T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE VENTURİ ENJEKTÖRÜ KULLANILARAK İŞLETME ŞARTLARININ İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Gökmen ÖZTÜRKMEN

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Haziran-2018

T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Gökmen ÖZTÜRKMEN tarafından yapılan "Membran Biyoreaktörlerde Venturi Enjektörü Kullanılarak İşletme Şartlarının İyileştirilmesinin Araştırılması" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyesinin

	Ünvanı Adı Soyadı	
Başkan	: Prof. Dr. Mustafa GÜNAL	
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Necati KAYAALP	
Üye	: Doç. Dr. Ergin TAŞKAN	
Üye	: Doç. Dr. Veysel TOLAN	
Üye	: Doç. Dr. Fevzi ÖNEN	

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 29/06/2018

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../201..

Doç. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜRÜ V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tasarlanıp hazırlanması boyunca bilgi ve birikimlerini içtenlikle paylaşan, her daim yardımlarını ve anlayışını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Necati KAYAALP'e,

Doktora eğitimim süresince hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa GÜNAL ve Doç. Dr. Veysel TOLAN'a,

Tez çalışmam süresince kıymetli desteklerini gördüğüm Öğr. Gör. Etuğrul GÜL'e, Arş. Gör. Cem HAYDAROĞLU'na, Arş. Gör. Dr. Hüseyin ERDOĞAN'a, Arş. Gör. Dr. Felat DURSUN'a,

Ayrıca başta Doç. Dr. Halil GÖRGÜN ve Öğr. Gör. Dr. Ali EM olmak üzere manevi desteklerini gördüğüm ve burada adlarını sıralayamadığım Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşat Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına,

Doktora çalışmamın yürütülmesi için maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne,

Yaşamım ve eğitimim boyunca yanımda olan başta Prof. Dr. Nermin BİRİCİK ve Doç. Dr. Hatice ÖZTÜRKMEN AKAY olmak üzere sevgili aileme ve eşim Dr. Nesrin GÜMÜŞ ÖZTÜRKMEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Gökmen ÖZTÜRKMEN

Haziran, 2018

Babam Hasan ÖZTÜRKMEN'in anısına…

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR I

İÇİNDEKİLER III

ÖZET..... VI

ABSTRACT VII

ÇİZELGE LİSTESİ VIII

ŞEKİL LİSTESİ IX

KISALTMA VE SİMGELER XIV

1. GİRİŞ..... 1

1.1. Çalışmanın Önemi 1

1.2. Problem Tanımı 3

1.2. Amaç ve Kapsam 6

2. KAYNAK ÖZETLERİ 9

2.1. Membran ve Membran Prosesler 9

2.1.1. Tarihçe 9

2.1.2. Tanım ve Yapısal Özellikler 11

2.1.3. Membran ve Membarn Proseslerin Sınıflandırılması 13

2.2. Membran Biyoreaktörler 17

2.2.1. Atıksu Arıtımı ve Aktif Çamur Prosesi 17

2.2.2. Atıksu Arıtımı ve Membran Biyoreaktörler 18

2.2.3. Membran Biyoreaktör Konfigürasyonları 21

2.2.4. Membran Biyoreaktörlerin Avantaj ve Dezavantajları 23

2.2.5. Membran Biyoreaktörlerde Temel İşletme ve Tasarım Parametreleri 25

2.2.6. Membran Kirlenmesi ve Etkileyen Faktörler 28

2.2.7. Membran Biyoreaktörlerin Membran Kirlenmesine Karşı Havalandırılması 30

2.3. Venturi Enjektörü 32

2.3.1. Venturi Borusu (Tüpü) 32

2.3.2. Venturi Enjektörünün Kullanım Alanları ……. 36

3. MATERYAL VE METOD..…….. 45

3.1. Deney Düzeneği …….. 45

3.1.1. Difüzör Tasarımı ……. 47

3.1.2. Venturi Enjektörü Konfigürasyonları……... 51

3.1.3. Reaktör Tankı …… 54

3.1.4. Membran Elemanı ……..…….. 55

3.2. Blower ve Venturi Havalandırma Sistemlerinde Oksijen Transfer Katsayıları 56

3.3. Sentetik Atıksu İle Yapılan Çalışmalar …..……. 56

3.3.1. Aşı Çamuru ve Aktif Çamur Aklimasyonu …….. 56

3.3.2. Sentetik Atıksu ile Membran Biyoreaktör İşletimi ……...…….. 58

3.3.3 Sentetik Atıksu Membran Kirlenmesi Çalışmaları……... 59

3.4. Gerçek Atıksu İle Yapılan Çalışmalar……..... 60

3.4.1. Aşı Çamuru ve Atıksu …….. 60

3.4.2. Gerçek Atıksu Çalışmalarında Membran Biyoreaktör İşletimi …… 61

3.4.3. Gerçek Atıksu Çalışmalarında Membran Kirlenmesi Çalışmaları…… 62

3.5. Çalışmada Kullanılan Analiz ve Ölçüm Yöntemleri……..... 64

3.5.1. Konvansiyonel Parametreler…… 64

3.5.2. Protein Ölçüm Yöntemi…… 64

3.5.3. Karbonhidrat Ölçüm Yöntemi…….. 64

3.5.4. Hücre Dışı Polimerik Madde Ekstraksiyonu…… 65

4. BULGULAR VE TARTIŞMA …… 67

4.1. Blower ve Venturi Sistemlerinde Oksijen Transfer Katsayıları …….. 67

4.2. Sentetik Atıksu Çalışmalarında Elde Edilen Bulgular…….. 69

4.2.1. Memran Biyoreaktörün İşletilmesi Sürecinde Elde Edilen Bulgular…… 69

4.2.2. Sentetik Atıksu Deneylerinden Elde Edilen Bulgular……... 72

4.2.2.1. 3L/dk. Havalandırma Debisi ve 18 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Bulgular…… 72

4.2.2.2. 3L/dk. Havalandırma Debisi ve 32 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Bulgular…… 77

4.2.2.3. 3L/dk. Havalandırma Debisi ve 50 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Bulgular…… 81

4.2.2.4. Venturi Havalandırma Sisteminin Arıtma Performansına Etkisi……..... 84

4.2.3. 6 L/dk. Havalandırma Yoğunluğunda Yapılan Çalışmalar ……..... 85

4.2.3.1. 18 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Veriler ……... 85

4.2.3.2. 32 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Veriler …… 89

4.2.3.3. 50 L/$m^{2\cdot}$st Akıda Elde Edilen Veriler ….……..... 93

4.3. Gerçek Atıksu Çalışmalarından Elde Edilen Veriler ……. 95

4.3.1. Memran Biyoreaktörün İşletilmesi Sürecinde Elde Edilen Bulgular…… 95

4.3.2. Gerçek Atıksu Atıksu Deneylerinden Elde Edilen Bulgular……. 97

4.3.2.1. 18 L/m^2.st Akı da ve 3L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular 97

4.3.2.2. 18 L/m^2.st Akı da ve 1.5 ve 6 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular…… 98

4.3.2.3. 32 L/m^2.st Akıda 3 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular ……. 100

4.3.2.4. 32 L/m^2.st Akıda 1.5 ve 6 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular.. 101

4.3.2.5. 50 L/m^2.st Akıda 3 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular …..... 103

4.3.2.6. 50 L/m^2.st Akıda 1.5 ve 6 L/dak Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular. 104

4.4. Gerçek Atıksu için Venturi ve Blower Sistemlerinin Arıtma Performansı ……... 105

4.4.1. Biyokütle ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı …….. 105

4.4.2. Azot ve Fosfor Giderimi……...…..……..... 106

4.4.3. Hücre dışı Polimerik Madde ve Çözümü Mikrobiyal Ürün Analizi ….…… 107

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER…… 109

5.1. Sentetik Atıksu Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar …...…… 109

5.2. Gerçek Atıksu Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar …… 110

5.3. Venturi Enjektörü Entegre Edilmiş Batık MBR'nin Klasik Bir Batık MBR'e Kıyasla Elde Edilen Genel Sonuçlar……. 111

5.4. Öneriler …… 112

6. KAYNAKLAR…… 113

ÖZGEÇMİŞ…… 122

ÖZET

MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE VENTURİ ENJEKTÖRÜ KULLANILARAK İŞLETME ŞARTLARININ İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Gökmen ÖZTÜRKMEN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2018

Atıksu arıtımında membran biyoreaktörlerin (MBR) kullanılmasının pek çok avantajı bulunmaktadır. Bunlar kısaca, daha kaliteli çıkış akımının sağlanması, daha az yer gerektirmesi, modüler olması ve daha az atık çamuru üretmesi olarak sıralanabilir. Bu avantajlarından dolayı MBR teknolojisinin uygulama alanları artmakta, kurulan tesislerin kapasitesi sürekli olarak gelişmekte ve bunların geliştirilmesine yönelik pek çok araştırma yapılmaktadır.

Buna karşın MBR teknolojisinin çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Atıksu arıtımında kullanılan membranların yüzey ve gözeneklerinin zamanla tıkanması, diğer bir deyişle membran kirlenmesi, MBR'lerin önemli dezavantajlarından biridir. Membranlar kirlendikçe sistemin enerji kullanım verimi düşmekte, dolayısıyla sistemin arıtma maliyetleri artmaktadır. Bu durum MBR'lerin işletme maliyetini önemli oranda arttırmaktadır. MBR'lerin en önemli dezavantajı olan membran kirlenmesini azaltmak için, daha az kirlenen membranların üretilmesi, yeni membran modüllerinin geliştirilmesi ve işletme şartlarının optimize edilmesi konusunda pek çok araştırma yapılmaktadır.

Bu çalışmada laboratuvar ölçekli batık bir MBR'de yeni bir havalandırma şeklinin membran kirliliğini azaltma ve oksijen transfer verimini arttırmadaki etkinliği araştırılmıştır. Bu kapsamda batık bir MBR'ye bir venturi enjektörü entegre edilerek, gerekli havanın sisteme kendiliğinden girmesi sağlanmıştır. Venturi enjektörü sayesinde elde edilen jet akımı, membran yüzeyine yöneltilerek membran yüzeyinin daha etkili bir şekilde temizlenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan sentetik ve gerçek atıksu çalışmalarında, aynı hava miktarı venturi enjektörü ile sağlandığında MBR'deki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun blower ile sağlanandan çok daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Membran kirliliği çalışmalarından, aynı akı ve havalandırma hızında venturi enjektörü kullanılan sistemde transmembran basıncı (TMP) gelişim hızının çok daha düşük olduğu, sistem akısı arttıkça blower ve venturi havalandırma sistemleri arasındaki farkın daha çok arttığı gözlenmiştir. Buna paralel olarak, eşit şartlar altında venturi sisteminin çalışmada belirlenen maksimum çalışma TMP değerine blower sisteminden çok daha geç ulaştığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Venturi, membran biyoreaktör, kirlenme, havalandırma

ABSTRACT

INVESTIGATION ON THE IMPROVEMENT OF OPERATING CONDITIONS BY USING THE VENTURI INJECTOR IN MEMBRANE BIOREACTORS

Ph.D. THESIS

Gökmen ÖZTÜRKMEN

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2018

There are many advantages of using a membrane bioreactor (MBR) in wastewater treatment. These advantages can be summarized as better effluent quality, less footprint, being modular and less waste sludge production. Due to these advantages, application fields and the installation capacity of MBR technology have been constantly increasing and numerous studies have been done to improve this technology.

However, in addition to its advantages, MBR technology has important disadvantages. One of the most important disadvantages is the blocking of membrane pores and surface as it is being used, in other words, membrane fouling. As membranes become fouled, the energy utilization efficiency of the system drops; therefore, treatment cost of the system increases. When a specific fouling point is reached, the system should be shut down and the membranes are subjected to an intensive cleaning process. This case increases the operation cost of MBRs substantially. To mitigate the most important disadvantage of the MBRs, which is membrane fouling, a lot of research has been done in terms of production of less fouling membranes, development of new membrane modules and optimization of operating conditions.

In this study, the effectiveness of a novel aeration method on membrane fouling reduction and on the improvement of oxygen transfer efficiency was investigated. In this scope, the required air was ensured to enter the system spontaneously by integrating a venturi injector to a submerged MBR. It is aimed to clean the membrane surface more efficiently by directing the jet flow through the venturi injector to the membrane surface.

In studies performed with the synthetic and real wastewater, by supplying the same amount of air, it is observed that the oxygen concentration in MBR was very high compared to that supplied by the blower. Membrane fouling studies indicate that the with the same flux and aeration rate, transmembrane pressure (TMP) development is much lower in the venturi injector system at the same flow and aeration rate, and the difference between the blower and venturi aeration systems is observed to increase more as the system flow increases. In parallel to that under the same conditions, it was observed that the venturi system reached to the maximum TMP value later than the blower system. In parallel, comparing to the blower system, the venturi system, set under the same conditions, reached much later to the TMP value determined within the scope of this study.

Keywords: Venturi, membrane bioreactor, fouling, aeration

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 1.1.	Su sınıflandırılması ve su geri kazanımı ihtiyacı	1
Çizelge 2.1.	Membranların gözenek çaplarına göre sınıflandırılması	14
Çizelge 2.2.	Membran ayırma proseslerinin sürücü kuvvete göre sınıflaması	16
Çizelge 2.3.	Dahili ve harici MBR'lerin kıyaslanması	23
Çizelge 2.4.	MBR tasarım ve işletmesindeki temel parametreler	27
Çizelge 2.5.	Venturi enjektörünün belli başlı kullanım alanları ve sağladığı avantajlar	36
Çizelge 3.1.	Çalışmada kullanılan venturi enjektörünün özellikleri	51
Çizelge 3.2.	Çalışmada kulanılan membran elemanın özellikleri	55
Çizelge 3.3.	Sentetik atıksu bileşenleri	57
Çizelge 3.4.	Sentetik atıksu ile membran kirlenmesini gözlemlemek amacıyla yapılan deneyler	59
Çizelge 3.5.	Çalışmada kullanılan gerçek atıksuya dair bazı karakteristikler	61
Çizelge 3.6.	Gerçek atıksu ile membran kirlenmesini gözlemlemek amacıyla yapılan deneyler	63
Çizelge 4.1.	3 L/dk. hava debisinde blower ve venturi sistemlerinin oksijen transfer parametreleri	75
Çizelge 4.2.	3 L/dk. Hava debisinde venturi sistemi sonrasında ölçülen bazı parametreler	84
Çizelge 4.3.	3 L/dak havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'da ölçülen biyokütle ve KOİ konsantrasyonları	105
Çizelge 4.4.	6 L/dak (blower) ve 1.5 L/dak (venturi) havalandırma hızları ve değişik akılarda MBR'da biyokütle ve KOİ konsantrasyonları	106
Çizelge 4.5.	Membran kirlenmesi çalışmalarında değişik akı ve havalandırma hızlarında MBR'da ölçülen Azot ve Fosfor Parametreleri	106
Çizelge 4.6.	3 L/dak havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'da ölçülen SMP konsantrasyonları Havalandırma sistemi	107
Çizelge 4.7.	6 L/dak (blower) ve 1.5 L/dak (venturi) havalandırma hızları ve değişik akılarda MBR'da ölçülen SMP konsantrasyonları	107
Çizelge 4.8.	6 L/dak (blower) ve 1.5 L/dak (venturi) havalandırma debileri ve değişik akılarda MBR'de ölçülen EPS konsantrasyonları	108
Çizelge 4.9.	6 L/dak (blower) ve 1.5 L/dak (venturi) havalandıma hızları ve değişik akılarda MBR'de ölçülen EPS konsantrasyonları	108

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 1.1.	Yıllara göre membran biyoreaktör kelimelerini içeren yayın sayısındaki değişim	3
Şekil 1.2.	Bir MBR'nin enerji ihtiyacı	6
Şekil 2.1.	Bir membran tarafından ayrılmış iki fazlı bir sistemin gösterimi	12
Şekil 2.2.	Geometrik şekillerine göre membranlar	14
Şekil 2.3.	Yapı ve morfolojilerine göre membranlar	15
Şekil 2.4.	Morfolojisine göre bazı membran türlerinin SEM ile çekilmiş görüntüleri	15
Şekil 2.5.	Aktif çamur prosesinde organik madde stabilizasyonu	18
Şekil 2.6.	Membran biyoreaktör prosesi	19
Şekil 2.7.	Membran proseslerin ayırma kapasiteleri	22
Şekil 2.8.	MBR konfigürasyonları	22
Şekil 2.9.	Batık MBR konfigürasyonları	23
Şekil 2.10.	Tipik bir batık MBR akış şeması	24
Şekil 2.11.	MBR'lerde işletme tasarım parametrelerinin ilişkisi	26
Şekil 2.12.	MBR'lerde membran kirlenmesinin mekanizması	28
Şekil 2.13.	MBR'lerde tıkanmayı etkileyen faktörler	29
Şekil 2.14.	Bir venturi borusunun görünümü	33
Şekil 2.15.	Bir venturi borusunda akım alanı	33
Şekil 2.16.	Bir venturi borusunun teorik değişkenleri	33
Şekil 2.17.	Bir venturi enjektörü vasıtasıyla hava enjeksiyonu	35
Şekil 2.18.	Venturi tüpü ve venturi ile hava ve sıvı enjeksiyonu	35
Şekil 2.19.	Venturi enjektörü ile ozon enjeksiyonu	38
Şekil 2.20.	Venturi enjektörünün tübüler elektrokimyasal reaktöre adapte edilmesi	38
Şekil 2.21.	Venturi enjektörünün membran modülüne adapte edilmesi	39
Şekil 2.22.	Venturi ile karbondioksit enjeksiyonu.	41
Şekil 2.23.	Tsai ve ark. (2013) kullandıkları elektroliz hücre sistemi	41

Şekil 2.24.	Gerçek ölçekli venturi enjektörlü atıksu havalandırma sistemleri	42
Şekil 2.25.	Vitox jet havalandırma sistemi	43
Şekil 3.1.	Deney düzeneğinin genel görünümü	46
Şekil 3.2.	Deney sisteminin şematik görünümü	46
Şekil 3.3.	Yüksek hızlarda manifold üzerindeki kanal çiftlerindeki gaz ve sıvı debileri	48
Şekil 3.4.	Kullanılan difüzörler	49
Şekil 3.5.	Akım yönünde artan orifis çaplarının kullanıldığı difüzör	49
Şekil 3.6.	Akım yönünde artan orifis çaplarının kullanıldığı difüzör boyunca hava debisinin dağılımı	50
Şekil 3.7.	Dörtlü nozzle şeklinde difüzör tasarımı	50
Şekil 3.8.	Dörtlü nozzle difüzör sisteminde membran yüzeyinde kirlenme.	51
Şekil 3.9.	Deney düzeneğinde kullanılan venturi enjektörü	52
Şekil 3.10.	Tekli ve Paralel bağlı ventrurilerin kullanıumı	52
Şekil 3.11.	Paralel bağlı venturi ile süzüntü pompasına ihtiyaç duyulmadan membran filtrasyonu	53
Şekil 3.12.	Paralel bağlı venturilerin MBR'de kullanımı	53
Şekil 3.13.	Pleksiglasdan imal edilmmiş olan MBR tankı	54
Şekil 3.14.	MBR tankının şematik kesiti	55
Şekil 3.15.	GASKİ Merkez Atıksu Arıtma Tesisi çamur devir-daim pompa istasyonu ve aşı çamurunun alındığı hat.	56
Şekil 3.16.	Biyokütle aklimasyonu	57
Şekil 3.17.	Sentetik atıksu çalışmalarında membran kirlenmesinin çalışıldığı deney düzeneği	59
Şekil 3.18.	DİSKİ İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi ön çökeltim havuzu	61
Şekil 3.19.	DİSKİ İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi ön çökeltim havuzundan gerçek atıksu alımı	61
Şekil 3.20.	Gerçek atıksu çalışmalarında kullanılan deney düzeneği	62
Şekil 4.1.	3 L/min hava debisinde venturi ve blower sistemleri için çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi	67
Şekil 4.2.	Doygunluk fark konsantrasyonu (Cs-C) değişimi (Blower)	68
Şekil 4.3.	Doygunluk fark konsantrasyonu (Cs-C) değişimi (Blower)	68
Şekil 4.4.	Sentetik atıksu ile MBR işletiminde AKM konsantrasyonu değişimi	69

Şekil 4.5. Sentetik atıksu ile MBR işletiminde pH değişimi 70

Şekil 4.6. Sentetik atıksu ile MBR işletiminde çözünmüş oksijen kosantrasyonu değişimi 70

Şekil 4.7. Sentetik atıksu ile MBR işletiminde sıcaklık değişimi 71

Şekil 4.8. Sentetik atıksu bileşenlerinin hava ile türbülans durumunda köpürmesi 72

Şekil 4.9. Venturi sisteminde MBR'de köpürmeni başlaması, azalması ve tamamen yok olması 72

Şekil 4.10. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi 73

Şekil 4.11. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 73

Şekil 4.12. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR'deki pH değişimi 74

Şekil 4.13. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR'de sıcaklık değişimi 74

Şekil 4.14. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR'deki çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi 75

Şekil 4.15. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (ön yüzeyler) 76

Şekil 4.16. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (arka yüzeyler) 77

Şekil 4.17. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi 77

Şekil 4.18. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 78

Şekil 4.19. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR'deki pH değişimi. 79

Şekil 4.20. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklığının zamanla değişimi. 79

Şekil 4.21. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR'deki çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi. 80

Şekil 4.22. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Ön yüzeyler) 80

Şekil 4.23. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Arka yüzeyler) 81

Şekil 4.24. Tüm deneyler bitirildikten sonra MBR'de kullanılan difüzörün durumu 81

Şekil 4.25. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi 82

Şekil 4.26. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 82

Şekil 4.27. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR'deki pH değişimi 83

Şekil 4.28. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi 83

Şekil 4.29. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR'deki çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi 83

Şekil 4.30. Blower ve venturi sistemlerinde deney sonrasında santrifüj edilen aktif çamur 85

Şekil 4.31. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi 86

Şekil 4.32. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 86

Şekil 4.33. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi 87

Şekil 4.34. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi 87

Şekil 4.35. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi 87

Şekil 4.36. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Ön yüzeyler) 88

Şekil 4.37. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Arka yüzeyler) 88

Şekil 4.38. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi 89

Şekil 4.39. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 90

Şekil 4.40. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Ön yüzeyler) 90

Şekil 4.41. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Arka yüzeyler) 91

Şekil 4.42. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi 92

Şekil 4.43. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi 92

Şekil 4.44. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi 92

Şekil 4.45. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi 93

Şekil 4.46. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 93

Şekil 4.47. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi 94

Şekil 4.48. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi 94

Şekil 4.49. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi 94

Şekil 4.50. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde AKM ve UAKM konsantrasyonu değişimi 95

Şekil 4.51. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde pH değişimi 95

Şekil 4.52. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde çözünmüş oksijen kosantrasyonu değişimi 96

Şekil 4.53. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde çözünmüş oksijen kosantrasyonu değişimi 96

Şekil 4.54. 18 L/m^2.st akı ve 3 L/dak havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi 97

Şekil 4.55. 18 L/m^2.st akı ve 3 L/dak havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 98

Şekil 4.56. 18 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dak (Venturi) ve 6 L/dak (Blower) havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi 99

Şekil 4.57. 18 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dak (Venturi) ve 6 L/dak (Blower) havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 99

Şekil 4.58. 32 L/m^2.st akı ve 3 L/dak havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi 100

Şekil 4.59. 32 L/m^2.st akı ve 3 L/dak havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 101

Şekil 4.60. 32 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dak (Venturi) ve 6 L/dak (Blower) havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi 102

Şekil 4.61. 32 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dak (Venturi) ve 6 L/dak (Blower) havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 102

Şekil 4.62. 50 L/m^2.st akı ve 3 L/dak havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi 103

Şekil 4.63. 50 L/m^2.st akı ve 3 L/dak havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 103

Şekil 4.64. 50 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dak (Venturi) ve 6 L/dak (Blower) havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi 104

Şekil 4.65. 50 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dak (Venturi) ve 6 L/dak (Blower) havalandırma debinda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi 104

KISALTMA VE SİMGELER

a	: Ayırma faktörü
AAT	: Atıksu Arıtma Tesisi
AÇ	: Aktif Çamur
AKM	: Askıda katı madde
A_m	: Membran alanı
AnMBRs	: Anaerobik membran biyoreaktör
ASP	: Aktif Çamur Prosesi
BAF	: Biyolojik Havalandırmalı Filtre
CA	: Selüloz Asetat
Cl^-	: Klor
ClO_2	: Klordioksit
ÇO	: Çözünmüş Oksijen
CO_2	: Karbon dioksit
CT	: Çoklu Delikli
DAF	: Çözünmüş hava flatasyonu
DBR	: Döner Biyolojik Reaktörler
DİSKİ	: Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi
DSİ	: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
ED	: Elektrodiyaliz
EPS	: Hücre dışı polimerik maddeler
FC	: Katlanmış Kartuş Filtre
FS	: Düz plaka/Levha
ɣ	: Suyun birim hacim ağırlığı
H_2	: Hidrojen
HF	: Hollow Fiber
HRT	: Hidrolik Bekleme Süresi
iMBR	: Batık membran
J_b	: Geri Yıkama Akısı (LMH)
J_{net}	: Net akı

KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı

L : Litre

mbar : Milibar

MBBR : Hareketli Yataklı Biyofilm Reaktörler

MBR : Membran Biyoreaktör

MEM-TEK : Ulusal Membran Teknolojileri Araştırma Merkezi

MF : Mikrofiltrasyon

MLSS : Karışık Sıvı Süspanse Katı Madde

MLVSS : Karışık Sıvıdaki Uçucu Katı Madde Muhtevası

MT : Tübüler Membran

Na^+ : Sodyum

NaCl : Sodyum klorür

NaOCl : Sodyum hipoklorit

NaOH : Sodyum hidroksit

NF : Nanofiltrasyon

NH_3 : Amonyak

NH_3-N : Amonyak Azotu

NH_4Cl : Amonyum Klorür

NO_2 : Nitrit

NO_3 : Nitrat

O_3 : Ozon

OTE : Rölatif Oksijen Transfer Verimi

P : Fosfor

P_1 : 1 no'lu kesitteki basınç

P_2 : 2 no'lu kesitteki basınç

PE : Polietilen

PE : Polietilen

PES : Polietil sülfon

PES : Polietilsülfon

PP : Polipropilen

PP : Polipropilen

PVDF : Polifinilidendiflorid

PVDF :Polivinilidin diflorür

Q_f : Besleme akımı

Q_p : Süzüntü akımı

Q_p : Süzüntü Debisi

R : Reddetme faktörü

RO : Ters Osmoz

SBR : Seri Bağlı Kesikli Reaktörler

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SMP : Çözünmüş mikrobiyal ürünler

SORT : Oksijen transfer hızı

SRT : Çamur Alıkonma Süresi / Yaşı

SW : Spiral Sarmal

t_c : Kimyasal Temizleme Aralığı

TF : Damlatmalı Filtre

TMP : Transmembran Basıncı

t_p : Fiziksel Temizleme (geri yıkama) Aralığı

TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu

UAKM : Uçucu askıda katımadde

UF : Ultrafiltrasyon

ΔC : Konsantrasyon farkı

ΔE : Elektriksel Potansiyel farkı

ΔP : Basınç farkı

ΔT : Sıcaklık farkı

μm : Mikrometre

τ_p : Fiziksel Temizleme (geri yıkama) Süresi

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Önemi

Hızlı nüfus artışı, artan sanayileşme, artan kuraklık ve aşırı tüketim ile birlikte temiz su kaynakları dünya genelinde azalmaktadır. İstenilen kalitede temiz su kaynaklarına ulaşmak çözümü her geçen gün teknik ve ekonomik açıdan zorlaşan bir problem haline gelmektedir. Artan talebe karşılık temiz su kaynaklarını yenileyip artırmanın teknik ve ekonomik açıdan sınırlayıcılığı, yakın gelecekte temiz su kaynaklarının ihtiyacı karşılayamama ihtimali gibi nedenler su geri kazanımı gerekliliğini ve/veya zorunluluğunu doğru su politikaları ve yönetiminde dünya genelinde artan bir kabul görmesini sağlamıştır. Jiménez ve Asano'ya (2008) göre su yeterliliği ve su geri kazanımı ihtiyacı noktasında genel olarak kişi başına kullanılabilir yıllık su miktarı 1000-2000 m^3 olan ülkeler su stresi altında sayılmaktadır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1. 1. Su sınıflandırması ve su geri kazanımı ihtiyacı (Jiménez ve Asano 2008, Jiménez Cisneros 2014)

Sınıflandırma	**Sınır değer (m^3/kişi yıl)**	**Su geri kazanımı**
Su stresi olasılığı	< 1700	Önerilmekte
Su kıtlığı	< 1000	Gerekli
Minimum yaşam sınırı	< 100	Kesinlikle uygulanmalı ve daha başka alternatif su kaynakları bulunmalı

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) verilerine göre Türkiye'nin ekonomik olarak kullanılabilir su miktarı, kişi başına yıllık 1519 m^3 civarındadır. Bu sınıflandırmaya göre Türkiye su kıtlığı çekmeyen ancak su stresi olasılığı bulunan ve su geri kazanımı önerilen bir konumdadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2030 yılı için Türkiye nüfusunu 100 milyon civarında öngörmekte ve DSİ 2018'de 2030 yılı için kişi başına düşen kullanılabilir su miktarının 1120 m^3/yıl civarında olacağını tahmin etmektedir (DSİ 2018). Bu öngörüler ışığında Türkiye yakın tarihte su kıtlığı çeken ve su geri kazanımı gerekli hatta zorunlu bir konumda bulunacaktır.

Diğer yandan, insanoğlunun günlük yaşamsal ve endüstriyel faaliyetleri sonucunda üretilen, en geniş anlamda kullanım sonucu özelliği değişmiş sular olarak tanımlanan, çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan karbon, azot, fosfor, ağır metaller, bakteriler, virüsler gibi organik, inorganik ve biyolojik bileşenleri içeren atıksuların nüfus artışı ve teknolojik gelişmelere paralel olarak deşarj miktarları ve

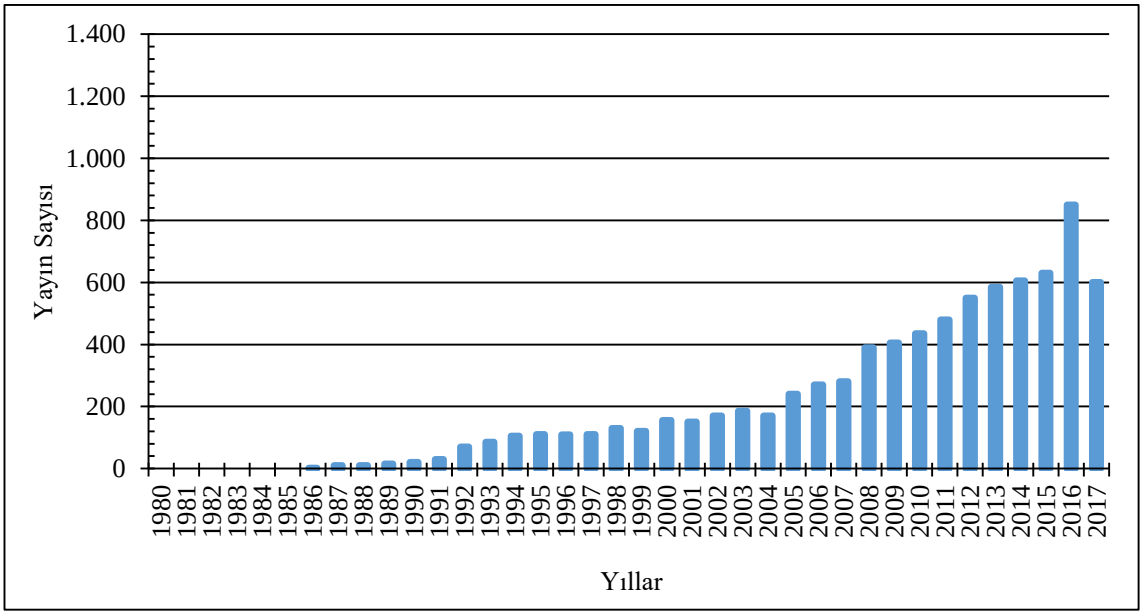
içerdikleri kirletici madde miktarları da günden güne artmaktadır. Uygun arıtma süreçlerine tabi tutulmadan alıcı ortamlara deşarj edilen atıksular başta su ve toprak kaynaklarının kirlenmesi olmak üzere insan sağlığı ve diğer tüm canlılar için tehdit oluşturan birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Dünya genelinde su ve toprak kaynaklarının korunması kapsamında alınan önlemler neticesinde daha sıkı atıksu deşarj limitlerinin uygulanmaya başlanması, sürekli gelişen emisyon standartları konvansiyonel arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi ve atıksu arıtımında yeni teknolojilerin üretilmesini gerekli kılmaktadır.

Yukarda kısaca belirtilen nedenlerden ötürü atıksuların çevresel etkilerini en aza indirilebilen, aynı zamanda geri kazanımı ve çeşitli amaçlarla yeniden kullanımına yönelik etkin, nitelikli ve pratik yöntemlerin geliştirilerek uygulanması su ve toprak kaynaklarının stratejik yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma açısından artan bir öneme sahiptir.

Atıksu arıtımında temel amaç atıksudan istenmeyen maddeleri, güvenilir ve ekonomik olarak uzaklaştırmak; onları mümkün olan en stabil hale getirmek veya bir sonraki kullanım için istenen nitelikte hazır hale getirmektir. Bu bağlamda arıtılmış atıksuların geri kazanımı ve değişik amaçlı geri kullanımı için yapılan yeni yöntem geliştirme çalışmaları içerisinde son dönemlerde membran prosesleri ve mebran biyoreaktör teknolojisi ön plana çıkmaktadır.

İstenilen nitelikte, güvenilir arıtılmış su üretebilecek, ilk yatırım ve işletme maliyeti açısından rekabet edebilecek, ileri arıtma teknolojilerine olan ihtiyaç ve talebi son 25-30 yıllık dönemde membran biyoreaktör (MBR) sistemleri karşılamaya başlamıştır. MBR teknolojileri su arıtımında, atıksu arıtımında ve su ıslahında artan bir popülerlik kazanmıştır (Tsai ve ark. 2005, Gürel ve Büyükgüngör 2011). Şekil 1.1'den de görüldüğü gibi, MBR'ler ile ilgili yapılan çalışmalar son yıllarda artarak devam etmektedir.

Yüksek kalitede su eldesi ve geri kazanımdaki üstünlüklerinden dolayı membran prosesler atıksulardan su geri kazanım sektöründe önemli teknolojilerin başında gelmektedir. Son yıllarda polimer endüstrisindeki gelişmeler ve membran üretim maliyetlerindeki azalmalar neticesinde, MBR'ler özellikle gelişmiş ülkelerde atıksu arıtımı ve geri kazanımında daha geniş uygulama alanları bulmaya başlanmıştır.



Şekil 1.1. Yıllara göre "membran biyoreaktör" kelimelerini içeren yayın sayısındaki değişim (1986 yılı öncesinde yayın bulunmamaktadır) (Web of Science, Ekim 2017) MBR' lerle ilgili hakemli dergi makalelerin dünya çapında kronolojik dağılımı. (Koyuncu ve ark. 2018)

Sonuç olarak dünya genelinde evsel ve endüstriyel alanlarda oluşan atıksuların alternatif bir su kaynağı olarak değerlendirilmesini zorunlu hale gelmektedir. Ancak, mevcut konvansiyonel arıtma teknolojilerinin atıksuların çeşitli yeniden kullanım faaliyetleri noktasında yetersiz kaldığı görülmektedir. Gelişmekte olan membran prosesler ve MBR teknolojisi yüksek kalitede su eldesi ve geri kazanımdaki üstünlüklerinden dolayı su geri kazanım sektöründe önemli teknolojilerin başında yer almaya başlamıştır. Ayrıca bu teknolojiler hem atıksu arıtma tesisi olmayan, hem de mevcut tesislerinin iyileştirilmesi gerekli olan yerleşim ve sanayi bölgeleri için de etkin ve nitelikli bir çözüm yolu olarak değerlendirilmeye başlamıştır. Türkiye gibi hızlı nüfus artışı ve sanayileşmenin getirdiği çevre sorunları ile karşı karşıya olan ülkelerin bu sorunlarının hızlı bir şekilde çözümlenmesinde, su ve toprak kaynaklarının etkili bir şekilde yönetilmesinde önemli bir rol oynayacaktır (Kayaalp 2012).

1.2 Problem Tanımı

Konvansiyonel atıksu arıtımı genel olarak, fiziksel bir işlemin gerçekleştirildiği birincil çökeltme, organik madde ve besi maddesi giderimi için ikincil işlem, arıtılmış su ile aktif biyokütlenin ayrımı için ikincil çökeltme ve arzu edilen arıtma derecesi için kum filtrasyonu, dezenfeksiyon, vb. ardışık arıtma ünitelerinden oluşmaktadır.

MBR'ler organik madde ve besi maddesi giderimi ile aktif biyokütle ayrımının

yani biyolojik proses ile biyokütlenin arıtılmış sudan ayrılmasının tek bir ünitede yapılabilmesini sağlayan yapıları ile konvansiyonel atıksu arıtmaya karşı bir alternatiftir.

Bu sistemler klasik aktif çamur prosesleriyle karşılaştırıldığında daha kaliteli arıtılmış su sağlama, güvenilirlik, modüler olabilme, daha az yer kaplama, daha az atık çamur üretme gibi avantajlara sahiptir (Lesage ve ark. 2008). Ürettiği içme suyu kalitesine yakın arıtılmış su ile MBR'ler atıksuların geri kullanımı ve temiz su talebini düşürme açısından da önemlidir.

MBR'ler hem sistem dizaynı hem de işletme parametrelerinin kontrol altında tutulabilmesi noktasında konvansiyonel aktif çamur proselerine nazaran daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla konvansiyonel atıksu sistemlerine kıyasla ortaya çıkan avantajlarının yanı sıra MBR teknolojisinin iyileştirilmesi gereken dezavantajları da mevcuttur. Özellikle arıtmada kullanılan membranların, kullanıldıkça yüzey ve gözeneklerinin tıkanması diğer bir deyişle membran kirlenmesi MBR proseslerin işletme performansını ve maliyetini doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biridir.

Membranlar kirlendikçe sistemin enerji kullanım verimi düşmekte, dolayısıyla sistemin arıtma maliyetleri artmaktadır. Belli bir kirlenme noktasından sonra ise sistemin durdurulması ve membranların yoğun bir temizleme faaliyetine tabi tutulması hatta membranların değiştirilmesi gerekmektedir. Bu durum MBR'lerin işletme maliyetini önemli oranda arttırmaktadır.

Atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan batık membran biyoreaktör konfigürasyolarında iki tür havalandırma uygulanmaktadır. Reaktör tabanındaki difüzörlerden verilen ince hava kabarcıklı havalandırma ile biyokütlenin oksijen ihtiyacı karşılanmaya çalışılırken, membran yüzeyine uygulanan kaba hava kabarcıklı havalandırma ile membran yüzeyine maddelerin birikip akıyı azaltması engellenmeye yani kirlenmenin geciktirilmesine çalışılır. Yükselen hava kabarcıkları membran yüzeyinde türbülans yaratarak, membran yüzeyinde materyallerin birikmesi azaltılarak sistemin daha etkin çalışması hedeflenir.

Reaktördeki türbülanslı karışım ve reaktör hidroliğinden dolayı iki havalandırma türü de pratikte hem temizleme hem de oksijen ihtiyacı taleplerini karşılayabilmektedir ancak uygulamada iki havalandırmanın da sonuçlarını ayırt edilmesi zordur. Modül altından verilen kaba hava kabarcıklı havanın bir kısmı membran yüzeyini temizlerken

geri kalan kısmı membran yüzeyi ile hiç temas etmeden reaktöre karışmaktadır. Yapılan çalışmalarda membran yüzeyini sıyıran hava debisinin bir optimum değerinin bulunması ve bunun ötesinde verilen havanın bir iyileştirme sağlamaması bunu kanıtlamaktadır. Örneğin, Han vd. (2005) kritik bir hava debisi aşıldığında fazladan verilen havanın membran yüzeyini temizlemede etkisiz kaldığını, Rahimi ve ark. (2011) ise optimum havalandırma hızının altında ve üstünde verilen havanın membran permeabilitesini azalttığını belirtmişlerdir.

Diğer yandan MBR'ler konvansiyonel sistemlere nazaran yüksek karışık sıvıda askıda katı madde (MLSS) konsantrasyonlarına imkan verirken yüksek MLSS'den kaynaklı oksijen transfer veriminde azalma ve membran yüzeyinde daha fazla materyal birikmesi problemlerini tetiklemektedir. Önceki çalışmalarda MLSS'in transfer veriminin musluk suyununkine oranı olarak tanımlanan rölatif oksijen transfer veriminin (OTE) (α faktörü) MLSS konsantrasyonu ile eksponansiyel olarak aşağıdaki şekilde değiştiği belirtilmiştir (Muller ve ark 1995);

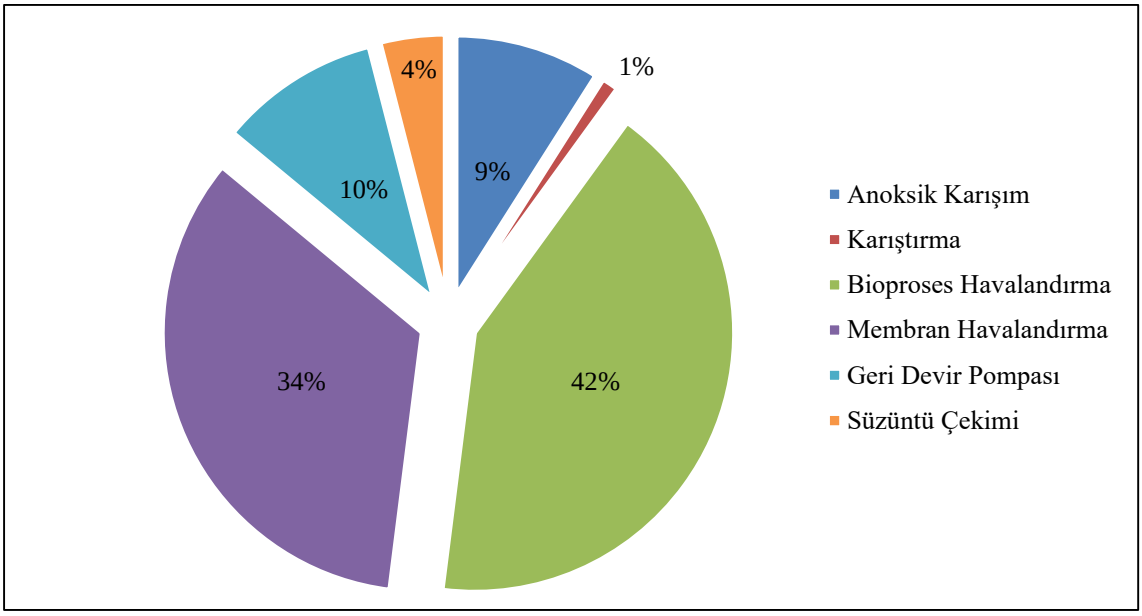
$$\alpha \text{ factor } [-] = 1.06 * \exp [-0.0446 * \text{MLSS } (g/L)] \quad (1.1)$$

Dolayısıyla MLSS konsantrasyonu arttıkça reaktöre verilen oksijenin kullanılamayan kısmı ya da diğer bir deyişle gereksiz olarak verilen kısmı artmaktadır.

Gander ve ark. (2000), Meng ve ark. (2008) biyokütlenin ihtiyaç duyduğu oksijen ve membran yüzeyinin sıyrılması için gerekli havadan dolayı MBR'lerin işletme maliyetlerinin, %80'nden fazlasını havalandırmanın oluşturduğu bildirmişlerdir. Dolayısıyla hem biyoproses hem de membran havalandırmasında verimi arttıracak yöntemlerin geliştirilmesinin MBR'lerin işletme maliyetlerini önemli oranda azaltma potansiyeli bulunmaktadır.

Literatürde membran kirlenmesini geciktirmeye yönelik MBR havalandırması ile ilgili çalışmaların genelinde havalandırma için blower veya hava kompresörünün kullanıldığı görülmektedir (Le-Clech ve ark. 2006, Meng ve ark. 2009, Drews 2010). Bununla birlikte Dong ve ark. (2012) blower veya hava kompresörü ihtiyacını ortadan kaldıran ve bunların yerine atıksu arıtmada enerji ihtiyacında bir artışa neden olmadan aktif çamurun daha etkin havalandırılması için venturi enjektörünün kullanıldığı bildirmişlerdir.

Şekil 1.2'den görüldüğü gibi bir MBR sisteminin enerji tüketiminde en büyük dilimini oluşturan MBR (biyokütle ve membran) havalandırmasının venturi enjektörü kullanılarak daha etkin ve verimli hale getirilmesinin araştırıldığı bu çalışmanın sonuçlarının MBR'lerde işletme şartlarının iyileştirilmesi çabalarına önemli ölçüde katkı sunacağı düşünülmektedir.



Şekil 1.2. Bir MBR'ün enerji ihtiyacı (Hribljan, 2007)

1.3 Amaç ve Kapsam

Venturi enjektörleri basit yapıları, harici bir havalandırıcıya (blower, hava kompresörü vb.) ihtiyaç duymama ve yüksel havalandırma verimleri gibi özelliklerinden dolayı havalandırma, sıvı ve gaz enjeksiyonu uygulamalarında yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle atıksu arıtma sistemlerinin havalandırılmasında daha etkili bir çözüm sunmalarından ötürü venturi prensibine dayanan havalandırma cihazlarının tasarımı son yıllarda popüler hale gelmiştir (Dong ve ark. 2012).

Bu tez çalışmasının amacı yüksek havalandırma verimi sunan venturi enjektörü yardımıyla klasik bir batık MBR sistemine nazaran membran yüzeyinin kirlenmesini geciktirildiği ve havalandırma veriminin artırıldığı dolayısıyla enerji ve işletme maliyeti açısından daha üstün bir batık MBR konfigürasyonunun oluşturulmasıdır. Böylelikle ilk defa bu çalışma ile bir venturi cihazı batık bir MBR'ye membran yüzey temizlenmesini ve biyoreaktör oksijenasyonunu artırmak için entegre edilmiş olacaktır. Ayrıca birden fazla venturi enjektörü kullanılarak, membrandan süzüntü akısı elde etmek için gerekli

sürücü kuvvetin venturi enjektörünün sağladığı vakum etkisi ile sağlanabilirliği de incelenecektir.

Bu konfigürasyon ile klasik bir batık MBR'den farklı olarak, biyokütlenin oksijen ihtiyacı, reaktörün karışımı ve membran yüzeyini temizlemek için gerekli havalandırma ihtiyacı sisteme entegre edilen bir venturi enjektörü ile karşılanmış olacaktır.

Bu kapsamda her ne kadar venturi enjektörü entegre edilmiş batık MBR'nin blower kullanılan klasik sistemle kıyaslamasının tam olarak yapılabilmesi için iki ayrı batık MBR ünitesine ihtiyaç olsa da iki farklı reaktörü aynı anda işletme güçlüğü, iki farklı reaktörde biyokütle karakteristiklerinde olabilecek farklılıkların kıyas noktasında ortaya çıkaracağı güçlükler ve ekonomik nedenlerden ötürü her iki sisteminde çalıştırılabileceği uygun bir difüzör ve reaktör tasarımına sahip, laboratuvar ölçeğinde tek bir batık MBR ünitesi oluşturulmuştur. MBR ünitesinde kurulum kolaylığı ve düşük maliyet açısından membran modülü olarak tek düz plaka membran kullanılmıştır. Her iki sisteminde membran kirliliğini trans membran basıncı (TMP) ölçümlerine dayalı olarak farklı havalandırma debilerinde ve farklı işletme akılarında mebran tıkanma eğilimleri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

İki sistemde de hem sentetik atıksu için hem de gerçek atıksu kullanılarak biyokütle ve biyolojik proses takibi ve arıtma performanlarının mukayese edilmesi noktasında ekonomik ve laboratuvar altyapısı yeterliliklerinden ötürü belli başlı konvansiyonel parametrelerin ölçülmesi veya analitik olarak belirlenmesi ile sınırlandırılmıştır.

Çalışma toplam beş bölümden oluşmaktadır. Bu bölümü takip eden ikinci bölümde çalışma ile ilgili kaynak özetleri sunulmuş, üçüncü bölümde yapılan laboratuvar çalışmaları hakkında bilgi verilmiş, yapılan deney ve analiz yöntemleri anlatılmıştır. Elde edilen bulgular dördüncü bölümde yorumlanmış, beşinci ve son bölümde ise çalışmanın sonuçlarından bahsedilerek önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde öncelikle membranlar ve membran proseslerin tarihsel gelişimi, yapısal özelliklerine değinilmiştir. Daha sonra MBR'lerin tarihsel gelişimi, atıksu arıtımındaki yeri ve önemi hakkında bilgiler verilmiş ve MBR'lerin tasarım ve işletme ilke ve yaklaşımlarına, kullanımdaki avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Son olarak çalışmaya özgün nitelik katan venturi enjektörü ile ilgili temel bilgiler verilerek, bu çalışmanın literatürdeki yeri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2.1. Membran ve Membran Prosesler

2.1.1. Tarihçe

Membranlar ile ilgili ilk sistematik çalışmalar, Abbe Noblet tarafından 1752'de bir tarafta su-etanol karışımı diğer tarafta su ortamı bulunurken, aradaki malzemenin seçici olarak etanolü geçirdiğini keşfetmesiyle başlamış kabul edilmektedir. Nollet bir şarap fıçısının ağzına bir hayvan derisi germiş; fıçıyı bu haliyle suya batırmış ve suyun fıçıya girdiğini, buna karşılık şarabın deriden geçip dışarı çıkamadığını görmüştür. Nollet böylece ozmos'u keşfetmiştir (Özkan 2007). Fick, 1855'de membran kalınlığı boyunca taşınımın ne şekilde gerçekleştiğini ilk kez tanımlayan difüzyon kanunlarını yayınlamıştır (Koyuncu ve ark. 2018). İlk çalışmalar hayvan mesaneleri ya da kauçuk gibi doğal malzemeler kullanılmıştır. 1861 yılında Graham sentetik membranlar ile ilk elektrodiyaliz deneylerini gerçekleştirmiştir. Graham, 1866'da farklı ortamlar kullanarak gaz difüzyonunu çalışmış ve kauçuğun farklı gazlara karşı farklı geçirgenliğe sahip olduğunu keşfetmiştir (Koyuncu ve ark. 2018). Traube, 1867'de ilk kez bakır-demirsiyanür kullanarak gözenekli porselen üzerinde yarı geçirgen membran üretmiştir. Nerst ve Plank, konsantrasyon veya elektrik potansiyel sürücü kuvvetleri altındaki elektrolitler için akı denklemlerini geliştirmiştir (Koyuncu ve ark. 2018). Donnan, 1911'de elektrolitlerin varlığında membran üzerindeki denge ve potansiyel teorileri üzerine çalışmıştır (Koyuncu ve ark. 2018).

Yirminci yüzyılın başlarına kadar membranlar, laboratuvar çalışmalarında fiziksel/kimyasal teorilerin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Bechold, 1907 yılında konsantre asetik asit içerisinde nitroselüloz çözeltisi kullanarak sentetik membranlar üretmiştir. Bechhold kabarcık deney metodu yardımıyla gözenek çaplarına göre

sınıflandırılmış nitroselüloz membranlarının geçirgenlikleri asetik asit ve nitroselüloz oranlarını değiştirilerek ayarlamıştır. Ters ozmosun öncüsü olacak çalışmaları ilk kez Manegold, Michealis ve McBain gibi araştırmacılar 1920'lerde selofan ve selüloz-nitrat malzemeleri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Tuz veya elektrolit çözeltileri, bu membranlardan basınç altında geçirilmiş, süzüntüde beslemeye göre daha az miktarda çözünmüş madde elde edilmiştir (Koyuncu ve ark. 2018). Zsigmondy ve Bachmann (Zsigmondy ve ark. 1918) Elford (Elford 1937), ve Ferry (Ferry 1936) Bechold tekniğini geliştirerek 1930'ların başlarında ilk ticari mikroporoz nitroselülöz membranları üretmişlerdir (Paşaoğlu 2013). 1944 yılında fonksiyonel hemodiyaliz cihazının üretilmesiyle membranlar büyük ölçekte biyomedikal alanda da kullanılmaya başlamıştır (Koyuncu ve ark. 2018). 1945'lere kadar mikro gözenekli membranlar öncelikli olarak mikroorganizma ve partikül gideriminde kullanılmıştır. Juda ve McRae iyon seçici membranları kullanarak elektrodiyalize öncülük etmişlerdir.

1950'li yıllarda polimerik ve çok ince selüloz asetat malzemeden yapılan membranların keşfedilmesiyle birlikte membranlar, uygulamaya yönelik olarak da gelişmeye başlamıştır. Membran bilim ve teknolojisine yönelik önemli gelişmelerden birisi, selüloz asetat bazlı yüksek tuz tutunumu ve akıya sahip, orta seviyede hidrostatik basınç gerektiren ters ozmos membranlarının üretilmesi olmuştur (Koyuncu ve ark. 2018). Loeb–Sourirajan (1963), hatasız, yüksek akılı, anizotropik ters ozmos membranı 1960'ların ilk yıllarında üreterek membran ayırma sistemlerinin laboratuvarlardan ticari prosesler haline getirilmesini sağlamıştır. Bu dönem içerisinde çözelti-difüzyon modeli gibi membran taşınım modeli de geliştirilmiştir (Paşaoğlu 2013). Bu gelişmelerle birlikte membran prosesler (membranlı ayırma sistemleri) çeşitli alanlarda küçük ve endüstriyel bazlı uygulamalarda kullanılmaya başlasa da güvenilirlik, sistem yavaşlığı ve yüksek maliyet gibi nedenlerden ötürü yaygın kullanıma ulaşmamıştır.

1960'lardan 1980'li yıllara doğru Loeb-Sourirajan tekniği üzerine, arayüz polimerizasyonu ve çok tabakalı kompozit döküm ve kaplamayı içeren yüksek mekanik dayanıma sahip membranlar üretilmiştir. Hollow fiber (içi boşluklu fiber) ve ince film kompozit membran modülleri bu yıllarda geliştirilmiştir (Türker 2003). Ayrıca 1980'li yıllarda organik membranların yanı sıra inorganik membran kullanımı ile nanofiltrasyon membranları da üretilmeye başlanmıştır (Crittenden ve ark. 2012). Membranlar 0.1 μm ve daha az kalınlığa sahip seçici tabakalar halinde üretilmeye başlanmış, paketlenme

metotları geniş membran yüzeyli spiral sargı, ince boşluklu fiber, kapilar ve plak-çerçeve modüller içerisinde geliştirilmiş ve bu sayede membranların stabilitesi artırılmıştır. 1980'li yıllardan itibaren mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, ters ozmos ve elektrodiyaliz membranları dünya çapında büyük tesislerde üretilmeye başlamış ve membran prosesler hızlıca çok çeşitli uygulama alanları bulmaya başlamıştır. (Henis ve ark. 1980, Türker 2003, Paşaoğlu 2013).

