

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



**SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMINDA  
JET-LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERİN  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SÜLEYMAN UZUNER**

**BALIKESİR, TEMMUZ - 2012**

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



**SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMINDA  
JET-LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERİN  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SÜLEYMAN UZUNER**

**BALIKESİR, TEMMUZ - 2012**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Süleyman UZUNER tarafından hazırlanan “SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMINDA JET-LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 26.07.2012 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

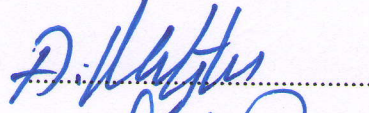
Jüri Üyeleri

İmza

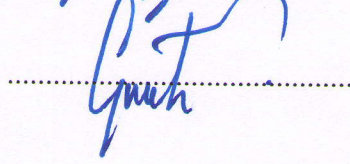
Danışman  
Yrd. Doç. Burhanettin FARİZOĞLU



Üye  
Prof. Dr. Alper NUHOĞLU



Üye  
Prof. Dr. Cengiz ÖZMETİN



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Hilmi NAMLI

.....

**Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 107Y260 nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMINDA JET-LOOP  
MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERİN PERFORMANSININ  
İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
SÜLEYMAN UZUNER  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. BURHANETTİN FARIZOĞLU)**

**BALIKESİR, TEMMUZ - 2012**

Süt işleyen tesislerin pek çoğu küçük işletmeler şeklinde ülkemizin çeşitli yerlerine dağılmış olup bunların büyük bir kısmında arıtma tesisi yoktur. Hayvansal protein, yağ, şeker ve mineral maddeler içeren süt endüstrisi atıkları pek çok ülkede değişik şekillerde değerlendirilmektedir. Süt endüstrisi atıksularının konvansiyonel sistemler yerine daha gelişmiş, modern ve kompakt sistemler ile arıtılması gerekmektedir. Kimyasal ve biyolojik proseslerde etkinliği ispatlanmış olan jet-loop reaktörler (JLR), süt endüstrisi atıksularının arıtımı için ideal ve ekonomik bir reaktör yapısına sahiptir. Bu çalışmada bir süt fabrikasından alınan atıksuyun deşarj kirlilik parametrelerine göre karakterizasyonu yapılmıştır. Analizler sonucunda KOİ konsantrasyonu 922–9004 mg/L, TA 8–230 mg/L, TF 9–112 mg/L olarak tespit edilmiştir. Atıksuyun ÇKOİ/BOİ oranı 0.76 ve ÇKOİ/TKOİ oranı 0.85 olarak tespit edilmiştir. ÇKOİ/TA oranı ise 35.06 olarak belirlenmiştir. Yine bu çalışma süt endüstrisi atıksularının biyolojik olarak yüksek oranda arıtılabilir olduğunu göstermiştir. JLMBR sisteminde oldukça yüksek arıtım performansı elde edilmiştir. Sistemden 34.3 kgKOİ/m<sup>3</sup>.gün yük (KOİ giriş değeri 4700 mg/L) ve 3.3 saat hidrolik bekletme süresinde %97 arıtma verimi elde edilmiştir. Yine bu çalışmada 53.6 kgKOİ/m<sup>3</sup>.gün organik yük altında (giriş KOİ konsantrasyonu 6600 mg/L) 3 saat bekletme süresinde %97 gibi çok yüksek bir verimde atıksu arıtılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** süt endüstrisi atıksuyu, jet-loop reaktör, membran biyoreaktör, membran filtrasyonu

## **ABSTRACT**

### **THE PERFORMANCE INVESTIGATION OF DAIRY WASTEWATER TREATMENT IN JET-LOOP MEMBRANE BIOREACTORS**

**MSC THESIS**

**SÜLEYMAN UZUNER**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. BURHANETTİN FARİZOĞLU)**

**BALIKESİR, JULY 2012**

Dairy production facilities in the form of small factories are spread over in Turkey and many of these facilities do not have wastewater treatment system. Dairy industries wastes, which contain animal protein, lipids, sugar and mineral substances, are evaluated in different ways in many countries. Dairy wastewaters (DW) must be treated by advanced, modern and compact systems instead of conventional systems. Jet-loop reactors (JLRs), which have proven efficiency in chemical and biological processes, might represent an ideal reactor topology for an economic solution to DW treatment. In this study a cheese factory wastewater characterization performed according to the discharge parameters. Characterization results were 922 - 9004 mg COD L<sup>-1</sup>, 8 - 230 mg Total Nitrogen (TN) L<sup>-1</sup>, 9 - 112 mg Total Phosphorus (TP) L<sup>-1</sup>. The average ratio of Soluble COD (COD<sub>s</sub>) to BOD and COD<sub>s</sub> to Total COD were found as 0.76 and 0.85, respectively. The ratio of COD<sub>s</sub> to TN was found 35.06. This study demonstrated that biological DW purification can be achieved in high rates by JLMBR system. JLMBR system has 97% COD removal efficiency at a loading rate of 34.3 kg COD m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> (4700 mg COD L<sup>-1</sup> influent concentration) have achieved under hydraulic retention time (HRT) at 3.3 h. Also, at the loading rate of 53.6 kg COD m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> (6600 mg COD L<sup>-1</sup> influent concentration) COD removal efficiencies resulted in 97–98% under 3 h HRT.

**KEYWORDS:** dairy wastewater, jet-loop reactor, membrane bioreactor, membrane filtration

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                                     |             |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖZET</b> .....                                                   | <b>i</b>    |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                               | <b>ii</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                                            | <b>iii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....                                          | <b>v</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b> .....                                          | <b>vi</b>   |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....                                         | <b>vii</b>  |
| <b>ÖNSÖZ</b> .....                                                  | <b>viii</b> |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                               | <b>1</b>    |
| 1.1    Biyolojik Atıksu Arıtımı .....                               | 1           |
| 1.2    Biyoreaktörler.....                                          | 1           |
| 1.2.1    Kabarcık Kolonlar.....                                     | 2           |
| 1.2.2    Hava Kaldırmalı Reaktörler.....                            | 3           |
| 1.2.3    Jet-Loop Reaktörler .....                                  | 4           |
| 1.3    Membran Sistemleri .....                                     | 7           |
| 1.3.1    Membran Biyoreaktörlerin Avantajları .....                 | 8           |
| 1.3.1.1    Arıtılmış Suyun Kalitesi.....                            | 8           |
| 1.3.1.2    Esnek İşletme Şartları .....                             | 9           |
| 1.3.1.3    Kompakt Kurulum Alanı.....                               | 9           |
| 1.3.1.4    Düşük Oranda Çamur Üretimi .....                         | 9           |
| 1.3.1.5    Dezenfeksiyon ve Koku Kontrolü.....                      | 10          |
| 1.3.2    MBR'lerin Performansına Etki Eden Faktörler .....          | 10          |
| 1.3.2.1    Membranın Cinsi.....                                     | 11          |
| 1.3.2.2    Transmembran Basıncı (TMP).....                          | 11          |
| 1.3.2.3    Çapraz Akış Hızı .....                                   | 14          |
| 1.3.2.4    Membranın Tıkanması .....                                | 15          |
| 1.3.2.5    Viskozite .....                                          | 16          |
| 1.4    Süt Endüstrisi Atıksuları .....                              | 16          |
| <b>2. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....                                  | <b>19</b>   |
| 2.1    Deney Sistemi.....                                           | 19          |
| 2.2    Kullanılan Aktif Çamur.....                                  | 21          |
| 2.3    Kullanılan Atıksu .....                                      | 21          |
| 2.4    Kullanılan Membran Ünitesi .....                             | 21          |
| 2.5    Yöntem .....                                                 | 23          |
| 2.5.1    KOİ Analizi.....                                           | 23          |
| 2.5.2    Askıda katı madde ve MLSS konsantrasyonunun ölçülmesi..... | 24          |
| 2.5.3    BOİ Ölçümleri .....                                        | 25          |
| 2.5.4    Yağ ve Gres Ölçümleri .....                                | 25          |
| 2.5.5    pH, ÇO ve İletkenlik Ölçümleri.....                        | 26          |
| 2.5.6    NO <sup>3-</sup> -N Ölçümü .....                           | 26          |
| 2.5.7    Toplam Azot (TA) Analizi .....                             | 27          |
| 2.5.8    NH <sup>4+</sup> -N analizi .....                          | 27          |
| 2.5.9    Toplam Fosfor (TF) Analizi .....                           | 27          |
| 2.5.10    Transmembran Basıncı (TMP) .....                          | 27          |
| 2.5.11    Çapraz Akış Hızı (v).....                                 | 28          |
| 2.5.12    Membran Akısı (J).....                                    | 28          |

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3. BULGULAR .....</b>                                                                          | <b>29</b> |
| 3.1 Kullanılan Atıksuyun Karakterizasyonu .....                                                   | 29        |
| 3.2 Jet Loop Biyoreaktörün Kütle Transfer Özelliklerinin Belirlenmesi .....                       | 30        |
| 3.3 Süt Endüstrisi Atıksuyunun Biyolojik Arıtım Performansının İncelenmesi.....                   | 33        |
| 3.3.1 Jet Loop Membran Biyoreaktör Sisteminin Biyolojik Arıtıma Hazırlanması .....                | 33        |
| 3.3.2 Organik yükleme hızının KOİ giderme performansına etkisi .....                              | 34        |
| 3.3.3 Çamur yaşının ve hidrolik bekletme süresinin JLMBR'ün KOİ giderme performansına etkisi..... | 39        |
| 3.3.4 MLSS'nin KOİ giderme performansına etkisi.....                                              | 42        |
| 3.3.5 Jet Loop Membran Biyoreaktör'ün Azotlu ve Fosforlu Madde Giderim Performansı.....           | 44        |
| 3.3.6 Sürekli modda çalıştırılan JLMBR'ün kinetik katsayıları .....                               | 49        |
| 3.3.7 JLMBR membran filtrasyonu özellikleri .....                                                 | 53        |
| <b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                 | <b>55</b> |
| <b>5. KAYNAKLAR.....</b>                                                                          | <b>57</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1: Bir kabarcık kolon reaktör düzeneği.....                                                                                                                    | 3  |
| Şekil 1.2: Hava kaldırmalı bir reaktör örneği.....                                                                                                                     | 4  |
| Şekil 1.3: Jet-Loop Reaktörün yapısı .....                                                                                                                             | 6  |
| Şekil 1.4: Por büyüklüğüne göre membran proseslerin sınıflandırılması .....                                                                                            | 8  |
| Şekil 1.5: Akıyı etkileyen dirençler.. .....                                                                                                                           | 12 |
| Şekil 1.6: Akı ve Transmembran Basıncı arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterimi.....                                                                              | 13 |
| Şekil 1.7: Süzüntü akısı ile çeşitli hızlardaki sürücü basınç kuvvetinin ilişkisi                                                                                      | 14 |
| Şekil 1.8: Çapraz akışlı bir seramik membran sisteminin çalışma prensibi.....                                                                                          | 15 |
| Şekil 1.9: Membran filtrasyonundaki akı performansını sınırlayan olaylar .....                                                                                         | 15 |
| Şekil 2.1: Denemelerde kullanılan jet loop membran biyoreaktörün şematik görünümü .....                                                                                | 20 |
| Şekil 2.2: Denemelerde kullanılan jet loop membran biyoreaktörün blok diyagramı.....                                                                                   | 20 |
| Şekil 2.3: Denemelerde kullanılan seramik membran modülü. ....                                                                                                         | 22 |
| Şekil 2.4: KOİ ölçümlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi.....                                                                                                         | 24 |
| Şekil 2.5: Yağ-Gres Analizinde kullanılan kalibrasyon eğrisi.....                                                                                                      | 26 |
| Şekil 3.1: Denemelerde ölçülmüş çözülmüş oksijen değerlerinin değişimi ve Statistica 6.0 programı kullanılarak hesaplanmış $K_{La}$ ve $C_S^*$ 'nin hesaplanması ..... | 31 |
| Şekil 3.2: $K_{La}$ değerlerinin sıvı jet hızı ile değişimi .....                                                                                                      | 32 |
| Şekil 3.3: Jet Loop Biyoreaktör ve Membran sisteminin genel görüntüsü. ....                                                                                            | 34 |
| Şekil 3.4: Degazifikasyon tankı cidarlarında oluşan biyofilm tabakası .....                                                                                            | 36 |
| Şekil 3.5: KOİ yükleme değerleri ile arıtma veriminin değişimi .....                                                                                                   | 37 |
| Şekil 3.6: Organik KOİ yükü ile çıkış KOİ konsantrasyonlarının değişimi .....                                                                                          | 38 |
| Şekil 3.7: Hidrolik kalış sürelerinin KOİ arıtımına etkisi .....                                                                                                       | 39 |
| Şekil 3.8: Çamur yaşı ile KOİ giderme yüzdesinin değişimi.....                                                                                                         | 41 |
| Şekil 3.9: MLSS konsantrasyonu ile KOİ giderme veriminin ilişkisi .....                                                                                                | 44 |
| Şekil 3.10: TA giderme verimlerinin TA giriş konsantrasyonu ve MLSS ile değişimi .....                                                                                 | 46 |
| Şekil 3.11: TF giderme veriminin TF giriş konsantrasyonu ile değişimi .....                                                                                            | 48 |
| Şekil 3.12: $\mu_{max}$ ve $K_s$ kinetik katsayılarının belirlenmesi .....                                                                                             | 50 |
| Şekil 3.13: Y ve b kinetik katsayılarının bulunması .....                                                                                                              | 51 |
| Şekil 3.14: Çamur yaşı, çıkış suyu KOİ konsantrasyonu ve KOİ giderme verimi arasındaki ilişki .....                                                                    | 52 |
| Şekil 3.15: Membrandan elde edilen akıların çapraz akış hızı ve zaman ile değişimi .....                                                                               | 54 |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                           | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Tablo 1.1: Membranların uygulama alanına göre sınıflandırılması.....                      | 7            |
| Tablo 3.1: Balıkesir Onur Süt ve Süt Ürünleri Fabrikası atıksuyunun karakterizasyonu..... | 30           |
| Tablo 3.2: Çalışmada kullanılan Jet Loop Membran Biyoreaktörün performans verileri .....  | 42           |
| Tablo 3.3: Çeşitli atıksular için biyokinetik katsayılar .....                            | 52           |

## SEMBOL LİSTESİ

|                                   |                                                             |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>L:</b>                         | Litre                                                       |
| <b>g:</b>                         | Gram                                                        |
| <b>mg:</b>                        | Miligram                                                    |
| <b>m:</b>                         | Metre                                                       |
| <b>cm:</b>                        | Santimetre                                                  |
| <b>µm:</b>                        | Mikrometre ( $10^{-6}$ m)                                   |
| <b>nm:</b>                        | Nanometre ( $10^{-9}$ m)                                    |
| <b>sa:</b>                        | Saat                                                        |
| <b>s:</b>                         | Saniye                                                      |
| <b>BOİ:</b>                       | Biyolojik Oksijen İhtiyacı, mg/L                            |
| <b>KOİ:</b>                       | Kimyasal Oksijen İhtiyacı, mg/L                             |
| <b>TA:</b>                        | Toplam Azot                                                 |
| <b>TF:</b>                        | Toplam Fosfor                                               |
| <b>NH<sub>4</sub>-N:</b>          | Amonyum Azotu                                               |
| <b>PO<sub>4</sub>-P:</b>          | Fosfat Fosforu                                              |
| <b>AKM:</b>                       | Askıda Katı Madde Miktarı, mg/L                             |
| <b>UAKM:</b>                      | Uçucu Askıda Katı Madde Miktarı, mg/L                       |
| <b>MLSS:</b>                      | Aktif çamuru oluşturan mikroorganizma miktarı, mg/L         |
| <b>MLVSS:</b>                     | MLSS'nin uçucu kısmı, mg/L                                  |
| <b>K<sub>L</sub>a:</b>            | Gaz Transfer Katsayısı, sa <sup>-1</sup>                    |
| <b>F/M:</b>                       | Besin/Mikroorganizma oranı                                  |
| <b>HRT , θ<sub>h</sub>:</b>       | Hidrolik Bekletme Süresi, sa                                |
| <b>SRT , θ<sub>c</sub>:</b>       | Çamur Yaşı (Çamur Bekletme Süresi), sa                      |
| <b>TMP:</b>                       | Transmembran Basıncı, Pa                                    |
| <b>J:</b>                         | Akı, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .s                      |
| <b>JLB:</b>                       | Jet Loop Biyoreaktör                                        |
| <b>JLMBR:</b>                     | Jet Loop Membran Biyoreaktör                                |
| <b>µ:</b>                         | Spesifik Biyokütle Büyüme Hızı, saat <sup>-1</sup>          |
| <b>µ<sub>max</sub>:</b>           | Maksimum Spesifik Biyokütle Büyüme Hızı, saat <sup>-1</sup> |
| <b>Y:</b>                         | Substrat Dönüşüm Oranı                                      |
| <b>B:</b>                         | Endojen Bozunma Katsayısı, saat <sup>-1</sup>               |
| <b>θ<sub>c</sub><sup>m</sup>:</b> | Kritik Çamur Yaşı, saat                                     |
| <b>r:</b>                         | Substrat Kullanım Oranı, gKOİ/L.sa                          |
| <b>X:</b>                         | Reaktördeki Biyokütle Konsantrasyonu, g/L                   |
| <b>S:</b>                         | Reaktör Çıkışındaki Substrat Konsantrasyonu, gKOİ/L         |
| <b>S<sub>0</sub>:</b>             | Reaktör Girişindeki Substrat Konsantrasyonu, gKOİ/L         |

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında her konudaki desteğini ve engin bilgisini hiç esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Burhanettin FARİZOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Laboratuvar çalışmaları esnasındaki yardımlarından dolayı Sayın Arş. Gör. Simge SERTKAYA'ya, numune alma konusundaki yardımlarından dolayı Sayın Tevfik TEZCAN'a, deney sisteminin imalatında yardımcı olan Sayın Makine Mühendisi Faik DERİCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans dönemimde bana her konuda destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın Türkiye'de yaygın ve dağınık halde bulunan küçük ve orta ölçekli peynir üreten ve süt işleyen tesislerin atıksularının çevreye zararsız hale getirilmesi ve bertarafındaki sorunların giderilmesine ışık tutması dileklerimle.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Biyolojik Atıksu Arıtımı

Aktif çamur prosesi İngiltere’de 1914’de Arden ve Lockett tarafından geliştirilmiştir. Bu orijinal prosesin birçok çeşitleri geliştirilerek kullanılmaktadır. Bütün havalı (aerobik) atıksu arıtma proseslerinde atıklar sentez ve oksidasyon yolu ile yok olurlar. Diğer bir ifadeyle organik maddelerin bir kısmı yeni hücrelere dönüşürken (sentez) geri kalan kısmı gerekli enerjiyi üretmek için oksidasyona tabi tutulurlar. Organik maddeler yok olmaya başlayınca biyolojik hücrelerin bir kısmı gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla kendi kendini oksitler (içsel solunum).

Aktif çamur prosesi, organik maddenin CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>, ve yeni hücrelere dönüşmesi esasına dayanır [1]. Aerobik arıtım sistemlerinde sisteme aktarılan oksijen miktarı direkt olarak arıtma performansını etkilemektedir. Klasik aktif çamur sistemlerinde havalandırma tanklarındaki çözülmüş oksijen miktarı 2 – 4 mg/L arasında değişmektedir, çözülmüş oksijen konsantrasyonundaki bu sınırlama yüksek çamur yaşlarına ve yüksek mikroorganizma konsantrasyonuna ulaşılmasını engellemektedir.

## 1.2 Biyoreaktörler

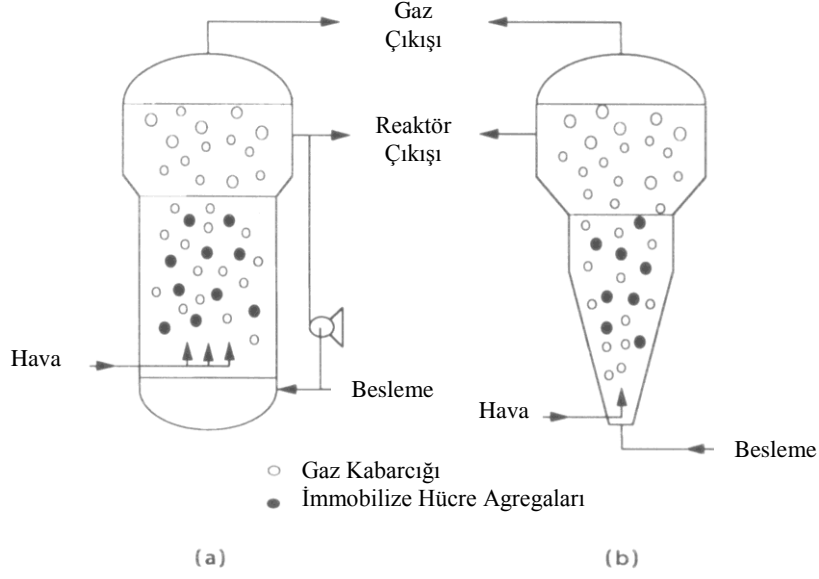
Biyolojik arıtma atıksuyun içinde bulunan askıda veya çözülmüş organik maddelerin bakterilerce parçalanması ve biyolojik floklarla çökerek sıvının içinde kalan veya gaz olarak atmosfere kaçan sabit inorganik bileşiklere dönüşmesidir. Biyolojik arıtmanın esası organik kirleticilerin doğada yok edilmeleri için yer alan biyoflokülasyon ve mineralizasyon proseslerinin kontrolü ve optimum şartlarda devam etmesidir. Böylece doğadaki reaksiyonların hızlandırılarak daha kısa bir sürede, emniyetli ortamda gerçekleştirilmeleri sağlanmaktadır.

Biyolojik arıtma sistemleri değişik şekillerde sınıflandırılabilirler. Ortamda oksijen varlığına göre havalı (aerobik) ve havasız (anaerobik) olarak sınıflandırılan bu sistemler kullanılan mikroorganizmaların sistemdeki durumuna göre askıda ve sabit film (biyofilm) prosesleri olarak da sınıflandırılabilirler. Biyoreaktörlerin işletilmesinde proses verimini, reaktördeki metabolik aktiviteyi ve enerji maliyetini etkileyen en önemli hidrodinamik parametre oksijen transferidir. Atıksu ortamındaki oksijen dengesi transfer hızına ve bakteriyel solunuma bağlıdır. Yıllardan beri kullanılan klasik arıtma sistemlerinin evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılmasında yeterli miktarda ve verimde kütle transferi sağlanamaması nedeniyle daha etkili ve daha düşük maliyetteki yeni tip biyoreaktörler geliştirilmiştir [2].

