

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANAEROBİK BATIK MEMBRAN BİOREAKTÖRDE MEMBRAN
MODÜL GEOMETRİSİ VE BİYOGAZ GERİ DEVRİNİN MEMBRAN
KİRLENMESİNE ETKİSİ**

**Mustafa ASLAN
(07212201)**

Yrd. Doç. Dr. Yusuf SAATÇİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 Mayıs 2012

Haziran- 2012

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANAEROBİK BATIK MEMBRAN BİOREAKTÖRDE MEMBRAN
MODÜL GEOMETRİSİ VE BİYOGAZ GERİ DEVRİNİN MEMBRAN
KİRLENMESİNE ETKİSİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Mayıs 2012
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Haziran 2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr.Yusuf SAATÇI (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nusret ŞEKERDAĞ (F.Ü.)

Prof. Dr. Gülbeyi DURSUN (F.Ü.)

Prof. Dr. Halil HASAR (F.Ü.)

Doç. Dr. Vedat UYAK (İ.Ü.)

HAZİRAN-2012

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, anaerobik biyoreaktör sistemin içerisine farklı şekillerde tasarlanan modüller yerleştirilerek, performans ve kirlenme kontrolü araştırılmıştır. Sistem aynı ortam şartlarında biyogaz geri devirli ve geri devirsiz olmak üzere tasarlanmıştır. Bu çalışmanın ileride sorunları gidermek üzere çalışacak araştırmacılara ve uygulamalara yol göstereceği umut edilmektedir.

Bu doktora tez çalışmasının konu tespitinde, çalışma sırasında ve reaktör tasarım ve kurulmasında, kısaca tezin her aşamasında her türlü bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan ve maddi manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yusuf SAATÇI'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tecrübe ve düşünceleriyle tezin olgunlaşmasında desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Halil HASAR'a, tez izleme komitesi toplantılarında yaptıkları yorum ve yönlendirmelerle tezin olgunlaşmasına katkı sağlayan TİK komitesinin değerli üyeleri Prof. Dr. Nusret ŞEKERDAĞ ve Prof. Dr. Gülbeyi DURSUN'a teşekkür ederim. Sistemin kurulmasında ve membran modüllerinin yapılmasında yardım eden Arş. Gör. Ergin TAŞKAN ile partikül boyut dağılımı konusundaki laboratuvar çalışmalarında İ.T.Ü Çevre Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. İsmail KOYUNCU'ya teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin her aşamasında maddi ve manevi desteklerini ve dualarını esirgemeyen babam Mehmet Şükrü ASLAN ve annem Meliha ASLAN'a, ailem, eşim Fadile ASLAN ve çocuklarım Zübeyir EMRE, Hilal Merve ve Meliha Betül'e en samimi duygularla şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı 110Y043 No'lu proje ile destekleyen TÜBİTAK Başkanlığına ve 2055 nolu proje ile destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (FUBAP) teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa ASLAN

ÖZET

ANAEROBİK BATIK MEMBRAN BİOREAKTÖRDE MEMBRAN MODÜL GEOMETRİSİ VE BİYOGAZ GERİ DEVRİNİN MEMBRAN KİRLENMESİNE ETKİSİ

Anaerobik membran biyoreaktörlerde temel sorunu membran kirlenmesi oluşturmaktadır. Membran kirlenmesi, organik maddeler, inorganik maddelerin çökmesi ve membran yüzeyinde mikrobiyal hücrelerin adhezyonu sonucu oluşmaktadır. Membran kirlenmesinin kontrolü için, membran malzemesi ve modüllerinin geliştirilmesi, çamur karakteristiğinin düzenlenmesi, akı, çapraz akım hızı, geri yıkama, temizleme gibi birçok faktör üzerinde araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak anaerobik sistemde oluşan biyogazın geri devri ile membran yüzeyine verilmesi ve kirlenmeye etkisi üzerindeki çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca anaerobik batık membran biyoreaktör (SAnMBR) proseslerinde, aynı materyalden yapılmış farklı geometrik şekillerde oluşturulan modüllerle membran kirlenmesinin izlenmesi ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Birçok parametrenin kararlı tutulduğu bir reaktör içerisine farklı şekillerde oluşturulan modüller iki grupta halinde yerleştirilerek, sistemin bir bölümü gaz geri devirli, diğer bölümü geri devirsiz işletmeye alındı. Bu amaçla Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) görüntüleri, Enerji Diffüz X-Ray (EDX) analizi, partikül boyut dağılımı (PSD) analizi, Hücre dışı Polimerik Maddelerin (EPS) ekstraksiyonu ve kimyasal analizleri, Çözünabilir Mikrobiyal Ürünlerin (SMP) kimyasal analizleri yapılarak membran yüzeyinde oluşan kek tabakası, organik ve kristal yapısı incelendi. Kirlenme izlenerek, membran yüzeyi ile gaz temasını en iyi sağlayan modül şekilleri belirlendi. Çalışma laboratuvar şartlarında ve mezofilik (ortalama 37 °C) koşullarda sentetik atıksu kullanılarak yürütüldü.

Sentetik atıksuların arıtılması için batık AnMBR'ın fizibilitesi, KOİ giderim verimi, biyogaz üretimi (kimyasal kompozisyonu ve oranı), partikül boyut dağılımı, Hücre dışı polimerik maddeler (EPS) ve Çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) kapsayan çamur özelliklerinin karakterizasyonu ve membran kirlenme ile membran modül geometrik şekli ve biyogaz geri devir arasındaki ilişki araştırıldı.

İşletme aşamasında KOİ giderim verimi% 95-98 arasında, $SO_4^{=}$ giderim verimi % 38-65 ve TOK giderim verimi ise %95-98 arasında bulunmuştur. Ayrıca TVSS için giderim verimi % 97-98'un üzerinde gerçekleşmiştir. SAnMBR'ın uygulanmasında atıksuların arıtılmasında anahtar olabilecek spesifik bakterilerin alınması için etkili bir yol olduğunu göstermiştir. SAnMBR işletimi boyunca uygulanan biokütle konsantrasyonları 0.9-8 g/l aralığında olduğu belirlendi. TSS'nin büyük oranda çözünmüş katı maddelerden oluştuğu görülmüştür. Tüm test koşullarında kek oluşumunun uygulanabilir akının sağlanmasında sınırlayıcı faktör olduğunu gösterdi. Görünmez kirlenme düşük seviyelerde gözlemlendi ve SAnMBRs'ın uzun süre işletilmesi boyunca en büyük etkiye sahip olduğu belirlendi.

Sonuçlar SAnMBR sistemlerinde yüksek KOİ giderim verimi elde edildiğini ve yüksek membran kirlenme gerçekleştiğini gösterdi ve bunun nedeninin küçük partikül boyutlu kolloidlerin varlığı ile ilişkili olduğu belirlendi. Enerji geri kazanımı için mezofilik koşullar altında anaerobik atıksu arıtımı ve yüksek kalitede süzüntü elde etmek için biyogaz üretimi ve KOİ giderimi için fizibil bulunmuştur.

Süzüntü akıları yüksek kalitede ve üretilen biyogazın %75-80 metan gazından oluştuğu belirlendi. Üretilen biyogazın geri devir hızına bağlı olarak membran temizlenmesinde etkili olduğu belirlendi. Ayrıca çamur kek oluşumu ve membran kirlenme üzerinde flok

boyutu, SMP ve EPS içeren çamur özelliklerinin etkili parametreler olduğunu göstermiştir. Ancak ince partiküllerin büyük oranda olmasının neden olduğu membran kirlenme büyük bir sorun olabilir. filtrasyon performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip biyo-hücrelerin ayrışması muhtemelen küçük boyutlu partiküllerin oluşmasının kaynağını teşkil etmiştir. İnce flok veya partiküllerin sebep olduğu Membran filtrasyon direncinin artışına deflokulasyonun yol açtığı görüldü. Çamurun maruz kaldığı, yüksek kesme gerilmesi, muhtemel partikül boyutundaki bir azalmadan dolayı, sürdürülebilir akıyı azaltan çamur özelliklerini etkilediği belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgularla, muhtemelen AnMBR hususunda halen belirsiz olan pek çok noktanın açıklığa kavuşması sağlanacaktır. Çalışmada literatürde olmayan, Membran modül geometrisi ile kirlenme arasındaki ilişki ve biyogaz geridevri ve biyogaz geri devir debisinin membran kirlenme kontrolündeki etkisi ile yeni fikirler sağlayacağı umut edilmiştir.

Gelecek araştırmalarda ele alınacak sorunlar, kek oluşumunun kontrolü, membran performansının artırılması, membran alan gereksinimlerinin azaltılması, membran maliyet ve ömürlerinin uzatılması için optimum koşulların belirlenmesi olacaktır. Bu sorunların çözülmesi, AnMBRs'ın full ölçekli uygulanmasında, ekonomik fizibilitesini artıracığı muhtemeldir.

Anahtar Kelimeler:

Anaerobik Batık Membran Biyoreaktör, Membran Kirlenmesi, Biyogaz Geridevri, Membran Modülü, SMP, EPS, PSD, Membran Görüntüsü, Kirlenme Dirençleri

ABSTRACT

EFFECT OF BIYOGAS SPARGING AND MODULE GEOMETRIC SHAPES ON MEMBRANE FOULING IN ANAEROBIC SUBMERGED MEMBRANE BIYOREACTORS

The main problem in anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) is membrane fouling, is a result of organic substances, settling of inorganic substances and adhesion of microbial cells on membrane surface. Researches are made on several factors such as sludge property, flux, cross-over flow velocity, back washing, module development and membrane material on control of membrane fouling. However, studies on membrane surface recirculation of biogas that occurs in anaerobic systems and related to effects on membrane fouling are very limited. In anaerobic submerged membrane process, a study is not found that is related to monitoring of membrane fouling by membrane modules which formed different geometrical shapes that made of the same material.

Modules which are made in different forms into a reactor that maintains stable state of several parameters, settling two different group states, had be operated with gas recirculation in a part of system and in other part without gas recirculation. The cake layer formation, deposition of organic and inorganic substances formed on membrane surface were researched, making membrane autopsy by Scanning Electron Microscopy (SEM), chemical component on membrane surface by Energy Diffuse X-Ray(EDX), particulate Size Distribution (PSD), extraction of Hücre dışı Polimeric Substances (EPS) and chemical analysis and analysis of Soluble Microbial Products (SMP).By monitoring fouling, a module form that provides the best membrane surface and gases contact was founded. This study is processed by using synthetic wastewater in laboratory and mesoflic (37°C) conductions.

In this thesis, Specific objectives were to study the feasibility of using submerged AnMBRs for syentetic treatment, to quantify the chemical oxygen demand (COD) removal efficiency and biogas production and composition to characterize sludge properties, including particle size, hücre dışı polymeric substances (EPS), soluble microbial products (SMP) and relations between membran module geometric forms and biogas sparging on membrane fouling.

During reactors operation, %95-98 of COD removed efficient, %38-65 of SO_4^- removed efficient, %96-98 of TOC removed efficient were founded. Also, efficiency of TVSS removed were founded over %97-98. Results show that the application of anaerobic membrane bioreactors is an efficient way to retain specific bacteria that can be key for the treatment of wastewaters under extreme conditions. Applied biyokütle concentrations during AnMBRs operation were in the range 0,9-8 g/L. A great rate of TSS were founded to formation dissolved solid. Under all conditions tested, cake formation showed to be the limiting factor determining the applicable flux. Low levels of irreversible fouling were observed, The latter is of great importance for the long term operation of the AnMBRs.

A high COD removal efficiency was achieved, and the resulting biogas was, again, of high fuel quality and a higher membrane fouling rate was present, and was related to the presence of a larger portion of fine colloidal particles. The experimental results from this study indicate that anaerobic treatment of wastewater under mesophilic conditions for energy recovery and for subsequent reuse of high quality permeates is feasible in terms of COD removal and biogas production. However, membrane fouling caused by the large portion of fine particles may be a challenge.

The permeate was of high quality, and the resulting biogas, composed of %75-80 methane, was of excellent fuel quality. It was found that the bubbling of recycled biogas was effective for in-situ membrane cleaning, depending on the recycle flow rate of produced biogas. resulted in deflocculation, which led to an increase in membrane filtration resistance caused by fine flocs.

Sludge properties, including SMP, bound EPS, and floc size, are the important parameters in governing sludge cake formation and membrane fouling in SAnMBR systems. However, membran fouling become to great rate causes of fine particulates can be a important issue. The development of a fraction of small particles, most likely originated from cells decay, produced an important influence on the filtration performance. Deflocculation which led to an increase in membrane filtration resistance caused by Fine floc or small particles. Eexposure of the sludge to a high shear stress affected sludge properties, reducing the attainable flux, most likely due to a reduction in particle size.

Information that can be obtained from this thesis may be cause a lot of unclear point about AnMBRs will be revealed and also support to international science. Also the result of the assessment of applicable of gases sparging process will provide significantly information about using this process practically.

The challenge for future research is finding the optimum operational conditions to control the cake layer formation, enhancing membrane performance and reducing the membrane area requirements. This will increase the economic feasibility of AnMBRs, enabling its full scale application.

Keywords:

Anaerobic Submerged Membrane Bioreactor, Membrane Fouling, Biogas Sparging, Membrane Moduls, SMP, EPS, PSD, Membrane Otopsisy, Fouling Resistances

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
ÖZET	III
ABSTRACT	V
İÇİNDEKİLER	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
RESİMLER LİSTESİ	XIII
TABLolar LİSTESİ	XIV
EKLER LİSTESİ	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Membran Proseslerin Gelişimi	3
1.2. Membran Biyoreaktör Modülleri	6
1.3. Membran Biyoreaktörlerin Avantaj ve Dezavantajları	8
1.3.1. Membran Biyoreaktörlerin Avantajları	8
1.3.1.1. Arıtılmış su kalitesi	8
1.3.1.2. İşletme Esnekliği	9
1.3.1.3. Düşük alan ihtiyacı	9
1.3.1.4. Yüksek oranda ayrışma	9
1.3.1.5. Düşük çamur üretimi	10
1.3.1.6. Dezenfeksiyon ve koku kontrolü	11
1.3.2. Membran Biyoreaktörlerin Dezavantajları	11
1.4. Anaerobik Membran Biyoreaktörlerin Performansını Etkileyen Faktörler	12
1.4.1. İşletme Sıcaklığı, Çamur Yaşı (ÇY) ve Hidrolik Bekletme Süresi (HBS)	13
1.4.2. Akı, Trans-membran Basıncı (TMP) ve Geçirgenlik	14
1.4.3. Membran Proses Tipleri	14
1.4.4. Çapraz Akım Hızı	17
1.4.5. Biyogaz Geri Geri devir ve Membran Gevşetme (Dinlendirme)	17
1.4.6. Membran Temizleme	17
1.4.7. İşletme Modü	18
1.4.8. Viskozite	18
1.4.9. Mikrobiyal Aktivite	18
1.4.10. Membran Kirlenmesi/Tıkanması	19
1.5. Anaerobik Membran Biyoreaktör Proseslerinin Ekonomisi	22
2. MATERYAL VE METOD	24
2.1. Anaerobik Batık Membran Biyoreaktör (SAnMBR) Sistemi	24
2.2. Membran Modüllerinin Oluşturulması	27
2.3. Yapılan Analizler ve Analiz Yöntemleri	31
2.3.1. Toplam Katı Madde (TKM)	32
2.3.2. Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM)	32

2.3.3.	Toplam askıda katı madde (TAKM).....	32
2.3.4.	Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	33
2.3.5.	Toplam alkalinite	34
2.3.6.	Gaz analizleri	34
2.3.7.	Gaz Ölçüm Düzenegi.....	35
2.4.	Akı, TMP ve Toplam Membran Direnci	36
2.5.	Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler (SMP) ve Hücre Dışı Polimerik Maddeler (EPS)	38
2.5.1.	Protein Analizi	39
2.5.2.	Karbonhidrat Analizi	39
2.6.	SEM Görüntüleri -EDX Analizleri.....	40
2.7.	Partikül Boyut Dağılımı (PSD) Analizi.....	40
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	41
3.1.	Sistem Optimizasyonu	41
3.2.	Membran Tıkanma/Kirlenme Çalışmaları	45
3.2.1.	Membran modül geometrisinin kirlenme üzerindeki etkisi.....	45
3.2.1.1.	Akı, TMP ve Membran Dirençleri	45
3.2.1.2.	Membran modül geometrisi ile geçirgenlik ilişkisi.....	48
3.2.1.3.	Membran modül geometrisi ile SMP ve EPS ilişkisi	48
3.2.1.4.	Membran modül geometrilerinde SEM görüntüsü ve EDX analizleri	50
3.2.1.5.	Membran modülleri ile partikül boyut dağılımı ilişkisi.....	60
3.2.2.	Biyogaz geri devrinin modül geometrisi ve membran kirlenmesi üzerindeki etkisi... 62	
3.2.2.1.	Akı, TMP ve Membran Dirençleri	62
3.2.2.2.	Biyogaz geri devri ile geçirgenlik ilişkisi.....	67
3.2.2.3.	Biyogaz geri devri ile çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) ve hücre dışı polimerik maddeler (EPS) ilişkisi	67
3.2.2.4.	Biyogaz geri devri ile SEM görüntüleri ve EDX analizleri ile ilişkisi.....	69
3.2.2.5.	Biyogaz geri devri ile partikül boyut dağılımı ilişkisi.....	79
3.2.3.	Biyogaz geri devir debisinin kirlenmeye etkisi	80
3.2.3.1.	Akı, TMP ve membran kirlenme dirençleri.....	80
3.2.3.2.	Biyogaz geri devir debisi ile geçirgenlik ilişkisi	85
3.2.3.3.	Biyogaz geridedir debisi ile SMP ve EPS ilişkisi	86
3.2.3.4.	Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran modüllerindeki SEM görüntüleri ve EDX analizleri	87
3.2.3.5.	Farklı biyogaz geri devir debilerinde partikül boyut dağılımı ilişkisi	109
4.	SONUÇLAR	111
5.	KAYNAKLAR	115
6.	EKLER	122
7.	ÖZGEÇMİŞ	132