1990'lı yıllardan itibaren membran konusundaki çalışmalarda ağırlık, membran üretiminin yanında proses geliştirilmesine, uygulama ve uzun süreli işletme deneyimi üzerine yoğunlaşmıştır. Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte membran özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla nanopartikül eklentili kompozit membranların üretilmesi gerçekleşmiştir. Düşük basınçta işletilebilen, yüksek akı ve geçirgenliğe sahip membranlar geliştirilmiş, membran kontaktörlerinin ve membran reaktörlerinin kullanılmasına başlanmış ve bu konudaki çalışmalar da artış göstermiştir.

20. yüzyılın ortalarından itibaren özellikle deniz suyu ve yer altı suyu desalinasyonu için yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanılan membran prosesler ve membran prosesleri içeren hibrid sistemler, günümüzde atıksuların arıtılmasında, saf ve yumuşak su üretiminde, endüstriyel su hazırlanmasında, tekstil, boya, gıda ve ilaç gibi sanayi prosesleri ayırma işlemlerinde, atıksulardan bazı maddelerin geri kazanılmasında, iyon değiştirme, sıvılardan kolloidlerin ve büyük ölçekli moleküllerin ayrımında, sulardan veya diğer sıvılardan askıda katı veya çözünmüş maddelerin ayrımında, kontrollü ilaç salınımı, yakıt hücreleri ve pillerde enerjinin dönüşümü gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmuştur.

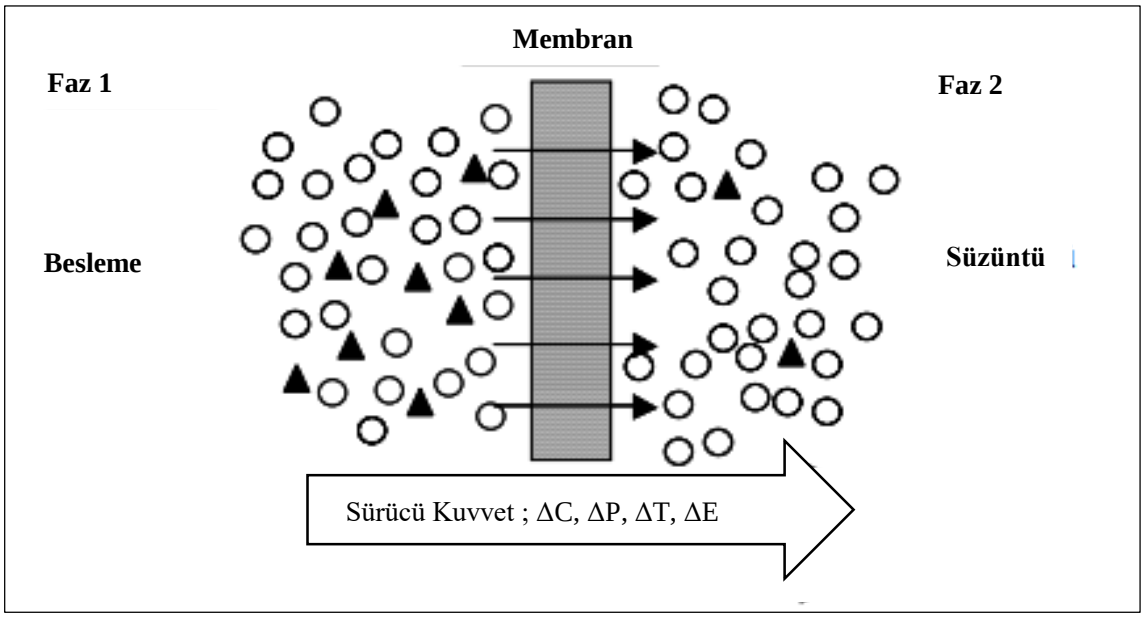
2.1.2. Tanım ve Yapısal Özellikler

Membranlar ayırma ve saflaştırma işlemleri için kullanılan bir materyal iken, membran prosesler bu işlemlere verilen ad olarak tanımlanabilir (Kitiş ve ark. 2009). Membranlar en genel tanımıyla, iki faz arasındaki seçici geçirgen tabaka olarak tanımlanmaktadır.

Bir membran prosesinde temel amaç membran vasıtasıyla iki faz arasında kütle değişimini kontrollü bir şekilde yapacak üçüncü bir fazın teşkil edilerek iki faz arasında fiziksel bir ayrımın sağlanmasıdır. Membran iki faz arasındaki bir ara fazdır. Yani membran proseslerde iki faz arasına yerleştirilen membran fazı, bu iki faz arasındaki kütle

değişimini kontrol eder. Bu sebeple ayırma prosesinde karışımdaki bileşenlerden bir kısmına karşı seçici geçirgen davranış sergiler. Bir membran gaz, sıvı, katı fazda veya bunların kombinasyonları şeklinde olabilir.

Membran çalışma mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir. Membran iki faz arasındaki kütle transferine belirtildiği gibi uygulanan bir sürücü kuvvet yardımıyla kısıtlı veya düzenli geçişine izin verir. Buradaki sürücü kuvvet her iki faz arasındaki basınç, konsantrasyon, elektriksel potansiyel ya da sıcaklık farkından kaynaklanabilmektedir.



Şekil 2.1. Bir membran tarafından ayrılmış iki fazlı bir sistemin gösterimi (Paşaoğlu 2013).

Membran sayesinde çözünmüş ve partiküler maddeler membrana giren besleme akımından ayrılarak, süzüntü ve konsantre akım olmak üzere iki ayrı akım halinde membrandan çıkmaktadır. Membran tabakasından süzülerek geçen akım süzüntü, geçemeyerek tutulan akım da konsantre olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1'deki birinci faz genellikle besleme veya üst akış, ikinci faz süzüntü ya da alt akışı ifade eder (Ersöz ve ark. 2010, Paşaoğlu 2013). Membran seçici geçirgen bir malzeme olduğu için membran proseslerin en önemli tasarım ve işletme parametrelerinin başında performans ve verim parametreleri olarak ifade edilen, kullanılan membranın seçici geçirgenliği ve membran birim yüzey alanından geçen süzüntü akımı miktarı yer almaktadır. Bir membran içinden geçen süzüntü akımı miktarı, membran birim alanının (A) birim

zamanda geçirdiği hacim (Q_p) olarak denklem 2.1'deki gibi ifade edilir, akı olarak adlandırılır ve birimi L/m^2 st'dir.

$$\text{Akı} = \frac{\text{Süzüntü Debisi}}{\text{Toplam Memran Alanı}} = \frac{Q_p}{A} \quad (2.1)$$

Akı seçilen proses tipine göre hem ilk yatırım maliyetini hem de işletim maliyetini doğrudan etkilemektedir.

Bir membranın seçiciliği genellikle reddetme faktörü (R) ya da ayırma faktörü (α) kullanılarak açıklanmaktadır (Paşaoğlu 2013). Reddetme faktörünün R; c_s, süzüntü konsantrasyonu ve c_b besleme akımı konsantrasyonu olmak üzere denklem 2.2'deki gibi tanımlanmaktadır;

$$\text{Reddetme Faktörü} = R = 1 - \frac{C_s}{C_b} \quad (2.2)$$

Gaz karışımları ve organik karışımlar için genellikle ayırma faktörü kullanılır. Reddetme solventin su olduğu seyreltik sulu çözeltilerde sıklıkla kullanılır. Reddetme boyutsuzdur bir birimdir ve bu değerin sıfır olması solventler ve çözünenlerin membrandan tamamen geçmesini, bir olması ise çözeltilerdeki tamamen tutunumu ifade etmektedir.

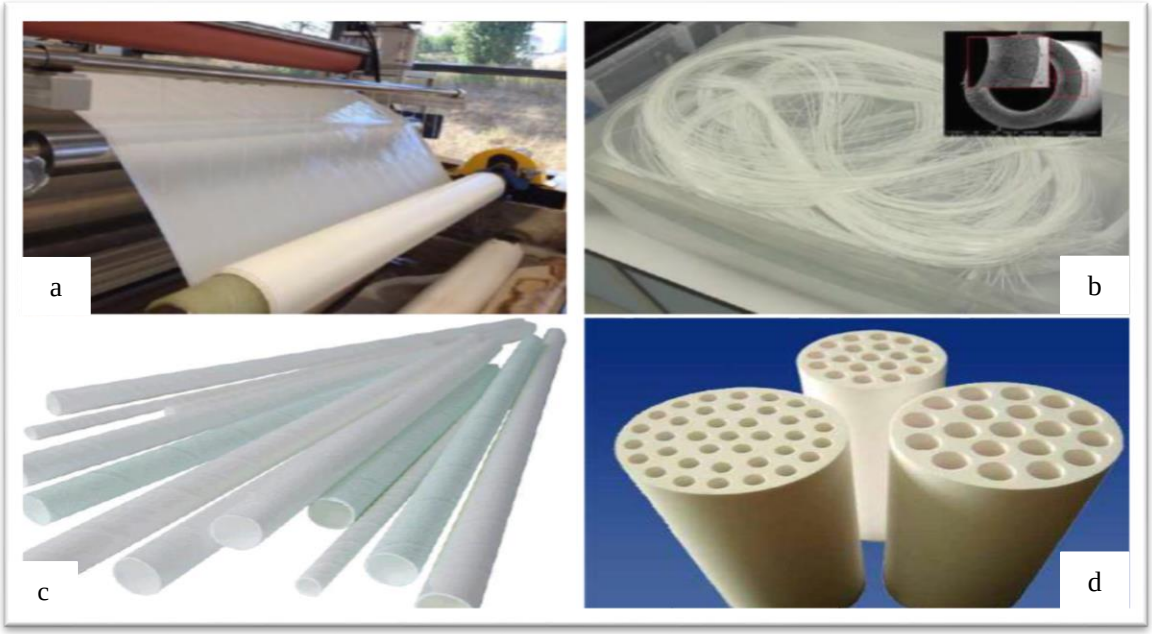
2.1.3. Membran ve Membran Proseslerin Sınıflandırılması

Membranlar ham maddeleri, gözenek çapları, geometrik şekilleri, morfolojileri olmak üzere farklı kriterlere göre sınıflandırılmaktadırlar.

Endüstriyel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak kullanılabilecek malzemeler her geçen gün artmaya devam etse de membran üretiminde kullanılan malzemeler genellikle, sentetik ürünler (polimer ve elastomerler), modifiye doğal ürünler (selüloz bazlı malzemeler) ve inorganikler (seramik ve metaller) olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Membranlar ince ve daha geçirgen, gerekli mekanik mukavemeti sağlayacak bir destek malzemesinin üzerinde olacak şekilde üretilirler. Membran materyali normal olarak termal ve kimyasal koşullara, oksitleyicilere karşı dayanıklı olmalıdır. Membranların tıkanmaya karşı da dayanıklı olması gereklidir. Genel olarak bütün polimerler membran üretiminde kullanılabilse de, membran proseslerde ayırma işlemi için kullanılabilecek polimerler sınırlıdır. Bunlar; Polivinilidin diflorür (PVDF), Polietilsülfon (PES), Polietilen (PE), Polipropilen (PP). Genel olarak PVDF kullanımı

MBR' lerde daha yaygındır (Judd, 2006, Şahinkaya 2014). Malzeme seçimi ayırma oranı, istenilen membran morfolojisi ve işletme koşulları gibi parametrelere bağlıdır.

Membranlar yaygın olarak düz plaka (flat sheet, FS), içi boşluklu fiber (hollow fibre, HF), tübüler (MT), çoklu delikli (capilar tube, CT) olmak üzere Şekil 2.2'deki dört türde üretilmektedirler. Ancak kullanımda amaca göre geometrik şekil, membranların tertip tarzına göre de değişebilmektedir. Düz plaka membranlar spiral sargılı modül olarak tertip edilip proseslerde kullanılabilmektedir.



Şekil 2.2. Geometrik şekillerine göre membranlar a) Düz plaka (MEMTEK), b) İçi boşluklu fiber (MEM-TEK), c) Tübüler (Xylemflowcontrol, 2017), d) Çok delikli membranlar (Advantecmfs 2017, Koyuncu ve ark 2018).

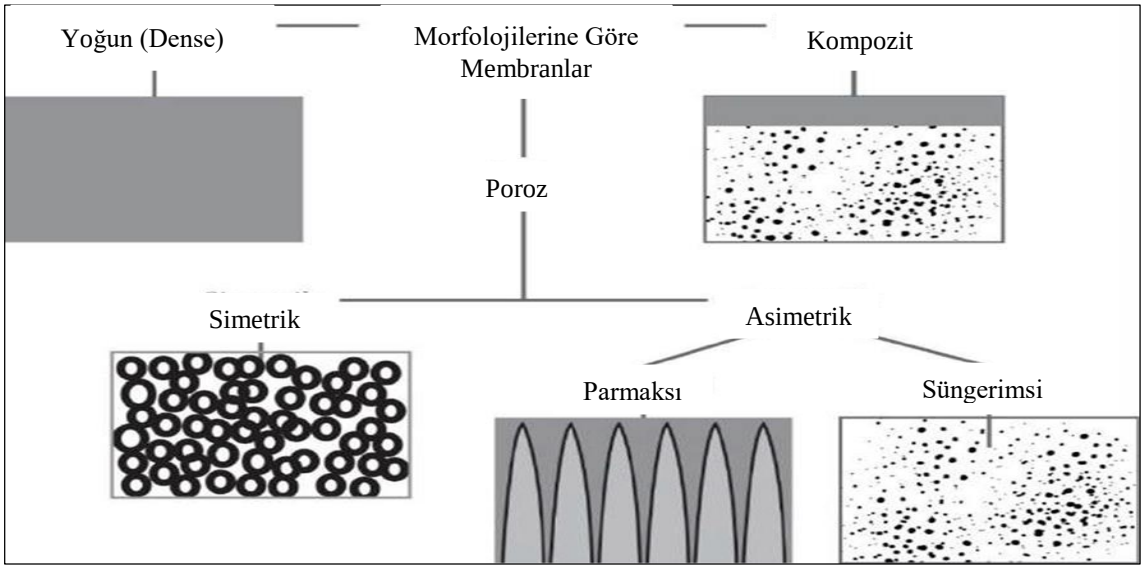
Gözenek çaplarına göre membranların ayırma özellikleri de değişmektedir. Bu sınıflandırmalar ve bunlara ait bazı temel bilgiler Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Membranların gözenek çaplarına göre sınıflandırılması.

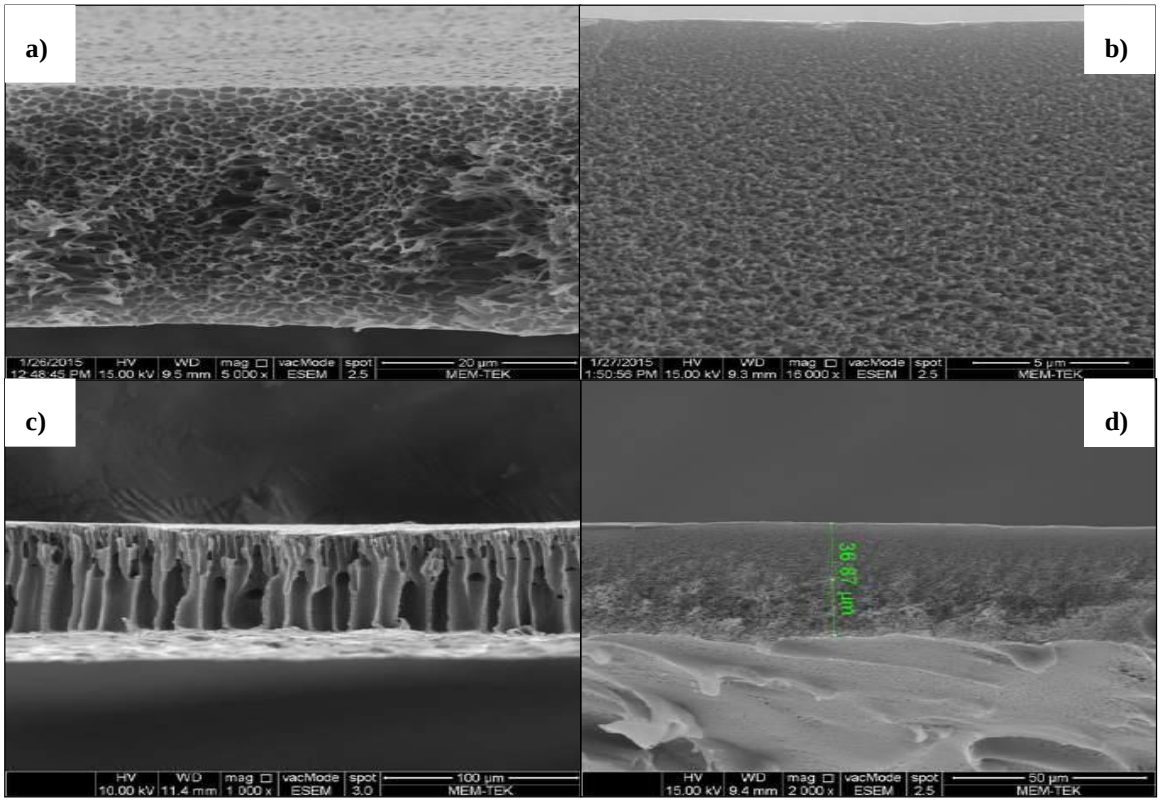
Gözenek Çaplarına Göre Membranlar			
Mikrofiltrasyon	Ultrafiltrasyon	Nanofiltrasyon	Ters Ozmos
2 – 0,05 µm	0,05 - 0,005 µm	0,005 - 0,001µm	< 0,001 µm

Membranlar morfolojilerine göre yoğun, gözenekli (poröz) ve kompozit olmak üzere temel olarak üç sınıfa ayrılmaktadırlar (Şekil 2.3). Morfolojik yapılarına göre bazı membran türlerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 2.4'.de verilmiştir. Yoğun membranlarda su akısı düşüktür ve ters ozmos ve gaz ayırmada,

parmaksı boşluğa sahip membranlar daha çok MF/UF gibi yüksek basınç istemeyen uygulamalarda tercih edilir. Süngerimsi membranlarda hidrolik direnç biraz daha fazladır ve mekanik olarak daha yüksek dayanımlıdır. Kompozit membranlar, alt kısımda gözenekli yapıda olup suyla temas eden üst yüzey kısmında yoğun yapıdadırlar.



Şekil 2.3. Yapı ve morfolojilerine göre membranlar (Koyuncu ve ark 2018).



Şekil 2.4. Morfolojisine göre bazı membran türlerinin SEM ile çekilmiş görüntüleri; a) asimetrik, b) simetrik, c) parmaksı, d) süngerimsi, (MEM-TEK Kütüphanesi) (Koyuncu ve ark 2018).

Membranlar besleme akımını konsantre ve süzüntü akımlarına ayırma prensibine göre çalışmaktadır. Besleme ve süzüntü fazları arasından oluşan süzüntü akımı oluşturan sürücü kuvvetin oluşma nedenine göre membran prosesleri en genel şekilde Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi sınıflandırılmaktadır. Sürücü kuvvet ayırma prosesine tabi tutulan fazlar arasındaki basınç, konsantrasyon, elektriksel potansiyel ya da sıcaklık gradyanından kaynaklanmaktadır. Ayırma mekanizması ise boyut, çekim ya da kimyasal yapıya bağlı olabilir (Koyuncu ve ark. 2018).

Çizelge 2.2. Membran ayırma proseslerinin sürücü kuvvete göre sınıflaması (Saleh ve Gupta 2016, Koyuncu ve ark. 2018).

Sürücü Kuvvet	**Besleme Fazı**	**Süzüntü Fazı**	**Membran Prosesi**	**Ayırma Mekanizması**
Basınç (ΔP)	Sıvı	Sıvı	Mikrofiltrasyon	Boyut
			Ultrafiltrasyon	Boyut
			Nanofiltrasyon	Boyut ve Çekim
			Ters Ozmos	Boyut ve Çekim
	Gaz	Gaz	Gaz Ayırma Buhar geçirgenliği	Boyut ve Çekim
	Sıvı	Gaz	Pervaporasyon	Çekim
Elektriksel Potansiyel (ΔE)	Sıvı	Sıvı	Elektrodiyaliz	Elektrik Yükü
			Membran Elektrolizi	Elektrik Yükü
Konsantrasyon (ΔC)	Sıvı	sıvı	Diyaliz	Boyut
			Difüzyon Diyalizi	Boyut ve Çekim
			Membran kontaktör	Çekim
			Osmoz	Kimyasal Özellik
			Sıvı Membranlar	Kimyasal Özellik
Basınç ve Konsantrasyon (ΔC / ΔP)	Gaz	Sıvı	Membran kontaktör	Çekim
	Sıvı	Gaz	Membran kontaktör	Çekim
Sıcaklık ve Basınç (ΔT / ΔP)	Sıvı	Sıvı	Ters Osmoz	Buhar Basıncı
			Membran Distilasyonu	Buhar Basıncı

2.2. Membran Biyoreaktörler

2.2.1. Atıksu Arıtımı ve Aktif Çamur Prosesi

Atıksu arıtımı; sulara, çeşitli amaçlarla kullanımları sonucunda yitirdikleri fiziksel, kimyasal ve bakteriyolojik özelliklerinin bir kısmını veya tamamını tekrar kazandırabilmek, atıksuları deşarj edildikleri ortamın doğal fiziksel, kimyasal, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerini değiştirmeyecek hale getirmek için uygulanan fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerin kombinasyonu veya bütünü olarak tanımlanabilir.

Fiziksel arıtma, atıksu içerisinde bulunan filtre edilebilen ve çökebilen ve kirleticilerin çeşitli mekanik düzenekler ve çökeltim yoluyla uzaklaştırılmasıdır. Kimyasal arıtmada atıksuya karıştırma ünitesinde çeşitli kimyasallar eklenerek, bu kimyasalların suyun içindeki kirleticiler ile reaksiyona girerek çökelmesi prensibine dayanır. Fiziksel ve kimyasal süreçler adsorblanamayan organik maddeleri gideremmemelerinden dolayı daha düşük arıtma verimine sahiptir (Toprak 2000).

Atıksulardaki kirliliğin giderilmesi için en çok kullanılan yöntem olan biyolojik arıtmanın temelinde ise, atıksuda bulunan substratın karışık mikrobiyal topluluk tarafından besin maddesi olarak tüketilmesi yani mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu besinleri atıksuda bulunan organik maddelerden sağlayarak ayrıştırmaları yatmaktadır. Biyolojik arıtma, organik kirleticilerin giderilmesinde etkin bir rol oynar ancak biyolojik olarak ayrışamayan organik maddelerin giderilmesinde düşük verime sahiptir (Toprak 2000).

Temel biyolojik atıksu arıtma tekniklerinin başında aktif çamur prosesleri gelmektedir. Aktif çamur süreci ilk defa 1900'lü yılların başında İngiltere'nin Manchester kentinin atıksularının arıtılması amacı ile uygulanmıştır. Yaygın olarak kullanılması ise 1940'larda başlamıştır (Toprak 2000). Ülkemizde ve dünya genelinde özellikle evsel atıksuların arıtımında biyolojik arıtma sistemlerinden ön çöktürme, uzun havalandırmalı aktif çamur ve çamur susuzlaştırma işlemleri uygulanmaktadır.

Aktif çamur, organik ve inorganik maddeler içeren atıksu ile hem canlı hem de ölü mikroorganizmaların karışımıdır. Aktif çamur prosesi, atıksuyun bünyesindeki çözünmüş, partiküler ve kolloidal yapıdaki organik maddelerin arıtılmasında mikroorganizmaların organik maddeyi oksijen kullanarak ayrıştırmaları esasından

yararlanılarak geliştirilen bir aerobik biyolojik arıtma sistemidir. Aktif çamur sisteminde bulunan mikroorganizmalar, atıksu içindeki çözünmüş, partiküler ve kolloidal organik maddeyi oksijen kullanarak parçalamaktadır. Bu nedenle aktif çamur prosesleri organik maddelerin gideriminde yoğun olarak kullanılan aerobik bir biyolojik arıtma sistemidir. Sisteme aktifleştirilmiş (veya aktif) çamur denmesinin nedeni de aerobik koşullarda atığı stabilize edecek aktif biyokütlenin üretilmesidir (Öztürk 1999, Yıldız ve ark. 2013).

Aktif çamur prosesinde oluşan net reaksiyon, süreçte yer alan değişik mikroorganizmaların özgün reaksiyonlarının bir bileşenidir. Organik maddenin stabilizasyonu için biyokimyasal reaksiyon Şekil 2.5'deki gibi özetlenebilir. Mikroorganizmaların hücre solunumunu sağlamak için atıksuda bulunan oksijen yeterli olmaz ve dışarıdan oksijen verilmesi gerekli olur. Dışarıdan verilen oksijen ile hem mikroorganizmalar yaşamsal faaliyetlerini sürdürürler hem de aktif çamur ünitesi içerisinde içerisinde homojen bir karışım sağlanmaya çalışılmış olur (Toprak 2000).



Şekil 2.5. Aktif çamur prosesinde organik madde stabilizasyonu (Toprak 2000).

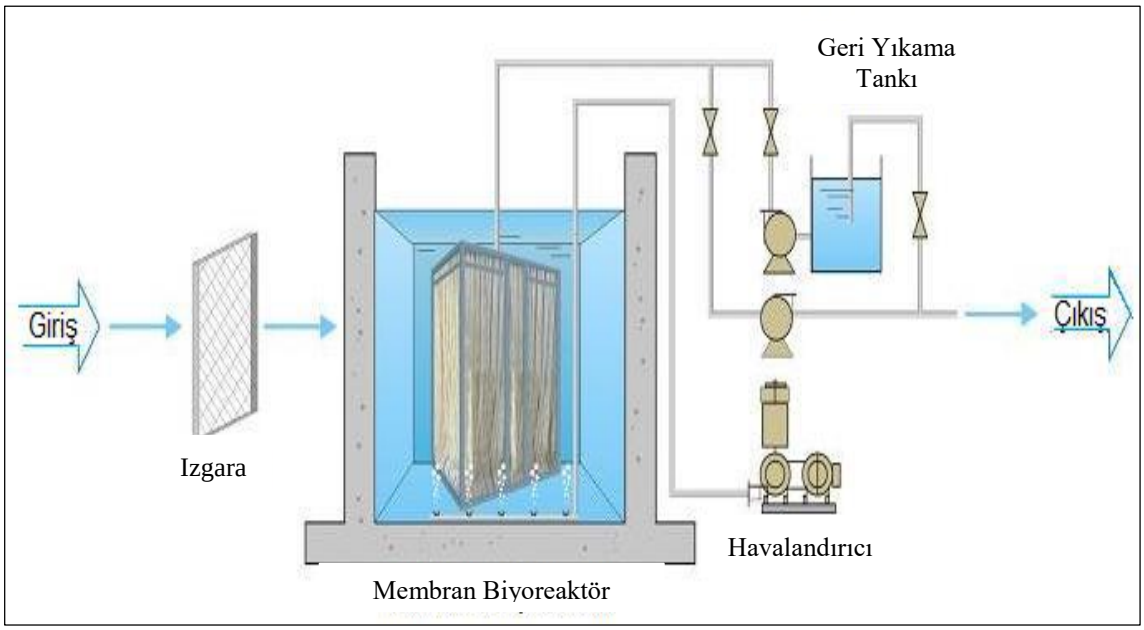
Aktif çamur prosesinde biyokimyasal oksidasyon havalandırıcılar (blower) vasıtasıyla havalandırma havuzlarında, su-biyokütle ayrımı ise sedimantasyon ile çökeltim havuzlarında yapılır. Yani biyokimyasal oksidasyon ve su-biyokütle ayrımı iki ayrı ünite kullanılmaktadır.

2.2.2 Atıksu Arıtımı ve Membran Biyoreaktörler

MBR'ler, membran elemanı sayesinde arıtılmış su ve biyokütlenin fiziksel olarak filtrasyon ile ayrıldığı süspansiyon büyüme modundaki biyokimyasal oksidasyon (aktif çamur gibi) prosesidir (Adham ve Gagliardo 1998, Crawford ve ark. 2000, Stephenson ve ark. 2000, Kitiş ve ark. 2009). Katı madde ayrımını sağlamak için biyolojik su ve atıksu arıtımını ile bir seçici geçirgen membranı bütünleştiren bütün süreçler, membran biyoreaktör olarak adlandırılır (Judd 2011, Kayaalp 2012).

Membran arıtma prosesleri çözünmüş ve kolloidal bileşenlerin sudan gideriminde kullanılır. Partiküller zorunlu olarak membran üzerindeki ince açıklıklarda tutulurlar. Membran teknolojisinin su arıtımındaki esas kullanım alanları filtrasyon, mikroorganizma giderimi, sertlik, uçucu organikler, diğer çözünebilir organiklerin giderimi ve biyolojik arıtmadır. Membranların diğer bir kullanım alanı da bazı endüstrilerde atık su arıtımı sırasında kıymetli metallerin geri kazanımıdır (Droste 1997, Yıldız ve ark. 2013).

Konvansiyonel aktif çamur prosesinde iki ayrı tankta gerçekleşen biyokimyasal oksidasyon ve su-biyokütle ayrımı, Şekil 2.6'da gösterildiği MBR'lerde tek tankda gerçekleşmektedir. Bu tank içinde havalandırma suretiyle aktif çamur oluşturulmakta ve de tankın içinde batmış haldeki membran modülüne vakum uygulanarak arıtılmış su çekilmekte ve biyooksidasyon ile karbon giderimini yapan biyokütle tank içerisinde kalmaktadır.



Şekil 2.6. Membran biyoreaktör prosesi (Şahinkaya 2014).

1960 ve 1970'li yıllarda düşük maliyetli membran modüllerinin geliştirilmeye başlanmasıyla uygulama alanları genişleyen membran prosesler, atıksu arıtımında da hızlıca yer edinmiştir. Atık su arıtımında MBR kullanımı muhtemelen arıtma tesislerinin küçültülebilmesi, daha sıkı deşarj standartlarının elde edilebilmesi arayışlarından kaynaklanmıştır (Kayaalp 2012).

İlk MBR'ler ticari olarak 1960'ların sonlarında ulrafiltrasyon ve aktif çamur prosesinin birleştirilmesi şeklinde Dorr-Oliver tarafından gemi kaynaklı atıksuların arıtılması amacıyla geliştirilmiştir (Judd 2015). Aynı tarihlerde ayrıca aktif çamur prosesine entegre edilen laboratuar ölçekli membran ayırma sistemleri de rapor edilmiş ve ultrafiltrasyon 1969'da Smith ve arkadaşları tarafından aktif çamur proseslerinde çöktürmenin alternatifi olarak ilk kez tanımlanmıştır (Lofrano ve Brown 2009). Bu yıllarda geliştirilen sistemlerde harici membran modülleri kullanılmıştır. Dorr-Oliver tarafından geliştirilen evsel atıksu arıtma MBR'lerde düz tabaka (Flat-sheet) (FS) ultrafiltrasyon (UF) membranları kullanılmıştır. Bu yıllarda Güney Afrika'da kuvvetli endüstriyel atıksuların arıtımı amacıyla ultra filtrasyon membrna modülü adapte edilmiş anaerobik çürütücü MBR Weir Env tarafından geliştirilmiştir (Judd 2015).

1980 ve 1990 yıllardan itibaren çeşitli firmalar tarafından yeni MBR konfügürasyonları üretilerek piyasa sürülmüştür. Zenon Environmental ilk batık membran (iMBR) uygulaması olan ZenoGem®'i, Kubota FS-mikrofiltrasyon iMBR'yi, Kazuo 1989 yılında Yamamoto ve arkadaşları hollow fibre (HF) UF iMBR'yi geliştirilmiştir. Zenon, 1993 yılında ilk batık HF ZeeWeed modülünü tanıtmıştır. Bu modül ZW 145 olup daha sonra ZW130 ve ZW150 modülleri üretilmiştir. 1997'de ise ZW500 serisi üretilmiştir. Yine Kubota enerji ihtiyacını azaltan çift katlı sitemini 2003'de geliştirmiştir (Judd, 2006, Şahinkaya 2014).

Membran ömrünün belirsizliği, yüksek maliyetli membranlar, membranların büyük ölçekli tesisler için denenmemiş olması ve işletim sisteminin bilinmemesi gibi nedenlerden ötürü MBR'ler büyük ölçekli arıtma projeleri için daha yavaş ilerlemiştir. Ancak özellikle 2000'li yıllara doğru membran üretimindeki maliyet düşüşler, pilot ve küçük ölçekli çalışmalardaki deneyimler, membran performanslarındaki artışlar ve daha yüksek kalitede su geri kazanımı ve deşarj limitlerinin yükselmesi bu alandaki yatırımların artmasını sağlamıştır. 1990'ların başında sınırlı sayıda üretici ve filtrasyon çeşidi mevcut iken 2000'li yıllardan itibaren yıllık 4-5 adet yeni ürün geliştirilmektedir (Judd ve Judd 2015). Tam ölçekli MBR tesisleri, 1970'lerde Kuzey Amerika'da, 1980'lerde Japonya, 1990' larda Avrupa'da hizmete girmiştir (Casey ve ark. 2008, Kayalp 2012).

Türkiye'de de bu alanda ilk pilot ölçekli MBR çalışmaları 2005'te başlamış ve bu küçük ölçekli çalışmalarda üniversite kampüslerinin evsel atıksularının MBR ile arıtıldıktan sonra bahçe sulamada kullanılması planlanmıştır (Kayaalp 2012). Halen yeterli düzeyde olmasa da yatırımlar, pilot ve gerçek ölçekli uygulamalar, membran teknolojileri alanındaki çalışmalar devam etmektedir. 100 - 200 m^3/gün kapasiteli küçük tesislerden sonra, kombine evsel ve endüstriyel atıksuları işleyen daha büyük tesislerin inşası başlamıştır (Şahin 2009, Kayaalp 2012).

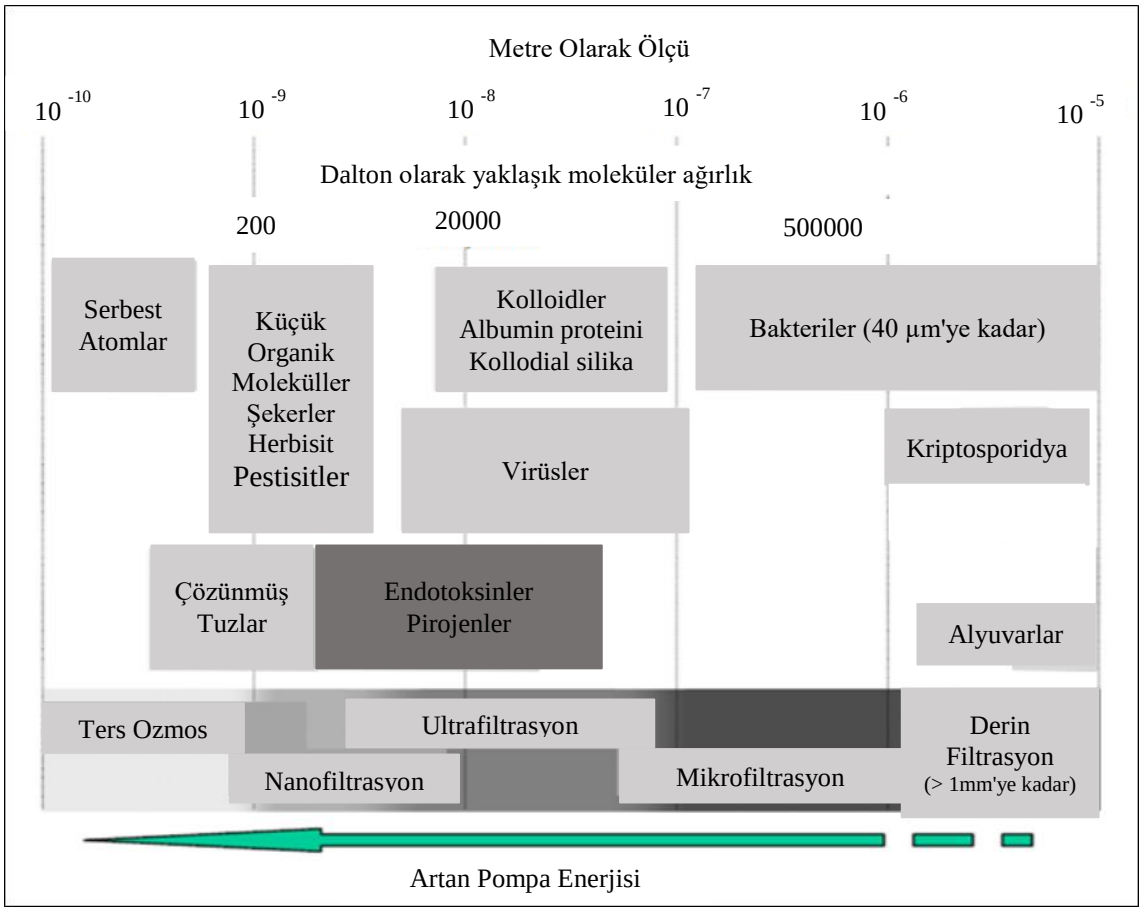
2.2.3 Membran Biyoreaktör Konfigürasyonları

MBR'lerde farklı materyal ve gözenek çapında membranlar kullanılabilmektedir. Membranların seçiciliği gözenek çağına bağlıdır. En büyük gözenek çapına ve dolayısıyla en düşük seçiciliğe sahip olan mikrofiltrasyon membranları (MF) partikül maddeleri, en yüksek seçiciğe sahip olan ters osmoz (RO) membranları ise sodyum (Na^+) ve (CI^-) gibi tek yüklü iyonları dahi itebilme özelliğine sahiptir. Su ve atıksu arıtımında kullanılan membranlar gözenek çaplarına göre ters osmoz, nanofiltrasyon (NF), ultrafiltrasyon (UF) ve mikrofiltrasyon şeklinde sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.7). Su ve atıksu arıtımında kullanılan membran modülündeki membranların ayırma kapasiteleri Şekil 2.7'de verilmiştir (Judd, 2011).

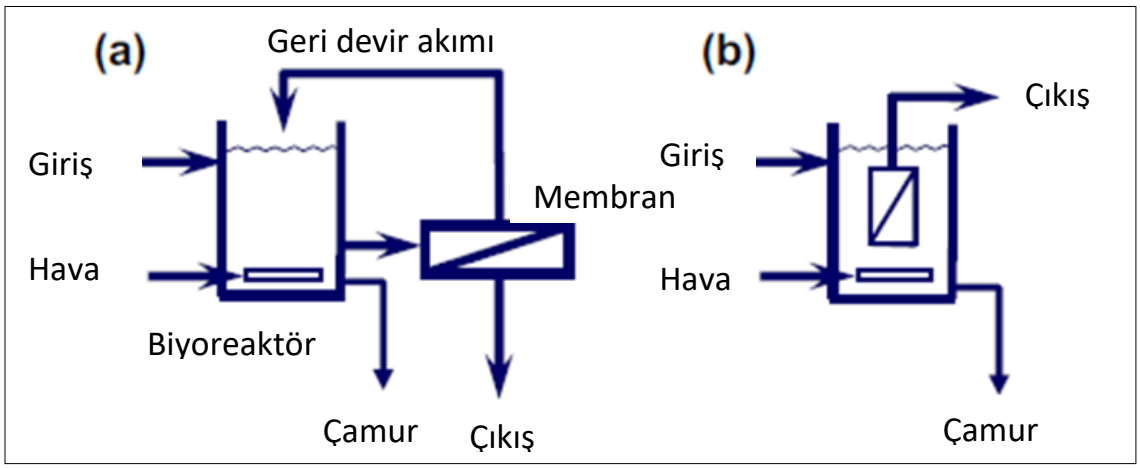
MBR'lerde kullanım uygunluğundan dolayı membran modülleri genellikle düz tabaka (FS), içi boş delikli (HF) ve tübüler membranlardır. Membran modülünün biyolojik oksidasyonunn gerçekleştiği biyoreaktör tankının içinde veya dışında yer alıp almamasına göre harici ve dahili (batık) olarak Şekil 2.8'de gösterilen iki temel konfigürasyon kullanılmaktadır.

İlk 20-30 yıllık süreçte MBR'ler mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon membran modülleri olan sirkülasyon hatlarında basınçlı kaplar kullanılan harici konfigürasyonlar şeklinde dizayn edilmekteydi. Daha sonraları düşük basınçlı membranların üretimi, çok yüksek katı madde konsantrasyonu olmaması durumunda çapraz akış kullanımının ortadan kaldırılması, 1 atm' den daha düşük basınçlarla istenen akıların elde edilmesi ve kabarcıklanma akışı ile membran kirlenmesinin etkili bir şekilde kontrol edilmesi gibi gelişmeler batık MBR konfigürasyonuna doğru bir kayma meydana gelmiştir (Li ve ark. 2008, Kayaalp 2012). Daldırılmış konfigürasyonun kirlenme eğiliminin, iki konfigürasyonun karşılaştırılmasında harici konfigürasyondan daha düşük olduğu

gösterilmiştir (Casey 2005, Kayaalp 2012). Batık ve harici konfigürasyonların bazı özelliklerinin karşılaştırması Çizelge 2.3'te verilmiştir.



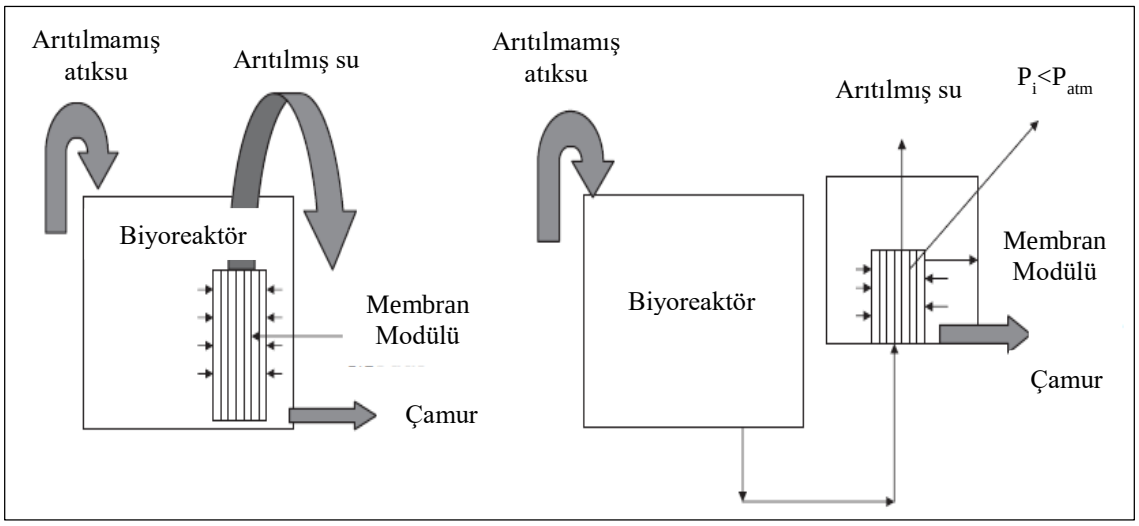
Şekil 2.7. Membran proseslerin ayırma kapasiteleri (Judd 2011) .



Şekil 2.8. MBR konfigürasyonları, a) harici, b) batık (Kayaalp 2012).

Ayrıca batık konfigürasyonlarda membran direkt olarak biyoreaktör içerisinde bulunabileceği gibi, biyoreaktör dışında ayrı bir tank içerisinde de bulunabilir (Şekil 2.9). Batık konfigürasyonlar açısından membran modülünün ayrı bir tanka alınması maliyet

artırıcı olsa da membran modülüne kolay müdahale edilebilmesi ve MBR'lerde membranın dışarı alınarak temizlenmesi durumunda biyolojik prosesi olumsuz etkileyecek durumlara karşı bir avantaj sağlar. Ayrıca yüksek geri devir hızları nedeniyle daha iyi fiziksel yıkama da harici konfigürasyonlarda mümkün olabilir (Singhania ve ark. 2012).



Şekil 2.9. Batık MBR konfigürasyonları a) dahili, b) harici (Singhania ve ark. 2012, Şahinkaya 2014).

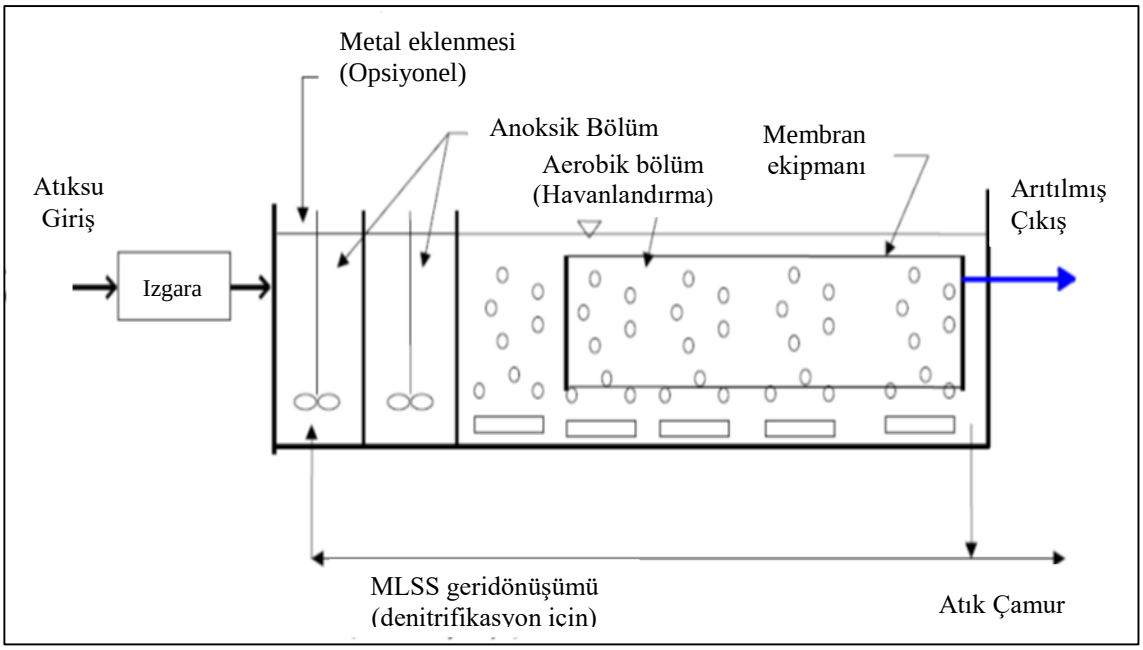
Çizelge 2.3. Dahili ve harici MBR'lerin kıyaslanması (Yiğit 2007).

Batık MBR	**Harici MBR**
Yüksek havalandırma masrafı	Düşük havalandırma masrafı
Düşük pompaj masrafı	Yüksek pompaj masrafı
Düşük akı	Yüksek Akı (az alan gereksinimi)
Daha az temizleme ihtiyacı	Daha sık temizleme ihtiyacı
Düşük işletme maliyeti	Yüksek işletme maliyeti
Yüksek ilk yatırım maliyeti	Düşük ilk yatırım maliyeti

2.2.4. Membran Biyoreaktörlerin Avantaj ve Dezavantajları

Atıksu içerisinde membran elemanlarını tıkayabilecek büyük çaplı materyalleri ayırmak için mekanik ızgaradan geçen atıksu direkt olarak MBR tankına alınabildiği gibi, askıda katı madde içeriği nispeten fazla olan atıksularda MBR ünitesinden önce ön çökeltim de uygulanabilmektedir. Tipik batık bir MBR arıtma sisteminin akış şeması Şekil 2.10'da görülmektedir.

MBR tankının giriş bölümü kapalı ve havalandırmasız yapılarak anoksik şartlar sağlanıp denitrifikasyon uygulanabilmektedir. Bunun için havalandırma tankında nitrifikasyon ile oluşan nitrat biyokütle geri döngüsü ile anoksik tanka geri pompalanır. Böylece isteğe bağlı olarak organik karbon gideriminin yanında anaerobik amonyak - azotu giderimi de sağlanır. Eğer fosfor giderimi de amaçlanıyorsa tankın ilk giriş kısmına bir anaerobik bölüm eklenip fosfor da biyolojik olarak atıksudan giderilebilir. Dolayısıyla MBR prosesi biyolojik nutriyent giderimi için de uygun hale gelebilmektedir. Bazı sentetik toksik organik maddelerin, fosforun (kimyasal olarak giderim için) veya ağır metallerin giderimi istenirse opsiyonel olarak koagülasyon/flokülasyon işlemi için bazı metalik koagülantlar suya eklenebilir (Kitiş ve ark. 2009).



Şekil 2.10. Tipik bir batık MBR akış şeması (Kitiş ve ark. 2009).

Bu özellikleri sayesinde konvansiyonel sistemlere nazaran MBR'ler daha esnek bir arıtma prosesi teşkil edilebilmesine imkan verirler. Oluşan atık çamur diğer konvansiyonel sistemlerde olduğu gibi nihai bertaraf için proses edilir. MBR'lerin en dikkat çekici özelliklerinden biri de mevcut işletimde olan konvansiyonel aktif çamur sistemlerinin havalandırma tanklarına membran modüllerinin entegre edilerek kolaylıkla MBR sistemlerine dönüştürülebilmesidir.

Aerobik süreçlerde uygulanan membranlar son yıllarda anaerobik proseslerde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu reaktörler bir filtrasyon ünitesi ile bir anaerobik reaktörün birleşiminden oluşmaktadır. Filtrasyon ünitesi olarak membranlar ya anaerobik reaktör

içerisine batık şekilde veya reaktör dışında reaktöre bağlı şekilde geliştirilmiştir. Yüksek askıda katı içeren atık suların arıtımında batık veya harici anaerobik süreçle birleştirilen anaerobik membran biyoreaktör (AnMBRs) uygulaması, mezbaha atık suları, birincil ve ikincil çamurlar, sentetik madde olarak selüloz, hayvan gübresi gibi farklı maddeler kullanılarak çalışılmaktadır (Aslan 2012).

MBR'lerin su ve atıksu arıtımında kullanmanın hem avantajları hem de dezavantajları bulunmaktadır. Aşağıdaki özellikler MBR'lerin avantajları arasında sayılabilir;

- Biyokütle sedimentasyon tankı yerine membran tarafından tutulmaktadır. Bu nedenle çamur kabarması gibi çökelme problemleri arıtma prosesini etkilemez. Ayrıca havalandırma tankındaki biyokütle konsantrasyonu son çöktürme tankının kapasitesine bağlı olmadığından 10000 – 15000 mg/L biyokütle konsantrasyonlarında işletme mümkündür. Buna bağlı olarak yüksek organik madde dönüşüm ve nitrifikasyon reaksiyon hızları nedeniyle gerekli tesis alanında bir küçülme de sağlanır.
- MBR'daki yüksek çamur yaşları özellikli organic kirleticileri gideren mikroorganizmaların çoğalmasına imkan tanır.
- Membran bir filtre görevi gördüğünden bulanıklık, bakteri, partiküler ve colloidal organik madde bakımından daha iyi bir çıkış kalitesi sağlar.
- Biyolojik prosesin hızlı bir şekilde devreye alınması (Pollice ve ark. 2008).
- Çamur üretimindeki azalma özellikle tehlikeli atık sınıfına ait endüstriyel çamurların arıtma maliyetini düşürür (Casey 2008).

Bütün bu avantajlarına rağmen MBR'ların iki önemli dezavantajı vardır;

- Membran kirlenmesi
- Membran kirlenmesine bağlı olarak işletme maliyetinin yüksekliği

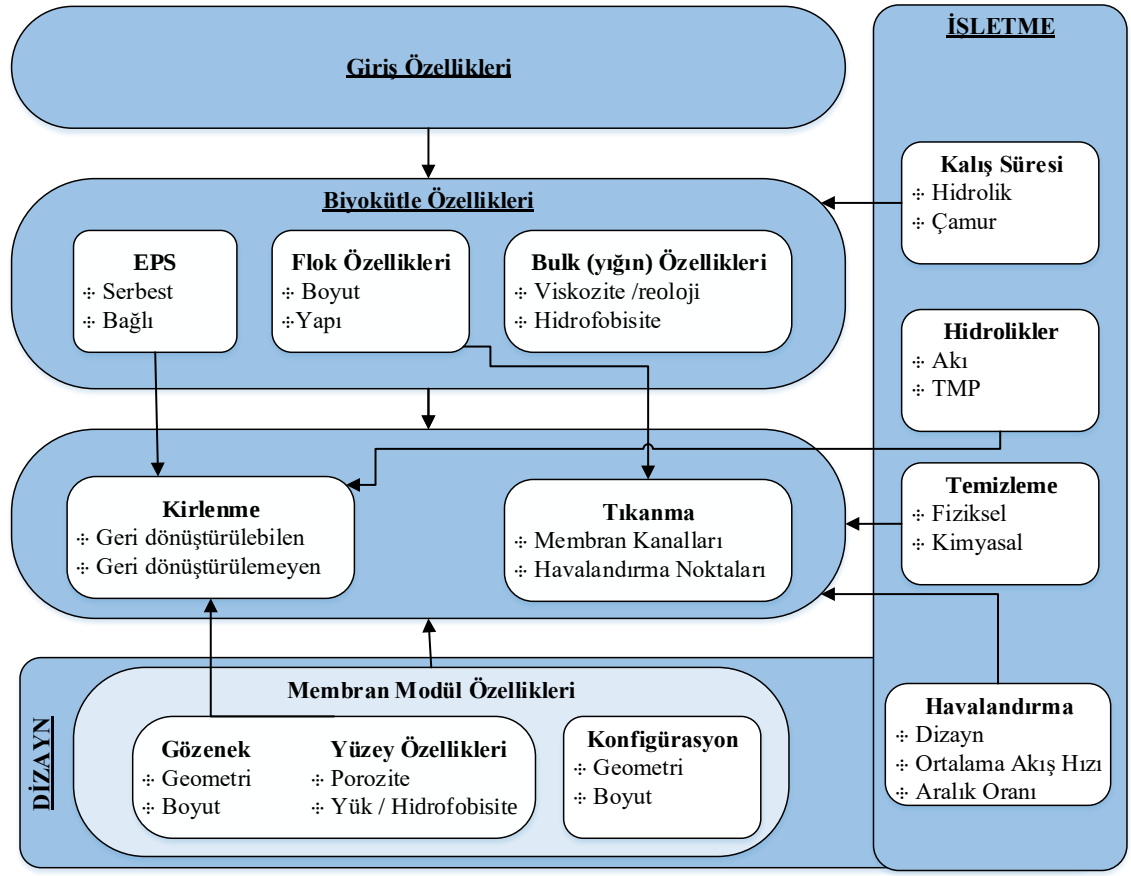
2.2.5. Membran Biyoreaktörlerde Temel İşletme ve Tasarım Parametreleri

Daha yüksek çıkış suyu elde edilmesinde yeni bir süreç başlatan MBR'lerde en düşük enerji ihtiyacına sahip olmasından ötürü batık MBR konfigürasyonu en çok tercih edilen konfigürasyondur (Judd 2011). Batık MBR'lerin tasarım ve işletmesi için gerekli beş ana bileşen şu şekilde sıralanmaktadır;

- Membran dizaynının ve geçirgenliğinin sürdürülebilmesi
- Giriş suyu özellikleri ve ön arıtım

- Havalandırma (membran ve biyokütlenin)
- Çamur çekilmesi ve bekletme süresi
- Biyoaktivite ve biyokütlenin yapısı

Bu bileşenlerin kirlenme ile ilişkileri Şekil 2.11'deki gibi özetlenebilir (Judd 2015).