Kimya sanayisinde son yıllarda kullanılan yüksek gaz hızlarının temin edilerek sistem verimliliğinin arttırıldığı “gaz kaldırmalı reaktörler”, klasik karıştırılmalı reaktörlerle karşılaştırıldığında büyük avantajlar sağlamaktadır. Gaz kaldırmalı reaktörler, mekanik karıştırıcı kullanılmadan, yüksek gaz hızları ve büyük spesifik ara yüzey alanları sağlayabilmektedirler. Bu avantajları atıksu arıtımında kullanmak amacıyla önce “kabarcık kolonlar”, sonra “hava kaldırmalı reaktörler” ve daha sonra da “jet loop reaktörler” geliştirilmiştir.

### **1.2.1 Kabarcık Kolonlar**

Biyolojik arıtım ve fermentasyon sistemlerinde karıştırıcıların kesme kuvvetinin zararlarının bertaraf edilmesi kabarcık kolonların tercih edilmesinin nedenidir ve kabarcık kolonların bu yüzden kullanımı oldukça yaygındır. Bir kabarcık kolon reaktör sistemi Şekil 1.1’de gösterilmektedir [3].



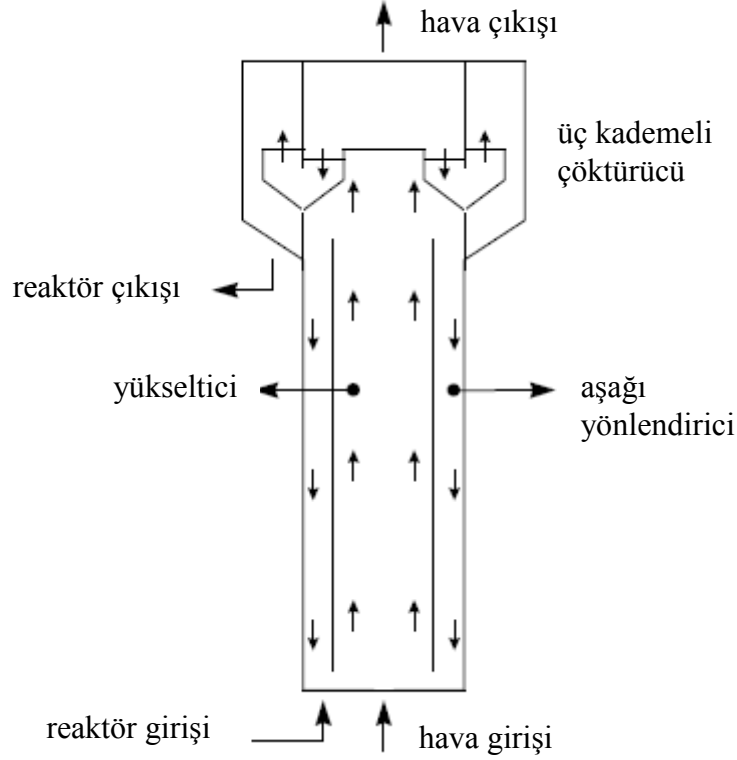
**Şekil 1.1:** Bir kabarcık kolon reaktör düzeneği [4]

### 1.2.2 Hava Kaldırmalı Reaktörler

Hava kaldırmalı reaktörler kabarcık kolonların bir sonraki adımındır. Bu reaktörlerde karışımın sağlanması ve katıların süspanse hale getirilmesi yalnızca havalandırma ile sağlanır. Hava kaldırmalı reaktörler oldukça büyük boyutlarda inşa edildiklerinde bile yüksek oksijen ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahiptirler. Bu nedenle yüksek kirlilik içeren kentsel ve endüstriyel atıksu arıtımında ve biyoteknoloji endüstrisinde oldukça fazla dizayn avantajlarına sahiptirler (Şekil 1.2) [5, 6].

Atıksu arıtımı ve fermantasyon biyoreaktörleri gibi bazı uygulamalarda fazlar arasında tüm kolon boyunca etkili bir sirkülasyonun ve etkileşimin meydana gelmesi istenir. Bu, ya kabarcık kolon içerisine yerleştirilen bir emme tüpü (internal loop) ile ya da kabarcık kolonun üst ve alt bölgelerine dışardan bir tüpün (external loop) bağlanması ile sağlanabilmektedir. İçsel çevrim konfigürasyonundaki emme tüpü, giriş bölümünde oluşturulan jeti kanalize ederken reaktör ile emme tüpü arasında kalan bölgenin altında hafif bir vakum oluşturur. Oluşan vakum fazların emme tüpü içerisinde yukarıya doğru yükselmesine neden olurken reaktör ile emme tüpü

arasındaki bölgede ise aşağıya doğru bir harekete olanak sağlayarak büyük çaplı bir sirkülasyonun oluşmasını sağlar [7].



Şekil 1.2: Hava kaldırmalı bir reaktör örneği [8]

### 1.2.3 Jet-Loop Reaktörler

Kimyasal ve biyolojik proseslerde etkinliği ispatlanmış olan jet-loop reaktörler (JLR), süt endüstrisi atıksularının arıtımı için ideal ve ekonomik bir reaktör yapısına sahiptir [9,10].

Jet loop reaktörlerde püskürtme başlığı ile üretilen sıvı jeti yüksek miktarda karışım ve türbülans meydana getirir ki bu da optimum kütle transferi ve iyi bir biyolojik çevrimin oluşmasını sağlar. Genellikle Jet-loop reaktörler ufak hacimlere, ufak kurulum alanına, düşük kurulum ve işletme maliyetlerine ve az enerji ihtiyacına sahip reaktörler olarak karakterize edilirler ve tanımlanırlar[11].

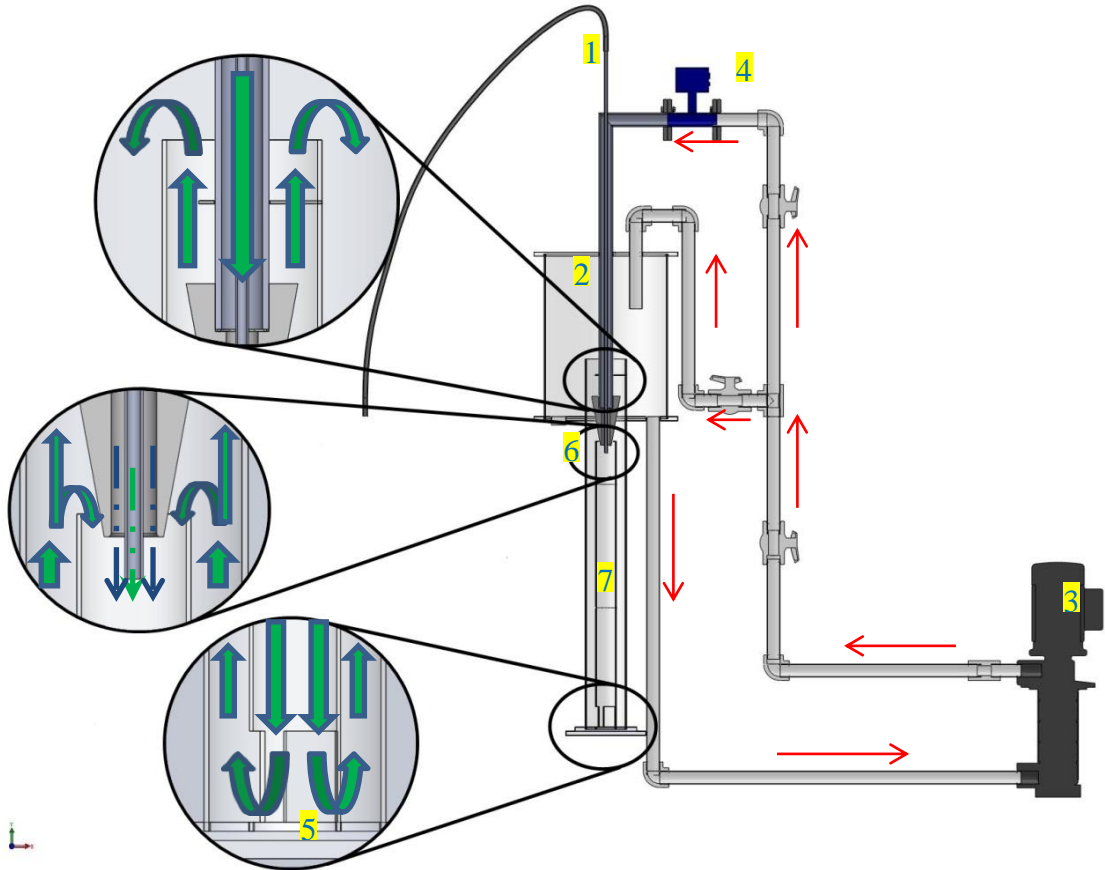


Konvansiyonel aerobik arıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında (örn. klasik aktif çamur sistemleri) jet loop rektörler, havalandırma için herhangi bir mekanik ekipman (örn. blower, pervane, türbin, vb.) bulundurmaması gibi avantajlara sahiptir. Basit bir santrifüj pompa akışkanın püskürtme başlığından yüksek hızlarda geçmesini sağlar ve bunun sonucunda da yüksek miktarlarda hava da venturi ejektörü vasıtasıyla atmosferden emilir [12].

Jet-loop reaktörde hava ve sıvı püskürtme başlığında karışarak büyük bir hızla emme tüpünün içerisinden aşağıya doğru püskürtülmektedir. Sağlanan jetin yardımıyla emme tüpü boyunca aşağı doğru harekete zorlanan gaz ve sıvı karışımı, reaktörün altında bulunan çarpma levhasına çarparak buradan yanlara doğru yayılır ve emme borusu ile reaktör arasında kalan bölgedeki boşluktan yukarı doğru çıkar. Kesitteki değişimden dolayı burada sıvı hızı değişir. Reaktörün en üstüne gelen gaz kabarcıkları ve sıvı taneciklerinin bir kısmı püskürtme başlığından çıkan sıvının sürüklenme kuvvetlerinden doğan hareket nedeniyle tekrar emme tüpüne gidebilirler. Böylece su - hava karışımının reaktör içerisinde kalış süresi ve buna bağlı olarak da gaz tutunma yüzdesi ve  $K_La$  artırılmış olur [13, 14, 15, 16].

Jet-loop reaktörlerde gaz fazın sıvı içerisindeki dispersiyonu iki şekilde gerçekleşir. İlk dispersiyon sıvı ve gaz fazların ilk buluştukları püskürtme başlığının çıkışında, diğeri ise sıvının reaktör içerisindeki dağılması sırasında meydana gelmektedir. Birinci dispersiyon bölgesinde son derece yüksek bir hızda gelen sıvı gaz fazı çok küçük kabarcıklara parçalar. Daha sonra reaktörün altına doğru sürüklenen bu küçük kabarcıklar ikinci dispersiyon bölgesine girerler. Burada sıvı basıncının artmasıyla gaz fazın çözünürlüğü de yükselmektedir. Bunun sonucu olarak da kütle transferi artmaktadır. Özellikle reaktörün ortasında, merkezlenmiş bir şekilde duran emme tüpü yardımıyla sıvının birkaç defa sirkülasyona uğraması sıvı faz içerisinde dağılmış olan gaz fazın sistemde kalış süresini arttırmaktadır. Diğer önemli dispersiyon bölgesi ise sıvı ve gaz fazın emme tüpünü terk ettikten sonra reaktör tabanındaki çarpma levhasına çarparak gaz kabarcıklarının dağılması esnasında gerçekleşir [17, 18, 19].

Klasik sistemlerde, düşük sirkülasyonlar ve sistemde çözülmüş oksijen konsantrasyonunun sıfıra düştüğü ölü bölgelerin meydana gelmesi nedeni ile çözülmüş oksijen değerlerinin 2 mg/L civarında olması ve özellikle 2 mg/L'den düşük olmaması istenir [11]. Pratikte biyolojik arıtma sistemlerinin havalandırma ünitelerinde, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun 1.5 - 4 mg/L arasında olması tavsiye edilmektedir [20]. Yapılan bir çalışmada jet loop biyoreaktör MLSS konsantrasyonu 40000 mg/L'ye çıkarılarak çok yüksek organik yüklerin verimli bir şekilde arıtımı gerçekleştirilmiştir [21].



**Şekil 1.3:** Jet-Loop Reaktörün yapısı

- |                      |                         |                        |
|----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1- Hava Girişi       | 2- Degazifikasyon Tankı | 3- Sirkülasyon Pompası |
| 4- Dijital Debimetre | 5- Çarpma Plakası       | 6- Jet Nozzle          |
| 7- Draft Tüpü        | ■ - Hava                | ■ - Atıksu             |

Denemeler esnasında kullanılan jet-loop reaktörün şematik yapısı ve çalışma prensibi Şekil 1.3'te gösterilmektedir.

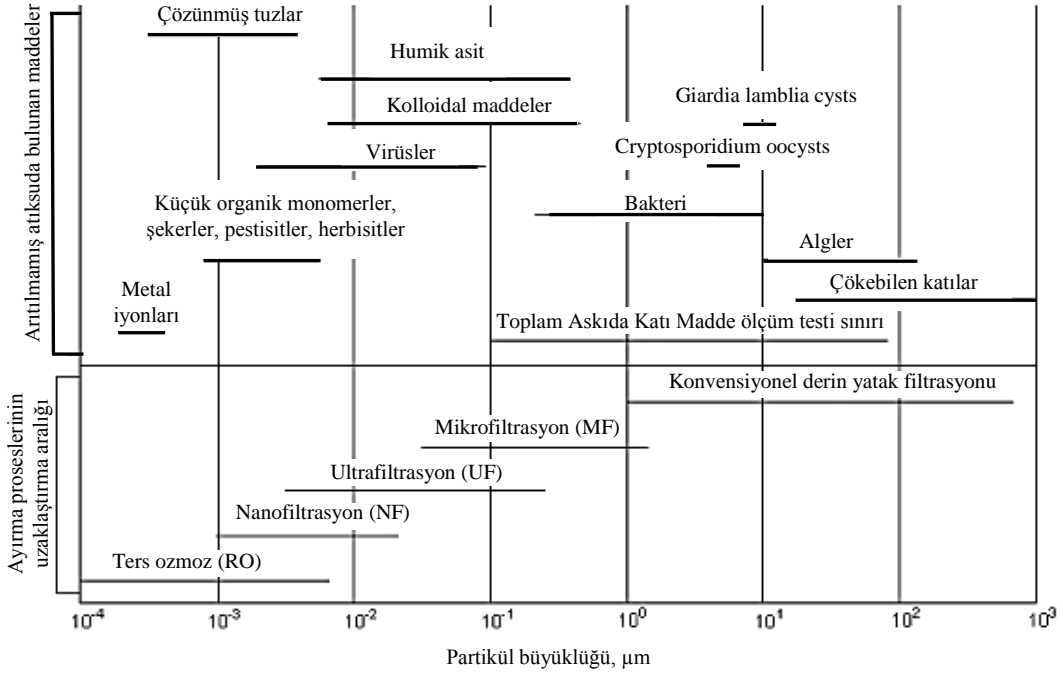
### 1.3 Membran Sistemleri

Membran prosesler, fiziksel ya da fizikokimyasal ayrıştırmaların yapılabilmesi için tasarlanmışlardır. Membran teknolojisinin gelişimi ilk yüksek performanslı ters ozmos membranın 1960'ların başında üretilmesiyle başlamıştır [22].

Çoğu membran uygulamaları sıvı tabanlı olmasına rağmen, gaz-sıvı ve gaz-gaz ayrıştırma işlemlerini meydana getiren membranlar mevcuttur.

**Tablo 1.1:** Membranların uygulama alanına göre sınıflandırılması [23]

| Proses                         | Genel Hedef                                                                                           |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mikrofiltrasyon (MF)           | Mikroorganizmaların da dahil olduğu askıdaki katı maddelerin uzaklaştırılması                         |
| Ultrafiltrasyon (UF)           | Büyük boyuttaki ve çözünmüş haldeki moleküllerin ve koloidal parçacıkların uzaklaştırılması           |
| Nanofiltrasyon (NF)            | Çok değerlikli iyonların ve belirli değeriğe ya da polar özelliğe sahip moleküllerin uzaklaştırılması |
| Ters Ozmos (RO)                | İnorganik iyonların uzaklaştırılması                                                                  |
| Elektrodiyaliz (ED) ve Diyaliz | İyonların sudan ve/veya akışkandan seçici uzaklaştırılması                                            |
| Gaz Transferi (GT)             | Moleküler gazların suya doğru ya da sudan dışarıya aktarılması                                        |



**Şekil 1.4:** Por büyüklüğüne göre membran proseslerin sınıflandırılması [24]

Membran proseslerin biyolojik (aerobik/anaerobik) prosesler ile birlikte katı-sıvı ayrımı yapmak amacıyla kullanımı sonucu ortaya çıkan reaktör tipine membran biyoreaktör (MBR) denir [25].

### 1.3.1 Membran Biyoreaktörlerin Avantajları

MBR prosesi kullanmanın birçok avantajı vardır. Temel avantajları olarak, arıtılmış suyun kalitesi, kurulum alanının az olması, daha az atık çamur oluşumu ve esnek işletme koşullarına sahip olması gösterilebilir.

#### 1.3.1.1 Arıtılmış Suyun Kalitesi

Konvensiyonel aktif çamur proseslerindeki esas problem çamurun çökeltmesidir. Mikroorganizmaların iyi flok oluşturamaması ve filamentli bakteriler çamurun çökmesini engeller. Katı ve kolloidal maddelerin tamamının membran

tarafından ayrılmasından dolayı çökelme problemlerine yol açan şartlar arıtılmış suyun kalitesi üzerine etki edemez. Dolayısıyla sistemin çalıştırılması ve bakımı kolaydır. Çıkış suyu askıda katı madde içermediği için direkt olarak alıcı ortama deşarj edilebilir veya kullanma suyu (soğutma, sulama,...) olarak kullanılabilir.

### **1.3.1.2 Esnek İşletme Şartları**

Bir membran biyoreaktörde çamur yaşı (SRT) ve hidrolik bekleme süresi (HRT) birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Yüksek çamur yaşları, yavaş büyüyen nitrifikasyon veya methanojenik bakteriler gibi mikroorganizmaların üremesi ve sistemde kalması için yeterli olur. Bu ise işletme şartlarında büyük bir esnekliğe sebep olur.

### **1.3.1.3 Kompakt Kurulum Alanı**

Çamurun çökelme karakteristiğinin sistemin boyutlandırılması üzerine etki etmemesi ve membran modüllerinin az yer kaplaması kurulum alanı ihtiyacının minimum olması anlamına gelmektedir. Membran biyoreaktör ve klasik aktif çamur üzerine yapılan bir çalışmada, MBR'ün flok boyutunun 100  $\mu m$ 'den daha küçük olduğu ve dar bir salınım aralığında dağıldığı gözlemlenmiştir. Klasik aktif çamurun flok boyutunun ise 0.5 ile 1000  $\mu m$  arasında değiştiği tespit edilmiştir [26]. MBR'lerdeki ufak boyutlu floklar daha yüksek oksijen ve/veya karbonlu substrat kütle transferine ve dolayısıyla daha yüksek sistem aktivite seviyelerine sebep olur. Aynı zamanda ikincil çökeltme ve yeniden kullanım kalitesine erişebilmek için gerekli ön arıtım ünitelerine gerek olmadığından MBR'ler büyük bir yer kazanımına sahip olmamızı sağlarlar.

### **1.3.1.4 Düşük Oranda Çamur Üretimi**

MBR üzerinde yapılan çalışmalar çamur üretim oranının çok düşük olduğunu göstermektedir [27]. Reaktördeki düşük F/M oranı ve yüksek çamur yaşı genellikle bu düşük çamur üretimini açıklar.

Praderie'nin 1996'da yapmış olduğu çalışma göstermiştir ki çamurun viskozitesi çamur yaşı ile artmaktadır ve MBR sistemlerinde oksijen transferini kısıtlamaktadır. Bu nedenle MLSS konsantrasyonunu 15 ile 20 g/L arasında tutmanın etkili bir oksijen transferi sağlayacağı tavsiye edilmektedir [28]. Çamur yaşının artırılmasıyla çamurun susuzlaştırılmasında büyük bir güçlük karşılaşıldığı ve buna hücre polimer formasyonunun aşırı miktarlara ulaşmasının sebep olduğu gözlemlenmiştir [29, 30].

### **1.3.1.5 Dezenfeksiyon ve Koku Kontrolü**

Membran filtrasyon proseslerinde bakterilerin ve virüslerin uzaklaştırılması için herhangi bir kimyasal madde eklenmesine gerek duyulmamaktadır [31, 32, 33]. Bütün proses ekipmanının sıkıca, hava geçirmeyecek şekilde, kapalı olması koku oluşmasını engeller.

### **1.3.2 MBR'lerin Performansına Etki Eden Faktörler**

MBR'lerin optimizasyonu için birçok parametrenin değerlendirilmesi gerekmektedir. Biyolojik basamakta, askıda katı maddelerin konsantrasyonu, çamur yaşı, ve hidrolik bekletme süresi (HRT) parametreleri ile membran ayırma basamağında ise akı oranı, malzeme maliyeti, ve enerji maliyeti parametreleri olarak belirtilebilir. Atık çamurun bertarafı da unutulmamalıdır [29].

Membran filtrasyonunun akı miktarına etki eden faktörler membranın yapılmış olduğu materyal ve por büyüklüğü olduğu kadar, membranın işletme parametreleri olan sürücü basınç kuvveti, akışkanın hızı/türbülans ve MLSS'nin miktar ve fiziksel özellikleridir.

### 1.3.2.1 Membranın Cinsi

Membran modülünün seçimi hedeflenen akıya ulaşmak için önemli bir rol oynamaktadır. Membranlar, imalinde kullanılan materyale (seramik veya organik), membran tipine (mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon), modül tipine göre (düz, boru tipi veya içi boş elyaf), filtrasyon yüzeyine (iç veya dış) veya modül durumuna (statik veya dinamik) göre kategorize edilebilir.