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Membran Biyoreaktörler a) harici ve b) dahili (batık) membran biyoreaktör	7
Şekil 1.2. Membran biyoreaktör konfigürasyonları	15
Şekil 2.1. SAnMBR sisteminin en kesit şekli.	24
Şekil 2.2. Gaz ölçüm düzeneğinin şematik görünümü.....	36
Şekil 3.1. Temiz membranlarda trans-membran basıncına bağlı akı değişimi	41
Şekil 3.2. Kademeli akı metoduna göre temiz su membran dirençleri	42
Şekil 3.3. Alıştırma safhasında reaktör çamurunda katı madde konsantrasyonları	42
Şekil 3.4. Sistem optimizasyonu aşamasında zamana bağlı akı değişimleri.	43
Şekil 3.5. Sistem optimizasyonu aşamasında zamana bağlı trans- membran basıncı (TMP) direnci değişimleri	44
Şekil 3.6. Sistem optimizasyonu aşamasında zamana bağlı membran direnci değişimleri	44
Şekil 3.7. Zamanla membran modüllerindeki akı değişimi	45
Şekil 3.8. Membran modüllerindeki membran toplam kirlenme direnci değişimi	46
Şekil 3.9. Membran modüllerindeki kirlenme dirençleri	47
Şekil 3.10. Membran modul şekillerinde kirlenme dirençleri	47
Şekil 3.11. Membran modüllerindeki süzüntü geçirgenliğinin değişimi.....	48
Şekil 3.12. Membran Modülleri yüzeyinde oluşan kekteki SMP ve EPS davranışı.....	49
Şekil 3.13. Temiz membran SEM görüntüsü.....	50
Şekil 3.14. Temiz membran EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	51
Şekil 3.15. Silindir membran modülün SEM görüntüsü.....	53
Şekil 3.16. Silindir membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	53
Şekil 3.17. Huni membran modülün SEM görüntüsü.....	54
Şekil 3.18. Huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	54
Şekil 3.19. U şekilli membran modülün SEM görüntüsü	55
Şekil 3.20. U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	55
Şekil 3.21. Silindir şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü	57
Şekil 3.22. Silindir şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları	57
Şekil 3.23. Huni şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü	58
Şekil 3.24. Huni şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	58
Şekil 3.25. U şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü	59
Şekil 3.26. U şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	59
Şekil 3.27. Membran modul şekillerinde PSD değişimi	60
Şekil 3.28. Biyogaz geri devri durumunda membran modüllerindeki süzüntü akılarının zamanla değişimi.....	63
Şekil 3.29. Biyogaz geri devri durumunda membran modüllerindeki toplam membran kirlenme direnci	63
Şekil 3.30. Membran modüllerindeki kirlenme dirençleri	64
Şekil 3.31. Kirlenme dirençlerinin % oranları	65
Şekil 3.32. Biyogaz geri devri ile membran modüllerindeki geçirgenlik davranışı	67
Şekil 3.33. Biyogaz geri devri ile SMP ve EPS ilişkisi	68
Şekil 3.34. Biyogaz geri devirli silindir şeklindeki membran modülün SEM görüntüsü	72

Şekil 3.35. Biyogaz geri devirli silindir şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	72
Şekil 3.36. Biyogaz geri devirli huni şeklindeki membran modülün SEM görüntüsü	73
Şekil 3.37. Biyogaz geri devirli huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	73
Şekil 3.38. Biyogaz geri devirli U şeklindeki membran modülün SEM görüntüsü.	74
Şekil 3.39. Biyogaz geri devirli U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	74
Şekil 3.40. Biyogaz geri devirli silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.....	76
Şekil 3.41. Biyogaz geri devirli silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	76
Şekil 3.42. Biyogaz geri devirli huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü	77
Şekil 3.43. Biyogaz geri devirli huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	77
Şekil 3.44. Biyogaz geri devirli U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	78
Şekil 3.45. Biyogaz geri devirli U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	78
Şekil 3.46. Biyogaz geri devir debisi ile ilgili çalışmalar süresince reaktör çamurunda Partikül boyut dağılımı (PSD)	79
Şekil 3.47. Biyogaz geri devirli membran modüllerinde kekteki Partikül boyut dağılımı (PSD).	80
Şekil 3.48. Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran modüllerinde zamana bağlı akı değişimleri	81
Şekil 3.49. Farklı biyobiyogaz geri devir debilerinde zamana bağlı membran toplam dirençlerinin değişimi	82
Şekil 3.50. Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran kirlenme dirençleri.	83
Şekil 3.51. Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran kirlenme dirençlerinin % oranları.....	84
Şekil 3.52. Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran modüllerindeki geçirgenlik değişimi.	85
Şekil 3.53. Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran modüllerindeki kekte SMP ve EPS ilişkisi.....	86
Şekil 3.54. 0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün SEM görüntüsü.	89
Şekil 3.55. 0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	89
Şekil 3.56. 1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün SEM görüntüsü.....	90
Şekil 3.57. 1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları	90
Şekil 3.58. 1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün SEM görüntüsü.	91
Şekil 3.59. 1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	91

Şekil 3.60.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	92
Şekil 3.61.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	92
Şekil 3.62.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	93
Şekil 3.63.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	93
Şekil 3.64.	1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	94
Şekil 3.65.	1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	94
Şekil 3.66.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün SEM görüntüsü.	95
Şekil 3.67.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	96
Şekil 3.68.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün SEM görüntüsü	96
Şekil 3.69.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	97
Şekil 3.70.	1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün SEM görüntüsü.	97
Şekil 3.71.	1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	98
Şekil 3.72.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	99
Şekil 3.73.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları	99
Şekil 3.74.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	100
Şekil 3.75.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	100
Şekil 3.76.	1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	101
Şekil 3.77.	1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	101
Şekil 3.78.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün SEM görüntüsü	102
Şekil 3.79.	0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	103
Şekil 3.80.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün SEM görüntüsü.	103
Şekil 3.81.	1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran	

modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.	104
Şekil 3.82. 1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün SEM görüntüsü.	104
Şekil 3.83. 1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları	105
Şekil 3.84. 0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	106
Şekil 3.85. 0,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	106
Şekil 3.86. 1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü	107
Şekil 3.87. 1,0 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	107
Şekil 3.88. 1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.	108
Şekil 3.89. 1,5 l/dak biyogaz geri devir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.....	108
Şekil 3.90. Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran modüllerindeki kek PSD.	109

RESİMLER LİSTESİ

Sayfa

Resim 2. 1. Sistemde kullanılan membran difüzörler (a) ve bağlantıları (b).....	26
Resim 2. 2. SAnMBR ve sitemdeki teçhizatın toplu resmi	26
Resim 2. 3. Biyogaz geridevrinde kullanılan difüzör sisteminin kontrolü	
Resim 2. 4. Anlık trans-membran basıncı ve akıyı ölçebilen online otomasyon sistemi .	27
Resim 2. 5. Membran modülleri.....	28

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Evsel atıksu arıtımında klasik aktif çamur prosesi (AÇP) ve membran biyoreaktör (MBR) proseslerinin çamur üretimlerinin kıyaslanması.....	10
Tablo 1.2. Anaerobik membran biyoreaktörler için işletme koşulları	13
Tablo 1.3. Tipik Membran Proseslerinin Özellikleri	15
Tablo 2.1. Membran modüllerinin özellikleri.....	28
Tablo 2.2. Modüllerin sembolleri, şekilleri ve yerleştirildiği kısımlar	29
Tablo 2.3. Sentetik atıksuyun kimyasal bileşimi	30
Tablo 2.4. Sentetik atıksu ve Aşı çamurunun özellikleri	30
Tablo 2.5. SAnMBR sistemi işletme şartları	31
Tablo 2.6. Gaz kromatografisinde metan analizi yapmak için optimize edilen şartlar.....	35

EKLER

Sayfa

EK. 1. SAnMBR Sisteminin Farklı Geometrik Membran Modüllü Şekillerde İşletilmesi Durumundaki Akı, TMP, Membran Toplam Direnci ve Geçirgenlik verileri.....	123
EK. 2. SAnMBR Sisteminin Biyogaz Geri devirli İşletilmesi Durumundaki Akı, TMP, Membran Toplam Direnci ve Geçirgenlik Verileri	125
EK. 3. SAnMBR Sisteminin Biyogaz Geri devirli Debilerde İşletilmesi Durumundaki Akı, TMP, Membran Toplam Direnci ve Geçirgenlik Verileri.....	125
EK. 4. SAnMBR Sisteminin İşletilmesi Sürecinde Membran Kirlenme Dirençleri	130
EK. 5. SAnMBR Sisteminin İşletilmesi Sürecinde SMP ve EPS Değişimi	131

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

J	:Membrandan geçen akı
ΔP	:Trans -membran Basıncı
ΔP_c	:Kritik trans -membran basıncı
R_t	:Toplam Direnç
R_m	:Membran Direnci
R_c	:Kek Direnci
R_p	:Gözenek ve Adsorbsiyon Direnci
μ	:Süzüntü viskozitesi
t	:Filtrasyon süresi
AnMBR	:Anaerobik Membran Biyoreaktör
APHA	:American Public Health Association
BOD	:Biyolojik Oksijen İhtiyacı
BSA	:Bovine Serum Albümin
COD	:Kimyasal Oksijen İhtiyacı
SVI	:Çamur hacim indeksi
DL	:Kaydedilebilir Limit
EC	:Evaporator Condensate
ED	:Elektrodiyaliz
EDTA	:Etilendiamintetraasetik Asit
EDX	:Energy Diffusive X-ray Analizör
EPS	:Hücre dışı Polimerik Maddeler
F/M	:Besin/Mikroorganizma
HBS	:Hidrolik Alıkonma Süresi
J	:Membran Akısı
LPM	:Birim dakikadaki akım
MBR	:Membran Biyoreaktör
MCAB	:Membranla birleştirilmiş Anaerobik Biyoreaktör
MF	:Membran Filtrasyon
MLSS	:Mixed Liquor Suspended Solids
MW	:Molekül Ağırlık
MWCO	:Molekül Ağırlık Cut-Off
NF	:Nanofiltrasyon
OLR	:Organik Yükleme Hızı
PN	:Protein
PS	:Polisakarit
PVDF	:Polivinildane Floride
Rc	:Kek Tabakası Direnci
Rm	:Membran Direnci
Rp	:Gözenek Tıkanma Direnci
Rt	:Toplam Membran Hidrolik Direnci
SAnMBR	:Anaerobik Batık Membran Biyoreaktör
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu

SMP	:Çözünebilir Mikrobiyal Ürünler
ÇY	:Çamur Yaşı
SS	:Askıda Katı Maddeler
TMP	:Trans-membran Basıncı
TMR	:Trans-membran Toplam Direnci
TOK	:Toplam Organik Karbon
TSS	:Toplam Askıda Katı Maddeler
UF	:Ultrafiltrasyon
VFA	:Uçucu Yağ Asitleri
VSS	:Uçucu Askıda Katı Maddeler
AP	:Trans -membran Basıncı
n	:Dinamik Viskozite
V	:Süzüntü hacmi

1.GİRİŞ

Atıksuların arıtımında anaerobik sistemler, düşük enerji tüketimi, daha az çamur üretimi, atık stabilizasyonu ve biyogaz eldesi gibi önemli avantajlara sahiptir. Anaerobik sistemlerin bu olumlu yönlerinin yanı sıra, çıkış sularının alıcı ortam standartlarını sağlamaması ve reaktörden mikroorganizma kaçıışı gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Metan bakterilerinin yavaş büyüme hızlarını biyokütle konsantrasyonundan bağımsız hale getirmek amacıyla çamur yaşlarını artırmak, anaerobik biyoreaktörlerde önemlidir. Anaerobik sistemler ile membran sistemleri (harici veya sistem içerisinde batık şekilde) birleştirilerek bu olumsuzluklar giderilmeye çalışılmıştır. Anaerobik mikroorganizmaların yavaş çoğaldığı biyoreaktörde tüm mikroorganizmaların tam olarak alıkonması için mikrofiltrasyon (MF) veya ultrafiltrasyon (UF) membran modülleri kullanılmaktadır.

Son yıllarda anaerobik batık membran biyoreaktöre (SAnMBR) ilgi oldukça artmıştır. Aerobik membran ile karşılaştırıldığında anaerobik membran biyoreaktör sistemlerinde, enerji maliyeti ve geri döngüyle biyokütle kaçıışı azaltılmakla beraber, oluşan biyogazın püskürtülmesiyle membran yüzeyinin temizlenmesini sağlamaktadır. Batık anaerobik membran biyoreaktör (SAnMBR); düşük alan ihtiyacı, yüksek kalitede çıkış suyu ve biyokütle yıkanmaksızın kararlı performans sağlayan membran modülün içerisinde alıkonmasını sağlayabildikleri için anaerobik biyoteknolojinin uygulanmasında önemli bir alternatif teşkil etmektedir (Saddoud vd., 2007; Meng vd., 2009; Ho ve Sung, 2010).

Bu avantajlara rağmen SAnMBR'ler, membran kirlenmesine bağlı olarak membran performansının olumsuz etkilenmesi, azalan verimlilik ve yüksek temizleme maliyeti, membranların yenilenmesi ve giderilemeyen kek yapısının oluşması gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Membran yüzeyinde çamur kekinin meydana gelmesi membran kirlenmesinin baskın mekanizmasını oluşturmaktadır. Kek tabakası çamur, hücre dışı polimerik maddeler (EPS), organik ve inorganik partiküller gibi farklı kirleticilerin adsorpsiyonu, depolanması ve birikmesinden dolayı membran yüzeyinde reddedilen gözenekli bir tabaka olarak tanımlanabilir. Membran biyoreaktörlerde (MBR) kek tabakasının oluşumu filtrasyon verimini etkileyen bir faktördür. Literatürlerde porozite, yoğunluk ve EPS, mikrobiyal popülasyon ve kek tabakasındaki dağılımlarını kapsayan kimyasal kompozisyon ile ilgili detaylı temel bilgilerin eksikliğine işaret edilmektedir. Aerobik MBR de kek

tabaka yapısını belirleyen sadece birkaç çalışma vardır. Diğer bir taraftan biyo-polimerik protein ve polisakkarit ve inorganik maddeler kekte belirlenebilir. Bunun için membran yüzeylerinde oluşan kek tabakasının fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik yapılarının dağılımını anlaşılması SAnMBR proseslerinin filtrasyon performansını ve kek tabaka davranışlarını bilinmesi önemlidir. Anaerobik batık membran biyoreaktörler (SAnMBRs) ile yapılan çalışmalarda, hücre dışı polimerik maddeler (EPS), çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP), biyo-polimerik kümeleşmeler (BPC) ve partikül boyutunu içeren farklı çamur özellikleri belirlenmiş ve böylece farklı membran kirlenme davranışının olduğu saptanmıştır. SAnMBRs’de filtrasyon karakteristikleri, çamur özellikleri (partikül boyutu, EPS, SMP ve BPC gibi) ve çamur kek özellikleri (partikül boyutu, EPS, kirlenici kompozisyonu ve sıkışma durumu) belirlenmiş ve SAnMBR sisteminde membran kirlenmesini etkileyen baskın faktörler tanımlanmıştır (Meng vd., 2009; Lew vd., 2009).

Son yıllarda AnMBR çalışmaları arasında harici membran modülleri ve konsantre atıksular üzerinde odaklanmıştır. Tipik olarak çok yüksek KOİ giderimi sağlayan yüksek biyokütle konsantrasyonları elde edilmiştir (Fuchs vd., 2003). Temel işletme sorunu olan membran kirlenmesi hidrodinamik ve çamur özelliği, işletme basıncı ve sıcaklık, membran gözenek boyutu ve malzemesi ve membran akısı ile ilgilidir (Liao vd., 2006). Aerobik batık MBRs belli temel prensiplerde SAnMBR ile benzer olmasına rağmen, işletme koşullarının optimizasyonu, membran kirlenme mekanizması ve kirlenme kontrol stratejileri ile ilgili SAnMBR’in daha detaylı araştırmalar gerekmektedir (Hu ve Stuckey, 2006 ve 2007; Meng vd., 2009).

SAnMBRs sistemlerinde hidrodinamik koşullar, membran malzemesi ve modül geometrisi, çamur özellikleri (partikül boyutları, EPS, hidrofobisite, yüzey yükü vb.) gibi faktörlerden bir kaç da membran kirlenmesini etkileyen faktörler olarak tanımlanmıştır (Meng vd., 2009). Aynı zamanda, batık membran sistemlerinde, toplam filtrasyon direncine kek direncinin katkısının %90’ın üzerinde olduğu rapor edilmiştir (Khan vd., 2009; Lin vd., 2009).

Çamur keki görünürde çamur karışımındaki biyomastan kaynaklansa da, çamur keki ve karışım çamurunun kirlenme davranışını gösteren bir çalışmada önemli farklılıkların olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2007). Membran yüzeylerindeki kek oluşumu, çamur kekinin yüksek spesifik filtrasyon direncinde önemli bir rol oynamaktadır. Membran yüzeyinde oluşan kek ile çamur karışım sıvısı kıyaslandığında, daha küçük PSD, daha yük-

sek EPS ve önemli oranda farklı mikrobiyal topluluğa sahip olduğu belirlenmiştir (Lin vd., 2011).

Yapılan çalışmalar membran yüzeyinde koloni oluşturan spesifik bakteri kültürlerinin ve/veya küçük flokların bağlanması ile çamur kekinin oluşmaya başladığını ve daha sonraki aşamalarda kek oluşumuna izin veren koşulların artışı sağladığını göstermiştir.

Membranların biyolojik olarak kirlenmesine katkı sağlayan, biyokütle sıvı karışımındaki EPS, SMP ve membran malzemesi gibi veriler üzerinden farklı kirlenme tabakasında mikrobiyal türlerin varlığının nasıl saptanacağı ile ilgili çalışmalar da literatürde mevcuttur (Praderier, 1996; Gao vd., 2011). Literatürde, anaerobik membran biyoreaktörde membran kirlenmesi ve tıkanmasının, hücre ve büyük oranda protein kaynaklı EPS ağını içeren bir kirlenme tabakasından kaynaklandığı ve spesifik türlerin membrana bağlanarak, kirlenmeye katkı sağladıkları belirtilmiştir (Gao vd., 2011). Filtrasyon performansını optimize etmek için, membran yüzeyi kek tabakasının karakteristikleri ve dinamik yapısının yeteri şekilde anlaşılması gereklidir.

AnMBR’lerde, modül şekilleri ve gaz akış hızının kirlenme/tıkanma üzerindeki etkilerinin birlikte araştırıldığı bu çalışma ile, optimize edilen şatlarda oluşturulan farklı fiber aralıkları ve geometrik şekillerde oluşturulan modüller tasarlanmıştır. Membran modülleri gaz geridevirli ve gaz geridevirsiz işletme şartlarını sağlayan bir reaktöre yerleştirilerek sistem optimize edilmiş ve işletmeye alınmıştır. modül geometrisi ve biyogaz geridevri ile biyogaz geridevir debisinin membran kirlenmesine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla SEM- EDX, partikül boyut dağılım analizi (PSD), EPS ve SMP’nin analizleri yapılarak membran yüzeyinde oluşan kek tabakası, organik ve kristal yapısı incelenmiştir. Bu çalışma şu andaki literatürde olmayan, Membran modül geometrisi ile kirlenme arasındaki ilişki ve biyogaz geridevri ve biyogaz geridevir debisinin membran kirlenme kontrolündeki etkisi ile yeni fikirler sağlayacağı umut edilmiştir.