Şekil 2.11. MBR'lerde işletme tasarım parametrelerinin birbirleriyle ilişkisi (Chang ve ark. 2002, Judd 2015).

MBR işletme maliyeti üzerine etki eden parametreler üç ana başlıkta toplanır. Bunlar membran geçirgenliğinin sağlanması, mikrobiyolojik açıdan sürdürülebilirlik, sıvı ve çamur transferidir. Bunlardan membran geçirgenliğinin sağlanması en önemli başlık olup, işletme maliyetine etki noktaları şöyle açıklanabilir;

- Temizleme ve/veya karıştırma işleminin havalandırma veya çapraz akışla sağlanması
- Fiziksel (dinlenme-geri yıkama) ve kimyasal (bakım-iyileştirme) yöntemlerle temizleme
- İyileştirmeye yönelik temizlemenin yetersiz kalması durumunda membran değişimin sağlanması

Bu etki mekanizmalarından mikrobiyolojik açıdan hem sistemi askıda tutmak hem de gerekli çözünmüş oksijen konsantrasyonunu sağlamak için yapılan havalandırma işlemi batık MBR sistemlerinin işletme maliyeti noktasında en büyük yeri kaplamaktadır (Judd 2015).

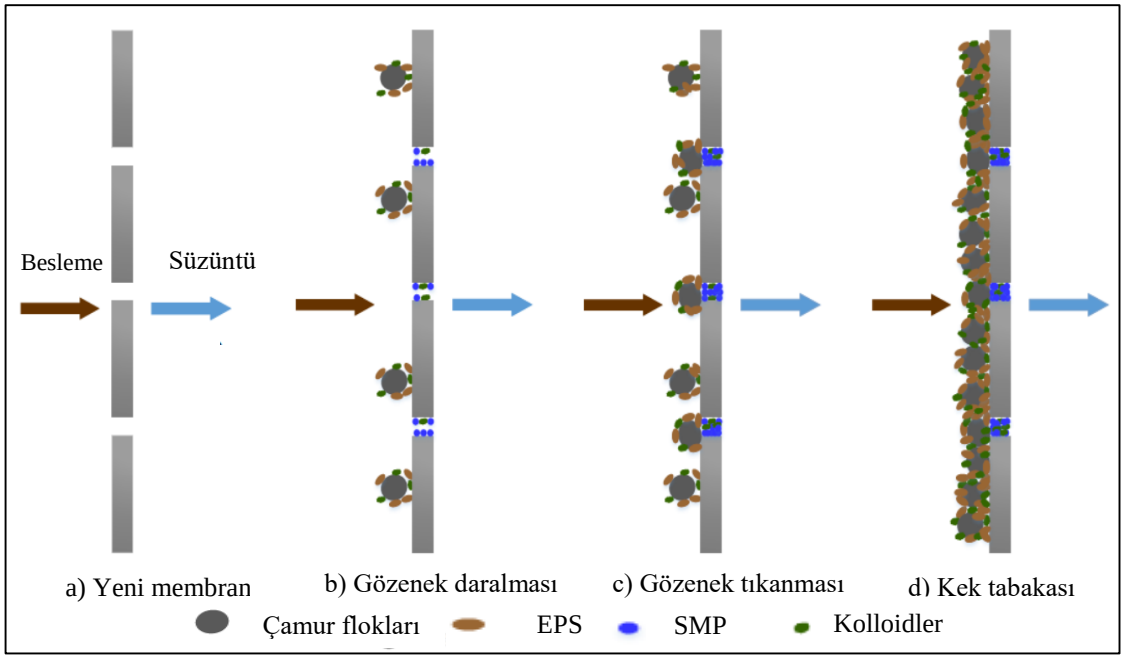
MBR'lerin biyolojik bileşenlerinin tasarımında biyokimyasal/biyokinetik ifadeler kullanılsa da membran modülü ile ilgili akı, geçirgenlik, temizleme, arasındaki karşılıklı ilişkiler deneme yanılma ve/veya amprik ifadelerle ortaya konabilmektedir. Ayrıca efektif çalışma süresini, dolayısıyla toplam akıyı azaltan temizleme işlemi sıklığı da benzer şekilde belirlenmektedir (Judd 2015). MBR prosesine dair temel tasarım ve işletme parametreleri Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi özetlenebilir.

Çizelge 2.4. MBR tasarım ve işletmesindeki temel parametreler (Judd 2015).

Ham Parametreler (birim)	**Simge**	
Besleme Akımı (m^3/saat)	Q_f	
Süzüntü Akımı (m^3/saat)	Q_p	
Membran Alanı (m^2)	A_m	
Ortalama Membran Basıncı (TMP) (bar)	ΔP_m	
Membran Havalandırma Hızı (m^3/saat)	Q_{Am}	
Fiziksel Temizleme (geri yıkama) Aralığı (saat)	t_p	
Fiziksel Temizleme (geri yıkama) Süresi (saat)	τ_p	
Geri Yıkama Akısı (LMH)	J_b	
Kimyasal Temizleme Aralığı (saat)	t_c	
Kimyasal Temizleme Süresi (saat)	τ_c	
Hesaplanan Parametreler (birim)	**Simge**	**Formül**
Akı (L/m^2saat, LMH)	J	Q_p / A_m
Geçirgenlik (LMH/bar)	K	$J / \Delta P_m$
Birim membran alanı başına membran hava ihtiyacı	SAD_m	Q_A / A_m
Birim süzüntü akımı başına fiziksel temizlenme sayısı	SAD_p	$1000*(SAD_m / J)$ Q_{Am} / Q_p
Kimyasal temizleme başına fiziksel temizleme sayısı	n	$t_c / (t_p + \tau_p)$
Net Akı (LMH)	J_{net}	

2.2.6. Membran Kirlenmesi ve Etkileyen Faktörler

Membran kirlenmesi, membran üzerinde biriken kirleticilerin membran gözeneklerini tıkaması, bunun sonucunda membran akısının azalması ve bunu dengelemek için transmembran basıncının artması olarak tanımlanabilir. Partiküler madde veya mikrobiyal giderim için tasarlanmış membranlarda kirlenme materyallerin membran yüzeyinde veya membran gözeneklerinde birikimi sonucu oluşur (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. MBR'lerde membran kirlenmesinin mekanizması (Iorhemen ve ark. 2016).

MBR'lerdeki membran kirlenmesi fiziksel, inorganik, organik, veya biyolojik kökenli olabilir. Fiziksel kirlenme membran gözeneklerinin kolloidal taneciklerle tıkanması ile ilgilidir. Böylece membran yüzeyinin belli bir kısmı kaplanıp etkisiz hale gelir. İnorganik ve organik tıkanma genellikle sırasıyla tortu oluşturuculara ve makromoleküllere bağlıdır (Kitiş ve ark. 2003).

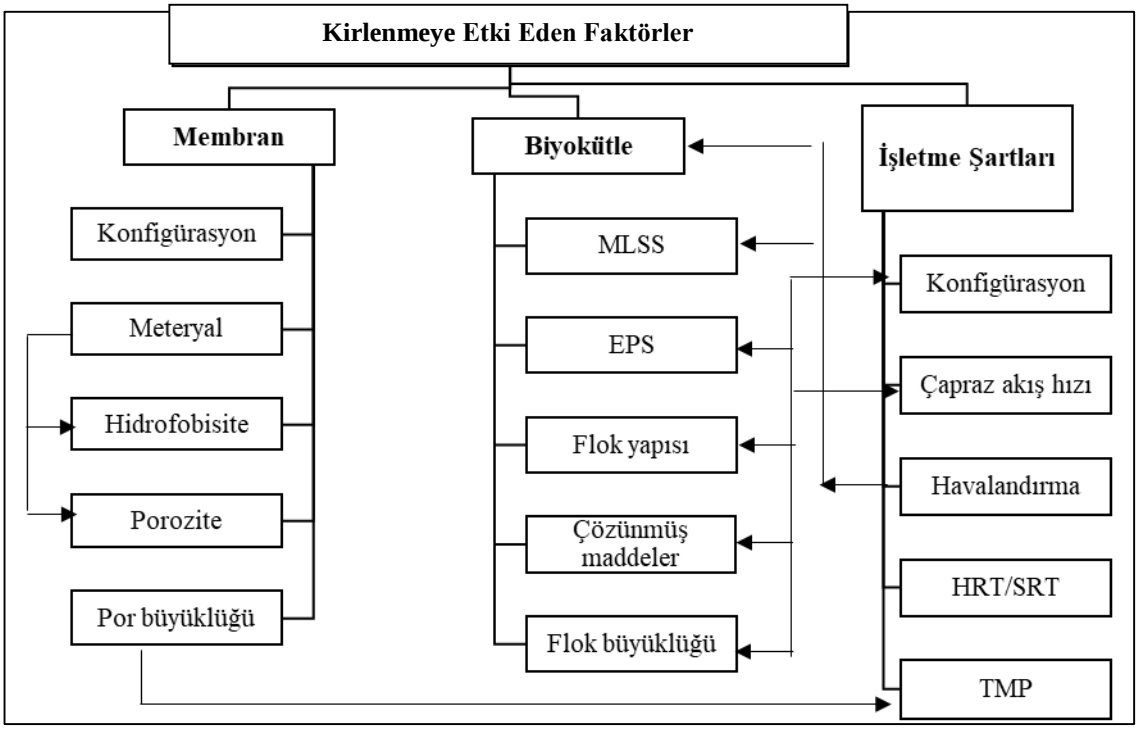
Membranlardaki kirlenme membran permeabilitesini azaltır. Birim transmembran basıncına karşılık membrandan geçen akının dolayısıyla da birim membran alanı başına arıtılmış su üretiminin azalmasına neden olur (Chang ve ark. 2001, Judd 2001, Water Environment Federation 2001, Cho ve Fane 2002, Stephenson ve ark. 2002, Şahinkaya 2014). Azalmış süzüntü akısının mekanik veya kimyasal yöntemlerle tekrar artırılabildiği türdeki kirlenmeler geri dönüşümlü kirleneler olarak adlandırılır. Öte yandan, geri

dönüşümsüz kirlenmelerde ise azalan süzüntü akısı tekrar orijinal miktarlara yükseltilemez (Zenon Env. Inc 2002, Kitiş ve ark. 2003).

MBR'lerde membran kirlenmesi problemine karşın uygulanan yöntemler şöyle sıralanabilir;

- Membrandan süzüntü alınan vakum hattının belirli periyotlarla tersine çalıştırılarak geri yıkama yapılması,
- Membran modüllerinin MBR'den çıkarılarak kimyasal temizleme solüsyonlarında bekletilmesi,
- Havalandırma vasıtasıyla türbülans etkisinin dolayısıyla membran yüzeyini sıyırabilecek kayma gerilmelerinin oluşumunu sağlamak olarak sıralanabilir.

Mebran materyali ve konfigürasyonu, proses işletimi (sistem hidrodinamiği) ve biyokütle konsantrasyonu ve kompozisyonu olmak üzere tıkanma üzerine etkili olan üç ana faktör vardır (Judd 2001, Chang ve ark. 2001, 2002). Şekil 2.13'de MBR'lerde tıkanmayı etkileyen faktörler şematik olarak gösterilmiştir. Genel olarak proses işletiminin performansı ana kirleticilerin giderimi ve enerji talebi ile belirlenir. Kirlenme membranın hidrolik performansını (permeabilite) düşürerek enerji masraflarını direkt olarak etkiler. Ana kirleticilerin gideriminde ise fazla etkisi yoktur (Kitiş ve ark. 2009).



Şekil 2.13. MBR'lerde tıkanmayı etkileyen faktörler (Judd 2001,Chang ve ark. 2002).

Membran kirlenmesi ölçülebilir ve ölçülemez birçok parametreye bağlı gelişir. Bu parametreler arasındaki ilişkiler başlı başına tek bir parametrenin membran kirlenmesindeki etkisinin tam olarak belirlenmesini imkansız kılar. Örneğin, sadece çamur yaşının (SRT) etkisini belirlemek için diğer tüm parametrelerin sabit tutulup SRT'nin değiştirilmesi mümkün değildir, çünkü SRT değiştirildiğinde, sabit besleme yükü durumunda ilk başta biyolojik askıda katı madde (MLSS) de dahil olmak üzere birçok aktif çamur özelliği de değişecektir. Bununla birlikte kirlenme ile ilgili deneysel çalışmaların kontrollü koşullar altında gerçekleştirilemeyeceği anlamına gelmez (Kayaalp 2012).

Bu tez çalışmasının temelini venturi enjektörlerinin MBR'lerin işletme şartlarında ortaya koyabileceği üstünlükleri belirlemek oluşturduğundan dolayı havalandırma ve kirlilik parametelerinin ilişkisi esas alınmıştır.

2.2.7. Membran Biyoreaktörlerin Membran Kirlenmesine Karşın Havalandırılması

Havalandırmayla ilişkili batık MBR'lerde membran kirliliğini azaltma çalışmalarının genelinde sisteme hava sağlamak için diğer biyolojik havalandırma sistemlerinde olduğu gibi bir difüzör sistemine bağlı blower veya hava kompresörü kullanılmaktadır. (Le-Clech ve ark. 2006, Meng ve ark. 2009, Drews 2010, Judd 2015). Ancak biyokütle havalandırması için kullanılan hava kabarcıkları ile membran yüzey temizlemesi için kullanılan hava kabarcıklarının özellikleri birbirleri ile aksi yöndedir. Biyokütle havalandırmasında etkili oksijen transferi için genellikle ince kabarcıklı (2-5 mm) havalandırma uygulanırken, membran yüzeyinin temizlenmesinde membran yüzeyinde daha yüksek kayma gerilmesi oluşumu için kaba kabarcıklı (6-10 mm) havalandırma uygulanmaktadır (Judd 2006). Bir başka ifadeyle, ince kabarcıklı havalandırma kaba kabarcıklı havalandırmaya nazaran daha fazla enerji kullanımıyla daha etkili oksijen transfer verimine katkı sağlarken, kaba kabarcıklı havalandırma ince kabarcıklı havalandırmaya nazaran daha az oksijen transfer verimi ile daha iyi membran yüzey temizlemesi sağlamaktadır. Üretici ve literatür çalışmalarından elde edilen verilere göre ince kabarcıklı difüzörler için % 3-10 arasında değişen bir oksijen transfer veriminden bahsedilirken kaba difüzörler için bu ürün % 1-3 arasındadır. Ayrıca difüzör

başına yaklaşık maliyet ince kabarcıklı difüzör sistemlerinde (40 £) kaba kabarcıklı difüzör sistemlerinden (15 £) daha fazla olduğu bildirilmiştir (Judd 2006).

Batık MBR'lerde havalandırmayla ilişkili membran kirlenmesi çalışmaları çoğunlukla havalandırma yoğunluğunun, havalandırma rejiminin ve hava kabarcık boyutunun optimizasyonunu işaret etmektedir (Braak ve ark. 2011, Kayaalp ve Öztürkmen 2016, Krzeminski ve ark. 2017).

Mayer ve ark. (2006) havalandırma oranına ek olarak, membran yüzeyine hava veren difüzör menfezlerini de optimize etmişlerdir. 0.05 mm ila 4 mm arasında değişen ağız çapına sahip enjektör, tüp, disk ve membran difüzörleri dahil olmak üzere 10 farklı havalandırma elemanının üniform havalandırma dağılımını incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre mikromembran difüzörlerin tübüler membran modülü boyunca üniform bir havalandırma sağladığını, ancak bu difüzörlerin incelenen en karmaşık havalandırma elemanı olduğunu ve membran kirlenmesini azaltmada etkinliğinin değerlendirilmediğini bildirmişlerdir.

Johir ve ark. (2011) havalandırma yoğunluğunun membran kirlenme oranını etkilediğini fakat bu etkinin çeşitli akılar için (5–25 $L/m^2.st$) yüksek havalandırma yoğunluklarında ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca havalandırma debisinin saat başına birim membran alanı başına 1.5'dan 1.0 m^3'e azaltıldığında ani bir TMP artışı gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde Orantes ve ark. (2006), membran yüzeyindeki hava akımının ikiye katlanması ile sistemlerindeki 10 ila 50 gün arasında olan filtrasyon süresini 200 günün üzerine çıkmasını sağlayarak membran kirlenmesinde önemli bir azalma sağlamışlardır. Bununla birlikte, aşırı bir havalandırma oranı daha fazla kirlenmeye neden olabilmektedir. Havalandırma oranının 400 L/st'den den 800 L/st'ye arttırılması, membran yüzeyindeki kek tabakası birikimini azaltmış, fakat aynı zamanda çamur floklarının parçalanmasına, flok yüzeylerinde adsorblanan kolloidlerin ve çözünen maddelerin dağılmasına böylelikle de daha yoğun bir kek tabakası oluşumuna ve daha fazla bir kek direncine neden olmuştur (Meng ve ark. 2008). Bir başka çalışmada, membran yüzeyindeki çamur birikiminin artan havalandırma oranlarıyla (0–25 L/dk) azaldığı fakat bu etki havalandırma oranı ile doğrusal olarak artmamış ve kritik havalandırma oranı aşıldığında bu etki ihmal edildiğini ortaya koymaktadır (Han ve ark. 2005). Sonuç olarak, optimum orandan daha düşük veya daha yüksek olan havalandırma

oranları, MBR'lerdeki membran filtrasyonunun geçirgenliğinde bir azalmaya neden olmaktadır (Rahimi ve ark. 2011).

Kouakou ve ark. (2005) su fazına hava kütle transferini arttırmak için aktif çamur geri dönüşüm hatlarına basınçlı hava sağlayan jet-loop MBR'leri (JLR) kullanılmışlardır.

Dalmou ve ark. (2014) birinde biokütle havalandırması için ince kabarcıklı difüzör sisteminin kullanıldığı (aerobik hazne) diğerinde ise membran yüzeyinin sıyrılması için kaba kabarcıklı difüzör sisteminin kullanıldığı (membran haznesi) iki hazneli bir batık MBR sistemi ile hava akımını optimize etmişlerdir. Aerobik hazne için optimum çözünmüş oksijen miktarının 0.5 mg/L olduğu, membran haznesi için ise membran spesifik havalandırma ile (SADm) ihtiyacının 1m/st olduğu ayar noktasında elde edildiğini belirmişlerdir. Bu optimizasyon ile besin giderim veriminden ödün vermeden toplam havalandırma miktarında % 42'lik (kullanılan enerjide % 75) bir azalma sağlamışlardır.

2.3. Venturi Enjektörü

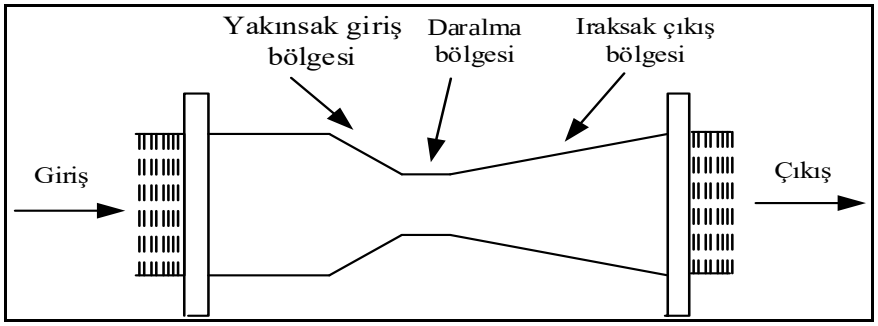
2.3.1. Venturi Borusu (Tüpü)

Venturi borusu (venturi tüpü) bir akışkan akımının debisini ölçmekte kullanılan, Bernolli ve Süreklilik Denklemleri vasıtasıyla da akımın hız ve debi değişimlerinin incelenmesine imkân veren, iki ucu açık, kesiti ortasına doğru her iki ucundan da daralan ve ince bir tüp şeklinde olan bir ölçü aletidir. 18. yüzyılda adını aldığı İtalyan fizikçi Giovanni Battista Venturi tarafından bilim dünyasına sunulmuştur.

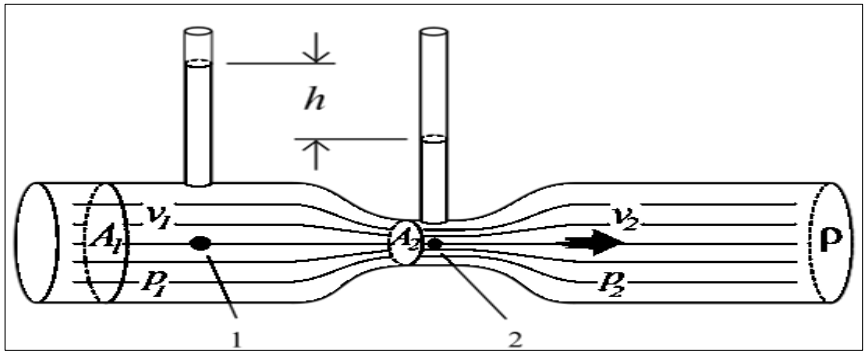
Venturi borusu giriş konisi, silindirik dar kesit (boğaz bölgesi) ve çıkış konisi olmak üzere üç bölüme ayrılarak incelenebilir (Şekil 2.14). Kabaca genişleyen ve daralan iki tüp biribirine bağlandığında bir venturi aygıtı oluşturulmuş olur (Baylar ve ark. 2007).

Boru içindeki akışkanın hızını artırmak için girişteki boru kesitinden daha küçük kesit alanına sahip boğaz bölgesine doğru daralma yapılmak suretiyle bu bölgedeki akışkanın hızının artması yani basınç yükünün hız yüküne dönüşmesi sağlanmaktadır. En dar kesitli boğaz bölgesinde akışkan hızı en büyük değerini alırken akışkan basıncı düşer ve tüpün giriş kesiti ile dar kesitli kısmı arasında bir basınç farkı oluşur. Bu basınç farkı venturi borusunun giriş ve boğaz bölgesine bağlanmış kapalı manometre yardımıyla ölçülür. Bu iki kesit arasındaki ölçüm sonucu elde edilen basınç değerleri yardımıyla da

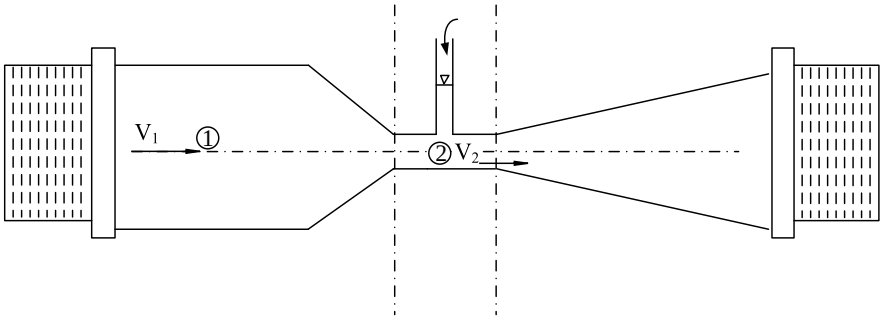
akışkan akımının debisi hidrolik olarak matematiksel yöntemlerle hesaplanabilmektedir (Şekil 2.15). Ventüri borusunun hidrolik olarak teorik değişkenleri ve matematiksel ifadeleri şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.14. Bir venturi borusunun görünümü (Özkan, 2005).



Şekil 2.15. Bir venturi borusunda akım alanı (Özkan 2005).



Şekil 2.16. Bir venturi borusunun teorik değişkenleri.

Ventürinin boğaz kısmında vakum oluşması için aşağıda verilen akım durumunun oluşması gerekir;

(1) ve (2) arasında Bernolli denklemi yapılırsa, (yük kayıpları ihmal edilmiştir)

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{P_1}{\gamma}=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{P_2}{\gamma}\rightarrow\frac{P_2}{\gamma}=\frac{V_1^2-V_2^2}{2g}+\frac{P_1}{\gamma} \qquad (2.3)$$

Süreklilik denkleminden;

$$Q = V_1 + A_1 = V_2 + A_2 \rightarrow V_1 = \frac{Q}{A_1},\ V_2 = \frac{Q}{A_2} \tag{2.4}$$

ve

$$\frac{P_2}{\gamma} < 0 \tag{2.5}$$

olduğunda basınç atmosfer basıncının altına düşer ve vakum oluşur.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} < \frac{V_2^2}{2g} \rightarrow \frac{P_1}{\gamma} + \frac{Q^2}{2gA_1^2} < \frac{Q^2}{2gA_2^2} \tag{2.6}$$

$$\frac{P_1}{\gamma} < \frac{Q^2}{2g}\left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right) \tag{2.7}$$

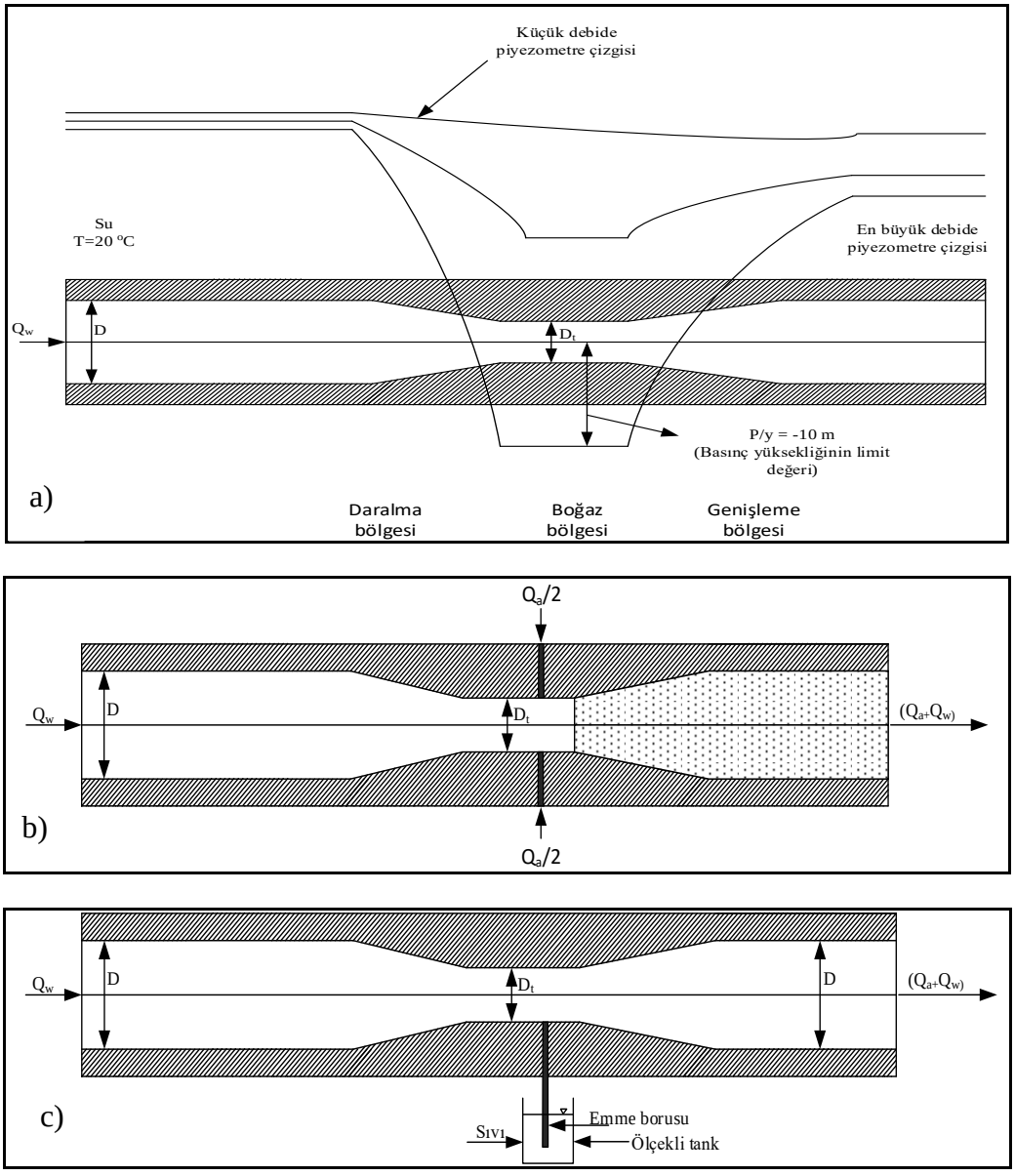
P1: (1) nolu kesitte rölatif basınç

P2: (2) nolu kesitte rölatif basınç

Venturi içerisinden geçen akımın boğaz gölgesindeki basınç düşüşü, atmosfer basıncından daha düşük bir basınçla sonuçlanırsa, hava, pompa duvarına ihtiyaç duymaksızın, boğaz bölgesinden boru içerisine doğru atmosferden zorlanır (Jackson ve Collins 1964, Baylar ve Özkan 2006). Oluşan bu atmosfer basıncından düşük basınç sayesinde vakum etkisi meydana gelmektedir. Venturi borusunun boğaz bölgesi kapalı manometreye bağlanmayıp atmosfere açık bir delik şeklinde bırakıldığında borudaki akışkan akımı sayesinde atmosferden hava girişine izin veren bir havalandırıcı işlevine sahip olmakta ve venturi havalandırıcısı olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.17). Bu vakum etkisinden yararlanılarak, ekstra güce ihtiyaç duyulmadan herhangi bir akışkana istenilen sıvı veya gaz maddenin enjeksiyonu gerçekleştirilebilmektedir. Vakum etkisi ile venturinin sıvı ve gaz enjeksiyonu amaçlı kullanımı literatüre venturi enjektörü ve venturi enjeksiyonu kavramlarının girmesini sağlamıştır (Şekil 2.18).



Şekil 2.17. Bir venturi enjektörü vasıtasıyla hava enjeksiyonu



Şekil 2.18. a) Venturi tüpü ve venturi ile b) hava ve c) sıvı enjeksiyonu (Baylar ve ark. 2005, 2007)

2.3.2. Venturi Enjektörünün Kullanım Alanları

Günümüzde venturi enjektörü, hareketli parçalar içermemesi, ucuz ve sağlam olması, basit yapısı ile kullanım uygunluğu sağlaması ve çalışma için harici enerjiye ihtiyaç duymaması gibi avantajları nedeniyle farklı alanlarda ve amaçlarda kullanılmaktadır. Venturi enjektörünün sağladığı avantajlar Çizelge 2.5'deki gibi özetlenebilir.

Çizelge 2.5. Venturi enjektörünün belli başlı uygulama alanları ve sağladığı avantajlar (Kırmacı 2013).

Uygulama Alanları	
İçme suyu arıtımda	Suların klor ve ozon gazı ile dezenfekte edilmesinde
Atıksu arıtımında	Havalandırma ve oksijen transferi
Tarımsal sulama	Sıvı gübre ve ilaç enjeksiyonu
Su ürünlerinde	Yetiştirme havuzlarında havalandırma ve oksijen transferi
Baca ve egzoz sistemlerinde	Kirli havanın vakumlanması

Avantajlar
Ozon, klor ve. birçok kimyasala dirençlidir
Hareketli parçaları olmayan basit bir yapısı nedeniyle bakımı, işletilmesi ve yerleştirilmesi kolaydır
Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır
Uygun tasarımıyla tam bir karışım temin eder
Yatırım maliyeti çok düşüktür
Herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaz, içinden geçirilen akışkan akımı ile çalışır
İstenen akım ve enjeksiyon kapasitesi ile boyut tasarımına imkan verir.

Bağatur ve Baylar (2001), su ve atıksu teknolojilerinde kullanılan havalandırma ünitelerinde venturi enjektörü kullanılması durumunda havalandırma veriminin 1.9 kat arttığını belirtmişlerdir.

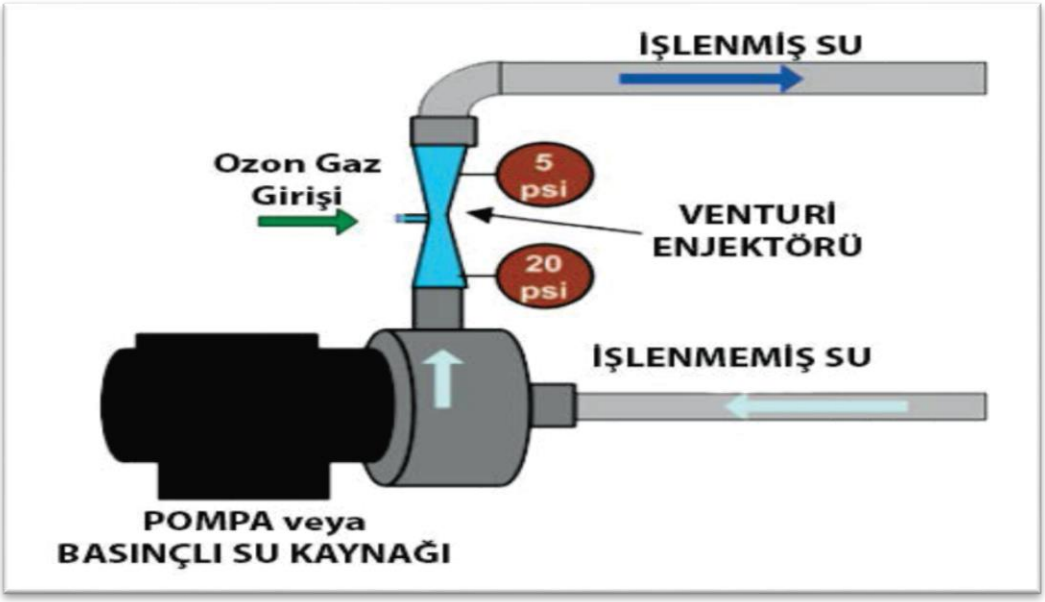
Bağatur (2005) su akışına bağlı olarak, volumetrik hava akış hızı gibi hava vakum özellikleri incelenmiştir. Venturi aygıtının hacimsel hava akış hızını su akış hızı, boğaz çapı, hava deliği çapı veya emme portu ve Reynolds sayısının fonksiyonu olarak tahmin etmek için bir venturi enjektörü ile hava vakumunun ampirik bir korelasyonunu sunmuştur.

Baylar ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada venturi enjektörünün hava sürüklenme oranının, dairesel bir nozuldan önemli ölçüde daha yüksek olduğu göstermiş ve havalandırma sistemlerinde venturi tüpleri son derece etkili havalandırıcılar olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Çalışmada ayrıca venturi aygıtı tasarımında boğaz bölgesinin boru çapı ana borunun yarısı kadar alınmakta olduğunu, konik daralma bölgesinin koniklik açısının 21℃ ve konik genişleme bölgesinin koniklik açısının da ideal olarak 7℃ olması gerektiği belirtilmiştir.

Özkan ve ark. (2006) farklı yoğunluğa sahip sıvıların vakumlanmasını inceledikleri çalışmalarında akım hızının en verimli hava vakum işlemleri için 2 m/s olması gerektiğini gözlemlemişlerdir.

Dong ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada değişik venturi konfigurasyonlarının (seri ve paralel) içme suyu havalandırma verimi üzerindeki etkisini incelemiş ve paralel bağlı venturi sisteminin daha verimli olduğunu gözlemlemişlerdir.

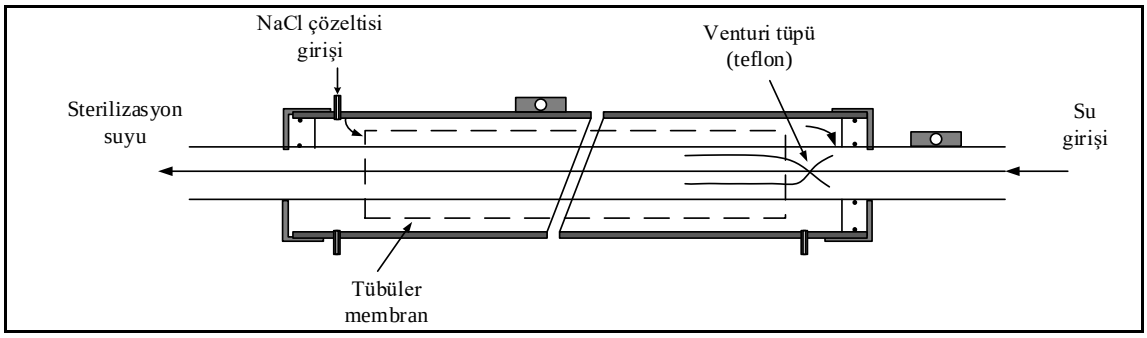
Kırmacı (2013) ve Cuci ve ark. (2016) venturi ile şebeke suyuna ozon enjeksiyonunu incelemişlerdir (Şekil 2.19.). Ozon gazı suda az çözündüğü için ozonun suyla homojen ve etkili şekilde karışmasını sağlamak amacıyla yaptıkları çalışmada venturi havalandırıcıların suya ozon gazı enjeksiyonunda verimli şekilde kullanılabileceği gözlemlemişlerdir. Farklı uzunluklara ve 0.50 daralma oranı sahip venturi enjektörlerinin hava giriş oranı ve ozon çözünürlüğü verimine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ozon çözünürlüğü verimine etkili olan faktörler venturi boyunun uzunluğu ve venturi daralma oranı olduğunu. uzunluğun az olduğu durumlarda daha iyi hava giriş performansı elde edildiğini, boru boyunun artmasıyla hava girişi performansında düşüş meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ozon gazı enjeksiyonunda, venturiden sonra sisteme eklenen boru boylarının artmasıyla ozon enjeksiyon veriminin arttığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedenini, venturiden sonraki uzunluğun artmasıyla ozonun suyla karışabileceği su temas süresinin de artması olarak açıklamışlardır.



Şekil 2.19. Venturi enjektörü ile ozon enjeksiyonu (Kırmacı 2013).

Thalasso ve ark. (1995) gaz halindeki bir substrat karışımını metabolize eden mikroorganizmaların, hücre büyümesi ve aktivitesine izin verirken yüksek gaz transfer oranlarını elde etmek için venturi enjektörü ile donatılmış bir biyoreaktör kullanmışlardır. Gaz transfer oranları, oksijen ve sulu sülfit kullanılarak çeşitli geometri tasarımları altında belirlenmiştir. Yapılan deneyler, *acetobacterium wieringae'nın* birkaç saat içinde asetat üretmek için karbondioksit (CO_2) ve hidrojenin (H_2) bir karışımını metabolize edebildiğini ortaya çıkardığını belirtmişlerdir.

Qin ve ark. (2002) gıda endüstrisinde anti-mikrobiyal uygulamalarda kullanılmak üzere sürekli olarak sodyum hipoklorid (NaOCl) üreten bir düzenekte, sodyum klorür (NaCl) çözeltisini hidrolizin gerçekleştiği hücreye bir venturi tüpünün oluşturduğu vakum ile çekmişlerdir (Şekil 2.20).

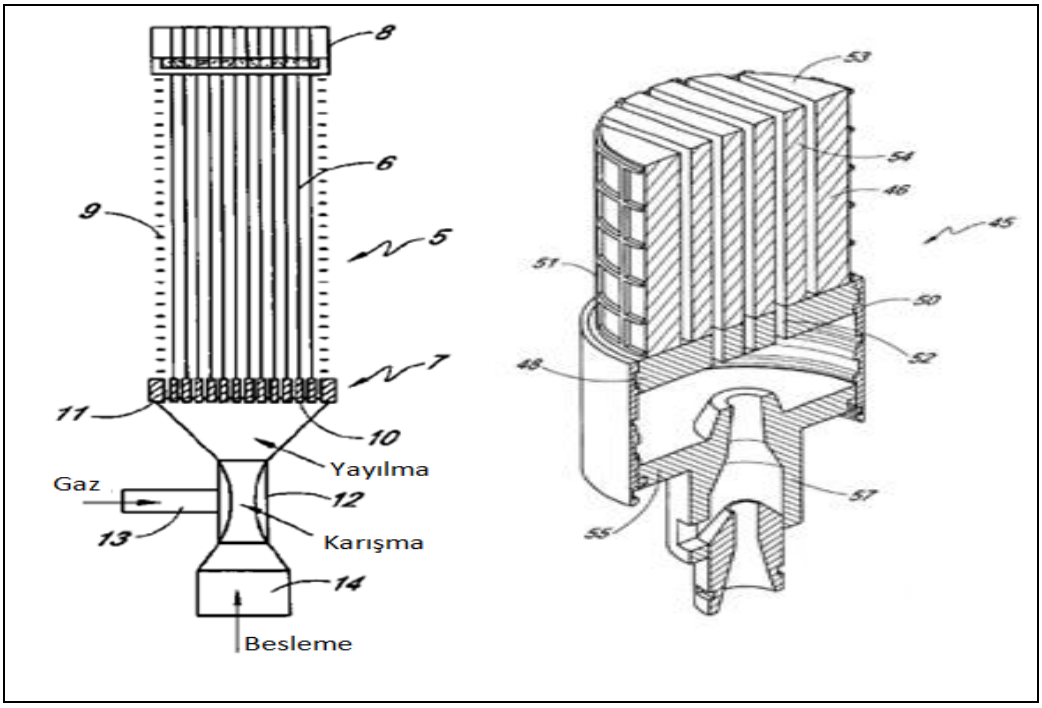


Şekil 2.20. Venturi enjektörünün tübüler elektrokimyasal reaktöre adapte edilmesi (Qin ve ark. 2002).

Zha ve Jordan (2005) MBR'de kullanılan membran modullerini temizlemek için venturi enjektörünün kullanıldığı bir yöntem geliştirmişlerdir (Şekil 2.21). Dikey duran bir membran modülünün altına yerleştirilen bir venturi aygıtından geçen besleme akımı venturi enjektöründe oluşan negatif basınç nedeniyle dışarıdan hava emmekte, oluşan kabarcıklı akım membran yüzeyini temizlemede kullanmışladır.

Capponi vd. (2006) venturi enjektörünü atıksudan ağır metallerin adsorpsiyon-flotasyon sistemi ile giderilmesinde kullanmışlardır. Oluşturulan flotasyon kolonunun veriminin, atıksu arıtımında en yaygın olarak kullanılan flotasyon tipi çözünmüş hava flotasyonundan (DAF) dört kat daha yüksek olduğu belirtmişlerdir.

Hirooka ve ark. (2009) süt endüstrisi atıksularını arıtan bir MBR'de oluşan fazla çamur miktarını azaltmak için venturi etkisiyle oluşan kavitasyon işlemini kullanmışlardır. Basıncın azaldığı daralma bölgesinde meydana gelen basınç azalması sonucu oluşan kabarcıklar ve sodyum hidrat (NaH) kullanılarak oluşturulan kavitasyon sonucunda aktif çamur flokları parçalanmıştır. Parçalanan bu aktif çamur reaktöre geri devredildiğinde fazla çamur üretiminde %80 azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimi ve nitrifikasyon verimlerine dayanarak, bu kavitasyonlu işlemin MBR performansı üzerinde negatif bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 2.21. Venturi enjektörünün membran modülüne adapte edilmesi (Zha ve Jordan 2005).

Robinson (2009) yenilenen bir alkollü içecek imalathanesi atıksularını arıtan bir MBR tesisinde biyolojik oksijen ihtiyacını blowerlarla sağlamış ve venturi jet havalandırma kullanılarak reaktöre vermiştir. Venturi jet havalandırma sisteminin kullanılmasının tankı havalandırmada çok etkili olduğu, çok az bakım gerektirdiği ve biyoreaktör içeriğinin tam olarak karışmasını sağladığı belirtilmiştir.

Hwang ve ark. (2010) MBR'de üretilen fazla çamurun çürütülmesinde ozon ve venturi enjektörünün birlikte kullanımı üzerinde yaptıkları çalışmada aşağıdaki bulguları elde etmişlerdir;

- Verilen bir ozon dozunda diğer ozonlu arıtma sistemlerine göre, venturi enjektörünün kullanımı %10-20 oranında daha yüksek çamur çürümesine olanak sağlamıştır. Hatta kullanılan sirkülasyon pompasının enerji ihtiyacını arttırmasına rağmen, venturi enjektörlü sistemin belirli bir enerjiyle %5-25 oranında daha fazla çamur çürütülmesine imkan verdiği belirtilmiştir.

- Venturi enjektörünün oluşturduğu hidrodinamik kavitasyon hem ozon transfer verimini hem de çamur partiküllerinin parçalanmasını arttırmıştır.

- Venturi enjektörü-ozon sistemiyle parçalanan çamur MBR'a geri devredildiğinde membran kirlenmesinin de azaldığı gözlenmiştir.

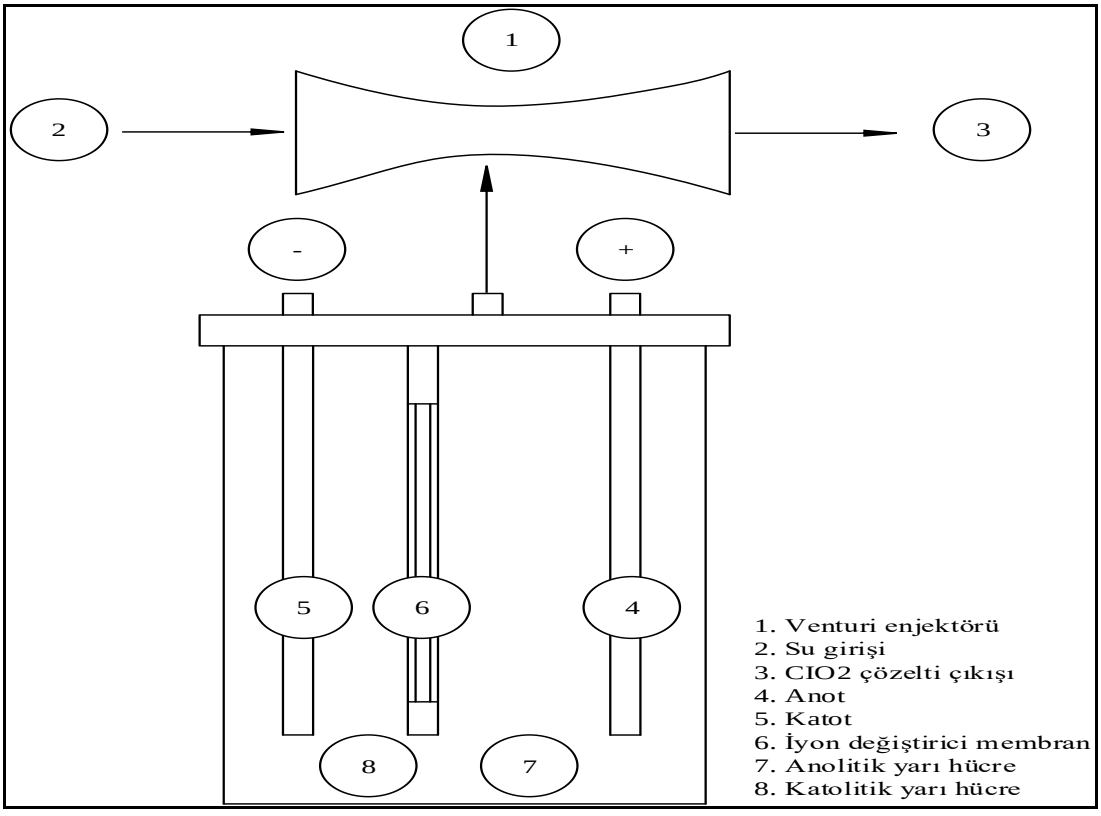
Wang ve ark. (2011) azo boyalarında renk gideriminde fotokataliz ile birlikte bir venturi enjektörünün kullanılmasıyla oluşturulan su jeti kavitasyonunun kullanımını araştırmışlardır. Fotokataliz ve su jeti birlikte kullanımı boya arıtımını %136 oranında arttırmıştır. Fotokatalizin veriminin artmasında su jeti kavitasyonunun katalizör partiküllerinin kümelenmesini önleyerek ve böylece katalizör yüzeyi ve reaktanların daha iyi temas etmesini sağlayarak etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmada venturi tüpünün boğaz bölgesinin çap ve uzunluğunun daha küçük olmasının kavitasyonu arttırdığı belirtilmiştir.

Du ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada deniz suyuna gözenekli taş difüzörlerine göre venturi (Şekil 2.22) ile daha yüksek oranda karbondioksit enjekte edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Tipik bir kabarcıklı difüzör sisteminde ozon (O_3) kütle transfer verimi %10-15 civarında iken, venturi enjektörünün kullanıldığı sistemlerde %90 transfer veriminin gerçekleşebildiği belirtilmiştir (Englehart ve ark. 2013).



Şekil 2.22. Venturi ile karbondioksit enjeksiyonu, A) gaz girişi, B) venturi, C) pompa (Du ve ark. 2012)

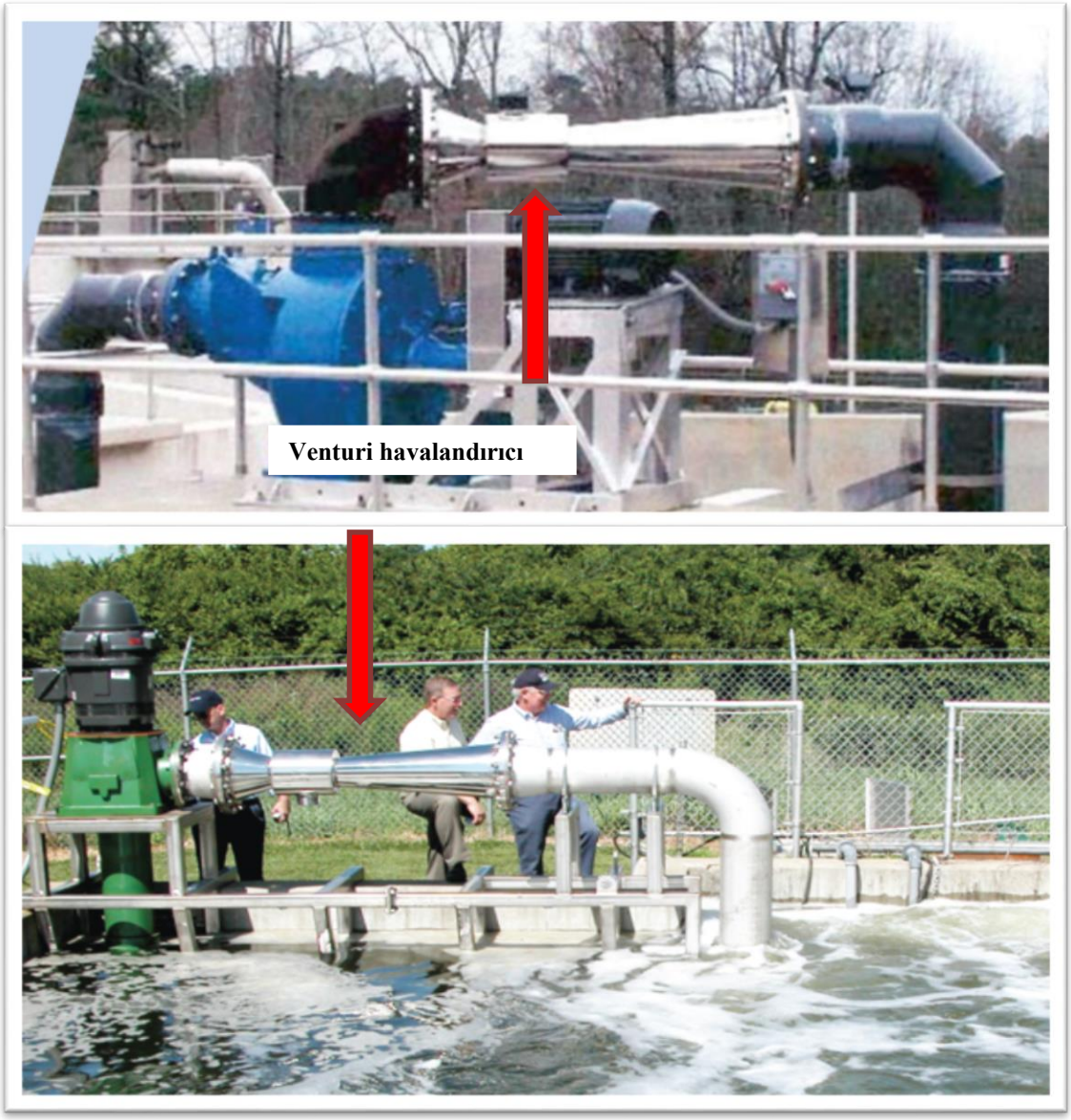
Tsai ve ark. (2013) Şekil 2.23'de görüldüğü gibi membran elektrolizi yöntemiyle ürettikleri gaz halindeki klordioksiti (ClO_2) elektroliz hücresinden dışarıya bir venturi enjektörü kullanarak almışlardır.



Şekil 2.23. Tsai ve ark. (2013) kullandıkları elektroliz hücre sistemi (Tsai ve ark. 2013)

He ve ark. (2013) tekstil atıksularının geri kazanımı amacıyla kurdukları ozon-biyolojik havalandırmalı filtre-ters ozmoz arıtma sisteminde, giriş atıksuyuna ozon gazını bir venturi tüpü yardımıyla almışlardır.

Amerika Birleşik Devleteri'nde bulunan Mazzei firması (www.mazzei.net), tarımsal sulama sistemlerine sıvı kimyasal madde ve gübre transferinde, içecek üretiminde (şarap fermantasyonu), atıksu havalandırma havuzlarında ve arıtma sonrası oksijen konsantrasyonunun arttırılmasında, dezenfeksiyon amaçlı O_3 vb. gazların transferinde, sıvı çözeltilerden CO_2, metan vb. gazların uçurulmasında (stripping) kullanılan farklı boyutlarda venturi enjektörleri üretmektedir. Şekil 2.24'de bu firmanın kurduğu gerçek ölçekli venturi enjektörlü atıksu havalandırma sistemleri görülmektedir.