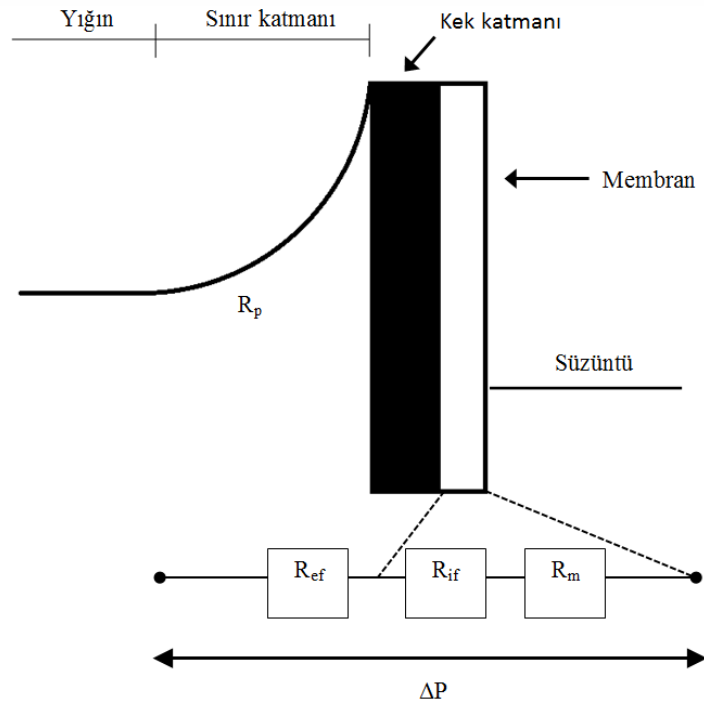
Akı seçilen membran kombinasyonuna göre çok değişken olabilir. Pürüzsüz yüzeyli (seramik) membranlar kek tabakasının yapışmasına daha fazla direnç gösterir ve akı oranı daha fazladır. Uzun çalışma ömrü, şiddetli kimyasal temizlemeye karşı dayanıklılığı, ve yüksek işletme basınçlarına dayanımı seramik membranların avantajlarından bazılarıdır. Membranın cinsinin belirlenmesi, seçimi ve işletme şartları filtrasyon maliyetini direkt olarak etkiler [34].

### 1.3.2.2 Transmembran Basıncı (TMP)

Membran filtrasyon performansı, membranın kendisinin oluşturduğu direnç ve filtrasyona uğrayacak olan akışkanın oluşturduğu direnç tarafından etkilenir. Direnç modeli Şekil 1.5’da gösterilmiştir. Bu modele dayanarak süzüntü akısı, akış direnci ile *Denklem 1.1*’deki gibi ifade edilir.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (1.1)$$

Burada J, süzüntü akısı ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$ );  $\Delta P$ , transmembran basıncı (Pa);  $\mu$ , süzüntünün viskozitesini (Pa.s);  $R_t$ , toplam filtrasyon direncidir (L/m).



**Şekil 1.5:** Akıyı etkileyen dirençler. [34].

Şekil 1.5’da da tasvir edildiği gibi toplam direnç, membranın direncinin ( $R_m$ ), konsantrasyon polarizasyonu direncinin ( $R_p$ ), kek tabakasındaki fizikokimyasal etkileşimlerden oluşan dış kirlenme direncinin ( $R_{ef}$ ), ve porları tıkamış olan maddelerden kaynaklanan iç kirlenme direncinin ( $R_{if}$ ) bir fonksiyonudur. *Denklem 1.1*’i yeniden düzenleyecek olursak:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_p + R_{ef} + R_{if})} \quad (1.2)$$

$R_p$  ile  $R_{ef}$  ayırt edilmesi güç olacağından bu iki terimi dış direnç ( $R_e$ ) olarak tek bir terim olarak birleştirebiliriz. Böylece

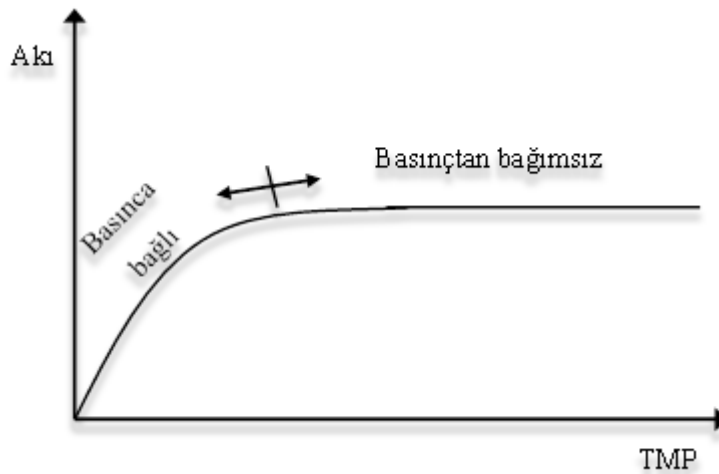
$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_e + R_{if})} \quad (1.3)$$



Filtrasyon için uygulanan basınç kekin sıkıştırılabilirliğini ve dolayısıyla da kek tabakası tarafından uygulanan direnci ( $R_e$ ) de etkileyeceğinden  $R_e$  transmembran basıncının bir fonksiyonu olarak yazılabilir ( $R_e=\theta\Delta P$ ). Burada  $\theta$ , kek tabakasının kütle transfer özelliğinin bir fonksiyonudur. *Denklem 1.3*'ü yeniden düzenleyecek olursak:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{if} + \theta\Delta P)} \quad (1.4)$$

Belirli bir akışkan için, süzüntü akısı transmembran basıncının bir fonksiyonudur. *Denklem 1.4*'ten de anlaşılacağı gibi basınca bağlı (düşük basınçlarda) ve basınçtan bağımsız (yüksek basınçlarda) iki farklı rejim bulunmaktadır. Basınca bağlı olan kısımda süzüntü akısı uygulanan basınçla orantılıdır ( $\Delta P \gg J = \frac{\Delta P}{\mu \theta \Delta P} = \frac{1}{\mu \theta}$ ). Basınçtan bağımsız olan kısımda ise süzüntü akısı kek tabakasının direnci tarafından kontrol edilir ( $\Delta P \ll J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{if})}$ ) (Şekil 1.6). Sürekli çalışma halinde düşük transmembran basınçlarında elde edilen süzüntü akısı yüksek transmembran basınçlarında elde edilenlerden daha fazladır [34].



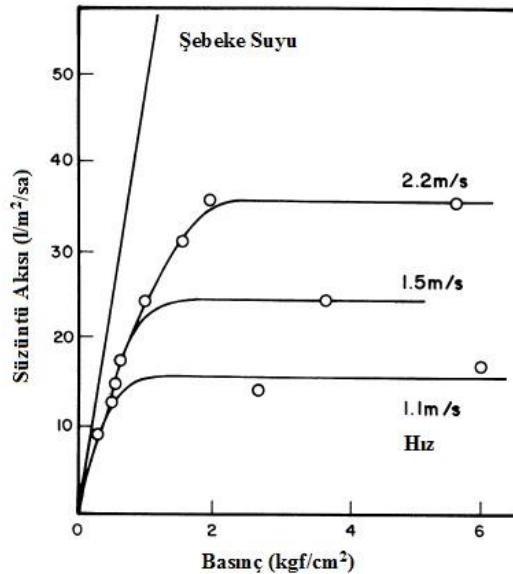
**Şekil 1.6:** Akı ve Transmembran Basıncı arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterimi. [34]

### 1.3.2.3 Çapraz Akış Hızı

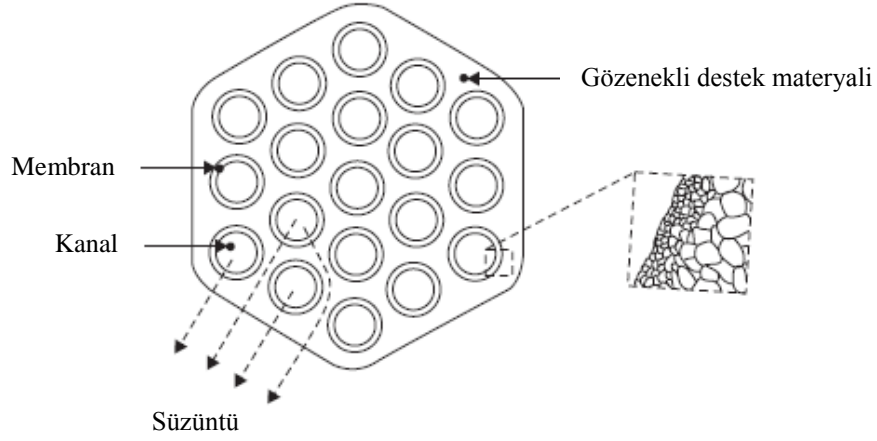
Şekil 1.6'dan da anlaşılacağı gibi transmembran basıncının basınçtan bağımsız olan bölgede olacak şekilde arttırmak akı miktarını daha fazla arttırmadığı için gereksizdir.

Ancak bu bölgede akı kek tabakası tarafından kontrol edilir ve kek tabakasında bozunmaya sebep olan herhangi bir kuvvet akı miktarını da etkiler. Çapraz akış hızının arttırılmasıyla kek tabakasını oluşturan maddeler süpürülebilir. Çapraz akış hızının arttırılması ile akıda iyileşme ve basınçtan bağımsız bölgeye geçiş gözlemlenmiştir (Şekil 1.7) [35].

Yüksek çapraz akış hızından kaynaklanan kesme kuvvetleri flok yapısının parçalanmasına ve yüksek biyokütle dağılımına sebep olur. Bu nedenle biyokütle ile oksijen ve besin arasındaki kütle transferi artar ve arıtma veriminin gelişmesine katkıda bulunur. Çapraz akışlı bir seramik membran sisteminin çalışma prensibi Şekil 1.8'te gösterilmiştir [23].



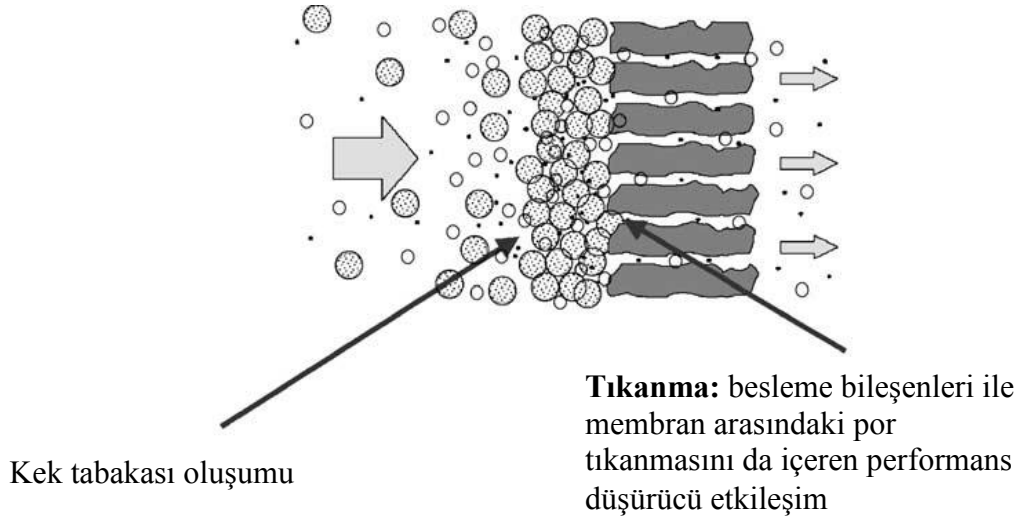
Şekil 1.7: Süzüntü akısı ile çeşitli hızlardaki sürücü basınç kuvvetinin ilişkisi [35]



**Şekil 1.8:** Çapraz akışlı bir seramik membran sisteminin çalışma prensibi [23]

#### 1.3.2.4 Membranın Tıkanması

Bütün membran filtrasyonu uygulamalarında direnç artarsa akı azalır. Dirençteki bu artış  $R_m$ ,  $R_{if}$ ,  $R_e$  parametrelerindeki değişimden veya bu üç parametredeki artıştan dolayı olabilir (*Denklem 1.4*) (Şekil 1.9). Eğer akıdaki bu düşüş işletme şartlarının değiştirilmesi ile engellenemiyor ise buna tıkanma (fouling) denir [36].



**Şekil 1.9:** Membran filtrasyonundaki akı performansını sınırlayan olaylar [37]

### 1.3.2.5 Viskozite

Akışkanın viskozitesindeki bir artış, *Denklem 1.4*'te de gösterildiği gibi, ters orantılı olarak filtrasyon akısını etkiler [28].

## 1.4 Süt Endüstrisi Atıksuları

Süt, doğrudan tüketime sunulduğu gibi, kısa sürede özelliklerini yitirdiğinden dolayı çeşitli ürünlere de işlenmektedir. Bu ürünlerin yanında artıklar da elde edilmekte ve sütteki besin maddelerinin önemli bir kısmı bu artıklara geçmektedir.

Süt işleyen tesislerin pek çoğu küçük işletmeler şeklinde ülkemizin çeşitli yerlerine dağılmış olup bunların büyük bir kısmında arıtma tesisi yoktur.

Süt fabrikası atıklarının, çevre kirlenmesine neden olmadan atılması en önemli problemlerdendir. Süt fabrikaları atıkları içerisinde mikroorganizmaların çoğalması için gerekli olan besin maddeleri bulunmaktadır. Bununla beraber bu atıklar sinekler, böcekler, kemiriciler içinde önemli bir besin kaynağıdır. Mikroorganizmalar için iyi bir ortam oluşturması ve içerisindeki organik ve inorganik maddeler nedeniyle toksik maddelerin meydana gelmesi, hatta patojen organizmaların bulunması nedeniyle, süt fabrikası atıkları halk sağlığı açısından olduğu kadar, diğer canlılar açısından da potansiyel bir kontaminasyon kaynağıdır [38].

Hayvansal protein, yağ, şeker, mineral maddeler içeren süt endüstrisi atıkları pek çok ülke tarafından değişik şekillerde değerlendirilmektedir. Peynir ve kazein teknolojisinden arta kalan peynir altı suyu, süt endüstrisinin büyük miktarlarda ürettiği yan ürünlerdendir. Kuru maddesinin düşük oluşu, süt gibi kolayca bozulabilir oluşu ve taşınmasının ekonomik olmayışı gibi nedenlerden dolayı değerlendirilmesi en problemlidir. Ülkemizde birkaç modern işletmede

değerlendirilmekte ve ayrıca kimi zaman hayvanlara verilmekte ya da tarlalara dökülmekte, kimi zamanda kanal ve akarsulara atılmak zorunda kalmaktadır.

Süt işletmelerinde, organik madde içeren süt işletmeye girdiği andan başlayarak, ürün halinde işletmeyi terk edinceye kadar değişik yerlerde ve değişik teknolojik aşamalarda sulara bulaşarak atıksuyu oluşturur. Süt bileşenlerini içeren atıksu miktarı işletmeden işletmeye değişmekte olup, 1 litre süt için en az 1 – 1.5 litre olarak hesaplanabilir.

Süt bileşenlerini içeren atık suların oluşması aşağıda görülen değişik işlemler sırasında meydana gelir.

- 1- Güğümlerin ve tankların içinde kalan süt, temizleme sırasında suya geçer.
- 2- Süt alım bölümünde, güğümler boşaltılırken damlayan ve dökülen süttten bulaşır.
- 3- Sütün işlenmesi sırasında damlayan, dökülen süt yıkandığında suya geçer.
- 4- Sütün ambalajlanması sırasında, arızalar sırasında dökülen sütün önemli bir bölümü atılır.
- 5- Tereyağı yıkama suları ile tereyağı atıkları tabana dökülür veya yayıkaltı değerlendirilmiyorsa doğrudan kanallara atılır.
- 6- Peynir imalatı sırasında arta kalan peynir suyu, pıhtı parçaları, peynir parçaları, atık suları önemli ölçüde kirletir.
- 7- Peynir haşlama suyu ve içinde kalan peynir parçaları haşlama suyu ile birlikte kanallara akıtılır.
- 8- Salamura tanklarının boşaltılması sonucu dip kısımda biriken tortu ve peynir parçacıkları atık sulara karışır.
- 9- Dökülen süttözu artıkları, temizlik sırasında yıkama suyuna geçer.
- 10- Üretim sırasında süt mamullerinin temas ettiği alet ve ekipman yüzeylerinde kalan süt artıkları, temizleme sularıyla atık sulara karışır.

- 11- Santrifüj çamuru içindeki organik maddeler imha edilmediği takdirde suyu önemli ölçüde kirletir.
- 12- İşletme içerisinde yapılan yağ tayini, titrasyon asitliği gibi kalite kontrol tayinleri için kullanılan örneklerden ileri gelen atıklar içerisinde de sütün bileşenleri mevcuttur.
- 13- Alet ve ekipmanların temizliği sırasında, yüzeyde kalan süt artıkları yıkama suyuna geçer.
- 14- Dolaylı olarak işletme içinde yapılan analizlerde, temizlikte ve dezenfeksiyonda kullanılan kimyasal madde kalıntıları kanallara akar.

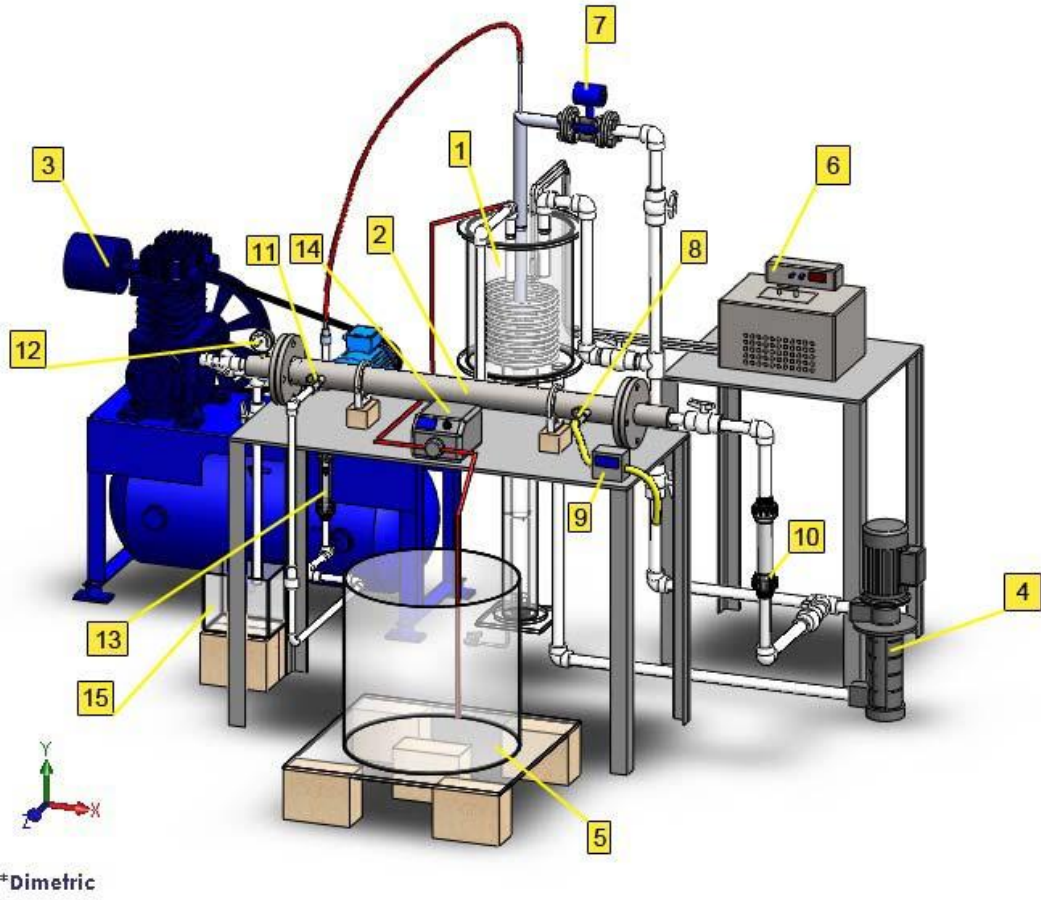
Süt işletmelerinde suların kirlenmesine neden olan bu atıklar üniteden üniteye göre değişiklik gösterir. Ayrıca bu atıkların 1 litresinde 150 mg kadar azot, 2.3 mg fosfor ve 3 - 4 mg kadar potasyum vardır. Bu ünitelerin atık suları içerisinde koruyucu maddelerden, deterjanlardan ve dezenfektanlardan kaynaklanan kimyasal maddelerde bulunur. Bu maddeler arasında emülsiyon halinde bulunan yağ, diğer maddelere oranla daha fazla kirletici özelliğe sahiptir [38].

Birden fazla prosesin tek bir reaktörde toplanarak dizayn edilmesi ekonomik parametrelerden de istenilen ölçüde yararlanmaya neden olmaktadır [39]. Bu sebeplerden dolayı süt endüstrisi atıksularının konvansiyonel sistemler yerine daha gelişmiş, daha modern ve daha kompakt sistemler ile arıtılması gerekmektedir.