1.1. Membran Proseslerin Gelişimi

Loeb ve Sourirajan reverse ozmos için bir asimetric selüloz asetat icat ettiklerinden, ilk olarak 1960’ tan, beri atıksu ve su arıtımında geniş bir şekilde membranlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu günden itibaren, biyolojik arıtma süreçlerinde membran katı/sıvı ayırıştırıcıların birçok kombinasyonları çalışılmıştır. Atık su geri dönüşüm ihtiyacı ilk

ortaya çıktığında, klasik yaklaşım ileri arıtma proseslerin kullanılması olmuştur. Sulama ve evsel atıksular için geri dönüşüm veya yüzeysel suya deşarjın aksine bu arıtma filtrasyon ve dezenfeksiyonla sınırlandırılabilir. Ayrıca ters osmoz da dahil edilebilir. Örneğin, Orange şehrindeki (Kaliforniya, ABD) 21 su fabrikasında, kireçle yumuşatma, hava sıyırma, rekarbonizasyon, kum filtrasyonu, karbon adsorbisyonu ve arıtılmış çıkış suyun biyolojik arıtımı için ters osmoz da kapsayan bir arıtma süreci kullanılmaktadır (Mills, 1996). Arıtılmış su yüzeysel su kaynaklarına deşarj edilebilir. Bu süreç nispeten karmaşıktır ve yüksek oranda kimyasal çamur üretir. Membran imalat teknolojisinin ve uygulamalarının ilerlemesi mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon ile üçüncül arıtma aşamalarının nihai olarak yerini alabilir. Bu gelişmeler paralelinde biyolojik arıtma süreçlerinde, mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon katı/sıvı ayırma işleminde kullanılmaktadır ve çöktürme aşaması ayrıca elimine edilebilmektedir.

Membran ünitesine sıvı karışım yüksek basınçta pompalanmasıyla, membran içerisinden süzüntü geçer ve konsantre biyoreaktöre geri dönmüş olur (Hardt vd., 1970; Arika vd., 1977; Krauth ve Staab, 1988; Muller vd., 1995). Ancak teğet akım hızının sürekliliği sağlamadaki yüksek enerji maliyetleri, gelecek aşamalarda reaktör içinde batık membranların gelişmesine ve membran içerisinde arıtılmış suyun geri çekilmesine yol açmıştır (Kayawake vd., 1991; Visvanathan vd., 1997). Bu gelişmede, membranlar hava/gaz difüzörleri üstünde reaktör içerisinde askıda tutturulmuştur. Arıtma için gerekli gazı sağlayan difüzörler yer almakta ve birikmiş katıları gidermek için membranın yüzeyini temizler.

İlk olarak membran biyoreaktörler (MBRs) 1980'lerin sonuna doğru gelişmeye başladı ve gri su uygulamasında endüstriyel ve ticari uygulamalar için geri dönüşüm amaçlı kullanılabilecek yüksek kaliteli su üretiminde kullanılmaya başlandı. Son zamanlarda MBRs su geri dönüşümü ve düşük toplam askıda katı (TAKM) ve biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ)'nda suların deşarjına ihtiyaç duyulması ve/veya daha gelişmiş çevresel düzenlemeleri karşılamak için evsel atıksuların arıtımında da uygulamalar artmıştır. İlave olarak, MBRs klasik arıtma süreçlerinin kullanımında alan sınırlaması olan yerlerde de cazip prosesler olmaktadır.

Günümüzde membran biyoreaktör (MBR) teknolojisi, hem evsel hem de endüstriyel atıksuların arıtımında hızlı bir şekilde gelişmektedir (Wallis-Lage ve Hemken, 2003; Sutton, 2003; Van Lier, 2008). Bu atıksular genellikle yüksek oranda biyolojik olarak

ayrışabilir orta derecede konsantre özelliktedirler. Ancak birçok atıksu mikrobiyal kütlenin kararlı oluşumunu sınırlayan özelliklere sahiptir. Böyle koşullar için membran, anaerobik atıksu arıtma sisteminde yoğunlaştırılmış aktif biyomas için alternatif bir yol olarak çamur yaşını artırır.

1990'lı yıllardan beri MBRs'nin endüstriyel uygulamaları, yağ, besin, şarap ve ilaç, gibi kompleks organik maddeleri içeren proses atıksularından azot gideriminde kullanılmaktadır (Sutton, 2003; Buckles vd.,2003).

Membranla birleştirilmiş biyoreaktörlerde enerji tasarrufu sağlamak için, jet havalandırmanın kullanımı araştırılmıştır (Yamagiwa vd., 1991). Bu membran modülün en önemli özelliği sıvı jetinin oluşması için sıvı resirkulasyonun yapılmasıdır. Bu durumda havalandırma ve filtrasyon sadece bir pompa ile sağlanabilir. Jet havalandırma, önemli oranda havanın bir sıvı içerisine verilmesi, bir gaz tabakası içerisinde geçtikten sonra bir sıvı jet prensibinde çalışmaktır. Bu teknik ile muhtemel oksijen/metan ve benzeri gazların transferinin sınırlı miktarı, küçük ölçekli uygulamalar için bu süreci kısıtlar. Ancak sadece bir pompa kullanılması, onu mekanik olarak daha basit duruma getirir ve bu nedenle küçük sistemlerde faydalı kılar.

Membran tıkanmaları önlemek için hava/gaz ile geri yıkama tekniğinin geliştirilmesi, hem arıtma hem de hava difüzörleri için membran kullanımının artmasına yol açmıştır (Parameshwaran vd., 1998). Bu yaklaşımda membran modüllerinin iki seti havalandırma tankında batık halde yerleştirilmektedir. Süzüntü bir setten çıkarılırken, diğeri ile geri yıkama için basınçlı hava temin edilir. Döngü alternatifli olarak tekrarlanır ve havalandırma tankında, karışım sıvısının yeterli havalandırmasını sağlayan, sürekli bir hava akışı vardır.

Membran bağlanmış biyoreaktörlerin başlıca amacı yüksek kalite çıkış suyu sağlayan biyolojik süreçlerinin verimini artırmaktır. Çünkü biyolojik arıtma ve membran ayırma ayrı süreçler olduğundan, birleşik MBR süreci nispeten karmaşıktır. Klasik aktif çamur ve MBR süreçlerinin atık çamur özellikleri kıyaslandığında, MBR atık çamurunun susuzlaştırılması klasik süreçlerle kıyaslanmasının zor olduğunu göstermiştir. Bu durum yüksek organik madde içeriği ve hücre dışı polimerlerinin aşırı üremesine bağlanmıştır (Parameshwaran, 1997).

Aerobik süreçlerde uygulanan membranlar son yıllarda anaerobik proseslerde de kullanılmaya başlanmıştır. İlgi anaerobik membran biyoreaktörlerin gelişimine odaklan-

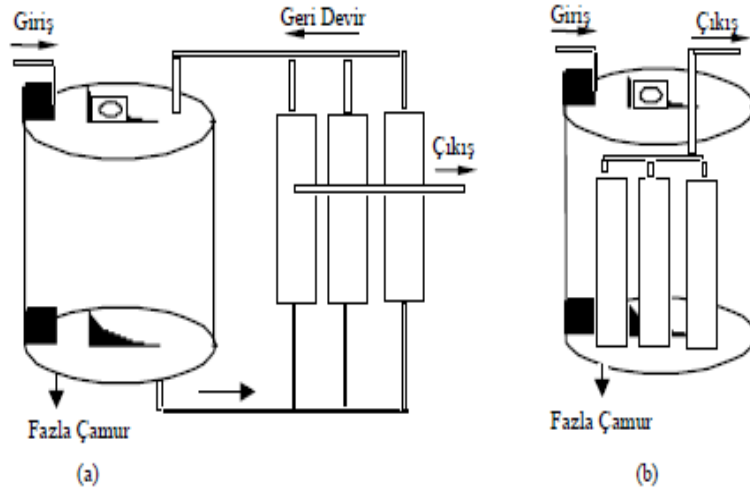
mıştır. Bu reaktörler bir filtrasyon ünitesi ile bir anaerobik reaktörün birleşiminden oluşmaktadır. Filtrasyon ünitesi olarak membranlar ya anaerobik reaktör içerisine batık şekilde veya reaktör dışında reaktöre bağlı şekilde geliştirilmiştir.

Yüksek askıda katı içeren atıksuların arıtımında batık veya harici anaerobik süreçle birleştirilen anaerobik membran biyoreaktör (AnMBRs) uygulaması, mezbaha atıksuları, birincil ve ikincil çamurlar, sentetik madde olarak selüloz, hayvan gübresi gibi farklı maddeler kullanılarak çalışılmaktadır.

Son yıllarda, Lin vd. (2011) tarafından laboratuvar ölçekli bir batık Anaerobik MBR 7 ay boyunca işletilmiştir. Kararlı durumdaki işletme periyodu süresince kek tabakası ve çamur karışımının karakteristiği sistematik olarak incelenmiştir. Filtrasyon testleri, partikül boyut dağılımı (PSD) analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), klasik optik mikroskobu (COM) ve Konfokal Lazer Scanning Mikroskobu (CLMS) gözlemleri, FTIR spektroskopisi, enerji yayımlı X-Ray analizeri (EDX), bağlı EPS ve mikrobiyal topluluk yapısı analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

1.2. Membran Biyoreaktör Modülleri

Membranların biyoreaktöre nasıl entegre edileceğine göre, iki MBR proses konfigürasyonu tanımlanmıştır. Bunlar ya reaktöre dışarıdan (Sıvı / biyokütle ayrımının çapraz akışlı membran filtrasyonu ile ayrı bir ünite de gerçekleştiği) harici ya da sıvı/biyokütle ayrımının biyoreaktör içinde batık membranlar ile gerçekleştiği batık şekilde entegre edilmektedir (Şekil 1.2).



Şekil.1.1 Membran Biyoreaktörler, a) harici ve b) dahili (batık) membran biyoreaktör (Hasar, 2001)

Harici MBRs modülleri reaktörün dışında yer alır ve membranı kapsayan bir resirkülasyon göngüsü üzerinde sıvı karışım sirküle edilir. Batık MBRs modüllerinde ise membranlar sıvı karışımında batık olarak reaktörün içine yerleştirilir. Dış bağlantılı MBRs'ler, daha yüksek operasyonel Trans-Membran basıncı (TMP) ve istenen teğet akım hızına ulaşmak için yüksek hacimsel akım gerektirdiklerinden dolayı, çok daha yüksek enerji ihtiyacına gerek duyarlar. Ayrıca dış bağlantılı aerobik MBRs için pompa-lama gereksinimleri, %20-40 sadece havalandırma olmak üzere, toplam enerji tüketimi-nin %60-80'den oluşmaktadır (Gander vd., 2000). Ancak dış bağlantılı reaktörler, batık teknoloji ile kıyaslandıklarında, sonraki durumda reaktörden membran ekstraksiyonuna ihtiyaç duyulduğu için, membran modüllerinin temizleme işlemi daha kolay gerçekleştirilir.

Batık MBR ler daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Fakat düşük membran yüzey kes-me seviyeleri sağladıklarından, daha düşük süzüntü akıllarında işletilirler. Bu daha fazla membran yüzey gereksinimleri anlamına gelir. Günümüzde ticari uygulamaların çoğu, düşük enerji gereksinimlerinden dolayı batık konfigürasyonlara dayanmaktadır (Judd, 2006).

MBR'ler batık konfigürasyonları, dışsal konfigürasyonları ile kıyaslandıklarında nisbetten düşük enerji gerektirmeleri nedeniyle, daha fazla tercih edilmektedir. Ancak, Anaerobik MBR'ler için durum çok net değildir.

Anaerobik MBR'ler, düşük mikrobiyal büyüme oranlarından dolayı, yüksek organik yüklemelerde verimli bir arıtma sağlamak için daha yüksek biyokütle konsantrasyonlarında işletilmeleri gerekir. Böyle koşullarda, kek tabakası oluşumu süzöntü akısının belirlenmesinde anahtar faktör olarak gösterilmektedir. Kek oluşumunun minimize edilmesinde, daha yüksek kesme hızlarının uygulanmasıyla harici MBR'lerde daha yüksek süzöntü akısı sağlanır. Ancak çamur özelliklerindeki değişimler, muhtemelen operansiyonel kesme hızı çıkmazını oluşturan, yüksek yüzey kesmenin faydalarını ortadan kaldırmaktadır.

Anaerobik membran biyoreaktörler ile yapılan birçok araştırma harici modüller ile gerçekleştirilmiştir (Liao vd., 2006). Ancak membrandan geçen çürütücü suyunun potansiyel negatif etkisi, pompalar ve vanalar bazı endişeleri artırmaktadır.

Atıksu arıtım uygulamalarında kullanılan membran gözenek boyutları 0,03-0,05 µm aralığında olmaktadır (Stephenson ve diğ ., 2000).

1.3. Membran Biyoreaktörlerin (MBRs) Avantaj ve Dezavantajları

1.3.1. Membran biyoreaktörlerin avantajları

Bir membran proseslerinin kullanımında, tesisin az alan kaplaması, arıtılmış suyun kalitesi, az çamur üretimi ve işletme esnekliği gibi birçok avantaj vardır.

1.3.1.1. Arıtılmış su kalitesi

Klasik aktif çamur proseslerindeki temel problem çamurun çökmesidir. Bu mikrofloranın kötü flokleşmesi veya filamentli bakterilerin çoğalmasına neden olur. Katı ve kolloidlerin tamamı membran ayırma işlemiyle giderildiklerinden dolayı, çöktürmede arıtılmış suyun kalitesinde etkili olmaktadır.

Sonuç olarak, sistemin işletme ve bakımı kolaydır. Bir nütrient eksikliği kötü çökme sonucu filamentli organizmaların aşırı büyümesine yol açtığından, endüstriyel atıksularda

önemlidir. Çünkü çıkış suyu, askıda maddeleri içermediğinden, yüzey sularına nihai deşarj edilebilir ve farklı yeniden kullanım amaçları için kullanılabilme imkânı sağlar.

1.3.1.2. İşletme esnekliği

Bir MBR’de çamur yaşı (ÇY) hidrolik bekletme süresinden (HBS) tamamen bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bu yüzden, çok uzun bir çamur bekletme süresinde, nitrifikasyon veya metan bakterileri gibi yavaş gelişen organizmaların tam bekletilmesi sağlanabilir ve bu durum büyük bir işletme esnekliği sağlar.

1.3.1.3. Düşük alan ihtiyacı

Hacimsel kapasiteleri tipik olarak yüksektir. Çünkü çöktürme kalitesinden bağımsız olarak yüksek bir çamur konsantrasyonu sürdürülebilir. İki saatten daha düşük HBS’lerde olumlu olarak uygulanmaktadır (Chaize ve Huyard, 1991) ve hacimsel yüklemdeki dalgalanmalar arıtılmış su kalitesi etkilemez (Chiemchaisri vd., 1993).

MBR çamuru ve klasik aktif çamurun flok boyut dağılımı üzerindeki bir analiz, MBR’deki flok boyutu 100µm’den çok daha küçük olduğu ve küçük bir aralıkta yoğunlaştığını göstermiştir. Diğer bir yandan, klasik aktif çamur prosesindeki flok boyutu 0,5 den 1000 µm aralığında değiştiğini göstermiştir (Zhang vd., 1997). MBR’lerdeki daha küçük floklar daha yüksek bir oksijen ve/veya karbon substrat kütle transferi ve böylece sistemde daha yüksek aktivite sağlanabilir. Ayrıca MBR’lü alanlarda çok büyük tasarruf sağlanmaktadır. Çünkü yeniden kullanılabilir kaliteye ulaşmak için ikinci çöktürme araçları ve nihai arıtmaya ihtiyaç olmamaktadır.

1.3.1.4. Yüksek oranda ayrışma

Arıtma verimi, ayrışmayan polimer maddelerin sızmasının önlenmesiyle artar. Eğer bu polimer maddeler biyolojik olarak ayrışabilirse, arıtma prosesindeki maddelerin biriminde bir azalma gerçekleşmesi ile bozulabilir. Diğer yandan yalnızca membranlar ayırma ile giderilemeyen düşük molekül ağırlıklı çözünmüş organik maddeler, mikroor-

ganizmalar ile bozulabilir ve gazlaştırılabilir veya arıtılmış suyun kalitesinin artırılması sayesinde, bakteriyel hücre bileşikleri olarak polimerlere dönüştürülebilir.

Yüksek biyokütle konsantrasyonu ve biyoksidasyonun bir ekzotermik proses olması nedeniyle, maksimum aktif sıcaklık aralığında sıcaklık artışı muhafaza edilebilir. Maksimum büyüme oranı, aktif çamur sisteminde gözlenen aktivitenin yaklaşık beş katı daha yüksektir. Reaktor hacminin her m³'ne dayalı olarak yüksek biyokütle konsantrasyonu ile kombine yüksek aktivite, klasik dönüşüm oranlarından 10–15 kat daha yüksek dönüşüm hızları meydana gelir (Buisson vd., 1997).

1.3.1.5. Düşük çamur üretimi

Membranlardaki çalışmalar çamur üretim oranlarının çok düşük olduğunu göstermiştir (Tablo 1.1). Chaize ve Huyard (1991) evsel atıksuların arıtımında, çamur yaşı 50–100 gün olduğunda, çamur üretiminin büyük oranda azaldığını göstermişlerdir. Bu durum, genellikle reaktördeki düşük F/M oranı ve daha uzun çamur yaşı ile açıklanır.

Çamur susuzlaştırma hücresel polimer şekillenmesini sağlar (Parameshwaran, 1997). Ayrıca mikrobiyal aktivitenin çamur yaşı artışı ile değişebileceği değerlendirilmiştir. Fakat bu konuda yayınlanmış çok az bilgi vardır. Mikroorganizma popülasyonu üzerinde önceki mikroskobik gözlemler çamur yaşının artmasıyla filamentli bakterilerde azalış, rotifer ve nematotlarda ise artış olduğunu göstermiştir (Praderier, 1996; Pliankarn, 1996).

Tablo 1.1. Evsel atıksu arıtımında klasik aktif çamur sistemi (AÇS) ve membran biyoreaktörlerin (MBRs) çamur üretimlerinin kıyaslanması.

Proses Tipi	Çamur Yaşı (gün)	Çamur Üretimi	Referans
AÇS	10-20	0.7-1 KgMLSS/Kg BOI ₅	Hsu ve Wilson, 1992
AÇS	14	0.7-1 KgMLSS/Kg BOI ₅	E.I.A, 1994
AÇS	33	0.6 KgMLSS / Kg BOI ₅	E.I.A, 1994
MBR	25	0.53KgMLVSS /KgBOI ₅	Trouve ve diğ.1994
MBR	50	0.22 Kg MLSS/ Kg BOI ₅	Takeuchi ve diğ. 1990
AnMBR	30	0.8 Kg MLSS/ Kg BOI ₅	Butcher , 1989
AnMBR	150	0.9 Kg MLSS/ Kg BOI ₅	Wen vd., 1999
AnMBR	∞	0.8.-1 Kg MLSS/ Kg BOI ₅	Fuchs vd., 2003
AnMBR	30	0.85 Kg MLSS/ Kg BOI ₅	P.M. Sutton ve diğ. 2004

1.3.1.6. Dezenfeksiyon ve koku kontrolü

Membran filtrasyon prosesinde bakteri ve virus giderimi her hangi bir kimyasal ilavesi olmaksızın yapılabilir (Langlais vd., 1992; Pouet vd., 1994). Çünkü tüm süreç ekipmanları kapatılabilir ve bu durumda koku yayılması oluşmaz.

