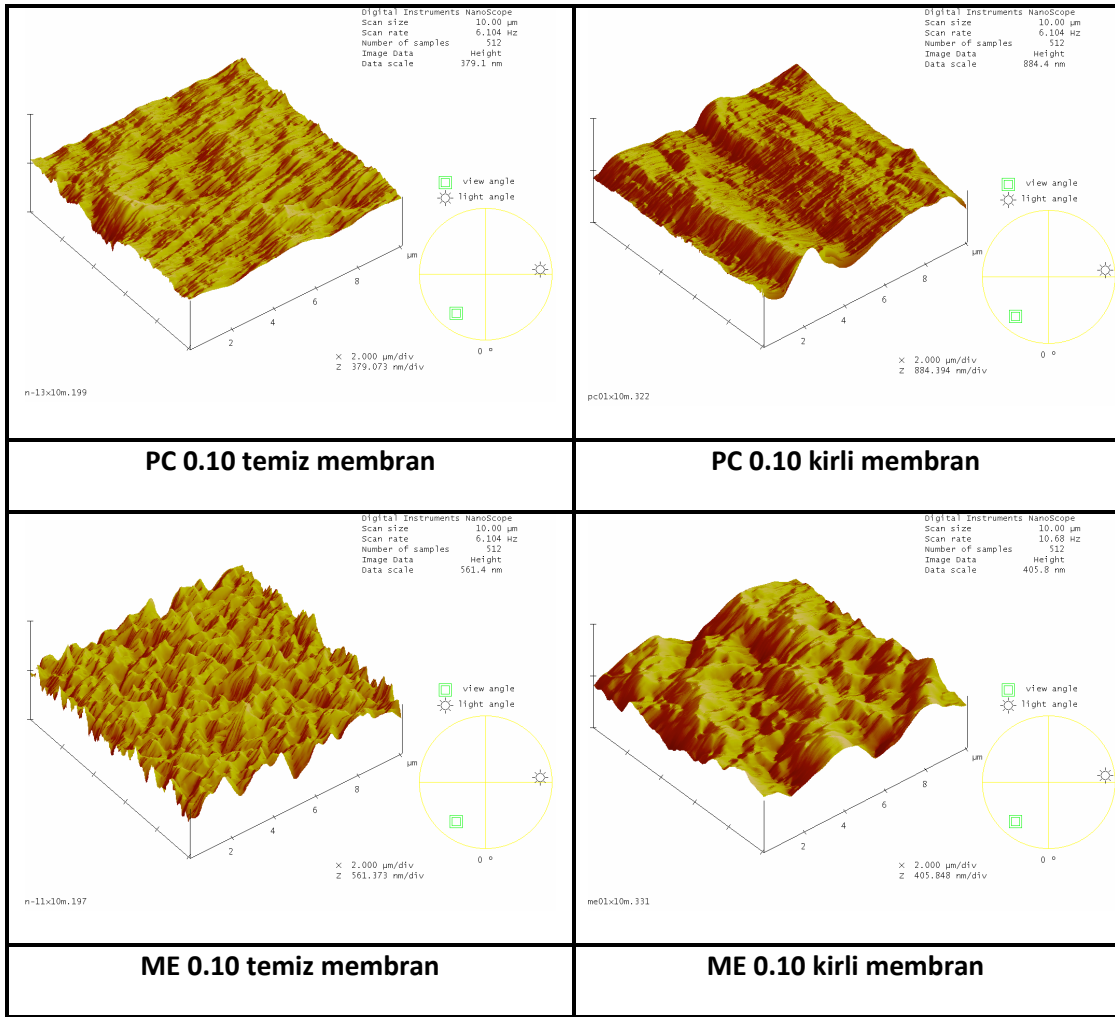
**PES 0.22 kirli membran**



**PC 0.20 temiz membran**

**PC 0.20 kirli membran**





Şekil 4.27. Sonsuz çamur yaşı ve düşük organik yüklemelerde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon sisteminde kullanılan membranların temiz ve kirli AFM resimleri (Deney Set:I).

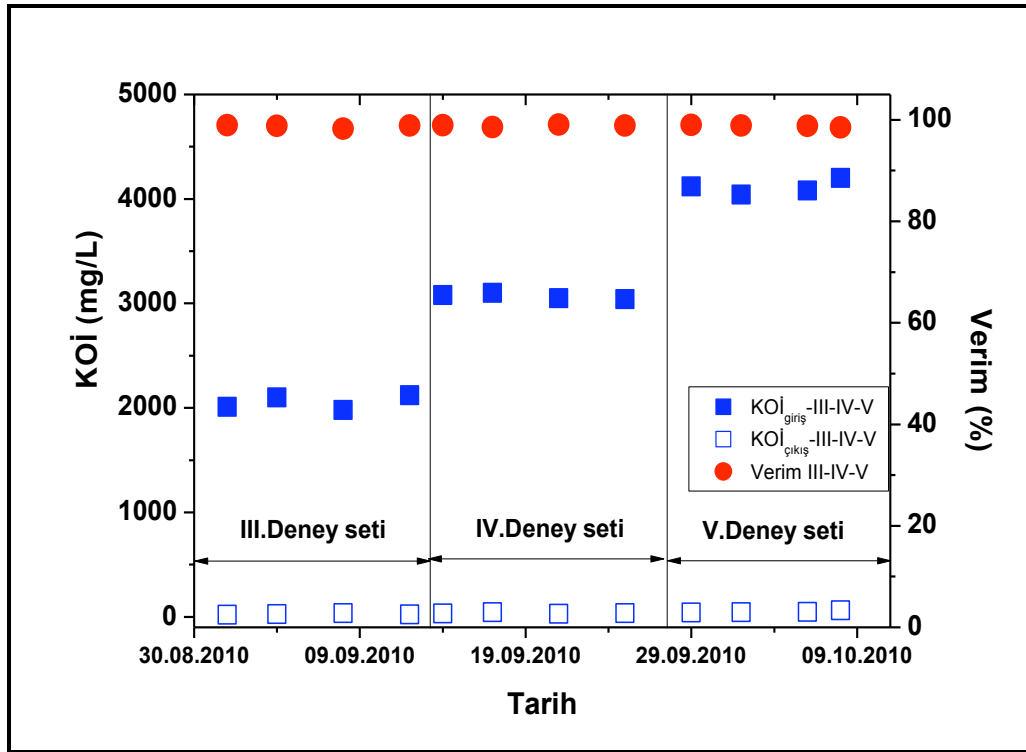
## 4.2. Farklı Organik Yüklemelerde Reaktördeki Parametrelerin Değişiminin ve Filtrasyon Performanslarının Araştırılması (Deney Set : III-IV-V)

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, ilk aşamada incelenen işletim şartlarından çamur yaşı sabit tutulup organik yüklemenin değişiminin reaktördeki parametrelere ve dolayısıyla filtrasyon performanslarına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla JLMBR üç farklı organik yüklemeye işletilmiştir. III nolu deney setinde reaktör  $2055 \pm 63.6$  mg/L giriş KOİ konsantrasyonu ile 13 gün sürekli olarak çalıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda filtrasyon sistemi olarak sadece batık membran filtrasyon sistemi kullanılarak ilk aşama deneylerindeki gibi seçilen 11 membranın kirlenme

mekanizması incelenmiştir. Deneilerin ardından reaktör IV nolu deney seti için,  $3100 \pm 28.3$  mg/L giriş KOİ konsantrasyonunda 14 gün sürekli olarak işletilmiştir ve batık membran filtrasyon deneyleri yapılmıştır. Son olarak V nolu deney setine geçilmiş, reaktör  $4050 \pm 99.0$  mg/L giriş KOİ konsantrasyonunda 11 gün işletilmiş ve batık membran filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu üç deney setinin deneysel sonuçları iki başlık altında verilmiştir; reaktördeki parametrelerin değişimi ve batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutunun etkisinin araştırılması. Bu başlıklar altında, deneysel sonuçlar üç setin birbiriyle ve literatürde yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırmasıyla değerlendirilmiştir.

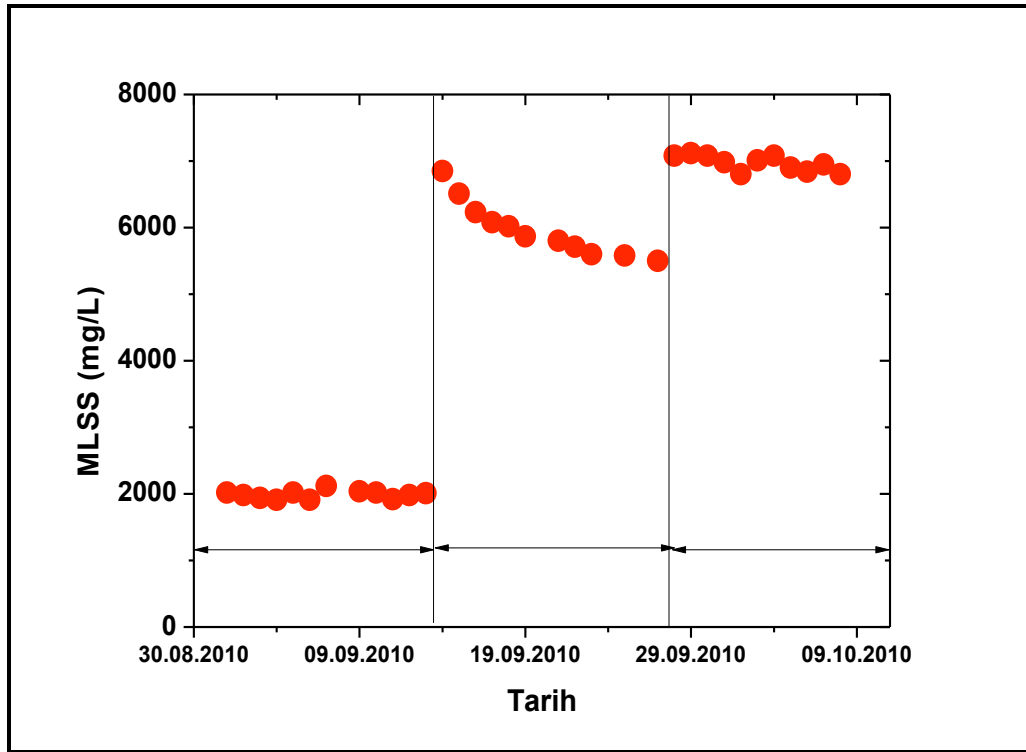
#### 4.2.1. Reaktördeki parametrelerin değişimi

**KOİ Değişimi;** Bu deney setinde reaktördeki çamur yaşı 3 güne ayarlanmıştır. Reaktör, düşük organik yüklemekten yüksek organik yüklemeye doğru çalıştırılmıştır. İlk olarak III nolu deney seti için, sentetik atıksuyun giriş KOİ konsantrasyonu ortalama  $2053 \pm 68$  mg/L'ye ayarlanmıştır. Bu durumda organik yükleme  $3.6 \pm 0.1$  kgKOİ/m<sup>3</sup>gün olmaktadır. Tübüler membran çıkışındaki KOİ değeri ortalama  $26 \pm 6$  mg/L olarak ölçülmüş ve buna göre KOİ giderim verimleri ise  $\%98.7 \pm 0.3$  değerlerinde olmuştur. IV nolu deney setinde sentetik atıksuyun giriş KOİ konsantrasyonu ortalama  $3068 \pm 28$  mg/L'ye ayarlanmıştır. Bu durumda organik yükleme  $5.33 \pm 0.1$  kgKOİ/m<sup>3</sup>gün olmaktadır. Tübüler membran çıkışındaki KOİ değeri ortalama  $35 \pm 7$  mg/L ve buna göre KOİ giderim verimleri ise  $\%98.9 \pm 0.2$  değerlerinde olmuştur. V nolu deney setinde ise sentetik atıksuyun giriş KOİ konsantrasyonu  $4110 \pm 68$  mg/L değerine ayarlanmıştır. Buna bağlı olarak organik yükleme  $7.2 \pm 0.1$  kgKOİ/m<sup>3</sup>gün, tübüler membran çıkışındaki KOİ değeri  $49 \pm 9$  mg/L ve KOİ giderim verimi de  $\%98.8 \pm 0.2$  olarak bulunmuştur. Şekil 28'de deney setlerinde reaktördeki KOİ değişimleri verilmiştir. Görüldüğü gibi organik yüklemeler çok kısa zaman aralıklarında değiştirilmiş olmasına rağmen KOİ giderim verimleri yine çok yüksek değerlerde olmuştur. Reaktör farklı atıksu karakterleri için yüksek performans göstermiştir.



Şekil 4.28. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki KOİ değerlerinin zamanla değişimi (Deney No:III-IV-V).

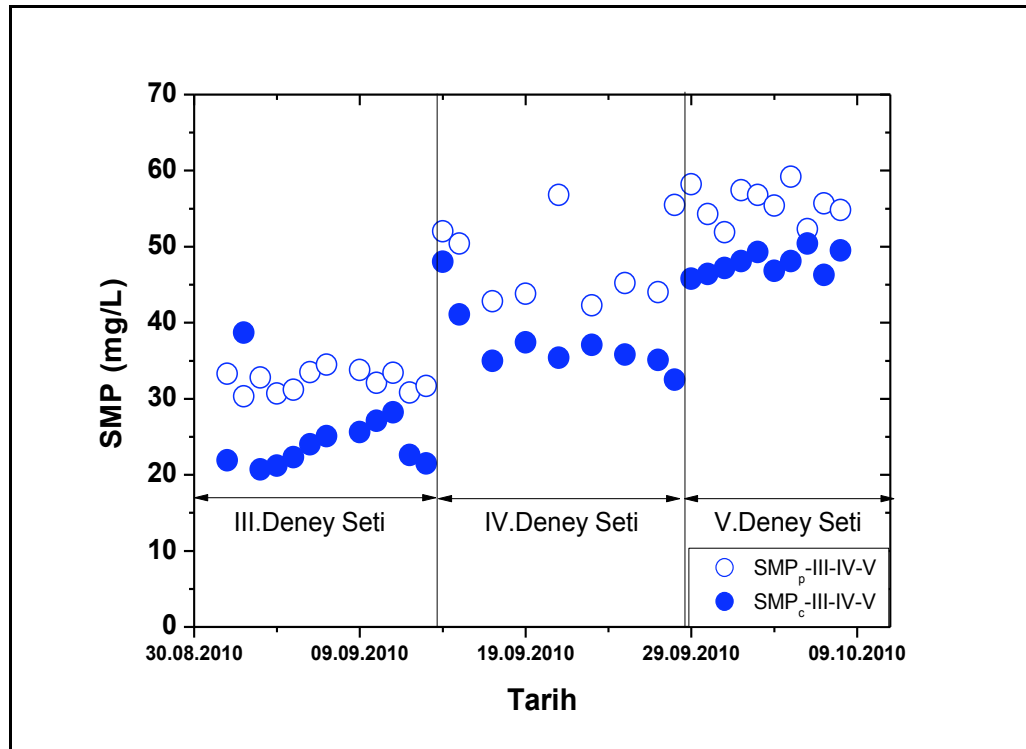
**MLSS Değişimi;** Değişen organik yüklemeye bağlı olarak reaktörde MLSS konsantrasyonları da değişmiştir. Artan organik yüklemeye birlikte MLSS konsantrasyonları da artış göstermiştir. MLSS konsantrasyonu III deney setinde ortalama  $1989 \pm 62$  mg/L, IV nolu deney setinde ortalama  $5977 \pm 420$  mg/L ve V nolu deney setinde ise ortalama  $6967 \pm 118$  mg/L değerlerinde olmuştur. Deney setlerinin F/M oranlarına bakıldığında, III nolu deney seti için F/M oranı ortalama  $1.81$  kgKOİ/kgMLSSgün, IV nolu deney seti için de F/M ortalama  $0.89$  kgKOİ/kgMLSSgün ve V nolu deney seti için de F/M ortalama  $1.03$  kgKOİ/kgMLSSgün olarak hesaplanmıştır. F/M oranlarının yüksek olmasının nedeni düşük çamur yaşıdır. Şekil 4.29'da üç deney setinde, reaktördeki MLSS konsantrasyonlarının değişimi gösterilmiştir.



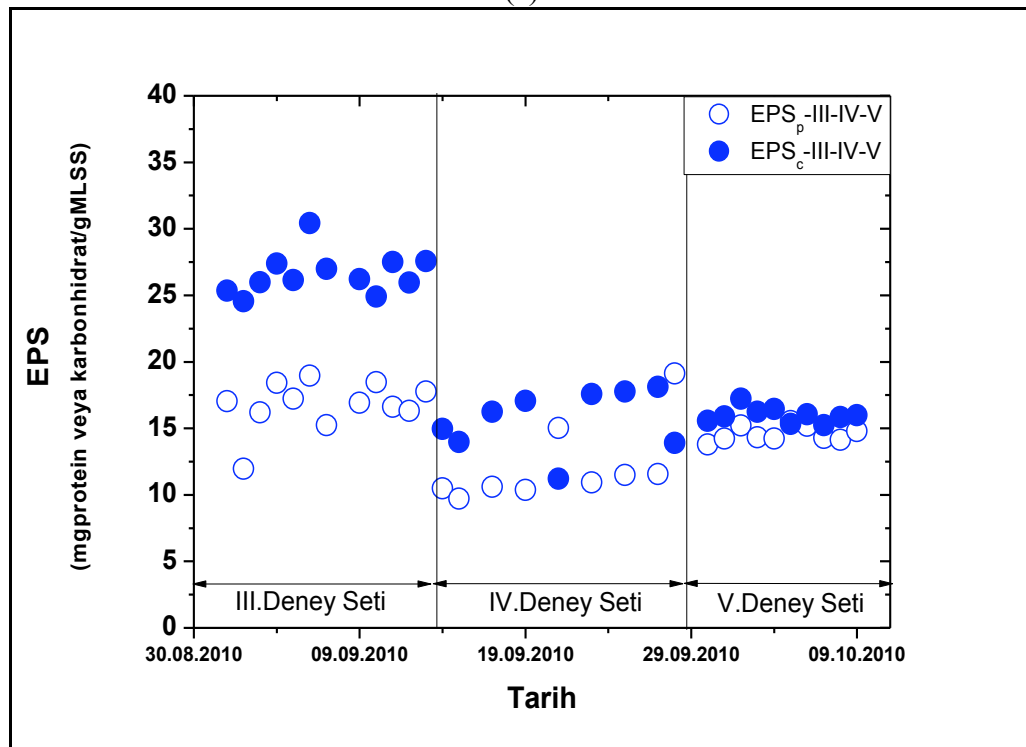
Şekil 4.29. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki MLSS konsantrasyonunun zamanla değişimi (Deney No:III-IV-V).

**SMP ve EPS değişimi;** JLMBR’de çamurun SMP ve EPS değişimleri bu deney setinde de sürekli olarak takip edilmiştir. SMP mg/L birimi ile EPS konsantrasyonu ise mg protein veya karbonhidrat/g MLSS olarak verilmiştir. Üç deney setinde SMP ve EPS’nin protein ve karbonhidrat içeriklerindeki değişimler Şekil 4.30 (a-b)’de verilmiştir. Artan organik yüklemeye birlikte SMP konsantrasyonları artmış EPS konsantrasyonları ise azalmıştır. İlk aşamada yapılmış olan deney sonuçlarına benzer şekilde, artan organik yükleme ve MLSS konsantrasyonları EPS’nin miktarını azaltmaktadır. III nolu deneyde  $SMP_p$  ortalama  $32.3 \pm 1.4$  mg/L,  $SMP_c$   $24.9 \pm 5.0$  mg/L,  $EPS_p$   $16.8 \pm 1.8$  mg protein/g MLSS ve  $EPS_c$   $26.6 \pm 1.6$  mg karbonhidrat/g MLSS olarak ölçülmüştür. IV nolu deneyde  $SMP_p$  ortalama  $47.2 \pm 5.3$  mg/L,  $SMP_c$   $38.1 \pm 4.5$  mg/L,  $EPS_p$   $11.3 \pm 1.6$  mg protein/g MLSS ve  $EPS_c$   $15.9 \pm 2.4$  mg karbonhidrat/g MLSS olarak ölçülmüştür. V nolu deney sisteminde ise  $SMP_p$  ortalama  $55.6 \pm 2.3$  mg/L,  $SMP_c$   $46.4 \pm 4.8$  mg/L,  $EPS_p$   $15.0 \pm 1.5$  mgprotein/grMLSS ve  $EPS_c$   $15.8 \pm 0.8$  mg karbonhidrat/g MLSS olarak ölçülmüştür. Organik yükleme arttıkça SMP’nin de artması, düşük çamur yaşında F/M oranının artmasından kaynaklanmaktadır. SMP ve EPS’nin protein ve karbonhidrat oranları (P/C) Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Genel olarak SMP’nin P/C oranı yüksek, EPS’nin P/C oranı

ise düşük olmuştur. Sabit çamur yaşında, artan organik yüklemeye de SMP'nin protein içeriği, EPS'nin ise karbonhidrat içeriği daha yüksek çıkmıştır.



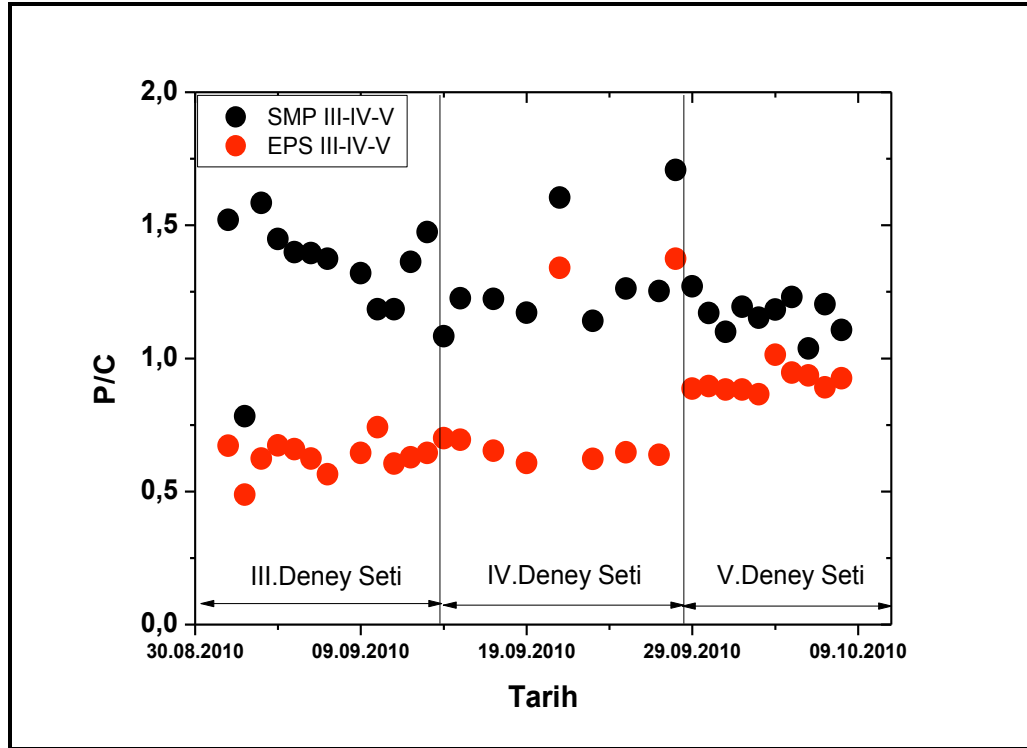
(a)



(b)

Şekil 4.30. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki SMP ve EPS konsantrasyonlarının zamanla değişimi (Deney Set: III-IV-V) (a) SMP (b) EPS.





Şekil 4.31. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki SMP ve EPS'nin P/C oranlarının değişimi (Deney Set:III-IV-V).

**Göreceli hidrofobisite ve viskozite değişimi;** III nolu deney setinde çamurun göreceli hidrofobisitesi  $6.4 \pm 1.6$  ve viskozitesi de  $1.3 \pm 0.1$  cP olarak, IV nolu deney setinde göreceli hidrofobisite  $17.9 \pm 4.7$ , viskozite  $2.0 \pm 0.1$  cP ve V nolu deney setinde çamurun göreceli hidrofobisitesi  $22.1 \pm 3.2$ , viskozite  $2.2 \pm 0.1$  cP olarak ölçülmüştür. Hidrofobisite değerinin düşük olması çamurun hidrofilik yani suyu seven bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Düşük organik yüklemde dolayısıyla düşük MLSS konsantrasyonlarında göreceli hidrofobisite ve viskozite değerleri de düşük olmuştur. Artan MLSS değeri ile bu değerlerde artmıştır. Bunun yanında, ilk aşamada yapılan deneylerde elde edilen  $EPS_p$  ile hidrofobisite arasındaki ilişkiye dayanarak, bu deney setlerinde de artan  $EPS_p$ 'nin  $EPS_c$ 'ye artışında hidrofobisitenin artmasında da katkısı olduğu düşünülmektedir.

**İstatiksel Analiz;** Üç deney seti için günlük MLSS konsantrasyonu ile  $SMP_p$ ,  $SMP_c$ ,  $EPS_p$  ve  $EPS_c$  konsantrasyonları, hidrofobisite ve viskozite değerleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak ifade etmek için datalar arasında Pearson korelasyon analizi yapılmıştır. Sonuçlar, Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15'de verilmiştir. III nolu deney setinin korelasyon analizinde, MLSS ile hidrofobisite ve viskozite

değerleri arasında pozitif, SMP ve EPS miktarları arasında negatif korelasyon olduğu görülmektedir. En yüksek korelasyon değerleri  $SMP_p$  ile göreceli hidrofobisite arasında (-0.729),  $EPS_p$  ile  $SMP_c$  arasında (-0.724),  $EPS_p$  ile  $EPS_c$  arasında (0.531) ve göreceli hidrofobisite ile viskozite arasında (0.506) olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.13. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki III nolu deney setinin MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:III).