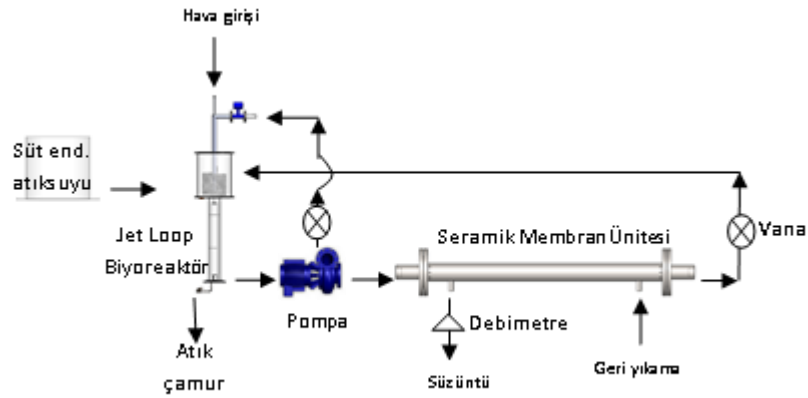
## 2. MATERYAL ve YÖNTEM

### 2.1 Deney Sistemi

Yapılan denemelerde kullanılan jet loop biyoreaktör ve silindirik membran modülünün olduğu filtrasyon sisteminin şematik görünümü Şekil 2.1’de , blok diyagramı ise Şekil 2.2’de verilmiştir. Jet loop biyoreaktör 18 L sıvı hacmine sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Jet loop biyoreaktör şeffaf akrilik malzemedan silindirik yapıda imal edilmiştir. Biyoreaktörün üst kısmına gaz alma tankı denir ve bunun içerisinde reaktörün ısınısını sabit tutabilmek için bir soğutucu yerleştirilmiştir. Jet loop reaktör sisteminde çözünmüş oksijen, pH, sıcaklık, sıvı sirkülasyon hızı, membran basıncı ve membran akısı kontrol edilmesi düşünülen parametreler olarak seçilmiştir. Sistemde sürekli olarak pH, sıcaklık ve ÇO ölçümleri yapılarak, pH=7.0-7.5 aralığında, sıcaklık ise  $22 \pm 2^{\circ}C$ ’de ve  $\text{ÇO} = 2 \pm 0.5 \text{ mg/L}$  değerinin üstünde dengelenmeye çalışılmıştır. Sistemin blok diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1:** Denemelerde kullanılan jet loop membran biyoreaktörün şematik görünümü (1- Jet Loop Biyoreaktör, 2- Seramik Membran Modülü, 3- Hava Kompresörü, 4- Sirkülasyon Pompası, 5- Atıksu Besleme Tankı, 6- Soğutma Ünitesi, 7- Dijital Debimetre, 8- Artırılmış Su Çıkışı, 9- Dijital Debimetre, 10- Membran Girişi Analog Debimetre, 11- Geri Yıkama Vanası, 12- Manometre, 13- Analog Hava Debimetresi, 14- Peristaltik Atıksu Besleme Pompası, 15- Geri Yıkama Çamur Toplama Tankı)



**Şekil 2.2:** Denemelerde kullanılan jet loop membran biyoreaktörün blok diyagramı



## 2.2 Kullanılan Aktif Çamur

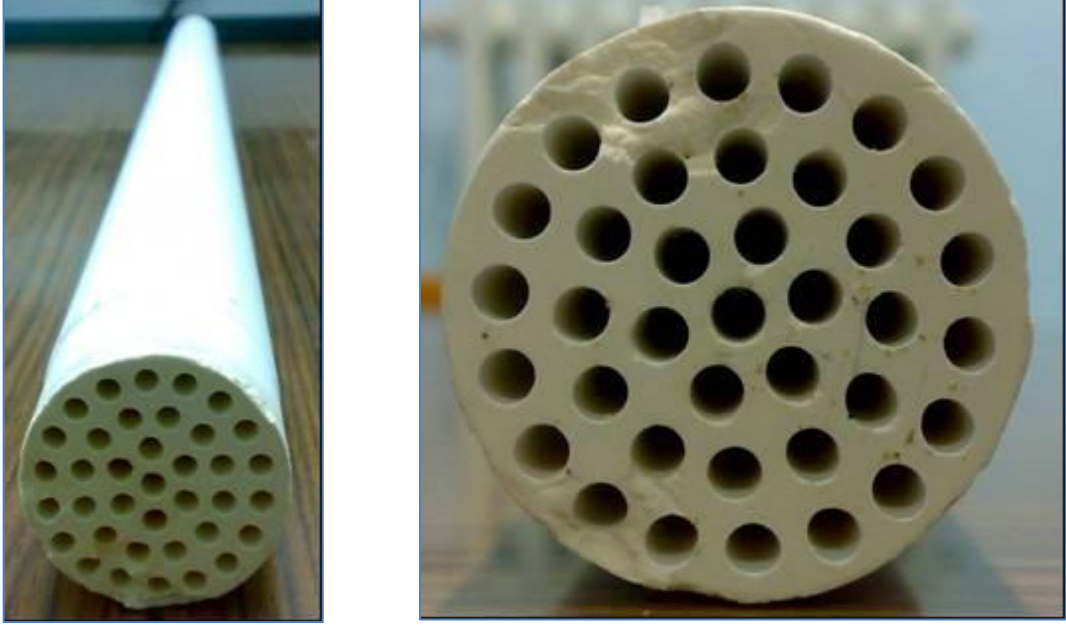
Çalışmada, Balıkesir Kenti Atıksu Arıtma Tesisi çöktürme havuzundan alınan aktif çamur ve Manisa Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtma Tesisi biyolojik arıtım ünitesinden getirilen aktif çamur birleştirilerek çoğaltılmış ve kullanılmıştır. Alınan çamur, karbon kaynağı olarak süt endüstrisi atıksuyu ile beslenerek mikroorganizmaların atıksuya adaptasyonu sağlanmaya çalışılmıştır. Daha sonra jet loop reaktöre alınmış ve jet loop reaktör şartlarına alışması beklenmiştir.

## 2.3 Kullanılan Atıksu

Çalışmalarda atıksu olarak Onur Süt Sanayi Ticaret A.Ş.'ye ait peynir üretim fabrikasından atılmakta olan deşarj suları kullanılmıştır. Atıksu fabrikaya ait arıtma tesisinin dengeleme havuzundan alınmıştır. Tesisten 2 - 4 günlük periyotlarda alınan yaklaşık 250 L atıksu laboratuarda depolanarak kullanılmıştır. Getirilen atıksuda periyodik olarak KOİ, BOİ, TA, TF, AKM, UAKM analizleri yapılarak sisteme beslenmiştir.

## 2.4 Kullanılan Membran Ünitesi

Deneylerde 0.24 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip silindirik seramik membran modülü kullanılmıştır. Jiangsu Jiuwu Hitech Co. Ltd. firmasında temin edilen seramik membran modülü 40 mm dış çapa ve 37 kanala sahiptir (Şekil 2.3). Paslanmaz çelik hauzing içerisine yerleştirilmiş olan seramik membran por çapları 0.1 - 0.05 µm ve uzunluğu 1 m'dir. Groundfos marka (1.7 kW gücünde) paslanmaz çelik kafalı sirkülasyon pompası ile hem reaktörde jet oluşturulurken; hem de membran ünitesi için gerekli çapraz akışı hızı ve membran basıncı üretilmiştir. Çapraz akış hızları su debisinin, suyun geçtiği dik kesit alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. İstenilen çapraz akış hızları Şekil 2.1'de gösterilen membran ünitesinin sirkülasyon hatları üzerine yerleştirilmiş vanalar ile ayarlanmıştır.



**Şekil 2.3:** Denemelerde kullanılan seramik membran modülü.

Kullanılan seramik membran modülü basınçlı hava kullanılarak geri yıkanmıştır. Basınçlı hava laboratuarda mevcut olan Ferrua Marka kompresörden membran ünitesine çekilen bir hat ile temin edilmiştir. Ayrıca membran belli zamanlarda kimyasal temizleme işlemlerine de tabi tutulmuştur. Geri yıkama ve kimyasal temizleme işlemleri için aşağıdaki prosedürler uygulanmıştır:

**Geri yıkama prosedürü:** Geri yıkamaya başlamak için öncelikle vanalar yardımıyla filtrasyon işlemi durdurulmuştur. Permeate hattından 3 dakika boyunca basınçlı hava verilerek filtrasyon esnasında membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının sıyırılması ve retentate hattından reaktöre alınması sağlanmıştır. 3 dakikanın sonunda ise geri yıkama vanaları kapatılmış ve tekrar filtrasyona devam edilmiştir.

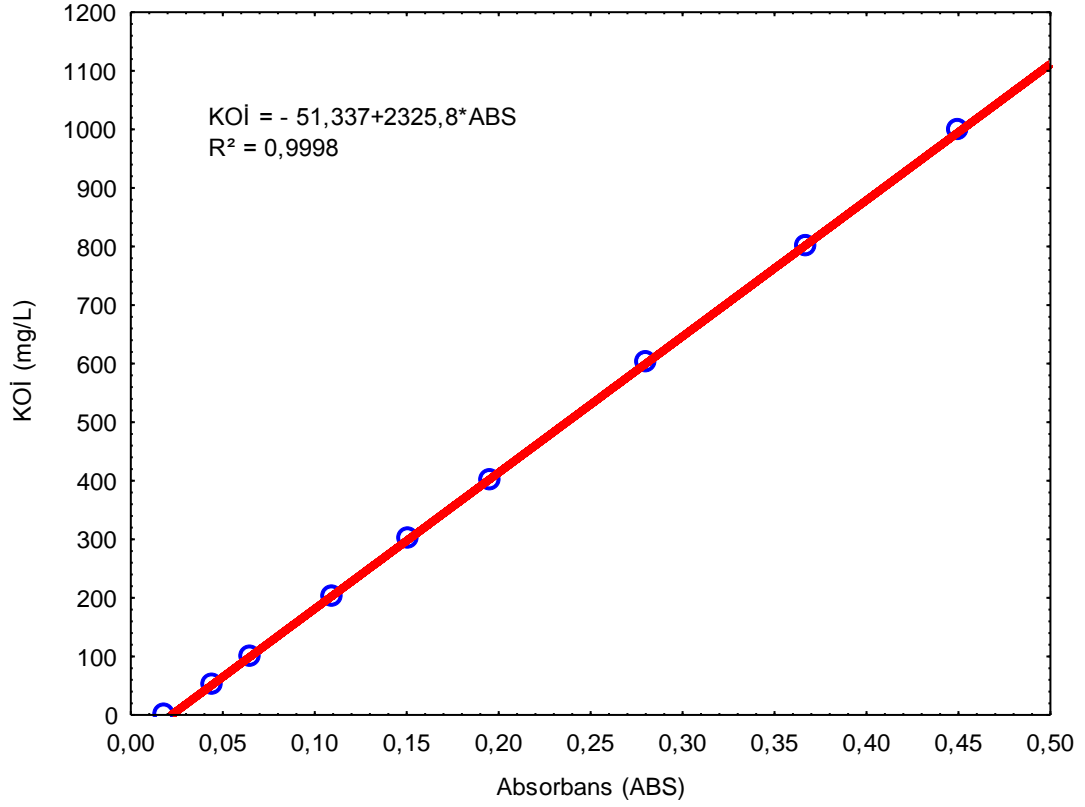
**Kimyasal temizleme prosedürü:** Membran iyice tıkanıp ya da belirlenen zamanlarda membran housingi flanşlardan sökülerek sistemden ayrılmış ve seramik membran modülü çıkartılmıştır. Daha sonra çıkarılan membran 1 saat saf suda

bekletilmiş ve 12 saat boyunca %2'lik NaOH çözeltisine konmuştur. Bu işlemin akabinde tekrar 1 saat boyunca saf suda bekletilen membran modülü bu kez %2'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine konarak 12 saat bekletilmiştir. Son olarak 1 saat saf suda bekletilen membran modülü hausinge takılarak sisteme monte edilmiştir. Sisteme takılan membran basınçlı hava ile 3 dakika boyunca geri yıkanarak filtrasyona yeniden başlanmıştır.

## **2.5 Yöntem**

### **2.5.1 KOİ Analizi**

KOİ analizi standart metotlarda belirtilen usullere uygun olarak kolorimetrik yapılmaktadır. KOİ ölçümü için, 850 mg Potasyum Hidrojen Ftalat 0,5 L saf suda çözülerek elde edilen 2000 mg/L KOİ stok çözeltisinden standartlar hazırlanmıştır. Daha sonra bu standartlardan 1.5 mL alınarak üzerine litresinde 10.216 g K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 167 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 33 g HgSO<sub>4</sub> bulunan parçalama çözeltisinden 1 mL ve son olarak litresinde 10.129 g Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bulunan derişik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> asit çözeltisinden 1.5 mL eklenerek 148±2°C'de 2 saat boyunca bir termoreaktörde (WTW marka CR3000 model) ısıtılmıştır. Reaktörden alınan örnekler oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulularak 600 nm'de WTW marka Spectroflex 6600 model spektrofotometrede absorbans değerleri okunarak Şekil 2.4'de verilen kalibrasyon eğrisi çizilmiştir.



**Şekil 2.4:** KOİ ölçümlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi

Toplam KOİ miktarları alınan numunelerin direk (herhangi bir filtre ortamından süzülmeden) olarak analiz edilmesi sonucu bulunurken, çözülmüş KOİ değerleri ise numunelerin membrandan (0.45 µm por çapına sahip glass-fibre filtre) süzüldükten sonra analiz yapılması sonucu tespit edilmiştir.

### 2.5.2 Askıda katı madde ve MLSS konsantrasyonunun ölçülmesi

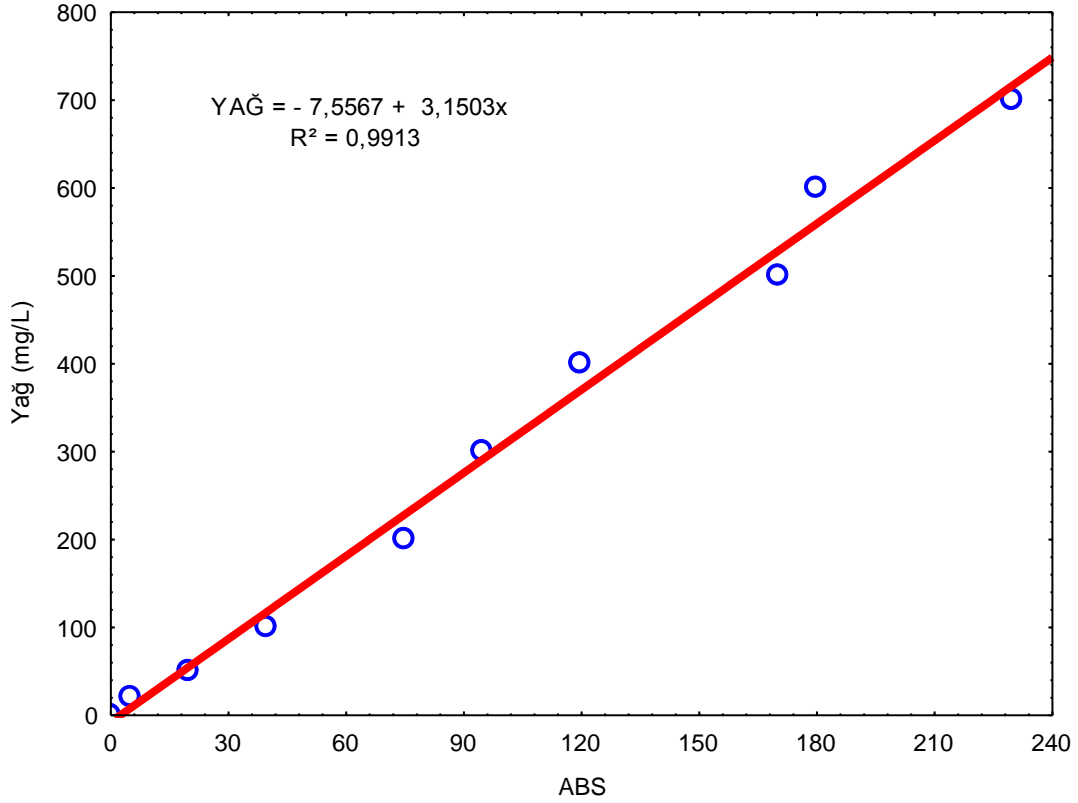
AKM ölçümleri Standart Metotlarda verilen yöntemlerle yapılmıştır [40]. Bu amaçla vakum pompası ile glass-fiber filtreler kullanılarak vakumlamak suretiyle ölçüm yapılmıştır. Ayrıca atıksuda ve biokütlede UAKM ve MLVSS (uçucu fraksiyonlar) ölçümleri de Standart Metotlarda açıklandığı gibi yapılmıştır.

### 2.5.3 BOİ Ölçümleri

BOİ ölçümleri; WTW marka OxiTop model dijital BOİ metre kullanılarak yapılmıştır. Bu cihaz 6 adet şişe kapasiteli olup, saat bazında BOİ değerlerindeki değişimleri verebilmektedir.

### 2.5.4 Yağ ve Gres Ölçümleri

Yağ ve gres ölçümleri “yağ-gres, petrol-hidrokarbonu” ölçüm cihazı (Wilksir HATRT-2) kullanılarak yapılmıştır. Cihaz IR bölgede çalışmakta olup yağ-gres standardı olarak bilinen bir yağ (30 numara (30W) motor yağı) kullanılmış ve aşağıdaki prosedüre göre kalibre edilerek yağ ve gres analizleri yapılmıştır [40]. Cihazın kalibrasyonunda kütleli ppm (mg/L) kullanılmıştır. Dereceli silindire 0.1 g yağ koyulduktan sonra üzeri hegzan kullanılarak 100 mL’ye tamamlanmış ve bu stok çözeltilen belirli oranlarda hegzan ile seyreltilerek cihazda absorbans değerleri okunmuş ve Şekil 2.5’te verilen kalibrasyon eğrisi hazırlanmıştır. Numunelerde yağ ve gres analizi yapılırken öncelikle numunenin pH’sı 2’nin altına 1:1’lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile düşürülmüş daha sonra belirli miktarda hegzan numuneye ilave edilerek hegzanın yağ ve gresi ekstrakte etmesi sağlandıktan sonra yağ-gres ölçüm cihazı aracılığı ile yağ-gres analizleri yapılmıştır.



**Şekil 2.5:** Yağ-Gres Analizinde kullanılan kalibrasyon eğrisi

### 2.5.5 pH, ÇO ve İletkenlik Ölçümleri

Reaktördeki pH ve ÇO sisteme online bağlı olan WTW marka Multiline P4 350i model çoklu parametre ölçer cihazı yardımıyla sürekli olarak ölçülerek kaydedilmiştir. İletkenlik ölçümü yine aynı marka çoklu parametre ölçer cihazında iletkenlik probu yardımıyla yapılmıştır. Ayrıca karakterizasyon ve diğer ölçümlerde Orion marka 5 Star model masa tipi iyon metre cihazı da kullanılmıştır.

### 2.5.6 NO<sup>3-</sup>-N Ölçümü

NO<sup>3-</sup>-N ölçümleri Merck marka ve 1.09713.0001 model numaralı hazır kitler kullanılarak spektrofotometrik metotla yapılmıştır.

### **2.5.7 Toplam Azot (TA) Analizi**

Toplam azot analizi için Merck marka ve 14763 model numaralı hazır kitler kullanılmıştır. Toplam azot analizi Koroleff metoduna (ortamdaki azotlu bileşiklerin nitrat azotuna indirgenmesi esasına) göre yapılmıştır.

### **2.5.8 NH<sup>4+</sup>-N analizi**

NH<sup>4+</sup>-N analizleri Merck marka ve 14559 model numaralı hazır kitler kullanılarak spektrofotometrik metotla yapılmıştır.

### **2.5.9 Toplam Fosfor (TF) Analizi**

TF analizleri Merck marka ve 14729 model numaralı hazır kitler kullanılarak spektrofotometrik metotla yapılmıştır.

### **2.5.10 Transmembran Basıncı (TMP)**

Membran filtrasyonunda, membrandan geçen sıvı miktarı uygulanan basınçla doğru, sıvının viskozitesi ve membran ile membran üzerinde oluşan dirençler toplamıyla ters orantılıdır. Membran basıncı, membranın kirlenmelerle ne ölçüde kirleneceğini (tıkanma) belirleyen ve membranın ekonomik ömrünü tayin eden önemli değişkenlerden bir tanesidir. Şekil 2.1’de gösterilen sistemde bir sirkülasyon pompası tarafından pompalanan sıvı membran modülünden geçirilmektedir. Bu esnada modülün giriş ve çıkışında bulunan iki ayrı vananın farklı pozisyonlara getirilmesi suretiyle farklı işletme basınçları uygulanmış olacaktır. Uygulanan basınç farkı altında membrandan geçen sıvı miktarlarının belirlenmesiyle, basıncın membran akıları üzerine olan etkisi açıklanmaya çalışılacaktır.

### **2.5.11 apraz Akış Hızı (v)**

Membran filtrasyonunda çapraz akış filtrasyon tekniği ile membran üzerindeki kirleticiler, membrana teğet olarak hızla akan besleme çözeltisinin yardımıyla membran üzerinden uzaklaştırılırlar. Bu sayede membran üzerinde daha az kirletici birikir. Sirkülasyon pompasının farklı debilerde çalıştırılmasıyla membran üzerindeki teğetsel hızın akı üzerindeki etkisi incelenebilmektedir.

### **2.5.12 Membran Akısı (J)**

Membran akısı bir membran filtrasyon sisteminde ölçülmesi gereken en önemli parametredir. Bir membranın; sudan ayrılması istenenleri mümkün olan en yüksek derecede membrandan geçirmemesi, suyu ise olabildiğince fazla miktarda geçirmesi beklenir. Bu nedenle membrandan geçen sıvı miktarı yani membran akısı sürekli olarak ölçülmeli ve proses parametreleri ile olan ilgisi belirlenmelidir. Akıların belirlenmesinde bilgisayar bağlantılı bir hassas teraziden veya elektromanyetik bir debimetreden yararlanılacaktır. Terazi üzerinde bulunan bir kapta, membrandan geçerek gelen su biriktirilmekte ve terazideki ağırlık artışı bilgisayara kaydedilmektedir. Daha sonra toplanan verilerden nümerik integrasyon metotları yardımıyla akıların hesaplanması gerçekleştirilecektir. Akı (J) birim zamandaki ağırlık değişiminin süzüntünün yoğunluğuna bölünmesi ile hesaplanmıştır.



### 3. BULGULAR

#### 3.1 Kullanılan Atıksuyun Karakterizasyonu

Çalışmada atıksu olarak kullanılan Onur Süt Sanayi Ticaret A.Ş.'ye ait peynir üretim fabrikasından atılmakta olan deşarj sularının karakterizasyon sonuçları ve istatistiksel değerlendirmesi Tablo 3.1'de gösterilmiştir. SPSS 11.5.0 programı kullanılarak verilerin istatistiksel analizleri yapılmıştır. Gün içerisindeki konsantrasyon, içerik ve debi salınımlarından fazlaca etkilenmemek için atıksu fabrikanın arıtma tesisinin dengeleme havuzundan alınmıştır.

Askıda Katı Madde (AKM), Toplam KOİ (TKOİ), Çözünmüş KOİ (ÇKOİ), Amonyum Azotu, Toplam Azot (TA) ve Toplam Fosfor (TF) ölçümleri alınan her atıksu için yapılırken yağ-gres, nitrat, toplam katı madde, BOİ ölçümleri ise aralıklarla yapılmıştır.

Yapılan karakterizasyon çalışmasında kirlilik parametrelerinin konsantrasyonlarının oldukça salınım gösterdiği tespit edilmiştir. Konsantrasyonlardaki büyük farklılıklar yüklemelerin de büyük salınım göstermesine neden olmuştur. Bu açıdan bakıldığında klasik sistemlerin stabil şartlarda işletilmesinde sorun yaratabilmektedir. Ancak JLMBR sistemi bu dalgalanmaları son derece başarılı bir şekilde tolere etmiştir.

Süt endüstrisi atıksuları genellikle ardışık proses ve işlemlerden, aralıklı bir yolla üretilirler. Dolayısıyla üretim süreci boyunca atıksuların debi ve özellikleri değişiklik gösterir. Buna ek olarak üretilen ürün çeşidine ve işletme metoduna bağlı olarak fabrikadan fabrikaya da değişiklik göstermektedir [41]. Ayrıca yıl boyunca hayvanların beslendikleri otların özelliklerindeki mevsimsel değişimlere bağlı olarak

sütün yapısı da değişmektedir. Sütün içeriğine coğrafik özelliklerle birlikte en büyük etkiyi mevsimsel değişiklikler yapmaktadır. Peyniraltı sularının kimyasal yapısı da sütün kimyasal bileşimine bağlı olarak hayvanların süt verme durumuna, besleme şekillerine, doğurma durumuna, bireysel hayvan özelliklerine ve iklime göre değişim göstermektedir [42].