1.3.2. Membran biyoreaktörlerin dezavantajları

MBR'da arıtma süreci tek bir havuzda gerçekleştiği için sistem mekanik ve kontrol açısından konvansiyonel sistemlere göre daha karmaşıktır. Ancak % 100 otomasyon sayesinde işletim kolaylaşır. İşletim sırasında zamanla membran gözenekleri tıkanır ve arıtılmış su akışı azalır, bunu engellemek için belirli aralıklarda basınçlı hava/su ve kimyasallarla (sitrik asit ve sodyum hipoklorür) gözenekler temizlenir. Tüm bu temizlik işlemi otomatik yapılır. Ancak bu kimyasallar için az hacimlerde de olsa biriktirme amacıyla depolama tankları gerekir.

Anaerobik membran biyoreaktör uygulamalarında temel bir dezavantaj tıkanma olayıdır. Membranların kendisi bir maliyete sahiptir. Bu yüzden kullanım süreleri proses ekonomisini direkt etkilemektedir. Membran temizleme, membran özellikleri ve membran ömrünü etkileyen, uzaklaştırılması gereken kimyasalları üreten, tesis kurulum stopajı ihtiyacından dolayı reaktör işletimini etkiler. Çeşitli faktörler, biyokütle, kolloidler (Choo vd., 2000), çözünebilir organik maddeler (Harada vd., 1994), inorganik çekelti (Yoon vd., 1999) ve hücre dışı polimerik maddeler (Nagaoka vd., 1996; Chang ve Lee, 1998) gibi faktörler membranların veri çalışmalarını sınırlayabilir. Bunlar membran yüzeylerinde birikerek gözeneklerin tıkanmasına, kek oluşmasına sebep olur. Akıyı olumsuz etkiler. Bu maddelerin her birinin nispi önemi kabul edilen işletme koşullarına bağlıdır.

Bu durumda, MBR'lerde katıların birikmesi, genellikle yüzey kesmenin tetiklenmesi ile kontrol edilebilir. Batık bir AnMBR'de bu durum üretilen biyogaz resirkülasyonu ile başarılabılır. Uygulanan gaz debisi kek tabakası gelişiminin kontrol edilmesi için önemli bir işletme parametresidir. Fakat uygulanan sistem için enerji gereksinimlerini etkileyecektir.

Membran maliyetleri ve membranların temizlenmesinde kullanılan kimyasalların maliyetleri de işletmede dezavantajdır. Ayrıca yüksek uygulama gerektirdiklerinden ener-

ji, pompa, ve benzeri maliyetler söz konusudur. Membran günümüzde oldukça pahalıdır. Ancak membran konusundaki çalışmalar daha ekonomik membran üretimi yönündedir.

1.4. Anaerobik Membran Biyoreaktörlerin Performansını Etkileyen Faktörler

Membran bağlanmış biyoreaktörlerin başlıca amacı yüksek kalite çıkış suyu sağlayan biyolojik süreçlerin verimini artırmaktır. Çünkü biyolojik arıtma ve membran ayırma ayrı süreçler olduğundan, birleşik MBR süreci nispeten karmaşıktır. MBR süreçlerini optimize etmek için birçok parametre dikkate alınması gerekir

Bunlar; sıcaklık, çamur yaşı, hidrolik bekletme süresi, çamur özellikleri (Choo ve Lee, 1996a) gibi işletme parametreleri, malzeme ve membran maliyetleri (Kang vd., 2002), enerji maliyeti, membran özellikleri (Kang vd., 2002; Ho vd., 2005), akı ve çapraz akım hızı (CFV) Kang vd., (2002). Trans membran basıncı (Pillay, 1994) vb. parametrelerdir. Ayrıca atık çamurun arıtımı ve uzaklaştırılmasını da dikkate almak gerekir. Yapılan çalışmaları membranların temizlenmesi ve/veya gaz püskürmesi gibi faktörlerde etkili olduğu belirtilmiştir (D.Jeison 2006; Padmasari vd., 2007; Zhang vd., 2007).

Klasik aktif çamur ve MBR süreçlerinin atık çamur özellikleri kıyaslandığında, MBR atık çamurunun susuzlaştırılmasının daha zor olduğu görülmüştür. Bu durum yüksek organik madde içeriği ve hücre dışı polimerlerinin aşırı üretimine bağlanmaktadır (Parameshwaran, 1997). Ayrıca çözünmüş mikrobiyal ürünlerin (Berube vd., 2006) etkisi konusunda çalışılmıştır.

Tüm bu parametreler birbiri ile ilişkili olduğu için, optimizasyon karmaşıktır. Örneğin çamur konsantrasyonundaki bir artış biyolojik aşamayı genişletebilir. Ancak çamur konsantrasyonu belli limitleri aştığı zaman, çamur karışımının viskozitesindeki dramatik artıştan dolayı, süzüntü akısı hızlı bir şekilde azalır ve çamur konsantrasyonundaki bir artış, ayrıca gaz transfer verimini etkileyebilir ve havlandırma için gerekli enerji bu yüzden artar (Praderie, 1996).

Membran filtrasyonunu süzüntü akısı, membranın ham maddesi ve gözenek boyutundan etkilenir. Ayrıca kullanılan basınç, sıvı viskozitesi/türbülansı gibi işletme koşulları ve filtrelenen sıvı karışımın fiziksel özellikleri de akıyı etkiler.

1.4.1. İşletme sıcaklığı, Çamur Yaşı (ÇY) ve Hidrolik Bekletme Süresi (HBS)

Anaerobik Membran biyoreaktör prosesleri genellikle mezofilik (35 °C) ve termofilik (55°C) sıcaklıklarda işletilmektedir (Jeison ve Lier, 2008). Bu sıcaklıklar evsel atıksu çamurları gibi yüksek oranda katı içeren maddelerin arıtılmasında özellikle önem taşır. Biyolojik arıtma süreçlerinin performansı ve stabilitesi çamur yaşı ile ilişkilidir ve membran biyoreaktörler serbest katı üretmek ve daha iyi kalitede çıkış suyu sağlamak amacıyla reaktör içerisine mikroorganizmaların ilavesi bu amaç için kullanılır. HBS ve ÇY'nin eşit olduğu ve yüksek organik yüklü atıksuların arıtılmasında sıcaklık artışı reactor boyutlarını küçültmeye yol açar ve reaksiyon hızlarını artırır. Ayrıca sıcaklık artışı sıvı vizkozitesini artırdığından dolayı, membran akısını artırır. Mezofilik işletmede iki kat kadar ÇY gerektirmesine ramen, Ortam sıcaklıklarında işletilmesi teknik olarak daha verimli değerlendirilmiştir. Anaerobik membran biyoreaktörler için tavsiye işletme koşulları Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Anaerobik membran biyoreaktörler için işletme koşulları (Sutton, vd., 2004)

PARAMETRE	DEĞER
Reaktör çamur yaşı (ÇY)	30- 150
Reaktör Sıcaklığı, °C	20-55
pH	6.5-8.2
MLSS, g/l	2-15
Organik yükleme hızı, Kg/m ³ .gün	0.5-10
Reaktör Uçucu askıda katı madde (UKM), g/l	8- 22.4
Hidrolik Bekletme süresi, gün	0.6-30
Besleme KOI, g/l	2-50

Bir AnMBR biyokütle alıkonulduğundan ÇY artışı gerçekleşirken HBS azalmasına izin verebilir (Wen vd., 2005). Örneğin mezofilik koşullarda işletilen bir anaerobik membran biyoreaktörde 4-6 saat HBS ile 150 gün ÇY sağlanmıştır (Baek ve Pagilla, 2005). Bu imkân daha küçük reaktör tasarımlarına izin verir. AnMBRs'de ÇY ve HBS konusunda veri eksikliği mevcuttur.

1.4.2. Akı, Trans-membran Basıncı (TMP) ve geçirgenlik

Katı-sıvı veya sıvı-gaz ayırımında kullanılan membranların verimleri akıdaki değişim veya işletme moduna bağlı olarak transmembran basıncı izlenerek belirlenebilir. İşletme süzüntü akım hızının sabit basınç sürecinde membran akısı belirlenebilir. Ayrıca akı ve TMP'na bağlı olarak geçirgenlik belirlenebilir.

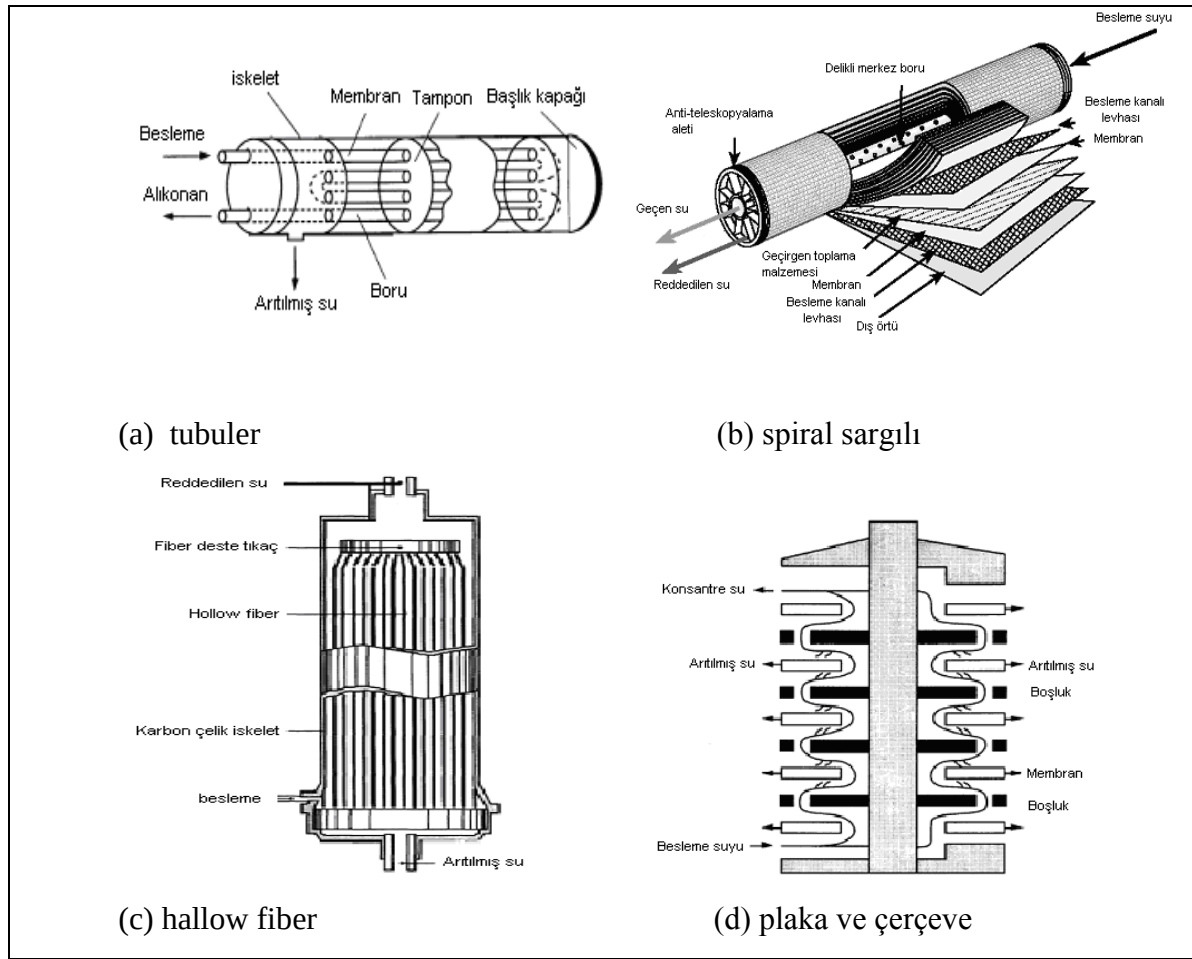
Membran filtrasyon performansı membranın kendi direnci ve sürekli filtrasyon altında sıvı ile oluşan direnç ile etkilenmektedir. Süzüntü akısı, transmembran basıncın bir fonksiyonudur. Basınça bağlı kısımda süzüntü akısı uygulanan basınçla orantılıdır. Basınçtan bağımsız kısımda ise süzüntü akısı başlıca kek tabakası direnciyle ilişkilidir.

Sürekli işletmede, düşük trans-membran basıncındaki süzüntü akısı yüksek trans-membran basıncındaki süzüntü akısından daha yüksektir. Bu katıların sınır tabakasının spesifik direncinin uygulanan emme basıncının göçlü bir foksiyonu olduğunun gösterir ve artan itici kuvvetin dengelenmesinden daha çok filtasyon direncinde bir artış olduğunu gösterir (Benítez vd., 1995; Parameshwaran vd., 1998). Bu durum filtrasyonun düşük trans-membran basınçında gerçekleştirilebileceğini vurgulamaktadır.

1.4.3. Membran prosses tipleri

Bir membran eleme ve sorbsiyon difuzyon mekanizmasının bir kombinasyonu ile bir sıvı veya gazda belli türlerin ayrılmasına izin veren seçici bir bariyer olarak tanımlanır (Tansel vd., 2000). Membran modulunun seçimi elde edilen membran akısında önemli bir rol oynar.

Membranlar kullanılan malzemeye (organik veya seramik), membran tipine, modul tipine filtrasyon yüzeyine (iç veya dış membran) ve ayrıca modul durumuna (statik veya dinamik membranlar) göre sınıflandırılabilirler. Membranlar hallow fiber (HF), tubuler, plaka ve çerçeve(PF) ve spiral sargılı (SW) gibi farklı konfigürasyonlar olabilirler (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Membran Biyoreaktör konfigürasyonları.

Bu teknoloji mikrofiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), ters osmoz (TO), elektrodiyaliz (ED) ve diyaliz vasıtasıyla ürünleri temizler ve benzerleri konsantre eder (Beerlange vd., 2001). Bu sistemleri tipik özellikleri Tablo 1,3’da verilmiştir. Membranlar simetrik veya asimetrik olarak sınıflandırılır. Asimetrik membranlar alt tabakadaki gözeneklerin çapı ile kıyaslandığında üst tabakadaki daha büyük bir gözenek çapı ile gözenekleri aşamalı olarak küçülürler.

Tablo 1.3. Tipik membran sistemlerinin özellikleri (Melamane, 2003).

PARAMETRELER	MF	UF	NF	TO
İşletme Basıncı (Bar)	1-4	2-7	10-40	15-100
Gözenek Boyutu (μm)	0.1-1.5	0.01-0.05	0.001-0.01	<0.0002
MWCO (μm) Aralığı	>300000	300000-100000	200000-20000	<500
Boyut-Kesme Aralığı (μm)	0.1-20	0.005-0.1	0.001-0.01	<0.001

Membranlar hidrofobik, hidrofilik ve inorganik membranlar içinde kendi kimyasal özellikleri ile sınıflandırılırlar. Polisülfon (PS), polietersülfon (PES), ve naylon membranlar hidrofobik özellik gösterirken, selüloz asetat (SA), poliakrilnitrit (PAN), polivinilklorit (PVC), poliamit (PA) ve polivinildeneflorit (PVDF) hidrofilik membranlardır (Melamane, 2003). Mikrofiltrasyon (MF) sıvı veya gazlarda mikron veya daha küçük partikülleri ayırmak için kullanılan bir membran prosesidir. MF membranlarının gözenek boyutları 0,1 ile 1,4 μm aralığındadır. Bu yüzden membran yüzeyindeki askıda katıların birikmesini minimize etmek için tipik olarak düşük transmembran basınçlarında (TMP) işletilirler. Tubular modülleri 0,3 ile 3,3 bar basınç ve 3-6m/s aralığında teğetsel akım hızları yaygındır. MF vasıtasıyla giderilen tipik maddeler, nişasta, bakteri, maya, küf vb dir (Kuberkar vd., 1998). Anaerobik membran biyoreaktörlerde (AnMBRs) yaygın olarak 0,1 μm MF ve UF kullanılır (Choo ve Lee, 1996). UF 2-7 bar basınç aralığında çalıştırılırlar. Gözenek boyutları 0,01 ile 0,05 μm aralığında değişmektedir. 0,005 ile 0,1 μm çaplarındaki çözünmüş tuzlar, düşük molekül ağırlıklı maddeler gibi bileşenleri tutarlar (Parmar vd.,2001).

Akı, tasarlanan kombinasyonlara bağlı olarak değişir. Örneğin seramik mikrofiltrelerde akı en yüksek 100 l/m².saat gösterilirken, batık hollow fiber membran modüllerinde (dış kaplamalı) en düşük akı 3,5 l/m².saat gösterilmiştir. Pürüzsüz yüzeyli membranlar (seramik) daha yüksek akı hızı sağlayan, daha yüksek kek tabaksı adezyon direncinden dolayı önerilmektedir. Uzun ömürleri, güçlü kimyasal temizleme direnç kabiliyeti ve yüksek işletme basıncı seramik membranların avantajlarında bazılarıdır.

Membran akısının sadece membran seçimine (tipi, geometrisi ve benzeri) bağlı olmadığı aynı zamanda TMP, çapraz akım hızı vb gibi işletme koşullarına da bağlıdır (Valero vd., 2005; Aquino vd., 2006). Bu yüzden membran seçimi (yatırım ve değiştirme maliyeti) ve işletme koşulları (enerji ve temizleme gereklilikleri gibi) filtasyon maliyetlerini belirler. Modül düzeni membran yüzeyinde turbülans etkiler. Onun yüksek paketleme yoğunluğundan dolayı, hollow fiber membranlar muhtemelen batık membran biyoreaktörlerde daha çok kullanılmaktadır. Hollow fiber membranlarda, akı azalmasında temel neden, fiberler arasındaki boşluklarda partiküllerin birikmesidir. Fiberlerin farklı paketleme yoğunluğu altında katı partikül birikmesinin dört nedeni olduğu gösterilmektedir. Bunlar; tam dağılma, kısmi birikme, tam birikme ve yüzey tıkanmadır. Eğer bir pa-

ketleme yoğunluğu kritik bir değerde kullanılandan daha düşük ise, fiber boşlukları arasındaki partikül birikmesi önlenabilir (Kiat vd., 1992).