	MLSS	$SMP_p$	$SMP_c$	$EPS_p$	$EPS_c$	HYD*	VIS**
MLSS	1	-0.269	-0.037	-0.083	-0.015	0.494	0.177
$SMP_p$	-0.269	1	-0.195	0.192	0.349	-0.729	-0.269
$SMP_c$	-0.037	-0.195	1	-0.724	-0.349	0.101	0.348
$EPS_p$	-0.083	0.192	-0.724	1	0.531	-0.007	-0.251
$EPS_c$	-0.015	0.349	-0.349	0.531	1	0.274	-0.009
HYD*	0.494	-0.729	0.101	-0.007	0.274	1	0.506
VIS**	0.177	-0.269	0.348	-0.251	-0.009	0.506	1

\*HYD:Göreceli hidrofobisite için kısaltma.

\*\*VIS:Viskozite için kısaltma.

IV nolu deney setinin korelasyon analizinde, MLSS ile SMP konsantrasyonu, hidrofobisite ve viskozite değerleri arasında pozitif, EPS miktarları arasında negatif korelasyon olduğu görülmektedir. III nolu deney setinden farklı olarak, bu deney setinde MLSS ile SMP arasında doğru orantı çıkmıştır. En yüksek korelasyon değerleri MLSS ile göreceli hidrofobisite arasında (0.789), MLSS ile  $SMP_c$  arasında (0.875),  $EPS_c$  ile  $SMP_p$  arasında (-0.917),  $SMP_c$  ile göreceli hidrofobisite arasında (0.862),  $EPS_p$  ile  $EPS_c$  arasında (-0.542) ve  $EPS_c$  ile viskozite arasında (-0.559) olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.14. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki IV nolu deney setinin MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:IV).

	MLSS	SMP <sub>p</sub>	SMP <sub>c</sub>	EPS <sub>p</sub>	EPS <sub>c</sub>	HYD*	VIS**
MLSS	1	0.465	0.875	-0.409	-0.442	0.789	0.447
SMP <sub>p</sub>	0.465	1	0.403	0.556	-0.917	0.426	0.501
SMP <sub>c</sub>	0.875	0.403	1	-0.411	-0.227	0.862	0.209
EPS <sub>p</sub>	-0.409	0.556	-0.411	1	-0.542	-0.166	0.045
EPS <sub>c</sub>	-0.442	-0.917	-0.227	-0.542	1	-0.28	-0.559
HYD*	0.789	0.426	0.862	-0.166	-0.28	1	0.264
VIS**	0.447	0.501	0.209	0.045	-0.559	0.264	1

\*HYD:Göreceli hidrofobisite için kısaltma.

\*\*VIS:Viskozite için kısaltma.

V nolu deney setinin korelasyon analizinde, MLSS ile SMP<sub>p</sub> ve EPS<sub>p</sub> konsantrasyonu, hidrofobisite ve viskozite değerleri arasında pozitif, EPS<sub>c</sub> ve SMP<sub>c</sub> miktarları arasında negatif korelasyon olduğu görülmektedir. Diğer iki deney setinden farklı olarak, bu deney setinde MLSS ile EPS<sub>p</sub> arasında doğru orantı çıkmıştır. En yüksek korelasyon değerleri MLSS ile SMP<sub>c</sub> arasında (-0.506), MLSS ile viskozite arasında (0.875), SMP<sub>c</sub>'nin EPS<sub>p</sub> ile arasında (-0.877), EPS<sub>c</sub> ile arasında (0.715) ve göreceli hidrofobisite ile arasında (-0.603), EPS<sub>p</sub> ile EPS<sub>c</sub> arasında (-0.647) ve göreceli hidrofobisite ile arasında (0.751), EPS<sub>c</sub> ile göreceli hidrofobisite arasında (-0.841) olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.15. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki V nolu deney setinin MLSS değişimi ile SMP, EPS, göreceli hidrofobisite ve viskozite arasındaki pearson istatistiksel analiz sonuçları (Deney Set:V).

	MLSS	SMP <sub>p</sub>	SMP <sub>c</sub>	EPS <sub>p</sub>	EPS <sub>c</sub>	HYD*	VIS**
MLSS	1	0.085	-0.506	0.268	-0.299	0.184	0.665
SMP <sub>p</sub>	0.085	1	-0.057	-0.073	-0.086	-0.07	0.371
SMP <sub>c</sub>	-0.506	-0.057	1	-0.877	0.715	-0.603	-0.362
EPS <sub>p</sub>	0.268	-0.073	-0.877	1	-0.647	0.751	0.201
EPS <sub>c</sub>	-0.299	-0.086	0.715	-0.647	1	-0.841	-0.457
HYD*	0.184	-0.07	-0.603	0.751	-0.841	1	-0.186
VIS**	0.665	0.371	-0.362	0.201	-0.457	-0.186	1

\*HYD:Göreceli hidrofobisite için kısaltma.

\*\*VIS:Viskozite için kısaltma.

Sonuç olarak sabit çamur yaşı ve değişen organik yüklemelerde reaktördeki parametrelerin değişimi Çizelge 4.16'da sunulmuştur. Organik yüklemenin arttırılmasıyla MLSS ve SMP konsantrasyonları ile göreceli hidrofobisite ve viskozite değerleri artmış, EPS miktarları azalmıştır.

Çizelge 4.16. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sistemindeki parametrelerin deney setlerine göre ortalama değerleri. (Deney Set:III-IV-V).

Parametre	Deney set: III	Deney set: IV	Deney set: V
KOİ <sub>giriş</sub> (mg/L)	2053±68	3068±28	4110±68
KOİ giderim verimi (%)	98.7±0.3	98.9±0.2	98.8±0.2
MLSS (mg/L)	1989±62	5977±420	6967±118
F/M (kgKOİ/kgMLSSgün)	1.81	0.89	1.03
SMP <sub>p</sub> (mg/L)	32.3±1.4	47.2±5.3	55.6±2.3
SMP <sub>c</sub> (mg/L)	24.9±5.0	38.1±4.5	46.4±4.8
EPS <sub>p</sub> (mgprotein/gMLSS)	16.8±1.8	11.3±1.6	15.0±1.5
EPS <sub>c</sub> (mgkarbonhidrat/gMLSS)	26.6±1.6	15.9±2.4	15.8±0.8
Göreceli hidrofobisite (%)	6.4±1.6	17.9±4.7	22.1±3.2
Viskozite (cP)	1.3±0.1	2.0±0.1	2.2±0.1

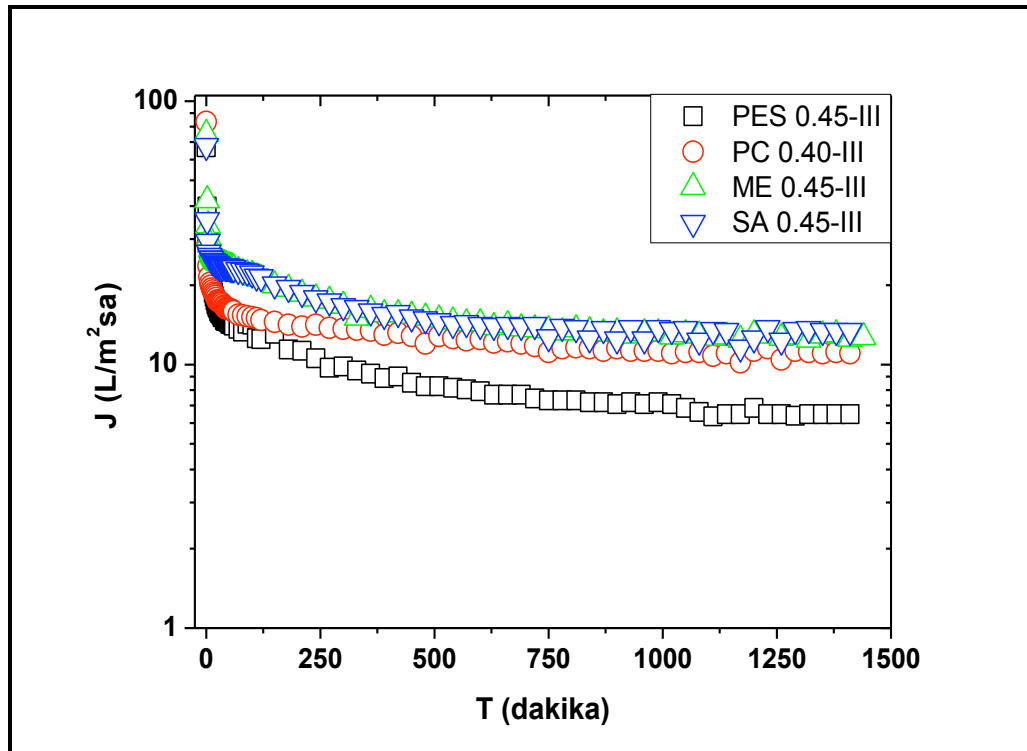
#### 4.2.2. Batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutunun etkisinin araştırılması

##### 4.2.2.1. Membran tipi ve gözenek boyutunun akı değişimlerine etkisi

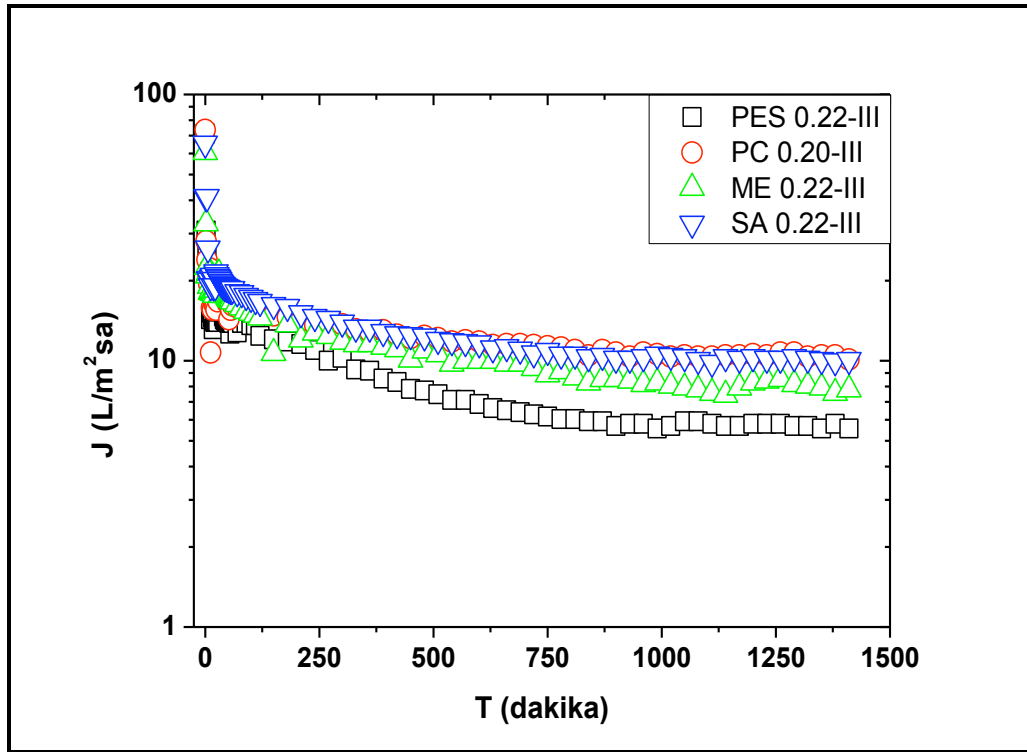
Bu deney sisteminde değişen organik yüklemelerde işletilen reaktörde batık membran filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler büyük membran gözenek boyutundan küçük membran gözenek boyutuna doğru gerçekleştirilmiştir. Seçilen membranların değişen organik yükleme karşısındaki filtrasyon performansları akı-zaman grafikleri ve  $J_o$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerinin çizelgesi ile karşılaştırılmıştır.

III nolu deney sisteminin akı-zaman grafiği membran gözenek boyutlarına göre Şekil 4.32 (a-c)'de verilmiştir. Bu deney setinde filtrasyonun ilk 30 dakikasındaki akı

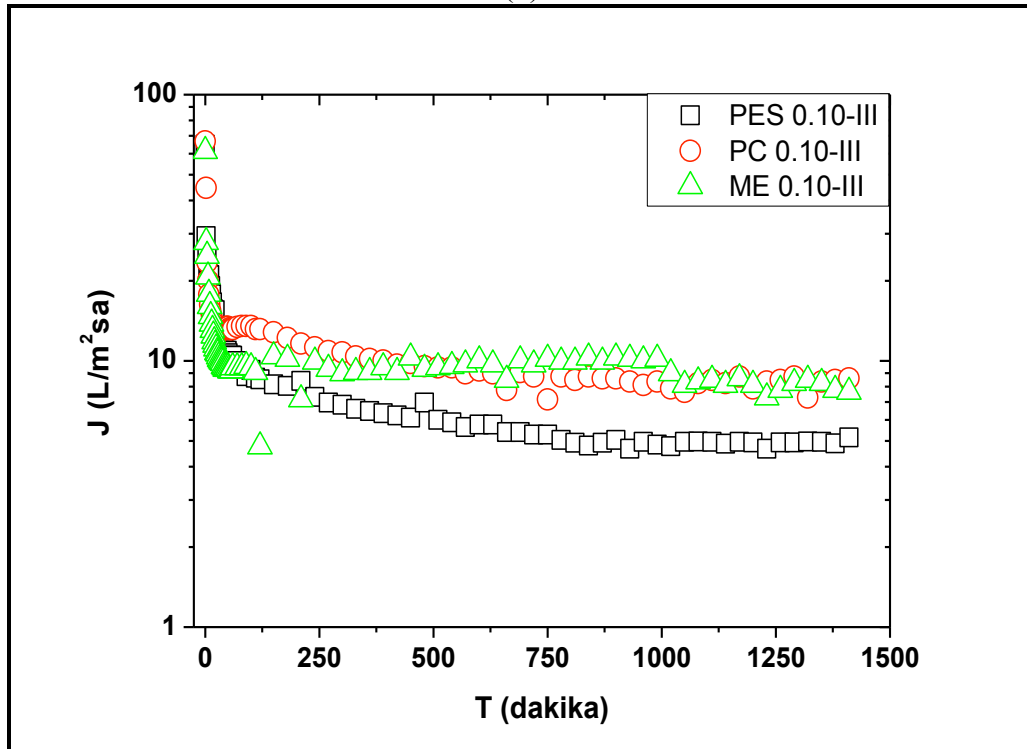
azalması önceki deneylere göre daha yavaş olmuştur. Filtrasyonun sonlarında PES membran hariç diğer membranların denge akı değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Grafiklerden görülebileceği gibi membranların ilk akı değerleri birbirlerinden farklıdır. Bunun nedeni membran ile çamurun ilk teması sırasında membran materyali ile çamurdaki bakteri türleri arasındaki etkileşimlerin farklı olmasıdır. Çizelge 4.17'den bu deney setine ait membranların  $J_o$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerine bakıldığında; membranların gözenek boyutlarına göre  $J_o$  değerleri birbirine yakın çıkmıştır. En yüksek  $J_d$  değerleri 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda elde edilmiştir. En yüksek  $J_o$  değeri ( $83 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) PC 0.40, en yüksek  $J_d$  değeri ( $13 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) ME ve SA 0.45 membranlarda ve en yüksek  $V_t$  değeri ( $1812 \text{ cm}^3$ ) SA 0.45 membranda elde edilmiştir. En yüksek FDR değeri (%92.5) PES 0.10, en düşük FDR (%81.9) değeri SA 0.45 membranda hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre bu deney setinde en iyi performansı gösteren membran SA ve ME 0.45, en kötü performansı gösteren membran ise PES 0.10 membranlar olmuştur.



(a)



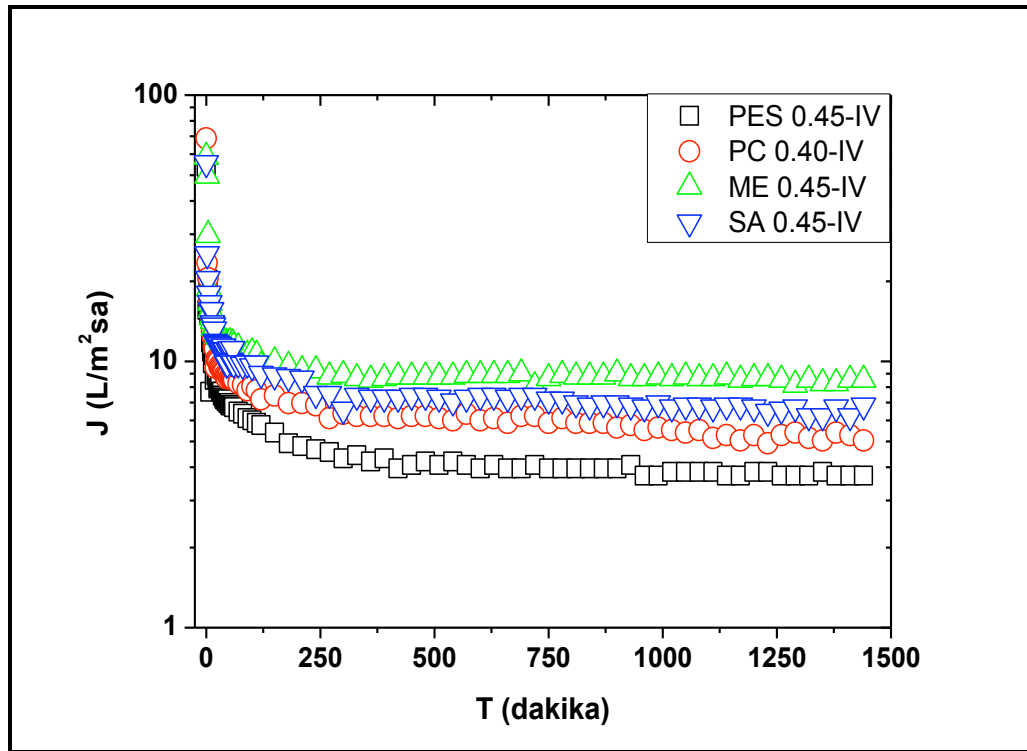
(b)



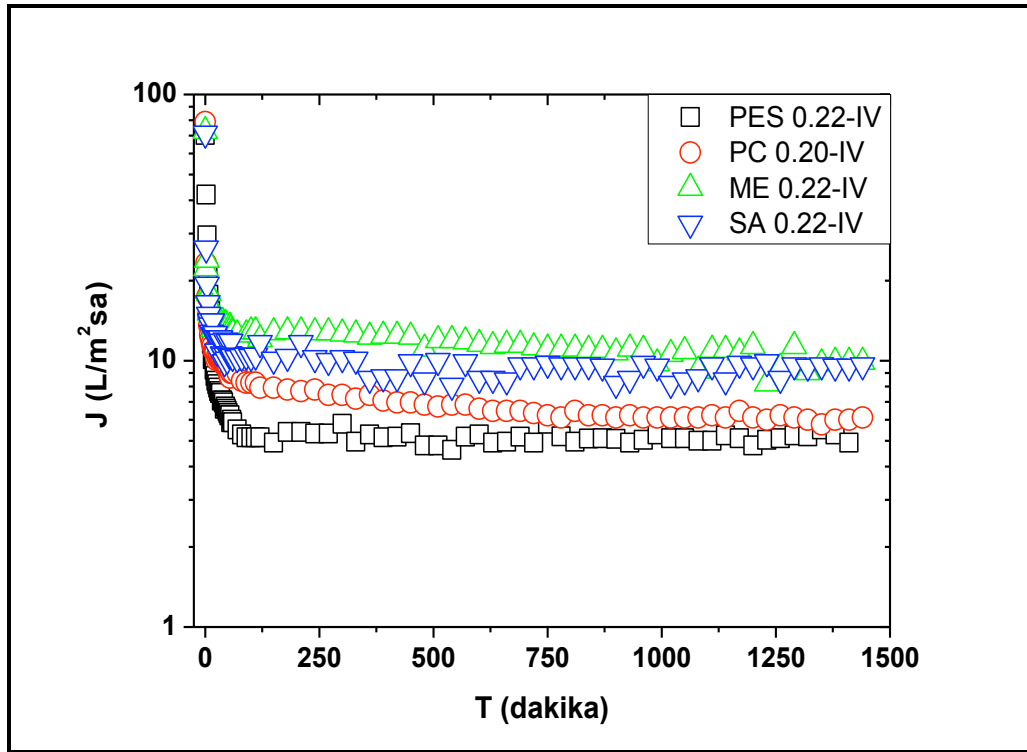
(c)

Şekil 4.32. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki III nolu deney setinin batık membran filtrasyon sistemine ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar.

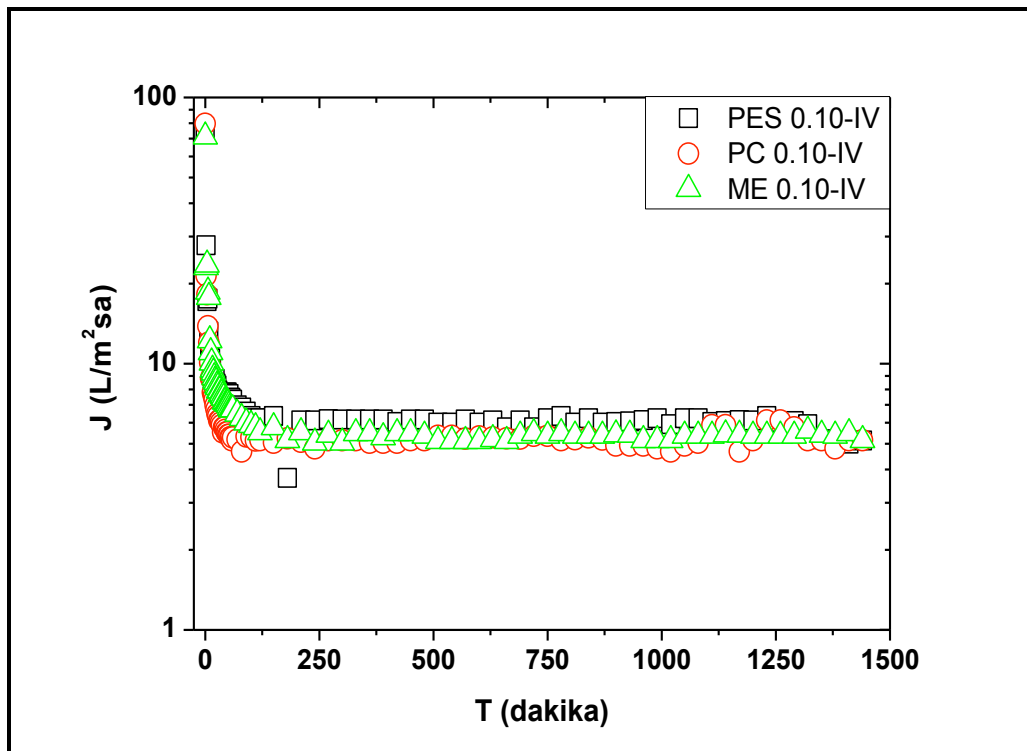
IV nolu deney sisteminin akı-zaman grafiği Şekil 4.33 (a-c)'de verilmiştir. Denge durumunda membran tipleri arasında çok büyük farklılıklar görünmemesine rağmen, ME membranların diğer membranlardan daha yüksek akı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 4.17'den bu deney setine ait membranların  $J_o$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerine bakıldığında; membranların gözenek boyutlarına göre  $J_o$  değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Burada en yüksek  $J_d$  değerleri 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda elde edilmiştir. En yüksek  $J_o$  değeri (80  $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ ) PC 0.10, en yüksek  $J_d$  değeri (10  $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ ) ve  $V_t$  değeri (1366  $\text{cm}^3$ ) ME 0.22 membranlarda elde edilmiştir. En yüksek FDR değeri (%93.5) PES 0.10, en düşük FDR (%85.7) değeri ME 0.45 membranda hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre bu deney setinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.22, en kötü performansı gösteren membran ise PES 0.45 membranlar olmuştur.