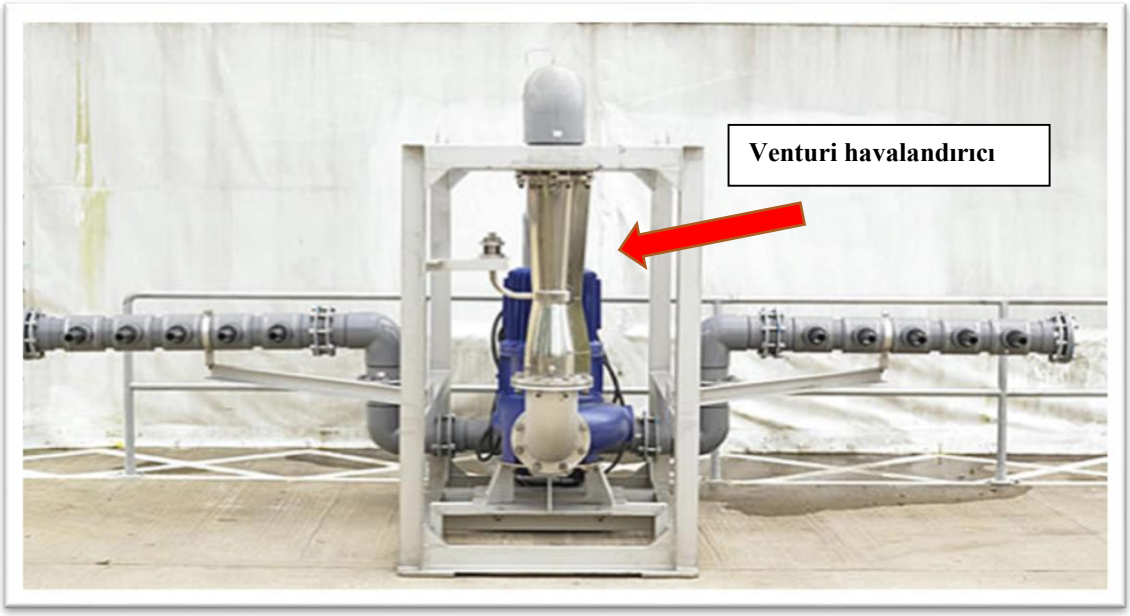


Şekil 2.24. Gerçek ölçekli venturi enjektörlü atıksu havalandırma sistemleri (http://mazzei.net/files/MAZ_WW_AirjectionProductSheet.pdf)

Kadzinga (2015), venturi havalandırmalı reaktörlerdeki enerji tüketimi ve oksijen transfer oranları, geometrik olarak benzer havalandırılmış karıştırılmış tanktakilerle

karşılaştırılmıştır. Venturi havalandırmalı kapta oksijen transferi ve enerji tüketimi, çalışma koşulları ve venturi havalandırıcı kurulumu değiştirilerek geliştirilmiştir. Venturi havalandırma işleminin fiili biyoproseslere uygulanabilirliği daha sonra bira mayasının aerobik ekimi üzerinde test edilmiş ve iki havalandırma sistemi karşılaştırılmıştır. Sulu çözeltilerde elde edilen oksijen transfer oranlarının büyük olasılıkla mevcut mikrobik kültürler ile elde edilenlerden farklı olacağı düşünülmektedir.

Artan kirletici yüklerini ve yasal mevzuatlara sıkılaşan deşarj limitlerini karşılamak üzere biyolojik arıtma tesislerinde iyileştirme amaçlı VO_2 ve Vitox gibi jet havalandırma sistemleri (Şekil 2.25) ile başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Bloor 1995). Bununla birlikte atık suların havalandırılması için yeni kabul edilen bir teknikte (Dong ve ark. 2012) blower veya hava kompresörü kullanımını ortadan kaldırarak bunun yerine aktif çamurun havalandırılması için bir venturi enjektörünü kullanmışlardır.



Şekil 2.25. Vitox jet havalandırma sistemi (http://www.enviropro.co.uk/entry/39622/BOC/Vitox-highvelocity-jet-oxygenation-process/#)

Bölüm 2.2.7'de MBR'lerde havalalandırmayla ilişkili membran kirlenmesi çalışmaların çoğunlukla havalandırma yoğunluğunu, havalandırma rejimini ve hava kabarcık boyutunun optimizasyonunu ele aldığı belirtilmişti. MBR işletmesinde iki ayrı haznede ince ve kalın kabarcık havalandırması gibi sistemde ilave ünite ve ilk yatırım maliyeti gerektirecek çözümlere gerek kalmadan hem yüksek oksijen transfer verimliliği hem de yüksek membran yüzey temizleme verimini beraber sağlayabilen bir sistem MBR işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir (Kayaalp ve ark. 2017).

Düşük ilk yatırım maliyeti, basit yapısı ile kolayca kurulumunun yapılabilmesi özellikle de harici enerjiye ihtiyaç duyulmaması gibi avantajlarından biyolojik arıtma tesisleri için başarılı bir çözüm olarak hali hazırda kullanılmaktadır. Batık MBR'lerde havalandırma için venturi enjektörlerinin kullanılması ile blower kullanılan mevsut konfigürasyonlara nazaran iki noktada avantaj sağlanabilir. Bunlardan ilki, özellikle 15 g/L'ye varan yüksek MLSS konsantrasyonlarının kullanıldığı MBR'ler için yüksek oksijen transfer veriminin artırılmasıdır. İkincisi ise membran kirlenmesini azaltmak için membran yüzeyini sıyıracak belirli bir kayma gerilmesinin elde edilmesidir. Venturi enjektörü içerisinden geçirilerek MBR'ye verilecek yüksek hızlı hava su karışımlı jet daha iyi bir membran yüzey temizlemesi için gerekli yüksek türbülanslı ortamı sağlayabilir (Kayaalp ve ark. 2017). Ancak venturi enjektörünün hem yüksek oksijen transfer verimliliği hem de yüksek membran yüzey temizleme verimi elde etmek için kullanıldığı ve gerçek ölçekli uygulamalara örnek teşkil edecek bir batık MBR konfigürasyonu bulunmamaktadır.

3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde tez çalışması kapsamında yapılan laboratuvar çalışmaları (difüzör ve reaktör tasarımı, venturi konfigürasyonları, kurulan deney düzeneği vb.) anlatılmaktadır. Laboratuvar çalışmaları genel olarak iki aşamadan oluşmuştur. Çalışmanın amacı klasik bir batık MBR'den farklı olarak, biyokütlenin oksijen ihtiyacı, reaktörün karışımı ve membran yüzeyini temizlemek için gerekli havalandırma ihtiyacının sisteme entegre edilen bir venturi enjektörü ile karşılanması ve venturi enjektörü entegre edilmiş batık MBR sisteminin blower kullanılan sistemle kıyaslaması olduğu için, her iki sisteme de uygun bir difüzör ve reaktör tasarımı ile uygun venturi enjektörü konfigürasyonunun belirlenerek MBR sisteminin işletilmeye başlaması, laboratuvar çalışmasının ilk aşaması olmuştur. İkinci aşamada her iki sistemin havalandırma, membran kirlenmesi ve arıtma performansları açısından değerlendirilmesi için yapılan çalışmalardır. Bu aşamada önce laboratuvarda hazırlanan sentetik atıksu için sonrasında ise gerçek atıksu için MBR sisteminde çeşitli biyokütle karakterleri (AKM, UAKM, EPS, SMP vb.), çeşitli işletim şartlarında (havalandırma debisi, işletme akısı) membran tıkanma eğilimleri ve KOİ, NH_4-N, NO_3-N ve PO_4-P gibi atıksu parametrelerinin giderim verimlerinin belirlenmesinden oluşmaktadır.

3.1. Deney Düzeneği

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında, batık bir MBR'de venturi enjektörü kullanılarak membran kirlenmesinin gözlenmesi amacıyla Şekil 3.1'de genel görünümü verilmiş olan deney düzeneği tasarlanmıştır.

Deney düzeneğinde iki ayrı havalandırma sistemi ile havalandırma yapılabilmektedir. Difüzör sisteminden önce havalandırma hatları üzerine yerleştirilen vanalar vasıtasıyla MBR havalandırması hem venturi (venturi enjektörlü havalandırma) hem de blower sistemi (blowerlı havalandırma) ile havalandırılabilmektedir. Her iki havalandırma hattı üzerine yerleştirilen rotametreler ile hava debisi ayarlanabilmektedir. Blower sisteminde venturi havalandırma hattı üzerindeki vana kapatılarak MBR havalandırması difüzör sistemine blower ile doğrudan hava verilerek yapılmaktadır. Venturi sisteminde blower hattı üzerindeki vana kapatılmakta ve sirkülasyon pompası ile MBR içerisindeki biyolojik süspansiyon venturi enjektöründen geçirilerek difüzör sistemiyle MBR'ye verilmektedir. Venturi enjektöründe oluşan atmosfer basıncından

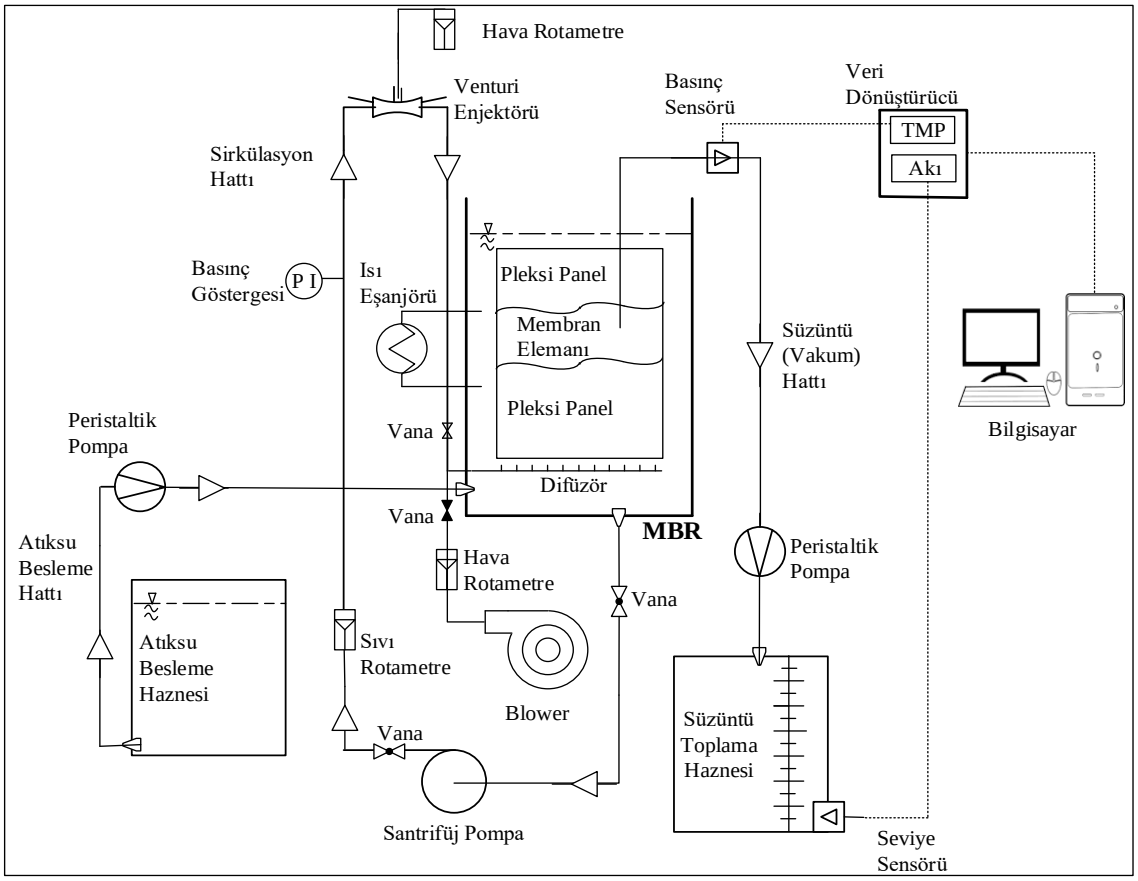
düşük basınç nedeniyle hava venturi enjektöründen içeri girmekte, oluşan hava süspansiyon karışımlı jet akımı difüzör vasıtasıyla membran modülüne yönlendirilmektedir. Sirkülasyonun optimum değerlere ayarlanabilmesi için ise Siemens V20 model sürücü kullanılarak optimum sirkülasyon debisi ayarlaması yapılmıştır. Çalışmada sirkülasyon debisi 10 L/dk. civarında tutulmuştur.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin genel görünümü

MBR'e atıksu beslemesi için analog peristaltik pompa kullanılmıştır. Membrandan süzüntü suyunun çekilmesi için ise iki yönlü ve devir ayarı dijital olarak ayarlanabilen peristaltik pompa kullanılmıştır. MBR içerisinde arıtılan atıksu vakum pompası yardımıyla membrandan çekilerek süzüntü tankında toplanmaktadır. Süzüntü tankı 25x25x50 ebatlarında ve tabanında seviye sensörü bulunmaktadır. Seviye sensörü takılmış süzüntü tankı vasıtasıyla MBR'den elde edilen süzüntü suyu (akı) miktarları bilgisayar ortamında kayıt altına alınmakta ve membran akısını hesaplamak için kullanılmaktadır . Membran çıkışı ile peristaltik süzüntü pompası arasına yerleştirilen basınç sensörü ile TMP ölçümleri için kullanılmıştır.

Difüzör tasarımı, venturi enjektörünün entegrasyonu, reaktör tankı ve membran modülünün teşkili alt bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır. Deney düzeneğinin sistemin şematik görünümü Şekil 3.2'deki gibidir.

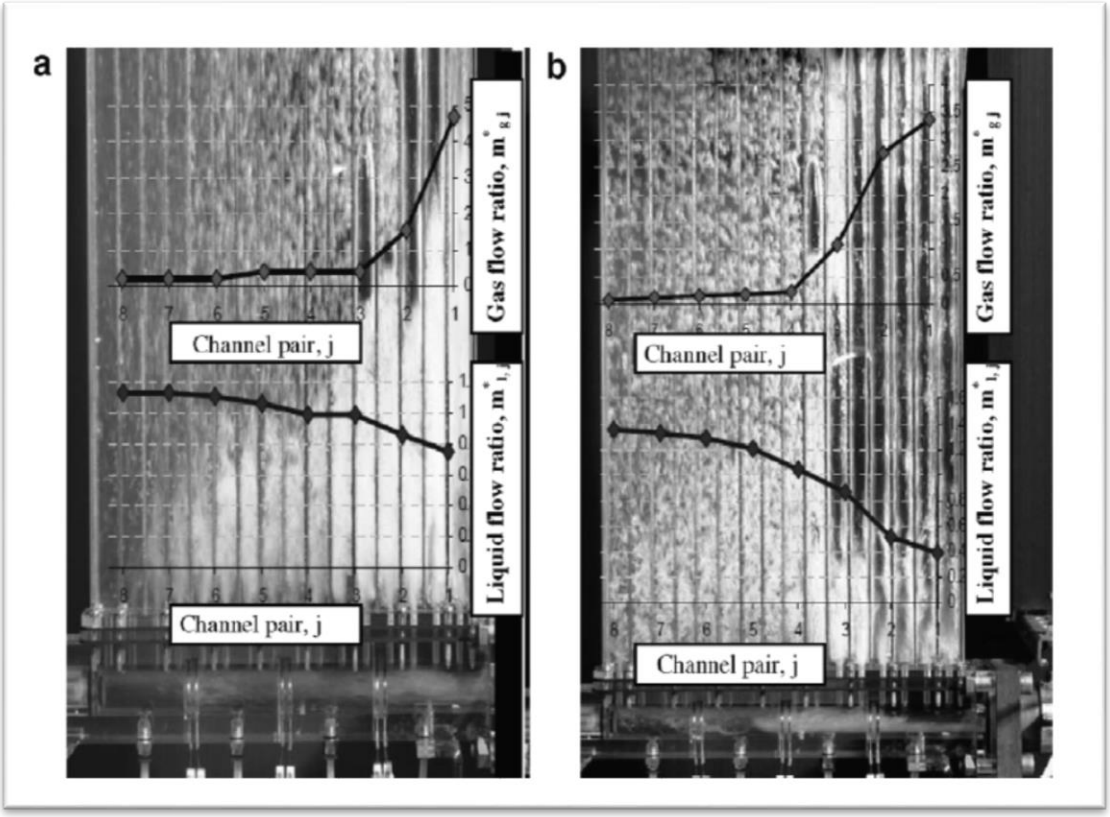


Şekil 3.2. Deney sisteminin şematik görünümü

3.1.1. Difüzör Tasarımı

Hava ve su karışımının bir difüzör sistemindeki hareketi ile ilgili literatürde çok az çalışma bulunduğu görülmüştür. İki fazlı (hava–su) bir akımın bir kaç çıkışı bulunan bir manifolddaki faz ayrımı çok karmaşık bir yapıdadır. Marchitto ve ark. (2008), bugüne kadar iki fazlı bir akımın ana kanal birleşimlerindeki dağılımını tahmin etmenin genel bir yolunun bulunmadığını belirtmişlerdir. Şekil 3.3a' da görüldüğü gibi havanın büyük bir kısmı ilk üç çift delikten çıkarken, akım yönünde daha sonraki deliklerden çıkan hava akımının çok azaldığı görülmektedir. Akım hızı yaklaşık beş katına çıkarıldığında ise sadece 4. çiftteki delikten çıkan hava debisinin biraz arttığı, geri kalanlarında pek bir değişiklik olmadığı görülmektedir. (Şekil 3.3b).

Venturi enjektöründen çıkan hava ile karışık jet akımını üniform bir şekilde bir membran modülünün her iki yüzeyine yönlendirmek için uygun bir difüzör ve reaktör tasarımı yapmak gerekir.

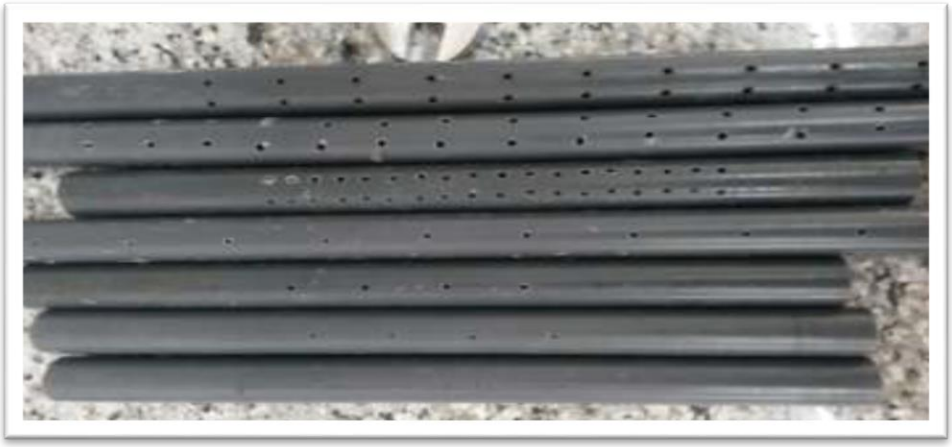


Şekil 3.3. Yüksek hızlarda manifold üzerindeki kanal çiftlerindeki gaz ve sıvı debileri (Vsl = 1.20 m/s, Vsg = 1.50 a) ve 5.25 m/s b)). Orifice çapı d = 4 mm (Marchitto ve ark. 2008)

Pratikte uygulandığı şekliyle sadece blower kullanılarak yapılan havalandırmada eşit orifis çaplarında havanın difüzör boyunca üniform bir şekilde çıktığı gözlenmiştir. Küçük orifis çaplarında blower ile yapılan havalandırmada herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Ancak yeterince büyük olmayan orifis çaplarıyla oluşturulan bir difüzörü ventüri sisteminde kullanmak mümkün olmamıştır. Böyle bir düzenlemede venturinin boğaz kısmında negatif yerine pozitif basınç oluşmakta ve venturi enjektörü amacına uygun olarak kullanılamamaktadır. Daha büyük ve eşit çapta orifis çapları kullanılarak oluşturulan difüzörlerde temiz su ile yapılan ilk denemelerde havanın büyük kısmının sadece ilk iki üç sıradaki deliklerden çıktığı gözlenmiştir. Temiz su ile yapılan ön çalışmalarda kullanılan difüzörler Şekil 3.4.' de gösterilmektedir.

Hava akımının difüzör boyunca üniform bir şekilde dağılımını sağlamak için orifis çapının akım yönünde arttığı bir difüzör tasarlanmış ve reaktöre entegtre edilmiştir (Şekil 3.5). Bu şekilde venturi enjektöründen çıkan hava–su karışımı oldukça üniform bir şekilde difüzör boyunca dağıtılmıştır. Ancak bu çalışmada amaç batık bir MBR'de venturi ve blower ile yapılan havalandırma ve membran kirlenmelerini karşılaştırmak

olduğundan, bunu sağlıklı bir şekilde yapabilmek için aynı reaktör ve difüzör sistemini kullanmak gerekmektedir.

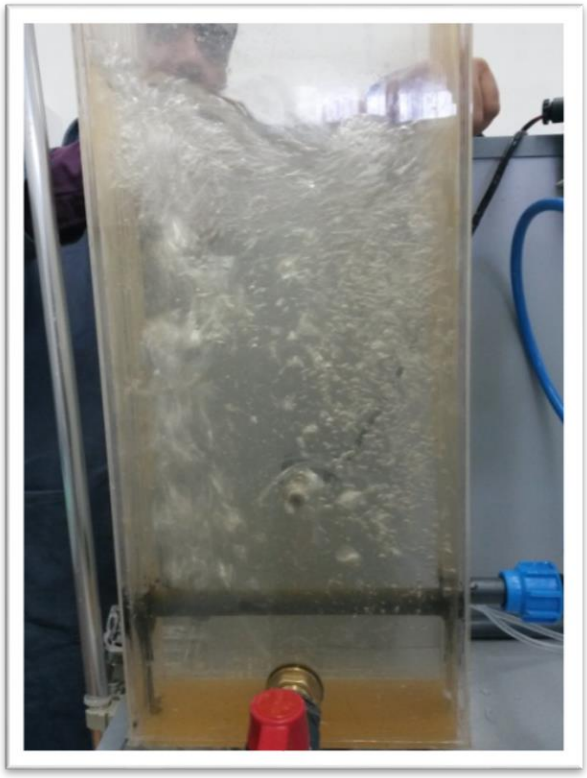


Şekil 3.4. Kullanılan difüzörler



Şekil 3.5. Akım yönünde artan orifis çaplarının kullanıldığı difüzör boyunca hava-su karışımının dağılımı

Venturi enjektörü için optimize edilmiş ve reaktöre takılmış olan difüzöre blower ile hava verildiğinde, daha büyük olan son deliklerden daha fazla hava çıktığı görülmüştür (Şekil 3.6). Bunun üzerine hava ve suyun eşit dağılımını sağlamak amacıyla farklı bir tasarıma gidilmiştir. Bu amaçla gelen akımı dört eşit parçaya ayıracak bir difüzör sistemi tasarlanmıştır (Şekil 3.7).



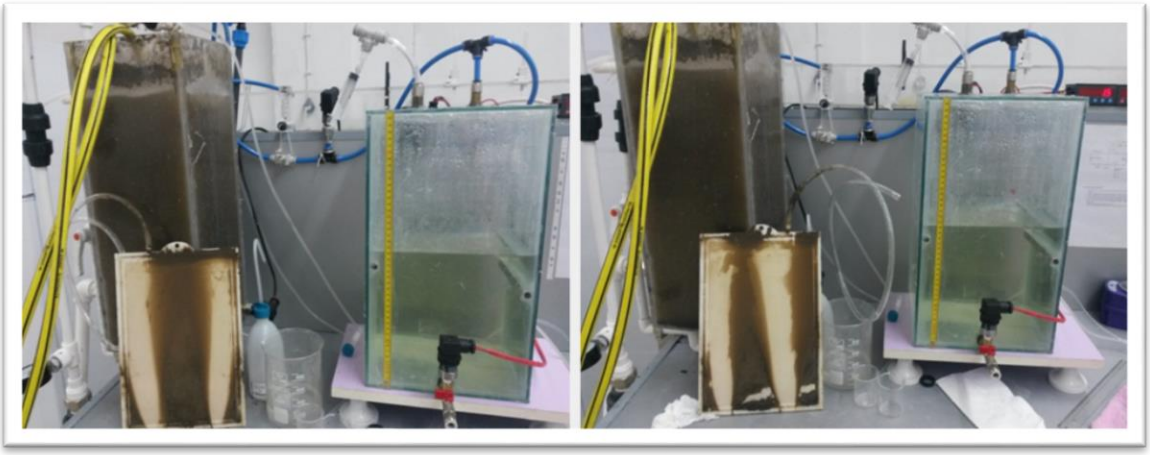
Şekil 3.6. Akım yönünde artan orifis çaplarının kullanıldığı difüzör boyunca hava debisinin dağılımı



Şekil 3.7. Dörtlü nozzle şeklinde difüzör tasarımı

Ancak, bu dörtlü nozzle sisteminden çıkan jet akımı bütün membran yüzeyine üniform dağıtılamamıştır. Membran yüzeyinde üniform olmayan bir kirlenme meydana

gelmiştir (Şekil 3.8). Bunun üzerine orifisli difüzör sisteminin kullanılmasına karar verilmiş, fakat difüzör baş ve sonundaki orifis çapları arasındaki fark azaltılarak hem venturi hem de blower sistemlerinde daha üniform bir hava çıkışı elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.8. Dörtlü nozzle difüzör sisteminde membran yüzeyinde kirlenme

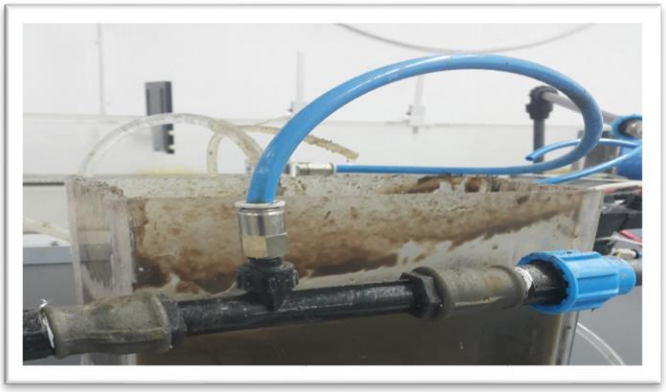
3.1.2. Venturi Enjektörü Konfigürasyonları

Çalışmada kullanılan venturi enjektörünün (Şelkil 3.9) üretici firma tarafından belirtilen özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

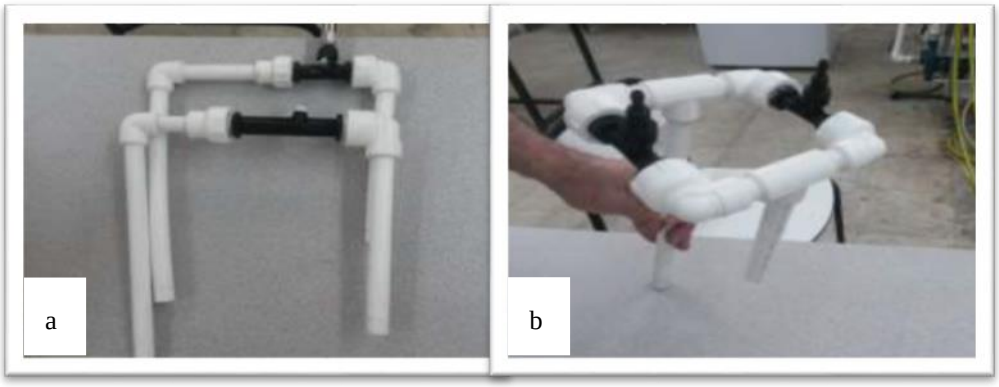
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan venturi enjektörünün özellikleri

Özellik	**Değer**
Üretici	Guangzhou Quanju Co.
Giriş – Çıkış çapları (inç)	3/4
Gaz giriş çapı (inç)	1/25
Giriş su basıncı (Mpa)	0.25-0.50
Debi (m^3/st)	1-3
Vakum debisi (Nm^3/st)	7.5-10
Uzunluk (mm)	152

MBR işletmeye alınmadan önce çeşitli venturi konfigürasyonları denenmiştir. Tekli (Şekil 3.10a) ve paralel (Şekil 3.10b) venturi konfigürasyonları amaca uygun bir şekilde kullanılabilirken, seri bağlı venturi enjektörlerinde problem yaşanmıştır. Seri bağlı konfigürasyonda aradaki mesafenin kısa olması nedeniyle meydana gelen girişim sonucunda venturilerin birinin boğaz kısmında pozitif basınç meydana gelmiştir. Dolayısıyla seri bağlı konfigürasyon amacına uygun olarak kullanılamamıştır.



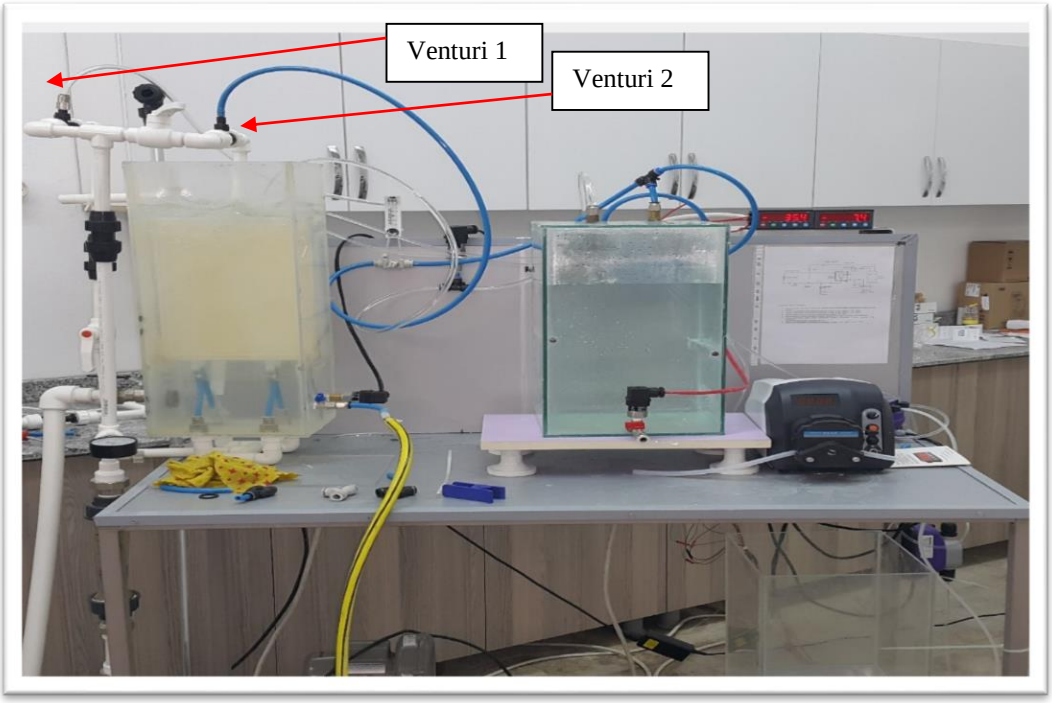
Şekil 3.9. Deney düzeneğinde kullanılan venturi enjektörü



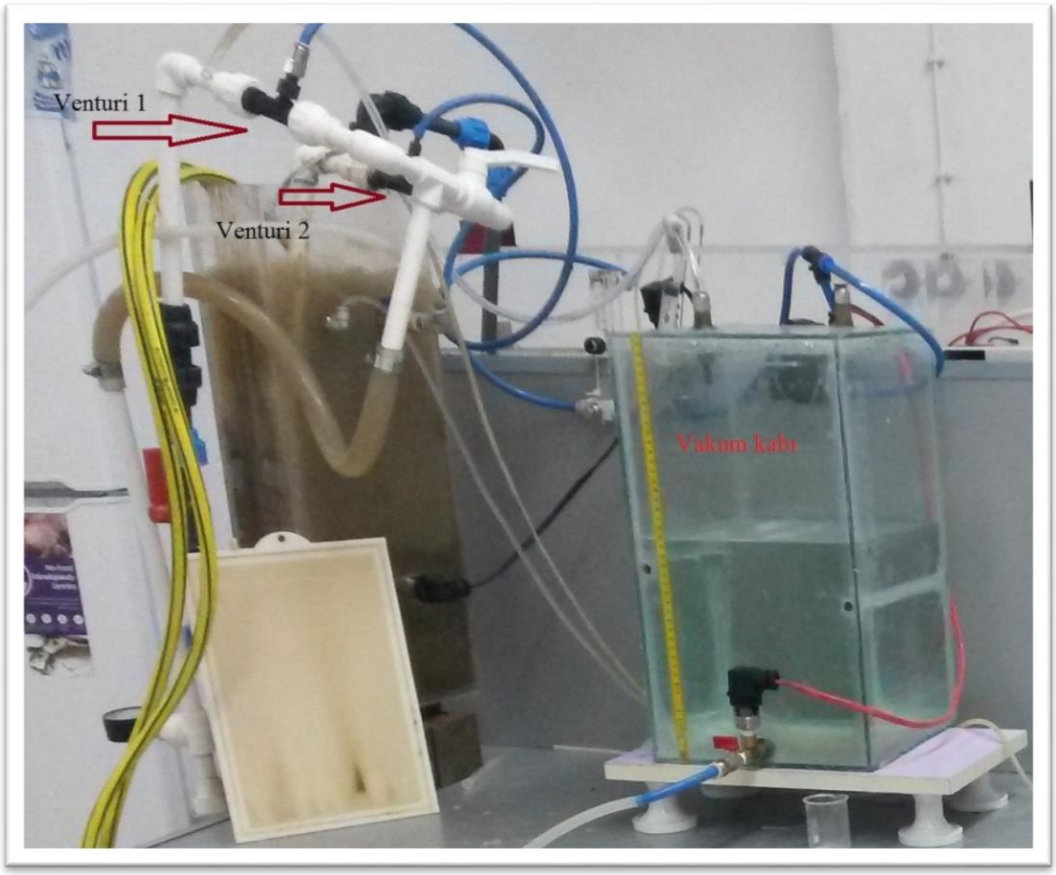
Şekil 3.10. a) Tekli venturi konfigürasyonları b) Paralel bağlı venturi konfigrasyonu

Paralel bağlı konfigürasyonda venturi enjektörlerinin biri süzüntü çekimi amacıyla diğeri de MBR'nin hava ihtiyacının karşılanmasında ve membran yüzeyinin temizlenmesinde kullanılmıştır (Şekil 3.11). Paralel bağlı konfigürasyon hava ve vakum miktarlarının birbirinden bağımsız olarak (Şekil 3.12) ayarlanabilmesi açısından oldukça avantajlı olmaktadır. Paralel bağlı venturi enjektörleri ile bir sirkülasyon pompası kullanılarak batık bir MBR'de süzüntü pompası ve blower ihtiyacını ortadan kaldırmak mümkündür. Bu şekilde 50 mbar sabit vakum basıncında sistem başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır.

Ancak bu çalışmada amaç venturi ve blower sistemlerini karşılaştırmak olduğundan ve bu karşılaştırma açısından süzüntü çekim yönteminin (sabit basınç–sabit akı) bir önemi bulunmadığından membran kirlenmesi çalışmalarında sabit akı yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla biyokütlenin karışımı ve havalandırması için sistemde sirkülasyon hattı üzerine yerleştirilmiş tek bir venturi enjektörü kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Paralel bağlı venturi ile süzüntü pompasına ihtiyaç duyulmadan membran filtrasyonu



Şekil 3.12. Paralel bağlı venturilerin MBR'de kullanımı

3.1.3. Reaktör Tankı

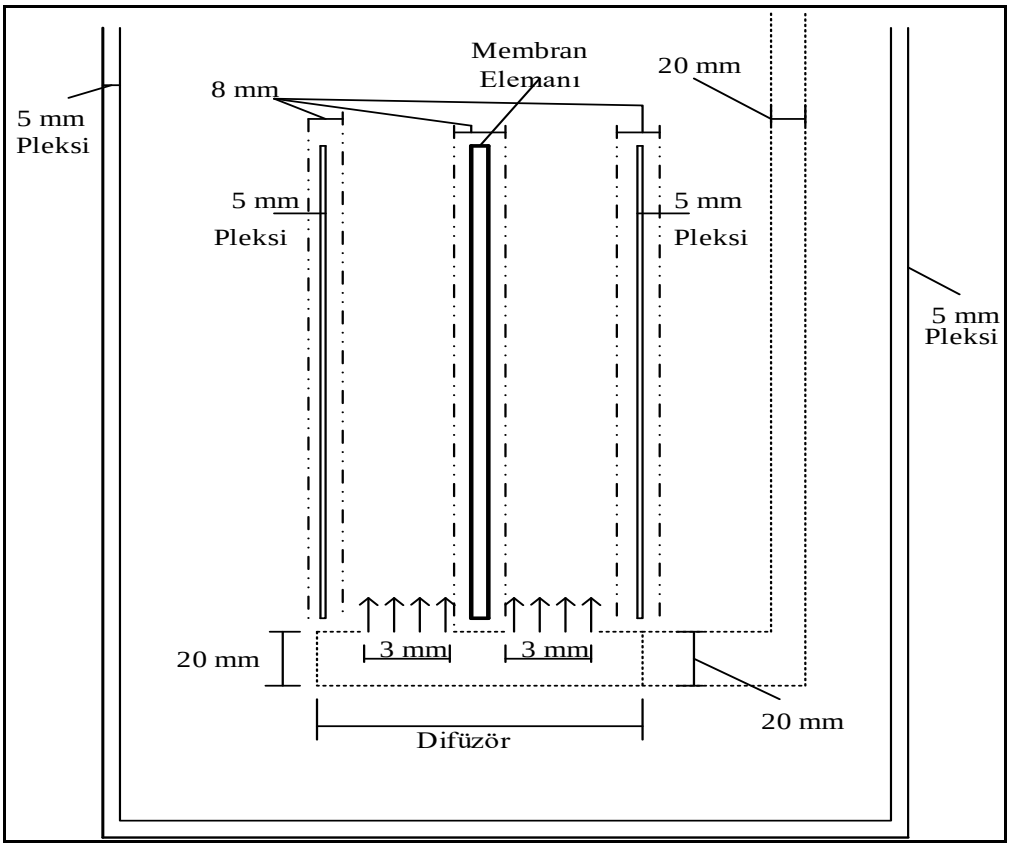
Çalışmada 62x10x22 cm^3 ebatlarında pleksiglas malzemeden imal edilmiş olan reaktör aerobik proseslere göre dizayn edilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Pleksiglasdan imal edilmmiş olan MBR tankı

Gerçek bir MBR sisteminde yan yana bulunan panellerin oluşturacağı duvar etkisini göz önüne almak amacıyla tasarlanan reaktörde yan yana üç membran paneli konulacak şekilde düzenleme yapılmıştır. Ancak deneysel çalışmalarda sadece ortaya bir membran paneli konulmuş, ön ve arkasına ise membran paneli ile aynı boyutlarda pleksiglass plakalar yerleştirilmiştir (Şekil 3.14.). Böylelikle panel ile aynı boyutta iki adet pleksi konularak gerçek bir MBR'nin daha iyi temsil edilmesi sağlanmıştır.

Kullanılan difüzörün gözenek çapları daha önceki çalışmalardan edinilen tecrübe doğrultusunda 3 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca MBR tankının alt kısmına 3 adet küçük çıkış vanası konumlandırılmıştır. Bu vanalar yardımıyla seviye kontrolü, peristaltik pompa yardımıyla sisteme atıksu beslemesi verilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca MBR içerisindeki biyolojik süspansiyonun sirkülasyonunu sağlayan sirkülasyon pompasına bağlantı için bir de büyük çıkış vanası yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14. MBR tankının şematik kesiti

3.1.4. Membran Elemanı

MBR'de kullanılan membran SINAP firmasından temin edilmiştir. Membran özellikleri aşağıda Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Çalışmada kulanılan membran elemanın özellikleri

Özellik	**Değer**
Membran Elemanı	SINAP-10-PVDF
Efektif Alan (m^2)	0.1
Boyutlar, En*Boy*Kalınlık (mm)	220*320*6
Ağırlık (kg)	0.4
Gözenek Çapı (µm)	0.1
Üretim (L/gün panel)	40-60
Havalandırma hacmi (L/dak panel)	6
pH çalışma aralığı	3-12
Çıkış Bulanıklığı (NTU)	1.0
Çıkış AKM (mg/L)	1
Hidrofobik/Hidrofilik	Hidrofilik

3.2. Blower ve Venturi Havalandırma Sistemlerinde Oksijen Transfer Katsayıları

Deney düzeneğinin oluşturulmasından sonra blower ve venturi sistemlerinin temiz suda standart oksijen transfer hızı (SOTR) ve standart oksijenlendirme verimleri (SOE) belirlenmiştir. Deneyde oksijen transfer katsayılarını belirleyebilmek için her iki sistemle ayrı ayrı havalandırılan tabanında dört adet hava girişi bulunan, 30 litrelik (25*25*45 cm) tank kullanılmıştır. 150 mg/L sodyum sülfat ve 1 mg/L kobalt klorür kullanılarak tank içerisindeki suyun oksijen konsantrasyonu sıfırlanmıştır (Dong ve ark. 2012). Tank içerisinde 3 L/dk havalandırma debisinde her iki sistem içinde çözünmüş oksijen ve sıcaklık değerleri 30 saniyede bir ölçülerek kaydedilmiştir.

3.3. Sentetik Atıksu ile Yapılan Çalışmalar

3.3.1. Aşı Çamuru ve Aktif Çamur Aklimasyonu

MBR'de kullanılacak aşı çamurunun başlangıçta Dicle Üniversitesi atıksu arıtma havuzlarından alınması planlanmış, ancak havuzlardaki anaerobik koşullar ve çamur alınmasının güç olması nedeniyle gerekli aşı çamuru Gaziantep Su ve Kanalizasyon İşleri İdaresi (GASKİ) Merkez Atıksu Arıtma Tesisi aerobik çamur geri devir hattından alınmıştır (Şekil 3.15).

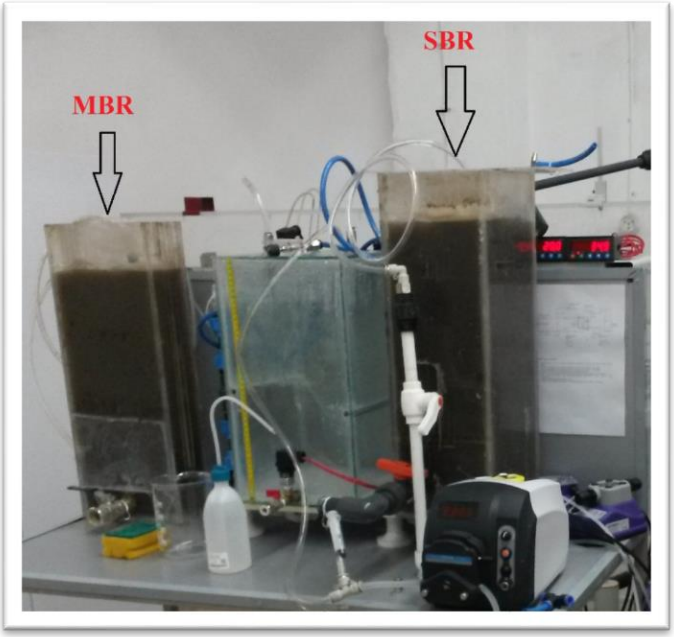


Şekil 3.15. GASKİ Merkez Atıksu Arıtma Tesisi çamur devir-daim pompa istasyonu ve aşı çamurunun alındığı hat

Literatürdeki önceki bir çalışmadan (Nopens ve ark. 2001) alınan ve Çizelge 3.3' de bileşenleri verilen sentetik atıksu beslemesi kullanılarak önce kesikli bir rektörde aklime edilen biyokütle zamanla tamamıyla MBR'ye alınmıştır (Şekil 3.16).

Çizelge 3.3. Sentetik atıksu bileşenleri Nopens ve ark. (2001)

	mg/L	COD mg/L	N mg/L	P mg/L
Kimyasal Bileşikler				
Üre	91.74	23.22	42.81	0
NH_4Cl	12.75	0	3.52	0
Na-asetat	79.37	79.39	0	0
Pepton	17.41	17.41	0.67	0
$MgHPO_4.3H_2O$	29.02	0	0	5.14
KH_2P0_4	23.4	0	0	3.14
$FeSO_4.7H_2O$	5.80	0	0	0
Gıda Maddeleri				
Glikoz	122.00	122.00	0	
Süt tozu	116.19	116.19	6.95	1.14
Maya	52.24	52.24	6.28	
TOPLAM		410.45	60.23	9.42
Eser Elementler	mg/L	mg metal /L		
$Cr(NO_3)_3.9H_2O$	0.770	0.100		
$CuCl_2.2H_2O$	0.536	0.200		
$MnSO_4.H_2O$	0.108	0.035		
$NiSO_4.6H_2O$	0.336	0.075		
$PbCl_2$	0.100	0.075		
$ZnCl_2$	0.208	0.100		



Şekil 3.16. Biyokütle aklimasyonu

3.3.2 Sentetik Atıksu ile Membran Biyoreaktör İşletimi

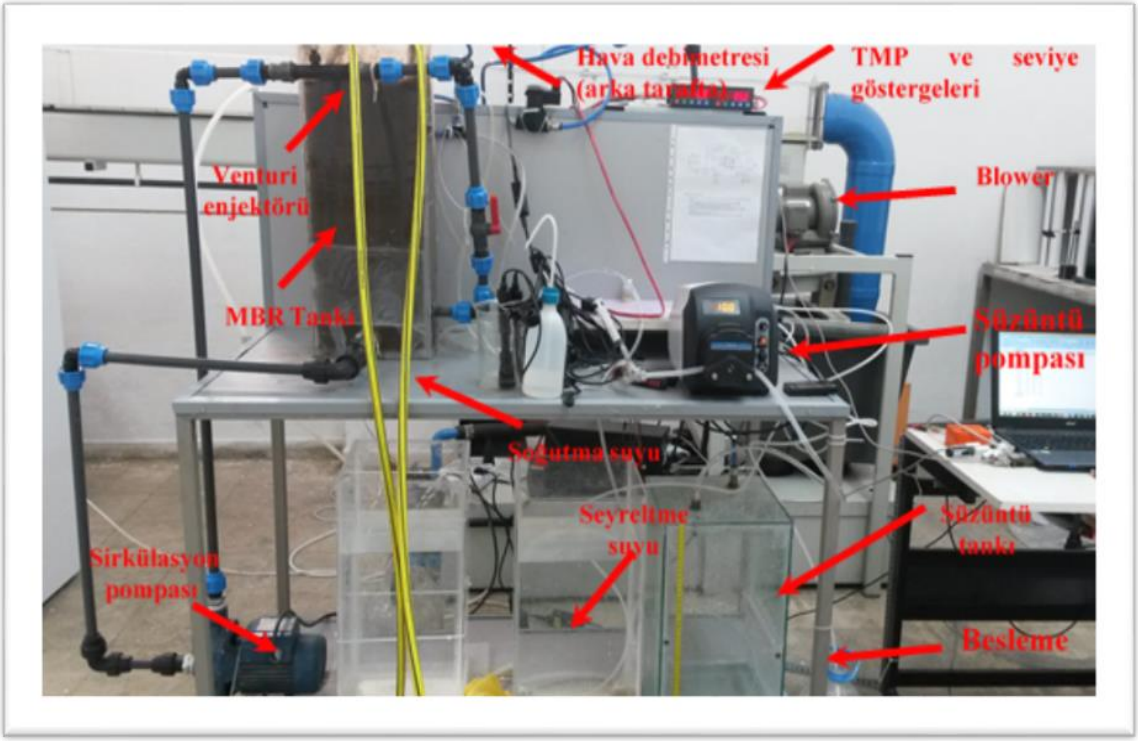
MBR aklimasyon süresi (yaklaşık bir hafta) dahil 40 gün boyunca Çizelge 3.3'de bileşenleri verilen sentetik atıksu ile 18 L/m^2.st sabit akıda kesikli filtrasyon (10 dk. açık/1 dk. kapalı) şeklinde blower ile havalandırılarak çalıştırılmıştır. İşletme süresince MBR takibi için gerekli parametrelerin ölçümü yapılmıştır. AKM, UAKM, pH, çözünmüş oksijen değerlerinin yanı sıra belirli aralıklarla arıtma performansına yönelik parametrelerin de ölçümü yapılmıştır.

Kullanılan membran elemanın üretici firma tarafından elde edilebilecek akı değeri 40-60 L/gün.panel (16.7-25 L/m^2.st) olarak tavsiye edildiğinden 8 L/m^2.st sabit akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde işletilmiştir. Membran kirlenmesini gözlemlemek için yapılan deneylerde bu değerler değiştirilse de deney sonlarında MBR bu işletme şartlarına tekrar getirilmiştir. Çalışma boyunca membran üzerinde biriken ve kazara dökülmeler hariç reaktörden çamur atılmamıştır.

Venturi ile yapılan çalışmalarda reaktörde sıcaklık artışları gözlendiği için reaktör içerisinden geçirilen çeşme suyu vasıtasıyla bir soğutma sistemi kurulmuştur.

3.3.3. Sentetik Atıksu Membran Kirlenmesi Çalışmaları

Batık MBR sisteminde blower ve venturi enjektörü kullanımının oksijen transferi ve membran kirlenmesi üzerindeki etkileri aşağıda gösterilen deney düzeneğinde çalışılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Sentetik atıksu çalışmalarında membran kirlenmesinin çalışıldığı deney düzeneği

İşletme akısı 18 L/m^2.st olarak seçilse de membran kirlenmesini gözlemlemek için yapılan deneylerde olumsuz senaryolardaki (aşırı yükleme gibi) sistem performansının belirlenebilmesi için üç farklı akıda 18 L/m^2.st (düşük), 32 L/m^2.st (orta) ve 50 L/m^2.st) ve sürekli filtrasyon yapılmıştır. Hem blower hem de venturi havalandırma sistemi için bu akı değerlerinde iki farklı havalandırma debisinde çalıştırılmıştır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Sentetik atıksu ile membran kirlenmesini gözlemlemek amacıyla yapılan deneyler

		Akı (L/m^2.st)				
		18 (Düşük)	32 (Orta)	50 (Yüksek)		
Havalandırma sistemi	Blower	✓	✓	✓	3	**Havalandırma debisi (L/dk.)**
	Venturi	✓	✓	✓		
	Blower	✓	✓	✓	6	
	Venturi	✓	✓	✓		

Sabit akı altında çalıştırılan bir MBR'de kullanılan membranların kirlenme düzeyini takip etmek amacıyla çoğunlukla TMP ölçülmektedir. Bu çalışmada da

membran kirlenmesini takip etmek amacıyla TMP ölçümleri anlık kaydedecek sistem kurulmuş ancak teknik bir arızadan ötürü kaydedilememiştir. TMP ölçümleri 15 dakikada bir okuma yapılarak kayıt edilmiştir. Kullanılan membranın üreticisi maksimum işletme basıncını 300 mbar olarak tavsiye etmiştir. Kısa süreli membran kirlenmesinin ölçüldüğü bu deneylerde deney sonlandırma kriteri, sistemin 6 saat çalıştırılması veya sistemin 250 mbar TMP basıncına ulaşılması olarak belirlenmiştir. Buna göre sürekli filtrasyon sonucunda, filtrasyon süresi 6 saate ulaştığında veya TMP 250 mbar'a ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Sabit akı altında çalıştırılan MBR'lerde her ne kadar akının sabit olduğu kabul edilirse de TMP yüksek değerlere ulaştığında akıyı istenilen değerde korumak zorlaşmakta, bazen de mümkün olamamaktadır. Bu çalışmada yüksek süzüntü akıları da denendiği için TMP'nin yanında akı ölçümleri de yapılmıştır.

Bütün deneylerde aynı test membranı kullanılmıştır. Her deney sonrasında membran yüzeyi çeşme suyu altında bir sünger ile temizlenerek 4000 mg/L NaOCl ve 1000 mg/L NaOH içeren bir çözeltide 2 saat bekletilmiştir. Daha sonra yine çeşme suyu ile durulanarak bir sonraki deneyde kullanılmıştır.

Bunlara ek olarak blower ve venturi sistemlerini karşılaştırmak amacıyla deneyler MBR'de çözünmüş oksijen, pH ve sıcaklık yine 15 dakikada bir ölçülmüştür. Bununla birlikte blower ve venturi havalandırma sistemlerinin karşılaştırmalı çalışması sırasında bu parametrelerin her biri için maksimum 6 saatlik deneysel değerler kısmı 4. Bölüm ve Ekler bölümlerinde sunulmuştur.

3.4. Gerçek Atıksu ile Yapılan Çalışmalar

Sentetik atıksu ile yapılan çalışmalarda elde edilecek bulguların gerçek atıksu kullanımı durumunda ne şekilde gözleneceğini belirlemek amacıyla daha önce sentetik atıksu ile yapılan çalışmalar tekrarlanmıştır. Daha önce sentetik atıksu için çalışılan akılar gerçek atıksu çalışmaları için de denenmiştir.

3.4.1. Aşı Çamuru ve Atıksu

MBR aşı çamuru beslemesi yine GASKİ Atıksu Artıma Tesisinin havalandırma havuzu geri devir hattından alınmıştır. Gerçek atıksu çalışmalarında kullanılan atıksu Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (DİSKİ) Atıksu Artıma Tesisi ilk çökeltim havuzu çıkışından alınmıştır (Şekil 3.18-3.19).



Şekil 3.18. DİSKİ İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi ön çökeltim havuzu



Şekil 3.19. DİSKİ İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi ön çökeltim havuzundan gerçek atıksu alımı

Haftada iki defa alınan atıksu, +4 °C'ye ayarlı atıksu besleme dolabında muhafaza edilerek MBR'ye verilmiştir. Giriş atıksu özellikleri aşağıda Çizelge 3.5'de verilmektedir.

Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan gerçek atıksuya dair bazı karakteristikler

Parametre (mg/L)	En Düşük	En Yüksek	Ortalama
KOİ	280	458	334
NH_4^+-N	25.6	48.6	40.6
PO_4^--P	4.1	9.8	6.4
$SMP_{Protein}$	25.2	72.8	46.3
$SMP_{Karbonhidrat}$	17.0	43.8	30.3

3.4.2. Gerçek Atıksu Çalışmalarında Membran Biyoreaktör İşletimi

MBR sistemi 90 günden daha uzun bir süre boyunca, sürekli olarak 18 L/m^2.st sabit akıda kesikli filtrasyon (10 dk. açık/1 dk. kapalı) modda çalıştırılmıştır. Biyokütleyi her iki havalandırma alıştırmak için MBR periyodik olarak hem blower hem de venturi ile sürekli havalandırılmıştır. Sistem kirlenme gözlemlerinin yapıldığı deneyler

sonrasında da venturi ile çalıştırıldığından ısı artışlarını dengelemek için sistemde aktif soğutma yapan soğutucu kullanılarak yeni bir soğutma sistemi kurulmuştur. Ancak reaktör sıcaklığı en çok 30°C civarında sabit tutulabilmiş, bu değerin altına inilememiştir. MBR işletimi sırasında membran üzerinde biriken ve kazara dökülmeler hariç reaktörden çamur atılmamıştır. 18 L/m^2.st işletme akısında MBR'nin hidrolik tutma süresi (HRT) 5.6 saattir. Yine MBR takibi için gerekli parametrelerin yanısıra arıtma performansına yönelik parametrelerin de ölçümü yapılmıştır.