1.4.4. Çapraz akım hızı

Membran biyoreaktörlerde kirlenme kontrolunda teketsel akım hızı kullanılmaktadır. Özellikle batık membranlarda membranın dış çeperinde veya membran etrafındaki teğetsel akım hızının artırılmasıyla, kek tabakasını oluşturan maddeler azaltılabilir. Ancak AnMBR’lerde çapraz akım hızının artışı, biyokütle üzerinde kesme kuvveti etkisine sahip olarak reaktör performansını azatlığı belirtilmiştir (Brockmann ve Seyfried, 1997; Ghyoot ve Verstraete, 1997; Padmasiri vd., 2007). Bira sanayi çıkış sularını arıtan bir anaerobik çürütücünün biyokütle filtrasyonu için TMP’nın aksine akı ve çapraz akım hızı arasında linner bir ilişki bildirilmiştir (Strohwald ve Ross, 1992). Ancak, Ghyoot ve Verstruete (1998) tarafından anaerobik olarak çürütülmüş çamur ile yapılan bir çalışmada, çapraz akım hızındaki bir artışın, süzüntü akısı üzerinde sadece küçük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Yüksek çapraz akım hızına sebep olan kesme, flok kırılmasına ve daha yüksek oranda biyokütle dispersiyonuna yol açabilir. Bu yüzden, biyokütle içinde organik ve gaz kütle transfer artışı, süreç verimini artırmaya yardımcı olabilir.

1.4.5. Biyogaz geridevir ve membran gevşetme (dinlendirme)

Membran biyoreaktörlerde membran kirlenme kontrolu strateji standartı olarak çalışmalar yapılmıştır (Jude, 2006). Biyogaz geridevir kek tabakasının oluşmasını engelleyebilir (Hulse vd., 2009). Ayrıca membran dinlendirme veya aşamalı çalıştırma işlemi membran kirlenme kontrolü üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Ancak hem biyogaz geridevir hem de membran dinlendirmenin membran kirlenme kontrolü üzerindeki etkisi hakkında bilgi sınırlıdır.

1.4.6. Membran temizleme

Membran temizleme işlemi hem fiziksel hemde kimyasal yöntemlerle yapılabilir. Fiziksel temizleme sünger veya benzer bir aygıtla silme, su ile yıkama, gaz püs-

kürtme gibi işlemlerle yapılmaktadır. Kimyasal temizleme işlemi ise uygun kimyasal çözeltilerle (alkol, seyreltik asit, NaOH vb.) yapılmaktadır. Her iki temizleme yönteminde membran kirlenme kontrolünde etkileri sözkonusudur (Kang ve diğ, 2002; Zhang vd., 2007).

1.4.7. İşletme modu

Akı azalışı çeşitli işletme kontrol vasıtalarıyla giderilebilir. Sürekli filtreleme yerine kesikli filtrasyon, kek tabakası basıncını azaltabilir. Böylece direnç azaltılır ve daha iyi akı sağlanır (Cheiemchaisri vd., 1992). Belli durumlarda, süzüntü geri yıkaması ile ayrıca desteklenebilir (Trouve vd., 1994). Sürekli işletme ile kıyaslandığında, hava ile geri yıkamalı, kesikli işletme üzerinde yapılan kapsamlı çalışmalar akı hızının arttığını göstermiştir (Visvanathan vd., 1997; Parameshwaran, 1997).

1.4.8. Viskozite

Süzüntü ve sıvı karışımın viskozitesi süzüntü akısını etkiler. Süzüntü viskozitesindeki bir artış filtrasyon akısını etkiler. Süzüntü esasında akı başta işletme sıcaklığından etkilenir. Ancak çamur viskozitesi de ayrıca dolaylı olarak akıyı etkiler (Praderie, 1996). Membran yüzeyi çevresinde türbülansın derecesi ve ters akım sırasında membran yüzeyi boyunca hızın derecesi, konsantrasyon ile etkilenmiş döngüde, çamur viskozitesiyle etkilenebilir.

Krauth ve Staab (1994), aerobik çamur için çamur konsantrasyonu ile viskozite arasında exponansiyel bir denge önermiştir. Ayrıca anaerobik için de benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Ross vd., 1990). Magara ve Itoh (1991) bir akı sınırlaması üzerinde biyokütle konsantrasyonunun etkisini açıklamak için, yarı-logaritmik bir ilişkinin kullanılabileceğini göstermiştir.

1.4.9. Mikrobiyal aktivite

Harici membran biyoreaktörlerde membran kirlenmesini azaltmak ve yüksek oranda akıyı sağlamak yüksek sıvı hızları uygulanmaktadır. Bunu sağlamak için büyük hacimli

pompalar kullanılmaktadır. Membran pompası ile sıvı geri devir partikül boyutunun küçülmesine neden olmaktadır (Meng vd., 2009; Gao vd., 2011). Anaerobik flok ve granüllerde hidrojen transferi sırasında, kırılma ve dağılma gerçekleşir. Hidrojen üreten bakteriler metan üretimini düşürebilir. Onun için hidrojen kısmı basıncını düşük tutmak için metan üreten bakteriler ile hidrojen üreten bakteriler arasında bir denge sağlanması gerekir. Klasik anaerobik sistemlerle kıyaslandığında AnMBR’de mikrobiyal aktivite nispeten daha düşüktür (Gao vd., 2011).

1.4.10. Membranların kirlenmesi/tıkanması

Membran kirlenmesi işletme sırasında membran yüzeyinde ve/veya gözeneklerinde meydana gelir. Birçok farklı mekanizma ile kirlenme gerçekleşmektedir. Bunlar, membran yüzeyinde kek oluşumu, biyofilm oluşumu, jel oluşumu, gözenek tıkanması adsorbsiyon ve konsantrasyon polarizasyonu şeklinde gerçekleşir (Judd 2006; Meng vd., 2009).Çoğu durumda kirlenme direncinde bunlarda biri, birkaçı veya hepsi önemli olabilir. Ancak, sistemde akı üzerinde daha büyük etkiye sahip kirlenme şekillerinin olduğu sistemlerde bazı dirençler ihmal edilebilir (Lim ve Bai, 2003). Bu kirlenme tiplerini daha iyi anlamak için sürücü kuvvetlerinin ne olduğunu bilmek önemlidir. Sürücü kuvvetlere göre membran kirlenme;

Kek oluşumu; TMP’dan kaynaklanan membrana karşı sürüklenme kuvveti ile oluşan membran yüzeyindeki kirlenme tabakasıdır (Mulder 1996).

Biyofilm; net ağını oluşturan polimerleri salgılayan organizmalar tarafından membran yüzeyinde biyopolimerlerin oluşturduğu bir ağıdır (Judd 2006).

Jel oluşumu; membran yüzeyinde polimerik bir ağın oluşumunu ifade eder, ancak jeller polimerler tarafından oluşur ve bu yüzden mikroorganizmalar tarafından aktif değildir. Membran yüzeyinde jel oluşumu hem TMP hemde konsantrasyon polarizasyonu sonucu gerçekleşir (Mulder 1996; Liao vd., 2006).

Gözenek tıkanması; membran gözeneklerinde süzüntü sırasında maddelerin gözenekleri girip sıkışması sonucu oluşur (Mulder 1996; Hasar, 2001).

Adsorbsiyon; hem membranın gözeneklerinde hemde yüzeyinde gerçekleşir (Judd, 2006). Membran yüzeyi ve membrana yakın madde arasındaki çekici kuvvetler ile kontrol edilebilir (Mulder 1996).

Konsantrasyon Polarizasyonu; membran yüzeyine yakın moleküllerin tutulması ile oluşur. tutulan bu moleküller konsantrasyon polarizasyonu alanı içerisinde direnci artırarak membran içerisinde kitle transferinde etkili olur (Mulder 1996).

Biyokütle, kolloidler (Choo vd., 2000), çözünebilir organik maddeler (Harada vd., 1994), inorganik çekelti (Yoon vd., 1999) ve hücre dışı polimerler (Nagaoka vd., 1996; Chang ve Lee, 1998) gibi kirletici maddeler akı azaltıcı etkenler olarak tarif edilmektedir. Bu maddelerin her birinin nispi önemi kabul edilen işletme koşullarına bağlıdır. Ayrıca bu kirletici maddelerin kaynağına göre membran kirlenmesi sınıflandırılabilir (Liao vd., 2006) Bunlar; organik kirlenme, biyokirlenme ve inorganik kirlenmedir.

Organik Kirlenme: besin ile sisteme giren çözünmüş ve partikül halindeki organik maddelerin ve biyolojik bileşenler ile membran yüzeyi arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak akıdaki azalma olarak tarif edilir. AnMBR proseslerindeki biyolojik kirleticiler biyokütle, hücre enkazları, mikrobiyal hücrelerin oluşturduğu kompleks ağlar ve hücre dışı polimerik ürünler (EPS), çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) olarak tarif edilen biyopolimerleri kapsar (Kang vd., 2002; Huang vd., 2009; An vd., 2009). Bu polimerler daha küçük boyutlu olduklarından membran yüzeylerine kolayca tutunabilirler (Meng vd., 2009). Birçok çalışmada membran yüzeyindeki EPS ve SMP, kek tabakası ve biyokirleticilerin oluşmasında önemli rol oynayan bakteriler tarafından salgılandığı belirtilmiştir (Liao vd., 2004; Jang vd., 2005a; Ramesh vd., 2007). Reaktördeki çamur artışı aynı zamanda SMP artışına sebep olduğu söylenebilir. Önceki çalışmalarda, membran kirlenmesinde SMP'nin önemli oranda etkili olduğu belirtilmektedir (Huang vd., 2000; Lee vd., 2003; Meng vd., 2006; Liang vd., 2007). SMP direkt olarak membran süzöntü akısını ve/veya permeabilitesini etkileyen bir kirletici olarak değerlendirilmiştir. Genelde filtrasyon direncinin yüksek SMP içeriği ile lineer olarak arttığı belirtilmiştir (Meng vd., 2006).

EPS karbondihidrat, protein, nükleik esitler, yağlar ve mikrobiyal kumelerin ara boşluklarında ve hücre yüzeylerinde veya dışında bulunan bileşikler ve diğer polimerik bileşikler gibi makromoleküllerin tüm sınıflarını kapsayan genel bir terim olarak kullanılır (Flemming ve Wingender, 2001 ; Huang vd., 2000; Shin ve Kang, 2003). EPS'nin temel içeriği proteinler, karbondihidratlar ve humustur. Ayrıca yağ EPS matriksinde, nisbi multivalent katyonların (Ca^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+}) yüksek miktarları mevcut ve bunlar protein ve humus ile ortaya çıkan negatif yüklü yüzeylerde stabilize ihtiyaçlarından dolayı önemlidir

(Wilén vd., 2008). EPS matriksinin fonksiyonları flok ve biyofilmlerdeki bakteriyel hücrelerin tümünü kapsar (Laspidou ve Rittmann, 2002) ve membran proseslerinde süzüntü akıları için önemli bir bariyer oluşturabilirler.

Inorganik Kirlenme:Membran besinindeki katyonlar gibi inorganik kimyasal bileşenler ile membran yüzeyi arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak akıdaki azalma olarak ifade edilmektedir (Choo ve Lee, 1996; An vd., 2009). Çözeltideki inorganik maddeler membran yüzeyinde birikerek membran gözenekleri içerisinde haps olmaları ile kalıcı kirlenmeye neden olurlar. Ayrıca çözeltideki katyonlar biyokek tabakası içerisinde birikerek kekin daha fazla kalınlaşmasına ve kirlenmenin artışına neden olurlar (Kang vd., 2002; Koyuncu, 2007). Bu membran yüzeyinde biriken biyopolimerler arasında köprü ve/veya metal tuzlarının birikmesi karboksil ve fosfat grupları gibi anyonik grupları yük nötralizasyonuna sebep olabilir (Choo ve Lee, 1996; Seidel ve Elimelech, 2002; An vd., 2009). AnMBRs'de kimyasal veya kalıcı kirlenmeye neden olan kirlenici tipleri struvit ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), dolomit ($CaMg(CO_3)_2$), $K_2NH_4PO_4$ ve kalsit ($CaCO_3$), hidroksiapatit ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) kapsadığı belirtilmiştir (Yoon vd., 1999; Liao vd., 2006; Koyuncu, 2007). Özellikle Ca^{+2} ve Mg^{+2} gibi katyonların varlığı kirlenme tabakasının oluşumunda etkili olmaktadır.

Biyo-kirlenme; Membranda mikrobiyal hücreleri (humik maddeler, lipopolisakaritler ve diğer mikrobiyal ürünler) bir film oluşmasına yol açan makro moleküllerin adsorpsiyonu, Sıvı karışımın mikro florasından oluşan hızlı yapışkan hücreler ile primer adhezyona (yapışma) sebep olan kirlenmedir (Liao vd., 2006; Meng vd., 2009). Bu hücrelere genellikle membran gözeneklerinden büyük olduklarından membran yüzeyinde tutunur ve gelişirler. Farklı birçok türün aşamalı adhezyonu ile bakterilerin gelişmesi ve kolonileşmesi, hücre dışı polimerlerin etkisi, yoğun biyofilmin gelişimi, sürekli yüksek filtrasyon kuvvetinin (TMP) uygulanması, hidrolik kuvvetlere karşı kek tabakasını kalınlaştırır. Biyo-kirlenme ilk fazını anlamak için üç bileşenli bir sistem dikkate alınır. Bunlar; mikroorganizma türleri, karışık populasyonun kompozisyonu, hidrofobisite, yüzey yükü, membran yüzeyi (kimyasal yapısı, yüzey yükü, hidrofobisite, pürüzlülük porozite, gözenek boyutu vs) ve sıvı karışımıdır (askıda madde ve kolloidler, viskozite, basınç, kesme kuvvetleri, sınır tabakası, akı hızı gibi).

Membran kirlenmesi AnMBRs'nın en önemli devavantajıdır. Bunun kontrolü verimi artırır. Anaerobik bakterilerin düşük büyüme hızları dikkate alındığında, sistemler yüksek

biyokütle konsantrasyonlarında işletilirse, muhtemelen AnMBRs teknolojisi fizibil olur. Bu durum, yüksek hacimsel yükleme hızına ve dolayısıyla küçük reaktör hacimlerine imkân verir. Ancak katıların konsantrasyonu, membranın yüzeyine karşı partiküllerin iletim akışını direkt olarak etkiler. Bundan dolayı, membran üzerinde katıların birikmesi, muhtemelen AnMBRs'lerdeki kritik akıyı sınırlandıran en önemli faktördür (An vd., 2009; Meng vd., 2009).

MBRs'lerde katıların birikmesi, genellikle yüzey kesmenin tetiklenmesi ile kontrol edilebilir. Batık bir AnMBRs'de üretilen biyogaz geri devri ile başarılabılır(Hulse vd., 2009). Uygulanan gaz debisi kek tabakasının gelişiminin kontrol edilmesi için önemli bir işletme parametresidir. Fakat uygulanan sistem için enerji gereksinimlerini etkileyecektir.

Anaerobik çamur filtrasyonlu çalışmalarda inorganik membranların yüzeyinde hemen hemen kek tabakasının oluşmadığını göstermiştir. Fakat gözeneklerdeki inorganik kirlenme akıyı sınırlamamada anahtar bir rol oynar (Kang vd., 1996). Organik membranlar içi, çok daha pürüzlü olmaları nedeniyle, 13 µm'lik kek tabakası oluşur. Ancak birikmiş inorganik kirletici miktarı bir seramik membranda gözlenenin dörtte biri kadardır (Kang vd., 1996). Çünkü organik membranların kullanıldığı MBR'lerde biyokirlenme önemlidir.

Kirlenme etkilerini azaltmak için kullanılan metodlar, işletme koşulları (düşük basınç, yüksek turbulans ve kesikli filtrasyon), geri yıkama (süzüntü ile hava veya her ikisi ile) ve kimyasal temizlemeyi kapsar. Ancak fouling çok aşırı olduğunda ve membran verimi uyumun dışına düştüğünde, membran değiştirilmelidir. Bir eş (isoporous) ve çok gözenek üzerinde dengeli dağılmış gözenekli bir biyokütle filtrasyonu orta derece basınçta düşük konsantrasyonda işletilen hidrofilik düz membran yüzeyinde kirlenme azaltılabilir (Fane ve dig., 1989). Ayrıca biyokütleyi sınırlamak için membranların negatif veya nötr yüklenebileceği önerilmektedir (Shimuzu vd., 1989).

1.5. Anaerobik Membran Biyoreaktör Proseslerinin Ekonomisi

Herhangi bir sürecinin başarısı MBR sürecinin gelişimini engelleyen, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri ve nihai olarak onun ekonomik faydaları ile saptanır. Ancak önemli oranda sıkı yönetmeliklerden kaynaklanan içilebilir su ve atıksu uzaklaştırma ve bertaraf etme maliyetleri tam ölçekli MBR uygulamalarına yol açmıştır (Aya, 1994). MBR süre-

cinde, teğet akım hızı ve filtrasyon basıncını sağlamak için ihtiyaç duyulan enerji maliyeti hemen hemen toplam işletme maliyetlerinin % 90'nı teşkil eder. Ancak batık membranların kullanılması enerji gereksinimleri azaltmaktadır (Yamamoto vd., 1989). Küçük ölçekli atıksu arıtma süreci kıyaslamalarına dayalı olarak, MBR sistemlerin arazi ve alan gereksinimleri ve enerji tüketimi açısından bir aktif çamur sisteminden daha cazip görünmektedir.

ABD'de inşa edilen MBR proseslerindeki maliyet hesabı tecrübelerine dayanarak yaklaşık 3,780 m³/gün'luk debi için ilk yatırım maliyeti (tüm elektrik ve mekanik aksam ve tank inşaaı dahil) yaklaşık 1,700,000 \$'dır (City of Redlands, California, ABD, Water Reclamation Facility Construction, designed by Carollo Engineers and CH2MHILL, ABD).

Membran üretici firmaları membran kasetleri için 5 yıl civarı garanti vermektedirler. Temel işletim ve bakım masrafları elektrik ve kimyasallardır.

rol paneli ile yarı otomatik olarak kontrol edilmektedir. Kontrol panelindeki zaman ayarlayıcı ile gaz akış hızı ve süresi ayarlanabilmektedir. Alt kısımda çamur haznesi ve onun üzerinde iki hazneli batık membran ünitesi ve her bir reaktöre 5 cm aralıklarla çamur numune alma vanaları konulmuştur.

Sistem bir su ceketine sahiptir ve dikdörtgen şeklindeki su ceketinin içerisinde silindirik şekilli anaerobik tank yer almaktadır. Sistemde sabit ısıyı sağlamak için 30 L hacminde termostatlı bir su ısıtma tankı ilave edilmiştir. Su ısıtma tankı, termostatlı bir rezistans ile ısıtılmış ve termostat probu ceket içerisine daldırılarak, ceketteki su sıcaklığının istenen derecede tutulması sağlanmıştır (37 °C). Isıtma tankı içerisine yerleştirilen bir dalgıç pompayla su, ceket sisteme verilmiş ve sürekli devir sağlanmıştır.