(a)



(b)

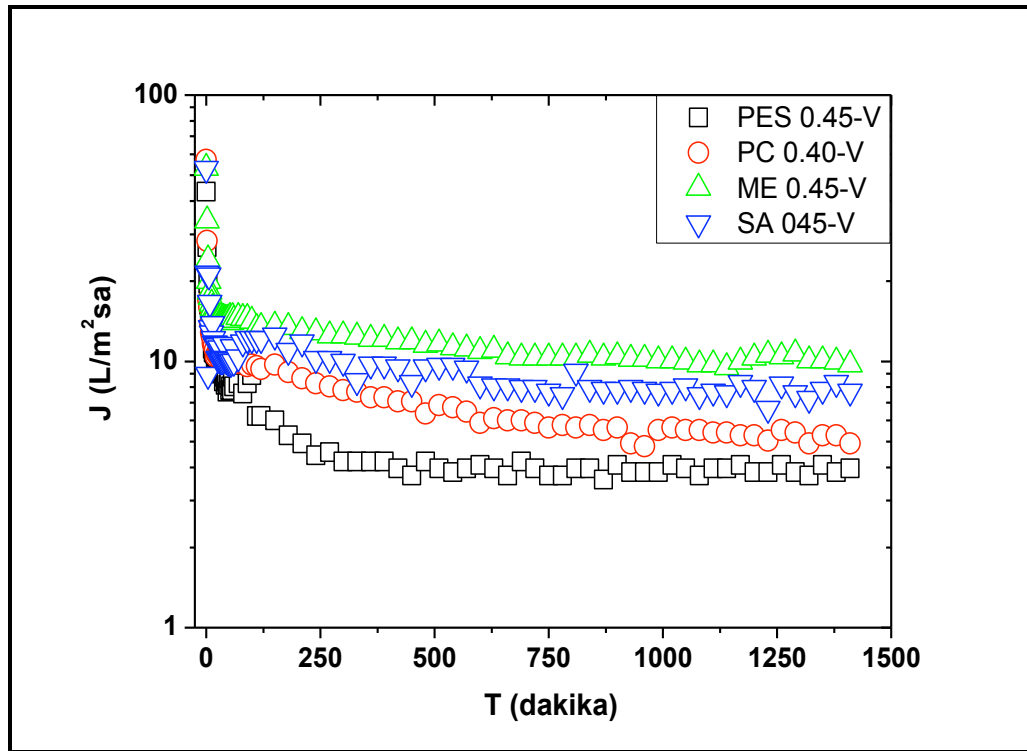


(c)

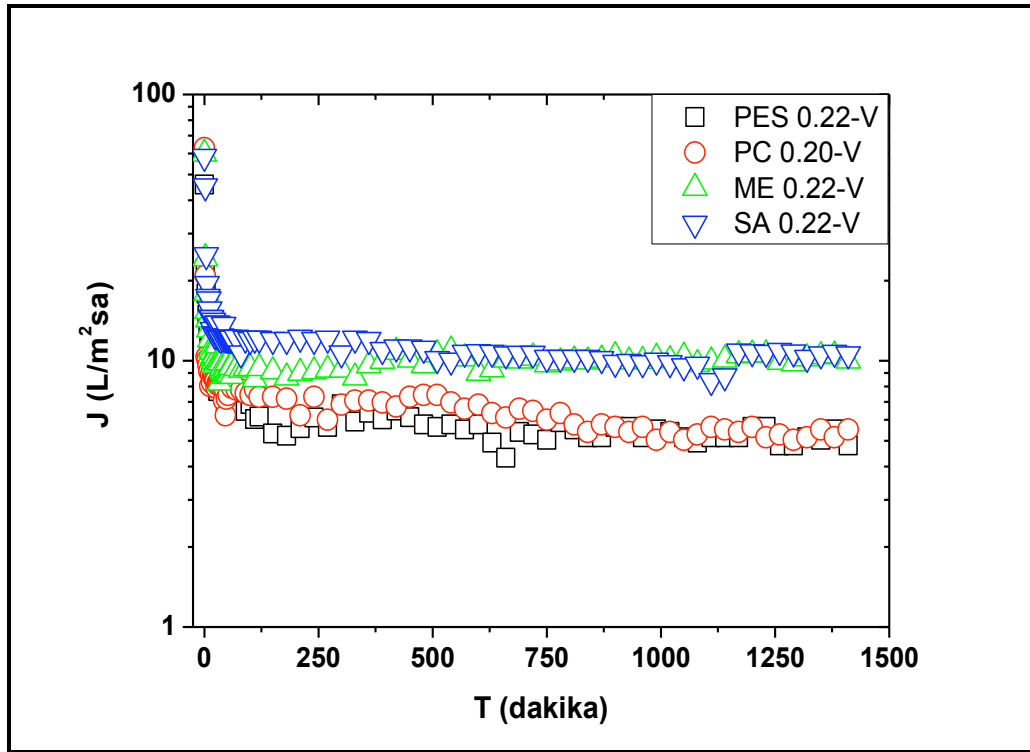
Şekil 4.33. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki IV bolu deney setinin batık membran filtrasyon sistemine ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar.



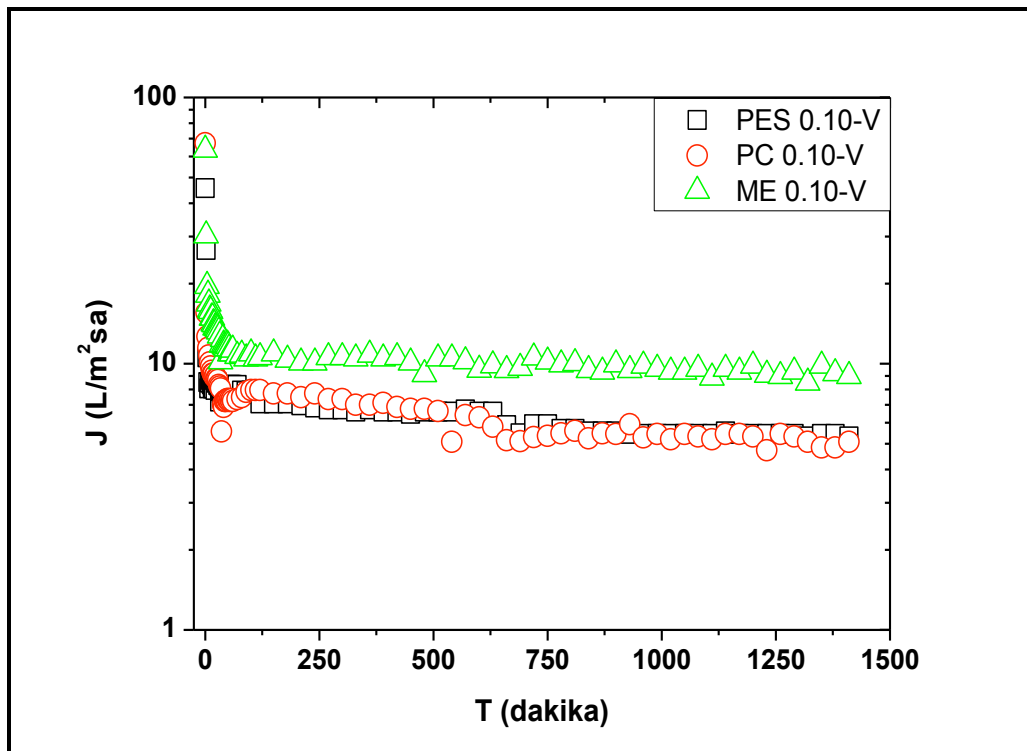
V nolu deney sisteminin akı-zaman grafiği Şekil 4.34 (a-c)'de verilmiştir. Burada da membran tiplerinin denge akı değerleri arasında çok büyük farklılıklar görünmemesine rağmen, ME ve SA membranların diğer membranlardan daha yüksek akı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 4.17'den bu deney setine ait membranların  $J_o$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerlerine bakıldığında; bu deney setinde de membranların gözenek boyutlarına göre  $J_o$  ve  $J_d$  değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. En yüksek  $J_o$  değeri ( $67 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) PC 0.10, en yüksek  $J_d$  değeri ( $10 \text{ L/m}^2\text{sa}$ ) ME 0.45, ME 0.22 ve SA 0.22 membranlarda ve en yüksek  $V_t$  değeri ( $1362 \text{ cm}^3$ ) ME 0.45 membranlarda elde edilmiştir. En yüksek FDR değeri (%92.0) PES 0.10, en düşük FDR (%77.0) değeri SA 0.22 membranda hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre bu deney setinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.45 ve SA 0.22, en kötü performansı gösteren membran ise yine PES 0.45 membranlar olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.34. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki V nolu deney setinin batık membran filtrasyon sistemine ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45 µm gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22 µm gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10 µm gözenek boyutlu membranlar.

Çizelge 4.17. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sistemine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:III-IV-V).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$J_0^*$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )			$J_d^{**}$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )			FDR (%)			$V_t^{***}$ ( $\text{cm}^3$ )		
		III	IV	V	III	IV	V	III	IV	V	III	IV	V
PES	0.45	67	54	43	6	4	4	90.4	92.9	91.0	1029	530	549
PC	0.40	83	69	57	11	5	5	86.8	92.4	90.7	1501	746	804
ME	0.45	75	59	53	13	8	10	83.0	85.7	81.6	1787	1089	1362
SA	0.45	68	56	53	13	6	8	81.9	90.9	83.6	1812	907	1062
PES	0.22	71	70	46	6	5	5	92.3	93.4	91.6	933	641	700
PC	0.20	74	79	63	10	6	5	83.0	91.6	91.3	1464	834	764
ME	0.22	61	73	60	8	10	10	88.4	87.0	82.7	1231	1366	1296
SA	0.22	65	71	59	10	9	10	84.6	87.4	77.0	1454	1155	1319
PES	0.10	65	73	46	5	5	5	92.5	93.5	92.0	747	753	758
PC	0.10	67	80	67	8	5	5	86.3	92.7	91.8	1160	646	747
ME	0.10	61	71	64	8	5	9	87.1	92.4	85.5	1125	668	1210

$J_0^*$ : Filtrasyon deneylerinde membranların ilk akı değerini ifade etmektedir.

$J_d^{**}$ : Filtrasyonun son 1 saatindeki akı değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.

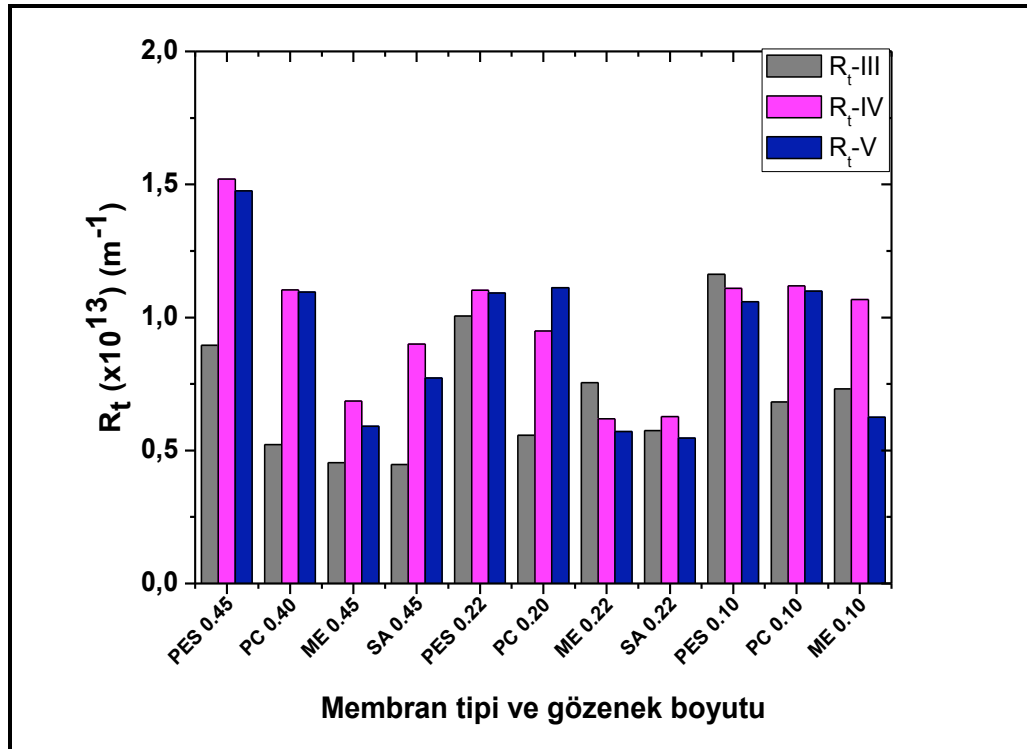
$V_t^{***}$ : 24 saatlik filtrasyon sonunda toplanan süzüntü hacmini ifade etmektedir.

Sabit çamur yaşında, farklı organik yüklemelerde çalıştırılmış olan JLMBR'nin çamurunun batık membran filtrasyon deneylerinde elde edilen sonuçlara göre, en yüksek  $J_o$ ,  $J_d$  ve  $V_t$  değerleri en düşük organik yüklemelerde çalıştırılan III nolu deney setinde gözlenmiştir. IV ve V deney setlerindeki akı ve hacim değerleri birbirine benzer çıkmıştır. Genel olarak en yüksek performansı gösteren membran ME ve SA membranlar, en kötü performans gösteren membran ise PES membran olmuştur. I ve II nolu deney setinde kötü performans göstermiş olan 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar bu deney setlerinde daha iyi performansa sahip olmuşlardır.

#### **4.2.2.2. Membran tipi ve gözenek boyutunun filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi**

Değişen organik yüklemelerde işletilen çamurun batık membran filtrasyon deneylerinde hesaplanmış olan direnç değerleri grafik ve çizelge olarak verilmiştir. Üç organik yüklemelerde hesaplanmış olan  $R_t$ ,  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin grafiği üç yükleme için birlikte çizilmiştir. Bu şekilde organik yüklemenin artması ile direnç değerlerinin değişimi takip edilebilmektedir. Toplam direnç değerleri ( $R_t$ ) çamur filtrasyonunun son 1 saatindeki akı değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Kek ( $R_c$ ) ve gözenek dirençleri ( $R_p$ ) membranların fiziksel olarak temizlenmesinden sonra saf suyun filtrasyonunda elde edilmiş denge akı değerleri ile hesaplanmıştır.

Deney setlerinin toplam direnç değerleri Şekil 4.35'de gösterilmiştir. gösterilmiştir. Artan organik yükleme ile özellikle 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip membranlarda  $R_t$  değerleri artmıştır. IV ve V nolu deney setlerinin  $R_t$  değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Çizelge 4.18'den membranların  $R_t$  değerlerine bakıldığında; III nolu deney setinde en yüksek  $R_t$  değerine ( $1.16 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.10 membran, IV ve V nolu deney setlerinde ise en yüksek  $R_t$  değerine ( $1.52 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  IV nolu deney seti için ve  $1.48 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  V nolu deney seti için) PES 0.45 membran sahip olmuştur. PES membran bu deney setlerinde de ilk aşamadaki deneylere benzer şekilde en kötü performansa sahip membranlar olmuştur.

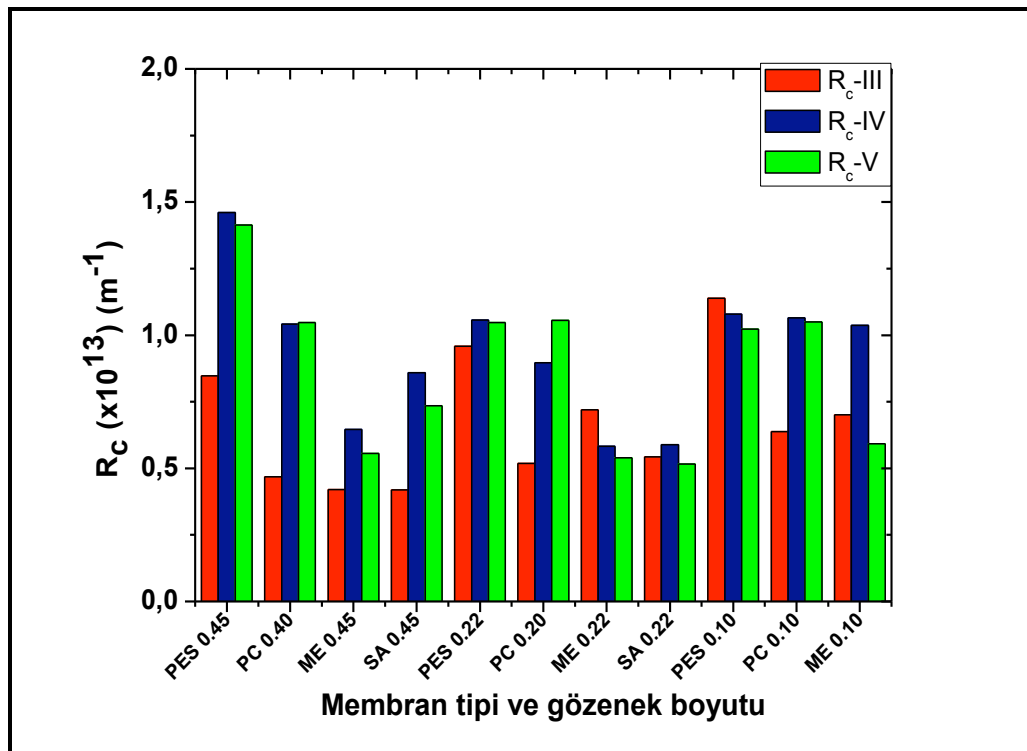


Şekil 4.35. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerleri (Deney Set: III-IV-V).

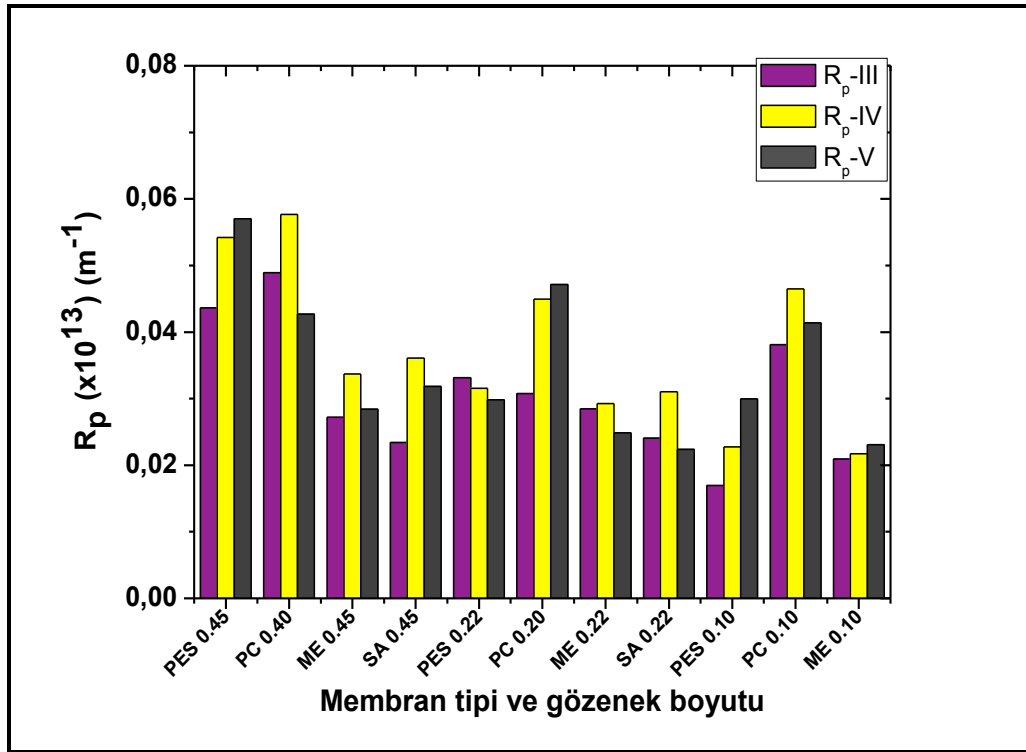
Deney setlerinin kek ( $R_c$ ) ve gözenek direnç ( $R_p$ ) değerleri Şekil 4.36 (a-b)'de gösterilmiştir. Artan organik yükleme ile  $R_t$ 'ye benzer şekilde  $R_c$  değerleri de artmıştır. Özellikle III nolu deney setinde gözenek boyutu azaldıkça  $R_c$  değerleri artmıştır. IV ve V nolu deney setlerinin  $R_c$  değerleri birbirine benzer çıkmıştır ve gözenek boyutuna göre çok fazla değişiklik göstermemiştir. MLSS konsantrasyonunun artmasıyla membran yüzeyinde daha fazla partikülün birikmesi nedeniyle membran yüzeyinde oluşan ikincil membran tabakası gözenek boyutunun etkisini azaltmıştır. Çizelge 4.18'den membranların  $R_c$  değerlerine bakıldığında; III nolu deney setinde en yüksek  $R_c$  değerine ( $1.14 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.10 membran, IV ve V nolu deney setlerinde ise en yüksek  $R_c$  değerine (IV nolu deney seti için  $1.46 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  ve V nolu deney seti için  $1.41 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.45 membran sahip olmuştur.  $R_p$  değerlerine bakıldığında; III ve IV nolu deney setinde en yüksek  $R_p$  değerine (III nolu deney seti için  $0.049 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  ve IV nolu deney seti için  $0.058 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PC 0.40 membran ve V nolu deney setinde ise en yüksek  $R_p$  değerine ( $0.057 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ ) PES 0.45 membran sahip olmuştur. Bütün deney setlerinde en yüksek  $R_p$  değerlerine  $0.45 \text{ }\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip membranlar sahip olmuştur. Bu deney setinde ilk aşama deneylerine göre gözenek dirençleri biraz daha düşmüştür. Her gözenek

boyutundaki en yüksek kek direnci oranları PES membranlarda, en yüksek gözenek dirençleri ise ME ve PC membranlarda gözlenmiştir. ME'nin pürüzlü yüzey yapısı küçük partiküllerin tutunmasına sebep olmaktadır. Kek ve gözenek dirençlerinin hesaplaması için yapılmış olan yüzey temizlemesi sırasında verimli temizleme yapılamaması bu membranların gözenek dirençlerini yükseltmektedir. Aynı şekilde PC membranın yüzeyindeki silindirik gözenek yapısı, temizleme sırasında bazı partiküllerin gözeneklere doğru hareket etmesine sebep olmaktadır.

Membranların yüzeyinde oluşan kek tabakasının yapısı hakkında bilgi veren  $\alpha$  değerlerine bakıldığında, artan organik yüklemeye membranların  $\alpha$  değerlerinin düştüğü görülmektedir. III nolu deney setinde en yüksek  $\alpha$  değeri ( $2.12 \times 10^{13}$  m/kg) PES 0.10 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.26 \times 10^{13}$  m/kg) PES 0.4 membranda elde edilmiştir. IV nolu deney setinde en yüksek  $\alpha$  değeri ( $0.73 \times 10^{13}$  m/kg) PES 0.45 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.05 \times 10^{13}$  m/kg) SA 0.22 membranda elde edilmiştir. V nolu deney setinde en yüksek  $\alpha$  değeri ( $0.73 \times 10^{13}$  m/kg) PES 0.45 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.03 \times 10^{13}$  m/kg) SA 0.22 membranda elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.36. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin dağılımı (a)  $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (Deney Set: III-IV-V).

#### 4.2.2.3. Membran yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

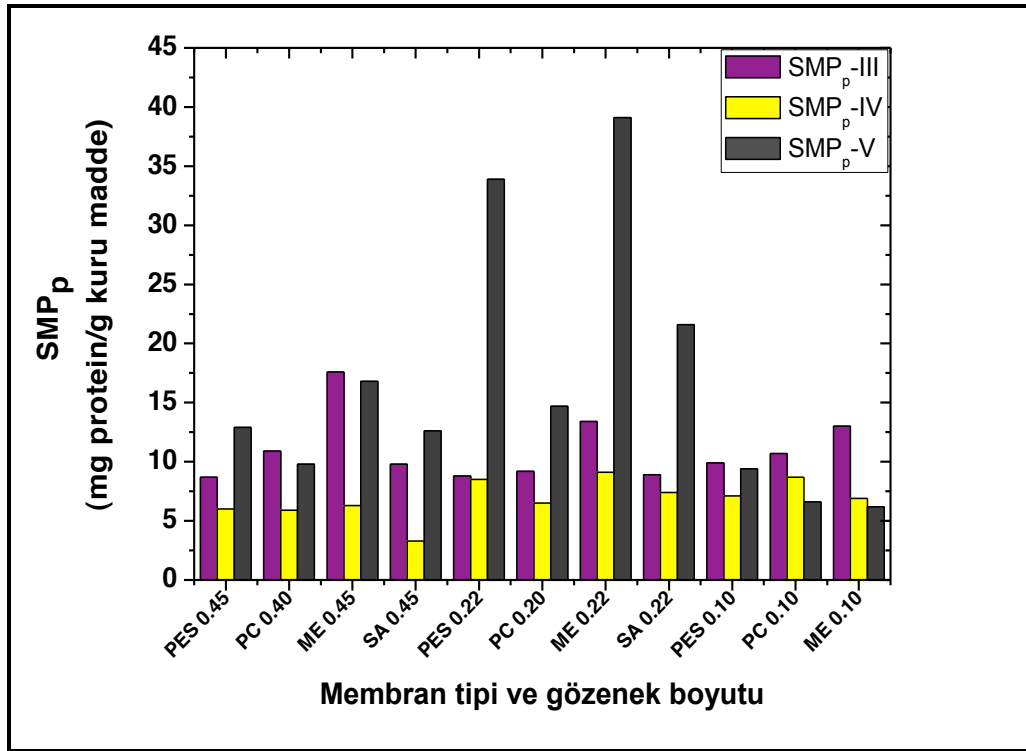
Bu çalışma sisteminde de membran yüzeyinde oluşmuş olan sabit kek tabakasında SMP, EPS ve su içeriği analizleri yapılmıştır. SMP ve EPS analizlerinin sonuçları yine protein ve karbonhidrat cinsinden, mg/L olarak ölçülmüş, su içeriği analizinden elde edilmiş çamurun MLSS değerine oranlanarak mg protein veya karbonhidrat/g MLSS olarak verilmiştir. Üç deney setinin, SMP ve EPS analizlerinin sonuçları grafiksel olarak Şekil 4.37 (a-b) ve 4.38 (a-b)'de sunulmuştur. Bu deney sisteminde de membran yüzeylerindeki SMP ve EPS miktarları membran tipine ve gözenek boyutuna göre farklılık göstermiştir.

Çizelge 4.18. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sistemine ait spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ) ve gözenek ( $R_p$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:I-II).