**Tablo 3.1:** Balıkesir Onur Süt ve Süt Ürünleri Fabrikası atıksuyunun karakterizasyonu.

| PARAMETRE         | KONSANTRASYON (mg/L) |           |          |                |
|-------------------|----------------------|-----------|----------|----------------|
|                   | En Düşük             | En Yüksek | Ortalama | Standart Sapma |
| Toplam KOİ        | 921                  | 9004      | 3445     | 1323           |
| Çözünmüş KOİ      | 635                  | 8064      | 2445     | 1336           |
| ÇKOİ/TKOİ         | 0.68                 | 0.90      | 0.71     | 0.14           |
| BOİ               | 483                  | 6080      | 1860     | 394.5          |
| Askıda Katı Madde | 134                  | 804       | 398.31   | 143.8          |
| Uçucu Katı Madde  | 168                  | 506       | 329.25   | 121.16         |
| Toplam Azot       | 8                    | 230       | 108.84   | 51.50          |
| Amonyum Azotu     | 2.5                  | 91        | 23.42    | 29.38          |
| Nitrat Azotu      | 1.8                  | 8.2       | 6.7      | 5.40           |
| Toplam Fosfor     | 9                    | 111.5     | 35.7     | 18.32          |
| Yağ-Gres          | 142                  | 400       | 288      | 77.86          |
| pH                | 5.52                 | 5.78      | 5.63     | 0.07           |

### 3.2 Jet Loop Biyoreaktörün Kütle Transfer Özelliklerinin Belirlenmesi

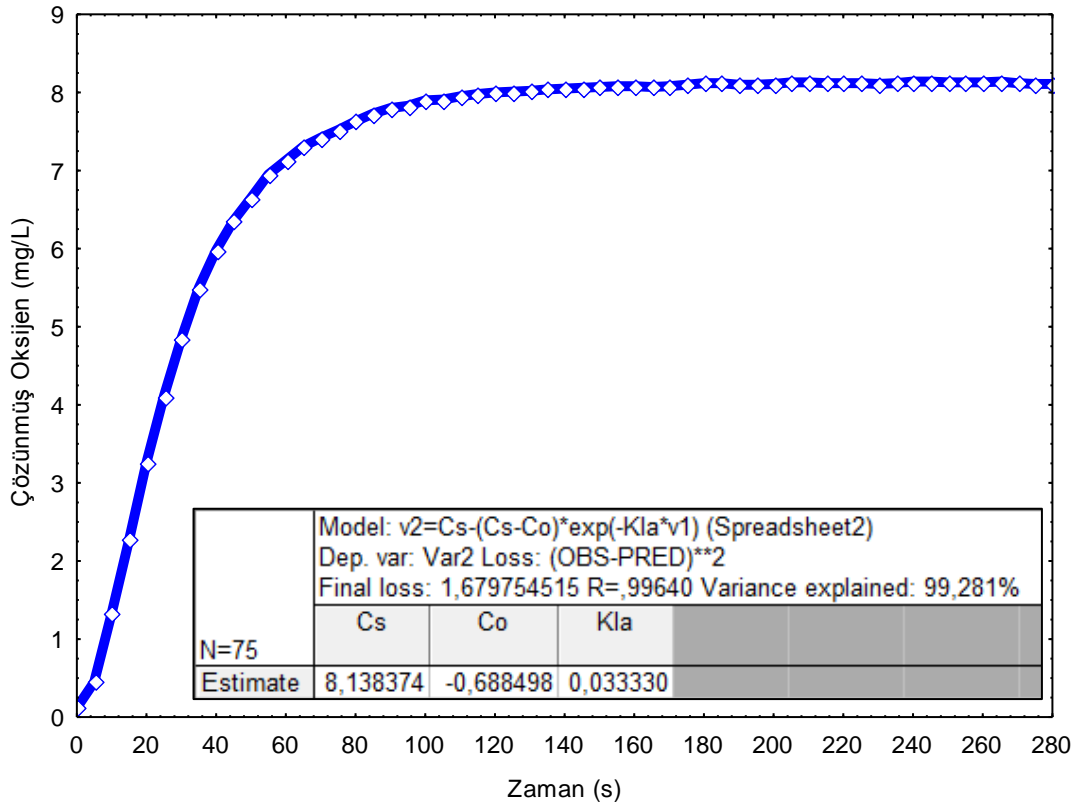
Jet loop reaktörler oldukça yüksek kütle transferi imkânı sunan yeni tip reaktörler olarak bilinmektedirler. Bununla birlikte reaktörün kütle transferi kapasitesini artırmak amacıyla kütle transferine etki eden parametreler üzerindeki araştırmalar devam etmektedir.  $(Reaktör\ Çapı\ (D_e))/(Draft\ Tüpü\ Çapı\ (D_a))$

oranı 2.0 olan daire kesitli emme tüpü biyoreaktörde reaktörün kütle transferi katsayısı ( $K_La$  değerleri) üzerine işletme değişkenlerinin (hava ve su debisi) etkileri incelenmiştir. Bütün denemelerde emme tüpünün çarpma levhasına mesafesi 7 cm olarak ayarlanmıştır [43].

Çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının zamana göre işlenmesi sonucu elde edilen verilerle Simplex ve Quasi-Newton metodu ile Statistica 6.0 programı kullanılarak

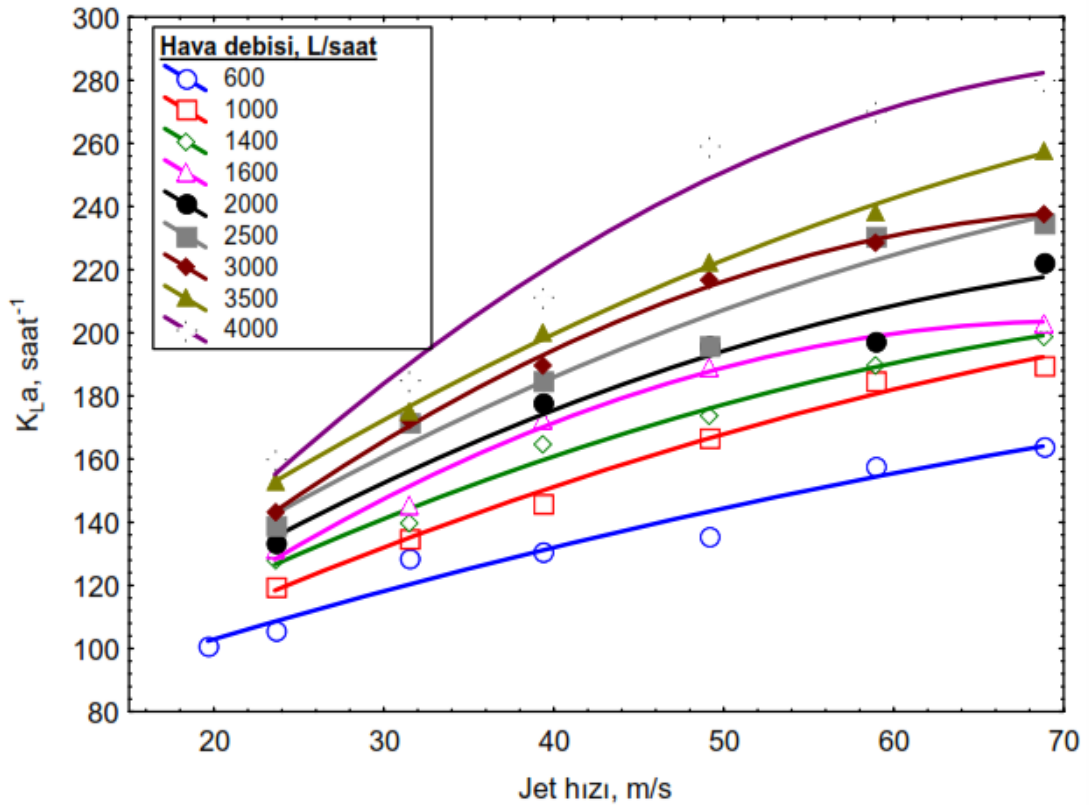
$$C = C_S^* - (C_S^* - C_0) \times e^{-(K_La)t} \quad (3.1)$$

ifadesindeki  $K_La$  ve  $C_S^*$  değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntemle  $K_La$  ve  $C_S^*$  değerlerinin hesaplanışına ait bir örnek Şekil 3.1’de gösterilmektedir [43, 44].



**Şekil 3.1:** Denemelerde ölçülmüş çözünmüş oksijen değerlerinin değişimi ve Statistica 6.0 programı kullanılarak hesaplanmış  $K_La$  ve  $C_S^*$  nin hesaplanışı ( $V_{jet}=31,44$  m/s,  $Q_{su}= 3200$  L/saat,  $Q_{hava}=1000$  L/saat)

Reaktörlerdeki kütle transfer katsayısı  $K_{L,a}$ 'nın artışı ya gaz-sıvı ara yüzey kütle transfer katsayısı ( $K_L$ ) değerinin ya da spesifik ara yüzey alanı ( $a$ ) değerinin artışı ile gerçekleşmektedir. Burada güç değerinin artması iki akımlı püskürtme başlığı ile sisteme giren hava kabarcıklarının boyutlarının küçülmesine böylece hava kabarcıkları ile su arasındaki etkin yüzey alanının ( $a$ ) artmasına neden olmaktadır.  $K_{L,a}$ 'daki artışın büyük oranını spesifik ara yüzey alanının artması meydana getirmektedir. Jet Loop reaktörlerden klasik havalandırıcı cihazlardan 25 - 125 kat daha yüksek oksijen transferi sağlanabilmektedir [44]. Denemeler sonucu elde edilen  $K_{L,a}$  değerleri  $101 \text{ saat}^{-1}$  ile  $280 \text{ saat}^{-1}$  arasındadır (Şekil 3.2) [43].



Şekil 3.2:  $K_{L,a}$  değerlerinin sıvı jet hızı ile değişimi ( $T=22\pm 2^\circ\text{C}$ , 1.2 cm nozle çapı)

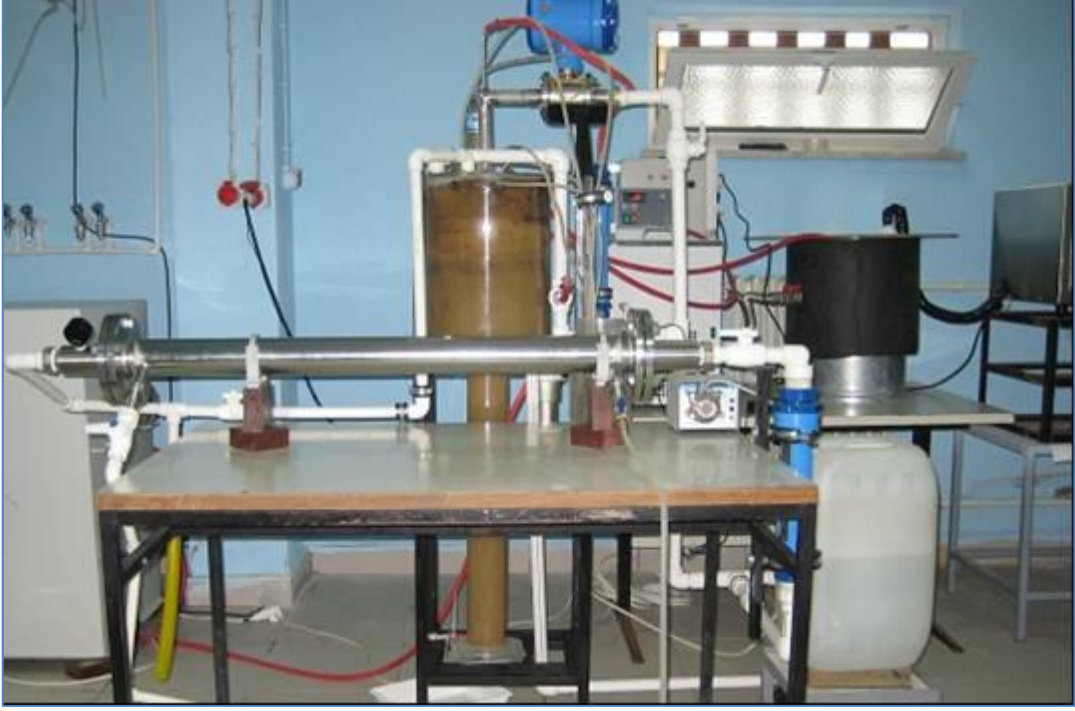
Biyolojik arıtım boyunca jet loop biyoreaktör 600-1000 L/saat hava debisinde ve yaklaşık olarak 3200 L/saat sıvı debisinde çalıştırılmıştır.

### **3.3 Süt Endüstrisi Atıksuyunun Biyolojik Arıtım Performansının İncelenmesi**

#### **3.3.1 Jet Loop Membran Biyoreaktör Sisteminin Biyolojik Arıtıma Hazırlanması**

Atık suların biyolojik metotlarla arıtımında mikroorganizmaların iyi bir şekilde ortama alıştırılması son derece önemli ve de gerekli bir aşamadır. Çünkü ortama iyi uyum sağlayamamış mikroorganizmalar biyolojik arıtım ünitelerinin verimlerini olumsuz yönde etkilemektedirler [44]. Çalışmada alınan aktif çamur Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bir tanka konularak havalandırılmaya başlanmış ve hazırlanan sentetik atıksu ile beslenmiştir.

Başlangıçta hazırlanan tankta 400 mg/L civarında mikroorganizma bulunmakta olup, yaklaşık 3 hafta sonra 580 mg/L değerine ulaşmıştır. 30 gün sonra çoğaltılan aktif çamurdan bir miktar (8 L) alınıp Şekil 3.3'te resmi gösterilen jet loop biyoreaktöre konulmuştur. Sistem çalıştırılıp mikroorganizmalar kesikli olarak beslenmiştir. Mikroorganizma konsantrasyonu 650 mg/L değerine ulaştıktan sonra ise sistem sürekli olarak atıksu beslenmeye başlamıştır.



**Şekil 3.3:** Jet Loop Biyoreaktör ve Membran sisteminin genel görüntüsü.

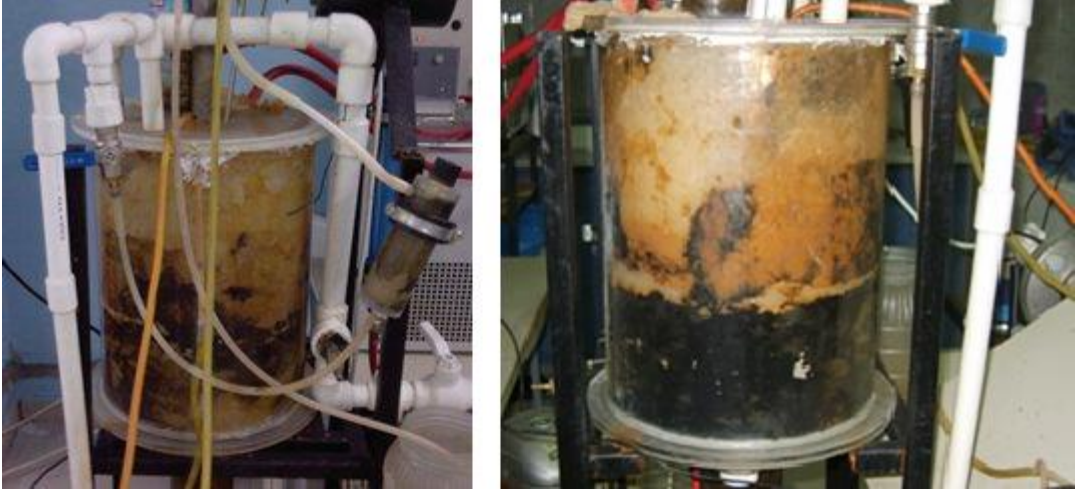
### **3.3.2 Organik yüklem hızının KOİ giderme performansına etkisi**

Sistemde bulunan aktif çamur süt endüstrisi atıksularından kaynaklanan ekstrem şartlara alıştırdıktan sonra sürekli denemelere başlanmıştır. Onur Süt A.Ş.'nin atıksu arıtma tesisinin dengeleme havuzundan 2 - 4 günde bir alınan 250 L civarındaki atıksular 2 - 4 günlük fabrikadaki üretimin çeşidine ve yapılan işlemlere ait özellikleri barındırdığından dolayı atıksuyun karakterizasyonunda çok yüksek salınımlar bulunmaktadır. Laboratuvara getirilen bu atıksular 90 L hacimli besleme tankına doldurularak debisi ayarlanabilir peristaltik pompa ile biyoreaktörün degazifikasyon bölümüne basılmıştır. Sistemin çıkışı seramik membran ünitesinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2). Çıkıştan gün içerisinde 2 - 3 kez KOİ analizi yapılmış ve bu analizlerin ortalaması o güne ait veri olarak kaydedilmiştir. Her periyotta sisteme beslenen atıksu hacmi reaktör hacminin 12 - 14 katı olduğundan, sistemin dengeye ulaştığı görüşüne varılmıştır. Çünkü besleme debisi uzunca süreler sabit tutulmuştur ve bu şekilde bekletme sürelerinin etkisi çalışılmıştır. Sisteme beslenen yükün değerini alınan atıksuyun konsantrasyonu belirlemiştir.

Jet Loop Membran Biyoreaktör sistemi 32 m/s sirkülasyon hızı ve 400 L/sa hava debisi şartlarında çalıştırılmıştır. Sistemin sıcaklığı soğutma ünitesi vasıtasıyla  $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$  değerinde sabit tutulmuştur. Sistemin pH değeri sürekli olarak ölçülmüş ve 7.0 - 7.7 arasında dengelenmiştir. Seramik membran ünitesinde transmembran basıncı (TMP) 0.5 - 4.0 bar, çapraz akış debisi ise 600 - 4000 L/sa arasında değiştirilerek çalışılmıştır. Çalışma boyunca sisteme beslenen atıksuya seyreltme yapılmamıştır. Atıksudan sadece mekanik olarak yağ ve partikül maddelerin sıyırılması sağlanmıştır.

Sisteme yüksek konsantrasyonlarda veya yüksek debilerde atıksuyun verildiği şartlarda biyoreaktörde köpürmeler gözlenmiştir. Özellikle yüksek konsantrasyonlu atıksulara rastladığı dönemlerde meydana gelen bu aşırı köpürmeler sistemden önemli miktarlarda aktif çamur kaçışlarına da sebep olmuştur. Biyokütle kaybını önlemek için reaktörün degazifikasyon kısmı izole edilmiştir.

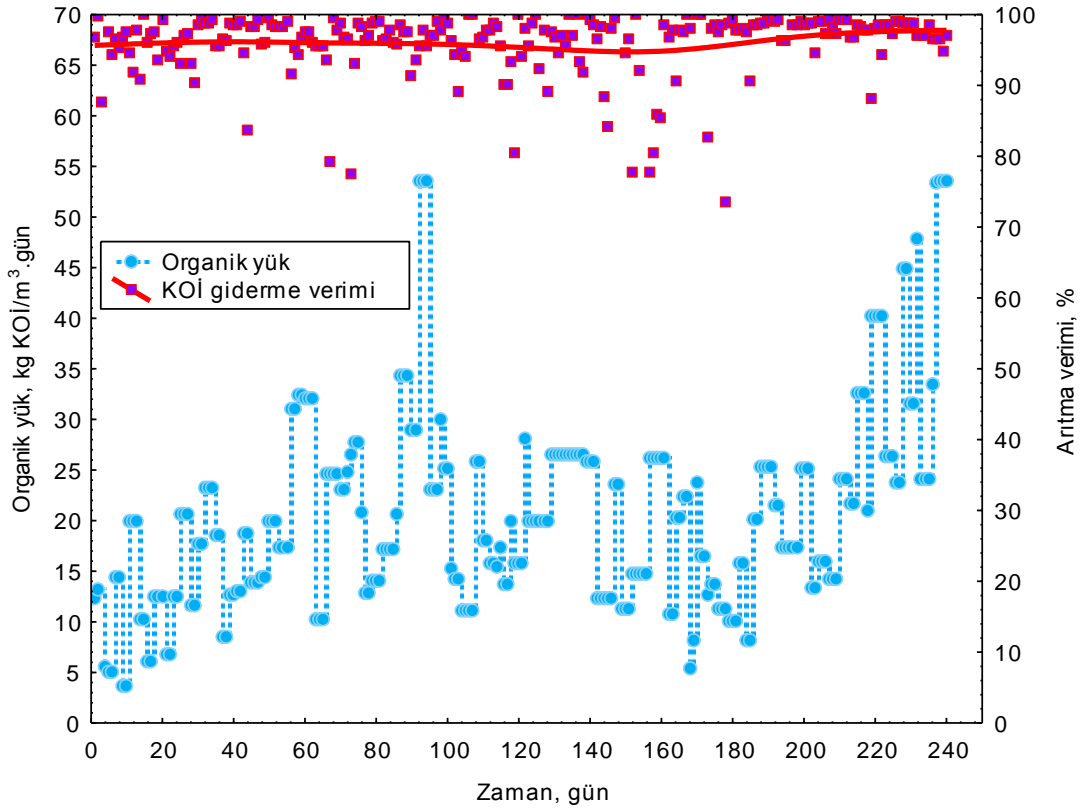
Jet loop biyoreaktör içerisinde zamanla biyofilm oluşumu gözlenmiştir. Hatta belirli dönemlerde biyofilm oluşumu çok hızlı ve fazla miktarda meydana gelmiştir. Özellikle beslenen atıksu düşük konsantrasyonlarda KOİ içerdiğinde ve/veya sisteme düşük debilerde atıksu verildiğinde biyoreaktörde biyofilm oluşumunun çok arttığı gözlenmiştir. En yoğun biyofilm oluşumu degazifikasyon tankının cidarlarında ve soğutma ünitesinin spiral sarımında meydana gelmiştir. Yüksek kesme kuvvetlerinin meydana geldiği ve türbülansın fazla olduğu reaktör ve emme tüpü cidarlarında fazla biyofilm oluşumu gözlenmemiştir. Buralarda oluşan biyofilmler de kısa sürede koparak sirkülasyona katılmıştır. Yüksek yüklemelerde ve/veya besleme KOİ konsantrasyonunun yüksek olduğu şartlarda biyofilm oluşumunun az olması dikkat çekmiştir. Şekil 3.4'te degazifikasyon tankındaki biyofilm oluşumlarına ait resimler gösterilmiştir.