Rektörün toplam sıvı hacmi 24,5 litredir. Reaktörde tam karışımı sağlamak için pedallı karıştırıcı (Heidolph, RZR 2041) kullanılmıştır. Karıştırıcının hızı 0-150 rpm arasında değişebilmekte ve değerler dijital ekranda görülebilmektedir. Sistemde 6 adet manometre (Kellgr Drugmeststedhing, PA-21-BA) kullanılmıştır. Manometreler ve gaz akışları bir kontrol paneli vasıtasıyla kontrol edilmiş ve bu panel bilgisayar programıyla (DAQ factory run time) desteklenmiştir.

Akılar için alınan 6 adet terazi (AND, EK 3000i) bilgisayar programına (Rs multi ver. 1.10P) bağlanarak, anlık akı ve basınç değişimleri izlenmiştir (Resim 2.4). İki anaerobik batık membran biyoreaktör, aynı anaerobik sistem içerisinde oluşturularak sistemde oluşan gazların ayrı ayrı toplanması sağlanmıştır. Gaz geridevri kısmında oluşan gazın geri devri için bir gaz düzeneği oluşturulmuştur.

Sistemde gaz toplama balonları, 3 adet manometre ve teflon diyaframlı hava pompaları kullanılmıştır. Gaz geridevri ni sağlamak gaz geridevri nin uygulanacağı kısma 1mm göz genişliğine sahip olan membran difüzörler yerleştirilmiştir. Bu amaçla, bir hazır membran difüzörü 6 cm çapında kesilmiş ve önceden hazırlanan fiber haznelere preslenerek 4 cm çapında membran difüzörler oluşturulmuştur. Hazırlanan difüzörler reaktörün biyogaz geri devri uygulanacak kısmına monte edilmiştir (Resim 2.1).



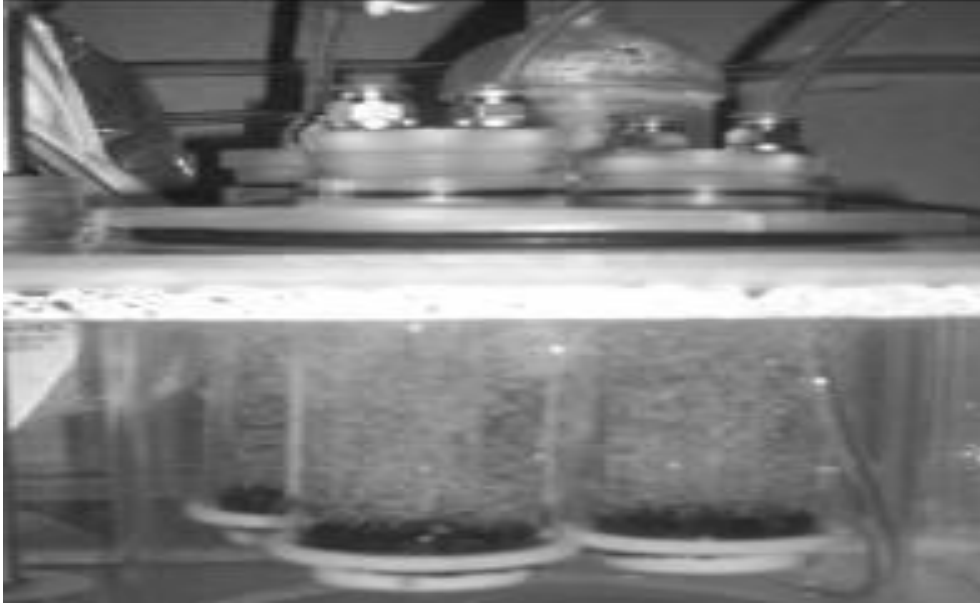
Resim 2. 1. Sistemde kullanılan membran difüzörler (a) ve bağlantıları (b).

Reaktöre, numune alma vanaları ve proses besleme tankı (20 L) bağlanmıştır. Proses besleme tankı içerisine mini dalgıç pompa yerleştirilerek U borusu sistemine göre çalışan bir düzenek vasıtasıyla sistemdeki suyun akı şartlarında aynı seviyede kalması sağlanmıştır (Resim 2.2).

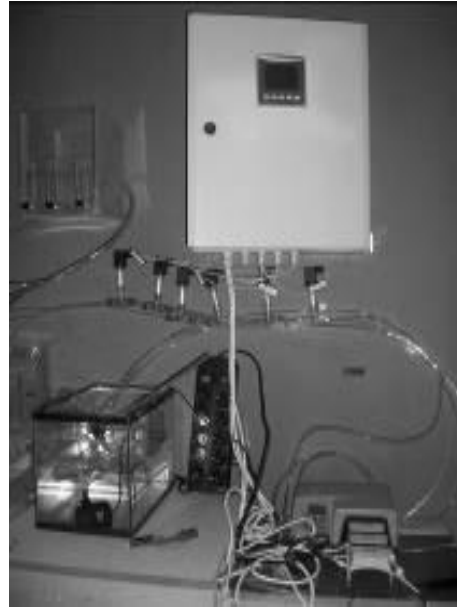
Sistemin sızdırmazlık deneyleri ve gaz akış düzeneği ile gaz difüzörlerinin çalışması saf su kullanılarak kontrol edilmiştir. Resim 2.3’de düfüzörlerdeki hava akışı görülmektedir.



Resim 2. 2. SAnMBR ve sitemdeki teçhizatın toplu resmi



Resim 2. 3. Biyogaz geridevri nde kullanılan difüzör sisteminin kontrolü.



Resim 2. 4. Anlık trans-membran basıncı ve akışı ölçebilen online otomasyon sistemi.

2.2. Membran Modüllerinin Oluşturulması

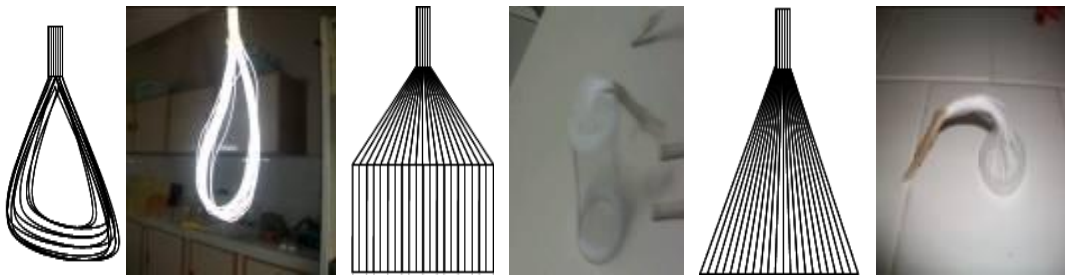
Sistemin sızdırmazlık testleri ve bağlantı kontrolleri yapıldıktan sonra farklı geometrik şekillerde membran modülleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan membranın özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir. ZENA membran (Zena Membranes, Çek) tarafından

Üretilen 60 cm boyundaki bir hallow fiber membran modülü kesilerek fiberleri çıkartılmış ve her bir batık membran kısımina, toplam yüzey alanları eşit ve 54cm² olan silindir, huni ve U şekli olmak üzere ikişer adet membran modülleri oluşturulmuştur.

Tablo 2.1. Membran zellikleri.

Membran tipi	Hollow fiber – P5
Üretici Firma	Zena Membranes
Membran Modül Yüzey alanı	54 cm ²
Membran materyali	Polipropilen
Por apı	0.1 µm
Tipik akı	150 l/m ² h, 1bar 15°C *
ID/OD	210/280 µm
pH direnci	2-11
Fiber parçalanma basıncı	>5.5 bar
Fiber yıkım basıncı	>3.5 bar

Membran modüllerinin yapıştırılmasında iki karışımlı özel bir yapıştırıcı kullanılmıştır (3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive 3501). Silindir ve huni membran modülleri için fiber malzemeden hazırlanan 4,5 cm çapında, 4 mm x 2,5mm et kalınlığındaki çember halkalar, 1mm çapında ve 1mm aralıklarla delinmiş, fiberler iki delik içerisinden U şekli geçirilmiş ve 19 cm etkili fiber uzunluğuna sahip modüller hazırlanmıştır. Modüller kuruduktan sonra gergin konuma getirilmesi için halkalar plastik çubuklarla desteklendi. U şekli modüllerde fiber halkalar kullanılmamıştır (Resim 2.5).



Resim 2. 5. Membran modülleri (şekil ve fotoğrafları).

Hazırlanan modüllerde herhangi bir sızdırmanın olup olmadığını belirlemek amacıyla sızdırmazlık testleri yapılmıştır. Bu test sürecinde modlere trans-membran basıncı uygulanarak, pompa çıkışında akının olup olmadığı kontrol edilmiştir. Membran modülleri hidrofobik özellik göstermektedir ve hidrofilik hale getirilmesi sağlanmıştır.

Membranların hidrofilik hale getirilmesi için modüller, 4 saat süre ile % 40'lık (v/v) etil alkole maruz bırakılmıştır. Hidrofilik hale getirilen membran modülleri temiz su membran akılarının belirlenmesi amacıyla deiyonize su kullanılmıştır. Modüller sızdırmayacak şekilde peristaltik pompalara bağlanarak akılar alınmış ve kaydedilmiştir. 14 KPa trans-membran basınçtan daha büyük basınçlarda hemen hemen akı sabitlenmiştir. Deionize suyun dinamik vizkozitesi ve akılar dikkate alınarak temiz su membran dirençleri belirlenmiştir. Bu işlemde aşağıdaki formül kullanılmıştır (Lee vd., 2001).

$$J = \text{TMP} / (\mu \cdot R_m) \quad (2.1)$$

Burada;

J : Membrandan geçen süzüntü akısı ($\text{l/m}^2 \cdot \text{saat}$),

TPM : Trans-membran basıncı (Pa),

μ : Dinamik viskozite ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) ve

R_m : Membran direnci ($1/\text{m}$)'dir.

Membran modüllerinde temiz su membran dirençleri belirlendikten sonra modüller daha önceden hazır hale getirilmiş anaerobik sisteme Tablo 2.2.'da belirtildiği üzere yerleştirilmiştir.

Tablo 2.2. Modüllerin sembolleri, şekilleri ve yerleştirildiği kısımlar.

	Sembol	Şekli	Reaktördeki yerleşimi
M1	GDS	Silindir Şekilli Modül	Biyogaz geri devirli
M2	GDH	Huni Şekilli Modül	
M3	GDU	U Şekilli Modül	
M4	MS	Silindir Şekilli Modül	Biyogaz geri devirsiz
M5	MH	Huni Şekilli Modül	
M6	MU	U Şekilli Modül	

Sistemde kullanılan sentetik atıksuyun bileşimi Tablo 2.3' de verilmiştir. Reaktör çamuru önceden sentetik atıksu ile aşı çamurunun alıştırıldığı 37°C de işletmeye alınan bir UASB reaktöründen alınmıştır. Efes Pilsen bira fabrikası (Adana) anaerobik Atıksu arıtma tesisinden alınan çamur karakterize edilerek, sistemde aşı çamuru olarak kullanılmıştır. sentetik atıksu ve aşı çamuru özellikleri Tablo 2.4'de görülmektedir. Reaktör 1/3 oranında aşı/sentetik atıksu karışımıyla doldurulup, bu aşamada 1200 mg/l konsantrasyondaki sentetik atıksu ile beslenmiştir.

Tablo. 2.3. Sentetik atıksuyun kimyasal bileşimi.

Bileşenler	Miktar (mg/l)
Sodyum Asetat CH_3COON	6000
Amonyum klorür (NH_4Cl)	1350
Potasyum di hidrojen orto-fosfat (KH_2PO_4)	355
Magnezyum Sülfat (MgSO_4)	384
Potasyum klorid (KCl)	296
EDTA	400
Sodyum bikarbonat (NaHCO_3)	250
Kalsiyum klorür ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	65,6
Amonyum molibdat ($(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7 \text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$)	8,8
Bakır sülfat ($\text{Cu SO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$)	14,4
Demir sülfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	40
Kobalt klorür ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	12,8
Çinko sülfat ($\text{Zn SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	176

Tablo.2. 4. Sentetik atıksu ve Aşı çamurunun özellikleri.

Parametre	Birim	Konsantrasyon	
		Atıksu	Aşı Çamuru
KOI	mg/l	4500-5000	16000
AKM	mg/l	1250	7280
TKM	mg/l	2740	8100
TUKM	mg/l	783	6800
TN	mg/l	50	270
TP	mg/l	4	52
Sülfat	mg/l	42	36
Klorür	mg/l	97	101
PH		7,7	7,6
Alkalinite	mg/l CaCO_3/l	2078	2450

Alıştırma devresi süresince 2 (iki) litre hacmindeki akı toplama kapları terazilere yerleştirilerek sistem düşük akı şartlarında (3devir/dakika) çalıştırılmıştır. Alıştırma safhası süresince biriken biyogaz, vakum pompası vasıtasıyla reaktörün gaz geri devirli kısmına yerleştirilen her bir membran için 0,5 l/dk akış hızı sağlanarak verilmiştir. Alıştırma aşamasında reaktörde pH, alkalinite, KOİ, TKM TUKM ve AKM Standart Metotlar'a göre periyodik olarak izlenmiştir (APHA, 1992). Alıştırma periyodu sonunda yeterli gaz oluşumunu sağlandığının belirlenmesi üzerine sistem işletmeye alınmıştır. Alıştırma devresi ve sistem optimizasyonunun ardından, sistem Tablo 2.5'da belirtilen şartlar altında işletmeye alınmıştır.

Tablo 2.5. SAnMBR sistemi işletme şartları.

Parametre	Ortalama değer	Birim
Sistem		
Karıştırma hızı	30	rpm
Gaz deri devri	0,5	L/dk
Sıcaklık	37	⁰ C
Difüzör çapı	1	mm
Fiberler arası mesafe	1	mm
İlk gün hacimsel organik yük	4.195	kg KOİ/m ³ .gün
İlk gün HBS	1.24	gün
Sentetik Atıksu		
pH	7,014	-
Alkalinite	1200	mg CaCO ₃ /L
KOİ	4600	mg/L
TOK	1465	mg/L
SO ₄ ⁼	320	mg/L
TN	81	mg/L
TP	15,54	mg/L
KOİ/N/P	296/5.2/1	
Reaktör Çamuru		
Toplam KOİ	6200	mg/L
Alkalinite	1600	mg CaCO ₃ /L
pH	6.93	-
TKM (MLS)	4360	mg/L
AKM (MLSS)	2440	mg/L
TUKM (MLVSS)	2040	mg/L
TUA	132	mg HoAc/L

2.7. Yapılan Analizler ve Analiz Yöntemleri

Çalışma süresince toplam azot (Kit no:14537), sülfat (Kit no:14791), Toplam uçucu asitler (TUA) (Kit no:01763) ve toplam fosfor (Kit no:14543) Nova 60 Spectraquant® (Merck) test kitleri kullanılarak spektrofotometre ile belirlenmiştir. Çalışmadaki pH değerleri, iletkenlik ve NH₄-N konsantrasyonları multi parametre cihazı (Mettler Toledo – Seven Multi) ile ölçülmüştür.

Akıların vizkoziteleri, AND Vibro-viskozimetre ile ölçülmüştür. Toplam organik karbon (TOK) ve katıda toplam azot tayini için TOC-VCPN ve TNM-1 (Shimadzu) ile oto örnekleyici (ASI-V, Shimadzu) kullanılmıştır. Alkalinite, KOİ, TKM TUKM ve AKM Standart Metotlar'a göre periyodik olarak izlenmiştir (AWWA, APHA, 1992).

2.3.1. Toplam Katı Madde (TKM)

100 ml iyice karıştırılmış numene sabit tartıma gelmiş ve darası alınmış bir porselen kroze konulmuş ve 103 °C’de etüvde sabit tartıma getirilmiştir. Desikatörde soğutulduktan sonra tartılmış ve aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (APHA, AWWA, WEF; 1992).

$$\text{mg/L Buharlaşıma Kalıntısı} = \text{mg Kalıntı} \times 1000 / \text{ml numune} \quad (2.2)$$

2.3.2. Toplam uçucu katı madde (TUKM)

Porselen krozedeki toplam katı madde (buharlaştırma kalıntısı) 550 °C’de kül fırınında 2 saat süreyle yakılmıştır. Kroze desikatörde soğutularak, tekrar tartılmıştır. Yakma ile meydana gelen kayıp uçucu maddelerin toplamı, kroze kalan maddeler ile toplam sabit kalıntı elde edilmiştir.

$$\text{mg/L Toplam Sabit Kalıntı} = (B - C) \times 1000 / \text{ml numune} \quad (2.3)$$

B= 550 °C’de yakmadan sonraki kroze ağırlığı

C= Sabit tartımdaki boş kroze ağırlığı

$$\text{mg/L Toplam Uçucu Katı Madde} = (A - B) \times 1000 / \text{ml numune} \quad (2.4)$$

A= Buharlaştırma kalıntısı miktarı

B= 550 °C’ de yakmadan sonraki kroze ağırlığı (APHA, AWWA, WEF; 1992).

2.3.3. Toplam askıda katı madde (TAKM)

Çok yüksek konsantrasyonda askıda madde ihtiva eden ve zor süzülen numuneler hariç iyice karıştırılmış numuneden 1 cm²’lik, filtrasyon alanına 14 ml veya daha fazla numune isabet edecek şekilde numune hacmi alınmış, 103 °C’de sabit tartıma getirilmiş ve 0,45 µm’lik filtre kâğıdından vakum altında süzülmüştür. 3 defa 10’ar ml’lik damıtık su ile yıkandıktan sonra vakum kesilerek, membran filtre 103 °C’de 1 saat etüvde kuru-

tulmuş, desikatörde oda sıcaklığına soğutulduktan sonra tartılarak aşağıdaki formüle göre hesaplamalar yapılmıştır (APHA, AWWA, WEF; 1992).

$$\text{mg/L Toplam AKM} = \text{mg askıda katı madde} \times 1000 / \text{numune hacmi (ml)} \quad (2.5)$$

2.3.4. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)

Çözeltiler:

1. Kristal Ag_2SO_4
2. Kristal HgSO_4 (analitik saflıkta)
3. Katı sülfamik asit
4. Sülfürik Asit-Gümüş Sülfat Çözeltisi
5. Standart $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ çözeltisi 0,25 N
6. Standard amonyum -demir-II -sülfat çözeltisi, 0,1 N
7. 0,025 N. Potasyum Dikromat Çözeltisi
8. Ferroin Çözeltisi

20 ml su numunesi veya damıtık su ile 20 ml'ye seyreltilmiş numune 500 ml'lik ağzı rodajlı bir balona alınmış ve 30 ml gümüş sülfatlı sülfürik asit ile 0,4 gr. HgSO_4 ilave edilip karıştırılmıştır. 10 ml 0,25 N. potasyum dikromat çözeltisi ve 30 ml gümüş sülfatlı sülfürik asit çözeltisi yavaşça ilave edildikten sonra balon iyice karıştırılarak derhal soğutucuya bağlanmıştır. Geri soğutucu altında çözelti 2 saat kaynatılarak, kaynama düzgün olması için balonda bir kaç tane cam boncuğu atılmıştır. İki saatlik kaynama periyodu sonunda balon soğutulurken, balondaki çözelti yaklaşık 120 ml. damıtık su ile seyreltilmiştir. Birkaç damla ferroin indikatörü ilave edilerek ve 0,1 N demir amonyum-II-sülfat çözeltisi ile indikatörün rengi kırmızıya dönene kadar titre edilmiş ve mg/L olarak KOİ miktarı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (APHA, AWWA, WEF; 1992).

$$\text{mg/L KOİ} = (\text{Vo} - \text{V1}). \text{N. } 8000 / \text{V} \quad (2.6)$$

Burada;

Vo = Şahide sarf edilen demir amonyum sülfat miktarı

V1 = Numuneye sarf edilen demir amonyum sülfat miktarı

V = Alınan ml numune miktarı

N = Demir amonyum sülfat normalitesi.