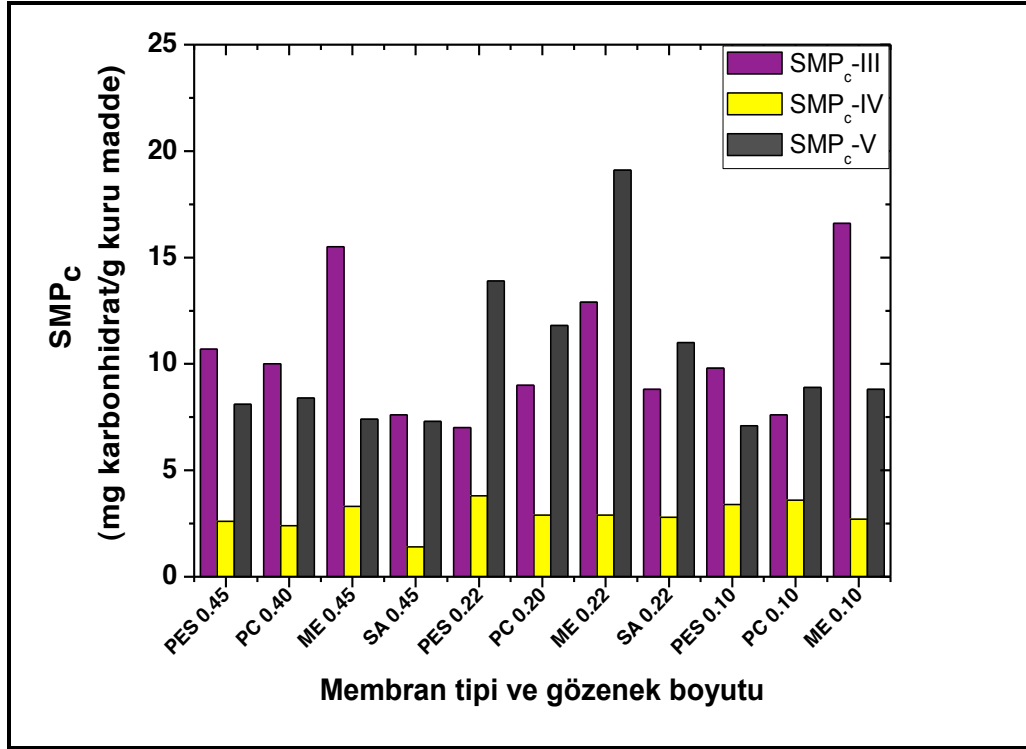
Membran tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	MFI ( $\times 10^6$ )			$(\alpha)$ Spesifik kek direnci ( $\text{m/kg}$ ) $\times 10^{13}$			$R$ ( $\times 10^{13}$ ) ( $\text{m}^{-1}$ ) (%)											
		III	IV	V	$\alpha$ -III	$\alpha$ -IV	$\alpha$ -V	$R_t$ -III	$R_t$ -IV	$R_t$ -V	$R_m$ -III	$R_m$ -IV	$R_m$ -V	$R_p$ -III	$R_p$ -IV	$R_p$ -V	$R_c$ -III	$R_c$ -IV	$R_c$ -V
PES	0.45	0.83	1.68	1.59	1.33	0.9	0.73	0.9	1.52	1.48	0.005	0.005	0.005	0.044	0.054	0.057	0.85	1.46	1.41
PC	0.40	0.16	0.96	1.15	0.26	0.51	0.53	0.52	1.1	1.1	(0.6)	(0.3)	(0.3)	(4.9)	(3.6)	(3.9)	(94.6)	(96.1)	(95.8)
ME	0.45	0.17	0.18	0.19	0.27	0.09	0.09	0.45	0.69	0.59	(1.0)	(0.5)	(0.5)	(9.4)	(5.2)	(3.9)	(89.6)	(94.3)	(95.6)
SA	0.45	0.20	0.51	0.45	0.32	0.27	0.21	0.45	0.9	0.77	(1.4)	(0.9)	(1.1)	(6.0)	(4.9)	(4.8)	(92.6)	(94.2)	(94.1)
											(1.1)	(0.6)	(0.7)	(5.2)	(4.0)	(4.1)	(93.6)	(95.4)	(95.2)
PES	0.22	1.08	0.30	0.59	1.7	0.16	0.27	1.01	1.1	1.09	0.01	0.01	0.01	0.033	0.032	0.03	0.96	1.06	1.05
PC	0.20	0.21	0.54	0.90	0.33	0.29	0.41	0.56	0.95	1.11	(1.4)	(1.3)	(1.3)	(3.3)	(2.9)	(2.7)	(95.3)	(95.8)	(95.9)
ME	0.22	0.53	0.22	0.16	0.85	0.12	0.07	0.76	0.62	0.57	(1.5)	(0.9)	(0.8)	(5.5)	(4.7)	(4.2)	(92.9)	(94.4)	(95.0)
SA	0.22	0.26	0.09	0.07	0.42	0.05	0.03	0.58	0.63	0.55	(0.9)	(1.1)	(1.2)	(3.8)	(4.7)	(4.4)	(95.3)	(94.2)	(94.5)
											(1.3)	(1.2)	(1.4)	(4.2)	(4.9)	(4.1)	(94.5)	(93.9)	(94.5)
PES	0.10	1.32	0.23	0.78	2.12	0.12	0.36	1.16	1.11	1.06	0.007	0.007	0.007	0.017	0.023	0.03	1.14	1.08	1.02
PC	0.10	0.33	0.50	1.00	0.52	0.27	0.46	0.68	1.12	1.1	(0.6)	(0.7)	(0.7)	(1.5)	(2.0)	(2.8)	(97.9)	(97.3)	(96.5)
ME	0.10	0.35	0.43	0.19	0.56	0.23	0.09	0.7	1.1	0.63	(1.0)	(0.6)	(0.6)	(5.6)	(4.2)	(3.8)	(93.4)	(95.2)	(95.6)
											(1.3)	(0.9)	(1.5)	(2.9)	(2.0)	(3.7)	(95.9)	(97.1)	(94.8)



Kek tabakasındaki SMP değerlerine bakıldığında, Şekil 4.37 (a)'dan görülebileceği gibi kek tabakasındaki  $SMP_p$  miktarları 0.10  $\mu m$  gözenek boyutlu membranlar hariç diğer membranlarda, V nolu deney setinde en fazla olmuştur. IV nolu deney setinde en az değerlere sahip olmuştur. Şekil 4.37 (b)'de kek tabakasındaki  $SMP_c$  miktarlarına bakıldığında burada da V nolu deney setinde en yüksek değerlere sahip olmuştur.  $SMP_p$ 'ye benzer şekilde IV nolu deney setinde  $SMP_c$  değerleri en az olmuştur. Değişen organik yüklemeler ile membran yüzeyindeki SMP miktarlarının değişimi de farklı olmuştur. Üç deney setinde SMP birikimi en fazla ME membranlarda olmuştur. ME membranının pürüzlü yüzeyi SMP'nin birikimine sebep olmuştur.



(a)

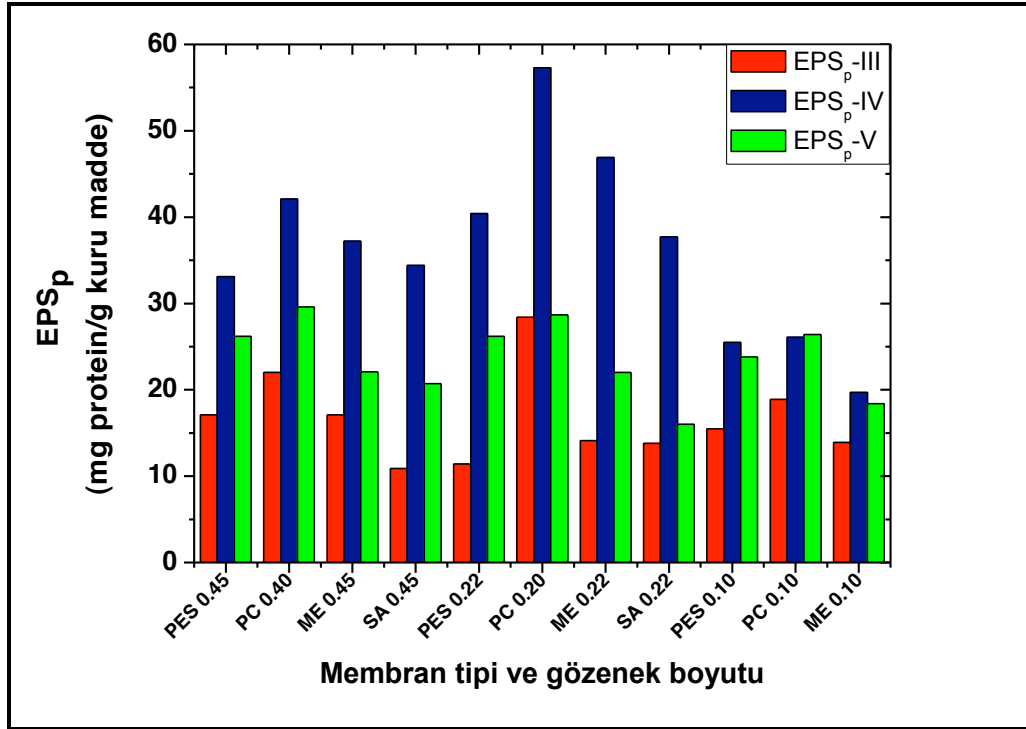


(b)

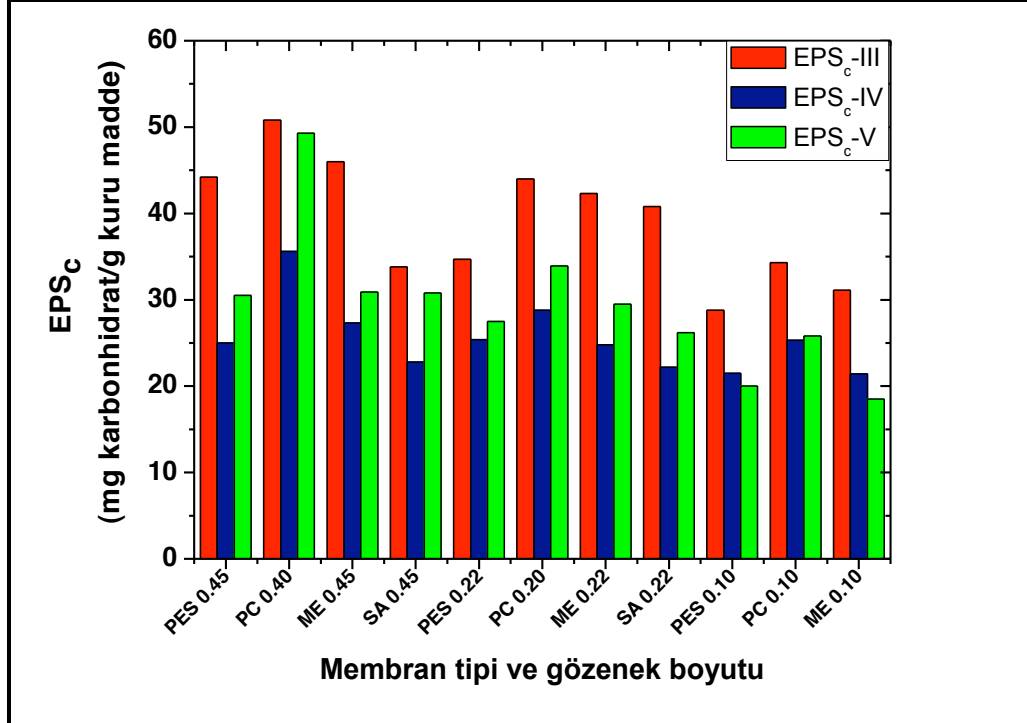
Şekil 4.37. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki SMP analizlerinin sonuçları (Deney No:III-IV-V) (a) SMP<sub>p</sub> değerleri (b) SMP<sub>c</sub> değerleri.

Kek tabakasında yapılmış olan EPS analiz sonuçlarına bakıldığında, Şekil 4-38 (a)'dan görülebileceği gibi kek tabakasındaki EPS<sub>p</sub> miktarları ikinci organik yüklemeye (Deney Set:IV) birinci organik yüklemeye göre artmış, üçüncü organik yüklemeye (Deney Set:V) tekrar azalmıştır. Şekil 4.38-(b)'den görülebileceği gibi kek tabakasındaki EPS<sub>c</sub> miktarları da ikinci organik yüklemeye azalmış, üçüncü organik yüklemeye tekrar artmıştır. Kek tabakasında hidrofilik özelliğe sahip EPS<sub>c</sub>'nin bulunması kek tabakasının daha sulu yapıya sahip olmasına neden olur. Kek tabakasında hidrofobik özelliğe sahip EPS<sub>p</sub>'nin bulunması ise kek tabakasının daha katı özelliğe sahip olmasına neden olur. Dolayısıyla SMP suda serbest halde bulunan bakteriyel ürünler oldukları için, ikinci organik yüklemeye (Deney Set:IV) kek tabakasındaki SMP miktarlarının az olmasının nedeni kek tabakasında birikmiş olan hidrofobik özelliğe sahip EPS<sub>p</sub>'dir. Çizelge 4.17'den deney setlerinin akı değerlerine bakıldığında, IV nolu deney setinde akı değerleri III ve V nolu deney setlerine göre daha düşük olmuştur. IV nolu deney setinde gerçekleştirilen batık

membran filtrasyon deneylerinde, kek tabakasındaki EPS<sub>p</sub> birikiminin diğer deney setlerine göre daha fazla olmasının akının azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



(a)

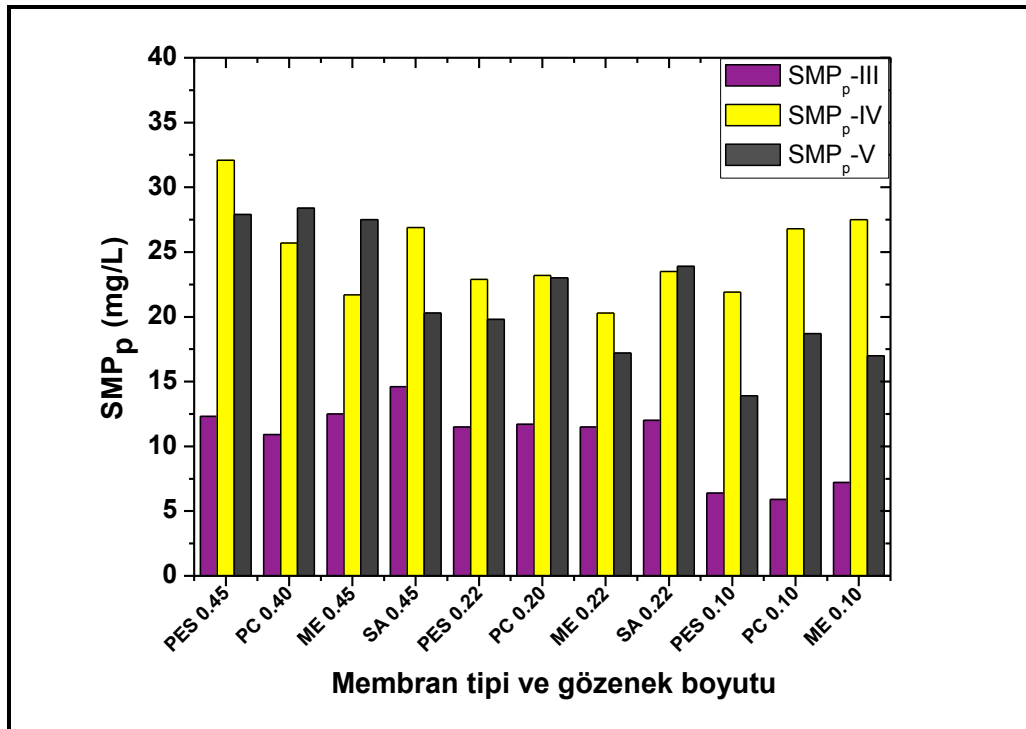


(b)

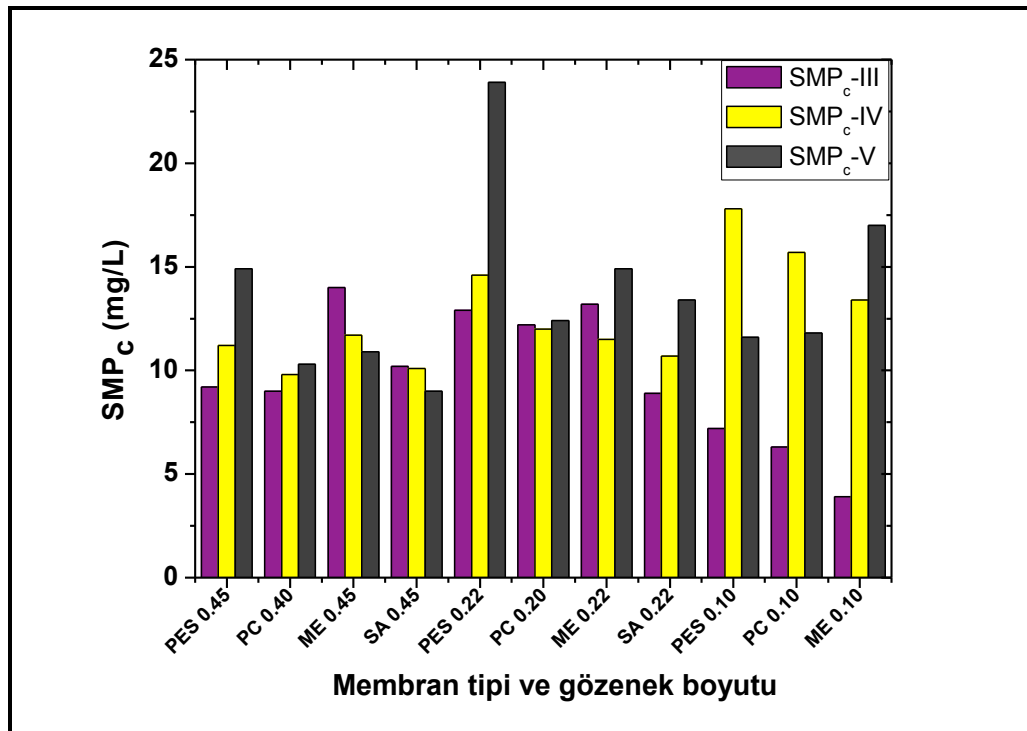
Şekil 4.38. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki EPS analizlerinin sonuçları (Deney No:III-IV-V) (a) EPS<sub>p</sub> değerleri (b) EPS<sub>c</sub> değerleri.

#### 4.2.2.4. Süzüntüde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu deney setinde de batık membran filtrasyonundan sonra toplanan süzüntülerde SMP analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.39 (a-b)'de gösterilmiştir. Şekil 4.39(a)'dan  $SMP_p$  değerlerine bakıldığında III nolu deney setinde diğer deney setlerine göre süzüntüye  $SMP_p$  geçişi en az olmuştur. IV nolu deney setinde ise süzüntüye en fazla  $SMP_p$  geçişi olmuştur. Kek tabakası analizinde de membran yüzeyinde  $SMP_p$ 'nin miktarının az olması bu deney setinde  $SMP_p$ 'nin membranlarda tutunmadığını göstermektedir. Şekil 4.39 (b)'de süzüntüdeki  $SMP_c$  değerlerine bakıldığında, süzütüye  $SMP_c$ 'nin geçişi diğerlerine göre en az III nolu deney setinde gerçekleşmiştir. Filtre edilen çamurdaki SMP değerleri ile süzüntüye geçen SMP değerleri arasında hesap yapılmış ve SMP tutunma yüzdeleri olarak Çizelge 4.19'da verilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi IV nolu deney setinde SMP tutunmaları daha düşük olmuştur. Bu sonuçlara göre en fazla  $SMP_p$  tutan membranlar; III nolu deney setinde PC 0.10, IV nolu deney setinde ME 0.22 ve V nolu deney setinde PES 0.10 membranlarda, en fazla  $SMP_c$  tutan membranlar; III nolu deney setinde ME 0.10, IV nolu deney setinde PC 0.40 ve V nolu deney setinde SA 0.45 membranlarda olmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.39. Farklı organik yüklemelerde işletilen JLMBR sistemindeki batık membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre toplanan süzüntü numunelerindeki SMP değişimleri (a) SMP<sub>p</sub> değişimi (b) SMP<sub>c</sub> değişimi (Deney Set:V-VI).

Çizelge 4.19. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sistemine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membranların SMP tutma verimleri (Deney Set: III-IV-V).

Membran Tipi	Gözenek boyutu (µm)	SMP tutma verimi (%)					
		SMP <sub>p</sub>			SMP <sub>c</sub>		
		III	IV	V	III	IV	V
PES	0.45	61.7	27.0	49.1	66.1	64.0	69.9
PC	0.40	66.0	41.6	48.2	66.8	68.5	79.2
ME	0.45	61.1	50.7	49.8	48.3	62.4	78.0
SA	0.45	54.5	38.9	63.0	62.4	67.5	81.8
PES	0.22	64.2	48.0	63.9	52.4	58.4	51.7
PC	0.20	63.6	47.3	58.0	55.0	65.8	74.9
ME	0.22	64.2	53.9	68.6	51.3	67.2	69.9
SA	0.22	62.6	46.6	56.4	67.2	69.5	72.9
PES	0.10	80.1	50.2	74.6	73.4	49.3	76.6
PC	0.10	81.6	39.1	65.9	76.8	55.3	76.2
ME	0.10	77.6	37.5	69.0	85.6	61.8	65.7

#### 4.2.2.5. Batık membran filtrasyonunda akı azalmalarına etki eden parametrelerin toplu olarak değerlendirilmesi

Sabit çamur yaşında, farklı organik yüklemelerde işletilmiş olan JLMBR sisteminde oluşan çamurun filtrasyon özellikleri farklı membran tipi ve gözenek boyutu kullanılarak batık membran sisteminde incelenmiştir. Bu deney setinde elde edilen sonuçlardan membranların aynı şartlarda denenmiş olmalarına rağmen denge akı ve direnç değerlerinin farklı olduğu gözlenmiştir. Bu amaçla bu deney setinde de akı azalmasını etkileyen parametreler birlikte değerlendirilmiştir. Çizelge 4.20’de membran tiplerine göre hesaplanmış olan  $f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  birimsiz sabiti ile  $J_d$  değerleri ile birlikte verilmiştir. Bu deney setinde de  $f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  değerinin yüksek olduğu durumda  $J_d$  değeri genelde düşük, bu değer düşük olduğu durumda ise  $J_d$  değerinin yüksek olduğu görülmektedir.  $J_d$  ile bu değer arasında yapılan korelasyonun sonucunda, korelasyon sabitleri III nolu deney seti için (-0.66), IV nolu deney seti içinde (-0.55) ve V nolu deney seti için (-0.83) olarak bulunmuştur. Buradan da görülebileceği gibi, iki değer arasında negatif korelasyon çıkmıştır.

Çizelge 4.20. Farklı organik yüklemelerde JLMBR sisteminde gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membran tiplerine göre  $f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  değerleri (Deney Set:III-IV-V).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$f(\alpha \times R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$			$J_d$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )		
		Set:III ( $\times 10^{26}$ )	Set:IV ( $\times 10^{26}$ )	Set:V ( $\times 10^{26}$ )	III	IV	V
PES	0.45	2.3	1.3	3.4	6	4	4
PC	0.40	0.8	1.1	2.3	11	5	5
ME	0.45	0.8	0.2	0.6	13	8	10
SA	0.45	0.5	0.3	1.0	13	6	8
PES	0.22	1.7	0.2	1.9	6	5	5
PC	0.20	0.5	0.6	2.8	10	6	5
ME	0.22	1.6	0.3	0.9	8	9	10
SA	0.22	0.5	0.1	0.2	10	9	11
PES	0.10	1.1	0.1	0.9	5	5	5
PC	0.10	0.8	0.6	1.5	8	5	5
ME	0.10	0.8	0.2	0.2	8	5	9

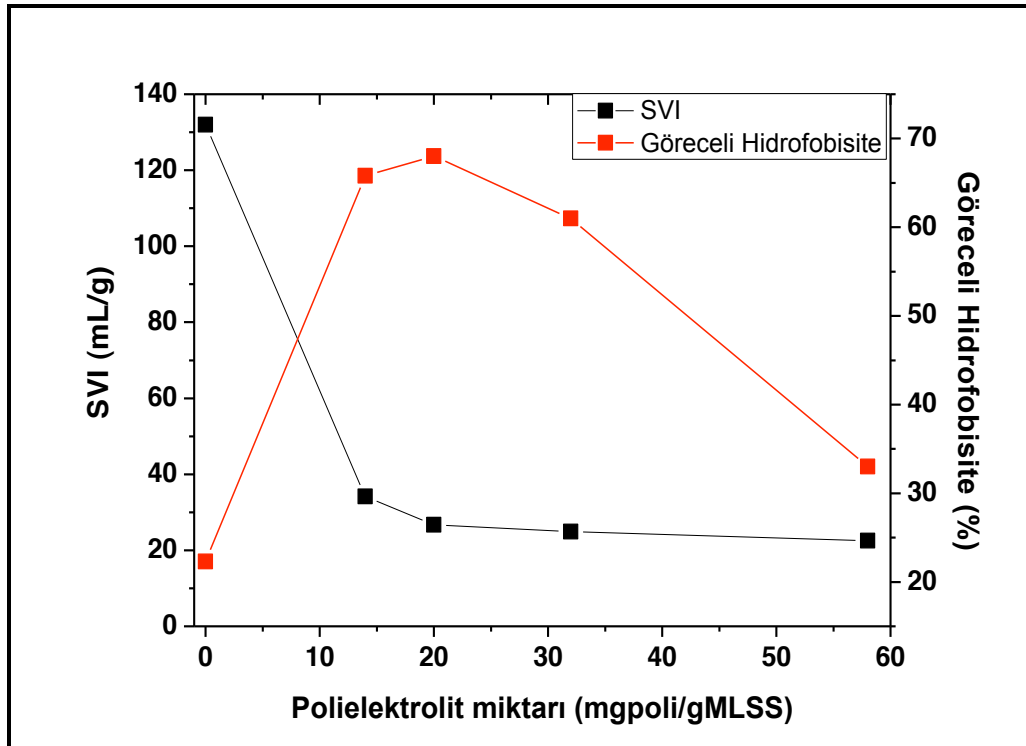
### 4.3. Katyonik Polielektrolit İlavesinin Reaktördeki Parametrelerin Değişimine ve Batık Membran Filtrasyon Performansına Etkisinin Araştırılması (Deney Set:VI)

Tez çalışmasının son aşamasında, katyonik özelliğe sahip polielektrolit ilavesinin reaktördeki biyolojik parametrelerin değişimine ve dolayısıyla batık membran filtrasyon performansına olan etkilerini incelemek için, JLMBR sistemine sürekli polielektrolit beslemesi yapılmıştır. İlk olarak kesikli olarak yapılan deneylerle optimum polielektrolit konsantrasyonu belirlenmiş daha sonra bu konsantrasyonda polielektrolit, FeCl<sub>3</sub> kimyasalı ile birlikte JLMBR sistemine belirli bir debide dozlanmıştır. Deneyler V nolu deney setinin hemen arkasından gerçekleştirildiği için reaktörde çamur yaşı yine 3 gün ve giriş KOİ konsantrasyonu da 4110±68 mg/L olarak ayarlanmıştır. Filtrasyon deneyleri sadece batık membran sisteminde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar üç başlık altında verilmiştir; uygun katyonik polielektrolit miktarının belirlenmesi, reaktördeki parametrelerin değişimi ve farklı membran tiplerinin ve gözenek boyutlarının batık membran filtrasyon performanslarının incelenmesi. Bu başlıklar altında deneysel sonuçlar polielektrolit ilave edilmeden önceki (Deney Seti: V) deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve literatürde yapılmış olan çalışmalarla birlikte değerlendirilmiştir.