**Şekil 3.4:** Degazifikasyon tankı cidarlarında oluşan biyofilm tabakası

Çalışma boyunca hacimsel organik (KOİ) yüklemelerine karşılık sistemden elde edilen arıtma verimleri Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Jet loop biyoreaktöre beslenen hacimsel organik yükler laboratuvara getirilen atıksuyun KOİ değerlerine bağlı olarak değişmiştir. Çalışmaya 13 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün yükleme ile başlanmış ve bir süre sonra yine giriş konsantrasyonuna bağlı olarak 5.5 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün'e düşürülmüştür. KOİ arıtma verimi başlangıçta %90'larda iken daha sonra %97'lere ulaşmıştır. Daha sonraki dönemlerde yükler artırılıp azaltılmıştır. 55 - 60. günler arasında 33 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün'e çıkarılan yük değerlerinde sistemden %96-98 arası verim elde edilmiştir. 86 - 88. günler arasında 34.3 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün yük değerleri çalışılmış ve bu şartlarda elde edilen arıtma verimi %96-97 arasında olmuştur. 92 - 95. günler arasındaki gelen atıksuyun yüksek KOİ konsantrasyonuna bağlı olarak sisteme 53.4 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün değerinde organik yük verilmiş ve %95-97 arıtma verimi elde edilmiştir. 224 - 226. günler arasında 40.3 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün yükle çalışılırken membran çıkışından ölçülen KOİ değerlerine göre arıtma verimi %97-98 arasında olmuştur. 233 - 235. günler arasında yük 44.95 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün'e çıkarılmış ve %97 civarında verim elde edilmiştir. 237 ile 240. günler arasında ise en yüksek hacimsel yükleme değerleri (53.6 kg KOİ/m<sup>3</sup>.gün) çalışılırken JLMBR sisteminden %97-98 KOİ arıtma verimi elde edilmiştir.



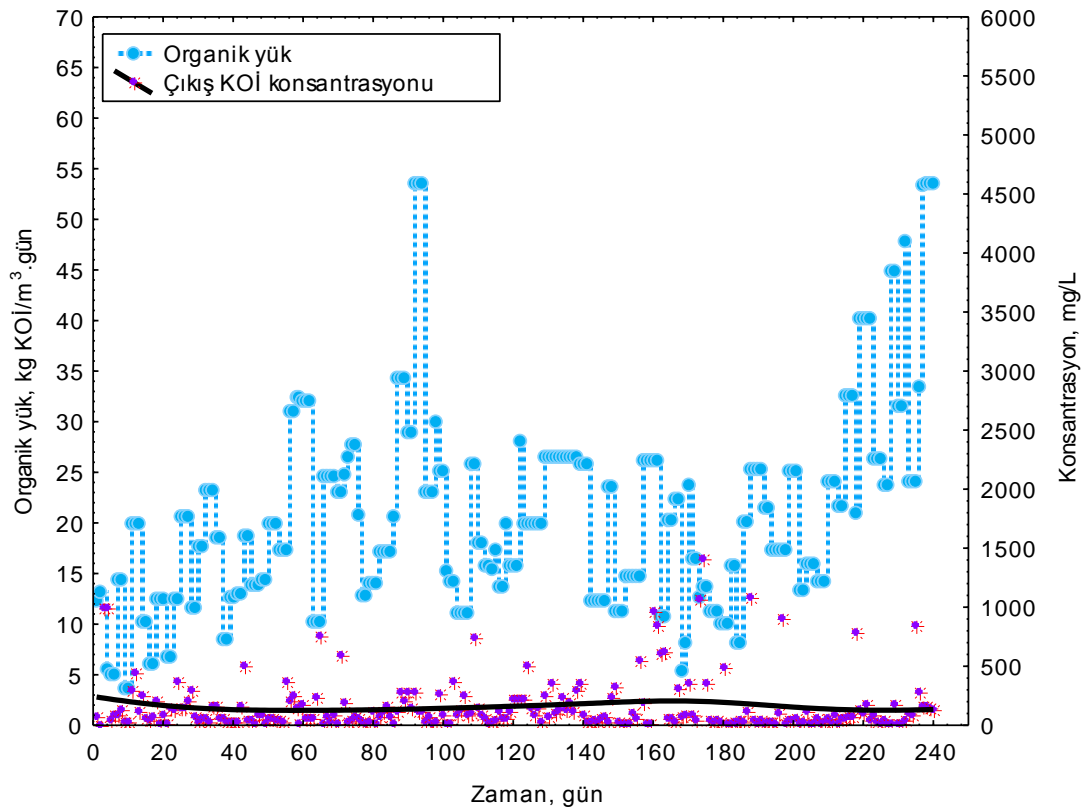


**Şekil 3.5:** KOİ yükleme değerleri ile arıtma veriminin değişimi ( $T=22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{\text{hava}}=600\text{L/sa}$ ,  $Q_{\text{Çapraz akış}}=600-4000\text{L/sa}$ )

Şekil 3.5'te de görüldüğü üzere sisteme verilen KOİ yükleri 5 - 54  $\text{kg/m}^3$ .gün değerleri arasında değişmiştir. Bu da sisteme verilen yüklemelerin oldukça salınım gösterdiğinin kanıtıdır. Yüklerdeki salınımlar alınan atıksuyun konsantrasyonundaki farklılıklardan ve besleme debisinin artırılıp azaltılmasından kaynaklanmaktadır. Yüklemelerde büyük salınımlar olmasına karşın, yüksek yüklerde dahi JLMBR sisteminden stabil çıkışlar alınabilmektedir. Sistem hemen hemen bütün şartlarda %94'ün üzerinde KOİ giderme verimi gerçekleştirmiştir.

Şekil 3.6'da çalışma süresince organik KOİ yüklemelerine karşı ölçülen KOİ çıkış konsantrasyonları gösterilmektedir. Çalışma boyunca çıkış konsantrasyonları genellikle 200  $\text{mg/L}$ 'nin altında ölçülmüştür. Son derece yüksek yüklemelerin yapıldığı 180 - 240. günler arasında bile membran çıkışından 50  $\text{mg/L}$  civarında KOİ

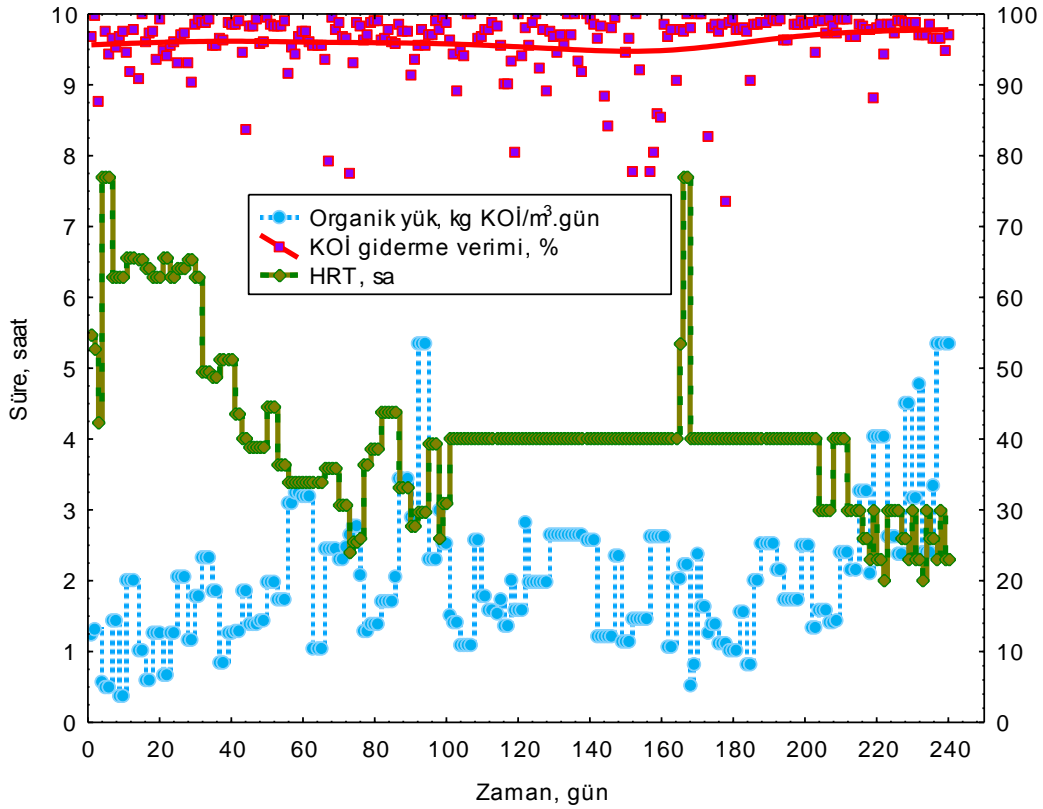
ölçülmüştür. Büyük yük dalgalanmalarında dahi sistemin son derece stabil tepki vermesi dikkat çekici bir noktadır. Yüksek giriş konsantrasyonlarının ve yüksek organik yüklemelerin olduğu dönemlerde sistem dengeye gelinceye kadar kısa sürede daha yüksek çıkış konsantrasyonları ölçülmüştür. Atıksuyun temin edildiği fabrikada zaman zaman uygun olmayan deterjanlar ve temizlik kimyasalları ile yerlerin ve ekipmanların yıkandığı tespiti yapılmıştır. Bu dönemlerde alınan atıksuların sistemde aşırı köpürmelere ve çamur kaybına neden olduğu gözlemlenmiş ve çıkış konsantrasyonlarında ani yükselmelere sebebiyet vermiştir. Bu dönemlerde atıksu alınan fabrikanın arıtma tesisinin de çöktüğü gözlemlenmiştir. JLMBR sistemi dengeye ulaştığı zaman son derece yüksek yüklerde dahi düşük çıkış konsantrasyonları vermiştir.



**Şekil 3.6:** Organik KOİ yükü ile çıkış KOİ konsantrasyonlarının değişimi ( $T=22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{\text{hava}}=600\text{L/sa}$ ,  $Q_{\text{Çapraz akış}}=600-4000\text{L/sa}$ )

### 3.3.3 Çamur yaşının ve hidrolik bekletme süresinin JLMBR'ün KOİ giderme performansına etkisi

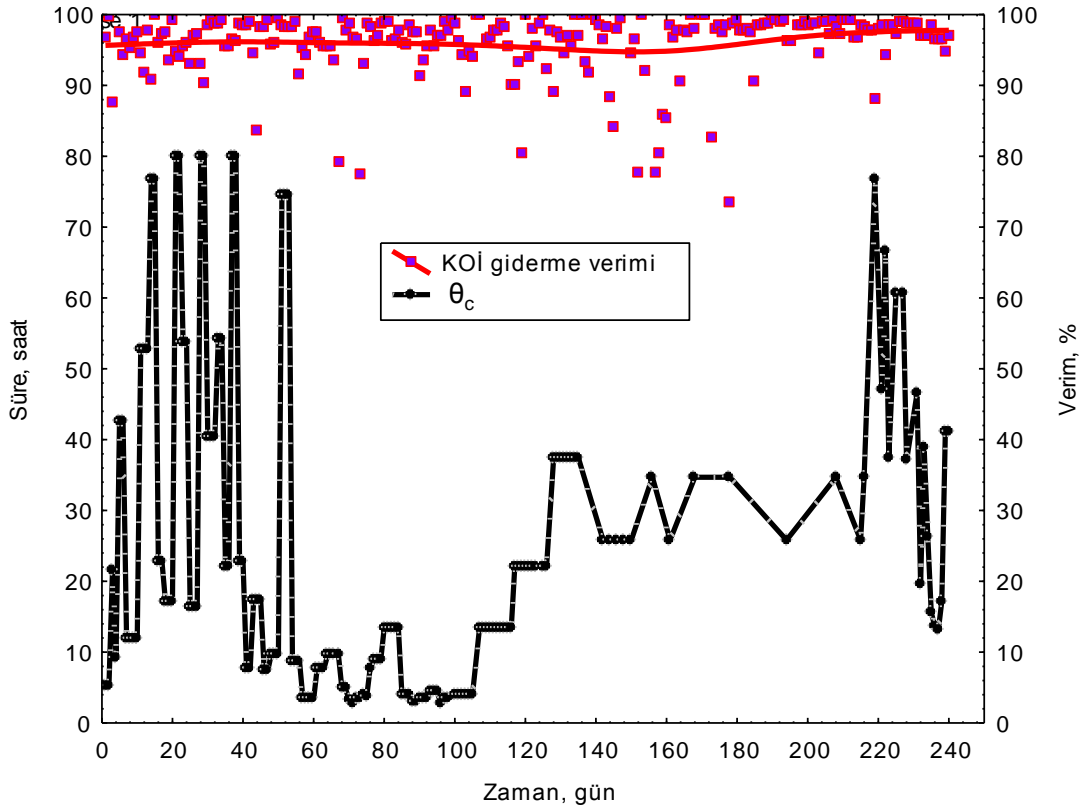
JLMBR'de uygulanan hidrolik kalış süreleri ( $\theta_h$ ) ve bu  $\theta_h$  değerleri için ölçülen çıkış suyu KOİ değerlerinin değişimi şekil 3.7'de gösterilmektedir. İşletme süresi boyunca  $\theta_h$  değerleri 2.3 - 7.7 saat arasında değiştirilmiştir.  $\theta_h$  değerleri sistem giriş suyu debisinin değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. JLMBR için  $\theta_h$  değerinin 3 kat küçültülmesinde bile KOİ giderimi açısından performansta dikkate değer bir bozulma gözlenmemiştir.  $\theta_h$  doğrudan sistem boyutlarını etkilediğinden deşarj limitlerini sağlayan bir artımı daha yüksek hız değerlerinde sağlayabilmek önemlidir.



Şekil 3.7: Hidrolik kalış sürelerinin KOİ arıtımına etkisi ( $T=22\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $Q_{\text{hava}}=600\text{L/sa}$ ,  $Q_{\text{Çapraz akış}}=600-4000\text{ L/sa}$ )

Çalışma periyodu boyunca sistemden 2.5 - 3.0 saatlik bekletme sürelerinde son derece yüksek performans alınmıştır. Yüklemelerin çok yüksek olduğu ( $>24 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{gün}$ ) şartlarda dahi bu süreler yeterli olmuştur. Sistemin hidrolik kalış süreleri üzerinde yüksek yük değerlerinden daha çok giriş atıksuyu konsantrasyonunun yüksek olması etkili olmuştur. Sistemin hidrolik olarak dengede kalabilmesi için giriş (besleme) debisinin çıkış (membran + atık çamur debisi) debilerine eşit olması gerekir. Bu çalışmada çıkış (deşarj) membrandan alınmıştır ve sıvı seviye sensorları kullanılarak reaktör seviyesi kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan JLMBR sisteminin çok daha küçük  $\theta_h$  değerlerinde de yüksek performans göstereceği kanaatine varılmıştır.

Biyolojik arıtım sistemlerinin işletilmesi ve tasarlanmasındaki en önemli parametrelerden birisi de çamur yaşıdır ( $\theta_c$ ). Çamur yaşının sayısal değeri arıtılan atık çamur ve sistemdeki biyokütlenin özelliklerine göre ayarlanmalıdır. Çalışmada farklı çamur yaşlarının çıkış suyunda KOİ giderimini ne şekilde etkileyeceği araştırılmış ve bulgular Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8:** Çamur yaşı ile KOİ giderme yüzdesinin değişimi ( $T=22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{\text{hava}}=600\text{L/sa}$ ,  $Q_{\text{Çapraz akış}}=600-4000\text{ L/sa}$ )

Çalışma sürecinde  $\theta_c$  değerleri 3 ile 80 saat arasında değiştirilmiştir. Çamur yaşı sistemden çekilen membran akısı ile doğrudan ilişkilidir. Yükleme hızı besleme debisi ile ayarlanmıştır. Besleme debisi ile membran çıkış debisi arasındaki fark kadar bir debi ile sistemden çamur atılmıştır. Dolayısıyla çamur yaşını belirleyen parametre bir anlamda membran akısı olmuştur. Proje denemelerinde çok yüksek  $\theta_c$  değerlerine çıkılmamıştır. Bunun yanı sıra 8 saat ve üzeri çamur yaşlarında her durumda yüksek bir performans elde edilmiştir. Sistemde istenilen seviyede yüksek biyokütle konsantrasyonuna ulaşabilmek için çamur yaşını da büyütme gerektiği anlaşılmıştır.

**Tablo 3.2:** Çalışmada kullanılan Jet Loop Membran Biyoreaktörün performans verileri

| Hacim (L) | Sıcaklık (°C) | KOİ (mg/L) | Verim % KOİ | Hidrolik Kalış Süresi (sa) | Organik Yük (gKOİ/L.gün) | $\theta_c$ (sa) |
|-----------|---------------|------------|-------------|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| 18        | 22 ± 2°C      | 4500       | 96-98       | 3.4                        | 33                       | 4               |
| 18        | 22 ± 2°C      | 4700       | 96-97       | 3.3                        | 34.3                     | 5               |
| 18        | 22 ± 2°C      | 6700       | 97-98       | 4                          | 40.3                     | 33              |
| 18        | 22 ± 2°C      | 4800       | 97-98       | 3                          | 45                       | 22              |
| 18        | 22 ± 2°C      | 6600       | 95-97       | 2.9                        | 53.6                     | 40              |
| 18        | 22 ± 2°C      | 5900       | 97-98       | 2.8                        | 53.1                     | 25              |

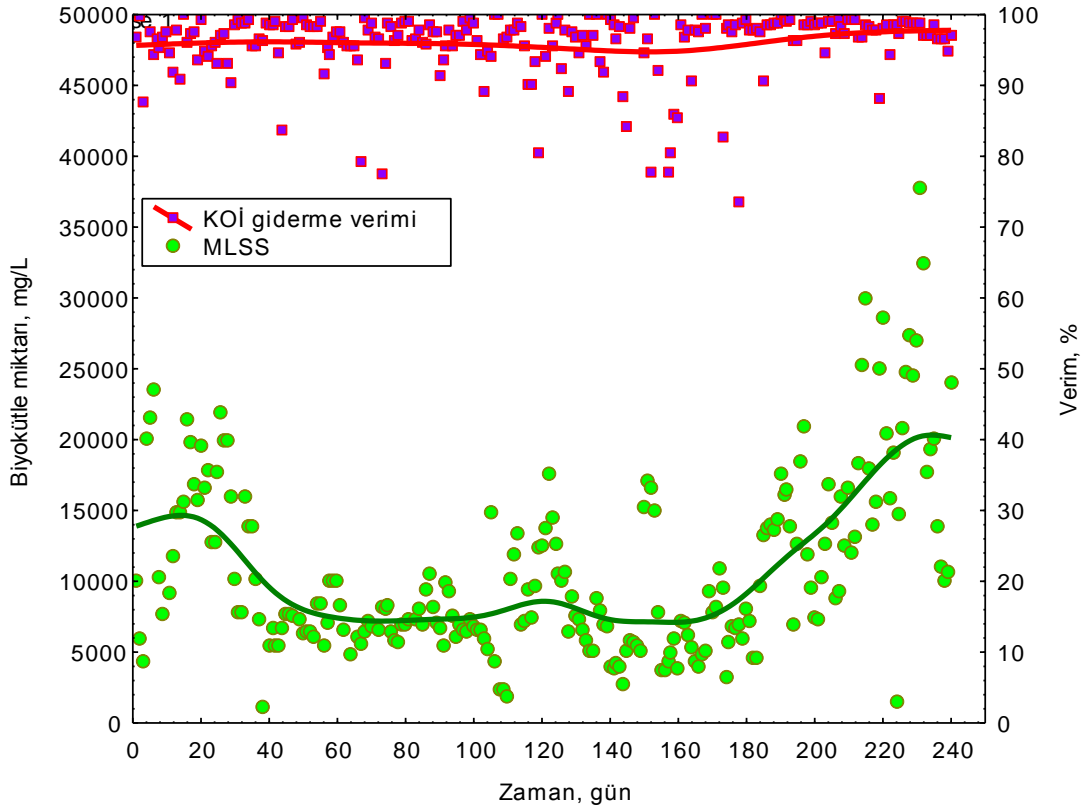
Tablo 3.2’de ise bu çalışmada elde edilen performans değerleri gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar aerobik biyolojik arıtım ile ilgili bilinen tüm sınırları aşmış durumdadır. Hatta organik yükleme hızı ve MLSS konsantrasyonunda ulaşılan değerler anaerobik arıtımın sınırlarını bile aşmış durumdadır. Çıkan sonuçların literatüre önemli bir katkı sağlayacağı kanaatine varılmıştır.

### 3.3.4 MLSS’nin KOİ giderme performansına etkisi

Jet loop biyoreaktör sistemlerinde yüksek çamur konsantrasyonlarına çıkılarak yüksek arıtım verimleri elde edilmektedir. Biyolojik atıksu arıtımında reaksiyon hızı her ne kadar biyokütlenin yaşlı ve genç oluşu gibi faktörlere bağlı olsa da biyokütle (MLSS) konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir [16]. Ancak klasik aktif çamur proseslerinde yeterli oksijenin temin edilememesi, çökelme sorunları ortaya çıkarması nedeniyle yüksek biyokütle konsantrasyonlarına çıkılamaz [44]. Şekil 3.9’da JLMBR sisteminde çalışma boyunca ölçülen MLSS konsantrasyonları gösterilmektedir. Denemeler sırasında MLSS konsantrasyonu 1700 ile 38000 mg/L arasında değişmiştir. MLSS konsantrasyonlarındaki değişimler genellikle bekletme

süresi, çamur yaşı ve hacimsel yüklere bağlı olarak değişmekle beraber aşırı köpürmelerin olduğu dönemlerde aktif çamur kayıpları da etkili olmuştur. Klasik aktif çamur sistemlerinde çamur konsantrasyonu sistemin toplam verimini etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Çamur konsantrasyonu arıtma verimleri ve giderim hızlarını doğrudan etkilemektedir ve yüksek verim için yüksek çamur konsantrasyonu istenen bir sonuçtur. Meydana gelen yüksek sirkülasyondan dolayı jet loop biyoreaktörde flok yapıları parçalanarak sistem içerisine dağılmaktadır. Bununla beraber biyoreaktörün yüksek oksijen transfer kapasitesi nedeniyle sistemde yüksek biyokütle konsantrasyonları için gerekli oksijen rahatlıkla temin edilebilmektedir. Bu sonuç biyoreaktörde çok yüksek MLSS konsantrasyonlarına çıkılabilmemesine ve böylece yüksek organik yüklerin etkili bir şekilde arıtılabilmemesine imkan tanımaktadır. Sistemde çamur yaşı arttırılarak çok yüksek MLSS değerlerine ulaşılabilmektedir. Sonuç olarak bu sistemde çözünmüş oksijen reaktörde homojen olarak dağılmakta ve ölü bölgeler meydana gelmemektedir.