2.3.5. Toplam alkalinite

Kullanılan Çözeltiler:

- 1- Fenolftalein Çözeltisi: Metiloranj çözeltisi: 0,5 g metiloranj 1000 ml damıtık suda çözülür.
- 2- Standard 0,02 N. H₂SO₄ çözeltisi
- 3- 0,02 N. Na₂CO₃ Ayar Çözeltisi

5 ml su numunesi alınarak 50 ml.'ye seyreltilmiş ve 3 damla fenolftalein çözeltisi ilave edilerek pembe renk oluşunca, renk gidinceye kadar 0,02 N, sülfürik asitle titre edilmiştir. Dönüm anına kadar sarf edilen asit miktarı kaydedilmiş, aynı numuneye 3 damla metiloranj çözeltisi konarak, tekrar 0,02 N. sülfürik asitle titrasyona devam edilmiş ve sarf edilen asit miktarı kaydedilerek aşağıdaki formülle belirlenmiştir (APHA, AWWA, WEF; 1992).

$$\text{Toplam Alkalinite mg/L CaCO}_3 = B \times N \times 50000 / \text{ml numune hacmi} \times 10 \quad (2.7)$$

Burada:

B, İkinci dönüm noktası sonuna (fenolftalein + metiloranj) kadar sarf edilen mililitre olarak toplam sülfürik asit miktarı. N, sülfürik asit çözeltisinin normalitesidir.

2.3.6. Gaz analizleri

Gazdaki karbondioksit, reaktörlerde biriken toplam gaz ile NaOH çözeltisinden geçen gaz arasındaki farktan hesaplanmıştır. Deneyleri doğrulamak için Madur (GA-21Plus) marka gaz analiz cihazında ayrıca karbondioksit ölçümleri de yapılmıştır. Gaz ölçüm düzeneğinden karbondioksiti alınmış olarak çıkan gaz 5 ml'lik sızdırmaz enjektörlere alınarak etiketlenerek Tablo 2.6'de belirtilen şartlar altında analiz edilmiştir. Gaz kromatografisi ile yapılan analizlerde analitiksel metan standardı Fluka (Katalog No: 02329) kullanılmıştır. Gaz kromatografisinde (Shimadzu 2010 GS, Japan, Resim 2.13),

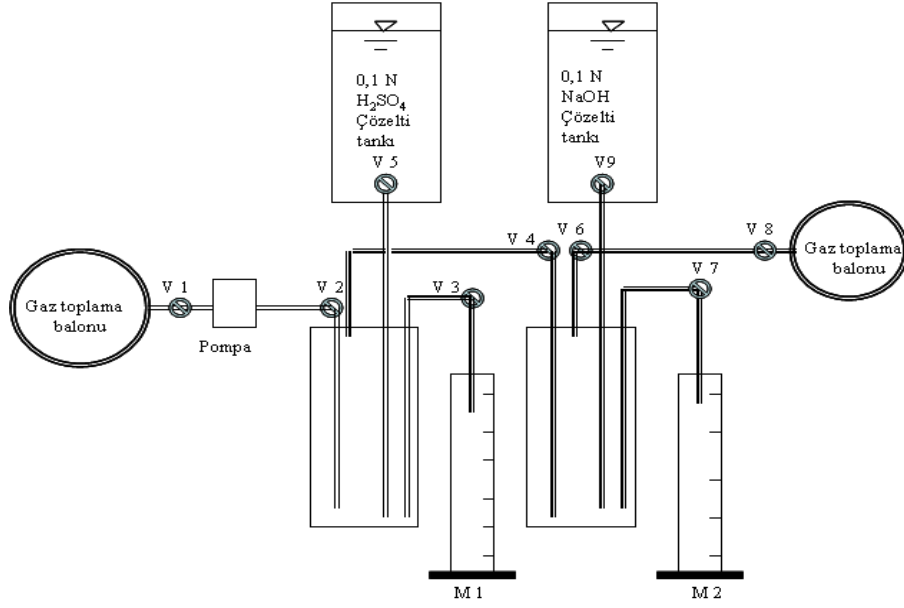
metan standardı ve reaktörlerde oluşan metan miktarlarıyla elde edilen pik alanları hesaplanmış ve konsantrasyonlar bulunmuştur.

Tablo 2.6. Gaz kromatografisinde metan analizi yapmak için optimize edilen şartlar.

Alet özellikleri	
Gaz kromatografisi	Shimadzu 2010 GC
Dedektör	TCD (Termal Conductivity Dedektör)
Kolon	Carbowax
Kolon sıcaklığı	60 °C
Taşıyıcı Gaz	Azot Gazı
Parametreler	
Taşıyıcı Gaz Akış hızı	30 ml/dk
Dedektör sıcaklığı	90°C
Örneğin enjekte edilen miktarı	0,5 ml

2.3.7. Gaz Ölçüm Düzeneği

Toplam gaz ölçümü için sıvı yer değiştirme metodu kullanılmıştır (Şekil 2.2). Toplam gaz hacmini belirlemek için, gaz toplama balonu üzerindeki V1 vanası kapatılarak, balon reaktörden çıkartılmış ve reaktöre yenisi bağlanmıştır. Daha sonra balon hava pompasına bağlanmış ve pompa, tamamen asit çözeltisi ile doldurulmuş 8 L hacmindeki taşıma kabına monte edilmiştir. Bu esnada V2 ve V3 vanaları açık, V4 ve V5 vanaları kapalı konumda tutularak pompa çalıştırılmıştır. Taşıma kapının üzerinde biriken gaz hacmi kadar sıvı taşarak, M1 mezüründe ölçülerek toplam gaz miktarı belirlenmiştir.



Şekil 2. 2. Gaz ölçüm düzeneğinin şematik görünümü.

Toplam gaz içerisindeki karbondioksit miktarını belirlemek için ikinci taşıma kap 0,1 N sodyum hidroksit çözeltisi ile doldurulmuştur. Bu amaçla V2 ve V3 vanaları kapatılarak V5 ve V4 vanaları açılarak asit çözeltisi basıncının etkisi ile taşıma kabı üzerindeki gazın baz çözeltisine aktarılması sağlanmıştır. Bu sırada V6 ve V9 vanaları kapalı, V7 vanası açık konumda tutulmuş ve taşan baz çözeltisi M2 mezürüyle ölçülmüştür. Baz çözeltisi üzerinde biriken gazı önceden vakumlanmış olan balona aktarmak için V4, V6 ve V7 vanaları kapatılarak, V8 ve V9 vanaları açık tutulmuştur. Baz tankından gelen çözeltinin basıncı ile üst kısımdaki gazın balonda toplanması sağlanmıştır.

2. 4. Akı, TMP ve Toplam Membran Direnci

Kullanılmamış temiz membranlarda sabit trans membran basınç koşullarında deionize su vakumlanmış deionize suyun süzüntü akısı ve viskozitesi ölçülerek temiz membran direnci (R_m) belirlenmiştir (Denklem 2.8).

$$J = \frac{TMP}{\eta \times R_m} \quad (2.8)$$

Membran biyoreaktörde sabit TMP'da diğer membran filtrasyon proseslerinde filtrasyonun başlangıç aşamasında hızlı bir akı azalışı oluşacağı beklenir. Farklı filtrasyon

modlarının kirlenme potansiyelini değerlendirmek için sabit basınçta sürekli akı ölçümü izlenmiş ve detaylı hidrolik bir analiz yapılarak Darcy kanunu dayalı toplam direnç tespit edilmiştir (Denklem 2.9).

$$J = \text{TMP}/\eta \times R_t \quad (2.9)$$

Süreç sonunlarında sabit basınçta akı ve dinamik viskozite ölçülerek toplam direnç belirlenmiştir. Daha sonra membran modülleri sistem içerisinde çıkartılarak bir sünger vasıtasıyla oluşan kek sıyrılmıştır. Membran modüllerinde deionize su kullanılarak akı ve viskozite belirlenmiş ve denklem 2.3 kullanılarak spesifik kek direnci dışındaki direnç ($R_m + R_p$) belirlenmiştir.

$$J = \text{TMP}/\eta \times (R_m + R_p) \quad (2.10)$$

Kek direnci dışındaki dirençten ($R_m + R_p$) temiz membran için ölçülen direnç (R_m) çıkarılarak gözenek tıkanması ve yüzeyde absorblanma sonucu oluşan kirlenme direnci (R_p) belirlenmiştir. Denklem (2.11) kullanılarak toplam direnç ve kek direnci dışındaki direncin farkı alınarak spesifik kek direnci hesaplanmıştır.

$$R_t = R_m + R_c + R_p = \text{TMP}/\eta \times J \quad (2.11)$$

Burada, J süzüntü akısı ($\text{l/m}^2.\text{saat}$), R_t toplam membran direnci ($1/\text{m}$), η süzüntü suyunun dinamik viskozitesi (Pa s), R_m temiz membran direnci ($1/\text{m}$), R_p gözenek tıkanması ve adsorbsiyondan kaynaklanan kek direnci dışındaki direnç ($1/\text{m}$), ve R_c ise kek ($1/\text{m}$) direncidir

Membran toplam direncindeki (R_t) değişimler ve TMP verilerine dayalı denklem 2.12 kullanılarak membran modüllerindeki geçirgenlik verileri tespit edilmiştir.

$$J_t = \text{Geçirgenlik} \times \text{TMP} \quad (2.12)$$

2.5. Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler (SMP) ve Hücre Dışı Polimerik Maddeler (EPS)

Günlük olarak aktif çamur numunelerinde ve batık membran deneyleri sırasında membran yüzeyindeki kek tabakasından alınan örneklerde EPS ve SMP analizleri ile elde edilen süzüntülerdeki SMP analizleri yapılmıştır. EPS ve SMP analizindeki en önemli nokta bu iki bileşenin hücreyi parçalamadan birbirinden ayırabilmektir. Bunun için fiziksel-kimyasal (sodyum hidroksit-formaldehit) ekstraksiyon yöntemi kullanılmıştır (Tinggang vd., 2008). Bu metotta kullanılan formaldehit, hücre zarında bulunan nükleik asit ve proteinlerin amino, hidroksil, karboksil ve sülfid grupları ile reaksiyona girerek hücrelerin parçalanmasını engellemektedir. Böylece hücrelerin formlarının korunmasını sağlanır. NaOH ise pH'ı artırarak EPS'nin suda çözünürlüğünü artırır böylece hücreden daha fazla EPS ekstrakte edilmiş olur (Liu ve Fang, 2002). Analizin ilk aşamasında çamur düşük hızda santrifüjlenmiştir (SIGMA Laborzentrifugen GmbH, 3–30 K Model, Germany), böylelikle bakteri hücrelerinin ortamdan uzaklaşması sağlanmıştır. Bu işlem sonunda elde edilen üst sıvı yüksek hızda santrifüjlenmiş (SIGMA Laborzentrifugen GmbH, 3–30 K Model, Germany) ve hücre tarafından ortama salgılanmış olan SMP fiziksel olarak sudan ayrılmıştır. Bakteri hücrelerine yapışık olarak bulunan EPS'nin ayırımı ise yukarıda belirtilen kimyasalların ilavesi ile mümkün olmaktadır. SMP ve EPS'nin ayırımından sonra protein ve karbonhidrat analizleri ile bu bileşenler mg/l olarak bulunmuştur.

Çamurda analiz yapılacak ise ara tanktan 5 ml çamur örneği alınmıştır. Membran yüzeyindeki kek tabakasından analiz yapıldığında ise kek tabakasından belli miktarda su içeriği bilinen çamur tartılarak çözelti şişesine alınmış ve üzerine 5 ml saf su eklenerek analize hazırlanmıştır. 5 ml'lik çamur örnekleri ependorf tüplerine konularak askıda katıların giderilmesini sağlamak amacıyla $4000 \times g$ 'de $4^{\circ}C$ 'de 10 dakika santrifüjlendi. Daha sonra üst faz steril bir tüpe alındı ve $13200 \times g$ ile $4^{\circ}C$ 'de 20 dakika tekrar santrifüjlendi (SIGMA Laborzentrifugen GmbH, 3–30 K Model, Germany). Fiziksel ekstraksiyon ile elde edilmiş bu üst fazda çözünmüş protein ve karbonhidrat analizleri yapıldı (Lowry vd., 1951; Dubois vd., 1956).

Çözünmüş protein ve karbonhidratın toplamı ortamdaki SMP (serbest EPS)'nin değerini vermektedir. Bağlı EPS tespitinde ilk santrifüjden kalan çökelti steril destile su ile tekrar 5 ml'ye tamamlanmış ve 6 µl formaldehit (%37'lik) eklenerek, karışım $4^{\circ}C$ 'de 1 saat süre ile bekletilmiştir. İkinci aşamada 500 µl NaOH (1N) eklenmiş ve karışım $4^{\circ}C$ 'de

3 saat süre ile bekletilmiştir. Bu süspansiyon $13200\times g$, 20 dakika $4^{\circ}C$ 'de santrifüjlenmiştir.

Kimyasal ekstraksiyon ile elde edilen üst fazda da protein ve karbonhidrat analizi yapılmıştır. Bu değerlerin toplamı da bağlı veya ekstrakte edilmiş EPS'nin değerini vermektedir. Protein analizi için Lowry metodu ve karbonhidrat analizi için fenol sülfirik asit metodu (Dubois vd., 1956) kullanılmıştır.

2.5.1. Protein Analizi

Lowry metodunda, analizde kullanmak üzere üç ana çözelti hazırlanmıştır. (A, B ve C çözeltileri). Çözelti A için, 2,86 g NaOH ve 14,31 g Na_2CO_3 saf suda çözölmüş ve 500 ml'ye tamamlanmıştır. Çözelti B için, 1,42 g $CuSO_4.5H_2O$ 100 mL saf suda çözölmüştür. Çözelti C için ise, 2,85 g sodyum tartarat ($Na_2C_4H_4O_6.2H_2O$) 100 mL saf suda hazırlanmıştır. Lowry çözeltisi, bu üç çözeltinin 100:1:1 (A:B:C) oranı ile karıştırılarak ve analizin yapılacağı gün hazırlanmıştır. 0,5 ml örneğe 0,7 ml Lowry çözeltisi eklenmiş ve hızlıca karıştırıldıktan sonra 20 dakika oda sıcaklığında ve karanlıkta bekletilmiş ve bu sırada folin çözeltisi hazırlanmıştır. 5 ml 2N Folin 6 ml saf su ile karıştırılmıştır. 0,5 ml örneğe 0,1 ml folin çözeltisi eklenmiştir. Hızlıca karıştırdıktan sonra oda sıcaklığında ve karanlıkta 30 dakika bekletilmiştir. Ölçümler UV spektrofotometrede, 660 nm dalga boyunda aynı koşullarda hazırlanan şahite karşı iki tekerrürlü olarak okunmuştur. Protein kalibrasyonunda standart protein çözeltisi olarak Bovin Serum Albumin (BSA) kullanılmıştır. Standart proteinden 5-50 mg/L aralığındaki konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır. UV Spektrofotometre'de 660 nm'de okunan absorbens değerlerine karşı konsantrasyon grafiğı çizilmiştir (Lowry vd., 1951).

2.5.2. Karbonhidrat Analizi

Karbonhidrat analizi için "fenol-sülfirik asit metodu" (Dubois vd., 1951) kullanılmıştır. Analizde %80'lik fenol çözeltisi ve derişik % 95-97'lik H_2SO_4 kullanılmıştır. 1 ml numuneye 25 μl % 80'lik fenol ve 2,5 ml H_2SO_4 ekleyip $30^{\circ}C$ 'de 15 dakika su banyosunda bekletildi. Numunelerin rengi içerdikleri karbonhidrat miktarına bağılı olarak açık sarıdan koyu sarıya doğru değışmiştir.

Oluşan renk UV Spektrofotometre’de 490 nm dalga boyunda okunmuştur. Kalibrasyonda standart çözelti olarak glikoz kullanılmış ve standart glikozdan 2-80 mg/l aralığındaki konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır.

2.6. SEM Görüntüleri-EDX Analizleri

Her çalışma periyodu sonunda, anaerobik batık membran biyoreaktör (SAnMBR) sisteminde kirlenmiş membran modülleri çıkarılarak, membran modüllerinin ortasından yaklaşık 1 cm olacak şekilde bir parça kesilmiş ve % 2.5 paraformaldehit çözeltisi ile sabitlenmiştir. Kesilen membran örnekleri 0.1 mol/l’lik Fosfat tampon çözeltisi (PBM) ile pH 7,2’de ve +4 °C’de üç kez yıkanmıştır. Daha sonra su/etanol çözeltisi ile %50, %80, %90, %100) suyu alınmış ve kurutulmuştur. Hazırlanan örnekler altın ve palladium karışımı ile kaplanmış ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Carl ZEİSS, EVO 50 Model, Germany) ile görüntüleri alınmıştır.

Ayrıca temiz membranın ve kirlenmiş membranlardaki kek tabakasının inorganik bileşiminin belirlenmesi için Enerji Diffüz X-Ray (EDX, Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany) analiz cihazı kullanılarak inorganik kimyasal bileşimi belirlenmiştir.