#### 4.3.1. Uygun katyonik polielektrolit miktarının belirlenmesi

JLMBR'ye sürekli polielektrolit ilave edilmeden önce, kesikli deneyler ile optimum polielektrolit konsantrasyonu belirlenmiştir. Bu deneylerde, polielektrolit ilavesiyle çamur özelliklerindeki değişimleri görebilmek için SVI, göreceli hidrofobisite, OD<sub>600</sub>, SMP ve EPS parametreleri takip edilmiştir. SVI ve göreceli hidrofobisite analizleri, polielektrolit ilavesinden hemen sonra çamur ortamından alınan numunelerde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.40'da sonuçlar gösterilmiştir. Polielektrolit ilavesi yapılmadan önce çamurun SVI değerleri çok yüksek ve çökme özelliği çok kötü iken polielektrolit ilavesi ile SVI değerleri düşmüş ve çamur çökebilen bir özellik kazanmıştır. En iyi çökme özellikleri 20 ve 32 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilavesinin yapıldığı çamurlarda gözlenmiştir. Çamurun göreceli hidrofobisitesi polielektrolit ilavesi ile artmıştır, fakat 20 mgpoli/gMLSS

polielektrolit ilavesinden sonra hidrofobisite değerleri düşmeye başlamıştır. Çamurun göreceli hidrofobisitesi 20 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilavesinde %68 iken, 58 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilavesinde %33'e düşmüştür. En yüksek hidrofobisite değeri, 20 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilavesinde elde edilmiştir. Polielektrolitin yüksek konsantrasyonunda çamurun yapısı da değişmiştir, daha viskoz ve yapışkan bir yapıya sahip olmuştur. Polielektrolit ilavesi ilk olarak çamurun floklaşmasını artırırken, belli bir değerden sonra floklaşmaya, dolayısıyla SVI ve göreceli hidrofobisite değerlerine negatif bir etki göstermektedir. Bu mekanizma flokulasyon-deflokulasyon mekanizması ile açıklanmaktadır. Pozitif yüklü polimerik yapıdaki filtrasyona yardımcı maddeler, MBR sistemlerine ilave edildiğinde negatif yüklü floklara adsorbe olurlar, böylece mikrobiyal flokların yüzeyi yüksüzleşir [Hwang, et al., 2007]. Yüksüzleşen çamur flokları yük nötralizasyon mekanizması ile birbirlerine etkileyerek büyük floklar oluştururlar. Bu da filtrasyonu olumlu yönde etkiler. Eğer filtrasyona yardımcı maddeler optimum konsantrasyonlarının üzerinde ortama ilave edilirlse flokların yüzeyi pozitif yüke sahip olur ve pozitif yüklü floklar da elektrostatik itme kuvveti ile tekrar dağılmaya başlarlar [Lee, et al., 2007]. Bunun sonucunda filtrasyon verimleri düşer.



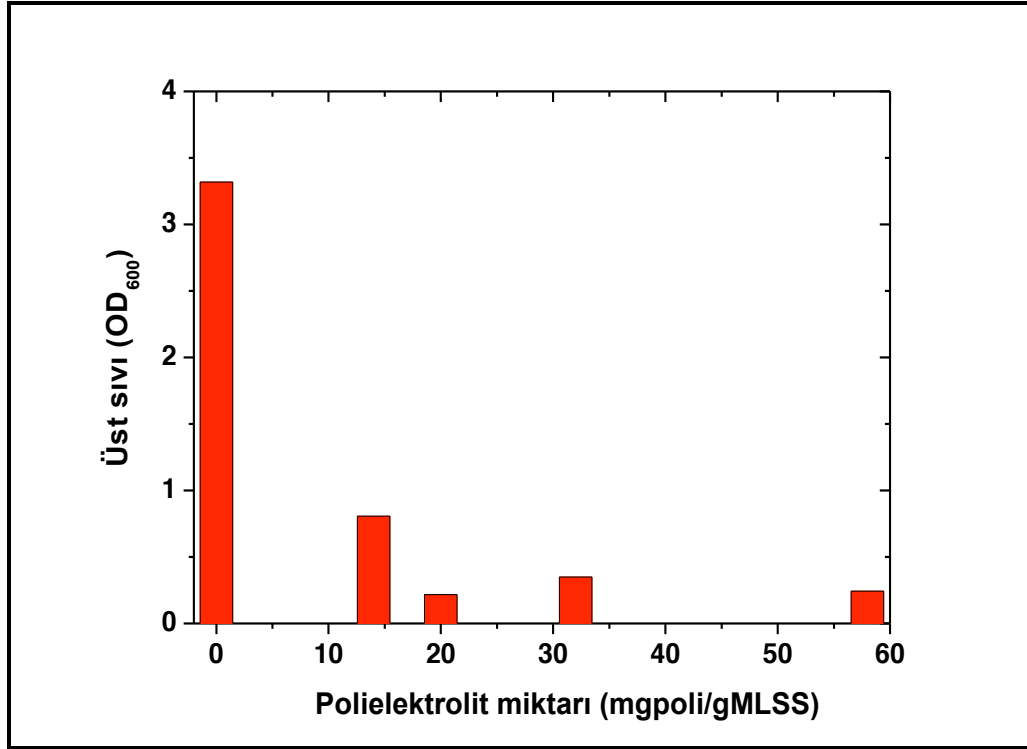
Şekil 4.40. Farklı konsantrasyonlarda polielektrolit eklenmiş çamurların SVI ve göreceli hidrofobisite ölçüm sonuçları.



Optimum polielektrolit miktarının bulunmasında, çamurdaki analizlerin yanı sıra çamurların üst sıvılarında da analiz yapılmıştır. Fotoğraf 4.1’de görülebileceği gibi polielektrolit ilave edilmiş çamurlar belirli bir süre çöktürülerek, üst sıvılarından numuneler alınmış ve OD<sub>600</sub>, SMP ve EPS ölçümleri yapılmıştır. Burada katyonik polielektrolitin bakteriyel ürünleri (SMP ve EPS) tutma verimlerinin bulunması amaçlanmıştır. Şekil 4.41’de polielektrolit miktarlarına göre üst sıvıda ölçülmüş OD<sub>600</sub> değerleri verilmiştir. OD<sub>600</sub> değerleri üst sıvıdaki bakteriyel yoğunluğu vermektedir. Şekilden görülebileceği gibi polielektrolit ilavesiyle OD<sub>600</sub> değeri azalmıştır. Polielektrolit ilave edilmediğinde OD<sub>600</sub> değeri absorbans olarak 3.31 iken 20 mgpoli/gMLSS ilavesinde 0.22’ye düşmüştür. En düşük OD<sub>600</sub> değeri 20 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilave edilen çamurda gözlenmiştir.



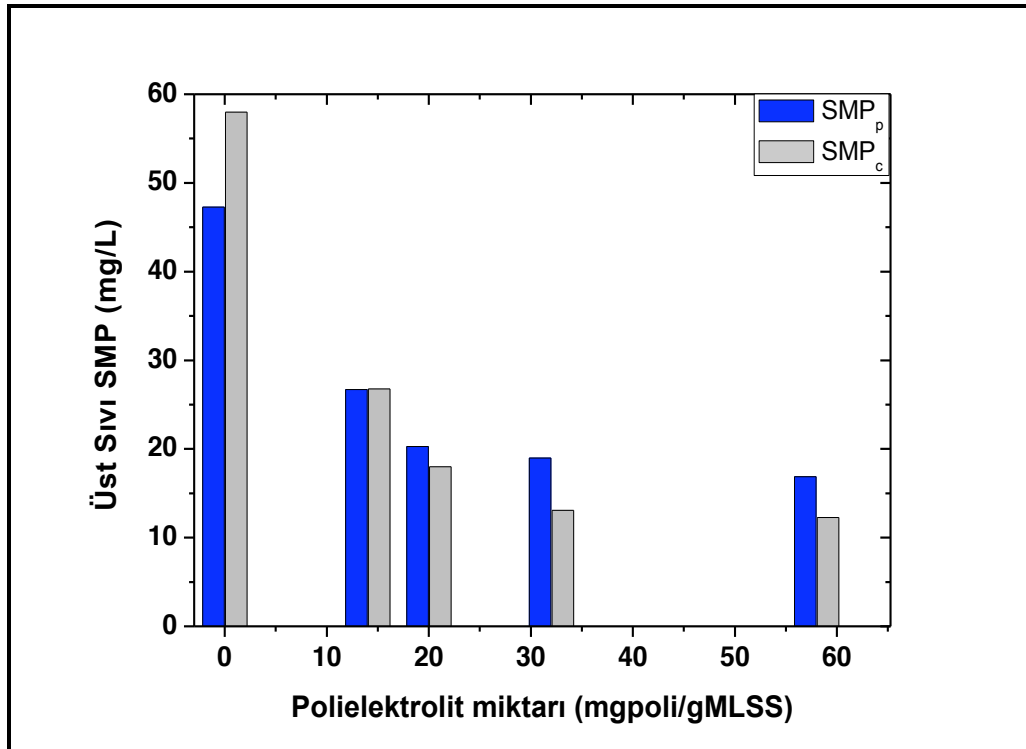
Fotoğraf 4.1. Uygun katyonik polielektrolit bulunması için yapılan deney düzeneğinin gösterimi.



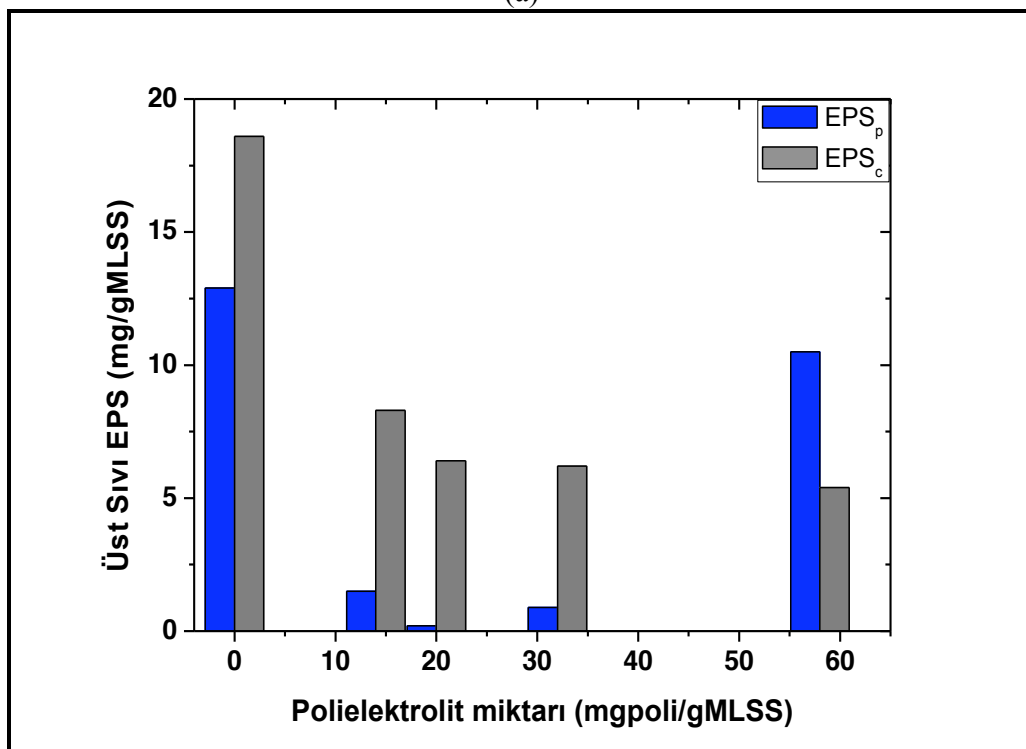
Şekil 4.41. Farklı polielektrolit konsantrasyonlarında çamurun üst sıvısındaki OD<sub>600</sub> değişimi.

Çamurların üst sıvısında yapılmış olan SMP ve EPS analizleri Şekil 4.42 (a-b)'de verilmiştir. Şekil 4.42 (a)'dan görülebileceği gibi polielektrolit miktarının artırılmasıyla çamurların üst sıvılarındaki SMP<sub>p</sub> ve SMP<sub>c</sub> miktarları azalmaktadır. Polielektrolit ilave edilmeden önce SMP<sub>p</sub> konsantrasyonu 47.3 mg/L ve SMP<sub>c</sub> konsantrasyonu 58 mg/L iken, üst sıvıdaki OD<sub>600</sub>'un en küçük değere sahip olduğu 20 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilavesinde SMP<sub>p</sub> konsantrasyonu 20.3 mg/L ve SMP<sub>c</sub> konsantrasyonu ise 18 mg/L'ye düşmüştür. Polielektrolit miktarını 20 mgpoli/gMLSS'den fazla arttırmak SMP konsantrasyonu üzerinde çok fazla değişikliğe sebep olmamıştır. Şekil 4.42 (b)'den EPS değişimlerine bakıldığında, çamurun üst sıvısındaki EPS<sub>p</sub> miktarının 20 mgpoli/gMLSS polielektrolit miktarına kadar azaldığı fakat bu değerden fazla polielektrolit ilavesinde tekrar arttığı görülmüştür. Polielektrolit ilave edilmeden önce çamurun üst sıvısındaki EPS<sub>p</sub> miktarı 12.9 mgprotein/gMLSS ve EPS<sub>c</sub> miktarı 18.6 mgprotein/gMLSS iken 20 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilave edilen çamurun üst sıvısında EPS<sub>p</sub> miktarı 0.2 mgprotein/gMLSS ve EPS<sub>c</sub> miktarı 6.4 mgprotein/gMLSS'ye düşmüştür. Polielektrolit miktarının 58 mgpoli/gMLSS olduğu çamurda üst sıvıdaki EPS<sub>p</sub> miktarı 10.5 mgprotein/gMLSS ve EPS<sub>c</sub> miktarı 5.4 mgprotein/gMLSS olarak ölçülmüştür. Göreceli hidrofobisite değerlerindeki 32 ve 58 mgpoli/gMLSS ilave

edilen çamurlarda düşmesi, bu çamurlardaki  $EPS_p$  miktarlarının artmasından dolayıdır. Çünkü  $EPS_p$ 'nin yapısında bulunan hidrofobik aminoasit grupları çamurun yüzey yükünü arttırarak hidrofilik özellik kazanmasına sebep olmaktadır.



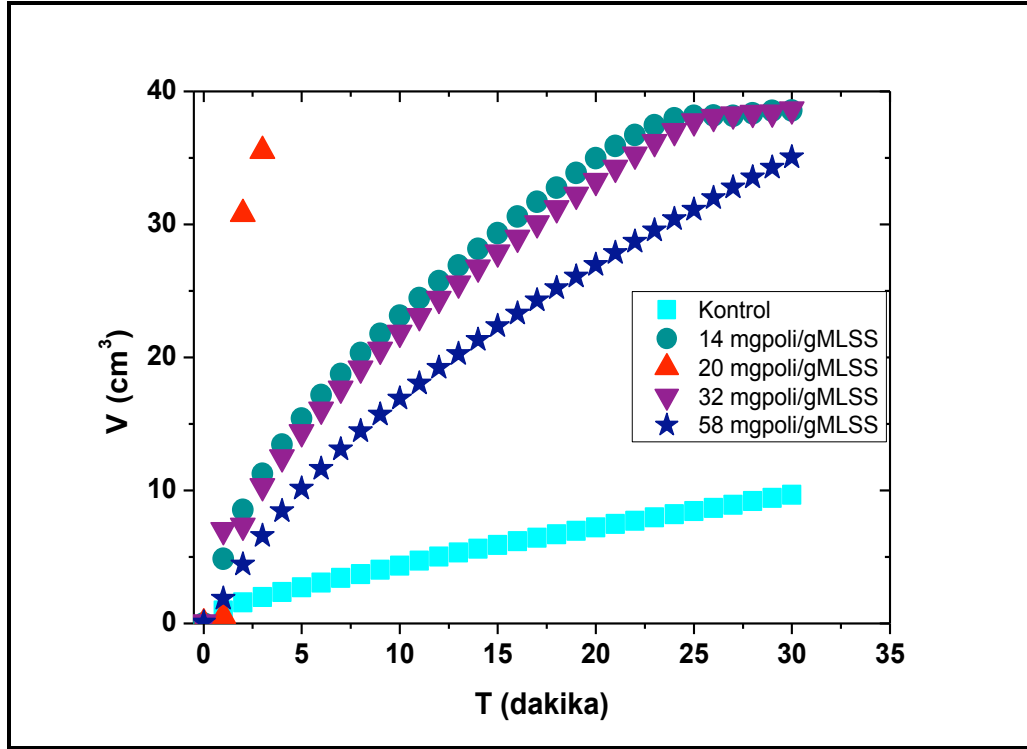
(a)



(b)

Şekil 4.42. Farklı polielektrolit konsantrasyonlarında çamurun üst sıvısındaki SMP ve EPS değişimleri (a) SMP (b) EPS.

Çamurdaki SVI, göreceli hidrofobisite ve çamur üst sıvısındaki OD<sub>600</sub>, SMP ve EPS analizlerinden sonra, filtrasyon performanslarını gözlemlemek için polielektrolit eklenmiş çamurlardan belirli hacimde numuneler alınmış ve klasik filtrasyon sisteminde filtre edilmişlerdir. Bu amaçla 0.45 µm gözenek boyutuna sahip SA membran kullanılarak 1 bar basınç altında filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.43'de deneye ait zaman-hacim grafiği verilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi, polielektrolit ilavesinin yapılmadığı kontrol çamurundan 30 dakikada yaklaşık 10 mL süzüntü hacmi elde edilmiştir. Polielektrolit ilavesinden sonra ise çamurun filtrasyon performansı artmış dolayısıyla toplanan süzüntü hacimleri artmıştır. Özellikle 20 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilavesinin yapıldığı çamurdan 5 dakika gibi kısa bir sürede 40 mL kadar süzüntü hacmi elde edilmiştir. 14 ve 32 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilave edilen çamurlar aynı filtrasyon performansını gösterirken, 58 mgpoli/gMLSS polielektrolit ilavesinin yapıldığı çamurun filtrasyon performansı düşmüş, daha az süzüntü hacmi elde edilmiştir. Fotoğraf 'da filtrasyon sonunda membran yüzeyinde biriken kek tabakalarının görünümü verilmiştir. Bu resimlerden de görülebileceği gibi çamura polielektrolit ilavesi membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının görünümünü ve özelliklerini değiştirmiştir. Yapılan bu deneyler sonrasında optimum polielektrolit miktarının 20 mgpoli/gMLSS olduğuna karar verilmiştir. JLMBR sistemine bu miktardaki polielektrolit, 2000 mg/L stok polielektrolit çözeltisinden peristaltik pompa ile sürekli olarak 2.6 L/gün debi ile sisteme verilmiştir. Bunun yanında FeCl<sub>3</sub>'de reaktöre sürekli olarak beslenmiştir.



Şekil 4.43. Farklı polielektrolit konsantrasyonlarında çamurun klasik filtrasyon sistemindeki filtrasyon performansları (Membran tipi: SA 0.45, Filtrasyon basıncı: 1 bar).



Fotoğraf 4.2. Polielektrolit deneyinde kullanılan çamurların klasik filtrasyon deneylerinden sonra membran yüzeyinde biriken çamurun oluşturduğu kek tabakalarının görünümü.

### 4.3.2. Reaktördeki parametrelerin değişimi

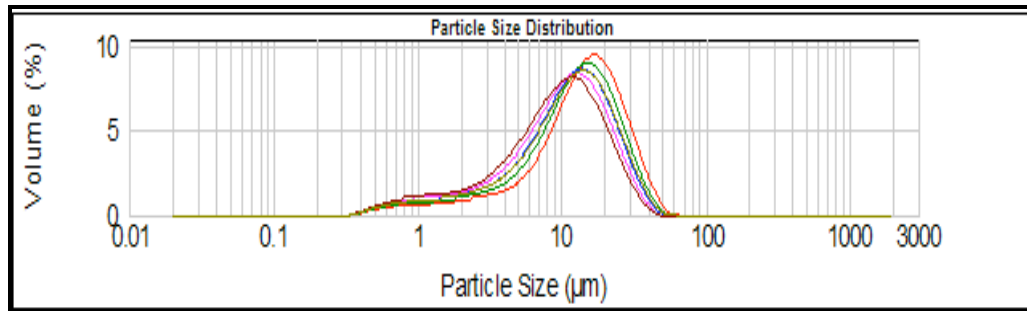
**KOİ Değişimi;** Reaktöre polielektrolit ilavesi, V nolu deney setinden hemen sonra gerçekleştirildiği için, bu deney setinde de çamur yaşı 3 günde sabit tutulmuş, sentetik atıksuyun giriş KOİ konsantrasyonu  $4110 \pm 68$  mg/L değerine ayarlanmıştır. Buna bağlı olarak organik yükleme  $7.2 \pm 0.1$  kgKOİ/m<sup>3</sup>gün, tübüler membran çıkışındaki KOİ değeri  $72 \pm 6$  mg/L ve KOİ giderim verimi de  $\%98.2 \pm 0.2$  olarak bulunmuştur. V nolu deney setindeki KOİ giderim verimi ( $\%98.8 \pm 0.2$ ) ile karşılaştırıldığında, polielektrolit ilavesinin KOİ giderim verimlerini kötü yönde etkilemediği söylenebilir.

**MLSS Değişimi;** Polielektrolit ilave edildikten sonra MLSS konsantrasyonunda biraz artış olmuştur. Konsantrasyon  $6967 \pm 118$  mg/L'den  $7190 \pm 99$  mg/L'ye artmıştır. Bu MLSS konsantrasyonunda F/M oranı da  $1.00$  kgKOİ/kgMLSS.gün olarak hesaplanmıştır.

**SMP ve EPS değişimi;** JLMBR'de çamurun SMP ve EPS değişimleri bu deney setinde de sürekli olarak takip edilmiştir. SMP mg/L birimi ile EPS konsantrasyonu ise mg protein veya karbonhidrat/gMLSS olarak verilmiştir. Bu deney sisteminde, SMP<sub>p</sub> ortalama  $45.0 \pm 4.2$  mg/L, SMP<sub>c</sub> ortalama  $42.2 \pm 10.2$  mg/L, EPS<sub>p</sub>  $19.4 \pm 0.6$  mgprotein/gMLSS ve EPS<sub>c</sub>  $14.5 \pm 0.4$  mgkarbonhidrat/gMLSS olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan görülebileceği gibi polielektrolit ilavesi ile çamurun SMP değerleri azalmıştır. Bu sonuçlar polielektrolit ilave edilmeden önceki (Deney Seti:V) değerler ile karşılaştırıldığında SMP konsantrasyonları azalmış, EPS<sub>p</sub> miktarları artmıştır. EPS<sub>c</sub> miktarı polielektrolit ilavesinden sonra çok fazla değişmemiştir.

**Göreceli hidrofobisite ve viskozite değişimi;** Göreceli hidrofobisite ve viskozite değerleri bu deney setinde artmıştır. Polielektrolit ilave edilmeden önce göreceli hidrofobisite değeri  $\%22.1 \pm 3.2$  iken reaktöre polielektrolit ilave edildikten sonra göreceli hidrofobisite değeri  $\%42.3 \pm 4.5$ 'e çıkmıştır. Viskozite değeri polielektrolit ilavesinden önce  $2.2 \pm 0.1$  cP iken polielektrolit ilavesinden sonra  $2.6 \pm 0.1$  cP'a çıkmıştır.

**Partikül boyut dağılımı;** Bu deney setinde çamurun partikül boyut dağılımı 2.48 ile 25.24  $\mu\text{m}$  arasında değişmiş, ortalama 11.5  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu değer I nolu deney setindeki (6.0-29.0  $\mu\text{m}$ ) değere yakın, II nolu deney setindeki (1.0-13.7  $\mu\text{m}$ ) değerden yüksek çıkmıştır. Polielektrolit ilavesi partikül boyutunu çok fazla değiştirmemiştir. Analiz sonucu Şekil 4.44’de verilmiştir.



Şekil 4.44. JLMBR’ye sürekli polielektrolit ilavesinde reaktördeki partikül boyut dağılım analiz sonuçları (Deney Set: VI).

Sonuç olarak polielektrolit ilavesinden önce ve sonra reaktördeki parametrelerin değişimi Çizelge 4.21’de sunulmuştur. Polielektrolit ilavesi MLSS konsantrasyonu,  $\text{EPS}_p$  miktarını, göreceli hidrofobisite ve viskozite değerlerini arttırmış, SMP konsantrasyonlarını düşürmüştür. Partikül boyut dağılımı ve  $\text{EPS}_c$  miktarları çok fazla değişim göstermemiştir.

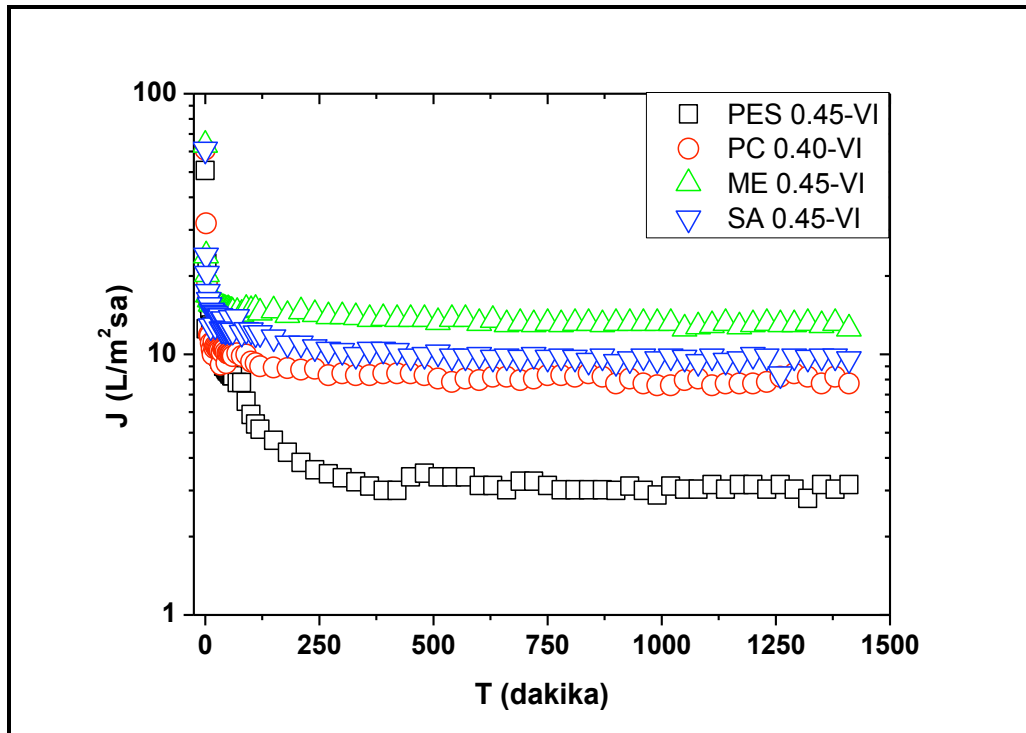
Çizelge 4.21. JLMBR sisteminde polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra reaktördeki parametrelerin değerleri.