3.4.3. Gerçek Atıksu Çalışmalarında Membran Kirlenmesi Çalışmaları

Gerçek atıksu çalışmalarında Şekil 3.20'de kullanılan deney düzeneği kullanılmıştır. Gerçek atıksu çalışmalarında sentetik atıksuda kullanılan düzenekte bazı zorunlu değişiklikler yapılmıştır. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi atıksu muhafaza dolabı eklenmiş, MBR soğutma sistemi değiştirilmiş (Bölüm 3.4.1–3.4.2) ve ihtiyaç olmadığı için seyreltme suyu ünitesi kaldırılmıştır.



Şekil 3.20. Gerçek atıksu çalışmalarında kullanılan deney düzeneği

Daha önce sentetik atıksu çalışmalarında belirtilen teknik arızanın giderilmesi ile yapılan TMP ölçümleri anlık olarak kaydedilmiştir. Deney sonlandırma kriterleri ve

deney membranı kullanımı da yine sentetik atıksu çalışmalarındaki gibi (6 saat veya 250 mbar TMP) belirlenmiştir.

Sentetik atıksu deneylerinde en olumsuz koşulları denemek amacıyla, sürekli filtrasyon uygulanırken, gerçek atıksu çalışmalarında kesikli filtrasyon uygulanmıştır (10 dk. açık/1 dk. kapalı).

3 L/dk. havalandırma debisi blower ve venturi havalandırma sistemleri için tüm akılarda çalışılmıştır. Sentetik atıksu çalışmalarında blower ile 3 L/dk. havalandırma debisinin MBR'nin oksijen ihtiyacını karşılamada yetersiz kalabildiği buna karşılık venturi için ise fazla olduğu tespit edilmiştir. Burada amaç blower ve venturi havalandırma sistemlerinin etkinliklerinin hem membran temizleme hem de oksijenlendirme yeterliliği açısından değerlendirilmesi olduğundan, gerçek atıksu çalışmalarında blower sistemi için 6 L/dk. buna karşılık venturi sisteminde 1.5 L/dk. havalandırma debilerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.6. Gerçek atıksu ile membran kirlenmesini gözlemlemek amacıyla yapılan deneyler

		Akı (L/m^2.st)				
		18 (Düşük)	32 (Orta)	50 (Yüksek)		
Havalandırma sistemi	Blower				1.5	**Havalandırma debisi (L/dk.)**
	Venturi	✓	✓	✓		
	Blower	✓	✓	✓	3	
	Venturi	✓	✓	✓		
	Blower	✓	✓	✓	6	
	Venturi					

Venturi ve blower havalandırma sistemlerinin verimliliğini MBR oksijenasyonu ve membran kirlenme azaltma açısından karşılaştırmak için MBR, her ikisi için de 3 L/ dk. havalandırma debisi farklı akılar altında (18, 32 ve 50 L/m^2.st) çalıştırıldı. Her iki havalandırma sisteminin arıtma verimini belirlemek ayrıca KOİ, NH_4-N, NO_3-N ve PO_4-P ölçümleri ve EPS ve SMP analizleri yapılmıştır.

3.5. Çalışmada Kullanılan Analiz ve Ölçüm Yöntemleri

3.5.1. Konvansiyonel Parametreler

MBR'da pH, sıcaklık ve çözünmüş oksijen konsantrasyonunun ölçümünde Hach HQ40D taşınabilir multimetre kullanılmıştır.

Kimyasal oksjen ihtiyacı (KOİ), amonyak (NH_4-N), nitrat (NO_3-N) ve fosfat (PO_4-P) Hach-Lange ölçüm kitleri ve kuru termostat kullanılarak yine aynı marka spektrofotometre ile ölçülmüştür.

AKM ve UAKM ölçümlerinde standart metotlarda (APHA 2005) belirtilen yöntemler kullanılmıştır.

3.5.2. Protein Ölçüm Yöntemi

Protein konsantrasyonunun ölçümünde Lowry (Frolund ve ark. 1996) metodu kullanılmıştır. 1–100 mg/L arasında hazırlanan Bovine Serum Albumin (BSA) kalibrasyon standardı olarak kullanılmıştır. Kullanılan reaktanlar şu şekildedir;

- Reaktan 1: 143 mM NaOH, 270 mM Na_2CO_3,
- Reaktan 2: 57 mM $CuSO_4$,
- Reaktan 3: 124 mM Na-tartrate,
- Reaktan 4: (Reaktan 1, 2 ve 3'ün 100:1:1 oranında karıştırılmasıyla elde edilir)
- Reaktan 5: (Folin Reaktanı distile su ile 5:6 oranında seyreltilerek elde edilir)

Deney prosedürü şu şekildedir; 1 mL örnek 1.4 mL Reaktan ile karıştırılır. 0.2 mL Reaktan 5 ekledikten sonra, çözelti hızlıca karıştırılır. 45 dk. sonra absorbans BSA standartlarına karşı 750 nm'de spektorfotometrede okunur.

3.5.3. Karbonhidrat Ölçüm Yöntemi

Karbonhidrat konsantrasyonunun ölçümü (DuBois ve ark. 1956) yöntemine göre yapılmıştır. 1–100 mg/L arasında hazırlanan glikoz, kalibrasyon standardı olarak kullanılmıştır. Kullanılan reaktanlar; % 95.5'lik sülfürik asit, %80 (w/w) phenol çözeltisidir. 2 mL örnek üzerine 0.05 mL phenol çözeltisi eklenir. Sonra 5 mL konsantre sülfürik asit hızlıca eklenir. 10 dakika bekledikten sonra, örnekler çalkalanarak 30 ^{0}C'de

20 dk. bekletilir. Daha sonra glikoz standartlarına karşı 490 nm'de spektrofotometrede okuma yapılır.

3.5.4. Hücre Dışı Polimerik Madde Ekstraksiyonu

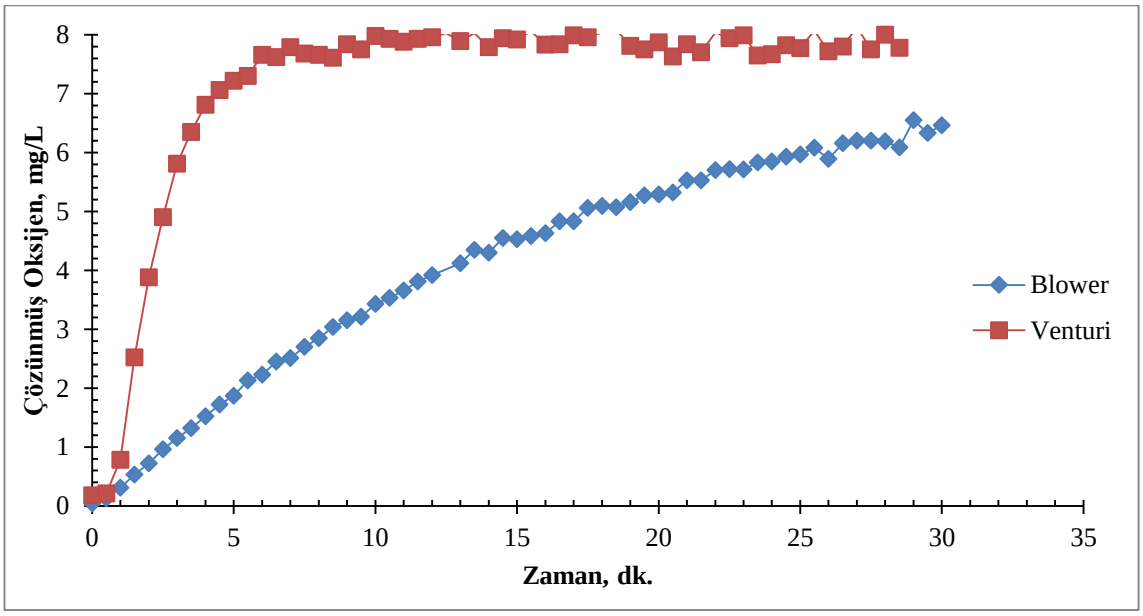
Hücre dışı polimerik maddelerin ekstraksiyonu katyon değiştirici reçine (CER) kullanılarak yapılmıştır (Frolund ve ark. 1996). MBR'den alınan çamur örneği 4000 rpm ve 4 0C'de 15 dakika santrifüj edilmiştir. Tüpün üst kısmında biriken sıvıda (centrate) SMP ölçümü yapılmıştır. Çöken çamur ise extraksiyon çözeltisi ile tekrar süspanse hale getirilmiştir. Ekstraksiyon çözeltisi şu maddeleri içermektedir: 2 mM Na_3PO_4, 4 mM NaH_2PO_4, 9 mM NaCl ve 1 mM KCl.

Çamur süspansiyonu bir erlenmayere alınarak 75 g CER/g UAKM oranında katyon değiştirici reçine (Dowex 50x8, 20-50 mesh in Na form) eklenmiştir. Ekstraksiyon manyetik karıştırıcıda 900 rpm ve 4 0C'de karıştırılarak yapılmıştır. Daha sonra santrifüjde 4000 rpm'de 1 dk. santrifüj edilerek CER ve çamur süspansiyonu birbirinden ayrılmıştır. Santrifüj sıvısı (centrate) tekrar 15 dk. santrifüj edilerek elde edilen sıvıda EPS protein ve karbonhidrat analizleri yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Blower ve Venturi Sistemlerinde Oksijen Transfer Katsayıları

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere venturi sisteminin doygunluk konsantrasyonuna çok daha erken ulaştığı görülmektedir. Örneğin tank içerisinde 7 mg/L çözünmüş oksijen konsantrasyonuna blower sisteminde 30 dk.ikadan fazla zaman geçmesi gerekirken venturi 5'inci dk.ikadan önce bu değere ulaşılmıştır.



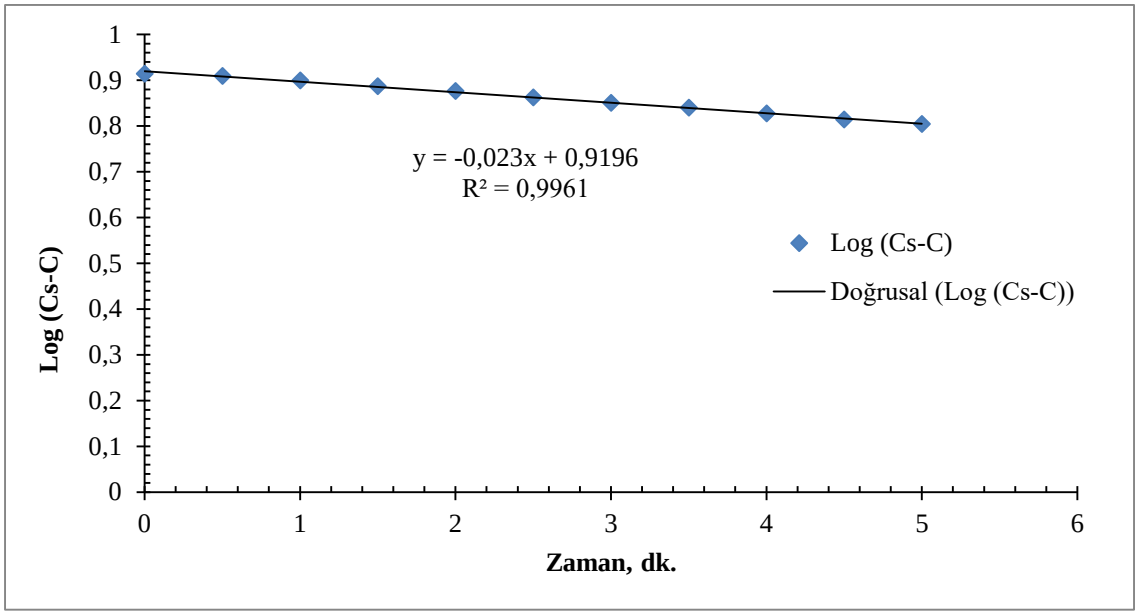
Şekil 4.1. 3 L/min hava debisinde venturi ve blower sistemleri için çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi

Oksijen transfer oranı şu şekilde tanımlanmaktadır (Dong ve ark. 2012);

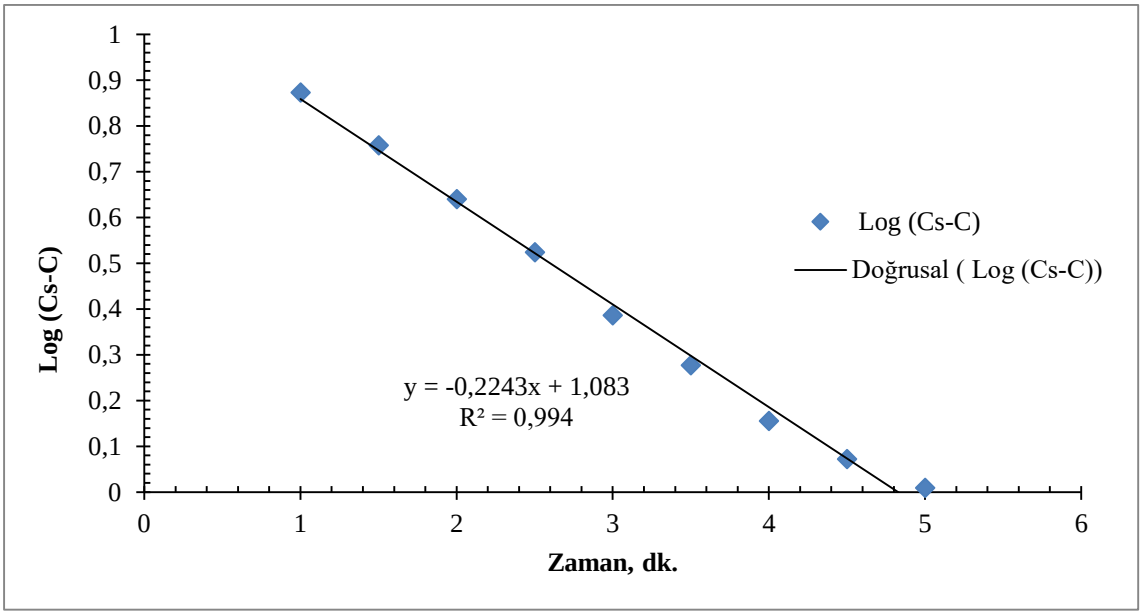
$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C_s - C) \qquad (4.1)$$

burada "C" sudk.i oksijen konsantrasyonunu (mg/L), "C_s" çözünmüş oksijenin doygunluk konsantrasyonunu (mg/L), "t" zamanı (st) ve "K_La" toplam kütle transfer katsayısını (1/st) ifade etmektedir.

Toplam oksijen transfer katsayısını (K_La) belirlemek amacıyla blower ve venturi sistemlerinde doygunluk fark konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Doygunluk fark konsantrasyonu (Cs-C) değişimi (Blower)



Şekil 4.3. Doygunluk fark konsantrasyonu (Cs-C) değişimi (Blower)

K_La, konsantrasyon farkının zamana göre değişimini gösteren yarı logaritmik grafiğin eğimi olarak tanımlanabilmekte ve "$(K_La)_{20}$" 20°C' de toplam kütle transfer katsayısı ve "T" ise su sıcaklığı olmak üzere 4.2 ifadesi ile 20°C sıcaklık için standartlaştırılmaktadır.

$$(K_La)_{20} = \frac{(K_La)_T}{1.024^{(T-20)}} \qquad (4.2)$$

Blower ve venturi sistemlerinin temiz su toplam oksijen transfer katsayısını gösteren K_{La} değerlerinin, deney sıcaklığında ve 20 ^{0}C için standartlaştırılmış hali aşağıda

Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bunun yanı sıra bu sistemlerin standart oksijen transfer hızı (SOTR) ve standart oksijenlendirme verimi (SOE) de yine bu tabloda verilmektedir. Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi venturinin toplam oksijen transfer katsayısı ve standart oksijen transfer hızı (9.5 kat) ve standart oksijenlendirme verimi (4.33 kat) blowerınkinden oldukça yüksektir.

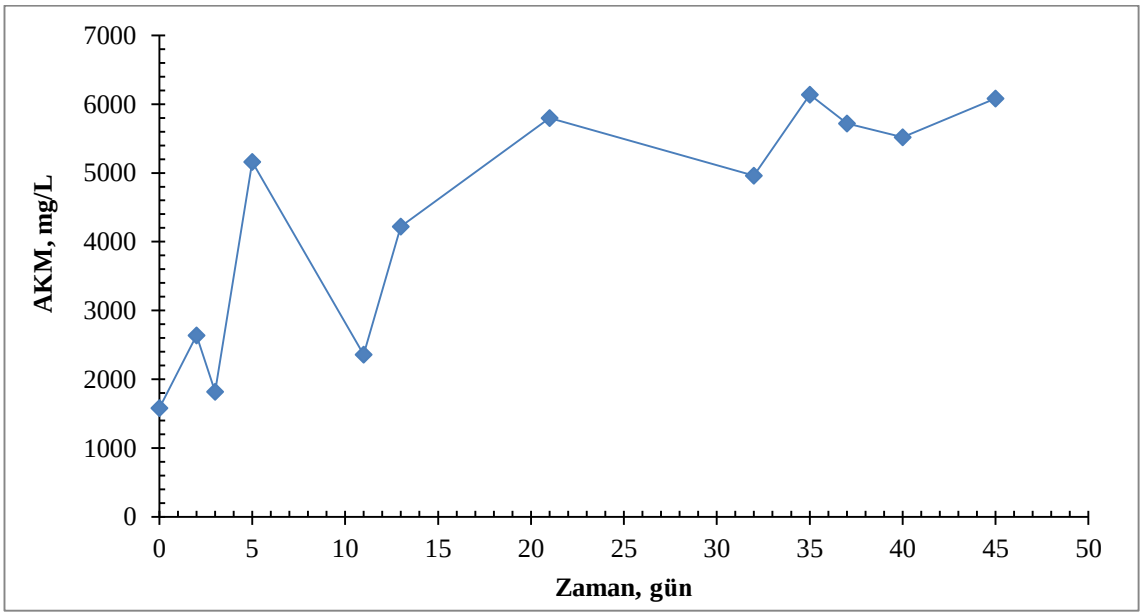
Çizelge 4.1. 3 L/dk. hava debisinde blower ve venturi sistemlerinin oksijen transfer parametreleri

Parametre	**Blower**	**Venturi**
K_La_Blower (25°C) (1/st)	3,17	
K_La_Venturi (26°C) (1/st)		30,99
K_La (20°C) (1/st)	2,82	26,88
SOTR (kg O_2/st)	0,00051	0,00488
SOE (kg O_2/kWst)	0,003	0,013

4.2. Sentetik Atıksu Çalışmalarında Elde Edilen Bulgular

4.2.1. Memran Biyoreaktörün İşletilmesi Sürecinde Elde Edilen Bulgular

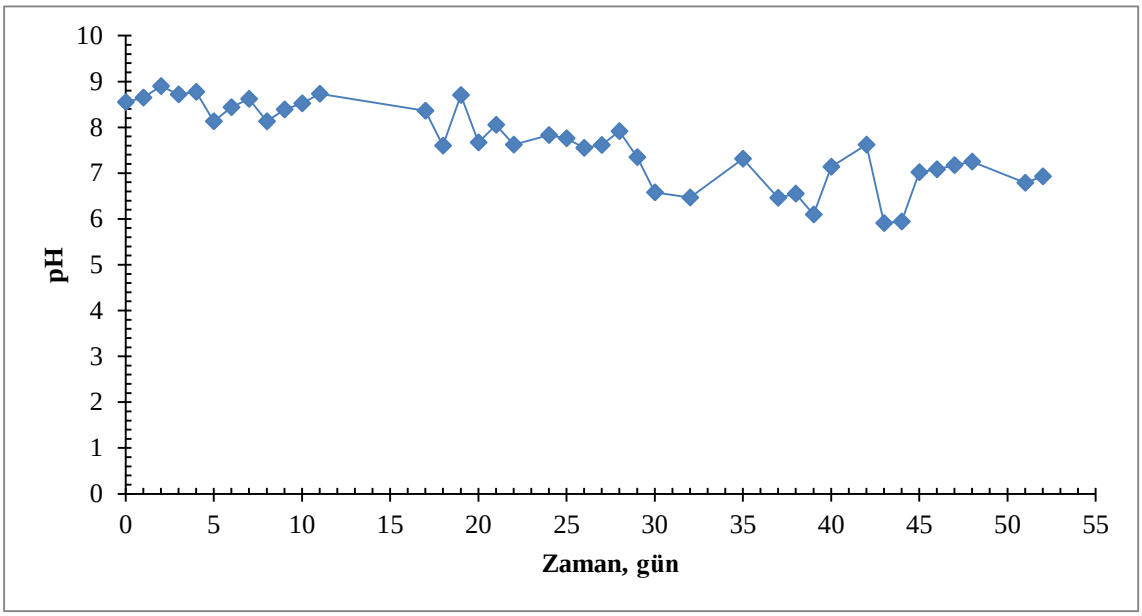
İşletim süresince ölçülen AKM konsantrasyonlarının değişimi Şekil 4.4'deki gibi olmuştur.



Şekil 4.4. Sentetik atıksu ile MBR işletiminde AKM konsantrasyonu değişimi

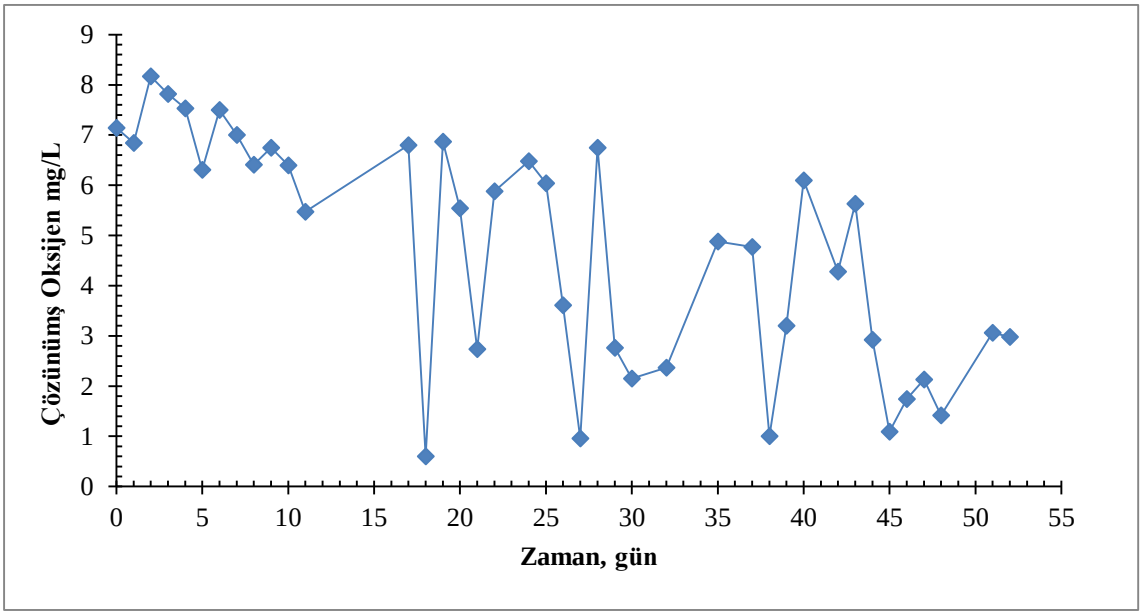
Biyokütle aklimasyonunun yapıldığı ilk zamanlarda pH yüksek iken daha sonra hem giriş atıksuyundk.i pH ayarlaması hem de nitrifikasyon nedeniyle pH düşmeye başlamıştır. MBR'de herhangi bir pH ayarlaması yapılmamış ancak pH düştüğü

durumlarda filtrasyon süresi arttırılarak seyreltme suyu olarak kullanılan çeşme suyunun alkalinitesi vasıtasıyla pH'nin tekrar yükselmesi sağlanmıştır (Şekil 4.5).



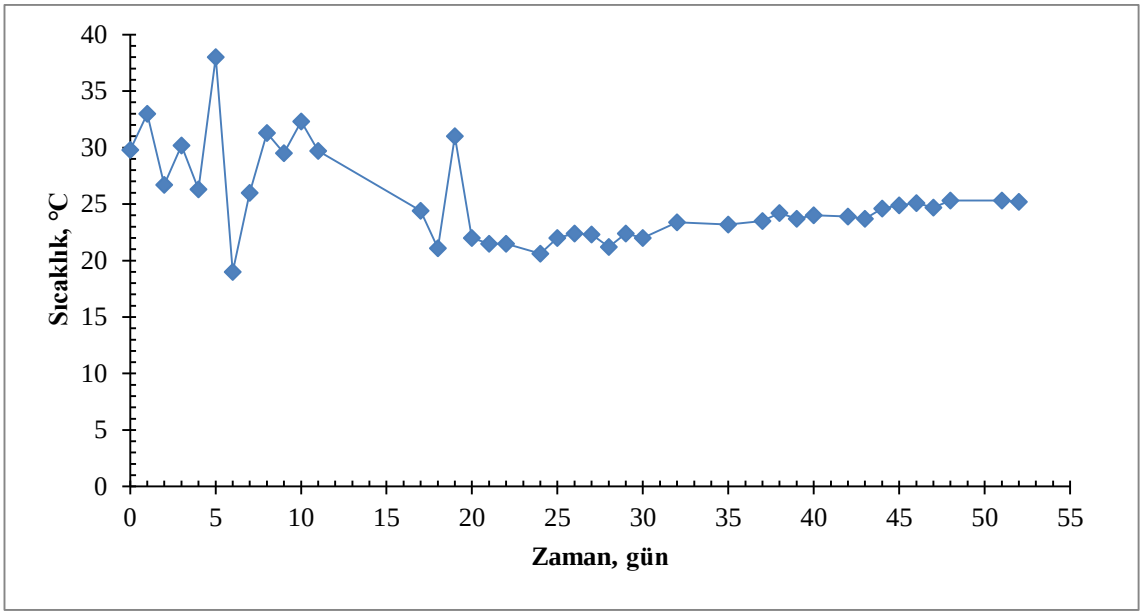
Şekil 4.5. Sentetik atıksu ile MBR işletiminde pH değişimi

Membran kirlenmesini gözlemlemek için yapılan deneylerde sistem venturi ile havalandırıldığı için sistemin venturi ile çalıştığı zamanlarda çözünmüş oksijen konsantrasyonunda yükselmeler olmuş ancak deney bitimlerinde blower havalandırma sistemi ile işletilme devam edildiğinden tekrar düşmüştür (Şekil 4.6)



Şekil 4.6. Sentetik atıksu ile MBR işletiminde çözünmüş oksijen kosantrasyonu değişimi

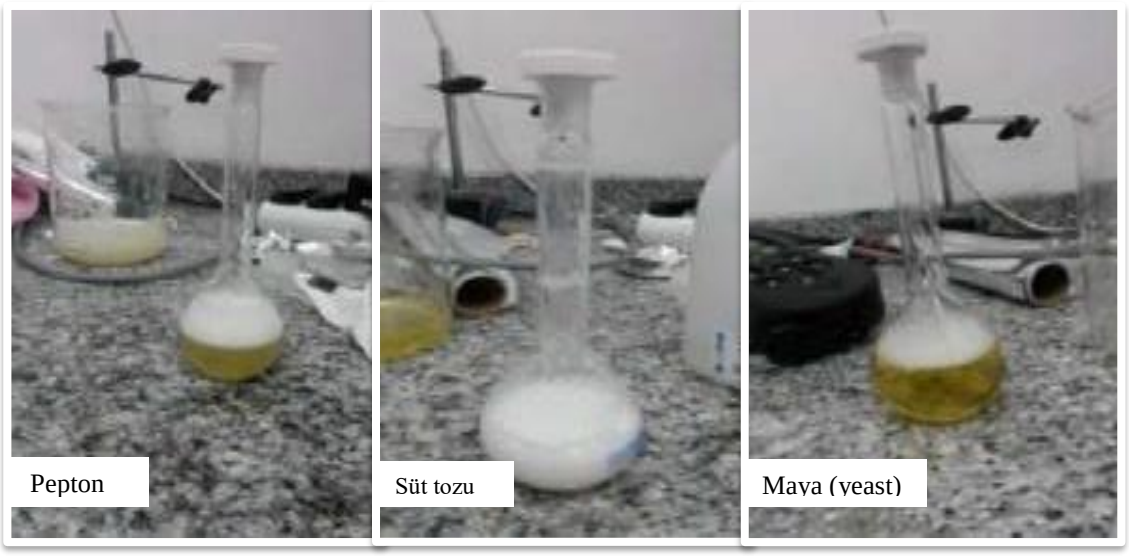
Aktif çamur aklimasyonunun tamamlanmasından sonra venturi sistemin denenmesi sürecinde MBR sıcaklığının yükseldiği gözlenmiş, blower sistemi ile havalandırılmaya dönüldüğünde sıcaklığın normal değerlere gerilediği gözlenmiştir. Venturi sisteminden kaynaklı ısı artışının önlenmesi için MBR tankı içerisinden geçirilen çeşme suyu vasıtasıyla bir soğutma sistemi kurulmuştur (Şekil 4.7).



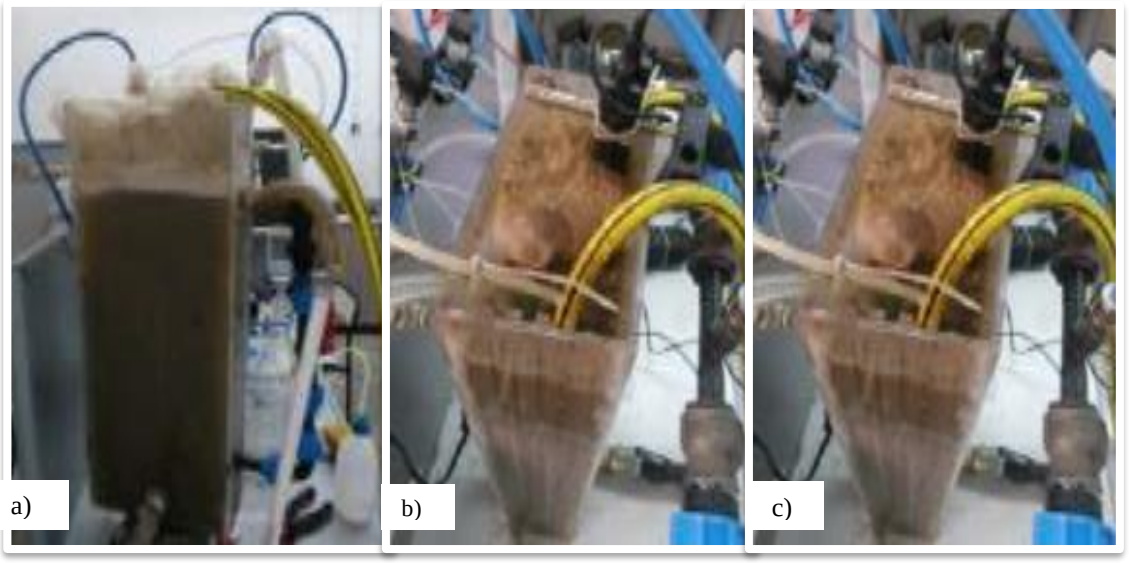
Şekil 4.7. Sentetik atıksu ile MBR işletiminde sıcaklık değişimi

Membran kirliliğini deneyleri sırasında ise MBR'nin biyokütle konsantrasyonu 5.520 ile 6.140 g/L arasında değişim göstermiştir. Çözünmüş oksijen, pH ve sıcaklık değerleri sırasıyla 1.0–6.1 mg/L, 5.9–7.6, 24.1–30.5°C olarak değişirken çıkış KOİ'si 5 ile 15 g/L arasında değişmiştir.

Kesikli işletilen reaktörden MBR'ye aktif çamur eklendiği zaman, venturi ile sistem çalıştırıldığında biyoreaktörde aşırı derecede köpük oluşumu gözlenmiştir. İlk zamanlarda sebebi anlaşılamayan bu köpük oluşumunun reaktör içerisindeki yüksek organik madde konsantrasyonundan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Sentetik besleme suyundk.i bazı maddelerin hava ile türbülansa girdiklerinde çok fazla köpürdükleri görülmüştür (Şekil 4.8). Nitekim MBR supernantantında organik besin maddesi konsantrasyonunun azalmasıyla beraber köpük problemi çözülmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4.8. Sentetik atıksu bileşenlerinin hava ile türbülans durumunda köpürmesi



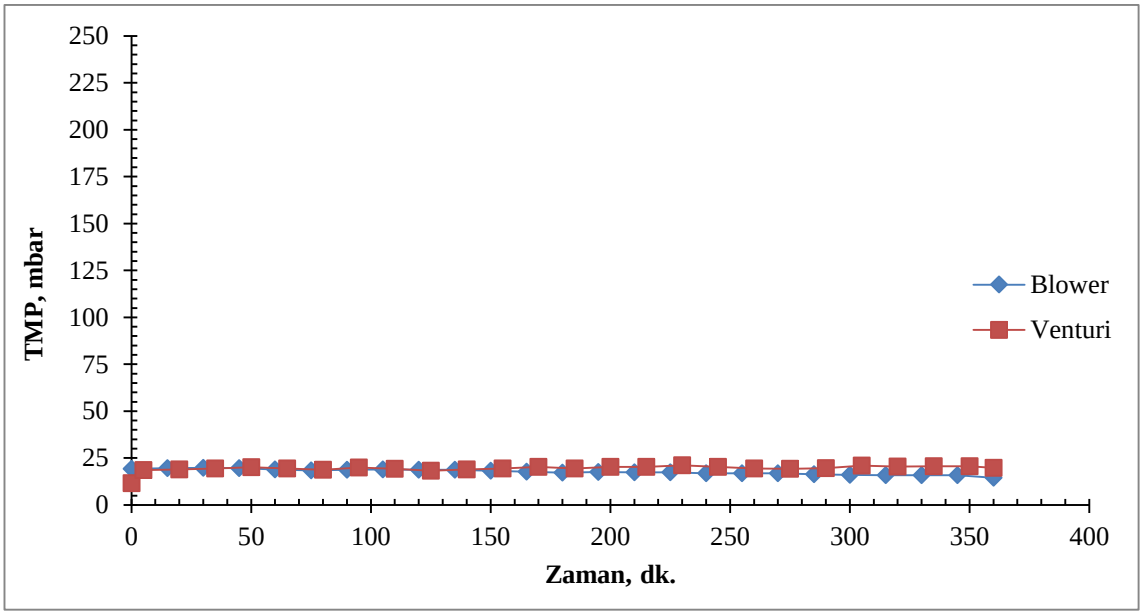
Şekil 4.9. Venturi sisteminde MBR'de köpürme (a) başlaması, (b) azalması ve (c) tamamen yok olması

4.2.2. Sentetik Atıksu Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Karşılaştırma kolaylığı sağlaması açısından aşağıda verilen grafiklerde aynı havalandırma debisi için göz önüne alınan parametrelerin değişimi hem blower hem de venturi sistemi için aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

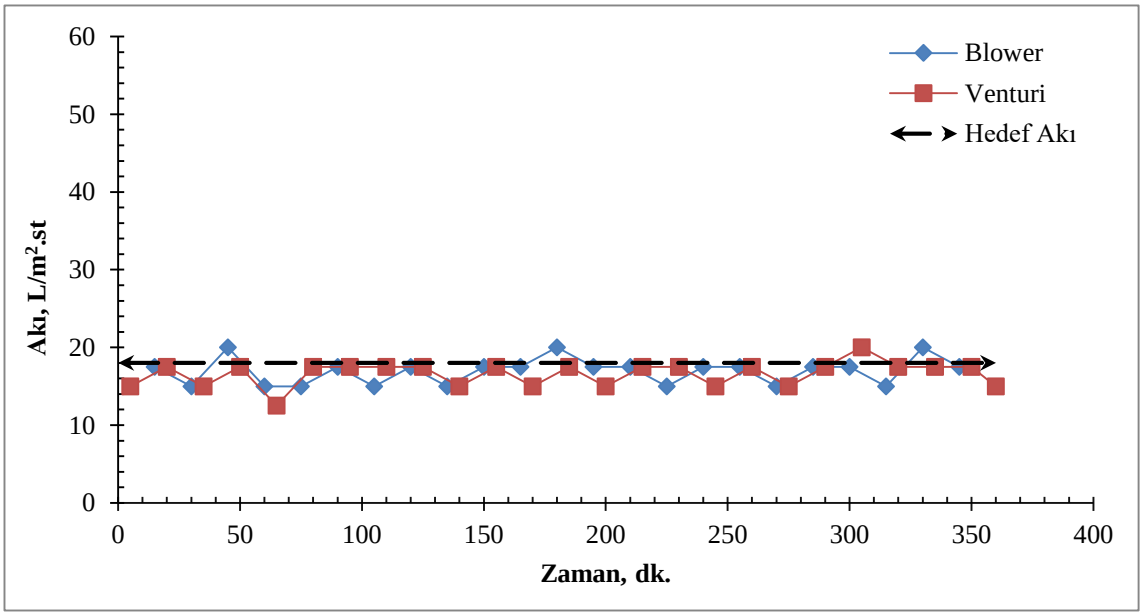
4.2.2.1. 3L/dk. Havalandırma Debisi ve 18 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Bulgular

18 L/m^2.st süzüntü akısında deney süresince blower ve venturi sistemlerinde önemli bir TMP artışı gözlenmemiş, hatta neredeyse sabit kalmıştır (Şekil 4.10).



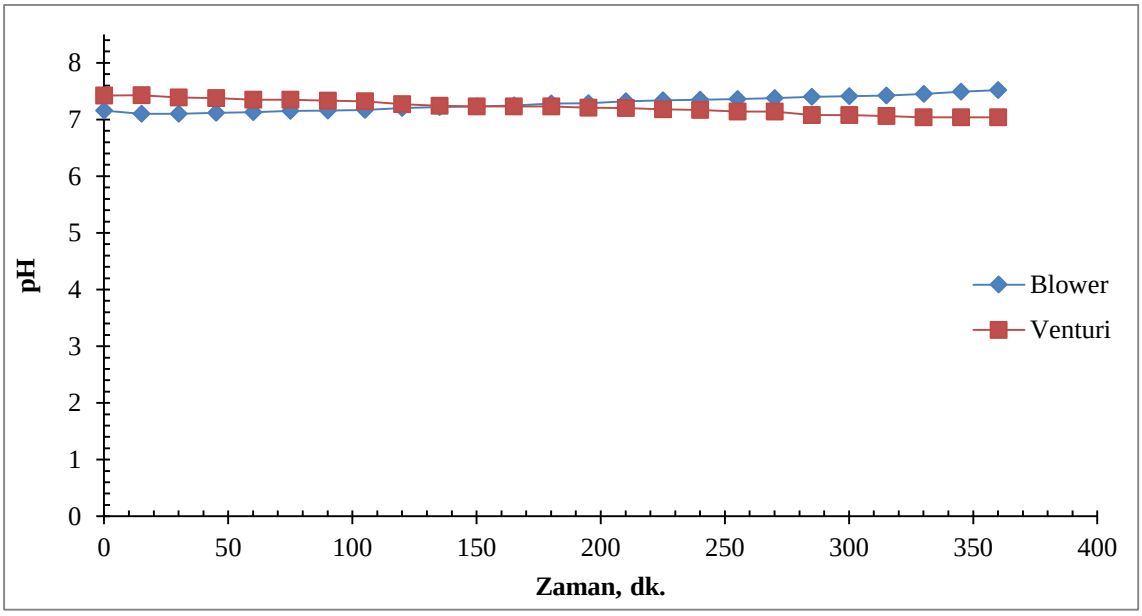
Şekil 4.10. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi

Yine Şekil 4.11'den görüldüğü gibi, hem blower hem de venturi sistemlerinde süzüntü akısında bir düşüş gözlenmemiş ve akı da hedeflenen değere oldukça yakın bir seyir izlemiştir.



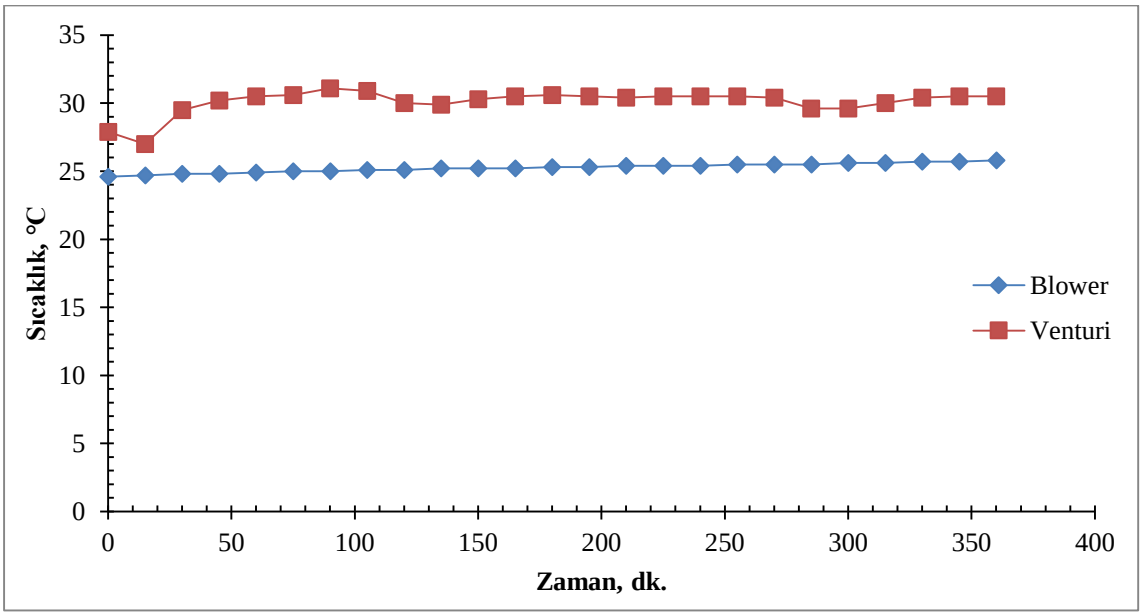
Şekil 4.11. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

Şekil 4.12'dan görüldüğü gibi her iki sistemin pH'si arasında da önemli bir farklılık gözlenmemiştir.



Şekil 4.12. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi

Venturi ve blower sistemlerinin arasında yaklaşık 5°C bir sıcaklık farkı meydana gelmiştir (Şekil 4.13).



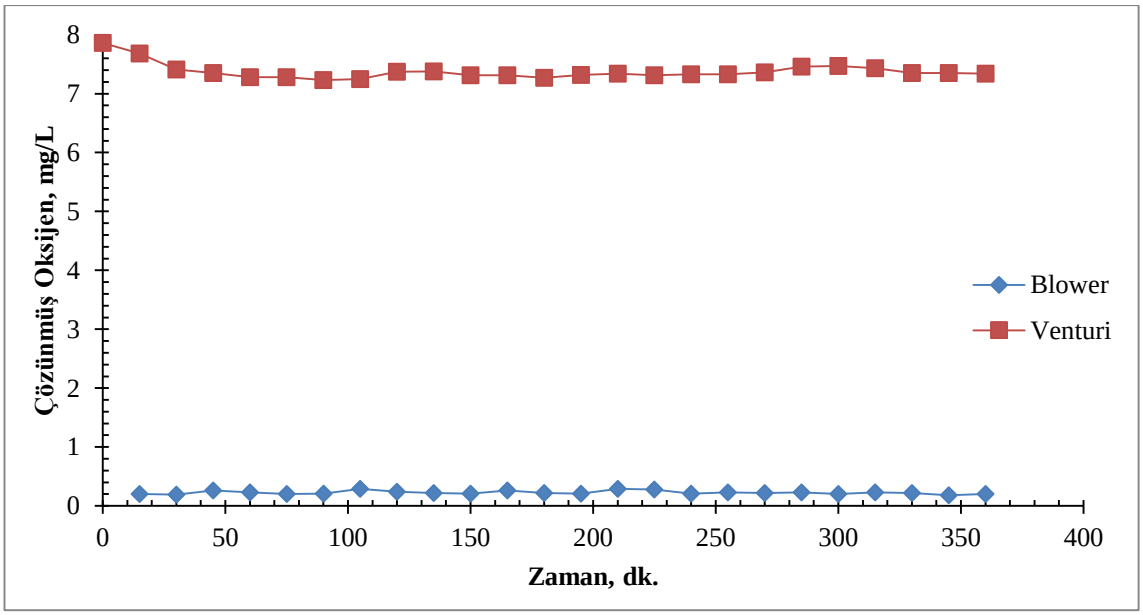
Şekil 4.13. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi

Ancak sıcaklık farkı yüksek olmadığından bunun deney sonuçlarını olumsuz etkilediği söylenemez. Literatürde daha çok 15°C'nin altındk.i sıcaklıklarda hem suyun viskozitesinin artması hem de biyolojik aktivitenin azalması, artan EPS üretimi vb. nedenlerle membran kirlenmesinin olumsuz etkilendiği yönünde çalışmalar

bulunmaktadır, örneğin Brink ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada membran kirlenmesi açısından 20°C ve 25°C arasında pek bir fark gözlenmediğini belirtmişlerdir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda sirkülasyon pompası kullanımına bağlı bir sıcaklık artışından bahsedilmektedir. Örneğin, bira fabrikası (Bloor ve ark. 1995) ve şaraphane atık sularının (Petruccioli 2002) aerobik olarak arıtılmasında JLR kullanılmada kullanılan JLR'lerde sıcaklık değerleri 35-39°C arasında değişmiştir (Kayaalp ve Öztürkmen 2016). Venturi sistemindeki sıcaklık artışı yaklaşık 10 L olan aktif çamur hacminin sürekli olarak sirküle edilmesi sonucunda pompada meydana gelen ısınma ve sirkülasyon sırasında venturi içerisindeki kesit değişimi nedeniyle artan enerji kayıplarının ısıya dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

3 L/dk. havalandırma debi ve 18 L/m^2.st süzüntü akısında blower ve venturi sistemleri arasındk.i en önemli fark biyoreaktörün çözünmüş oksijen konsantrasyonunda meydana gelmiştir (Şekil 4.14). Blower sisteminde MBR'deki çözünmüş oksijen konsantrasyonu deney boyunca 0.2–0.3 mg/L (ortalama 0.23 mg/L) arasında değişirken, venturi sisteminde 7–8 mg/L (ortalama 7.4 mg/L) arasında değişmiştir.



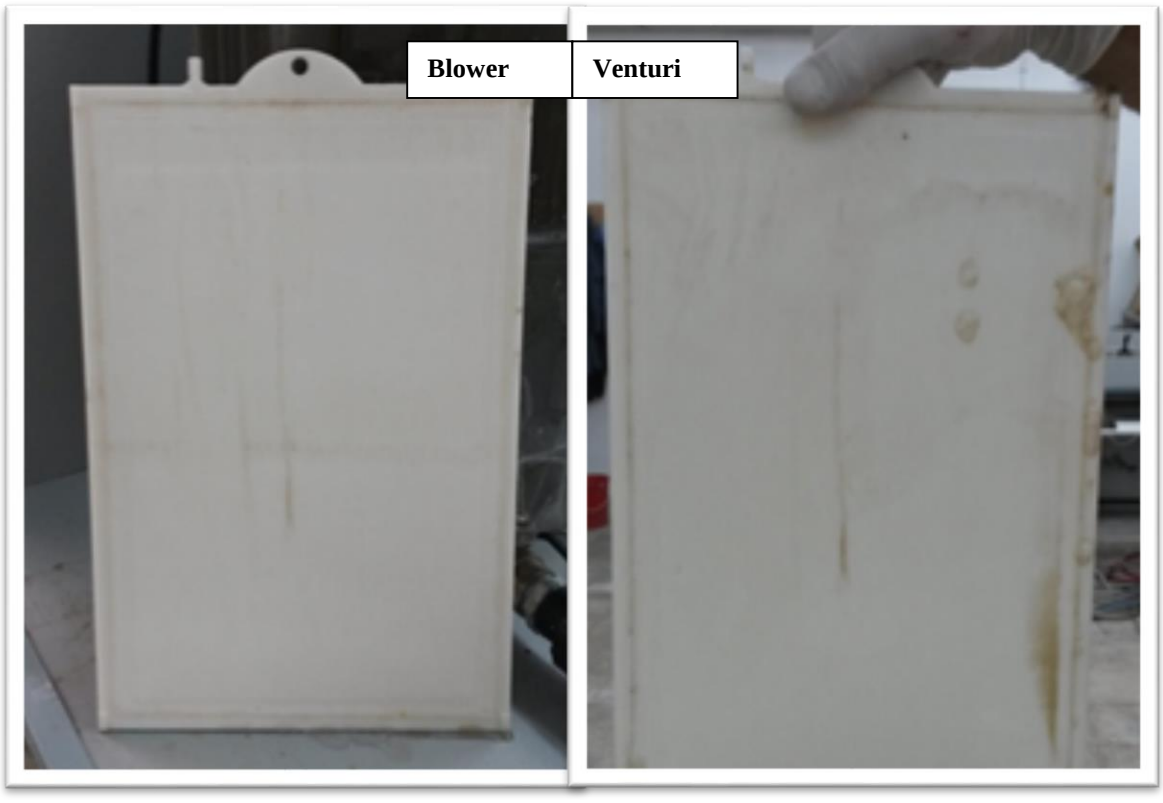
Şekil 4.14. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi

Literatür çalışmasında, aktif çamur havalandırmasında kullanılan bir blower ile venturi havalandırma sistemi arasında doğrudan bir karşılaştırma yapılabilecek bir çalışma bulunamamıştır. Ancak aktif çamur havalandırılmasında kullanılan venturi sistemlerine benzer şekilde gaz transferi sağlayan jet havalandırma sistemleri üzerinde

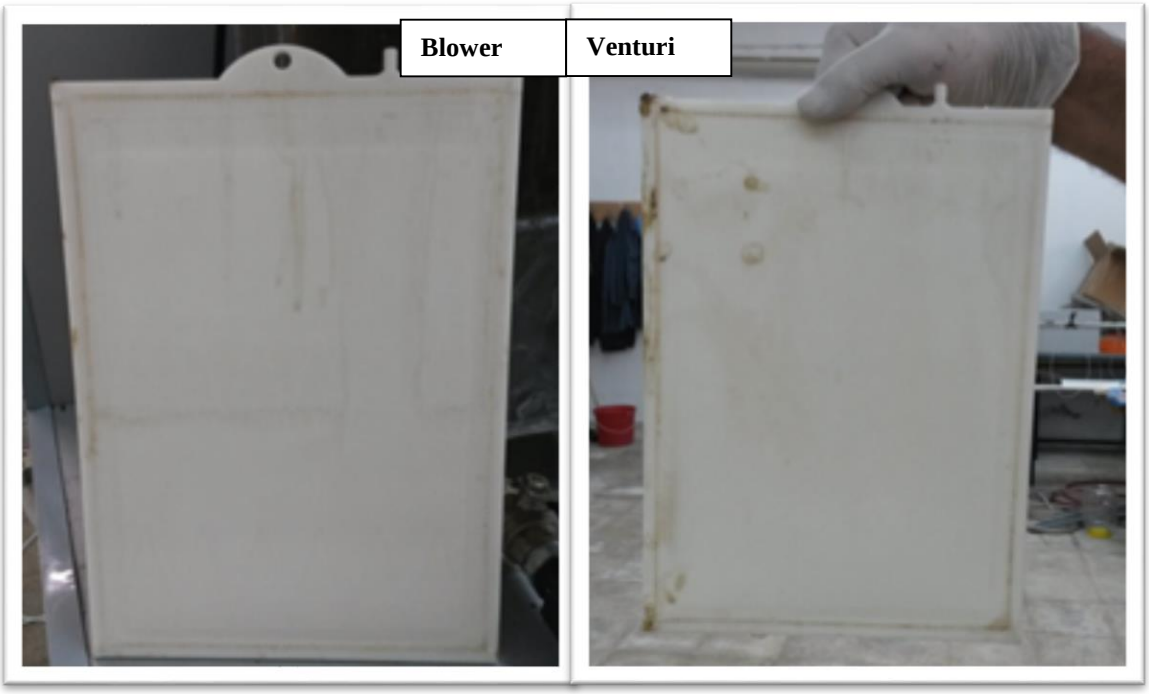
yapılan çalışmalar, benzer şekilde konvansiyonel difüzör sistemlerine kıyasla daha yüksek gaz transfer verimine sahip oldukları görülmektedir (Bloor ve ark. 1995,Petruccioli ve ark. 2002, Du ve ark. 2012, Enghlegardt 2013). Blower ve venturi havalandırma sistemleri arasındk.i havalandırma verimliliğindeki bu büyük fark, venturi enjektörünün blower sistemine kıyasla daha yüksek gaz transfer oranı nedeniyle olmuştur.

Venturi sistemindeki yüksek hava transferi, kullanılan enjektörünün boğaz kısmındk.i yüksek türbülanslı koşulların bir sonucudur. Türbülans etkisi hava-su temas yüzeyini arttırdığından, havanın kütle transferi orantılı olarak artmıştır. Bu nedenle, bir venturi cihazı ile entegre edildiğinde, MBR işletimi için daha düşük havalandırma oranları kullanılabilir (Kayaalp ve Öztürkmen 2016).

3 L/dk. havalandırma debi ve 18 L/m^2.st akıda membran kirlenmesi arasında önemli görsel bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16).