JLMBR sisteminden yüksek MLSS konsantrasyonlarının elde edilmesinde jet loop biyoreaktörlerin topolojisinden kaynaklanan yüksek kütle transferi özelliklerinin yanı sıra seramik membran modülünün de katkısı büyük olmuştur. Jet loop biyoreaktörlerde flok boyutunun küçülmesi etkin yüzey alanının ve böylece kütle transferinin artmasına neden olmaktadır. Elde edilen küçük boyutlu floklar jet loop reaktörlerin yüksek yüklerde etkili bir arıtım gerçekleştirmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Diğer taraftan flok boyutunun küçülmesi çamur çökmesinde sorunlar yaratmaktadır [45]. Seramik membran modülü sayesinde biyokütle kaçığı olmaksızın sistem işletilebilmiştir. Klasik çökeltme sistemleri ile bu kadar yüksek biyokütle tutabilmenin imkânı yoktur. Öte yandan konvansiyonel aerobik arıtım sistemlerine membran modülü bağlanıp yüksek biyokütle konsantrasyonlarına ulaşılsa dahi, artan yüklemelere bağlı olarak artış gösteren oksijen ihtiyacını karşılamak mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada kullanılan JLBR'deki kütle transfer katsayısının, harcanan güce bağlı olarak klasik havalandırıcı cihazlardan 25 - 125 kat daha fazla olması sayesinde biyokütlenin oksijen ihtiyacı hızlı ve etkin bir biçimde karşılanabilmiştir.



**Şekil 3.9:** MLSS konsantrasyonu ile KOİ giderme veriminin ilişkisi ( $T=22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{\text{hava}}=600\text{L/sa}$ ,  $Q_{\text{Çapraz akış}}=600\text{-}4000\text{L/sa}$ )

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi yüksek çamur konsantrasyonlarında yüksek arıtım verimleri elde edilmiştir. Temin edilen yüksek biyokütle konsantrasyonu reaktör hacminde azalmaya neden olmaktadır.

### 3.3.5 Jet Loop Membran Biyoreaktör’ün Azotlu ve Fosforlu Madde Giderim Performansı

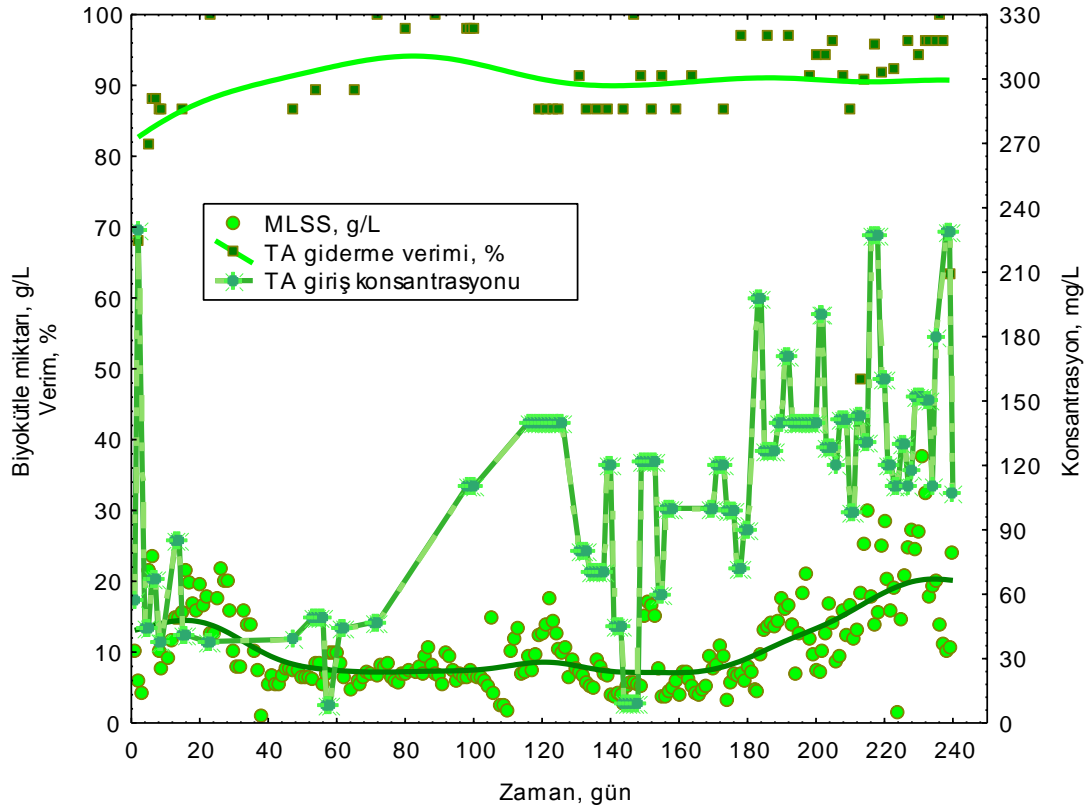
Süt endüstrisinde ve özellikle peynir üretiminde işlenen sütbaşına üretilen ortalama atıksu miktarı  $2.43 - 3.14\text{ m}^3\text{atıksu/ton}$  işlenen süt olarak gerçekleşmektedir [46]. Peyniraltı suları ise toplam süt endüstrisi atık sularının miktar olarak az bir hacmini teşkil etmesine karşın çok daha fazla kirlilik yüküne sahip atık sularlardır. Peyniraltı sularında bulunan toplam azotun (TA) orijini ham sütün yapısındaki organik olarak bağlı azottan (proteinler gibi) ve bu amino gruplarının amonyum



formuna dönüşmesinden gelmektedir. Ham sütün sahip olduğu 7200 mg/L TA'nın yaklaşık %6-15'i peyniraltı suyuna geçmektedir.

Bu çalışmada sütün endüstrisi atıksularından KOİ giderimi amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra JLMBR'de N ve P giderim performansı da araştırılmıştır. Şekil 3.10'da çalışma boyunca sistemden ölçülen TA giriş değerlerine karşı TA giderme verimleri gösterilmektedir.

Sisteme beslenen Azotlu madde (TA) konsantrasyonu 8 - 230 mg/L arasında değişirken JLMBR sisteminden elde edilen giderme verimi %65-100 arasında gerçekleşmiştir. Biyolojik olarak TA gideriminin iki aşamada gerçekleştiği bilinen bir durumdur. Bu aşamalar amonyumun nitrat dönüştüğü nitrifikasyon aşaması ve sonra da nitratın azot gazına dönüştüğü denitrifikasyon aşamasıdır. Sistemde gerçekleşen toplam azot arıtımında etkin mekanizmanın mikroorganizmaların azotlu maddeyi asimilasyon için kullanması olarak düşünülmektedir. Yüksek oksijen transfer kapasitesi ve oldukça homojen ve etkili karışım yeteneğine sahip jet loop biyoreaktör bu özelliği ile yüksek biyokütle konsantrasyonlarında çalışmaya imkân tanımıştır. Öte yandan membran ünitesinin de kullanımıyla jet loop biyoreaktörde çok yüksek biyokütle konsantrasyonlarına çıkılabilmektedir. Mikroorganizmalar kimyasal yapılarında bulunan oranlarda nütrientlere (N, P, S, gibi) gereksinim duymaktadırlar. Dolayısıyla yüksek mikroorganizma konsantrasyonunun da yüksek nütrient ihtiyacı bulunmaktadır. Bu nedenle sisteme verilen azotlu maddenin büyük oranının mikroorganizmalar tarafından asimile edilerek bertaraf edildiği kanaatine varılmıştır.



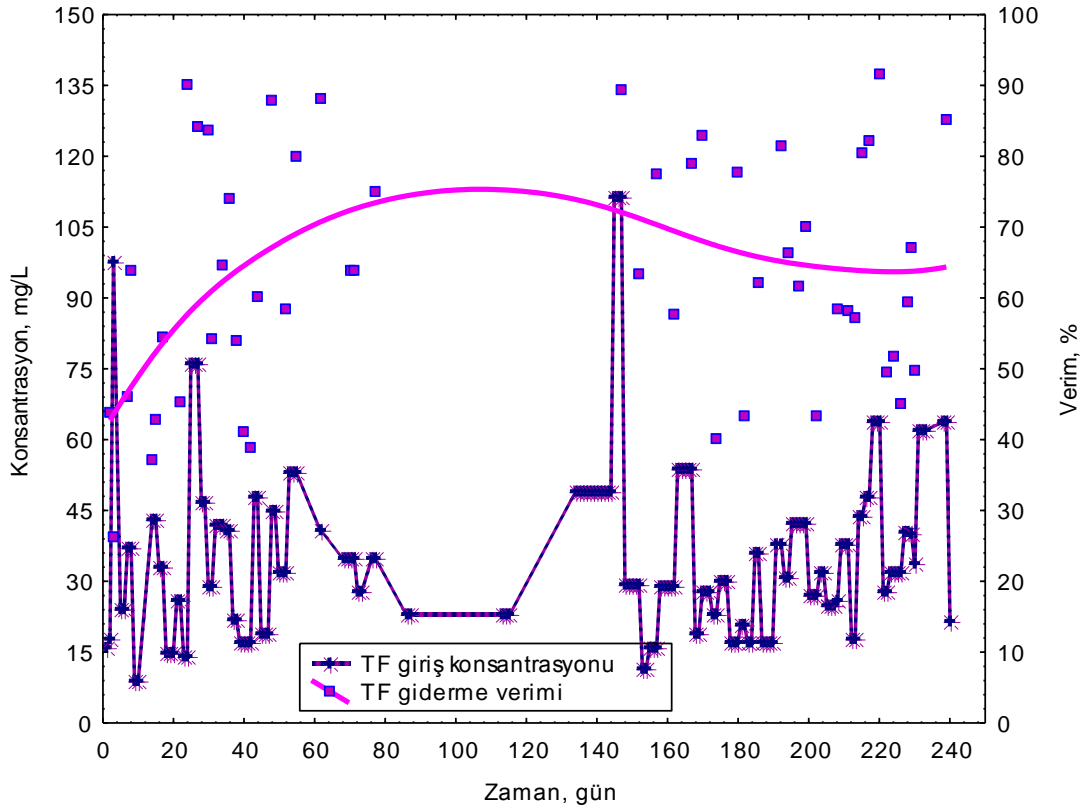
**Şekil 3.10:** TA giderme verimlerinin TA giriş konsantrasyonu ve MLSS ile değişimi  
( $T=22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{\text{hava}}=600\text{L/sa}$ ,  $Q_{\text{Çapraz akış}}=600\text{-}4000\text{ L/sa}$ )

TA gideriminde etkili bir diğer mekanizmanın ise azotlu maddenin yoğun biyokütle tarafından adsorplanması olarak düşünülmektedir. Biyoreaktördeki yüksek MLSS konsantrasyonu ve meydana gelen dağınık ve büyük yüzey alanına sahip flok yapısı nedeniyle azotlu maddenin bir bölümünün biyokütle tarafından adsorplanarak ve flok yapısında tutularak giderildiği düşünülmektedir. Adsorplanan azotlu madde, membran ünitesi yardımıyla tam bir katı-sıvı ayırımı yapılabildiğinden, çıkış suyundan yüksek verimde giderilmektedir. Bu anlamda TA gideriminde membran ünitesinin katkısının da önemli olduğu kesin bir sonuçtur.

Çalışma boyunca sisteme 9 - 111 mg/L arasında toplam fosfor (TF) verilmiştir. Atıksuyun TF içeriği yıkama sularının denk gelme olasılığına karşın yüksek veya düşük olmuştur. Fosfor bileşikleri atık sularda ortofosfat, polifosfat ve organik fosfor şeklinde bulunmaktadır. Bu üç tip fosfor bileşiğinden arıtılması en

kolay olan ortofosfat bileşimidir. Polifosfat hidroliz yoluyla, organik fosfor ise bakteriyel parçalanma ile ortofosfata dönüştürülür. Klasik ikincil biyolojik arıtma sistemlerinde mikroorganizmalar BOİ giderimi esnasında biyokütle sentezi için fosfor kullanarak kısmen fosfor giderimi de gerçekleştirebilmektedir. Mikrobiyal katıların tipik fosfor içeriği kuru ağırlığının %1.5 - 2 sine tekabül etmektedir. Dolayısıyla fazla biyokütle atımı (atık çamur) ile BOİ/Fosfor oranına, sistem  $\theta_c$ 'ye ve çamur işleme tekniklerine bağlı olarak toplam fosforun %10 - 30'u giderilmiş olmaktadır [47]. İleri biyolojik fosfor arıtımı gerçekleştirmek için biyoreaktörün anaerobik ve aerobik kompartımanlara bölünmesi gerekmektedir. Şekil 3.11'de ise zamanla TF çıkış konsantrasyonlarının giriş konsantrasyonu ile değişimi gösterilmektedir.

Çalışmada TF arıtımı amaçlanmamasına karşın sistemin doğasından kaynaklanan, kendiliğinden bir biyolojik TF giderimi meydana gelmiştir. Esasen karbonlu madde giderimi sırasında %30'a kadar varan bir biyolojik fosfor arıtımının gerçekleştirilebildiği bilinmektedir. Ancak çalışmada %37 ile %82 arasında değişen bazen %95'lerde ölçülen giderme verimleri elde edilmiştir. Çoğunlukla sistemden %70'in üzerinde arıtma verimi sağlanmıştır.



**Şekil 3.11:** TF giderme veriminin TF giriş konsantrasyonu ile değişimi ( $T=22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{\text{hava}}=600\text{L/sa}$ ,  $Q_{\text{Çapraz akış}}=600-4000\text{L/sa}$ )

Sistemde tutulan biyokütle konsantrasyonu son derece yüksek olduğundan bakteriyolojik asimilasyonda klasik sistemlerden daha yüksek miktarda  $\text{PO}_4^{3-}$  kullanılmaktadır. Şekil 3.10 ve 3.11 birlikte incelenirse TF girişi arttıkça MLSS konsantrasyonunun da arttığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar TF gideriminin TA'daki gibi asimilasyonla olduğu tezini kuvvetlendirmektedir. Buna ek olarak ortamda uçucu yağ asitlerinin bulunmasının  $\text{PO}_4^{3-}$  giderimini artırıcı etkiye bulunduğu literatürde kanıtlanan bir gerçektir [46]. Peyniraltı sularında da peynir üretimi sırasında fermantasyondan dolayı yüksek konsantrasyonlarda uçucu yağ asitleri bulunmaktadır. Ayrıca ortamda K ve Mg iyonlarının bulunması biyolojik fosfor giderimini artırıcı etki yapmaktadır [46]. Peyniraltı sularında K, Mg iyonları da (Ca, Na, Co, Al, Mn, Ni, Cu, Fe gibi mineraller de) fazla miktarda bulunmaktadır. Peyniraltı sularının hem yüksek miktarda uçucu yağ asitleri hem de K ve Mg mineralleri içermesinin yüksek TF giderme verimlerinin elde edilmesinde etkili olduğu düşünülmektedir. Reaktördeki yüksek MLSS konsantrasyonu fosfatın çamur

tarafından absorplanmasına neden olarak membran tarafından tutulmasına imkan sağlanmıştır. Bu etkilerin yüksek verimde fosfat giderimi elde edilmesini sağladığı düşünülmektedir.

### 3.3.6 Sürekli modda çalıştırılan JLMBR'ün kinetik katsayıları

Sürekli modda çalıştırılan JLMBR kinetik katsayılarını hesaplayabilmek için Monod Kinetiği benimsenmiştir. Monod Kinetiğine ait denklemler aşağıda verilmiştir.

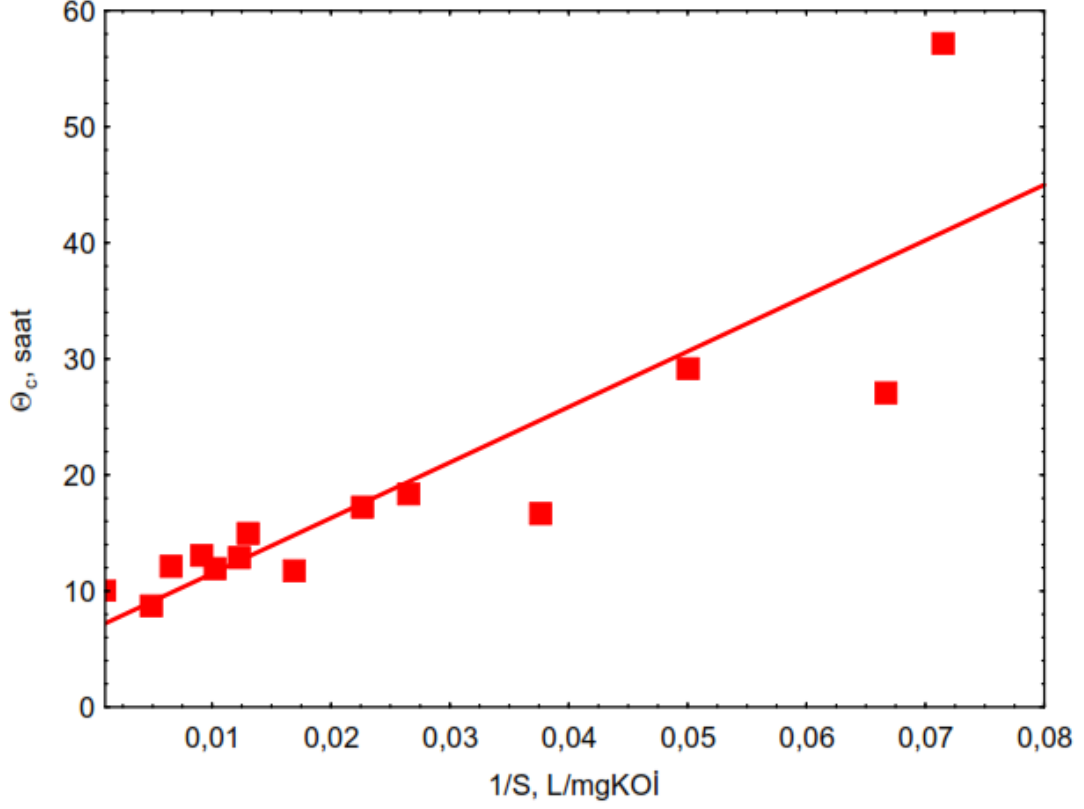
$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_S + S} \quad (3.2)$$

$$Y_{X/S} = \frac{dX}{dS} \quad (3.3)$$

$$\theta_c = \mu^{-1} = \frac{K_S}{\mu_{max}} \cdot \frac{1}{S} + \frac{1}{\mu_{max}} \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu = Yr - b \quad (3.5)$$

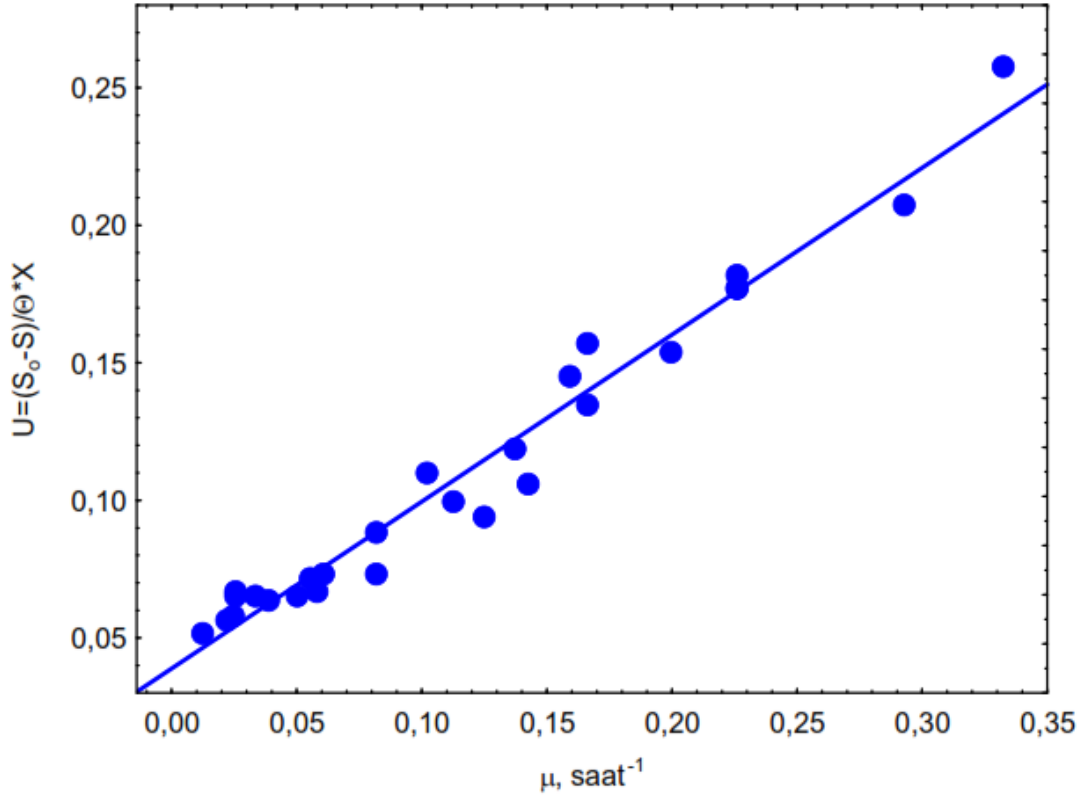
Her bir yükleme koşulunun dengeye gelmesinin ardından toplanan deneysel dataların değerlendirilmesi sonucunda spesifik büyüme hızının ( $\mu$ ) çıkış substrat konsantrasyonunun ( $S$ ) bir fonksiyonu olarak değişimi Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.12:**  $\mu_{max}$  ve  $K_s$  kinetik katsayılarının belirlenmesi ( $T=22\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $MLSS=16228$  mg/L)

Şekil 3.12’de doğrunun kesim noktasında  $\frac{1}{\mu_{max}}$  değeri, eğimden ise  $\frac{K_s}{\mu_{max}}$  hesaplanmıştır. Buna göre  $\mu_{max}$  ve  $K_s$  değerleri sırasıyla  $0.149 \text{ saat}^{-1}$  ve  $73 \text{ mg/L}$  olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde substrat dönüşüm oranı ( $Y$ ) ve endojen bozunma ( $b$ ) katsayıları aşağıdaki ifade kullanılarak bulunmuştur.