Parametre	Polielektrolit ilave edilmeden önce (Deney Seti: V)	Polielektrolit ilave edildikten sonra (Deney Seti: VI)
$\text{KOI}_{\text{giriş}}$ (mg/L)	4110±68	4110±68
KOI giderim verimi (%)	%98.8±0.2	%98.2±0.2
MLSS (mg/L)	6967±118	7190±99
F/M (kgKOİ/kgMLSSgün)	1.03	1.00
$\text{SMP}_p$ (mg/L)	55.6±2.3	45.0±4.2
$\text{SMP}_c$ (mg/L)	46.4±4.8	42.2±10.2
$\text{EPS}_p$ (mgprotein/gMLSS)	15.0±1.5	19.4±0.6
$\text{EPS}_c$ (mgkarbonhidrat/gMLSS)	15.8±0.8	14.5±0.4
Göreceli hidrofobisite (%)	22.1±3.2	42.3±4.5
Viskozite (cP)	2.2±0.1	2.6±0.1

### 4.3.3. Katyonik polielektrolit ilavesinin batık membran filtrasyon sisteminde membran tipi ve gözenek boyutuna göre etkisinin araştırılması

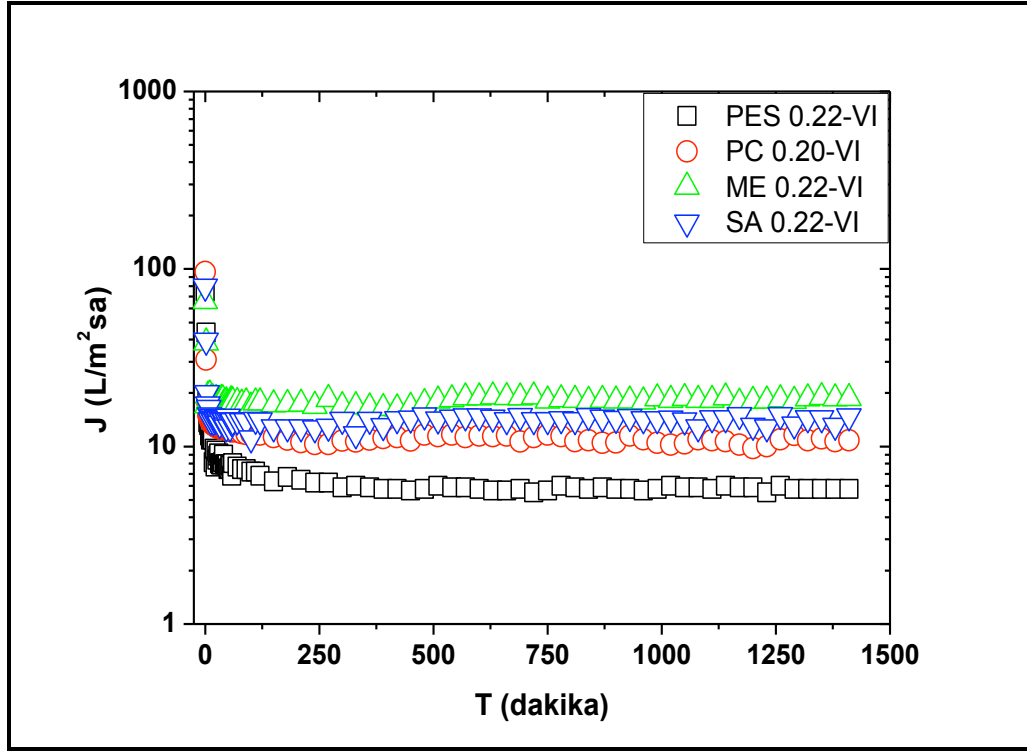
#### 4.3.3.1. Katyonik polielektrolit ilavesinin membran tipi ve gözenek boyutuna göre akı değişimlerine etkisinin incelenmesi

Çamur ortamına polielektrolit ilavesinin, filtrasyon performansına olan etkilerini araştırmak için batık membran filtrasyon sisteminde deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı tip ve gözenek boyutundaki membranların aynı şartlar altında filtrasyon performanslarının karşılaştırılabilmesi için, daha önceki deney setlerindeki gibi 11 tane membran kullanılmıştır. Deneyler büyük gözenek boyutlu membranlardan küçük gözenek boyutlu membranlara doğru gerçekleştirilmiştir. Batık membran sisteminde gerçekleştirilmiş olan 24 saatlik filtrasyonun sonucunda elde edilmiş olan akı-zaman grafikleri Şekil 4.45 (a-c)'de verilmiştir. Bu deney sisteminde diğer sistemlerden farklı olarak membranların denge akı değerleri birbirlerinden farklı çıkmıştır. Polielektrolit ilavesinin etkisini daha iyi yorumlayabilmek için membranların  $J_0$ ,  $J_d$ , FDR ve  $V_t$  değerleri polielektrolit ilave edilmeden önceki değerler ile birlikte Çizelge 4.21'de sunulmuştur.

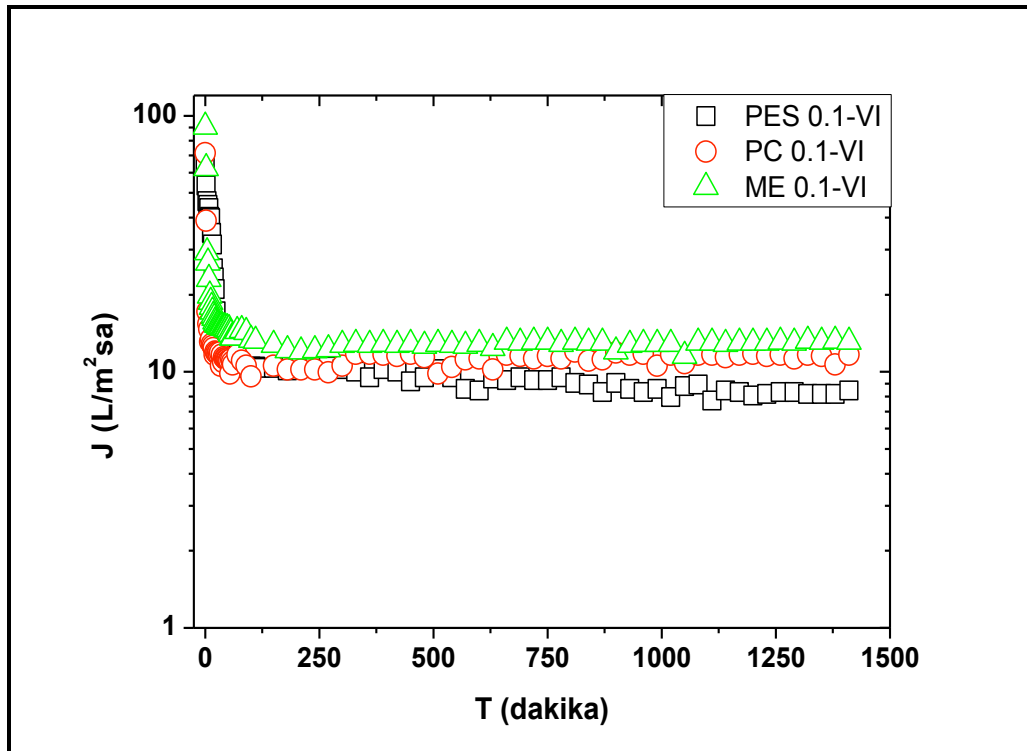


(a)





(b)



(c)

Şekil 4.45. JLMBR sistemine katyonik polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait akı-zaman grafikleri (a) 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (b) 0.22  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (c) 0.10  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlar (Deney No:VI).

Çizelge 4.22'den görülebileceği gibi en yüksek  $J_d$  değerleri ME membran hariç 0.1  $\mu\text{m}$  gözenek boyutlu membranlarda elde edilmiştir. En yüksek  $J_o$  değeri (96  $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ ) PC 0.20 membranda, en yüksek  $J_d$  değeri (18  $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ ) ve en yüksek süzüntü hacmi değeri (2166  $\text{cm}^3$ ) ME 0.22 membranda elde edilmiştir. En yüksek FDR değeri (%93.9) PES 0.45 membranda ve en düşük FDR (%72.0) değeri ME 0.22 membranda hesaplanmıştır. Genel olarak bakıldığında, polielektrolit ilave edildikten sonra membranların süzüntü hacimleri,  $J_o$  ve  $J_d$  değerleri artış göstermiştir. Aynı zamanda FDR değerleri de SA membranlar hariç azalmıştır. Polielektrolit ilavesi PES 0.45 membran hariç diğer membranların filtrasyon performanslarını arttırmıştır. Bu deney sisteminde de en uygun membran gözenek boyutu 0.22  $\mu\text{m}$ , en iyi membran tipi de ME membran olmuştur. En düşük verime sahip membran ise diğer deney setlerine benzer şekilde 0.45  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip PES membran olmuştur.

#### 4.3.3.2. Katyonik polielektrolit ilavesinin membran tipi ve gözenek boyutuna göre filtrasyon dirençlerine olan etkisinin değerlendirilmesi

Çamur filtrasyonunun son bir saatindeki akı değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmış olan toplam direnç değerleri membran tipi ve gözenek boyutuna göre grafiksel olarak Şekil 4.46'da gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi gözenek boyutu azaldıkça  $R_t$  değerleri de azalmıştır. En düşük  $R_t$  değeri ME 0.22 ve en yüksek  $R_t$  değeri PES 0.45 membranlarda elde edilmiştir. Polielektrolit ilave edilmeden önceki  $R_t$  değerleri ile karşılaştırıldığında, polielektrolit ilavesinin toplam direnç değerlerini azalttığı görülmektedir. Şekil 4.47 (a-b)'de deneysel olarak bulunmuş olan membranların gözenek ve kek direnç değerleri gösterilmiştir. Polielektrolit ilavesi ile membranların gözenek ve kek direnç değerleri de azalmıştır.

İki deney sistemi için Çizelge 4.23'de MFI,  $\alpha$ ,  $R_t$ ,  $R_c$  ve  $R_p$  değerleri verilmiştir. Bunun yanında  $R_m$ ,  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin  $R_t$  içerisindeki oranları % olarak parantez içerisinde belirtilmiştir.

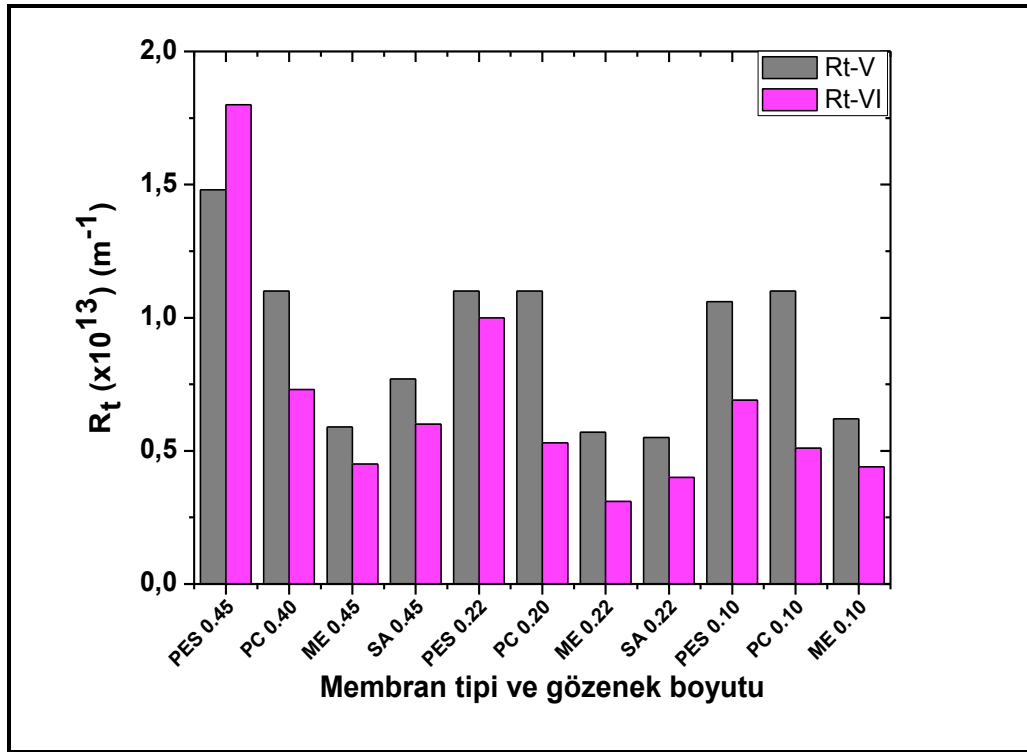
Çizelge 4.22. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait filtrasyon sonuçları (Deney Set:V-VI).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$J_0^*$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )		$J_d^{**}$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )		FDR (%)		$V_t^{***}$ ( $\text{cm}^3$ )	
		V	VI	V	VI	V	VI	V	VI
PES	0.45	43	51	4	3	91.0	93.9	549	450
PC	0.40	57	61	5	8	90.7	87.0	804	1012
ME	0.45	53	64	10	13	81.6	79.8	1362	1617
SA	0.45	53	61	8	10	83.6	84.3	1062	1233
PES	0.22	46	75	5	6	91.6	92.4	700	744
PC	0.20	63	96	5	11	91.3	88.6	764	1334
ME	0.22	60	66	10	18	82.7	72.0	1296	2166
SA	0.22	59	80	10	14	77.0	82.3	1319	1701
PES	0.10	46	65	5	8	92.0	87.1	758	1183
PC	0.10	67	71	5	11	91.8	84.3	747	1352
ME	0.10	64	91	9	13	85.5	85.5	1210	1547

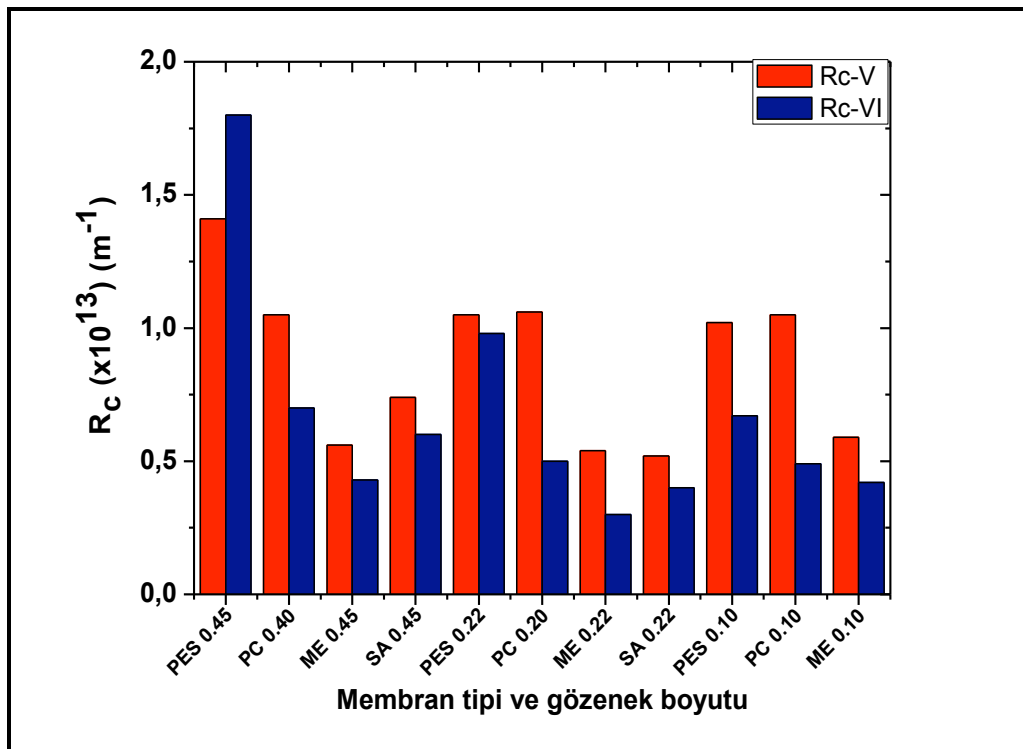
$J_0^*$ : Filtrasyon deneylerinde membranların ilk akı değerini ifade etmektedir.

$J_d^{**}$ : Filtrasyonun son 1 saatindeki akı değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.

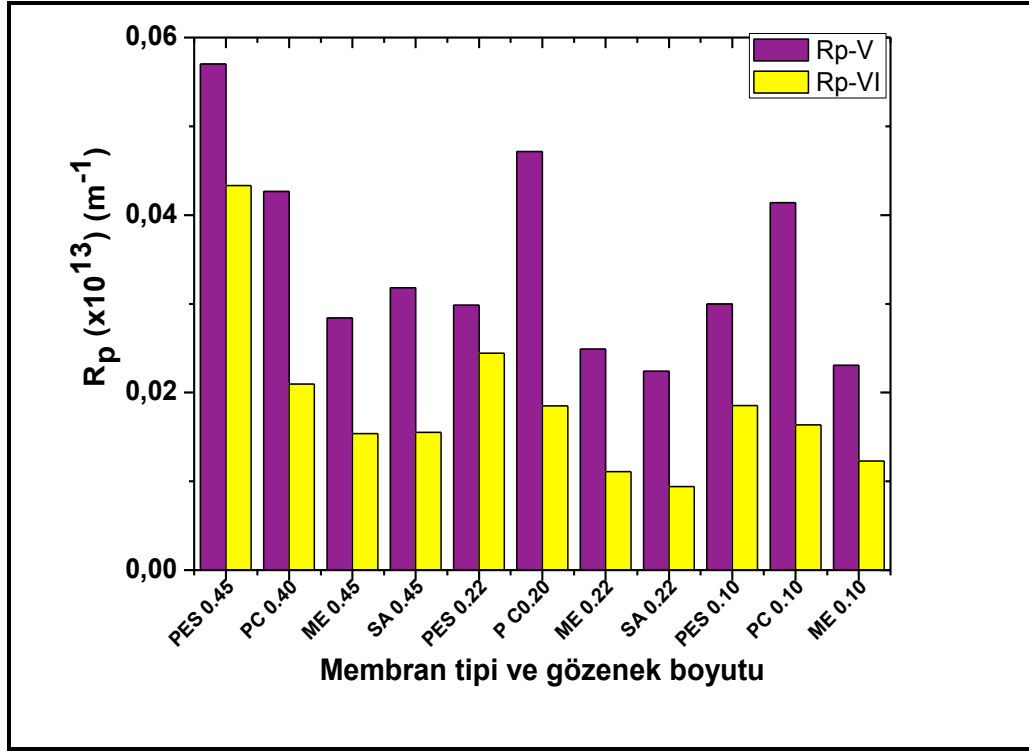
$V_t^{***}$ : 24 saatlik filtrasyon sonunda toplanan süzüntü hacmini ifade etmektedir.



Şekil 4.46. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_t$  değerlerinin birlikte gösterimi (Deney Set: V-VI).



(a)



(b)

Şekil 4.47. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre hesaplanmış  $R_c$  ve  $R_p$  değerlerinin birlikte gösterimi (a)  $R_c$  değerleri (b)  $R_p$  değerleri (Deney Set: V-VI).

VI nolu deney setinin direnç değerlerine bakıldığında, PES 0.45 membran en yüksek  $R_t$  ( $1.83 \times 10^{13}$  m<sup>-1</sup>), en yüksek  $R_c$  ( $1.78 \times 10^{13}$  m<sup>-1</sup>) ve en yüksek  $R_p$  ( $0.043 \times 10^{13}$  m<sup>-1</sup>) değerlerine sahip olmuştur. ME 0.22 membran ise en düşük  $R_t$  ( $0.31 \times 10^{13}$  m<sup>-1</sup>) ve en düşük  $R_c$  ( $0.30 \times 10^{13}$  m<sup>-1</sup>) değerlerine sahip olmuştur. En düşük  $R_p$  değeri ( $0.009 \times 10^{13}$  m<sup>-1</sup>) SA 0.22 membranda elde edilmiştir. Polielektrolit ilavesinden sonra  $R_p$  değerleri oldukça azalmıştır. Bunun nedeni reaktörde azalan SMP konsantrasyonlarıdır. Polielektrolit ilavesinden sonra, bakterilerin ürettiği çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) polielektrolite adsorbe olmuştur dolayısıyla membran gözeneklerini tıkaması önlenmiştir. Membranların yüzeyinde oluşan kek tabakasının yapısı hakkında bilgi veren  $\alpha$  değerlerine bakıldığında, polielektrolit ilave edildikten sonra membranların  $\alpha$  değerlerinin düştüğü görülmektedir. En yüksek  $\alpha$  değeri ( $1.24 \times 10^{13}$  m/kg) yine PES 0.45 membranda ve en düşük  $\alpha$  değeri ( $0.002 \times 10^{13}$  m/kg) SA 0.45 membranda elde edilmiştir. Membran yüzeyindeki kek tabakasının porozitesi arttıkça, suyun geçirgenliği artar ve dolayısıyla  $\alpha$  değeri düşer. Çamurun filtrasyonunda, polielektrolite adsorbe olmuş bakteri ve ürünleri membran yüzeyinde

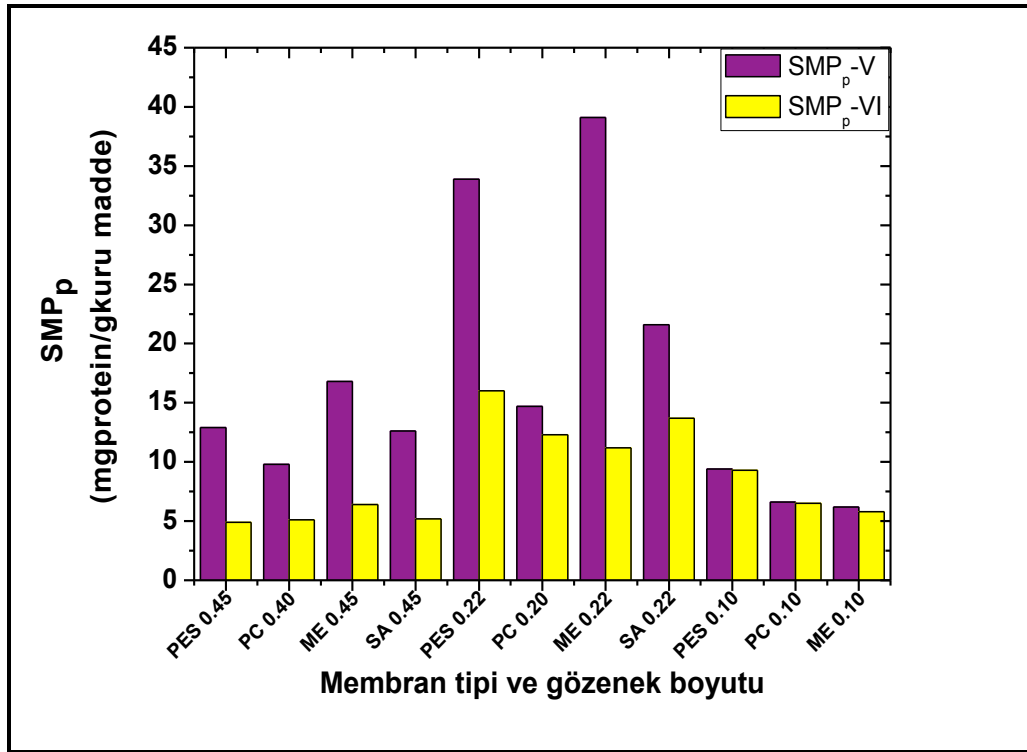
oluşan kek tabakasında homojen bir şekilde birikmiştir. Polielektrolit ilavesinden önce hidrofilik çamur özellikleri nedeniyle oluşan jelimsi yapıdaki kek tabakasında suyun geçirgenliği düşüktür, polielektrolit ilavesinden sonra oluşan hidrofobik çamur özellikleri nedeniyle su, bakteri floklarının arasında daha kolay hareket etmekte dolayısıyla kek tabakasının geçirgenliği artmaktadır. Burada hidrofobik çamur-hidrofilik membran etkileşiminin önemli olduğu düşünülmektedir.