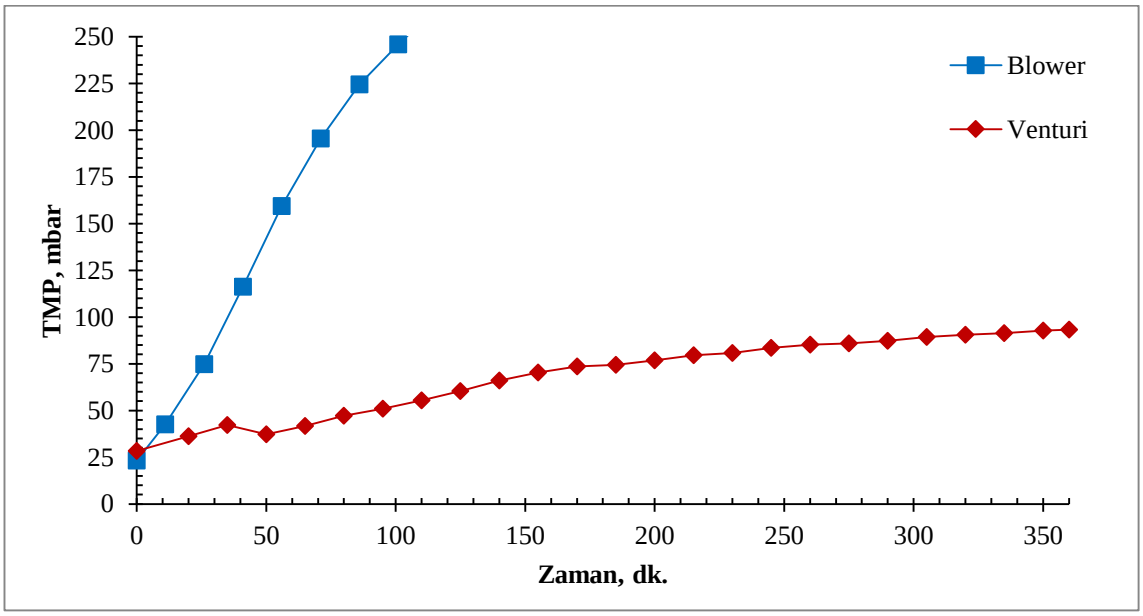
Şekil 4.15. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (ön yüzeyler)



Şekil 4.16. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (arka yüzeyler)

4.2.2.2. 3L/dk. Havalandırma Debisi ve 32 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Bulgular

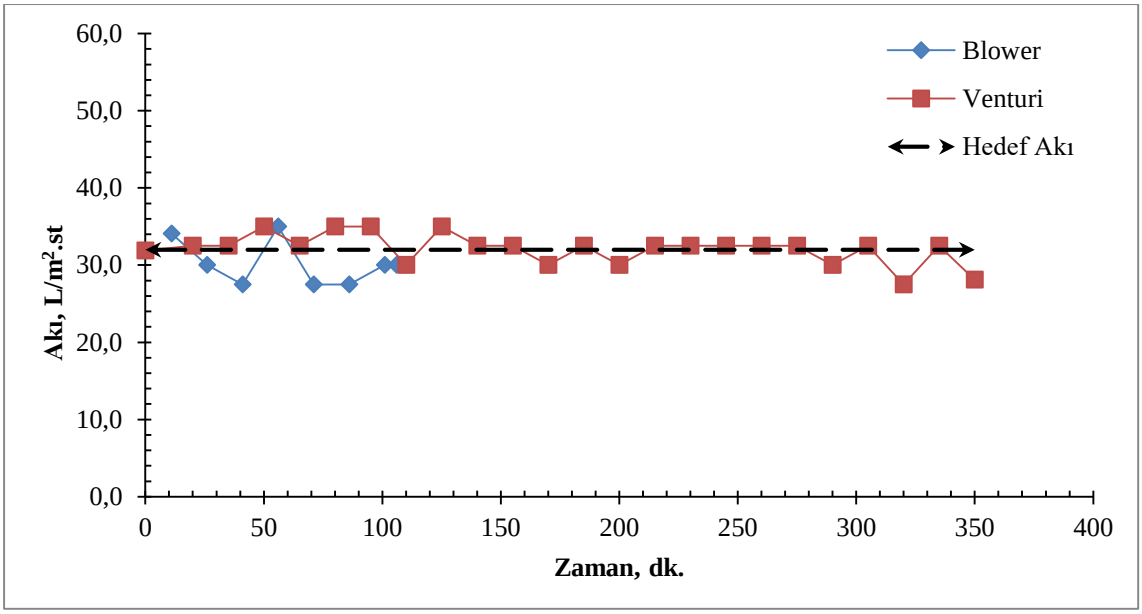
32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemleri arasında TMP gelişimi açısından önemli bir fark meydana gelmiştir. Blower sisteminde TMP 106'ncı dk.252 mbar'a ulaşmış, dolayısıyla blower deneyi burada sonlandırılmıştır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi

Venturi sisteminde ise TMP 360 dk.ika sonunda 93.3 mbar'a ulaşmıştır. Benzer bir sonuç JLR'nin bir çeşidi olan membran filtrasyonu ile kombine edilmiş yüksek hızlı kompakt reaktörün (MHCR) 15 L/m^2.st sabit akı altında konvansiyonel bir MBR ile performanlarını karşılaştıran çalışmada da gözlenmiştir (Yeon ve ark. 2005). Bir 4 L/dk. havalandırma debisinde blower ile havalandırılan MBR'nin TMP'si 1.5 saatte 30 kPa'a ulaşırken, MHCR için bu TMP değerine 6 saat sonunda ulaşılmıştır. Bu yüksek membran temizleme performansı MHCR konfigürasyonundk.i jet akımının oluşturduğu kabarcıklara ve türbülans etkilerine bağlanmıştır. Dolayısıyla bu çalışma içinde, venturi havalandırma sistemi ile blower'a nazaran elde edilen membran kirlenmesindeki azalmanın, membran yüzeyine etkili bir şekilde yönlendirilen yüksek hızlı jet akımından kaynaklandığı söylenebilir.

Venturi sisteminde süzüntü akısında önemli bir düşüş meydana gelmezken, blower sisteminde akıda küçük bir azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.18). Ventıuri sisteminde deney süresince hedef akıyı sağlamıştır.

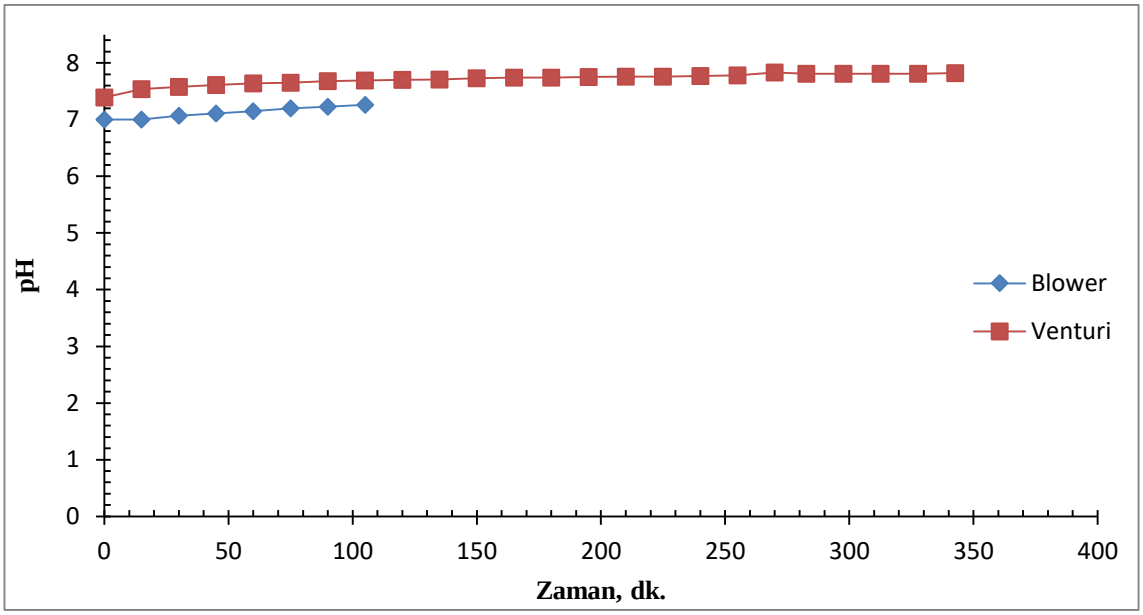


Şekil 4.18. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

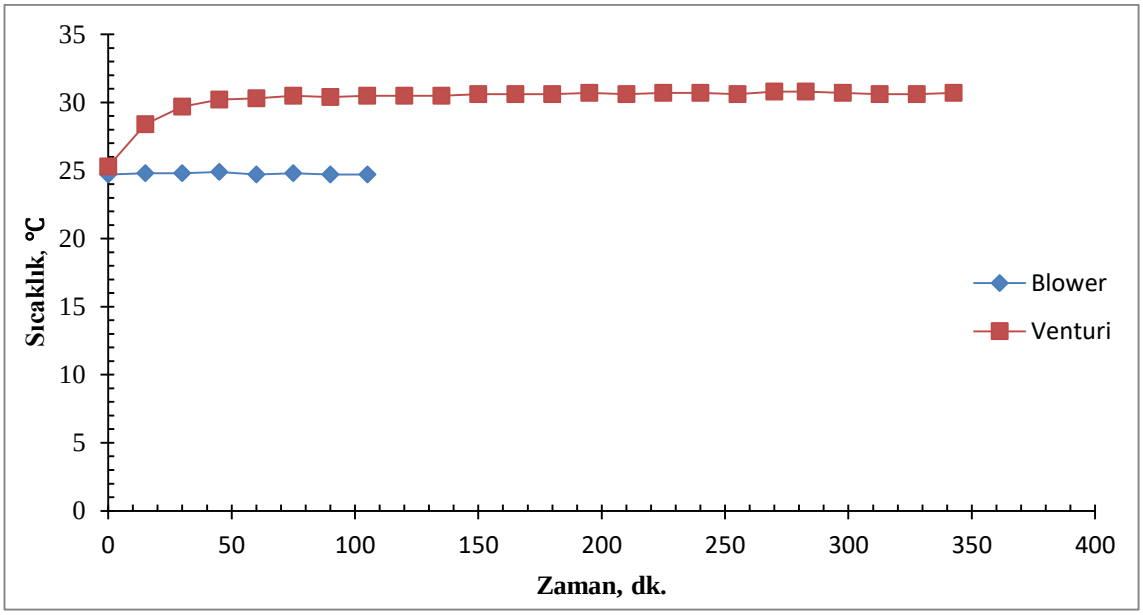
TMP ve akı değişimleri göz önüne alındığında venturi sisteminin 32 L/m^2.st akıda membrandk.i kirlenmeyi geciktirdiği görülmektedir. Blower sistemine nazaran venturi sistemi ile elde edilen bu membran kirlenmesindeki azalmanın, blower ile membran yüzeyine jet akımının etkili şekilde yönlendirilememesine bağlanabilir. Blower vasıtasıyla düfizör deliklerinden giren havanın çıkış açısına bağlı kalmaksızın rastgele bir şekilde dikey yönde hareket ederken, venturi enjektörü sayesinde elde edilen jet akımının

membran yüzeyine yönlendirilebilmesi daha etkili bir yüzey sıyırması sağlamaktadır. Bölüm 3.1.1.'de temiz su ile yapılan difüzör tasarımı çalışmalarındk.i gözlemler de bu durumu desteklemektedir.

Çalışılan akı değeri içi iki sistem arasında pH ve sıcaklık açısından anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20).

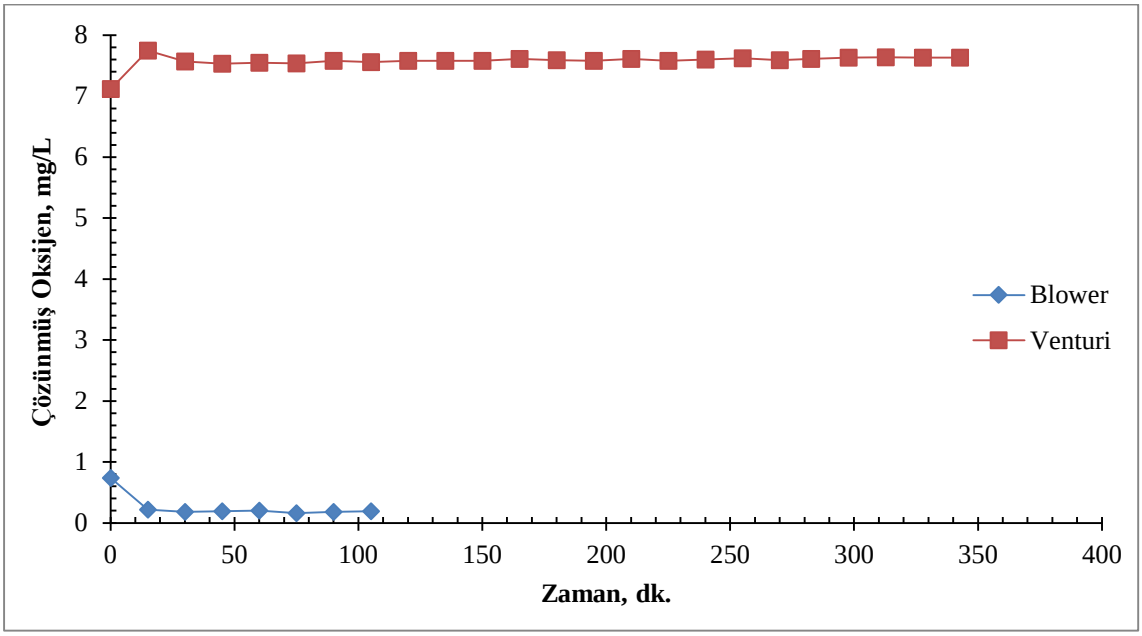


Şekil 4.19. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi



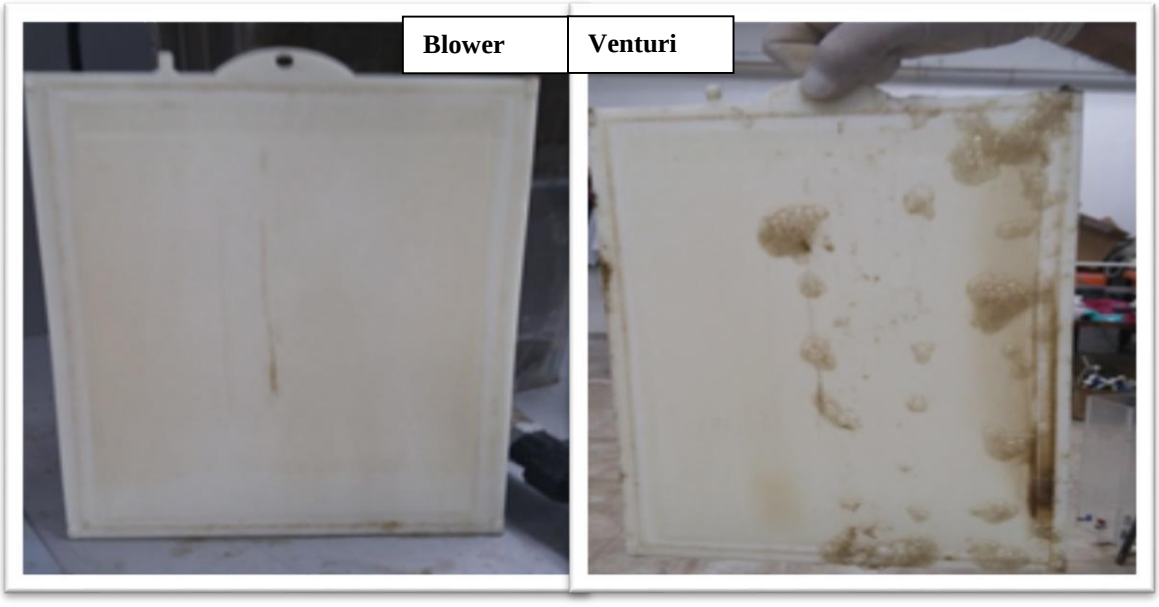
Şekil 4.20. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi

MBR'nin çözünmüş oksijen konsantrasyonu için yine büyük bir farklılık gözlenmiştir (Şekil 4-21). Blower sisteminde çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0.2 mg/L civarında iken, venturi sisteminde 7.5 mg/L civarında olduğu görülmüştür.

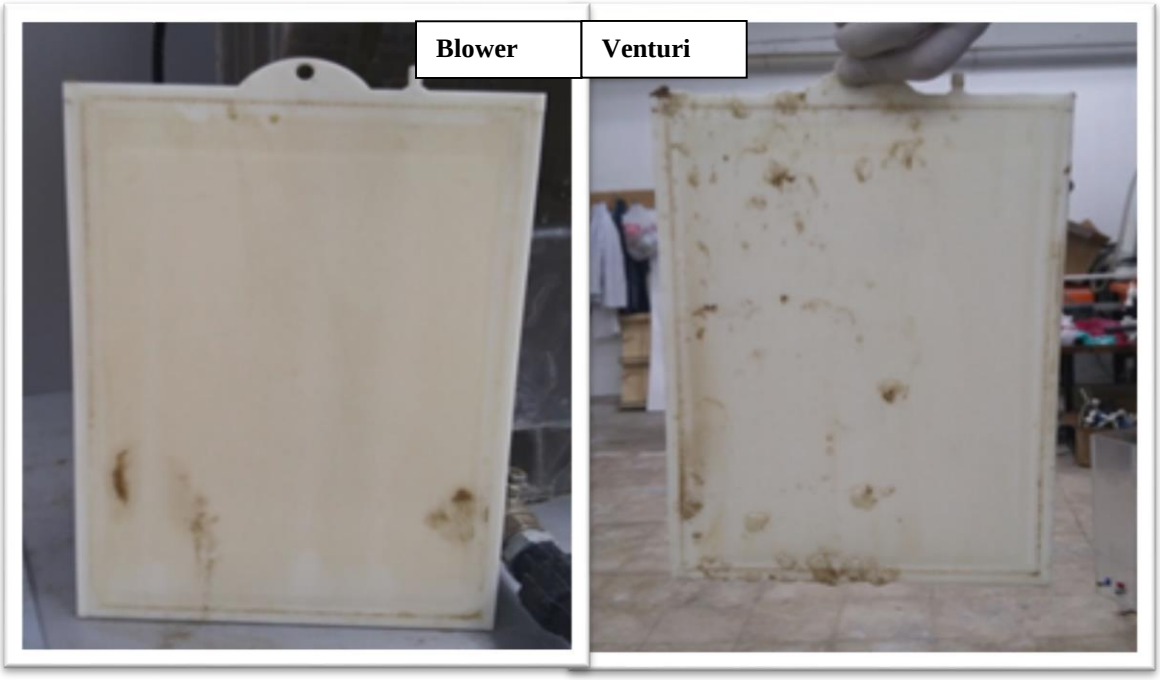


Şekil 4.21. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi

Membran elemanlarının deney sonrası görsel incelemesi sonucu, venturi sisteminde membranın sağ tarafında (ön yüzeylerde sağ taraf, arka yüzeylerde sol taraf) az bir bölümün kirlendiği, buna karşılık blower sisteminde membranın tüm yüzey boyunca daha fazla kirlendiği görülmüştür. (Şekil 4.22 ve Şekil 4.23).



Şekil 4.22. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Ön yüzeyler)



Şekil 4.23. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Arka yüzeyler)

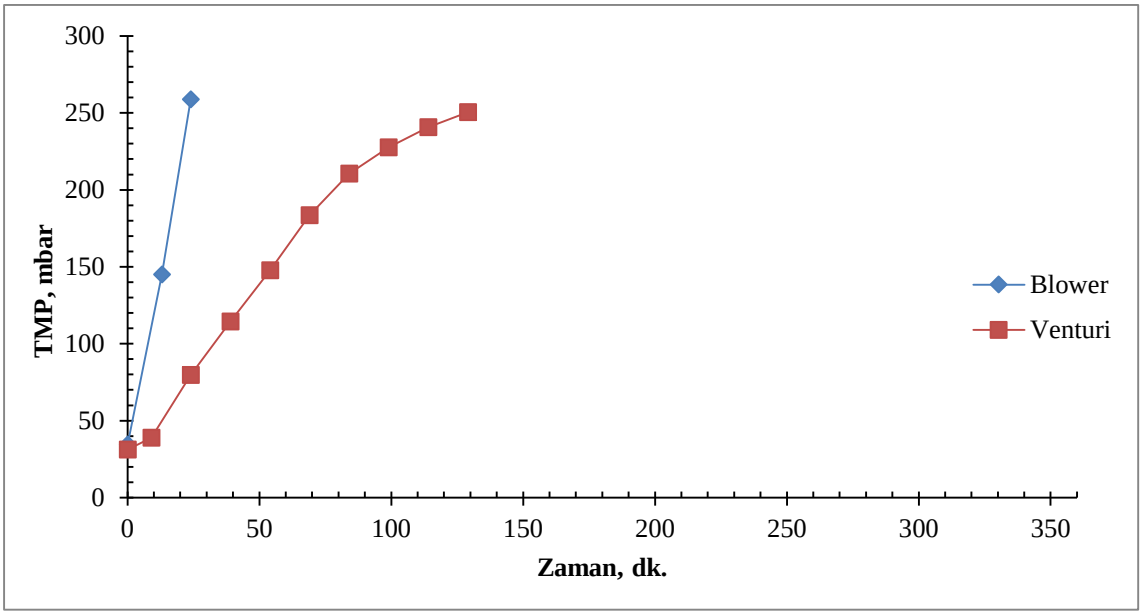
Bunun nedeninin difüzör tıkanması olabileceği düşünülerek reaktör boşaltılmış ve ilk delikleri tıkanmış olduğu görülmüştür (Şekil 4.24).



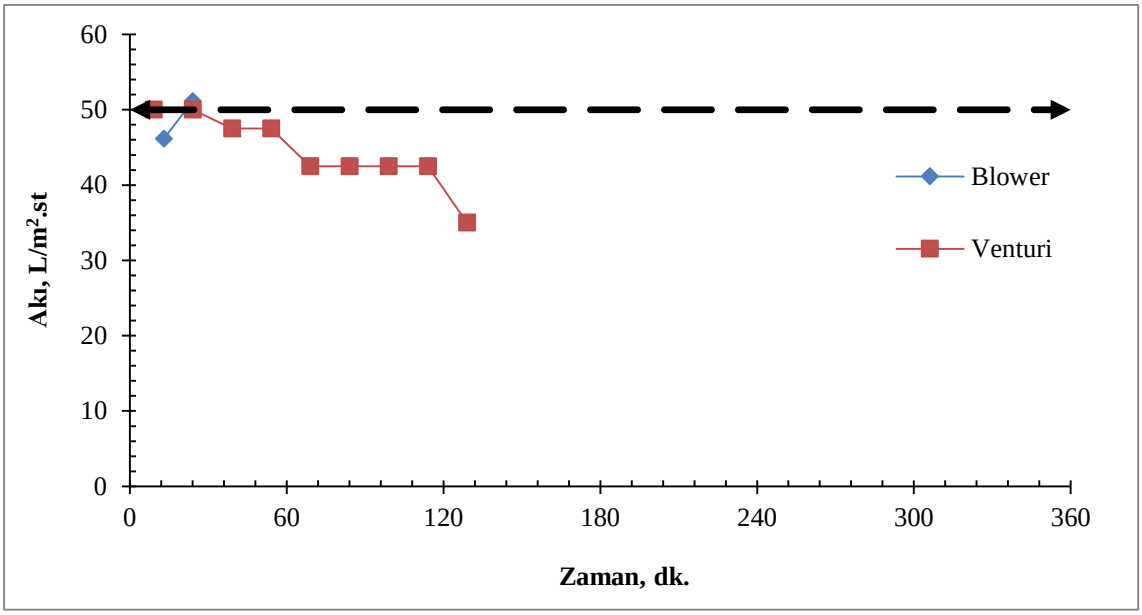
Şekil 4.24. Tüm deneyler bitirildikten sonra MBR'de kullanılan difüzörün durumu

4.2.2.3. 3L/dk. Havalandırma Debisi ve 50 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Bulgular

3 L/m^2.st havalandırma debi ve 50 L/m^2.st süzüntü akısında blower sisteminde TMP 24 dk.ika sonra 250 mbar'ı geçerken, venturi sisteminde TMP 129 dk.ika sonra 250 mbar'a ulaşmıştır (Şekil 4.25). Bu akı değerinin her iki sistemde de sürüdürülebilirliğinin bulunmadığı gözlenmiştir (Şekil 4.26).

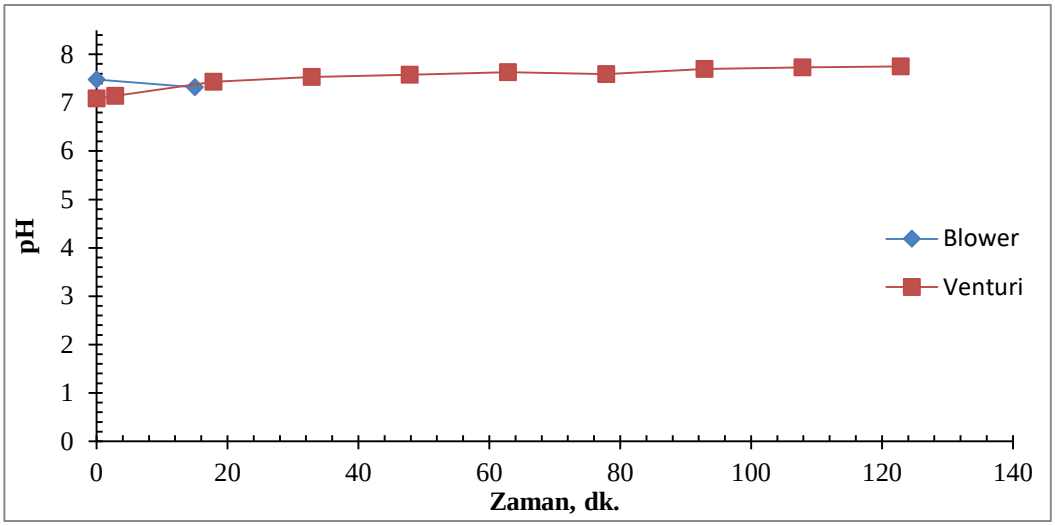


Şekil 4.25. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi

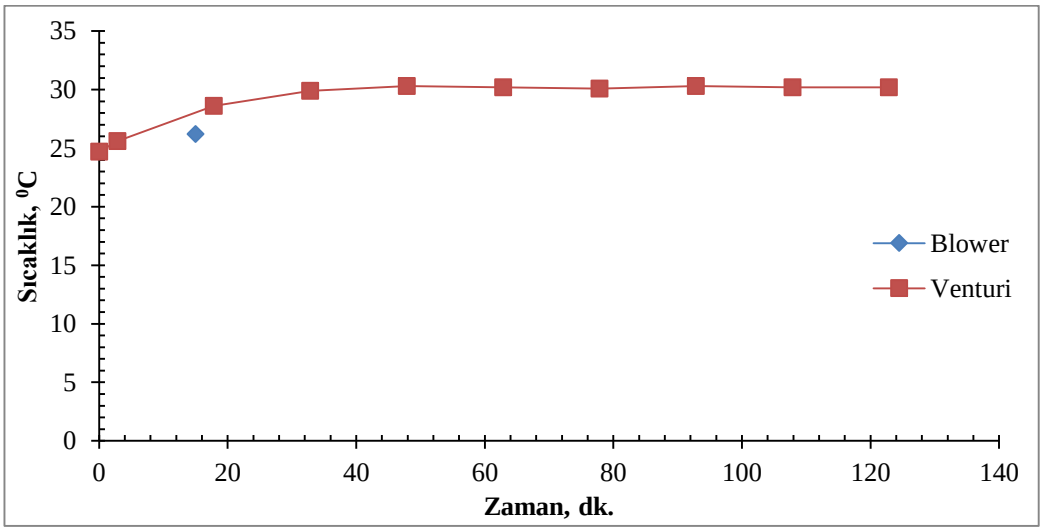


Şekil 4.26. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

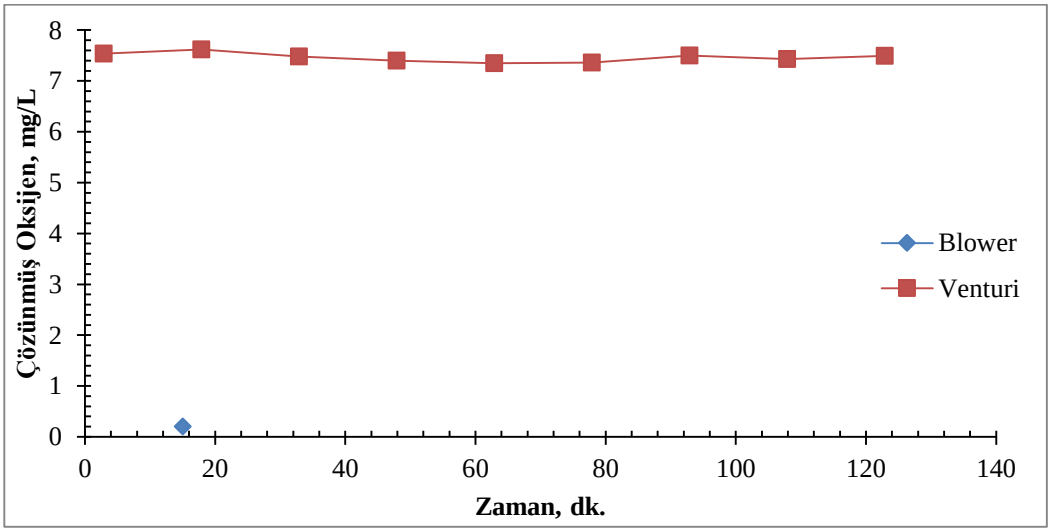
Blower sistemi, çok kısa süre de deney sonlandırma kriteri olan TMP (250 mbar) değerine ulaştığından pH, çözünmüş oksijen ve sıcaklık açısından anlamlı kıyas değerleri elde edilemese de venturi sistemi için bu değerler çalışılan önceki akı değerlerine paralellik göstermiştir (Şekil 4.27, 4.29).



Şekil 4.27. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi



Şekil 4.28. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi



Şekil 4.29. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi

4.2.2.4. Venturi Havalandırma Sisteminin Arıtma Performansına Etkisi

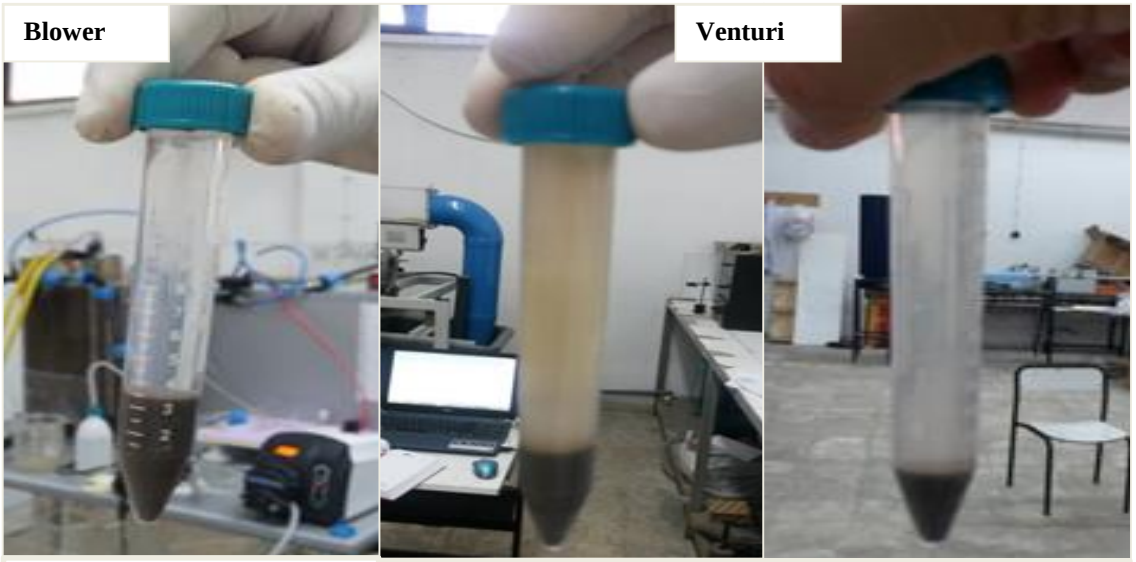
Hava debisinin 3 L/dk. olduğu 18 L/m^2.st akıda 6 saatlik venturi kullanımı sonrasında besleme suyu ve süzüntü suyunda ölçülen KOİ parametreleri venturi kullanımının arıtma verimini etkilemediğini göstermiştir. Çizelge 4.2'de belirtildiği gibi toplam ve çözünebilir KOİ giderim verimlerinin, 6 saatlik venturi havalandırma sistemini çalıştırdıktan sonra % 94 ila % 95 civarında olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.2. 3 L/dk. Hava debisinde venturi sistemi sonrasında ölçülen bazı parametreler

Parametre	Günlük Giriş Miktarı (mg)	Giriş Konsantrasyonu (mg/L)	Günlük Çıkış Miktarı (mg)	Çıkış Konsantrasyonu (mg/L)	Giderim Verimi %
$KOİ_{TOPLAM}$	9980	231	488.2	11.3	95.1
$KOİ_{ÇÖZÜNMÜŞ}$	1765	204.3	488.2	11.3	94.5
MBR Supernatant $KOİ_{TOPLAM}$			330 (mg/L)		
MBR Supernatant $KOİ_{ÇÖZÜNMÜŞ}$			25.5 (mg/L)		

Yine MBR süpernatantındk.i toplam ve çözünür KOİ değerlerine göre de venturi havalandırmasının KOİ giderim verimliliği açısından MBR üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Çizelge 4.2'de görülen MBR süpernatanındk.i düşük çözünmüş KOİ değeri (25.5 mg/L) de venturi havalandırmasına bağlı olarak MBR'de KOİ birikimi olmadığını göstermektedir.

Bununla birlikte aktif çamur flok yapısı ele alındığında, her iki sistem arasında küçük bir farkın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Deney sonunda aktif çamur çok yüksek olmayan bir devirde santrifüj edildiğinde blower sisteminde berrak bir üst faz elde edilirken, venturi sisteminde bulanık bir üst faz elde edilmiştir (Şekil 4.30). Santrifüj hızının 2000 rpm den 4000 rpm'ye ve santrifüj süresi de 2 dk.ikadan 5 dk.ikaya çıkarıldığında üst fazın bulanıklığının azaldığı görülmüştür. Venturi sisteminde meydana gelen bulanıklık, venturinin boğaz kısmında hava emilimi sırasında oluşan çok küçük hava kabarcıklarının flokların yapısını bozmasından ileri gelmektedir.



Blower ile havalandırma sonucu oluşan MBR supernatantı (2000 rpm, 2 dk. santrifüj)	Venturi ile havalandırma sonucu oluşan MBR supernatantı (2000 rpm, 2 dk. santrifüj)	Venturi ile havalandırma sonucu oluşan MBR supernatantı (4000 rpm, 5 dk. santrifüj)

Şekil 4.30. Blower ve venturi sistemlerinde deney sonrasında santrifüj edilen aktif çamur

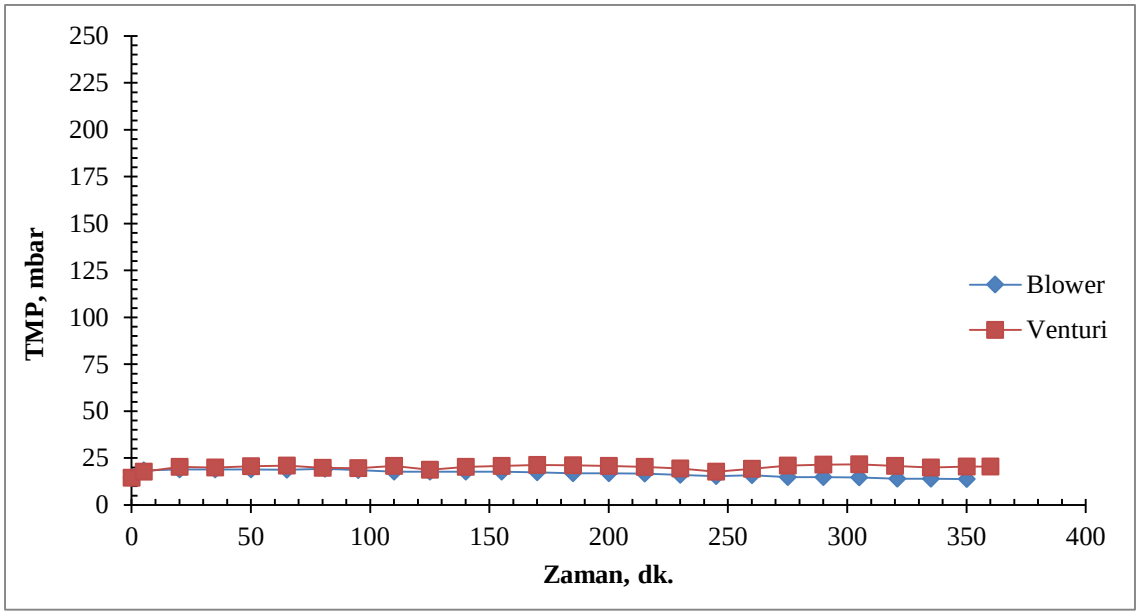
Biyoreaktörün toplam aktif çamur miktarına göre küçülen flokların miktarının çok az olduğu Şekil 4.11'den görülmektedir. Bunun yanısıra venturi sisteminde aktif çamurun çok az bir kısmında meydana gelen flok küçülmesinin geçici olduğu, ardından blower kullanıldığında 1–2 saat gibi kısa sürede normale (blower durumuna) geldiği gözlenmiştir.

Venturi sistemindeki flok küçülmesi durumunun esas olarak yine laboratuvar ölçekli reaktör hacminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kullanılan reaktörün hacmi yaklaşık 10 L'dir. Venturi sisteminde sirkülasyon debisinin yaklaşık 1200 L/st. olduğu düşünülürse, bütün biyokütlenin dk.20 kez venturi enjektörünün boğaz kısmından geçtiği görülmektedir. Biyokütlenin oldukça yüksek frekansta venturinin boğaz kısmında türbülansa uğramasına rağmen, küçülen flok miktarının az olduğu gözlenmiştir.

4.2.3. 6 L/dk. Havalandırma Yoğunluğunda Yapılan Çalışmalar

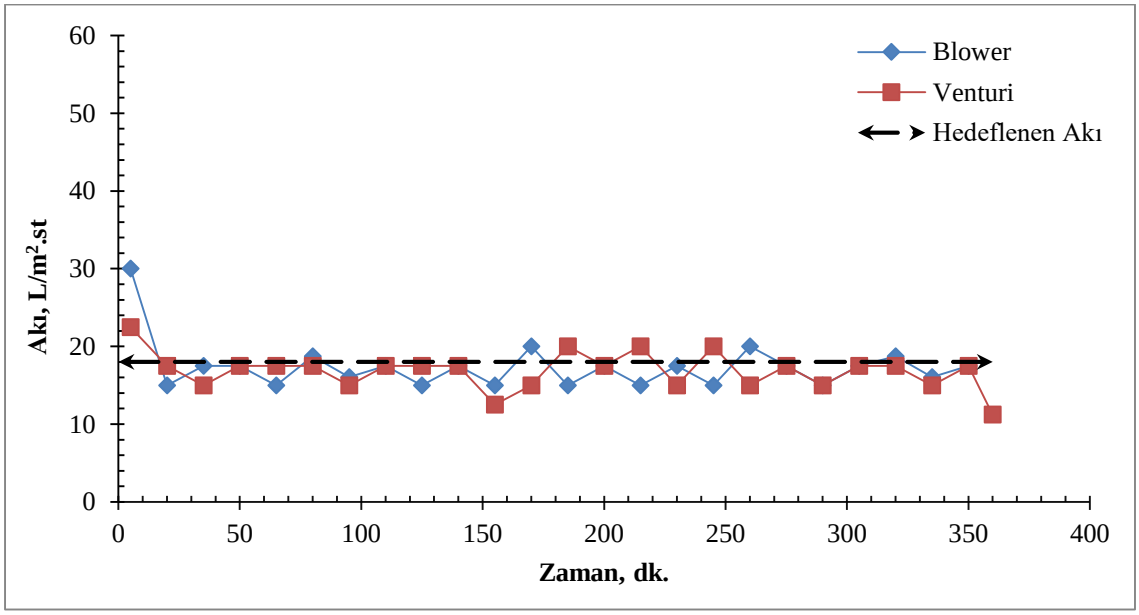
4.2.3.1. 18 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Bulgular

18 L/m^2.st süzüntü akısında deney süresince hem blower hem de venturi sistemlerinde önemli bir TMP artışı olmamış, hatta neredeyse sabit kalmıştır (Şekil 4.31).



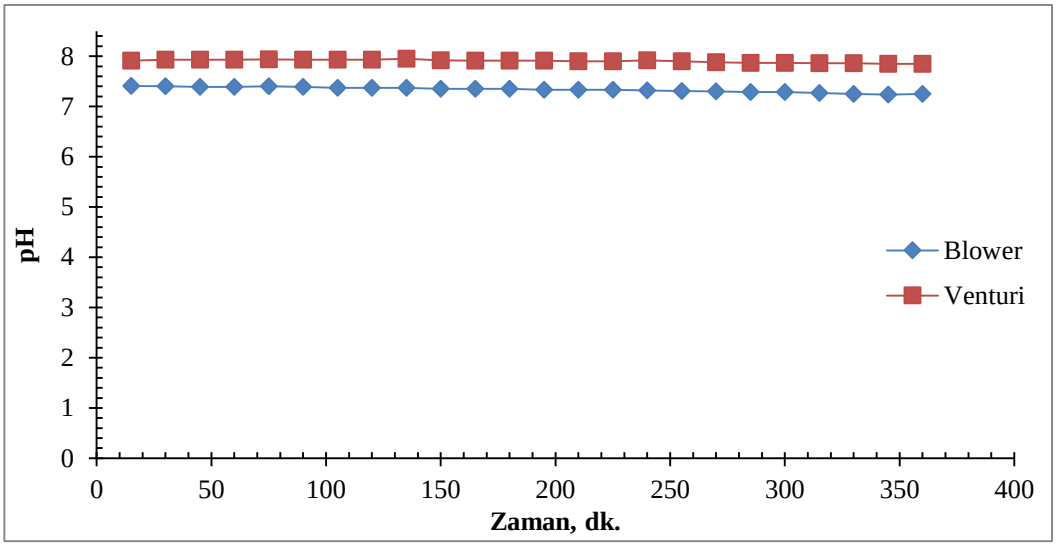
Şekil 4.31 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi

Şekil 4.32'den görüldüğü gibi hem blower hem de venturi sistemlerinde süzüntü akısında bir düşüş gözlenmemiş ve akıda hedeflenen değere oldukça yakın bir seyir izlemiştir.

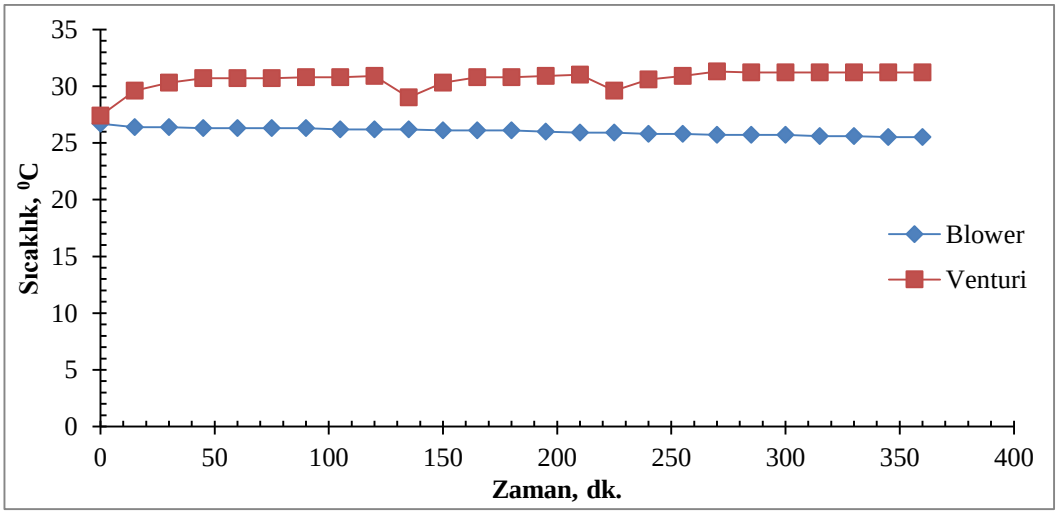


Şekil 4.32. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

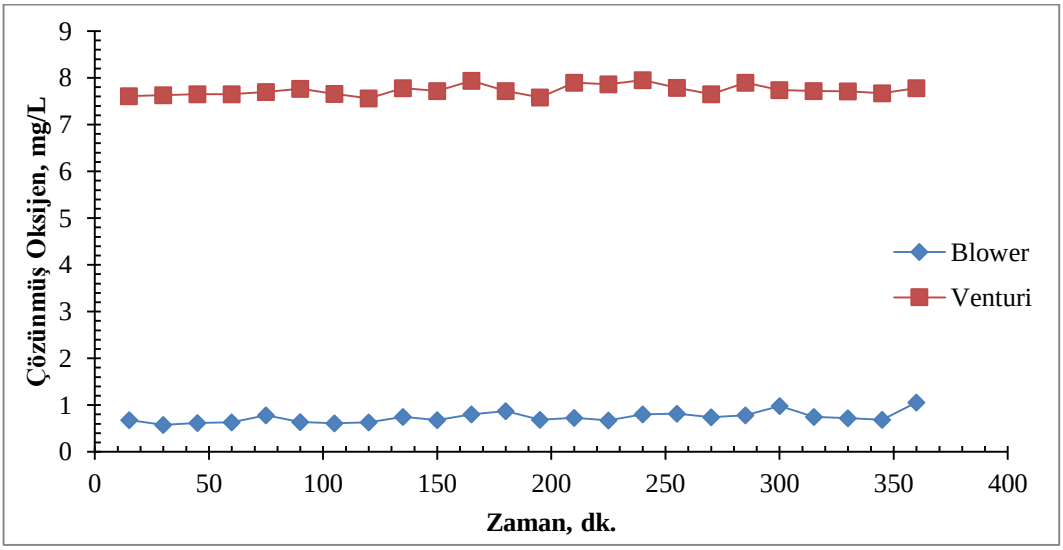
Şekil 4.33'den görüldüğü gibi her iki sistemin pH'si arasında da önemli bir fark bulunmamaktadır. Sıcaklık ve çözünmüş oksijen değerleri 3L/dk. havalandırma debisindeki değerlere paralellik göstermiştir (Şekil 4. 34- Şekil 4.35).



Şekil 4.33. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi

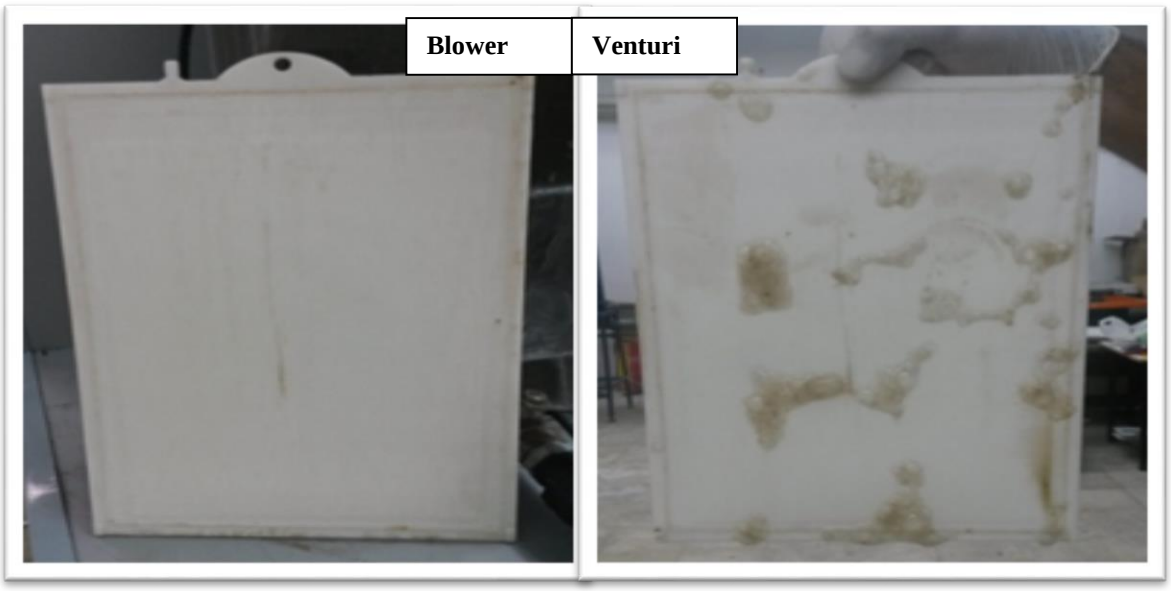


Şekil 4.34. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi

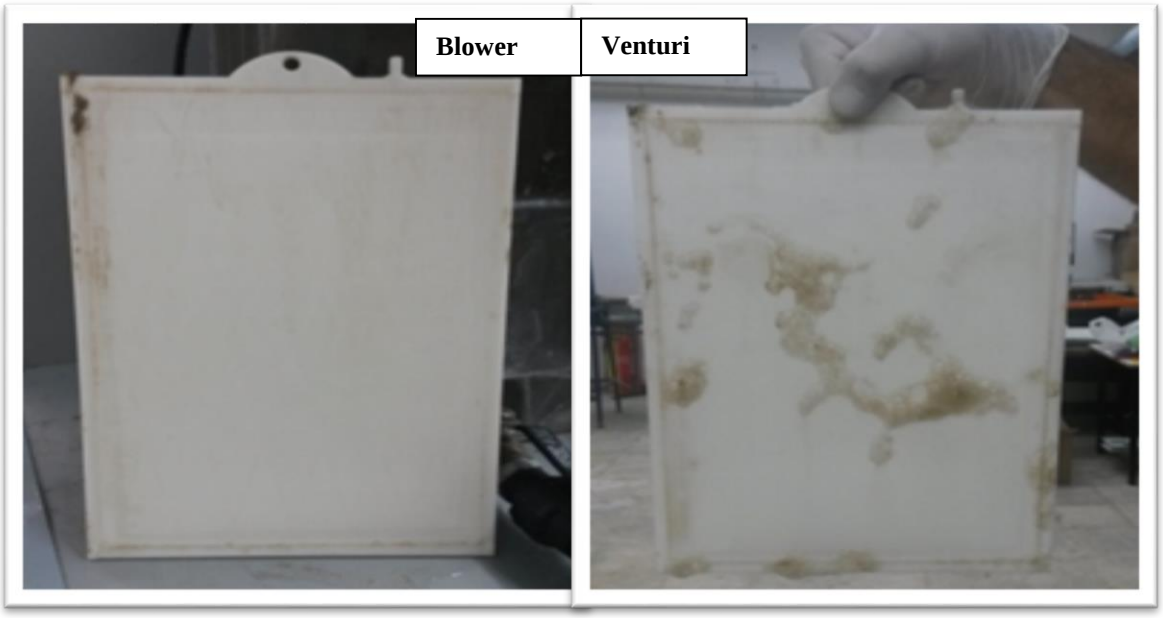


Şekil 4.35. 18 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi

3 L/dk. havalandırma debinsinde olduğu gibi 6 L/dk. havalandırma debisinde de blower ve venturi sistemleri arasındk.i en önemli fark biyoreaktörün çözünmüş oksijen konsantrasyonunda görülmüştür. MBR'deki çözünmüş oksijen konsantrasyonu blower sisteminde ortalama olarak 0.76 mg/L (0.6–1.5 mg/L) iken venturi sisteminde bu değer ortalama olarak 7.75 mg/L (7.5–8.2 mg/L) seviyesinde olmuştur. 6 L/dk. havalandırma debi ve 18 L/m^2.st akıda venturi ve blower sistemlerinde membran kirlenmesi açısından önemli görsel bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.36 - 4.37).



Şekil 4.36. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Ön yüzeyler)

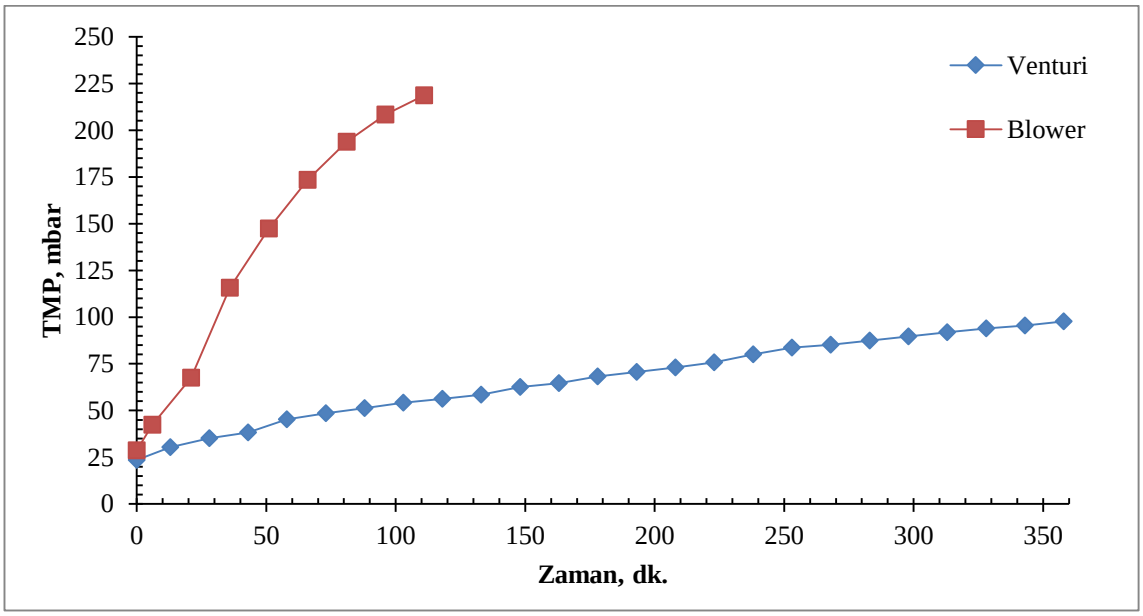


Şekil 4.37. 18 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Arka yüzeyler)

Sağ taraftaki venturi sisteminde kullanılan membran üzerinde görülen kirlilik, deney sonunda membran reaktörden çıkarılırken reaktör üstünde biriken köpüğün membrana yapışmasından kaynaklanmıştır.

4.2.3.2. 32 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Veriler

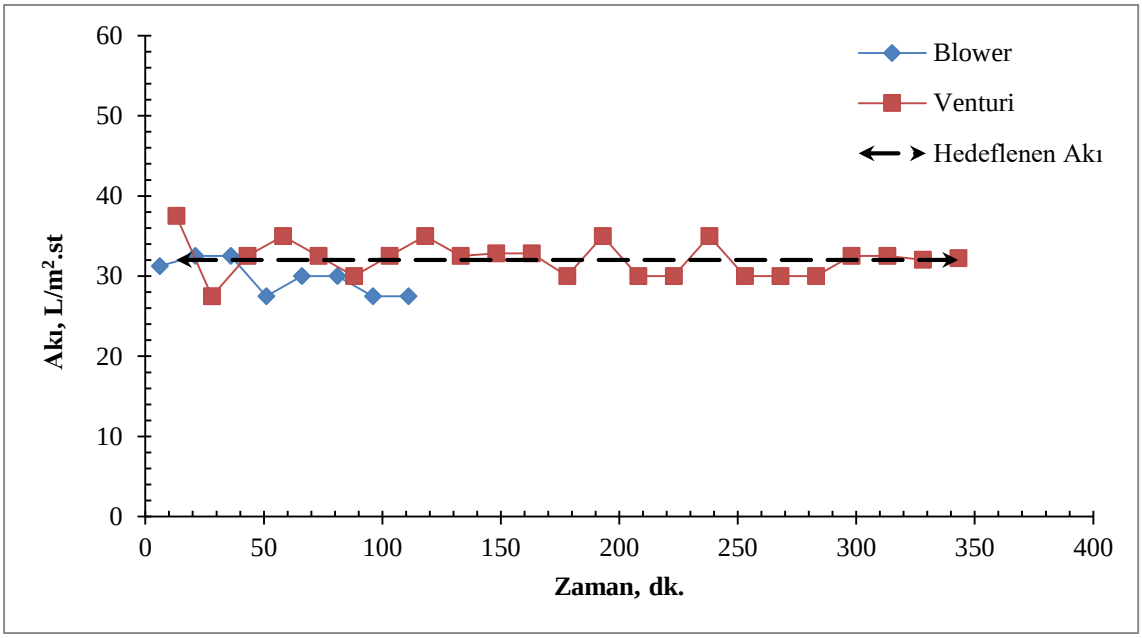
32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemleri arasında TMP gelişimi açısından önemli bir fark meydana gelmiştir. Blower sisteminde TMP 186. dk.250 mbar'a ulaşmış, dolayısıyla blower deneyi burada sonlandırılmıştır (Şekil 4.38). Venturi sisteminde ise TMP 360 dk.ika sonunda 97.7 mbar'a ulaşmıştır.