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{Y \cdot (S_0 - S)}{\theta \cdot X} - b \quad (3.6)$$

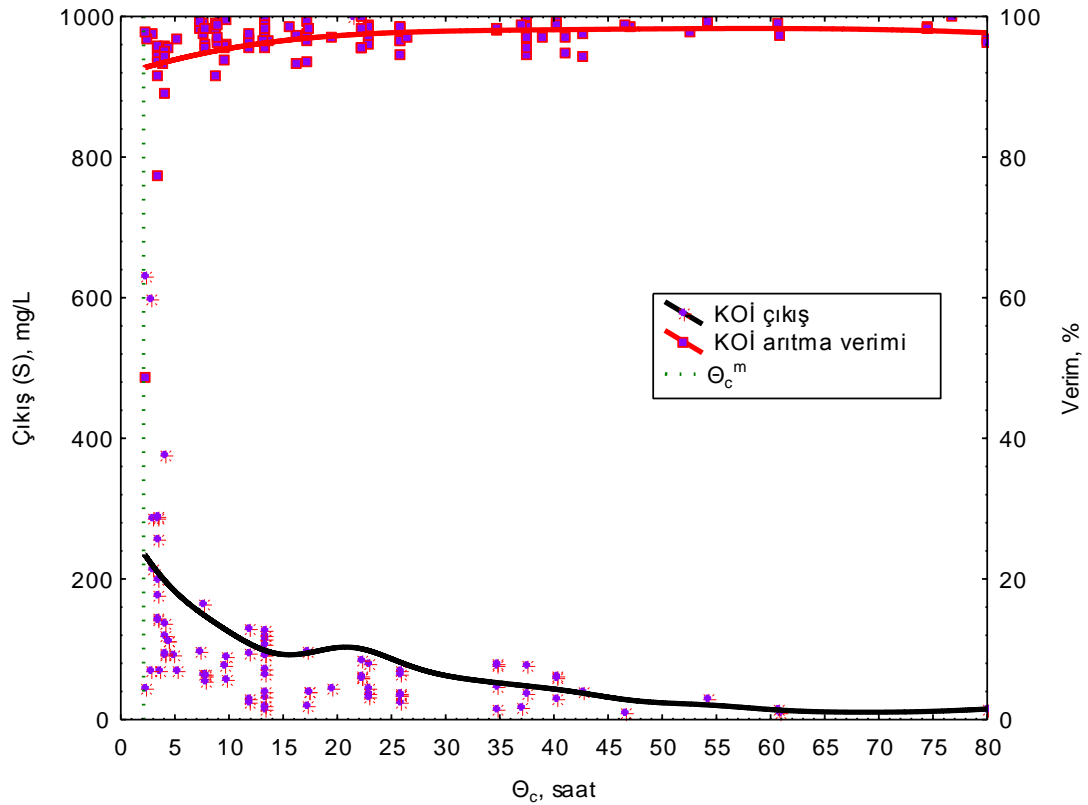


**Şekil 3.13:** Y ve b kinetik katsayılarının bulunması (T=22±2°C, MLSS=16228 mg/L)

Burada kesim noktası b katsayısına, eğim ise Y oranına eşittir. Şekil 3.13'ten bulunan b ve Y katsayıları sırasıyla 0.0038 saat<sup>-1</sup> ve 0.607 kg VSS/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3.3:** Çeşitli atıksular için biyokinetik katsayılar [48]

| Atıksu çeşidi        | Arıtma şekli | $\mu_{\max}$ (saat <sup>-1</sup> ) | $K_S$ (g/L) | b (saat <sup>-1</sup> ) | Y           | $\theta_c^m$ (saat) | Katsayıya esas parametre |
|----------------------|--------------|------------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|---------------------|--------------------------|
| Evsel kanalizasyon   | Aktif çamur  | 0.100                              | 0.035       | 0.0025                  | 0.30        | -                   | ağırlık                  |
| Kentsel kanalizasyon | Aktif çamur  | -                                  | 0.025-1     | 0.002 – 0.0042          | 0.35 – 0.45 | 6.85 – 11.7         | KOİ                      |
| Sentetik             | Jet loop     | 0.125                              | 0.080       | 0.0028                  | 0.44        | 7.02                | BOİ <sub>5</sub>         |
| Endüstriyel          | Jet loop     | -                                  | 0.145       | 0                       | 0.40        | 7                   | KOİ                      |
| Sentetik             | Jet loop     | 0.135                              | 0.178       | 0.002                   | 0.535       | 7,2                 | KOİ                      |
| Bu çalışma           | Jet loop     | 0.149                              | 0.073       | 0.0038                  | 0.607       | 2                   | KOİ                      |



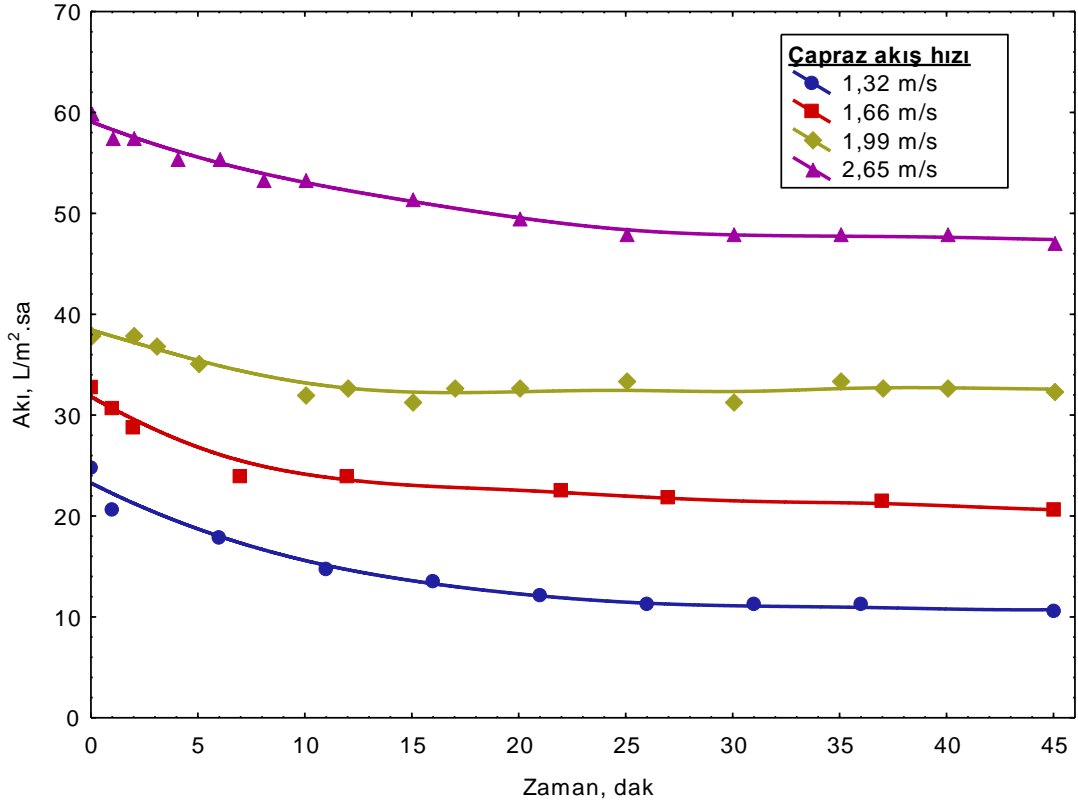
**Şekil 3.14:** Çamur yaşı, çıkış suyu KOİ konsantrasyonu ve KOİ giderme verimi arasındaki ilişki ( $T=22\pm 2^\circ\text{C}$ )



Şekil 3.14'te JLMBR'ün çıkış suyu KOİ konsantrasyonları ve KOİ giderme verimi sistemin çamur yaşına göre değerlendirilmiş ve sistemin minimum çamur yaşı ( $\theta_c^m$ ) değeri 2 saat olarak hesaplanmıştır. Eğer sistem kritik çamur yaşı değerlerinin altındaki  $\theta_c$  değerlerinde çalıştırılırsa, sistemdeki mikroorganizmaların üreme hızlarından daha yüksek bir hızda sistemden atılmaları söz konusu olmaktadır. "Sistemin yıkanması" olarak da adlandırılan bu olay sonucunda reaktördeki mikroorganizma konsantrasyonunda azalma meydana gelmektedir.

### 3.3.7 JLMBR membran filtrasyonu özellikleri

Son yıllarda özellikle üretim maliyetlerinin düşmesine bağlı olarak seramik membranlar arıtım endüstrisinde kullanılmaya başlamıştır. Bu tip membranların daha uzun süre kullanılabilmesi, temizlenmelerinin kolay olması, sıcaklık, kimyasallar ve aşınmaya karşı daha dirençli olmaları başlıca avantajları arasındadır. Çalışmanın bu kısmında Jiangsu Jiuwu Hitech Co. Ltd. firmasından temin edilen, 1 m uzunluğundaki silindirik yapılı, 0,1  $\mu\text{m}$  por çapında olan ve 0.24  $\text{m}^2$  yüzey alanına sahip seramik membran modülü kullanılmıştır. Jetloop biyoreaktörde oluşturulan biyokütlenin çıkış suyundan ayrılmasında kullanılan ultrafiltrasyon (UF) ünitesinin filtrasyon karakteristikleri incelenmiştir. Bu amaçla akıların zamanla azalmasına membran giriş debisi etkisi hesaplanmış ve elde edilen sonuçların bir kısmı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.15:** Membrandan elde edilen akıların çapraz akış hızı ve zaman ile değişimi ( $\Delta P=2\text{bar}$ ,  $T=22\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ )

Biyoreaktör içerisinde artan süspanse katı madde konsantrasyonu (MLSS) membran yüzeyine biriken ve kek oluşumuna neden olan tabakanın kalınlığını artırarak membrandan geçen akıların azalmasına neden olmuştur. Şekil 3.15'ten de anlaşılacağı gibi membran giriş debisi arttırıldığında kesme kuvveti arttırılmış olur. Kesme kuvvetinin artması ise kek tabakasının daha fazla ve hızlı bir biçimde süpürülmesini sağlar. Bu sebepten de yüksek membran giriş debilerinde yüksek akı miktarları elde edilmektedir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

- 1- Jet loop reaktörler ile klasik sistemlerden 25 – 100 kat daha yüksek  $K_{La}$  sağlanabilmektedir. Çalışmada işletme parametrelerine bağlı olarak 101 – 280  $sa^{-1}$  arasında değişen  $K_{La}$  değerleri elde edilmiştir.
- 2- Bir süt fabrikasından alınan atıksuyun deşarj kirlilik parametrelerine göre karakterizasyonu yapılmıştır. Analizler sonucunda KOİ konsantrasyonu 922 – 9004 mg/L, TA 8 – 230 mg/L, TF 9 – 112 mg/L olarak tespit edilmiştir. Atıksuyun ÇKOİ/BOİ oranı 0.76 ve ÇKOİ/TKOİ oranı 0.85 olarak tespit edilmiştir. ÇKOİ/TA oranı ise 35.06 olarak belirlenmiştir. Yapılan karakterizasyon süt endüstrisi atıksularının alıcı ortamlar için tahrip edici bir kirlenici olduğunu göstermiştir. Yine bu çalışma süt endüstrisi atıksularının biyolojik olarak yüksek oranda arıtılabilir olduğunu göstermiştir.
- 3- Atıksuyun biyolojik arıtımı esnasında yükleme hızları artırıldıkça reaktörde köpürme gözlenmiş ve biyokütle alışınca köpürme geçmiştir. Biyoreaktörün iç çeperinde ve alt bölgesinde, ara sirkülasyon tankında, soğutucunun çevresinde ve emme tüpünün dış çeperinde yoğun biyofilm oluşumu görülmüştür. Kalınlaşan biyofilm tabakasının renginin koyu kahverengi ve yer yer siyahlaştığı gözlemlenmiştir. Daha sonra biyofilm tabakalarında kopmalar olmuş ve kopan biyofilm parçaları sirkülasyona karışmıştır.
- 4- JLMBR sisteminde oldukça yüksek arıtım performansı elde edilmiştir. Sistemden 34.3 kgKOİ/m<sup>3</sup>.gün yük (KOİ giriş değeri 4700 mg/L) ve 3.3 saat hidrolik bekletme süresinde %97 arıtma verimi elde edilmiştir. Yine bu çalışmada 53.6 kgKOİ/m<sup>3</sup>.gün organik yük altında (giriş KOİ konsantrasyonu 6600 mg/L) 3 saat bekletme süresinde %97 gibi çok yüksek bir verimde atıksu

arıtılmıştır. Elde edilen bu çok yüksek performans değerleri literatüre önemli katkılar sağlayacak özelliğindedir.

- 5- JLMBR sisteminde asimilatif kaynaklı olarak yüksek oranlarda toplam azot (%65–100 arasında değişen) ve toplam fosfor (%37 ile %85 arasında) giderimi sağlanmıştır.
- 6- Çalışma süresince çözünmüş oksijen konsantrasyonu genellikle 2.5 mg/L'nin üstünde ölçülmüştür. Yüksek yüklemelerde ÇO konsantrasyonu 1.1 - 1.2 mg/L'ye kadar düşmüş ancak bu şartlarda dahi performans olumsuz etkilenmemiştir. Çünkü JLBK son derece yüksek oksijen transferi sağlamakta ve reaktördeki akım şartlarından dolayı da oldukça homojen bir içerik oluşmaktadır. Bir başka deyişle harcanan kadar oksijen sisteme sağlanabilmiştir.
- 7- Sürekli çalışmalarda  $\mu$  ve S (substrat konsantrasyonu) arasındaki ilgiyi ortaya koyabilmek için Monod Kinetiği benimsenmiş ve bu modele ait katsayılar olan  $\mu_{\max} = 0.149 \text{ sa}^{-1}$ ,  $K = 73 \text{ mg/L}$ ,  $Y = 0.607$  ve  $b = 0.0038 \text{ sa}^{-1}$  değerleri hesaplanmıştır.  $\theta_c^m \leq 2 \text{ sa}$  olduğu düşünülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] Vogelpohl, A., “Wastewater treatment by the HCR-Process”, *Acta. Biotechnol.*, 20:119-128, (2000).
- [2] Akbayır, E., “Jet Loop Reaktörler ve Atıksu Arıtımında Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çevre Mühendisliği ABD, Erzurum, (2007).
- [3] Gagnon, H., “Power Consumption and Mass Transfer in Agitated Gas- Liquid Columns - A Comparative Study”, *National Library of Canada*, 45, (1998).
- [4] Hatzikioseyan, A., Remoundaki, E., Bioreactors for metal bearing wastewater treatment [online]. (11-07-2012), [http://www.metal.ntua.gr/~pkousi/e-learning/bioreactors/page\\_10.htm](http://www.metal.ntua.gr/~pkousi/e-learning/bioreactors/page_10.htm)
- [5] Verlaan, P., Vos, J-C., Riet, V.K., “Hydrodynamics of the flow transition from abubble column to an airlift-loop reactor”, *J. Chem. Tech. Biotechnology*, 45, 109-121, (1989).
- [6] Chisti, Y. and Moo-Young, M., “Improve the performance of air reactors”, *Chem.Eng. Progress*, 89 (7), 38-45, (1993).
- [7] Pironti, F.F., Medina, V.R., Calvo, R., Saez, A.E., “Effect of draft tube position on the hydrodynamics of a draft tube slurry bubble column”, *The Chemical Engineering Journal*, 60, 155-160, (1995).
- [8] Hatzikioseyan, A., Remoundaki, E., Bioreactors for metal bearing wastewater treatment [online]. (11-07-2012), [http://www.metal.ntua.gr/~pkousi/e-learning/bioreactors/page\\_11.htm](http://www.metal.ntua.gr/~pkousi/e-learning/bioreactors/page_11.htm)
- [9] Blenke, H., “Biochemical loop reactors”, *Biotechnology: Fundamentals of biochemical engineering*, Verlagsgesellschaft mbH, 2, 466-517, (1985).
- [10] Vogelpohl, A., Wachmann, U., “Hydrodynamics of jet-driven loop reactors”, *Chem Ingen Technik*, 59, 510-1, (1987).

- [11] Bloor, J.C., Anderson, G.K., Willey, A.R., "High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor", *Water Res.*, 29, 1217-23, (1995).
- [12] Atay, I., Gordon, L., Trattner, R., "Fluid flow and gas absorption in an enjector venturi scrubber", *Environ. Prog.*, 6:198-203, (1987).
- [13] Velan, M., Ramanujam, T.K., "Gas-liquid mass transfer in a down flow jet loop reactor", *Chem. Eng. Science*, 47:2871-2876, (1992).
- [14] Gaddis, E.S., Vogelpohl, A., "The impinging-steam reactor: a high performance loop reactor for mass transfer controlled chemical reactions", *Chem. Eng. Science*, 47: 2877-2882, (1992).
- [15] Prasad, K.Y., Ramanujam, T.K., "Enhancement of gas-liquid mass transfer in a modified reversed flow jet loop reactor with tree phase system", *Chem. Eng. Science*, 2997-3000, (1995).
- [16] Prasad, K.Y., Ramanujam, T.K., "Gas holdup and overall volumetric mass transfer reversed flow jet loop reactor", *The Canadian Journal Of Chemical Engineering*, 73: 190-195, (1995).
- [17] Wachsmann, U., Rabiger, N., Vogelpohl, A., "The compact reactor - a newly developed loop reactor with a high mass transfer performance", *Ger. Chem. Eng.*, 8: 411-418, (1984).
- [18] Dirix, C.A.M.C., Van der Wiele, K., "Mass transfer in jet loop reactors", *Chem. Eng. Science*, 45: 2333-2340, (1990).
- [19] Bitton, G., "Wastewater Microbiology", Third Edition, *John Wiley & Sons, Inc.*, s. 225, (2005).
- [20] Tchobanoglous, G. And Burton, F.L., "Wastewater Engineering", Third Edition, *McGraw-Hill Inc.*, 1315, (1991).
- [21] Lübbecke, S., Vogelpohl, A., Dewjanin, W., "Wastewater treatment in a biological high performance system with high biomass concentration", *Water Res.*, 29(3), 793-802, (1995).

- [22] Loeb, S., Sourirajan, R., "Seawater demineralisation by means of an osmotic membrane", *Advances in Chemistry Series*, 38: 117, (1963).
- [23] Li, K., "Ceramic Membranes for Separation and Reaction", *John Wiley and Sons Ltd.*, s. 4-1, (2007).
- [24] Judd, S. and Jefferson B., "Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use", *Elsevier Ltd.*, s. 7-14, (2003).
- [25] Judd, S.J., "The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment", *Elsevier*, Oxford, (2006).
- [26] Zhang, B., Yamamoto, K., Ohgaki, S., and Kamiko, N., "Floc size distribution and bacterial activities in membrane separation activated sludge processes for small-scale wastewater treatment/reclamation", *Water Sci. Technol.*, 35(6), 37-44, (1997).
- [27] Chaize, S., Huyard, A., "Membrane bioreactor on domestic wastewater treatment sludge production and modeling approach", *Water Sci. Technol.*, 23, 1591-1600, (1991).
- [28] Praderie, M., "Contribution a l'étude du traitement des eaux Résiduaire Urbaines par boues actives a' membrane immergées", Doctoral dissertation, *INP Toulouse*, France, (1996).
- [29] Parameshwaran, K., "Membrane as air diffuser and solid/liquid separator in a bioreactor treating domestic wastewater", Master's Thesis, *Asian Institute of Technology*, Bangkok, Thailand, (1997).
- [30] Erikson, L., Steen, I., and Tendaj, M., "Evaluation of sludge properties at an activated sludge plant", *Water Sci. Technol.*, 30(12), 251-265, (1992).
- [31] Pouet, M-F., Grasmick, A., Homer, G., Nauleau, F., and Cornier, J. C., "Tertiary treatment of urban wastewater by cross-flow microfiltration", *Water Sci. Technol.*, 30(4), 133-139, (1994).
- [32] Langlais, B., Denis, Ph., Triballeau, S., Faivre, M., and Bourbigot, M. M., "Test on microfiltration as a tertiary treatment downstream of fixed bacteria filtration", *Water Sci. Technol.*, 25(10), 219-230, (1992).

- [33] Kolega, M., Gorhmann, G. S., Chiew, R. F., and Day, A. W., “Disinfection and clarification of treated sewage by advanced microfiltration”, *Water Sci. Technol.*, 23, 1609-1618, (1991).
- [34] Visvanathan, C., Ben Aim, R., Parameshwaran, K., “Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment”, *Critical Reviews in Environmental Sci. And Technol.*, 30(1), 1-48, (2000).
- [35] Magara, Y., and Itoh, M., “The effect of operational factors on solid/liquid separation by ultra-membrane filtration in a biological denitrification system for collected human excreta treatment plants”, *Water Sci. Technol.*, 23, 1583-1590, (1991).
- [36] Fane, A. G., Fell, C. J. D., Hodgson, P. H., Leslie, G., and Marshall, K. C., “Microfiltration of biomass and biofluids: effects of membrane morphology and operating conditions”, *Proc. of the Vth World Filtration Congress*, Nice, France, 320-329, (1989).
- [37] T. Wintgens et al., “Modelling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment”, *Journal of Membrane Science*, 216, 55–65, (2003).
- [38] Metin, M. ve Öztürk, F.G., “Süt İşletmelerinde Sanitasyon”, *E.Ü. E.M.Y.O. Yayınları*, No:17, Bornova-İzmir, s. 307-319, (2003).
- [39] Agar, D.W., “Multifunctional reactors: Old preconceptions and new dimensions”, *Chem. Eng. Science*, 54, 1299-1305, (1999).
- [40] AWWA, APHA, WPCF, “Standard Methods For Water And Wastewater Examination”, *Sixteenth edition*, New York, (1985).
- [41] Vidal, G., Carvalho, A., Me´ndez, R., Lema, J.M., “Influence of The Content in Fats And Proteins on The Anaerobic Biodegradability of Dairy Wastewaters”, *Biores. Technol.*, 74, 231-239, (2000).
- [42] Johansen, A.G., Vegarud, G.E., Skeie, S., “Seasonal and Regional Variation In The Composition Of Whey From Norwegian Cheddar-Type And Duch-Type Cheeses”, *International Dairy Journal*, 12, 7, (2002).



- [43] Farizoğlu, B., “Süt Endüstrisi Atıksularının Jet Loop Membran Biyoreaktörde Artılabilirliğinin İncelenmesi”, *107Y260 nolu Projenin Sonuç Raporu*, TÜBİTAK, (2010).
- [44] Farizoglu, B., Uzuner S., “The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system”, *Biochemical Engineering Journal*, 57, 46-54, (2011).
- [45] Farizoglu, B., Keskinler, B., Yıldız, E., Nuhoglu, A., “Cheese whey treatment performance of an aerobic jet loop membrane bioreactor”, *Process Biochemistry*, 39, 2283-2291, (2004).
- [46] Danalewich, J.R., Papagiannis, T.G., Belyea, R.L., Tumbleson, M.E., Raskin, L., “Characterization of Dairy Waste Streams, Current Treatment Practices, and Potential for Biological Nutrient Removal”, *Water Res.*, 32(12), 3555-3568, (1998).
- [47] Surampali, R.Y., Tyagi, R.D., Scheible, O.K., Heidman, J.A., “Nitrification, Denitrification And Phosphorus Removal In Sequential Batch Reactors”, *Bioresarch Technology*, 61, 151-157, (1997).
- [48] Yenkie, M.K.N., Geissen, S.U., Vogelpohl, A., “Biokinetics of wastewater treatment in the high performance compact reactor (HCR)”, *The Chemical Engineering Journal*, 49, B1-B12, (1992).