#### **4.3.3.3. Katyonik polielektrolit ilavesinden sonra membran yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki analiz sonuçlarının değerlendirilmesi**

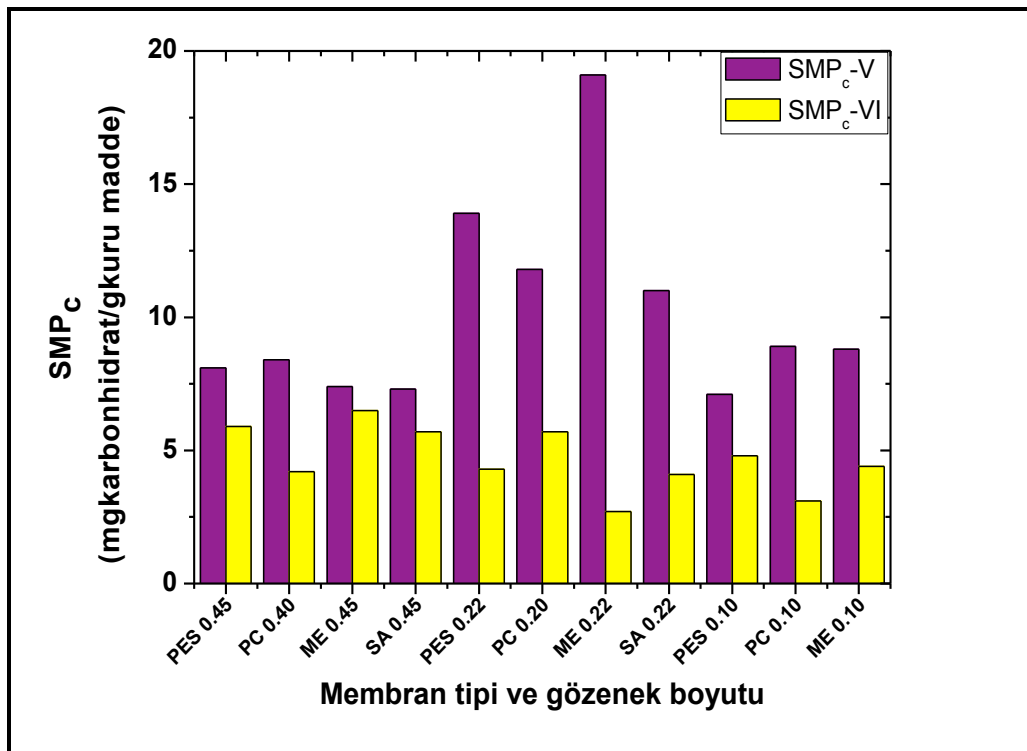
Bu çalışma sisteminde de membran yüzeyinde oluşmuş olan sabit kek tabakasında SMP, EPS ve su içeriği analizleri yapılmıştır. SMP ve EPS analizlerinin sonuçları yine protein ve karbonhidrat cinsinden mg/L olarak ölçülmüş, su içeriği analizinden elde edilmiş çamurun kuru madde değerine oranlanarak mg protein veya karbonhidrat/g kuru madde olarak verilmiştir. VI nolu deney sisteminin SMP ve EPS analizlerinin sonuçları V nolu deney setinin değerleri ile birlikte grafiksel olarak Şekil (a-b) ve Şekil (a-b)'de sunulmuştur. Bu deney sisteminde de membran yüzeylerindeki SMP ve EPS miktarları membran tipine ve gözenek boyutuna göre farklılık göstermiştir. Bu deney setinde, SMP<sub>p</sub>'nin en çok birikim yaptığı membran PES 0.22, SMP<sub>c</sub>'nin en çok birikim yaptığı membran ME 0.45 olmuştur. EPS<sub>p</sub>'nin en çok birikim yaptığı membran PC 0.20, EPS<sub>c</sub>'nin en çok birikim yaptığı membran ME 0.45 olmuştur. Kek tabakası analizlerinin sonuçları, polielektrolit eklemenden önce yapılan batık membran filtrasyon deneylerindeki analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında, polielektrolitin kek tabakasında özellikle SMP ve EPS<sub>p</sub>'nin birikimini azalttığı görülmektedir. EPS<sub>c</sub> üzerinde çok bir değişikliğe sahip olmamıştır. Bu sonuçlar çamurda yapılmış olan analizler ile tutarlılık göstermektedir. Çamurda yapılan analizlerde de reaktöre polielektrolit ilavesinden sonra çamurda SMP ve EPS<sub>p</sub>'nin miktarları azalmıştır. Sonuç olarak kek tabakasında EPS miktarlarının azalması özellikle kek dirençlerinin (R<sub>c</sub>) azalmasını ve akı değerlerinin artmasını sağlamış, böylelikle filtrasyon verimlerini arttırmıştır.

Çizelge 4.23. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait spesifik kek direnci ( $\alpha$ ), toplam direnç ( $R_t$ ) ile membran ( $R_m$ ), kek ( $R_c$ ) ve gözenek ( $R_p$ ) dirençlerinin değerleri ve toplam direnç içerisindeki % dağılımı sonuçları (Deney Set:V-VI).

Membran tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	MFI ( $\times 10^6$ )		( $\alpha$ ) Spesifik kek direnci ( $\text{m/kg}$ ) $\times 10^{13}$		R ( $\times 10^{13}$ ) ( $\text{m}^{-1}$ ) (%)							
		V	VI	$\alpha$ -V	$\alpha$ -VI	$R_t$ -V	$R_t$ -VI	$R_m$ -V	$R_m$ -VI	$R_p$ -V	$R_p$ -VI	$R_c$ -V	$R_c$ -VI
PES	0.45	1.59	2.76	0.73	1.24	1.48	1.83	0.005 (0.3)	0.005 (0.3)	0.057 (3.9)	0.043 (2.4)	1.41 (95.8)	1.78 (97.4)
PC	0.40	1.15	0.19	0.53	0.08	1.1	0.73	0.005 (0.5)	0.005 (0.7)	0.043 (3.9)	0.021 (2.9)	1.05 (95.6)	0.7 (96.4)
ME	0.45	0.19	0.06	0.09	0.03	0.59	0.45	0.006 (1.1)	0.006 (1.4)	0.028 (4.8)	0.015 (3.4)	0.56 (94.1)	0.43 (95.2)
SA	0.45	0.45	0.13	0.21	0.06	0.77	0.6	0.005 (0.7)	0.005 (0.8)	0.032 (4.1)	0.016 (2.6)	0.74 (95.2)	0.58 (96.6)
PES	0.22	0.59	0.43	0.27	0.19	1.09	1.0	0.01 (1.3)	0.01 (1.4)	0.03 (2.7)	0.024 (2.4)	1.05 (95.9)	0.98 (96.2)
PC	0.20	0.90	0.03	0.41	0.01	1.11	0.53	0.009 (0.8)	0.009 (1.6)	0.047 (4.2)	0.019 (3.5)	1.06 (95.0)	0.50 (94.9)
ME	0.22	0.16	0.11	0.07	0.05	0.57	0.31	0.007 (1.2)	0.007 (2.1)	0.025 (4.4)	0.011 (3.5)	0.54 (94.5)	0.30 (94.3)
SA	0.22	0.07	0.003	0.03	0.002	0.55	0.41	0.008 (1.4)	0.008 (1.8)	0.022 (4.1)	0.009 (2.3)	0.52 (94.5)	0.39 (95.9)
PES	0.10	0.78	0.38	0.36	0.2	1.06	0.7	0.007 (0.7)	0.007 (1.0)	0.03 (2.8)	0.019 (2.7)	1.02 (96.5)	0.67 (96.3)
PC	0.10	1.00	0.57	0.46	0.26	1.1	0.51	0.007 (0.6)	0.007 (1.4)	0.041 (3.8)	0.016 (3.2)	1.05 (95.6)	0.49 (95.4)
ME	0.10	0.19	0.01	0.09	0.005	0.63	0.44	0.009 (1.5)	0.009 (2.1)	0.023 (3.7)	0.012 (2.8)	0.59 (94.8)	0.42 (95.1)



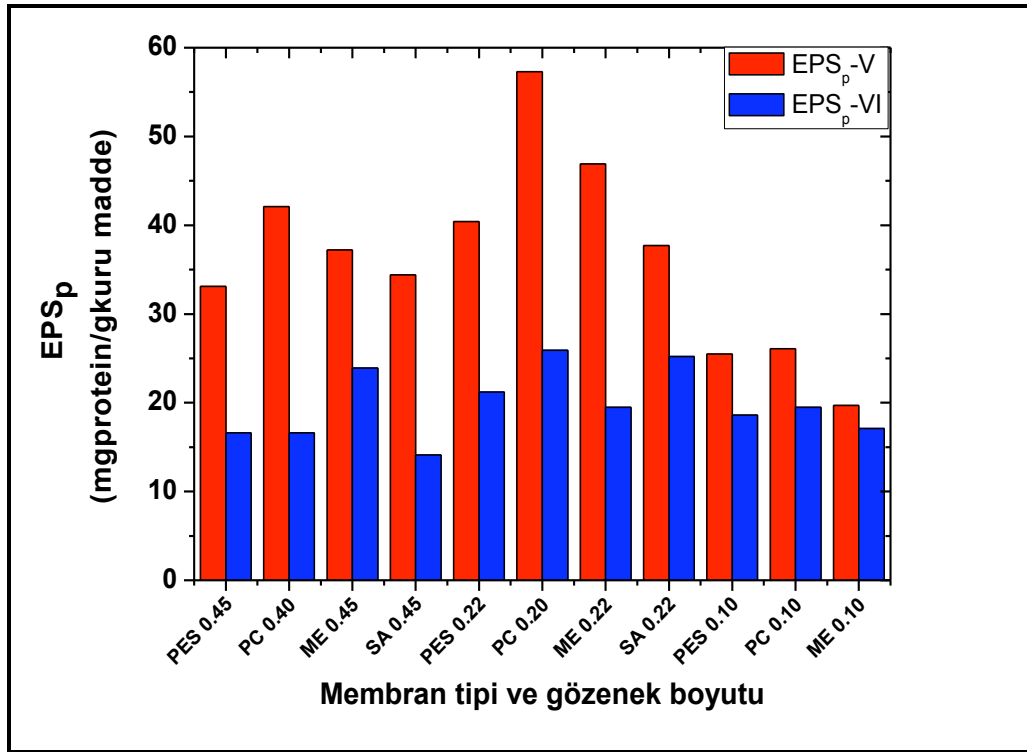
(a)



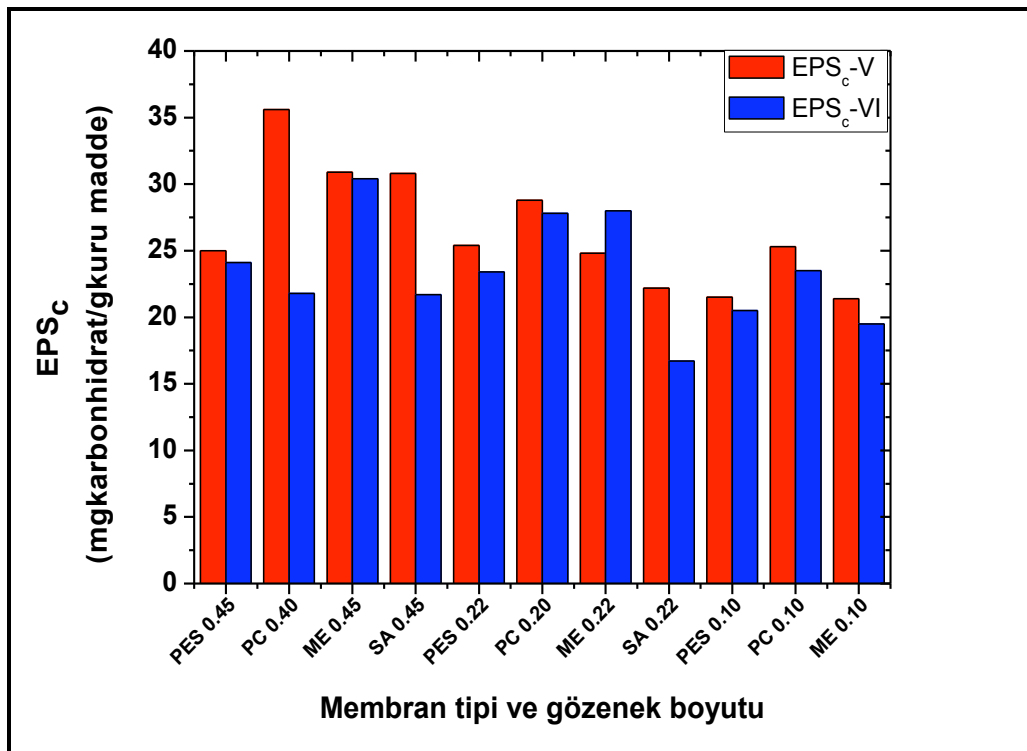
(b)

Şekil 4.48. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki SMP analizlerinin sonuçları (a) SMP<sub>p</sub> değerleri (b) SMP<sub>c</sub> değerleri (Deney No:V-VI).





(a)



(b)

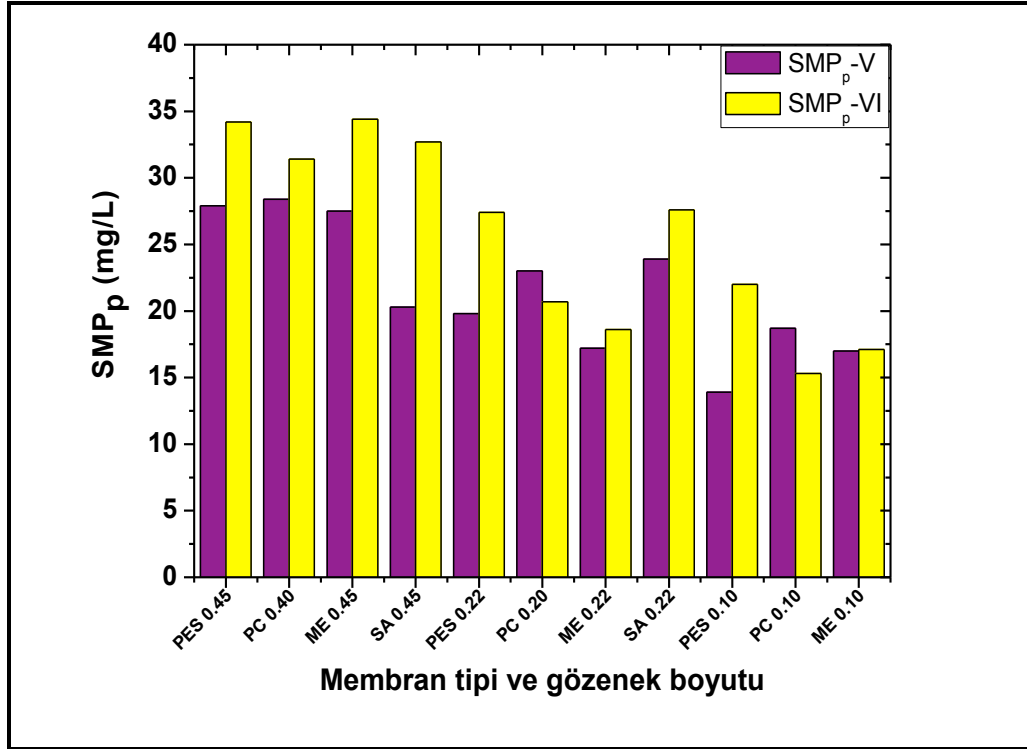
Şekil 4.49. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membran yüzeyindeki kek tabakasındaki EPS analizlerinin sonuçları (Deney No:V-VI) (a) EPS<sub>p</sub> değerleri (b) EPS<sub>c</sub> değerleri.

#### 4.3.3.4. Süzüntüde yapılan analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

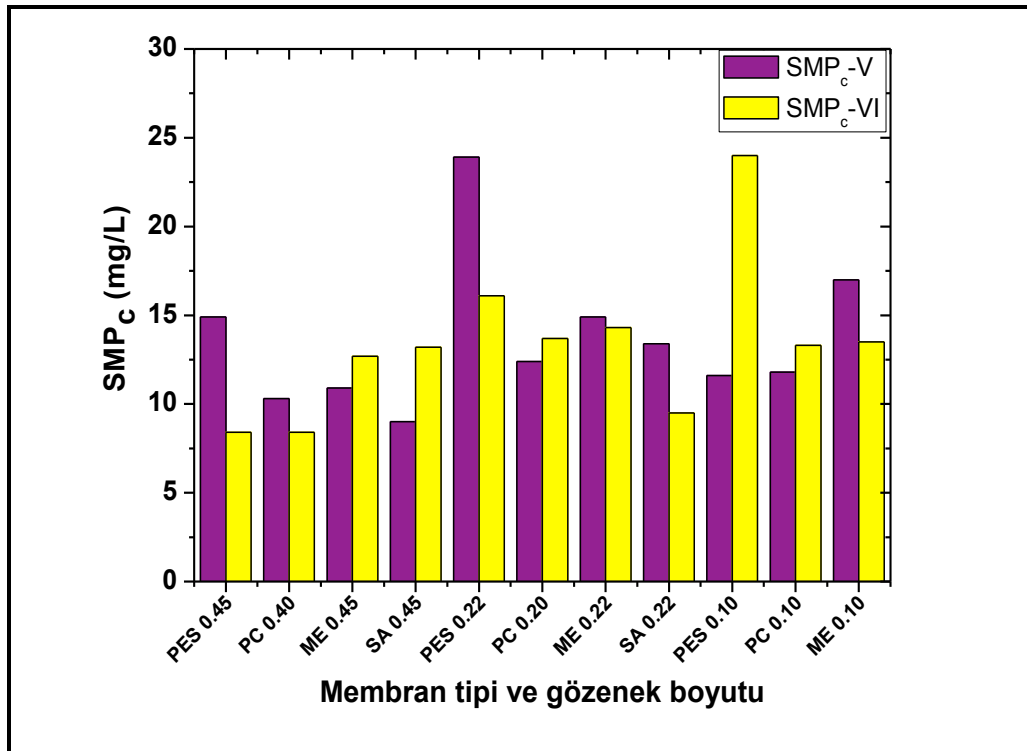
Batık membran filtrasyonundan sonra toplanan süzüntülerde SMP analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.50 (a-b)'de gösterilmiştir. Sonuçlar yine polielektrolit ilave edilmeden önce yapılan batık membran filtrasyon deneyleri ile birlikte verilmiştir. Polielektrolit ilavesinden sonra süzüntülerde  $SMP_p$  konsantrasyonları artmıştır. Gözenek boyutu azaldıkça süzüntüdeki  $SMP_p$  konsantrasyonları da azalmıştır. Süzüntü  $SMP_c$  konsantrasyonları polielektrolit eklendikten sonra çok fazla değişmemiştir. Bu sistemde de diğer deney setlerine benzer şekilde süzüntülerde genel olarak SMP'nin protein içerikleri karbondihdrattan daha yüksek çıkmıştır. İki deney seti için membranların SMP tutma verimleri Çizelge 4.24'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre en fazla  $SMP_p$  tutan membran PC 0.1, en az ME 0.45, en fazla  $SMP_c$  tutan membran PC 0.40 ve PES 0.45, en az PES 0.1 membran olmuştur. Polielektrolit ilave edilmesi özellikle büyük gözenekli membranlarda SMP'nin gözeneklere adsorbe olmadan süzüntüye geçmesine sebep olmuştur. Bu da filtrasyon performanslarını arttırmıştır.

Çizelge 4.24. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edildikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre membranların SMP tutma verimleri (Deney Set: V-VI).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	SMP tutma verimi (%)			
		$SMP_p$		$SMP_c$	
		V	VI	V	VI
PES	0.45	49.1	1.7	69.9	78.7
PC	0.40	48.2	9.8	79.2	78.7
ME	0.45	49.8	1.1	78.0	67.8
SA	0.45	63.0	6.0	81.8	66.5
PES	0.22	63.9	21.3	51.7	59.1
PC	0.20	58.0	40.5	74.9	65.2
ME	0.22	68.6	46.6	69.9	63.7
SA	0.22	56.4	20.7	72.9	75.9
PES	0.10	74.6	36.8	76.6	39.1
PC	0.10	65.9	56.0	76.2	66.2
ME	0.10	69.0	50.9	65.7	65.7



(a)



(b)

Şekil 4.50. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerine ait membran tipi ve gözenek boyutuna göre elde edilen süzütülerdeki SMP değişimleri (a) SMP<sub>p</sub> değişimi (b) SMP<sub>c</sub> değişimi (Deney Set:V-VI).

#### 4.3.3.5. Batık membran filtrasyonunda akı azalmalarına etki eden parametrelerin toplu olarak değerlendirilmesi

Polielektrolit ilavesinin yapıldığı JLMBR sisteminde oluşan çamurun filtrasyon özellikleri farklı membran tipi ve gözenek boyutu kullanılarak batık membran sisteminde incelenmiştir. Bu deney setinde de akı azalmasını etkileyen parametreler birlikte değerlendirilmiştir. Çizelge 4.25’de membran tiplerine göre hesaplanmış olan  $f(\alpha R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  birimsiz sabiti ile  $J_d$  değerleri ile birlikte verilmiştir. Bu deney setinde de  $f(\alpha R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  değerinin yüksek olduğu durumda  $J_d$  değeri genelde düşük, bu değer düşük olduğu durumda ise  $J_d$  değerinin yüksek olduğu görülmektedir.  $J_d$  ile bu değer arasında yapılan korelasyonun sonucunda, korelasyon sabitleri V nolu deney seti için (-0.83) ve VI nolu deney seti içinde (-0.7) olarak bulunmuştur. Buradan da görülebileceği gibi, iki değer arasında negatif korelasyon çıkmıştır.

Çizelge 4.25. JLMBR sistemine polielektrolit ilave edilmeden önce ve sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon sisteminde membran tiplerine göre  $f(\alpha R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  değerleri (Deney Set: V-VI).

Membran Tipi	Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	$f(\alpha R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$		$J_d$ ( $\text{L}/\text{m}^2\text{sa}$ )	
		Set: V ( $\times 10^{26}$ )	Set: VI ( $\times 10^{26}$ )	V	VI
PES	0.45	3.4	1.86	4	3
PC	0.40	2.3	0.12	5	8
ME	0.45	0.6	0.06	10	13
SA	0.45	1.0	0.09	8	10
PES	0.22	1.9	0.51	5	6
PC	0.20	2.8	0.04	5	11
ME	0.22	0.9	0.12	10	18
SA	0.22	0.2	0.00	11	14
PES	0.10	0.9	0.37	5	8
PC	0.10	1.5	0.39	5	11
ME	0.10	0.2	0.01	9	13

## 5. SONUÇLAR

Jet loop membran biyoreaktör sisteminde değişen işletim parametreleri ve filtrasyona yardımcı madde kullanıldığı şartlarda oluşan çamurun filtre edilebilirliğinin membran tipi ve gözenek boyutuna göre incelendiği bu doktora tez çalışmasında elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Deneyle sonunda JLMBR sistemi için batık membran filtrasyon sisteminin uygulanabilirliği ve değişen şartlarda elde edilebilecek akı değerleri tespit edilmiştir. Sonuçlara göre JLMBR sisteminde katı-sıvı ayırımı için ilk defa kullanılmış olan batık membran sisteminin uygulanabileceği bulunmuştur. En önemli sonuçlardan birisi ortama eklenen filtrasyona yardımcı maddenin (katyonik polielektrolit) batık membran filtrasyon sistem performansını önemli derecede arttırdığıdır. Buna göre farklı işletim şartlarında işletilen ve yüksek atıksu arıtım verimlerine sahip JLMBR sisteminde, katı-sıvı ayırımı için filtrasyona yardımcı madde ile birlikte batık membran filtrasyon sistemi alternatif olarak kullanılabilir.

- I nolu deney setinde sonsuz çamur yaşı ve  $1000 \pm 128$  mg/L giriş KOİ konsantrasyonu ile 81 gün sürekli olarak işletilmiş olan reaktörde yüksek KOİ giderim verimleri ( $\%95.5 \pm 2.3$ ) elde edilmiştir. Bu çalışma döneminde MLSS konsantrasyonu ortalama  $2347 \pm 344$  mg/L değerinde olmuştur.  $SMP_p$  ortalama  $32.1 \pm 16.3$  mg/L,  $SMP_c$   $18.2 \pm 4.1$  mg/L,  $EPS_p$   $31.6 \pm 17.0$  mg protein/g MLSS ve  $EPS_c$   $46.7 \pm 13.8$  mg karbonhidrat/g MLSS olarak ölçülmüştür. Göreceli hidrofobisitesi  $\%6.8 \pm 3.6$  ve viskozitesi değerleri de  $1.8 \pm 0.3$  cP olarak ölçülmüştür. Bu çalışma döneminde partikül boyut dağılımı  $6.0-29.0$   $\mu m$  arasında dağılım göstermiş ve çamurun zeta potansiyeli de  $(-12.0)$  mV olarak ölçülmüştür. Reaktör dengeye geldikten sonra gerçekleştirilen batık membran deneylerinde en yüksek performansı gösteren membran ME  $0.22$  ( $J_d=11$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=1811$  cm<sup>3</sup>) en kötü performansı gösteren membran PES  $0.45$  ( $J_d=4$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=594$  cm<sup>3</sup>) membranlar olmuştur. En uygun membran gözenek boyutunun  $0.22$   $\mu m$  ve en iyi membran tipinde ME membran olduğu bulunmuştur. Membranların aynı çamur ortamında denenmiş olmalarına rağmen yüzeyde oluşan kek tabakasındaki analizlerden SMP ve EPS birikimlerinin membran tipine ve gözenek boyutuna göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bakteri türleri ile membran tipi arasındaki etkileşim kuvvetlerinin farklı

olması nedeniyle, membran yüzeyinde hem bakteri çeşitliliği hem de üretilen bakteriyel ürünlerin (SMP ve EPS) miktarları farklı olmuştur. Genel olarak bakıldığında, bu deney setinde ME membranların SMP'ye karşı, PC membranların da EPS'ye karşı ilgileri diğer membranlara göre daha yüksek olmuştur. Bunun iki membrandaki pürüzlülüklerinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan AFM analizlerinden PC membranların pürüzlülüğünün çok düşük olduğu buna karşın ME membranların pürüzlülüğünün çok yüksek olduğu bulunmuştur. Bunun yanında membran yüzeylerindeki gözenek dağılımlarının bütün membranlarda farklı olduğu dolayısıyla bunun da SMP ve EPS birikimlerini etkilediği düşünülmektedir. Süzüntü numunelerinde yapılan analizlerde ME membranın SMP'yi tutma kapasitesinin yüksek olduğu görülmüştür. ME membranlarda SMP tutunumu en fazla kek tabakasında olmuştur. Bu nedenle ME membranlarda gözenek kirlenmesi dirençleri düşük olmuştur. PC membranların pürüzsüz yüzeyleri nedeniyle bu membranların ilk akı değerleri yüksek olmuştur, fakat EPS'nin bu membranlarda daha fazla birikmeleri nedeniyle denge akı değerleri düşük olmuştur. Denge akı değerlerine en fazla etki eden parametreleri birlikte değerlendirmek için  $f(\alpha R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  ile  $J_d$  arasında korelasyon yapılmış ve negatif korelasyon olduğu bulunmuştur.