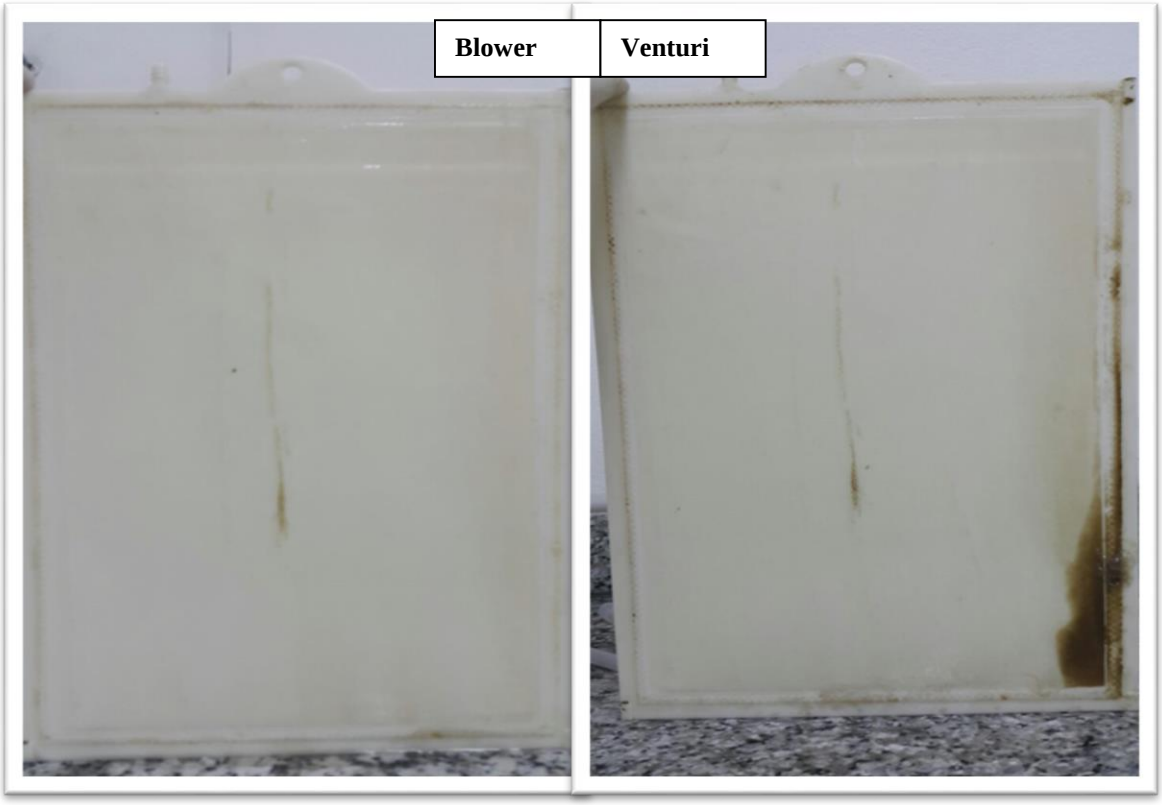
Şekil 4.38. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi

Venturi sisteminde süzüntü akısında önemli bir düşüş meydana gelmezken, blower sisteminde akıda (ortalama akı: 28.6 L/m^2.st) küçük bir azalma olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.39).

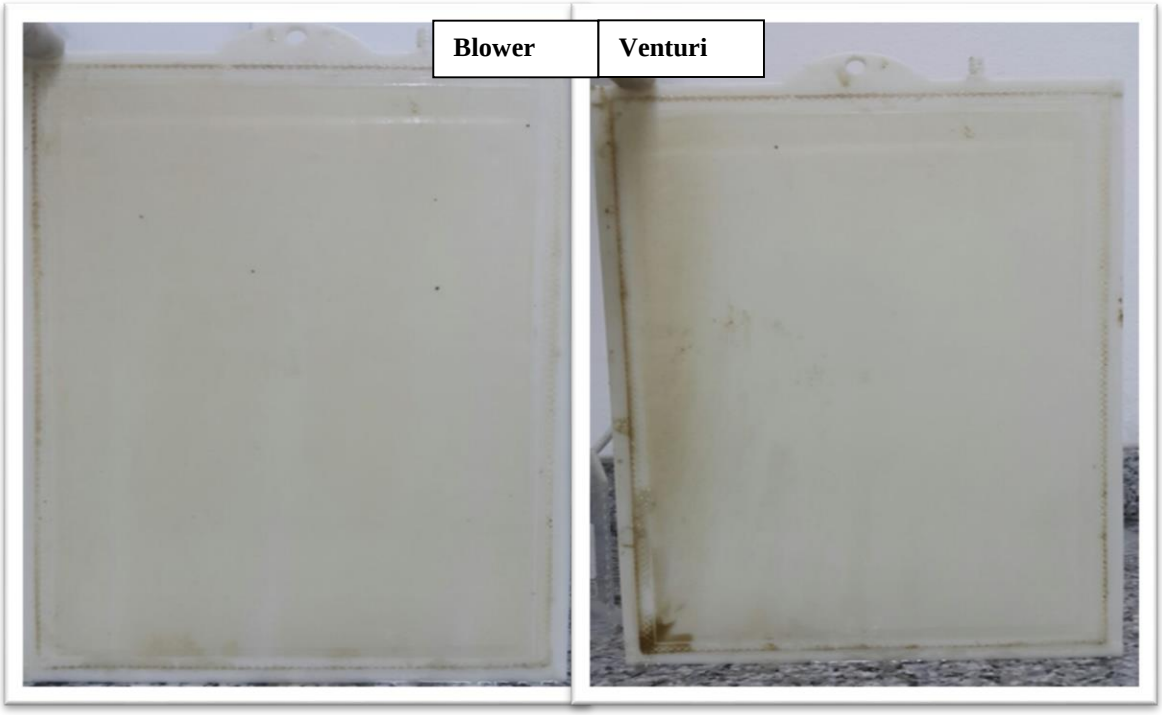
32 L/m^2.st akıda daha küçük olan ilk sıra difüzör deliklerinin tıkalı olması nedeniyle, venturi sisteminde membranın sağ tarafında (ön yüzeylerde sağ taraf, arka yüzeylerde sol taraf) az bir bölümün kirlendiği, buna karşılık blower sisteminde membranın tüm yüzey boyunca daha yoğun bir SMP tabakası ile kaplandığı görülmektedir (Şekil 4.40. ve Şekil 4.41).



Şekil 4.39. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi



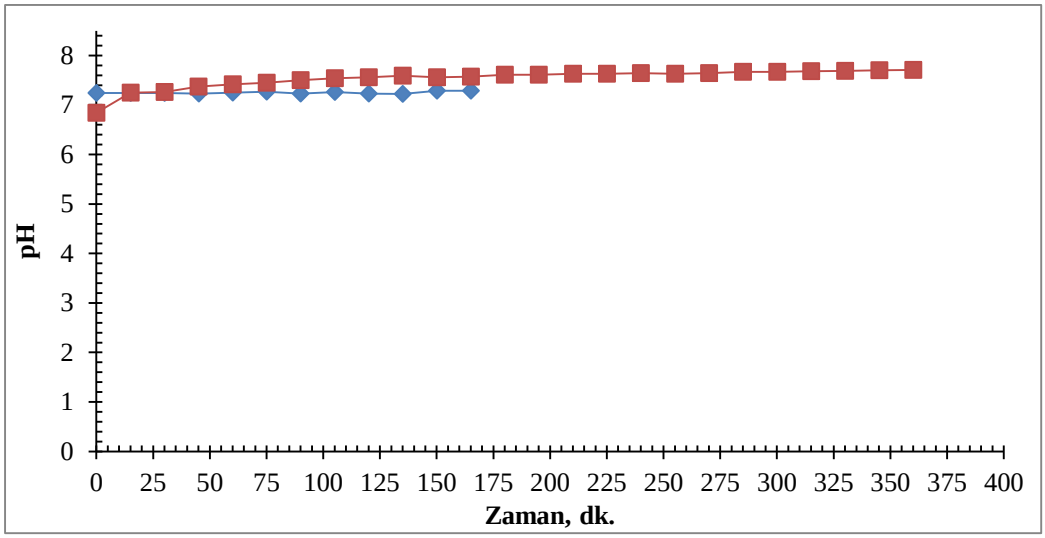
Şekil 4.40. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Ön yüzeyler)



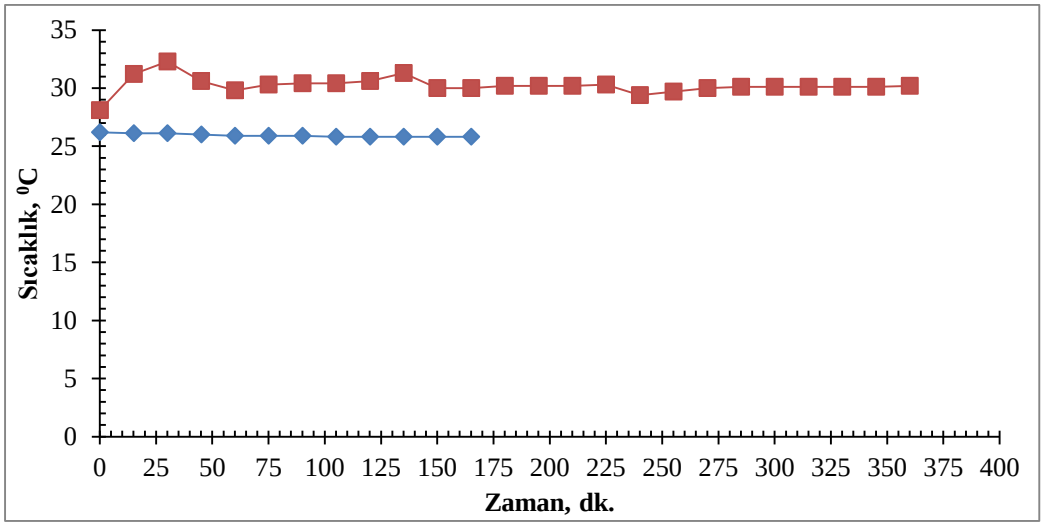
Şekil 4.41. 32 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde membran kirlenmesinin görsel olarak incelenmesi (Arka yüzeyler)

Burada ilginç bir şekilde difüzörün bir kısmının tıkalı olması nedeniyle venturi sisteminde membranın küçük bir bölümünün blower sistemine göre daha fazla kirlenmesine rağmen, membranın çalışma ömrü ve son TMP blower sistemine göre oldukça düşük çıkmıştır. Bu durum, yine venturi sisteminin membran yüzeyini temizlemede oldukça etkili olduğunu bir kez daha göstermektedir.

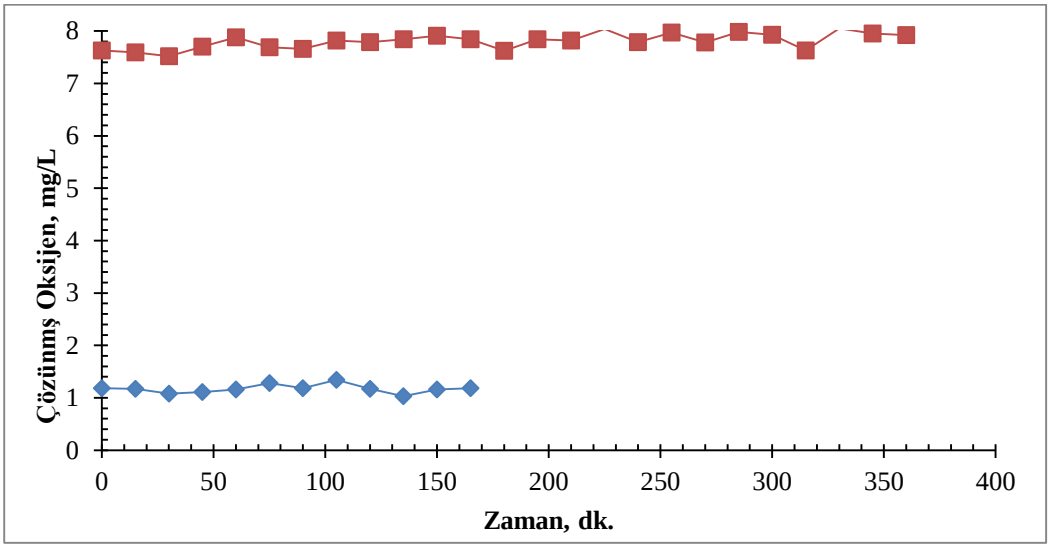
6 L/dk. havalandırma debi ve 32 L/m^2.st süzüntü akısında blower ve venturi sistemleri arasında, MBR'de pH ve sıcaklık açısından önemli bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.42. Şekil 4.43). Ancak 18 L/m^2.st akıda olduğu gibi burada da MBR'deki çözünmüş oksijen açısından her iki sistemde önemli bir fark gözlenmiştir. Blower sisteminde çözünmüş oksijen konsantrasyonu 1.5 mg/L civarında iken, venturi sisteminde 7.8 mg/L civarında olduğu görülmüştür (Şekil 4.44).



Şekil 4.42. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi



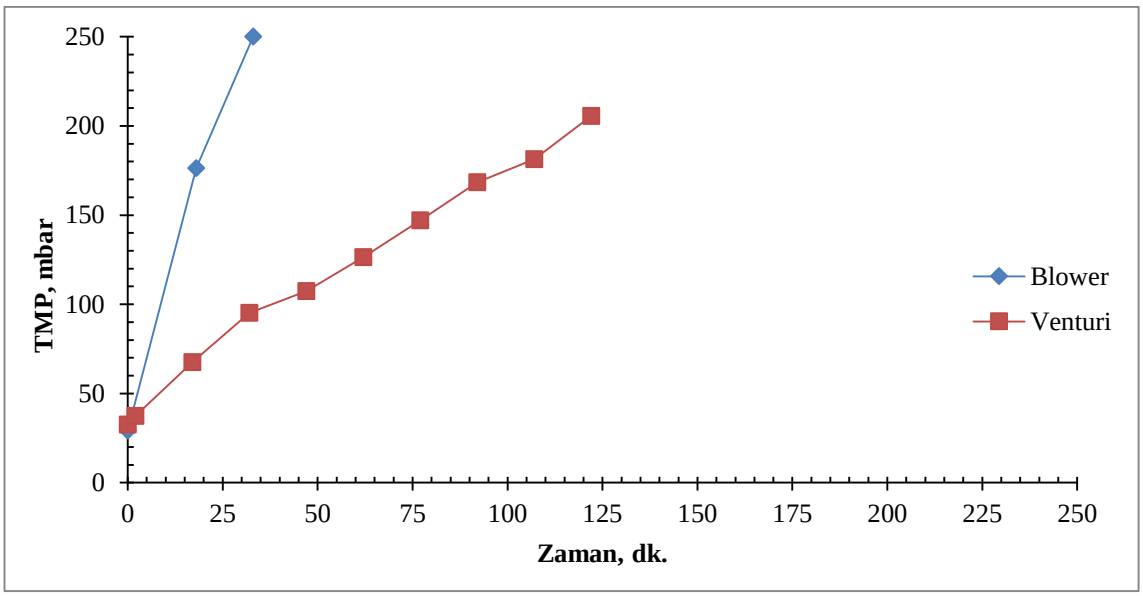
Şekil 4.43. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi



Şekil 4.44. 32 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi

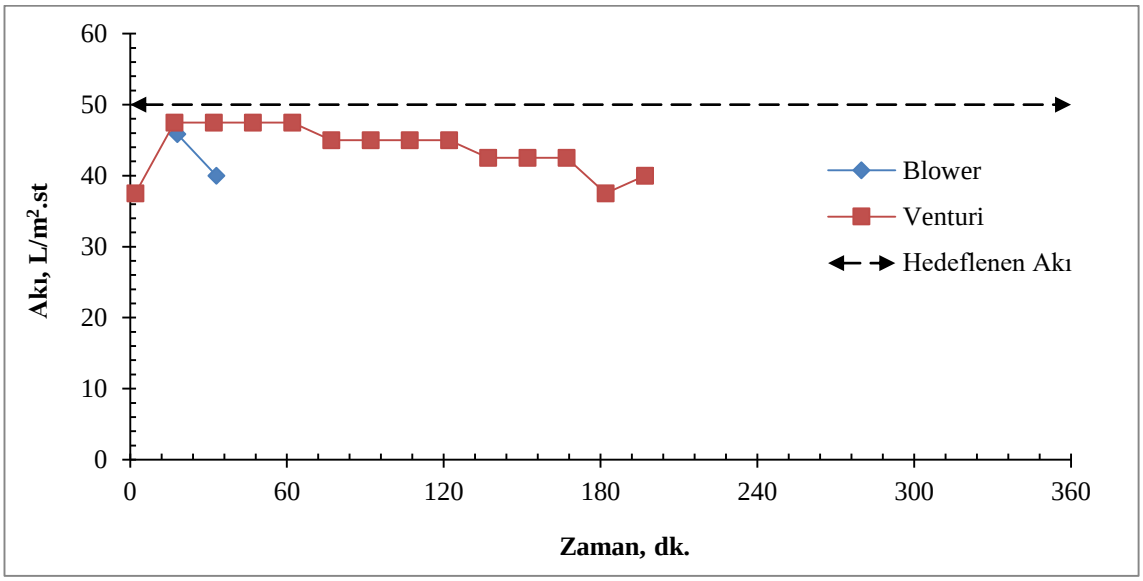
4.2.3.3. 50 L/m^2.st Akıda Elde Edilen Veriler

6 L/dk. havalandırma debi ve 50 L/m^2.st süzüntü akısında blower sisteminde TMP 33 dk.ika sonra 250 mbar'a ulaşırken, venturi sisteminde TMP 200 dk.ika sonra 250 mbar'a ulaşmıştır (Şekil 4.45).



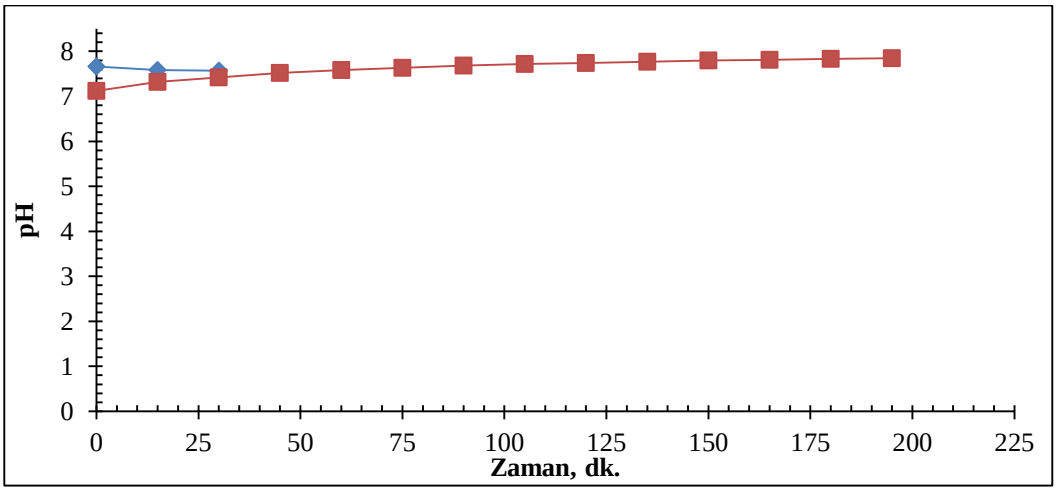
Şekil 4.45. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde TMP gelişimi

3L/dk. havalandırma debisinde her iki sistemde de 50 L/m^2.st akı değerinin sürdürülebilirliğinin bulunmadığı gözlenmişti, ancak havalandırma debisi 6 L/dk.'ya arttırıldığında blower sisteminin az bir düşüş ile (ortalama: 43.4 L/m^2.st) daha uzun süre çalışmaya devam ettiği görülmektedir (Şekil 4.46).

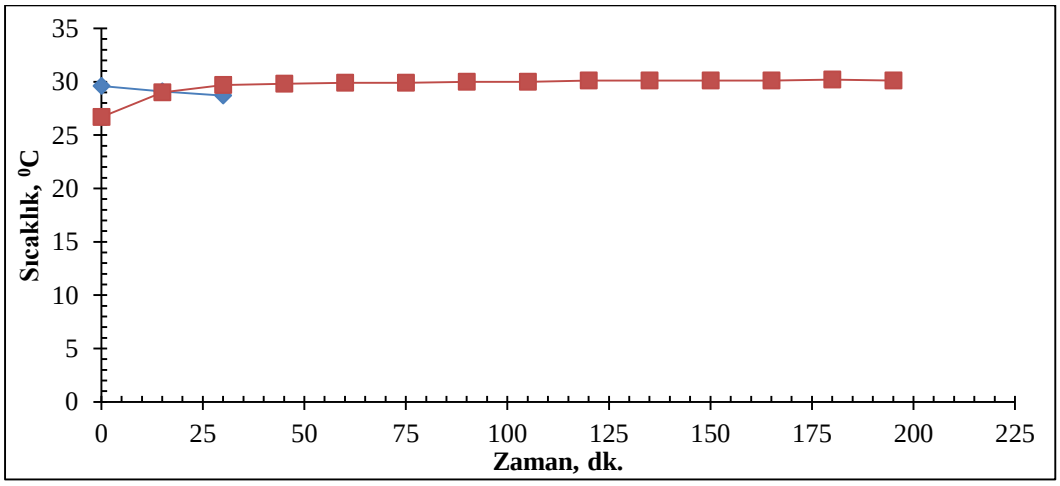


Şekil 4.46. 50 L/m^2.st akıda blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

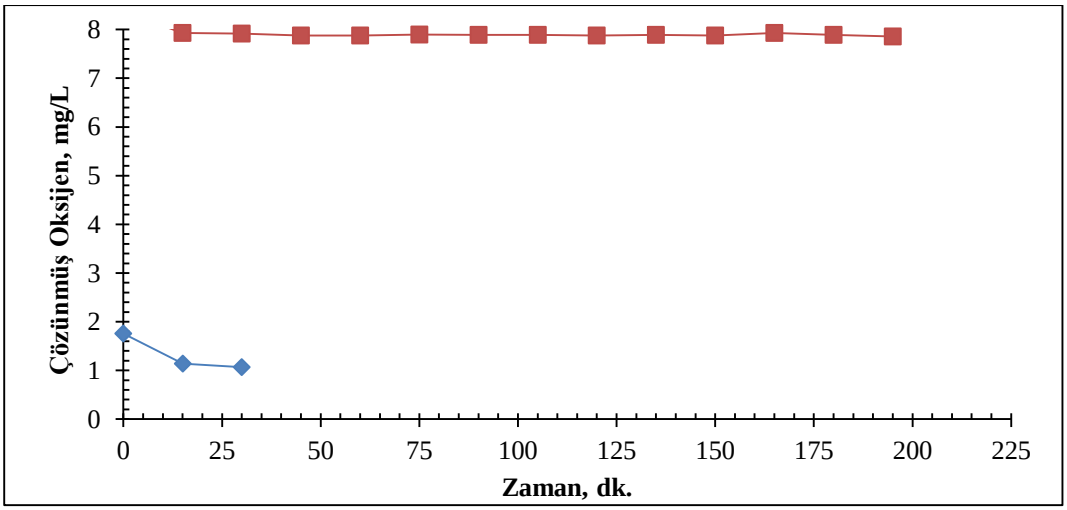
MBR'de pH, çözünmüş oksijen ve sıcaklık 32 L/m^2.st ile akıdk.i değerler ile benzerlik göstermiştir.



Şekil 4.47. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR pH değişimi



Şekil 4.48. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR sıcaklık değişimi

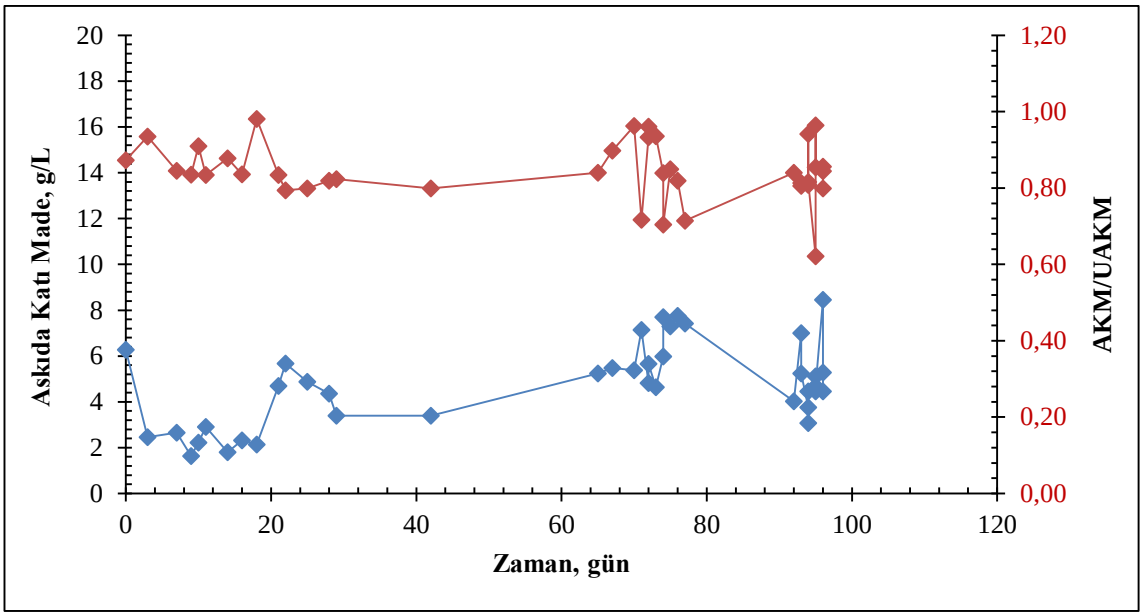


Şekil 4.49. 50 L/m^2.st hedeflenen akıda blower ve venturi sistemlerinde MBR çözünmüş oksijen konsantrasyonları değişimi

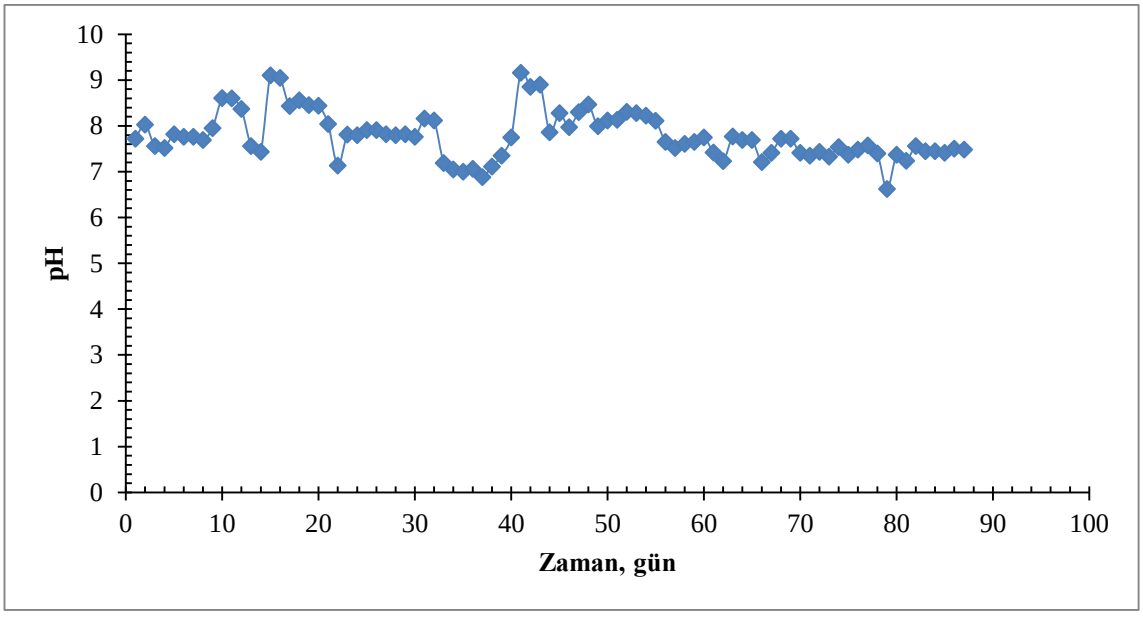
4.3. Gerçek Atıksu Çalışmalarından Elde Edilen Bulgular

4.3.1. Memran Biyoreaktörün İşletilmesi Sürecinde Elde Edilen Bulgular

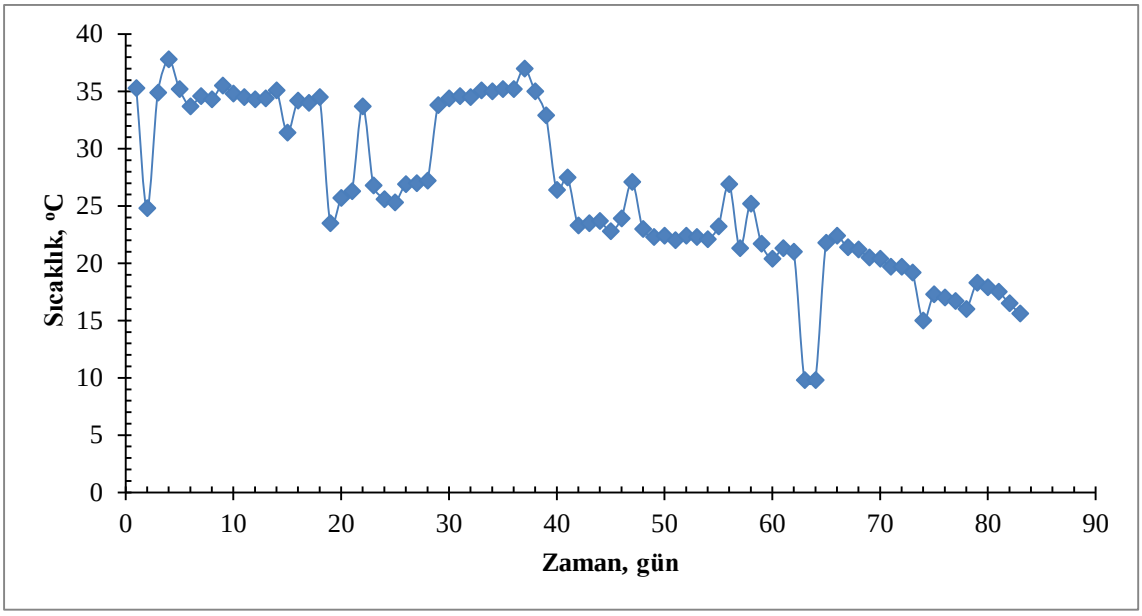
MBR'nin gerçek atık su ile işletildiği 90 günlük işletim sürecine dair veriler bu bölümde sunulmuştur. AKM, UAKM ve sıcaklık sırasıyla 0.34-7.42 mg/L, 2.5-8.5 g/L, 1.4–7.1 g/L ve 15–37 ºC arasında değişmiştir (Şekil 4.50, 4.53).



Şekil 4.50. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde AKM ve UAKM konsantrasyonu değişimi

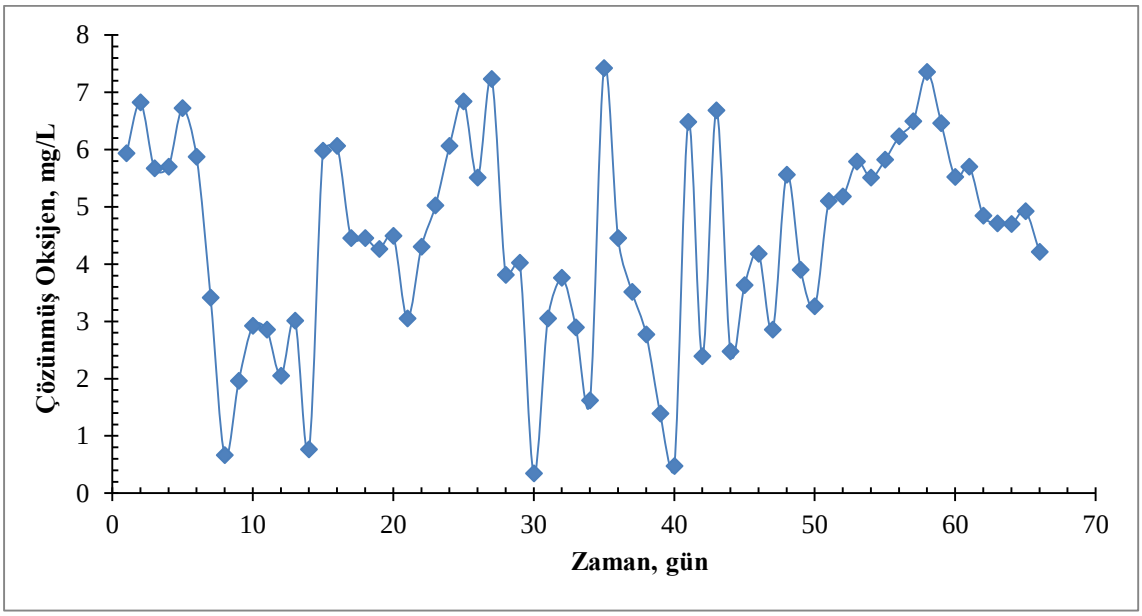


Şekil 4.51. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde pH değişimi



Şekil 4.52. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde çözünmüş oksijen kosantrasyonu değişimi

MBR'deki çözünmüş oksijen konsantrasyonu, sistemin blower veya venturi ile işletilmesine bağlı olarak oldukça değişkenlik göstermiştir (Şekil 4.54). Venturi ile yapılan işletmede çözünmüş oksijen konsantrasyonu genellikle 5 mg/L nin üzerinde ölçülmüştür.



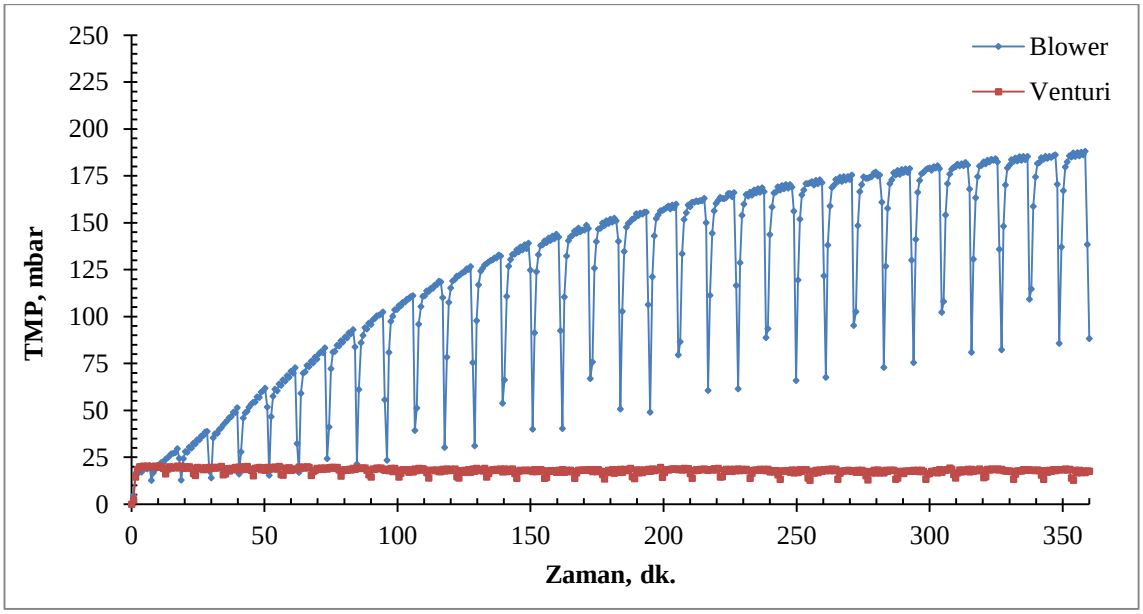
Şekil 4.53. Gerçek atıksu ile MBR işletiminde çözünmüş oksijen kosantrasyonu değişimi

4.3.2. Gerçek Atıksu Atıksu Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Daha önce sentsentetik atıksu çalışmaları sırasında oluşan teknik arızanın giderilmesi sonu TMP ve akı ölçüm değerleri anlık kaydedilebilmiştir.

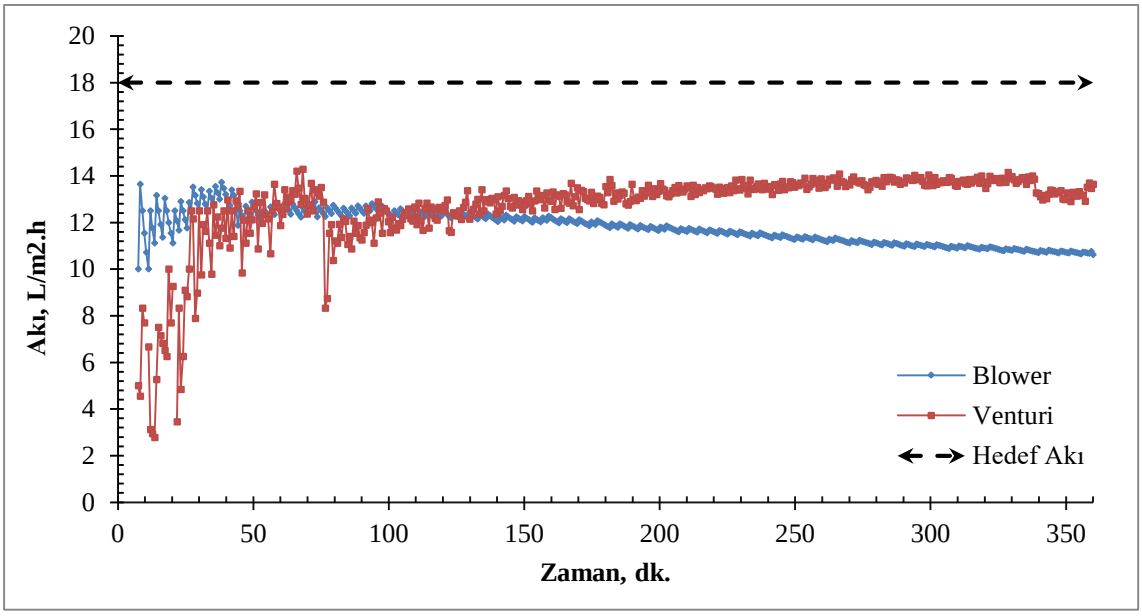
4.3.2.1. 18 L/m^2.st Akı da ve 3L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular

Her iki sisteminde 18 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower venturi sitemlerinde TMP gelişimi Şekil 4.54.'de verilmektedir. Şekil 4.54'ten görüldüğü gibi blower sisteminde TMP, azalan bir kirlenme hızı ile deney sonunda 200 mbar'a yaklaşmıştır. Buna karşılık venturi sisteminde TMP deney süresince yaklaşık olarak 20 mbar civarında kalmıştır.



Şekil 4.54. 18 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi

18 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi Şekil 4.54'de verilmektedir. Hem blower hem de venturi sisteminde akı 14 L/m^2.st civarında kalmıştır (Şekil 4.55).



Şekil 4.55. 18 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

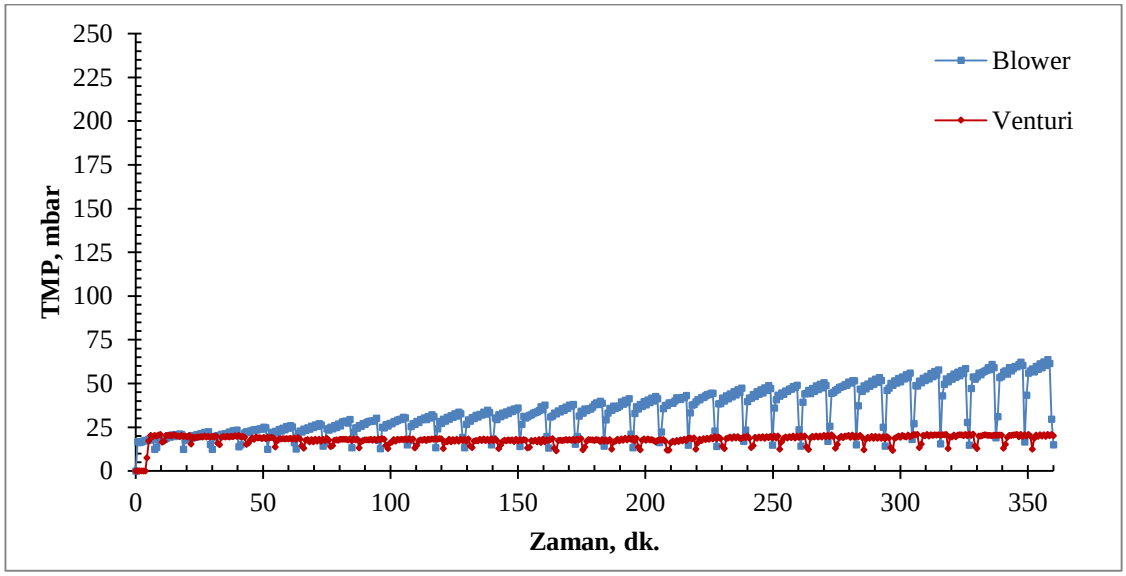
4.3.2.2. 18 L/m^2.st Akı da ve 1.5 ve 6 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular

3 L/dk. havalandırma debisinin blower sistemi için yetersiz, venturi sistemi için de fazla olması nedeniyle bu sistemlerin farklı havalandırma hızlarındk.i performanslarının karşılaştırılması kararlaştırılmıştır. Bu sebeple blower sistemi için 6 L/dk. venturi sistemi için de 1.5 L/dk. havalandırma hızlarında sistem performansları incelenmiştir. Şekil 4.56'dan görüldüğü gibi, blower sisteminde 6 L/dk. havalandırma debisinde deney sonunda TMP 65 mbar'a yükselirken venturi sisteminde 1.5 L/dk. havalandırma debisinde TMP deney sonunda 15 mbar'a yükselmiştir.

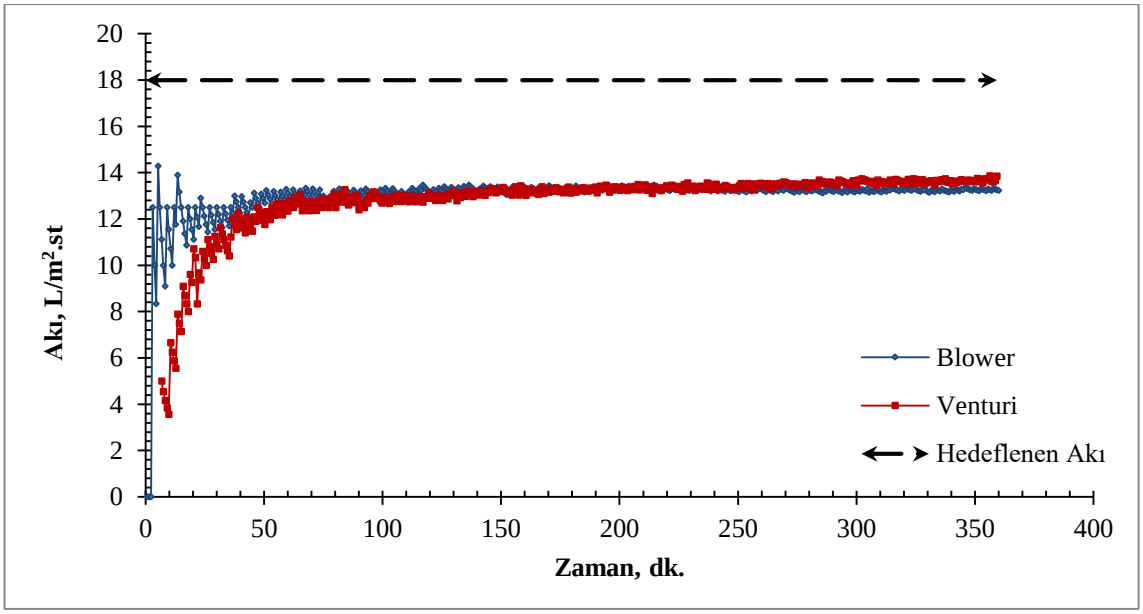
18 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi Şekil 4.57'de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, her iki sistemin akısı arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Her iki sistemde de membran akısı 13.5 L/m^2.st civarında kalmıştır. Burada hedeflenen 18 L/m^2.st akının, her iki sistemde de sağlanamadığı görülmektedir.

Daha önce sentetik atıksu kullanılarak yapılan çalışmada 18 L/m^2.st hedeflenen akının gerçekleştirildiği görülmüştü. Ancak gerçek atıksu ile yapılan çalışmada hedeflenen akının gerçekleştirilememesinin sebebinin gerçek atıksu bileşiminden kaynaklanmış olduğu tahmin edilmektedir. Sentetik atıksu bileşiminde inert veya partiküler madde bulunmadığından membran kirletme potansiyeli düşük dolayısıyla

membran akısı hedeflendiği şekilde çıkmıştır. Sentetik atıksu ve gerçek atıksu çalışmalarında çıkıştaki KOİ'nin sentetik atıksudakine göre daha yüksek çıkması da bu durumu teyit etmektedir.



Şekil 4.56. 18 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi



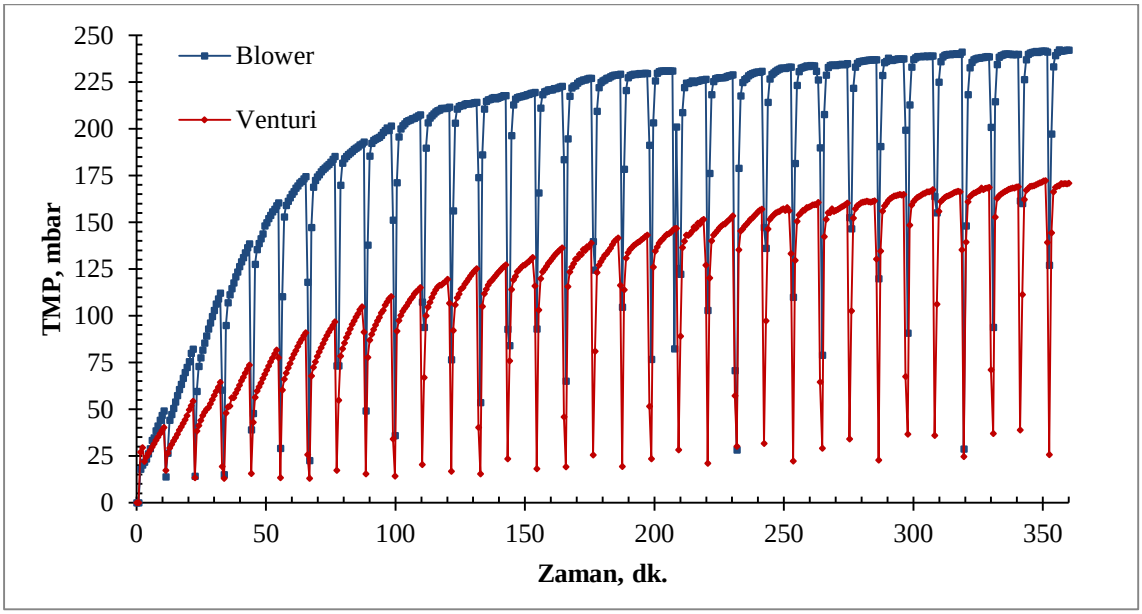
Şekil 4.57. 18 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

Daha önce sentetik atıksu kullanılarak yapılan çalışmada 18 L/m^2.st hedeflenen akının gerçekleştirildiği görülmüştü. Ancak gerçek atıksu ile yapılan çalışmada hedeflenen akının gerçekleştirilememesinin sebebinin gerçek atıksu bileşiminden kaynaklanmış olduğu tahmin edilmektedir. Sentetik atıksu bileşiminde inert veya

partiküler madde bulunmadığından membran kirletme potansiyeli düşük dolayısıyla membran akısı hedeflendiği şekilde çıkmıştır. Sentetik atıksu ve gerçek atıksu çalışmalarında çıkıştaki KOİ'nin sentetik atıksudk.ine göre daha yüksek çıkması da bu durumu teyit eder görünmektedir.

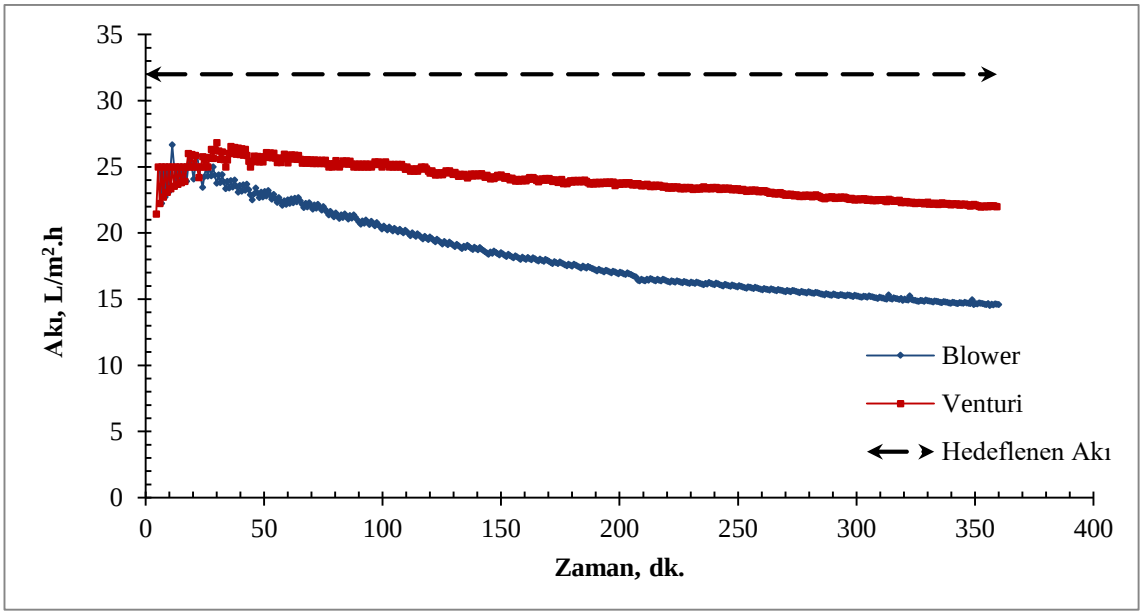
4.3.2.3. 32 L/m^2.st Akıda 3 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular

3 L/dk. havalandırma debi ve 32 L/m^2.st akıda blower sisteminde membran kirlenme hızının venturi sistemine göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 4.58). Her iki sistem de deney süresince belirlenen TMP (250 mbar) değerini aşmamıştır. Blower sisteminde gözlenen son TMP 242 mbar iken, venturi sistemi deney sonunda 170 mbar'a ulaşmıştır.



Şekil 4.58. 32 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi

32 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi Şekil 4.59'da verilmektedir.

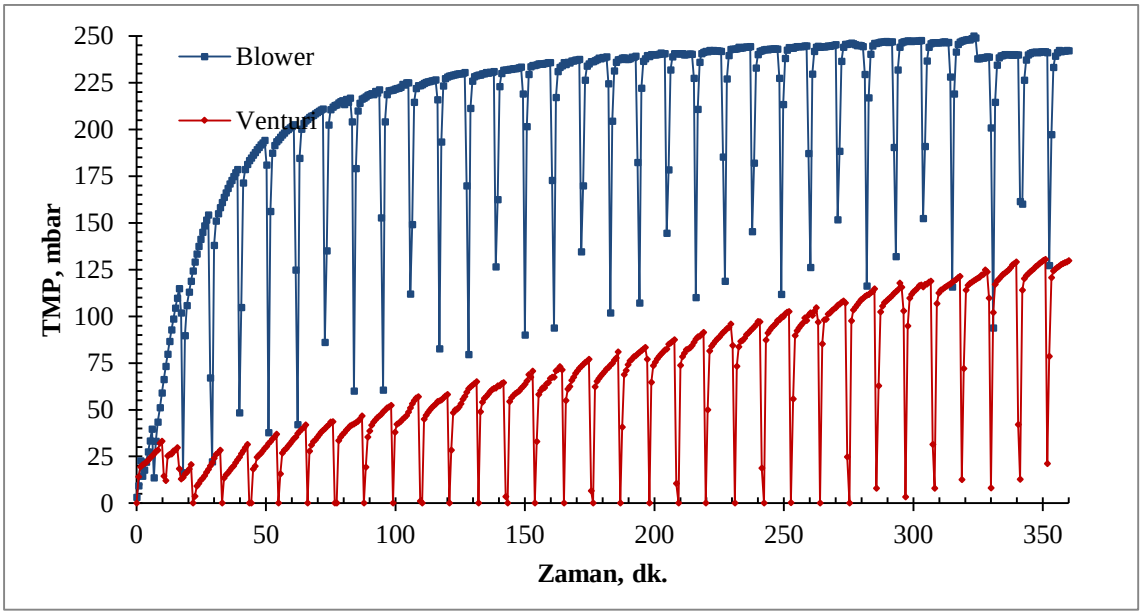


Şekil 4.59. 32 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

Görüldüğü üzere hedeflenen akı 32 L/m^2.st olmasına rağmen hem venturi hem de blower sistemlerinde hedeflenen akı değerine ulaşılamamıştır. Venturi sisteminde başlangıçta akı 26 L/m^2.st (Şekil 4.59'da 33. dk.) civarında iken deney sonunda 22 L/m^2.st değerine kadar düşmüştür. Buradan venturi sisteminde deney boyunca hedeflenen akıda yaklaşık %30 azalma meydana gelmiştir. Blower sisteminde ise başlangıçta akı 26 L/m^2.st (Şekil 4.59'da 25. dk.) civarında iken deney sonunda 15 L/m^2.st değerine kadar düşmüştür. Blower sisteminde deney boyunca hedeflenen akıda yaklaşık %53 azalma meydana geldiği görülmektedir.