- I nolu deney setinde gerçekleştirilen çapraz akış filtrasyon deneylerinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.45 ve 0.22 ( $J_d=154 \text{ L/m}^2\text{sa}$  ve  $V_t$  değeri= $1800 \text{ cm}^3$ ), en kötü performansı gösteren membran ise PC 0.40 ( $J_d= 67 \text{ L/m}^2\text{sa}$  ve  $V_t= 1037 \text{ cm}^3$ ) membranlar olmuştur. Belirli zaman aralıklarında süzüntülerden numuneler alınmış ve SMP analizleri yapılmıştır. Bütün membranlarda filtrasyon ilerledikçe süzüntüye geçen SMP miktarları azalmıştır. Çapraz akış filtrasyon sisteminde yüzeye uygulanan yüksek kesme hızları küçük boyutlara sahip SMP bileşenlerinin membran yüzeyine doğru itilmesine sebep olmaktadır. Filtrasyonun başında boş olan gözeneklerden SMP süzüntüye geçebilmekte fakat filtrasyon ilerledikçe gözeneklerin tıkanmasına sebep olduğu için süzüntüye geçişi azalmaktadır. En düşük akı değerlerine sahip olan PC membranların SMP tutma yüzdelерinin yüksek olması bu teoriyi doğrulamaktadır. Aynı zamanda bu membranların gözenek dirençlerinin diğer membranlara göre daha yüksek olduğu da bulunmuştur. Bu deney setinde  $R_p$  değerleri  $R_c$  ve  $R_{cp}$  değerlerine göre daha fazla

çıkıştır. SMP bileşenlerinin özellikle düşük MLSS konsantrasyonuna sahip çamurların çapraz akış filtrasyonunda önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

- II nolu deney setinde reaktör 3 gün çamur yaşı ve  $5100 \pm 230$  mg/L giriş KOİ konsantrasyonu ile 64 gün sürekli olarak işletilmiş olan reaktörde yüksek KOİ giderim verimleri ( $\%98.9 \pm 0.2$ ) elde edilmiştir. Bu deney sisteminde MLSS konsantrasyonu ortalama  $10813 \pm 1687$  mg/L değerinde olmuştur.  $SMP_p$  ortalama  $24.9 \pm 9.0$  mg/L,  $SMP_c$  ortalama  $16.8 \pm 6.7$  mg/L,  $EPS_p$   $19.8 \pm 4.6$  mg protein/g MLSS ve  $EPS_c$   $15.7 \pm 4.3$  mg karbonhidrat/g MLSS olarak ölçülmüştür. Çamurun göreceli hidrofobisitesi  $\%50.9 \pm 3.2$  ve viskozitesi de  $4.6 \pm 1.2$  cP olarak ölçülmüştür. Bu çalışma döneminde partikül boyutu  $1.0-13.7$   $\mu m$  arasında değişirken, zeta potansiyeli ise  $(-10.2)$  mV olarak ölçülmüştür. Artan MLSS konsantrasyonu ile birlikte ilk deney setine göre EPS değerleri ve partikül boyut dağılımı azalmış, göreceli hidrofobisite ve viskozite değerleri ise artmıştır. Reaktör dengeye geldikten sonra gerçekleştirilen batık membran deneylerinde en yüksek performansı gösteren membran SA 0.22 ( $J_d=10$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=1727$  cm<sup>3</sup>) en kötü performansı gösteren membran PES 0.45 ( $J_d=3$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=328$  cm<sup>3</sup>) membranlar olmuştur. En uygun membran gözenek boyutunun  $0.22$   $\mu m$  ve en iyi membran tipinde selüloz asetat (SA) membran olduğu bulunmuştur. Akı değerleri ilk deney setine göre azalmıştır. Membran yüzeyindeki kek tabakası analizlerinden, ilk deney setine göre membran yüzeyinde SMP ve EPS birikimlerinin daha az olduğu bulunmuştur. Buna rağmen akı değerlerinin bu deney setinde düşük olması, bu deney setinde filtrasyonu etkileyen en önemli parametrenin MLSS konsantrasyonu olduğunu göstermektedir. Bunun yanında ilk deney setine göre artan göreceli hidrofobisite ve viskozite değerlerinin de membranların kirlenmesini arttırdığı düşünülmektedir. Denge akı değerleri ile  $f(\alpha R_p \times SMP_{t-kek} \times MLSS \times V_t)$  arasında yapılmış olan korelasyon sonucunda yine negative korelasyon çıkmıştır. Fakat korelasyon sabitinin düşük çıkması bu deney setinde kirlenmenin kek tabakasındaki SMP ve EPS birikimlerinden çok yüksek MLSS konsantrasyonundan kaynaklandığını göstermektedir.

- II nolu deney setinde gerçekleştirilmiş olan çapraz akış filtrasyon deneylerinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.22 ( $J_d=131$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t$  değeri= $1556$  cm<sup>3</sup>), en kötü performansı gösteren membran ise PES 0.45 ( $J_d= 67$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=$

862 cm<sup>3</sup>) membranlar olmuştur. Bu deney setinde  $R_p$  (gözenek direnci) değerleri ilk deney setine göre daha düşük olmuştur. Artan MLSS konsantrasyonu ile membran yüzeyinde oluşan ikincil membran tabakasının gözeneklerdeki tıkanmayı azalttığı görülmektedir. Bu deney setinde konsantrasyon polarizasyon dirençleri artmıştır. Bu da yine yüksek MLSS konsantrasyonunda, süspansiyondaki partiküller ile membran yüzeyinde biriken partiküllerin konsantrasyonu arasındaki farkın artmış olmasındandır.

- III-IV-V nolu deney setlerinde reaktörde çamur yaşı 3 gün olarak sabitlenmiş ve giriş KOİ konsantrasyonları sırasıyla 2055±63.6, 3100±28.3 ve 4050±99.0 mg/L olarak ayarlanmıştır. Organik yüklemenin kısa süre aralıklarıyla değiştirilmiş olmasına rağmen KOİ giderim verimleri (%98.7-98.9) yine yüksek olmuştur. Artan organik yükleme ile birlikte MLSS konsantrasyonları da artmıştır, sırasıyla MLSS konsantrasyonları 1989±62, 5977±420 ve 6967±118 olarak ölçülmüştür. SMP konsantrasyonları hem protein hem de karbonhidrat değerleri artmış, EPS değerleri en düşük organik yüklemde yüksek diğer iki yüklemde düşük çıkmıştır. Artan organik yükleme ile birlikte göreceli hidrofobisite ve viskozite değerleri de artmıştır. Göreceli hidrofobisite değerleri sırasıyla %6.4±1.6, %17.9±4.7 ve %22.1±3.2, viskozite değerleri de 1.3±0.1, 2.0±0.1 ve 2.2±0.1 cP olarak bulunmuştur. Her yüklemde reaktör dengeye geldikten sonra gerçekleştirilen batık membran deneylerinde en yüksek performansı gösteren membranlar III nolu deney setinde ME ve SA 0.45 ( $J_d=13$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=1812$  cm<sup>3</sup>) membranlar, IV nolu deney setinde ME 0.22 ( $J_d=10$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=1366$  cm<sup>3</sup>) membran ve V nolu deney setinde ME 0.45 ( $J_d=10$  L/m<sup>2</sup>sa ve  $V_t=1362$  cm<sup>3</sup>) membran olmuştur. Görüldüğü gibi III nolu deney setinin değerleri IV ve V nolu deney setlerine göre daha yüksek olmuştur. IV ve V nolu deney setinin değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Önceki batık membran filtrasyon deneylerine benzer şekilde bu deney setlerinde de en kötü performansı gösteren membranlar PES membranlar olmuştur. Membranların kek tabakasının analiz sonuçlarına bakıldığında, akı değerleri birbirlerine yakın çıkan IV ve V nolu deney setlerinin kek tabakalarındaki SMP ve EPS birikimleri farklı olmuştur. IV nolu deney setinde SMP ve EPS<sub>c</sub> birikimleri en az, EPS<sub>p</sub> birikimleri en fazla olmuştur. Kek tabakasında hidrofobik özelliğe sahip EPS<sub>p</sub>'nin fazla miktarda bulunması kek tabakasının daha az sulu olmasına sebep olmaktadır. SMP suda serbest halde bulunan



bakteriyel ürünler oldukları için bu deney setinde kek tabakasındaki SMP miktarlarının az olmasının nedeni kek tabakasındaki birikmiş olan hidrofobik özelliğe sahip  $EPS_p$ 'dir. Bu deney setinde membranların spesifik kek dirençlerinin V nolu deney setine göre yüksek çıkmasının nedeninin bu olduğu düşünülmektedir. Genel olarak bakıldığında, bu deney setlerinde de ME membranların SMP'ye karşı, PC membranların da EPS'ye karşı ilgileri diğer membranlara göre daha yüksek olmuştur. Düşük MLSS konsantrasyonlarında membranların SMP ve EPS'ye olan ilgileri spesifik olmaktadır. MLSS konsantrasyonunun düşük olduğu ilk deney setinde de aynı sonuçlar elde edilmiş fakat MLSS konsantrasyonunun arttığı II nolu deney setinde böyle bir sonuç elde edilememiştir.

- VI nolu deney setinde, reaktöre filtrasyona yardımcı kimyasal madde eklemesi yapılmış ve değişimler izlenmiştir. Bu amaçla katyonik özelliğe sahip polielektrolit ile  $FeCl_3$  kimyasalları kullanılmıştır. İlk olarak  $FeCl_3$  konsantrasyonu sabit tutularak reaktöre verilmesi gereken katyonik polielektrolit miktarı belirlenmiştir. Bu değer 20 mgpoli/gMLSS olarak bulunmuştur. Reaktöre polielektrolit ilave edildikten sonra KOİ giderim verimlerinde çok bir değişiklik olmamıştır. MLSS ve  $EPS_p$  konsantrasyonları ile göreceli hidrofobisite ve viskozite değerleri artmış, SMP ve  $EPS_c$  miktarları azalmıştır. Reaktör dengeye geldikten sonra gerçekleştirilen batık membran filtrasyon deneylerinde en iyi performansı gösteren membran ME 0.22 ( $J_d=18 L/m^2sa$  ve  $V_t$  değeri= $2166 cm^3$ ), en kötü performansı gösteren membran ise PES 0.45 ( $J_d= 3 L/m^2sa$  ve  $V_t= 450 cm^3$ ) membranlar olmuştur. Polielektrolit ilavesinden sonra membranların  $R_p$  değerleri oldukça azalmıştır. Bunun nedeni reaktörde azalan SMP konsantrasyonlarıdır. Polielektrolit ilavesinden sonra membranların  $\alpha$  değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Membran yüzeyindeki kek tabakasının porozitesi arttıkça, suyun geçirgenliği artar ve dolayısıyla  $\alpha$  değeri düşer. Polielektrolit ilavesinden önce hidrofilik çamur özellikleri nedeniyle oluşan jelimsi yapıdaki kek tabakasındaki suyun geçirgenliği düşüktür, polielektrolit ilavesinden sonra oluşan hidrofobik çamur özellikleri nedeniyle su, bakteri floklarının arasında daha kolay hareket etmekte dolayısıyla kek tabakasındaki geçirgenliği artmaktadır. Kek tabakasındaki yapılan analizlerde polielektrolit ilavesinden sonra SMP ve  $EPS_p$  birikimlerinin azaldığı görülmüştür.  $EPS_c$  değerleri arasında çok fazla bir değişiklik görülmemiştir. Sonuç olarak polielektrolit ilavesi, JLMBR sistemindeki çamurun

batık membran filtrasyon performanslarını arttırmıştır. Özellikle kek tabakasındaki birikimleri azaltması olumlu katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

Ahmed, Z., Cho, J., Lim, B. R., Song, K. G., Ahn, K. H., (2007) Effects of sludge retention time on membrane fouling and microbial community structure in a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science* 287, 211-218.

Aimar, P., Meireles, M., Bacchin, P., and Sanchez, V., Edited Crespo, J. G., and Bøddeker, K. W., (1994) *Membrane processes in separation and purification*. Kluwer Academic Publishers Group, Netherlands. pp.35-36.

Al-Halbouni, D., Traber, J., Lyko, S., Wintgens, T., Melin, T., Tacke, D., Janot, A., Dott, W., and Hollender, J., (2008) Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena. *Water Research*, 42, 1475-1488.

Angst, R., Mier, P., and Kraume, M., Edited by Bathe, K. J., (2001) *Computational fluid and solid mechanics: proceedings*. First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics. June 12-15. Vol. 2. Elsevier. Netherlands, pp.1058.

APHA, AWWA, WEF, (1995) *Standard methods for examination of water and wastewater*, 19th edition, American Public Health Association Publication, Washington, D.C.

Bae, T.H., Tak, T. M., (2005) Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor. *Journal of Membrane Science*, 264, 151–160.

Baker, R. W., Cussler, E. L., Eykamp, W., Koros, W. J., Riley, and R. L., Strathmann, H., (1991) *Membrane separation systems: recent developments and future directions*. Noyas Data Corporation, USA, pp. 19-20.

Baker, R. W., (2004) *Membrane technology and applications*. John Wiley, England, pp. 15.

Bolto, B., Gregory, J. (2007) Review: Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, 41, 2307-2324.

Caldentey, K. M. and Barz, W. H. (2005) *Plant Biotechnology and Transgenic Plants*. Taylor Francis.

Chen, V., Fane, A.G., Madaeni, S., and Wenten, I.G., (1997) Particle deposition during membrane filtration of colloids: transition between concentration polarization and cake formation. *Journal of Membrane Science*, 125, 109-122.

Comte, S., Guibaud, G., and Baudu, M., (2006) Relations between extraction protocols for activated sludge extracellular polymeric substances (EPS) and EPS complexation properties Part I. Comparison of the efficiency of eight EPS extraction methods. *Enzyme and Microbial Technology*, 38, 237-245.

Comte, S., Guibaud, G., and Baudu, M., (2006) Biosorption properties of extracellular polymeric substances (EPS) resulting from activated sludge according to their type: Soluble or bound. *Process Biochemistry*, 41, 815–823.

Dizge, N., Soydemir, G., Karagunduz, A., Keskinler B., (2011) Influence of type and pore size of membranes on cross flow microfiltration of biological suspension. *Journal of Membrane Science*, 366: 1-2, 278-285.

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., and Smith, F. (1956) Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances *Analytical Chemistry*, 28:3, 1956.

Drews, A., (2010) Review: Membrane fouling in membrane bioreactors-characterisation, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*, 363, 1–28.

Environmental protection agency (EPA), (2005) *Membrane filtration guidance manual*. Proposal Draft. Diane Publishing, USA, pp. 2-3.

Eusebio, A., Mateus, M., Baeta-Hall, L., Saagua, M.C., Tenreiro, R., Almeida-Vara, E., and Duarte, J.C., (2007) Characterization of the microbial communities in jet-loop (JACTO) reactors during aerobic olive oil wastewater treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 59, 226–233.

Fang, H. H. P., and Shi, X., (2005) Pore fouling of microfiltration membranes by activated sludge. *Journal of Membrane Science*, 264, 161-166.

Farizoglu, B., and Keskinler, B., (2006) Sludge characteristics and effect of crossflow membrane filtration on membrane fouling in a jet loop membrane bioreactor (JLMBR). *Journal of Membrane Science*, 279, 578–587.

Farizoglu, B., Keskinler, B., Yildiz, E., Nuhoglu, A., (2004) Cheese whey treatment performance of an aerobic jet loop membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, 39, 2283–2291.

Field, R., Edited by Peinenmann, K. V., and Nunes, S. P., (2010) *Membranes for water treatment Vol.4*. Wiley-VCH, Great Britain, pp.1.

Flemming, H. C., Edited by Hillis, P., (2000) *Membrane technology in water and wastewater treatment*. Royal Society of Chemistry, European Desalination Society, Great Britain, pp. 140.

Geus, J. W. and Van Dillen, A. J., Edited by Sheldon, R. A. and Bekkum, H. V., (2001) *Fine chemicals through heterogenous catalysis*. Wiley WCH, Germany .pp.50.

Greliera, P., Rosenberger, S., Tazi-Pain, A., (2006) Influence of sludge retention time on membrane bioreactor hydraulic performance. *Desalination*, 192, 10-17.

Hwang, B. K., Lee, W. N., Park, P. K., Lee, C. H., and Chang, I. S., (2007) Effect of membrane fouling reducer on cake structure and membrane permeability in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 288, 149–156.

Ince, M., Yildiz, F., Onkal-Engin, G., Engin, S.N., and Keskinler, B., (2007) Respirometric kinetic parameter calculations of a batch jet loop bioreactor treating leachate and oxygen uptake rate estimation by DTM. *Journal of Hazardous Materials*, 153:3, 991-998.

Jang, N., Ren, X., Cho, J., and Kim, I. S., (2006) Steady-state modeling of bio-fouling potentials with respect to the biological kinetics in the submerged membrane bioreactor (SMBR). *Journal of Membrane Science*, 284, 352–360.

Jang, N., Ren, X., Kim, G., Ahn, C., Cho, J., and Kim, I. S., (2007) Characteristics of soluble microbial products and extracellular polymeric substances in the membrane bioreactor for water reuse. *Desalination*, 202, 90–98.

Ji, J., Qiu, J., Wong, F., and Li, Y., (2008) Enhancement of filterability in MBR achieved by improvement of supernatant and floc characteristics via filter aids addition. *Water Research*, 42, 3611-3622.

Jin, B., Wilén, B. M., Lant, P., (2003) A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge. *Chemical Engineering Journal*, 95, 221–234.

Jin, L., Ong, S. L., and Ng, H. Y., (2010) Comparison of fouling characteristics in different pore-sized submerged ceramic membrane bioreactors. *Water Research*, 44:20, 5907-5918.

Judd, S., and Jefferson, B., (2003) *Membranes for industrial wastewater recovery and re-use*. Elsevier, England, pp. 36-37.

Kim, D. S., Kang, J. S., Lee, Y. M., (2005) The influence of membrane surface properties on fouling in a membrane bioreactor for wastewater treatment. *Separation Science and Technology*, 39:4, 833-854.

Kochkodan, V. M., Hilal, N., Goncharuk, V. V., Al-Khatib, L., and Levadna, T. I., (2006) Effect of the surface modification of polymer membranes on their microbiological fouling. *Colloid Journal*, 68:3, 267–273.

Koseoglu, H., Yigit, N.O., Iversen, V., Drews, A., Kitis, M., Lesjean, B., and Kraume, M., (2008) Effects of several different flux enhancing chemicals on filterability and fouling reduction of membrane bioreactor (MBR) mixed liquors. *Journal of Membrane Science*, 320, 57–64.

Koyuncu, I., Topacik, D., Wiesner, M.R., (2004) Factors influencing flux decline during nanofiltration of solutions containing dyes and salts. *Water Research*, 38, 432-440.

Koyuncu, I., Lüttge, A., Wiesner, M. R., (2008) Interferometric observations and kinetic modeling of the chemical cleaning of humic materials deposited on membranes. *Journal of Membrane Science*, 313, 127-134.

Lee, W.N., Chang, I. S., Hwang, B. K., Park, P. K., Lee, C.H., and Huang, X., (2007) Changes in biofilm architecture with addition of membrane fouling reducer in a membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, 42, 655–661.

Le-Clech, P., Chen, V., and Fane, T. A. G., (2006) Review: Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284, 17–53.

Li, H., Fane, A.G., Coster, H.G.L., and Vigneswaran, S., (1998) Direct observation of particle deposition on the membrane surface during crossflow microfiltration. *Journal of Membrane Science*, 149, 83-97.

Liao, B. Q., Allen, D. G., Droppo, I. G., Leppard, G. G., and Liss, S. N., (2001) Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability. *Water Research*, 35:2, 339-350.

Liu, H., Fang, H.H.P., (2002) Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges. *Journal of Biotechnology*, 95, 249-256.

Malaisamy, R., Berry, D., Holder, D., Raskin, L., Lepak, L., Jones, K. L., (2010) Development of reactive thin film polymer brush membranes to prevent biofouling, *Journal of Membrane Science*, 350:1-2, 361-370.

Masse, A., Sperandio, M., and Cabassud, C., (2006) Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time. *Water Research*, 40, 2405-2415.

Matsuura, T., (1994) *Synthetic membranes and membrane separation processes*. CRC Press, USA, pp.12.

Meng, F., Yang, F., Xiao, J., Zhang, H., and Gong, Z., (2006) A new insight into membrane fouling mechanism during membrane filtration of bulking and normal sludge suspension. *Journal of Membrane Science*, 285, 159–165.

Meng, F., and Yang, F., (2007) Fouling mechanisms of deflocculated sludge, normal sludge, and bulking sludge in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 305, 48–56.

Mulder, M. H. V., Edited by Noble, R. D. and Stern S. A., (1995) *Membrane separations technology: principles and applications*. Elsevier, Netherlands, pp. 74.

Mulder, M., (1996) *Basic principles of membrane technology*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 13-17, pp. 231.

Musale, D. A. and Kulkarni, S. S., (1998) Effect of membrane-solute interactions on ultrafiltration performance. *Polymer Reviews*, 38:4, 615-636.

Nataraj, S., Schomacker, R., Kraume, M., Mishra, I. M., and Drews, A., (2008) Analyses of polysaccharide fouling mechanisms during crossflow membrane filtration, *Journal of Membrane Science*, 308, 152–161.



Nath K., (2008) Membrane Separation Processes. Prentice-Hall, India. pp.30-33 and 43-44.

Park, J. S., and Lee, C. H, (2005) Removal of soluble COD by a biofilm formed on a membrane in a jet loop type membrane bioreactor. *Water Research*, 39, 4609-4622.

Petruccioli, M., Duarte, J. C., Eusebio, A., and Federici, F., (2002) Aerobic treatment of winery wastewater using a jet-loop activated sludge reactor. *Process Biochemistry*, 37, 821–829.

Prasad, K., (2010) Downstream Process Technology: a new horizon in biotechnology, PHI Learning Pvt. Ltd., Delhi, pp.289.

Ramesh, A., Lee, D. J., Wang, M. L., Hsu, J. P., Juang, R. S., Hwang, K. J., Liu, J. C., and Tseng, S.J., (2006) Biofouling in membrane bioreactor. *Separation Science and Technology*, 41:7, 1345-1370.

Ramesh, R. B., Edited by Vogel, H. C., and Todaro, C. L., (1997) Fermentation and biochemical engineering handbook: principles, process design, and equipment. Noyes Publications, USA, pp. 271-279.

Ridgway, H. F., and Flemming, H. C., (1996) Water treatment membrane processes. McGraw-Hill, AWWA Research Foundation, South Africa. pp.6.5.

Sanin, S. L., Sanin, F. D., Bryers, J. D. (2003) Effect of starvation on the adhesive properties of xenobiotic degrading bacteria. *Process Biochemistry*, 38, 909-914.

Scott, K., (2006) Handbook of Industrial Membranes. Elsevier Advanced Technology, England, pp. 374.

Sombatsompop, K., Visvanathan, C., and Aim, B. R., (2006) Evaluation of biofouling phenomenon in suspended and attached growth membrane bioreactor systems. *Desalination*, 201, 138–149.

Song, L., (1998) Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modeling of membrane fouling. *Journal of Membrane Science*, 139, 183-200.

Tansel, B., Sager, J., Garland, J., Xu, S. Levine, L., and Bisbee, P., (2006) Deposition of extracellular polymeric substances (EPS) and microtopographical changes on membrane surfaces during intermittent filtration conditions. *Journal of Membrane Science*, 285, 225-231.

Tinggang L., Renbi B., Junxin L., (2008) Distribution and composition of extracellular polymeric substances in membrane-aerated biofilm *Journal of Biotechnology*, 135, 52–57.

Todaro, C. L., Edited by Vogel H. C., and Todaro, C. L., (1997) *Fermentation and biochemical engineering handbook: principles, process design, and equipment*. Noyes Publications, USA, pp. 243-244.

Wang, Z., Wu, Z., Yu, G., Liu, J., and Zhou, Z., (2006) Relationship between sludge characteristics and membrane flux determination in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 284, 87–94.

Wang, Z., Wu, Z., Yin, X., Tian, L., (2008) Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: membrane foulant and gel layer characterization. *Journal of Membrane Science*, 325, 238–244.

Wang, Z., and Wu, Z., (2009) A review of membrane fouling in MBRs: characteristics and role of sludge cake formed on membrane surfaces. *Separation Science and Technology*, 44:15, 3571-3596.

Wiesmann, U., Choi, I. S., and Dombrowski, E. M., (2007) *Fundamentals of biological wastewater treatment*, Wiley-VCH, Germany, pp. 313-315.

Windenger, J., Neu, T. R., Flemming, H. C., (1999) *Microbial extracellular polymeric substances*. Springer, Germany, pp. 11.

Wu, Z., Wang, Z., Zhou, Z., Yu, G., and Gu, G., (2007) Sludge rheological and physiological characteristics in a pilot-scale submerged membrane bioreactor. *Desalination*, 212, 152–164.

Yamato, N., Kimura, K., Miyoshi, T., and Watanabe, Y., (2006) Difference in membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) caused by membrane polymer materials. *Journal of Membrane Science*, 280, 911-919.

Yıldız, E., (1999) Çapraz akış mikrofiltrasyon sistemli püskürtme çevrimli (Jetloop) reaktörlerde biyolojik arıtım. Atatürk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Erzurum.

Zhang, J., Chua, H.C., Zhou, J., and Fane, A.G., (2006) Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 284, 54–66.

Zhang, G., Ji, S., Gao, X., and Liu, Z., (2008) Adsorptive fouling of extracellular polymeric substances with polymeric ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 309, 28–35.

Zhang, W., Chen, G., Sun, W., and Li, J., (2010) Effect of membrane structural characteristics on mass transfer in a membrane absorption process. *Separation Science and Technology*, 45:9, 1216-1227.

## ÖZGEÇMİŞ

01.03.1980 tarihinde Osmaniye/Bahçe doğan Derya Yüksel İMER 2001 yılında İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans programına başlamıştır. Bunu takiben 2004 yılında yüksek lisansını tamamlayıp doktora eğitimine başlamıştır. Doktora süresince 6 ay süre ile YÖK Doktora Araştırma Bursu ile ABD’de ziyaretçi araştırmacı olarak membran konusunda çalışmalar yapmıştır.