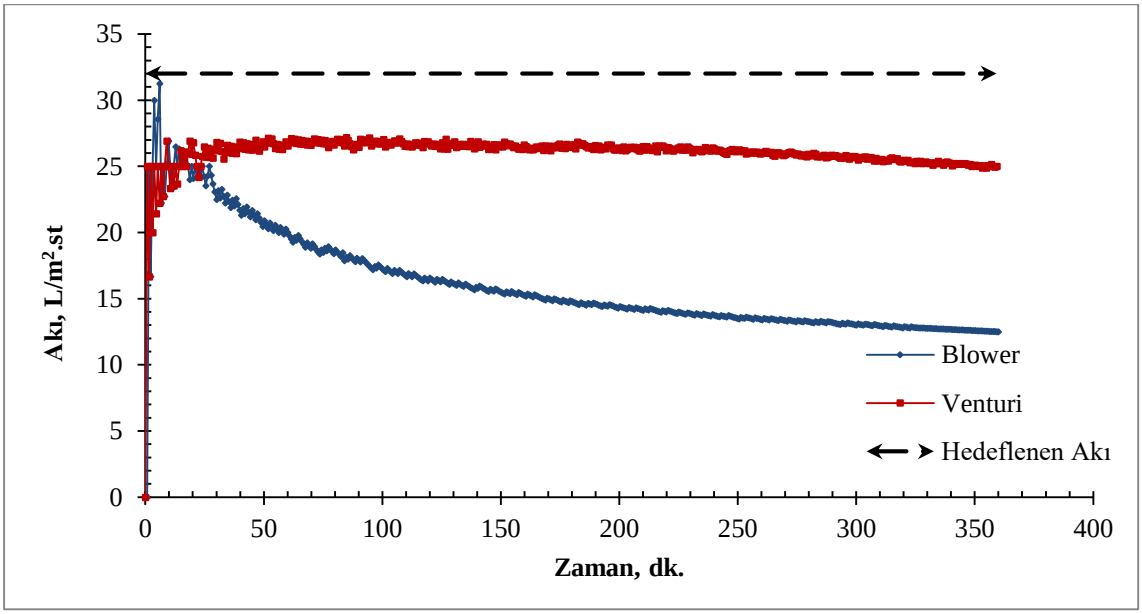
4.3.2.4. 32 L/m^2.st Akıda 1.5 ve 6 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular

32 L/m^2.st akıda blower sistemiyle 6 L/dk. ve venturi sistemiyle 1.5 L/dk. havalandırma hızlarında meydana gelen TMP gelişimi Şekil 4.60'da verilmektedir. Blower sisteminde venturi sisteminin dört katı kadar havalandırma yapılmasına rağmen blower sisteminde TMP deney süresi bitmeden 250 mbar'a ulaşmıştır. Dört kat daha az havalandırılan venturi sisteminde ise deney süresi sonunda TMP 130 mbar'a çıkmıştır. Ayrıca Şekil 4.60'dan blower sisteminde yaklaşık 60 dk.ika içerisinde TMP'nin hızlı bir şekilde 200 mbar seviyesini geçtiği görülmektedir.



Şekil 4.60. 32 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi

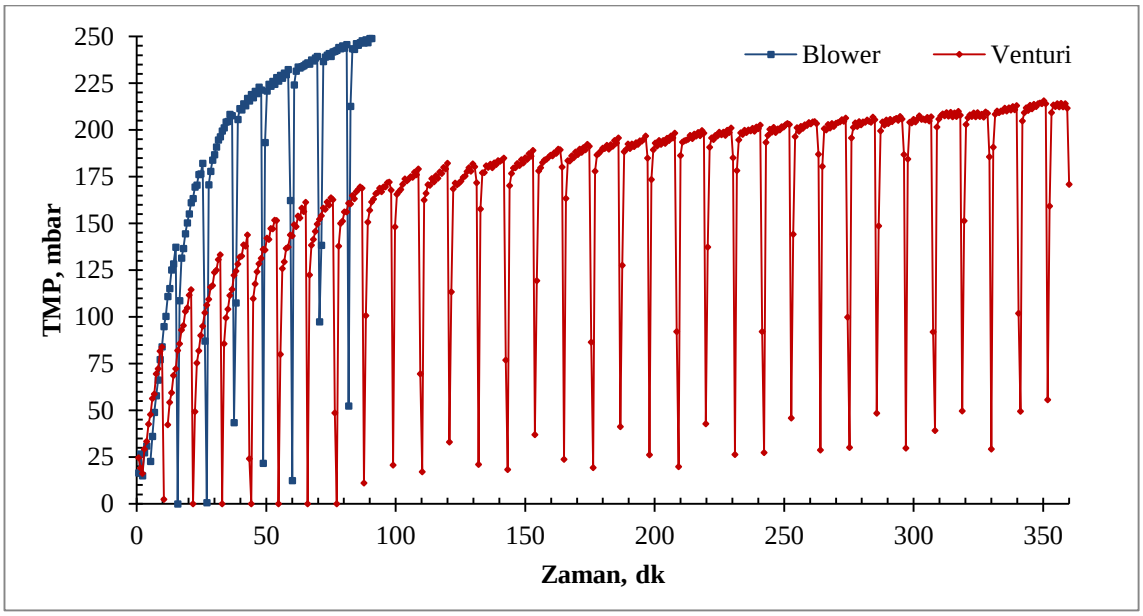
Aynı işletme koşullarında blower ve venturi sistemlerinde gözlenen akı değişimi Şekil 4.61'de verilmektedir. Burada görüldüğü üzere, venturi sisteminde ortalama akı 25 L/m^2.st civarında iken, blower sisteminde akı daha hızlı bir şekilde azalmakta ve deney sonuna doğru 12 L/m^2.st değerine kadar düşmektedir.



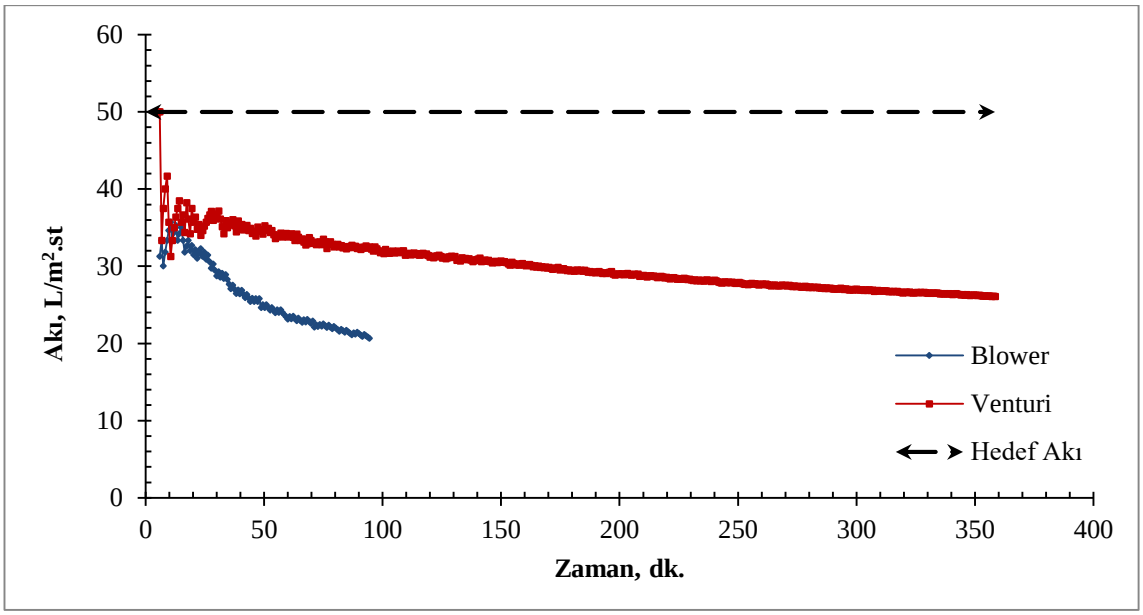
Şekil 4.61. 32 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

4.3.2.5. 50 L/m^2.st Akıda 3 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular

50 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde yapılan deneylerde gözlenen TMP gelişimi Şekil 4.62'de verilmektedir. 50 L/m2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower sistemi yaklaşık 90 dk. son TMP değerine (250 mbar) ulaşmıştır. Buna karşılık venturi sistemi deney süresi sonuna kadar çalışmış olup son TMP değeri 212 mbar olmuştur.



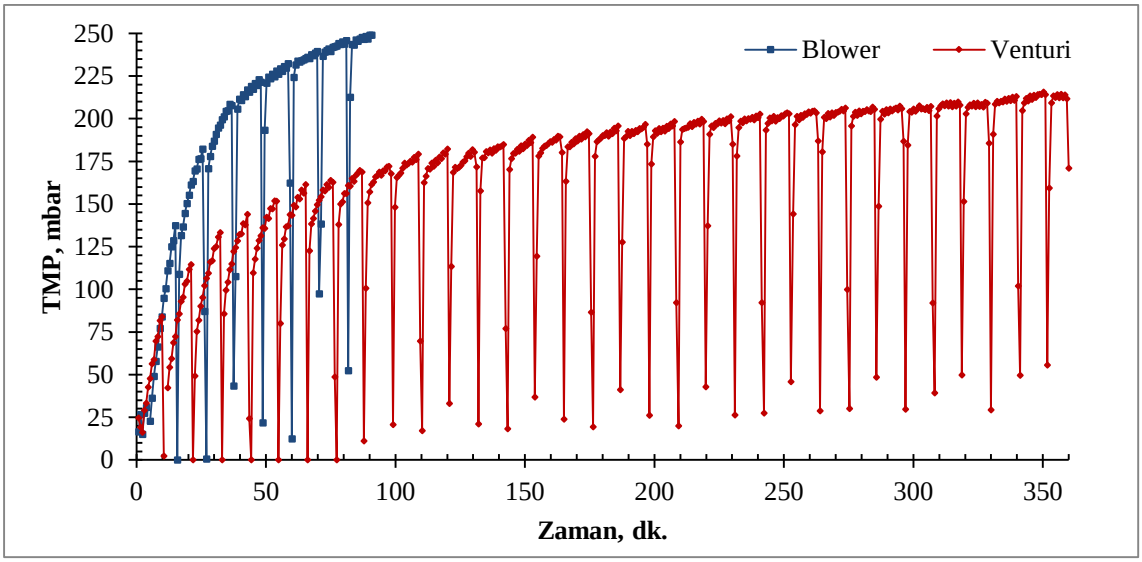
Şekil 4.62. 50 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi



Şekil 4.63. 50 L/m^2.st akı ve 3 L/dk. havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

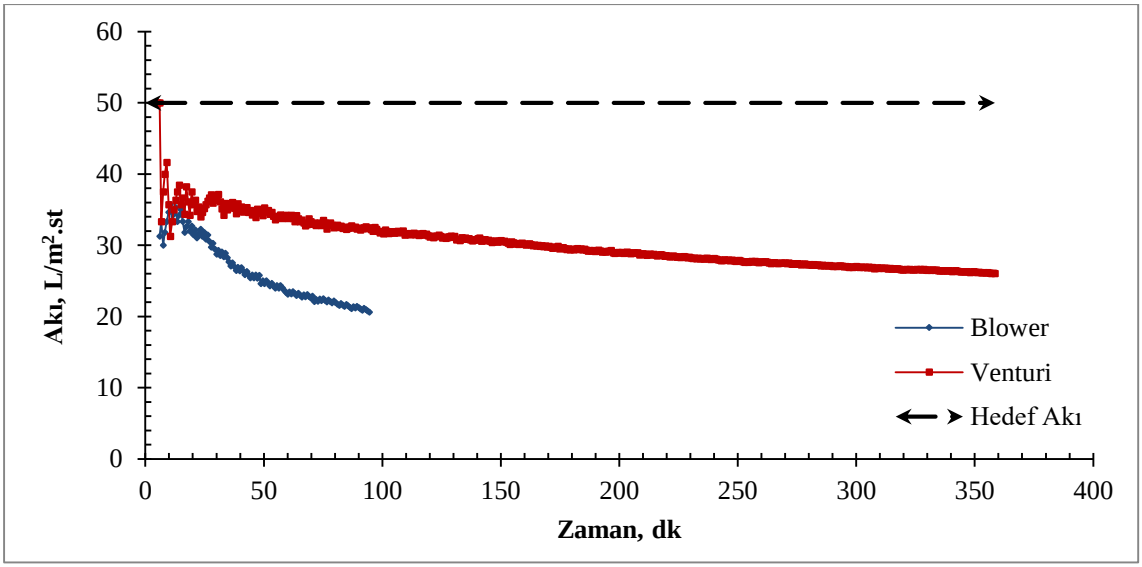
4.3.2.6. 50 L/m^2.st Akıda 1.5 ve 6 L/dk. Havalandırma Debisinde Elde Edilen Bulgular

50 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinin TMP değişimleri Şekil 4.64'de ve akı değişimleri Şekil 4.64'de görülmektedir.



Şekil 4.64. 50 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde TMP değişimi

Blower sistemi 86 dk.ika çalışmış ve son akısı 26 L/m^2.st olmuştur. Venturi sistemi blower sisteminin 1/4 hızında havalandırılırken, deney sonuna kadar çalışmış ve son akı değeri 29 L/m^2.st değerine kadar inmiştir.



Şekil 4.65. 50 L/m^2.st akı ve 1.5 L/dk. (Venturi) ve 6 L/dk. (Blower) havalandırma debisinde blower ve venturi sistemlerinde akı değişimi

4.4. Gerçek Atıksu için Venturi ve Blower Sistemlerinin Arıtma Performansı

4.4.1. Biyokütle ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı

3 L/dk. havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'de ölçülen biyokütle ve KOİ konsantrasyonları aşağıda Çizelge 4.3'te verilmektedir. Genel olarak AKM konsantrasyonlarına bakıldığında, venturi sisteminde AKM'nin daha yüksek ölçüldüğü görülmektedir. KOİ giderim verimine bakıldığında blower sisteminde %75–92 arasında kaldığı görülmektedir. Blower sisteminde akı arttıkça KOİ giderim veriminin azaldığı görülmektedir. Venturi sisteminde ise KOİ giderim verimi %85–87 düzeyinde gerçekleşmiştir. Venturi sisteminde KOİ giderim veriminin akıdan (veya organik yükleme hızından) etkilenmediği görünmektedir.

Çizelge 4.3. 3 L/dk. havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'da ölçülen biyokütle ve KOİ konsantrasyonları

Hav. Sistemi	Akı ($L/m^2.st$)	AKM (mg/L)	UAKM (mg/L)	AKM/ UAKM	KOİ (mg/L)			F/M	KOİ Gid. Verimi
					Giriş	MBR Supernatant	Çıkış		
Blower	18	4020	3620	0.84	324	75.2	25.6	0.35	92
	32	3760	3040	0.81	308	85.1	60.8	0.63	80
	50	3080	2900	0.94	307	77.6	75.4	1.20	75
Venturi	18	8460	7140	0.84	458	74.9	59.7	0.23	87
	32	5280	4220	0.80	301	59.9	44.7	0.44	85
	50	4460	3820	0.86	388	75.1	51.8	1.04	87

6 L/dk. (blower) ve 1.5 L/dk. (venturi) havalandırma hızları ve değişik akılarda MBR'de biyokütle ve KOİ konsantrasyonları Çizelge 4.4'te verilmektedir. Genel olarak AKM konsantrasyonlarına bakıldığında bu havalandırma hızlarında blower sisteminde AKM 'nin daha yüksek olduğu görülmüştür. KOİ giderim verimine bakıldığında blower sisteminde %83–89 arasında kaldığı görülmektedir. Blower sisteminde akı arttıkça KOİ giderim veriminin bu havalandırma hızları için de azaldığı görülmektedir. Venturi sisteminde ise KOİ giderim verimi %88–91 düzeyinde gerçekleşmiştir. 3 L/dk. havalandırma debisinde olduğu gibi 1.5 L/dk. havalandırma debisinde da venturi sisteminde KOİ giderim veriminin akıdan (veya organik yükleme hızından) etkilenmediği gözlenmiştir.

Çizelge 4.4. 6 L/dk. (blower) ve 1.5 L/dk. (venturi) havalandırma hızları ve değişik akılarda MBR'da biyokütle ve KOİ konsantrasyonları

Hav. Sistemi	Akı ($L/m^2.st$)	AKM (mg/L)	UAKM (mg/L)	AKM/ UAKM	KOİ (mg/L)			F/ M	KOİ Gid. Verimi
					Giriş	MBR Supernatant	Çıkış		
Blower	18	7000	5640	0.81	280	63.1	31	0.17	89
	32	5240	4260	0.81	308	68.1	35.8	0.45	88
	50	4460	3640	0.82	361	78	60.8	0.97	83
Venturi	18	5120	3180	0.62	298	75	37.1	0.25	88
	32	4460	4300	0.96	325	76.7	32.2	0.56	90
	50	4680	400	0.85	353	77.9	32.8	0.91	91

4.4.2. Azot ve Fosfor Giderimi

Membran kirlenmesi çalışmalarında değişik akı ve havalandırma hızlarında MBR'da ölçülen azot ve fosfor parametreleri Çizelge 4.5'de verilmektedir. Fosfor giderimi genel olarak %30 civarında gerçekleşmiştir. Çıkış NH_4-N konsantrasyonu 0–14.7 mg/L arasında gerçekleşmiştir. Çıkış NO_3-N konsantrasyonu ise 0-28 mg/L arasında ölçülmüştür.

Çizelge 4.5. Membran kirlenmesi çalışmalarında değişik akı ve havalandırma hızlarında MBR'da ölçülen Azot ve Fosfor Parametreleri

Havalandırma Sistemi	Havalandırma Hızı (L/dk.)	Akı ($L/m^2.st$)	PO_4^-P (mg/L)		NH_4^-N (mg/L)		NO_3^-N (mg/L)
			Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Çıkış
Blower	3	18	4.6	3.5	25.6	0.0	27.4
		32	5.9	3.9	38.7	3.9	9.4
		50	5.2	4.1	39.9	14.7	3.1
Venturi	3	18	5.9	3.9	> 47	0.0	33.3
		32	9.7	4.1	> 47	0.1	37.8
		50	8.4	5.5	> 47	0.7	34.0
Blower	6	18	8.6	4.5	45.2	0.0	32.8
		32	4.1	4.1	48.6	1.2	29.7
		50	5.3	3.2	38.7	9.2	5.7
Venturi	1.5	18	6.4	3.7	38.3	0.3	0.3
		32	6.7	3.6	43.4	0.4	0.3
		50	8.1	4.0	46.7	0.1	0.3

4.4.3. Hücre Dışı Polimerik Madde ve Çözümü Mikrobiyal Ürün Analizi

3 L/dk. havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'da ölçülen SMP konsantrasyonları, Çizelge 4.6'de gösterilmektedir. Reaktör girişinde protein ve karbonhidrat konsantrasyonlarının birbirinden çok farklı olmadığı gözlemlenmiştir. Hem blower hem de venturi sisteminde MBR ve çıkışta SMP karbonhidrat miktarının protein miktarından daha fazla olduğu tesbit edilmiştir. Örneğin MBR'deki karbonhidrat/protein oranının 1.6–5.9 arasında değiştiği görülmektedir.

6 L/dk. (blower) ve 1.5 L/dk. (venturi) havalandırma hızları ve değişik akılarda MBR'de ölçülen SMP konsantrasyonları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu havalandırma hızlarında da 3 L/dk. havalandırma debisinde olduğu gibi hem blower hem de venturi sisteminde MBR ve çıkışta SMP karbonhidrat miktarının protein miktarından daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. 3 L/dk. havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'da ölçülen SMP konsantrasyonları Havalandırma sistemi

Havalandırma Sistemi	**Akı (L/m^2.st)**	**SMP Karbonhidrat (mg/L)**			**SMP Protein (mg/L)**		
		Giriş	MBR	Çıkış	Giriş	MBR	Çıkış
Blower	18	30.4	73.9	63.8	32.4	12.6	15.7
	32	26.1	49.3	65.2	25.2	10.1	10.3
	50	21.7	40.6	65.2	28.2	10.7	13.0
Venturi	18	32.2	26.1	17.1	66.2	6.9	17.4
	32	39.8	27.7	22.8	56.9	16.8	7.6
	50	37.4	80.7	25.8	60.0	30.6	9.6

Çizelge 4.7. 6 L/dk. (blower) ve 1.5 L/dk. (venturi) havalandırma hızları ve değişik akılarda MBR'da ölçülen SMP konsantrasyonları

Havalandırma Sistemi	**Akı (L/m^2.st)**	**SMP Karbonhidrat (mg/L)**			**SMP Protein (mg/L)**		
		Giriş	MBR	Çıkış	Giriş	MBR	Çıkış
Blower	18	25.7	21.9	12.9	47.2	10.7	8.2
	32	17.0	40.9	88.8	59.8	7.5	12.6
	50	20.3	30.4	23.2	36.6	11.7	9.1
Venturi	18	40.6	40.7	66.7	72.8	14.8	8.8
	32	29.3	45.2	16.8	33.1	20.7	12.8
	50	43.8	80.3	29.0	38.1	13.3	9.2

3 L/dk. havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'de ölçülen EPS konsantrasyonları Çizelge 4.8'de verilmektedir. Burada membran akısı ile MBR'deki EPS konsantrasyonları arasında monoton bir ilişki görünmemektedir.

Çizelge 4.8. 3 L/dk. havalandırma debi ve değişik akılarda MBR'de ölçülen EPS konsantrasyonları

Havalandırma Sistemi	**Akı (L/m^2.st)**	**EPS Karbonhidrat (mg/L)**	**EPS Protein (mg/L)**
Blower	18	76.8	8.3
	32	14.5	15.0
	50	13.0	23.1
Venturi	18	11.4	12.5
	32	7.0	3.4
	50	7.8	1.2

Havalandırma sistemi 6 L/dk. (blower) ve 1.5 L/dk. (venturi) havalandırma hızları ve değişik akılarda MBR'da ölçülen EPS konsantrasyonları Çizelge 4.9'da verilmiştir. Burada genel olarak EPS karbonhidrat konsantrasyonlarının protein konsantrasyonlarından daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte havalandırma debi veya havalandırma sisteminin MBR'deki EPS protein ve karbonhidrat konsantrasyonları üzerinde açık bir etkisinin bulunmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.9. 6 L/dk. (blower) ve 1.5 L/dk. (venturi) havalandırma debileri ve değişik akılarda MBR'de ölçülen EPS konsantrasyonları

Havalandırma Sistemi	**Akı (L/m^2.st)**	**EPS Karbonhidrat (mg/L)**	**EPS Protein (mg/L)**
Blower	18	49.1	9.5
	32	35.8	11.0
	50	14.5	10.2
Venturi	18	74.3	17.4
	32	28.6	9.6
	50	11.9	12.6

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Batık bir MBR'ye venturi enjektörü entegre ederek işletme şartlarının iyileştirilmesinin araştırıldığı bu doktora tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiş ve bu sistemle ilgili yapılacak ileriki çalışmalara yönelik öneriler sıralanmıştır.

5.1. Sentetik Atıksu Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

Sentetik atıksu ile yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

❖ 18 L/m^2.st süzüntü akısında çalışıldığı zaman, her iki havalandırma debisinde de (3 ve 6 L/dk.) blower ve venturi havalandırma sisteminin kullanımının membran kirliği açısından bir farkı bulunmamaktadır. Her iki sistem için bu akı değeri sürdürülebilir bir değerde olmuştur.

❖ 32 L/m^2.st süzüntü akısında çalışıldığı zaman, (nispeten yüksek akıda) venturi sistemi blower sisteminden 3.4 kat daha uzun süre çalışmasına rağmen ulaştığı son TMP venturi sisteminin yaklaşık 1/3'ü kadar olmuştur. Blower sisteminde akıda bir azalma gözlenirken, venturi sisteminde test süresince ortalama akı değeri korunmuştur.

❖ 50 L/m^2.st süzüntü akısında (yüksek akıda) çalışıldığı zaman, venturi sistemi blower sisteminden 5.4 kat daha fazla çalışmıştır. Bu akı değeri her iki sistem için de sürdürülebilir bir akı değeri değildir.

❖ Çalışılan havalandırma debisinden (3 ve 6 L/dk.) bağımsız olarak blower sistemi MBR'nin oksijen ihtiyacını karşılamada yetersiz kalırken (0.1–1.5 mg/L), venturi her iki havalandırma hızında da MBR'nin oksijen seviyesinin 7–8 mg/L civarında kalmasını sağlamıştır.

❖ 3 L/dk. havalandırma hızında temiz su ile yapılan deneylerde venturinin standart oksijen transfer hızı (SOTR) blowerınkinden yaklaşık 10 kat (9.56) daha yüksek çıkmıştır. Yine aynı havalandırma debisinde venturinin standart oksijenlendirme verimi blowerınkinden yaklaşık 4 kat (4.33) daha yüksek çıkmıştır.

5.2. Gerçek Atıksu Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

Gerçek atıksu ile yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

❖ 18 L/m^2.st akıda yapılan çalışmalarda havalandırma hızından bağımsız olarak, venturi ile havalandırılan sistemde, TMP deney boyunca yaklaşık olarak yatay bir seyir izlemiştir. Blower ile yapılan havalandırmada ise TMP 3 L/dak hava debisinde logaritmik, 6 L/dak hava debisinde de lineer bir artış göstermiştir. Hava debisi 3 L/dak iken membran kirlenme hızı 0.48 mbar/dak, hava debisi 6 L/dak çıkarıldığında ise ortalama membran kirlenme hızı 0.18 mbar/dak'ya düşmüştür. Her iki havalandırma sisteminde de hedeflenen membran akısı gerçekleştirilememiştir.

❖ 32 L/m^2.st saat akıda blower sisteminde havalandırma hızından bağımsız olarak membran hızlı bir şekilde tıkanmıştır. 3 L/dak havalandırma debisinde blower sisteminde deney sonunda elde edilen TMP venturi sistemindekinin yaklaşık 1.5 katı olmuştur. Bu akıda venturi sisteminde beklenilenin aksine, havalandırma debisi yarıya düşürüldüğünde membran kirlenme hızı azalmıştır. Yine bu akıda da hem blower hem de venturi sisteminde hedeflenen akıya ulaşılamamıştır. Ancak blower sisteminde akı daha hızlı bir şekilde düşmüş olup blower sisteminde son akı değeri 15 L/m^2.st (3 L/dak) iken venturi sisteminde aynı havalandırma hızında son akı değeri 22 L/m^2.st olarak ölçülmüştür.

❖ 50 L/m^2.st akı ve 3 L/dak havalandırma debisinde blower ve venturi sistemleri arasında önemli bir fark gözlenmiştir. Bu akı ve havalandırma hızında blower sistemi yaklaşık 90 dakika çalışabilirken, venturi sistemi deney sonuna kadar (360 dak) çalışmıştır. Yaklaşık dört kat daha uzun çalışmasına rağmen venturi sisteminde gözlenen son TMP değeri 250 mbar'ın altında (211 mbar) kalmıştır. Blower sisteminde havalandırma hızı iki katına (6 L/dak), venturi sisteminde ise yarıya (1.5 L/dak) düşürülmesine rağmen blower sistemi, venturi sisteminin sağladığı avantajları (daha uzun çalışma süresi ve daha düşük TMP gelişimi) sağlayamamıştır.

❖ Blower ve venturi sistemleri arasında KOİ giderim verimi, nitrifikasyon verimi ve fosfor giderim verimi açısından önemli bir fark gözlenmemiştir. Yine SMP ve EPS miktarları açısından da her iki havalandırma sistemi arasında önemli bir fark gözlenmemiştir.

5.3. Venturi Enjektörü Entegre Edilmiş Batık MBR'nin Klasik Bir Batık MBR'ye Kıyasla Elde Edilen Genel Sonuçlar

❖ Paralel iki venturi yardımı ile bir sirkülasyon pompası kullanılarak hem MBR'nin oksijen ihtiyacını hem de membran yüzeyini temizlemek için gerekli olan havayı blower kullanmadan, sağlamanın mümkün olduğu görülmüştür.

❖ Tez çalışması kapsamında oluşturulan yeni batık MBR konfigürasyonu ile klasik bir batık MBR'den farklı olarak, biyokütlenin oksijen ihtiyacı, reaktörün karışımı ve membran yüzeyini temizlemek için gerekli havalandırma ihtiyacı sisteme entegre edilen bir venturi enjektörü ile karşılanmıştır.

❖ Yeni konfigürasyon sayesinde Batık MBR sisteminde biyolojik oksijen ihtiyacı için ayrı, membran yüzeyini temizlemek için ayrı boyutlarda farklı difüzör kullanma ihtiyacı ortadan kalkmış ve her iki amaç için de aynı difüzör kullanılabilmiştir.Bu şekilde konfigüre edilmiş olan batık MBR'deki membranların kirlenme hızı klasik batık MBR'ninkine kıyasla daha az olmuştur. Yeni konfigürasyon batık MBR sisteminde membran yüzeyinin daha geç tıkanması sağlanarak sistemin daha etkili çalışır hale gelmesi sağlanmıştır.

❖ Venturi enjektörü kullanılması ile batık MBR sistemine oksijen transfer verimi arttırılmıştır.

❖ Kirlenmenin yavaşlatılabilmesi, biyolojik oksijen ihtiyacı ve membran yüzeyini temizlemek için ayrı ayrı difüzörlerle yapılan havalandırma tek bir difüzörle ve sistemle yapılabilmesi ile işletme maliyetinin klasik batık MBR sistemlerine nazaran daha az olabilecektir, ancak bunun ileriki çalışmalarla ortaya konması gerekmektedir.

❖ Venturi havalandırma sisteminin batık bir MBR sistemine entegre edilerek işletme maliyetinin azaltılmasının araştırıldığı bu çalışmada, değişik akı ve havalandırma hızlarında yapılan deneylerde, hem membran kirlenmesinin azaltılması (TMP artış hızının düşürülmesi ve belli bir TMP değerine ulaşma süresinin artması) hem de biyoreaktöre oksijen transfer veriminin arttırılması bakımından venturi havalandırma sisteminin blower sistemine göre daha avantajlı olduğu gösterilmiştir.

❖ Elde edilen bu verilere göre batık MBR'lere venturi enjektörü entegre ederek işletme maliyetini önemli derecede azaltmanın mümkün olabileceği görülmektedir.

Dolayısıyla bu çalışmanın sonuçları membran kirliliğini azaltma, MBR'lerin enerji kullanımının azaltılması ve yeni membran modüllerinin tasarlanması çalışmaları kapsamında literatüre katkı sağlayacaktır.

5.4. Öneriler

Yukarıda belirtilen elde edilmiş sonuçlar ışığında venturi enjektörü entegre edilmiş bir batık membran biyoreaktör sisteminin performansının arttırılabilmesi, daha iyi işletme şartlarında çalıştırılabilmesi ve ileride bu sistem ile yapılacak laboratuvar ölçekli çalışmalar için göz önünde bulundurulması amacıyla tavsiye edilecek hususlar ve öneriler şöyle sıralanabilir;

❖ Düşük hacimli bir sıvının (10 L) santrifüj pompa ile devridaim edilmesi sıcaklık artışına neden olmakta, dolayısıyla venturi ile yapılacak laboratuvar ölçekli böyle bir çalışma reaktöre aktif bir soğutma sisteminin kurulmasını gerektirmektedir. Bu problem büyük hacimli tam ölçekli sistemlerde söz konusu değildir, çünkü venturi havalandırma sistemi zaten tam ölçekli tesislerde kullanılmaktadır.

❖ Reaktör işletimi iyi bir şekilde kontrol edilmediğinde, reaktör içerisinde belli bir KOİ konsantrasyonundan sonra önemli miktarda köpürme problemi ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde meydana gelen köpürme, sistemden önemli miktarda biyokütle kaybına yol açmaktadır. Dolayısıyla mümkün olduğu durumlarda MBR'deki KOİ konsantrasyonunu düşük tutmak, bu mümkün değilse aktif bir köpük kırıcı metot kullanmak gerekmektedir. Ancak bu durum da laboratuvar ölçekli sistemin bir dezavantajı olup, yüzey alanı geniş tam ölçekli sistemlerde böyle bir sorun ile karşılaşılma olasılığının düşük olacağı düşünülmektedir. Yine venturi havalandırma sisteminin tam ölçekli sistemlerde kullanılıyor olması bu düşünceyi desteklemektedir.

❖ Teknik açıdan yapılabilirliğin incelendiği bu çalışmada maliyet analizi yapılmamıştır. Venturi enjektörünün batık MBR'de kullanımının ekonomik açıdan değerlendirilebilmesi için pilot ölçekli ve daha uzun süreli çalışmaların yapılması gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

Adham, S., Gagliardo, P. 1998. Membrane Bioreactors for water Repurification Phase I. Desalination Research and Development Program Report No. 34, U.S Department of Interior, Bureau of Reclamation, USA.

APHA, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington DC, USA.

Bağatur, T. ve Baylar, A. 2001. Venturi aygıtının çok amaçlı kullanılması. I. Türkiye Su Kongresi, İstanbul, Cilt 2, 431-438.

Bagatur, T. 2005. Minimal conditions for venturi aeration of water flows. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers − Water Management* 158 (3), p. 127−130.

Baylar, A., Emiroglu, M. E. 2003. Air entrainment and oxygen transfer in a venturi. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers − Water&Maritime Engineering*, 156 (WM3), p. 249−255.

Baylar A., Ozkan F. 2006. Applications of venturi principle to water aeration systems, *Environmental Fluid Mechanics*, 6 (4), p. 341–357.

Baylar A., Ozkan F., Unsal M. 2007. On the use of venturi tubes in aeration. *Clean − Soil, Air, Wate*r, 35 (2), p.183−185.

Bloor, J. C., Anderson, G. K., Willey, A. R., 1995. High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor. *Water Research*, 29/ 1217-1223.

Braak, E., Alliet, M., Schetrite, S., Albasia, C., 2011. Aeration and hydrodynamics in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, Volume 379, Issues 1–2, Pages 1-18. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.06.004

Capponi, F., Sartori, M., Souza, M.L., Rubio, J. 2006. Modified column flotation of adsorbing iron hydroxide colloidal precipitates. *Int. J. Miner. Process.* 79, 167–173. doi:10.1016/j.minpro.2006.02.002

Casey, E. 2008. Handbook of membrane eeparations: chemical, pharmaceutical, food, and biotechnological applications, in: Pabby, A.K., Rizvi, S.S.H., Sastre, A.M. (Eds.), . CRC Press, pp. 1007–1008.

Chang, I.S., Bag, S.O., Lee, C. H. 2001. Effects of membrane fouling on solute rejection during membrane filtration of activated sludge. *Process Biochem*., 36(8-9), 855-860.

Chang, I.S., Le-Clech, P., Jefferson, B., Judd, S.J. 2002. Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Environ. Eng. Sci.*, 128(11), 1018-1029.

Cho, B.D., Fane, A.G. 2002. Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreacto. *J. of Membrane Science*, 209:391-403.

Choo, K.H. and Lee, C.H. 1996. Effect of anaerobic digestion broth composition on membrane permeability. *Water Science and Technology*, 34:173-179.

Crawford, G., Thompson, D., Lozier, J., Daigger, G., Fleischer, E. 2000. Membrane bioreactors – a designer's perspective. Proceedings of the Water Environment Federation Technical Symposia, Anaheim, California, USA.

Crittenden J. C., Rhodes T. R., Hand D. W., Howe K. J., Tchobanoglous G. 2012. MWH's Water Treatment: Principles and Design, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Cuci, Y., Ünsal, M., Kırmacı, H. K. 2016. Venturilerin ozon enjeksiyon performansının araştırılması. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (3).

Dalmau, M., Monclus, H., Gabarron, S., Rodrigez-Roda, I., Comas, J., 2014. Towards integrated operation of membrane bioreactores; effects of aeration on biological and filtration performance. *Bioresour. Technology.*, 171/103-1012.

Dong, C., Zhu, J., Wu, X., Miller, C.F. 2012. Aeration efficiency influenced by venturi aerator arrangement, liquid flow rate and depth of diffusing pipes. Environ. Technol. 33 (11), 1289–1298. doi:10.1080/09593330.2011.620986

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

DSİ, 2018. [http://www.dsi.gov.tr/toprak-ve-su-kaynaklari]. Erişim Tarihi: 09 Haziran 2018.

Du, H., Lin, J., Zuercher, C. 2012. Higher efficiency of CO_2 injection into seawater by a venturi than a conventional diffuser system. *Bioresour. Technol.* 107, 131–134. doi:10.1016/j.biortech.2011.12.060

DuBois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F. 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal Chem* 28, 350–356.

Englehardt, J.D., Wu, T., Tchobanoglous, G. 2013. Urban net-zero water treatment and mineralization: Experiments, modeling and design. *Water Res.* 47, 4680–4691. doi:10.1016/j.watres.2013.05.026

Ersöz, M., Çengeloğlu, Y., Gezgin, S. , Tor, A. Arslan, G., Özmen, M., Edebali, S., Koyuncu, H. 2010. Membran prosesleri kullanılarak içme sularından arseniğin giderilmesi, Proje No: 106Y299.

Farizoglu, B., Uzuner, S. 2011. The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system. *Biochemical Eng. Journal* 57 (1), 46–54.

Fane, A., Chang, S. 2002. Membrane bioreactors: design and operational options. *Filtr. Sep*., 39, 26-29.

Frolund, B., Palmgren, R., Keiding, K., Nielsen, P.H. 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. *Water Res* 30, 1749–1758.

Gamisans X., Sarrà M., Lafuente F.J. 2004. Fluid flow and pumping efficiency in an ejector-venturi scrubber. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43, 127-136.

Gander M., Jefferson, B., Judd S. 2000. Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations. *Separation and Purification Technology*, Volume 18, Issue 2, 6 March 2000,Pages 119-130,ISSN 1383-5866,http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866(99)00056-8.

Gürel, L. ve Büyükgüngör, H. 2011. Atıksu Arıtımında Membran Biyoreaktörler, *İTÜ Dergisi/E*, 21(1):13-23s.

Gürel, L., Büyükgüngör, H. 2011. Treatment of slaughterhouse plant wastewater by using a membrane bioreactor. *Water Science and Technology*, 64, 1, 214-219.

Han, S.-S., Bae, T.-H., Jang, G.-G., Tak, T.-M. 2005. Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system. *Process Biochem*. 40, 2393–2400.

Henis, J.M.S., Tripodi, M.K. 1980. A novel approach to gas separation using composite hollow fiber membranes. *Sep. Sci. Technol*. 15, 1059.

Henkel, J., Lemac, M., Wagner, M., Cornel, P. 2009. Oxygen transfer in membrane bioreactors treating synthetic greywater. Water Research 43 (6), 1711–1719.

Hirooka, K., Asano, R., Yokoyama, A., Okazaki, M., Sakamoto, A., Nakai, Y., 2009. Reduction in excess sludge production in a dairy wastewater treatment plant via nozzle-cavitation treatment: Case study of an on-farm wastewater treatment plant. *Bioresour. Technol*. 100, 3161–3166. doi:10.1016/j.biortech.2009.01.011

Hribljan, M. J. 2007. Large MBR Design and Residuals Handling, WEF Webcast.

Hwang, B.-K.K., Son, H.-S.S., Kim, J.-H.H., Ahn, C.H., Lee, C.-H.H., Song, J.-Y.Y., Ra, Y. H.H. 2010. Decomposition of excess sludge in a membrane bioreactor using a turbulent jet flow ozone contactor. *J. Ind. Eng. Chem.* 16, 602–608. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2010.03.010

Iorhemen, O. T., Hamza, R. A., Tay, J. H., 2016. Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation. *Membranes*, 6, 33. doi:10.3390/membranes6020033

Membrane Fouling

Jime´nez B, Asano T. 2008. Water reclamation and reuse around the world. Chapter 1. In: Jime´nez B, Asano T, editors. Water reuse: an international survey of current practice issues and needs. Londres (Reino Unido): IWA Publishing, Inc.; 2008. p. 3–26.

Jimenez-Cisneros, B. 2014. Water recycling and reuse: an overview. In: Water Reclamation and Sustainability. S. Ahuja (Ed.), pp. 431–454. Elsevier, Boston, MA

Johir, M. A. H., Aryal, R., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Grasmick, A. 2011. Influence of supporting media in suspension on membrane fouling reduction in submerged membrane bioreactor (SMBR). *Journal of Membrane Science*, 374 (1–2), 121–128.

Judd S.J. 2001. A review of fouling of membrane bioreactors in sewage treatment. School of Water Sciences,Cranfield University, UK.

Judd, S. 2006. The MBR Book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment, Elsevier LTD, Oxford, UK.

Judd, S. 2011. The MBR Book (Second Edition). Elsevier Ltd.

Judd, S. 2015. MBR Su ve Atıksu Arıtımında Membran Biyoreaktörlerin Esasları ve Uygulama Alanları. Çeviri Editörü: Bülent Keskinler, 2. Basımdan Çeviri. Nobel Akademik Yayıncılık, Kasım 2015, Ankara. ISBN 978-605-320-184-7

Kaya, T., 2010. Farklı Tip Venturi Savaklarda Hava Giriş Oranlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Kayaalp, N., 2012. The effects of microbial polymeric substances on membrane fouling. Ph.D. Thesis. İstanbul Technıcal Unıversıty, Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.

Kayaalp, N., Öztürkmen, G., 2016. A venturi device reduces membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Water Science & Technology*, 74.1. doi: 10.2166/wst.2016.194

Kayaalp, N., Öztürkmen, G., 2017. A venturi device reduces membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Water Science & Technology*, 74.1. doi: 10.2166/wst.2016.194

Kırmacı, H. K. 2013. Venturi İle Ozon Enjeksiyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

Kitiş, M., Köseoğlu, H., Gül, N. ve Ekinci, F. Y., 2003, Atıksu arıtımı ve geri kazanımında membran bioreaktörleri, V. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Adana, 463-480s.

Kitis M., Yiğit N.Ö., Köseoğlu H., Harman B.I., Civelekoğlu G., Sayılgan E., Bekaroğlu Ş., Çelik E., 2009. Membran biyoreaktör (MBR) prosesleri- Genel değerlendirme, Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu (MEMTEK), Kasım 2-3, İTÜ, İstanbul.

Kouakou, E., Salmon, T., Toye, D., Marchot, P. & Crine, M. 2005. Gas–liquid mass transfer in a circulating jet-loop nitrifying MBR. Chemical Engineering Science 60 (22), 6346–6353.

Koyuncu, İ., Hasar, H., Keskinler, B., Uyak, V., Öztürk, İ., Koseoğlu-İmer, D.Y., Taşkan, E., ve ark., 2018. Su/Atıksu arıtılması ve geri kazanılmasında membran teknolojileri ve uygulamaları (Editör: Prof. Dr. İsmail Koyuncu), Cilt 1-2-3. Türkiye Çevre Koruma Vakfı Yayınevi, 1. Baskı, Şubat 2018, Ankara.

Krzeminski, P., Leverette, L., Malamis, S., Katsou, E., 2017. Membrane bioreactors – A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects. *J. of Mem. Sci.,* 527/207–227. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.010

Kuş, R., 1997. Venturi Tüpü Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni., Fen Bil. Enstitüsü, Ankara.

Le-Clech, P., Chen, V. & Fane, T. A. G. 2006. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science* 284, 17–53.Lesage, N., Sperandio, M., Cabassud, C., 2008. Study of a hybrid process: adsorption on activated carbon/membrane bioreactor for the treatment of an industrial wastewater. Chem. Eng. Process. 47, 303–307.

Li, T., Bai, R. ve Liu, J., 2008. Distribution and composition of extracellular polymeric substances in membrane-aerated biofilm. *Journal of Biotechnology*, 135: 52-57.

Deng, L., Guo, W., Ngo, H. H., Zhang, H., Wang, J., Li, J., Xia, S., Wu, Y., 2016. Biofouling and control approaches in membrane bioreactors. *Bioresource Technology*, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.105.

Loeb, S., Sourirajan, R., 1963. Seawater demineralisation by means of an osmotic membrane. *Advances in Chemistry Series*, 38: 117.

Lofrano, G., Brown, J., 2009. Wastewater Management Through the Ages: A History of Mankind, University of Salerno, Department of Civil Engineering, via Ponte don Melillo, Fisciano (SA), Italy, p.11

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., Randall, R.J., 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. *The Journal of Biological Chemistry*, vol. 193, pp. 265-275.

Marchitto A., Devia, F., Fossa M., Guglielmini, G., Schenone, C., 2008. Experiments on two-phase flow distribution inside parallel channels of compact heat exchangers. *International Journal of Multiphase Flow*, Volume 34, Issue 2, February 2008, Pages 128-144, ISSN 0301-9322, [http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.08.005].

Mayer, M., Braun, R. & Fuchs, W. 2006. Comparison of various aeration devices for air sparging in crossflow membrane filtration. *Journal of Membrane Science* 277 (1–2), 258–269.

Mazzei 2015. Mazzei Injector Corporation. [http://mazzei.net/ applications] (Erişim Tarihi: 6 Temmuz 2015).

Mazzei 2016. Mazzei Injector Company, [http://mazzei.net/ wastewater-activated-sludge-aeration] (Erişim Tarihi: 21 Eylül September 2016).

Meng F., Yang, F., Shi, B., Zhang, H., 2008. A comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities. *Separation and Purification Technology*, Volume 59, Issue 1, 1 February 2008, Pages 91-100, ISSN 1383-5866, [http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2007.05.040].

Meng, F., Chae, S.-R. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-S. S., Yang, F. 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water Research* 43 (6), 1489–1512.

Muller, E.B., Stouthamer, A.H., van Verseveld, H.W., Eikelboom, D.H., 1995. Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross-flow filtration.

Nopens, I., Capalozza, C. and Vanrolleghem, P. A., 2001. Stability analysis of a synthetic municipal Wastewater, Technical Report, [http://biomath.ugent.be/~peter/ftp/pvr334.pdf].

Orantes, J., Wisniewski, C., Heran, M., Grasmick, A. 2011. The influence of operating conditions on permeability changes in a submerged membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology* 52 (1), 60–66.

Ovenson P., 2008, Air demand in free flowıng gated conduits, Master Thesis, Utah State University, USA.

Ozkan, F., Ozturk, M., Baylar, a., 2005. Influence of venturi cone angles on jet aeration systems. *Proc. ICE - Water Manag.* 158, 9–16. doi:10.1680/wama.2005.158.1.9

Ozkan, F., Ozturk, M., Baylar, A., 2006. Experimental investigations of air and liquid injection by venturi tubes. *Water Environ. J.* 20, 114–122. doi:10.1111/j.1747-6593.2005.00003.

Özkan F., 2005, "Basınçlı Su Borularında Hava İletimi ve Oksijen Transferinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Özkan F., Baylar A., Öztürk M., 2006. Air entraining and oxygen transfer in high−head gated conduits. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers − Water Management*, 159 (2), p. 139−143.

Özkan, Ü., 2007. Tekstil endüstrisi proses suyu hazırlanmasında membran proseslerin uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Öztürk, İ. 1999. Anaerobik Biyoteknoloji, Su Vakfı Yayını, İstanbul.

Paşaoğlu, M. E., 2013. "Polietersülfon (Pes) ve Poliakrilonitril (Pan) Polimerleri Kullanılarak Düz-Plaka Membranların Üretimi Ve Uygulamaları", Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Petruccioli, M., Cardoso Duarte, J., Eusebio, A., Federici, F. 2002. Aerobic treatment of winery wastewater using a jet-loop activated sludge reactor. Process Biochemistry 37 (8), 821–829.

Pollice, A., Laera, G., Saturno, D., Giordano, C., 2008. Effects of sludge retention time on the performance of a membrane bioreactor treating municipal sewage. *J. Memb. Sci*. 317, 65–70. doi:10.1016/j.memsci.2007.08.051

Qin, G.F., Li, Z.Y., Chen, X.D., Russell, a. B., 2002. An experimental study of an NaClO generator for anti-microbial applications in the food industry. *J. Food Eng.* 54, 111–118. doi:10.1016/S0260-8774(01)00191-1

Rahimi, Y., Torabian, A., Mehrdadi, N., Habibi-Rezaie, M., Pezeshk, H., Nabi-Bidhendi, G.-R., 2011. Optimizing aeration rates for minimizing membrane fouling and its effect on sludge characteristics in a moving bed membrane bioreactor. *J. Hazard. Mater*. 186, 1097–1102.

Robinson, T., 2009. Wastewater treatment: Membrane bioreactor cleans up distillery wastewater. *Filtr. Sep.* 46, 40–41. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(09)70195-8

Saleh, T. A., Gupta, V. K., 2016. Membrane classification and membrane operations, nanomaterial and polymer membranes, 55-79.

Singhania R.R., Christophe G., Perchet G., Troquet J., Larroche C., 2012. Immersed membrane bioreactors: An overview with special emphasis on anaerobic bioprocesses. *Bioresource Technology* 122, 171-180.

Stephenson, T., Brindle, K., Judd, S., Jefferson, B., 2000. Membrane bioreactors for wastewater treatment, ISBN 1-900222-07-8, IWA Publishing, UK.

Şahinkaya, E., 2014. Membran Biyoreaktörler: Uygulama alanlari, son gelişmeler ve araştırma gereken alanlar, 1-43. İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul. [http://aves.medeniyet.edu.tr]. Erişim Tarihi: 20.05.2017).

Thalasso, F., Naveau, H., Nyns, E. J., 1995. Design and performance of a bioreactor equipped with a venturi injector for high gas transfer rates. *The Chemical Engineering Journal*, 57 B1-B5.

Toprak, H., 2000. Aktif Çamur Sürecinin Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Tsai, H.H., Ravindran, V. ve Pirbazari, M., 2005. Model for predicting the performance of membrane bioadsorber reactor process in water treatment applications. *Chemical Engineering Science*, 60, 5620-5636

Tsai, Y.T., Chang, J.H., Chang, C.Y., Hsieh, Y.H., Shen, S.Y., 2014. Efficiency and mechanisms of chlorine dioxide generation by electrocatalytical process. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 45, 404–410. doi:10.1016/j.jtice.2013.06.020

van den Brink, P., Satpradit, O.-A., van Bentem, A., Zwijnenburg, A., Temmink, H. and van Loosdrecht, M., 2011. Effect of temperature shocks on membrane fouling in membrane bioreactors. *Water Research*, vol. 45, no. 15, pp. 4491-4500.

Yang, W., Cicek, N., Ilg, J., 2006. State-of-the-art of membrane bioreactors: worldwide research and commercial applications in North America. *J. Membrane Sci.*, 270, 201-211.

Yeon, K. M., Park, J. S., Lee, C. H., Kim, S. M. 2005. Membrane coupled high-performance compact reactor: a new MBR system for advanced wastewater treatment. *Water Research* 39 (10), 1954–1961.

Yıldız, S., Namal, O. Ö., Çekim, M., 2013. Atıksu arıtma teknolojilerindeki tarihsel gelişimler. *S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg.*, c.1, s.1, ISSN: 2147-9364 (Elektronik)

Yigit, N. O., Harman, I., Civelekoglu, C., Koseoglu, H., Cicek, N. and Kitis, M., 2008. Membrane fouling in a pilot-scale submerged membrane bioreactor operated under various conditions. *Desalination*, vol. 231, pp. 124–132.

Yiğit, N.Ö., 2007. Membran biyoreaktörü ile (MBR) evsel atıksu arıtımı. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Yoon, S. H, Kang, I. J., Lee, C. H., 1999. Fouling of inorganic membrane and flux enhancement in membrane-coupled anaerobic bioreactor. *Separation Sci. & Tech.*, 35(5), 709-724.

Yoon, S. H., Kim, H. S., Yeom, I. T., 2004. The optimum operational condition of membrane bioreactor (MBR): cost estimation of aeration and sludge treatment. *Water Research* 2004 (38) 37–46. doi:10.1016/j.watres.2003.09.001

Wang, X., Jia, J., Wang, Y., 2011. Degradation of C.I. Reactive Red 2 through photocatalysis coupled with water jet cavitation. *J. Hazard. Mater.* 185, 315–321. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.036

Water Environment Federation, 2001. Membrane bioreactors: feasibility and use in water reclamation. ISBN 1-893664-36-8, Water Environment Research Foundation (WERF), USA.

Wisniewski, C., 2007. Membrane bioreactor for water reuse. *Desalination*, 203(1), 15-19.

ZENON Environmental Inc., 2002. [www.zenon.com], Oakville, Ontario, Kanada.

Zha, F., Jordan, E.J., 2005. Apparatus and method for cleaning membrane filtration modules.

Wallis-Lage, C. L., Levesque, S. D., Cost Effective & Energy Efficient MBR Systems

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Gökmen ÖZTÜRKMEN

Doğum Yeri: Oğuzeli/GAZİANTEP

Doğum Tarihi: 15.01.1979

e-Mail: gozturkmen@dicle.edu.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği (2004)

Yüksek Lisans: Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı (2008)

Bu Çalışma Kapsamında Yapılmış Olan Sözlü Bildiri ve Makaleler

- ✓ Kayaalp N., **Öztürkmen G.,** Bağatur T., Önen F., (2015). "A Novel Aeration Method for Submerged Membrane Bioreactors", The 12th International Conference on Membrane Science and Technology (MST2015), Tehran, Iran, 1-3 November 2015.
- ✓ Kayaalp N., **Öztürkmen G.,** (2016), "A venturi device reduces membrane fouling in asubmerged membrane bioreactor" Water Science and Technology, 74(1), 147-156. Doi: 10.2166/wst.2016.194
- ✓ Kayaalp N., **Öztürkmen G.,** Gül E., Günay E., (2016), "A Comparison of a Blower and a Venturi aeration system in a Submerged Membrane Bioreactor",Desalination for the Environment, Clean Water and Energy, Rome, Italy, 22–26 May 2016.
- ✓ Kayaalp N., **Öztürkmen G.,** GÜL E., GÜNAY E., (2017), "A comparison of a blower and a Venturi aeration system in a submerged membrane bioreactor" Desalination and Water Treatment, 69, 109-115. Doi:10.5004/dwt.2017.20243

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI İNTİHAL RAPORU FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Gökmen ÖZTÜRKMEN
ÖĞRENCİ NO	15806501
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2017 - 2018
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
PROGRAM	DOKTORA
TEZ KONUSU	MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE VENTURİ ENJEKTÖRÜ KULLANILARAK İŞLETME ŞARTLARININ İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	139
BENZERLİK ORANI	% 18
RAPORLAMA TARİHİ	02/08/2018

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 139 sayfalık kısmına ilişkin, 02/08/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 18 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

☒ Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐ Kaynakça hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esaslarını inceledim ve bu Uygulama Esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

(Gökmen Öztürkmen)

02 / 08 / 2018

Doç. Dr. Necati KAYAALP
Tez Danışmanı

02 / 08 / 2018

Doç. Dr. A. Halim KARAŞİN
Anabilim Dalı Başkanı