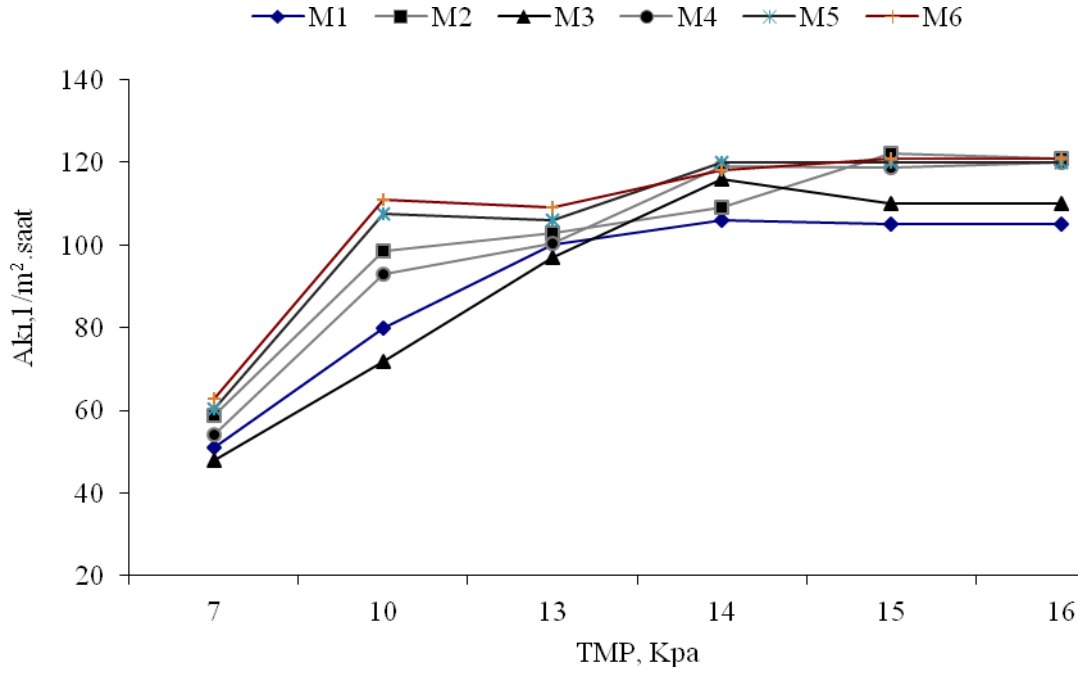
2.7. Partikül Boyut Dağılım (PSD) Analizi

Ortalama 20 gün aralıklarla alınan örnekler bir lazer partikül boyut analizör (Zetasizer Nano-S, Malvern Ins., U.K) (Resim 2.17) ile analiz edilerek partikül boyutu belirlenmiş ve grafiğe geçirilmiştir. Bu amaçla kirlenmiş membran modüllerin üzerinde oluşan kek tabakası, bir sünger vasıtasıyla silinmiş ve kek tabakasının partikül boyutları belirlenmiş ve grafiğe geçirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

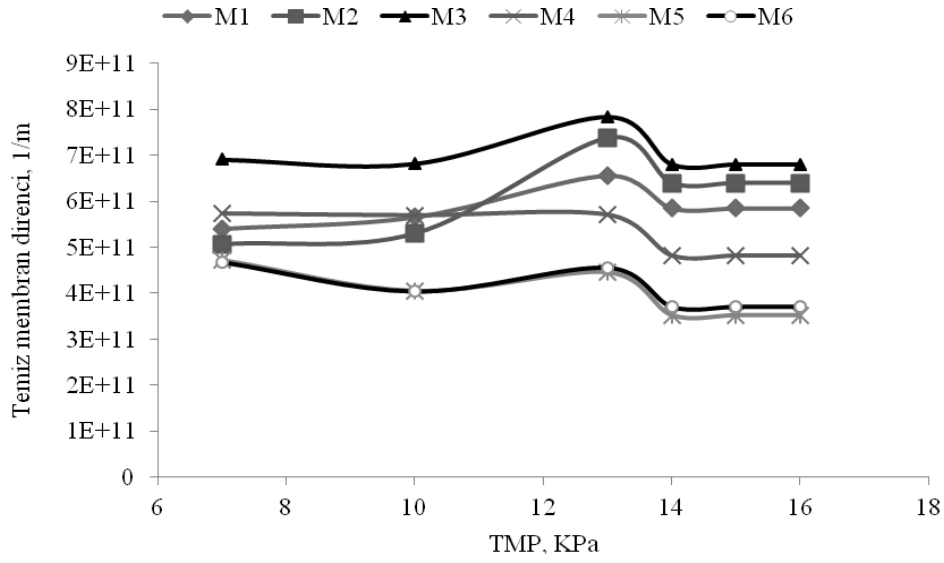
3.1. Sistem Optimizasyonu

Hazırlanan membran modüllerinde temiz su membran akıları şekil 3.1’de görülmektedir. 30 dakika süre ile akılar alınmıştır. 14 KPa trans-membran basıncından daha büyük değerlerinde, akılar $100\text{-}120\text{ l/m}^2\text{.saat}$ aralığında hemen hemen sabitlenmiştir.



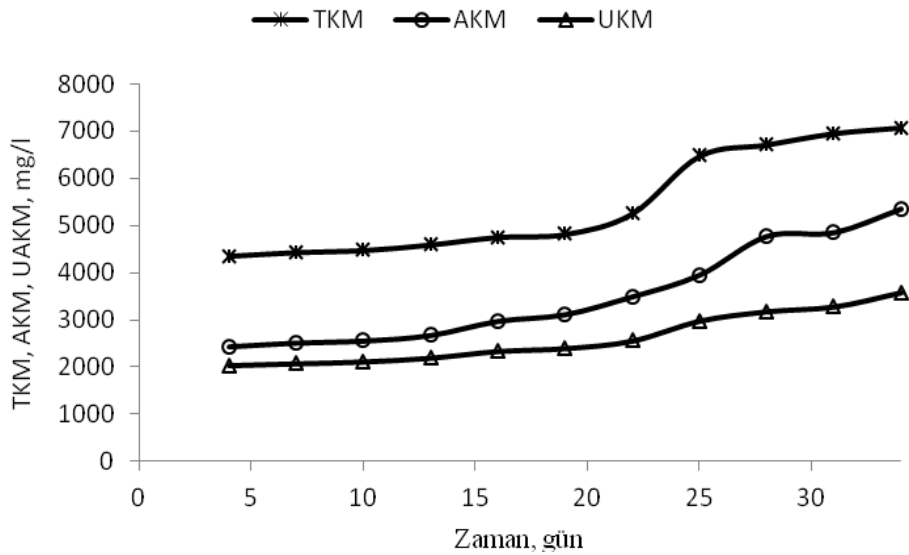
Şekil 3.1. Temiz membranlarda trans-membran basıncına bağlı akı değişimi.

Hesaplanan membran dirençlerinin trans-membran basıncına bağlı olarak çok değişiklik göstermediği ve 4.10^{11} - 6.10^{11} $1/\text{m}$ aralığında sabit olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kademeli akı metoduna göre temiz su membran dirençleri.

Sistem alıştırma ve optimizasyon süreci zarfında reaktör çamurunda pH 7,2-7,59 aralığında, KOİ 820-1200 mg/l, toplam alkalinite ise 1520-2160 mgCaCO₃/l aralığında değişim göstermiştir. Şekil 3.3’de zamana bağlı olarak, reaktör çamurunun katı madde değişimleri görülmektedir.



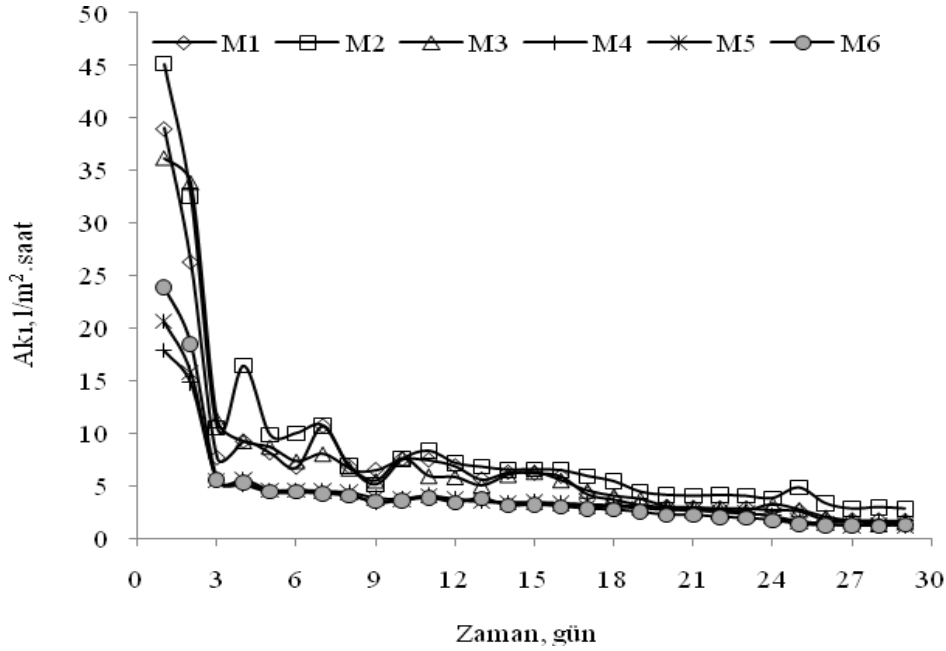
Şekil 3.3. Alıştırma safhasında reaktör çamurunda katı madde konsantrasyonları.

Sistemde oluşan biyogaz bir balonda toplanmıştır. Çalışmanın bu aşaması 28 gün sürdürülmüş, bu süre sonunda yeterli biyogaz oluşumu sağlanmıştır. Reaktörde uçucu

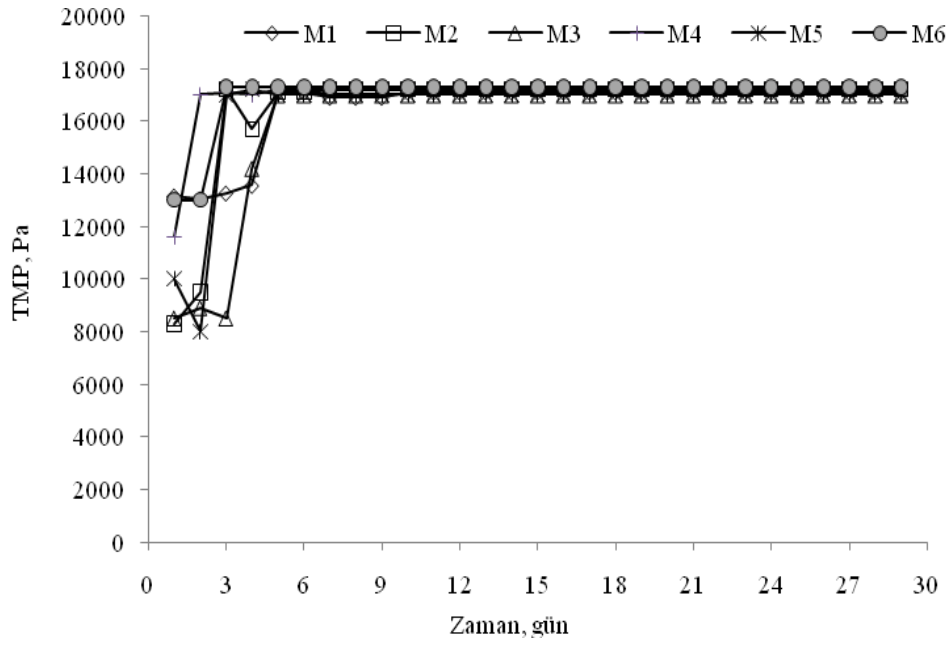
katı madde katı madde (mikroorganizma) gelişmesi sağlandığından optimizasyon çalışmalarının başlatılmasına karar verilmiştir.

Optimizasyon çalışmaları süresince zamana bağlı olarak akılardaki değişim Şekil 3.4’de görülmektedir. Biyogaz geridevri nin uygulandığı huni, silindir ve U şekilli membran modüllerinde akının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu üç membran içerisinde ise en yüksek akı silindir modülde sağlamıştır.

Yaklaşık bir aylık deneme periyodu süresinde transmembran basıncının zamanla değişimi Şekil 3.5’te görülmektedir. 5. günden sonra tüm membranlarda TMP değerleri 17 ± 0.3 KPa civarında sabitlenmiştir.

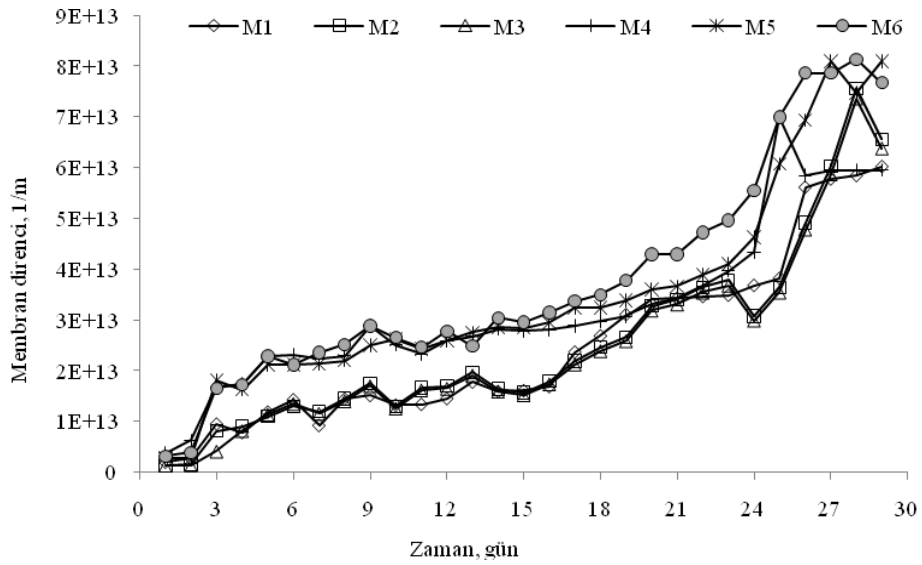


Şekil 3. 4. Sistem optimizasyonu aşamasında zamana bağlı akı değişimleri.



Şekil 3.5. Sistem optimizasyonu aşamasında zamana bağlı trans membran basıncı (TMP) değişimleri.

Biyogaz geridevirli ve geridevirsiz membranların dirençleri arasında önemli farklar görülmüştür (Şekil 3.6). Tüm modüllerde membran direnci zamana bağlı olarak artmıştır.



Şekil 3.6. Sistem optimizasyonu aşamasında zamana bağlı membran direnci değişimleri.

3.2. Membran Kirlenme/Tıkanma Çalışmaları

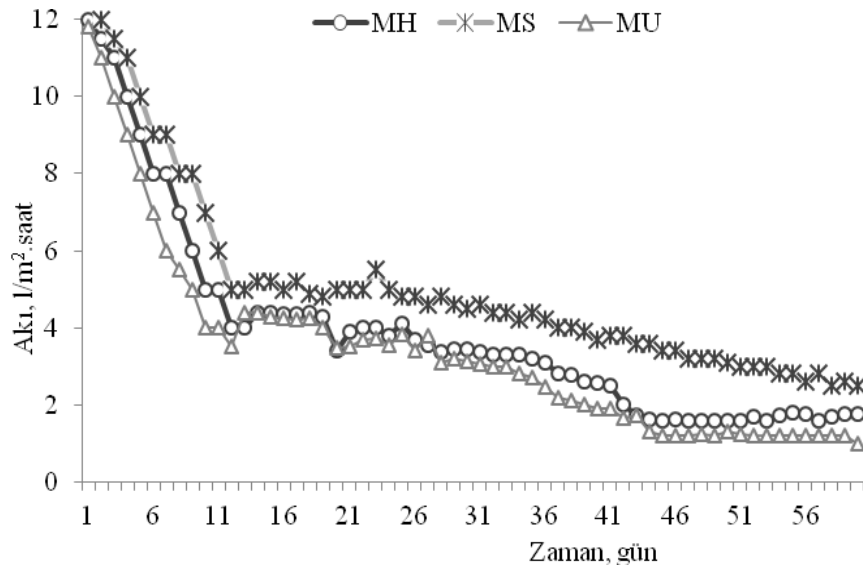
3.2.1. Membran modül geometrisinin kirlenme üzerindeki etkisi

Optimizasyon çalışmalarını müteakiben SAnMBR sistemi membran modül şekillerinin membran tıkanması ve kirlenmesi üzerine etkilerini incelemek amacıyla 63 gün süreyle çalıştırılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında akı, TMP, membran dirençleri, SMP, EPS, SEM görüntüleme ve EDX ile PSD incelenmiştir. Ayrıca sistem arıtma verimi araştırılmıştır.

3.2.1.1. Akı, TMP ve membran dirençleri

Membran akıları, trans-membran basınçlarına bağlı olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1). Tüm membran modüllerinde 14 KPa trans-membran basınç değerleri üzerinde saf su akıları 100-120 l/m².saat aralığında sabitlenmiştir. TMP ve viskozite izlenerek temiz membran dirençleri hesaplanmıştır (Şekil 3.2). Membran dirençleri 5.10¹¹-6.10¹¹ 1/m aralığında değişim göstermiştir.

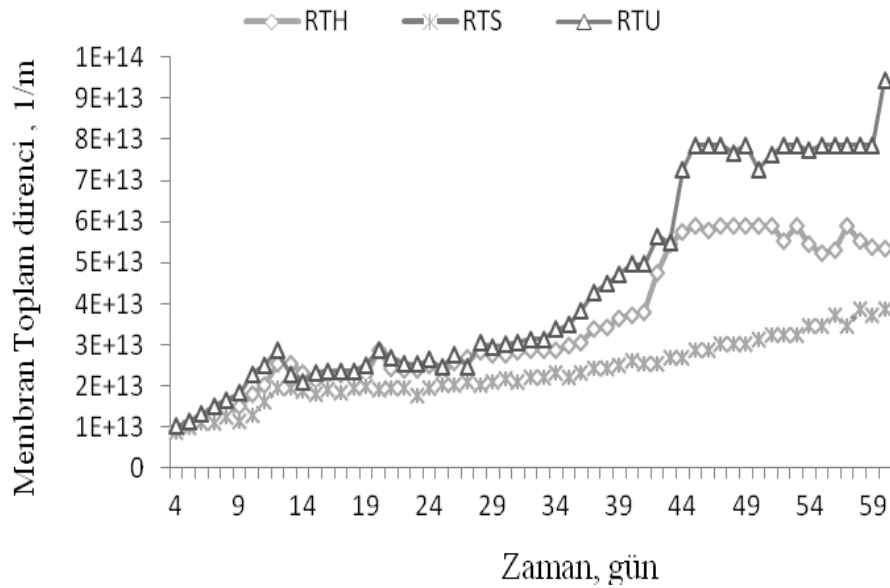
Çalışmanın bu safhasında peristaltik pompalar 15 devir/dak. çalıştırılarak membranlarda süzüntü akıları izlenmiştir. Şekil 3.7.'de membran modüllerinde izlenen süzüntü akıları görülmektedir.



Şekil 3.7. Zamanla membran modüllerindeki akı değişimi

SAnMBR’de, silindir şeklindeki membran modüllerindeki süzöntü akısının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunu huni şeklindeki membran modüllerindeki süzöntü akısı izlemiştir. En düşük süzöntü akısı ise U şekli membran modüllerinde belirlenmiştir.

SAnMBR sisteminin işletilmesi sürecinde, membran modüllerindeki süzöntü akısı azalışının aksine paralel olarak kirlenme dirençleri artış göstermiştir. Membran modüllerindeki süzöntü akılarının tam tersi yönünde membran modüllerindeki toplam kirlenme dirençleri U şeklindeki membran modülünde en yüksek olmak üzere, bunu sırasıyla huni ve silindir şeklindeki membran modülleri izlemiştir (Şekil 3.8).



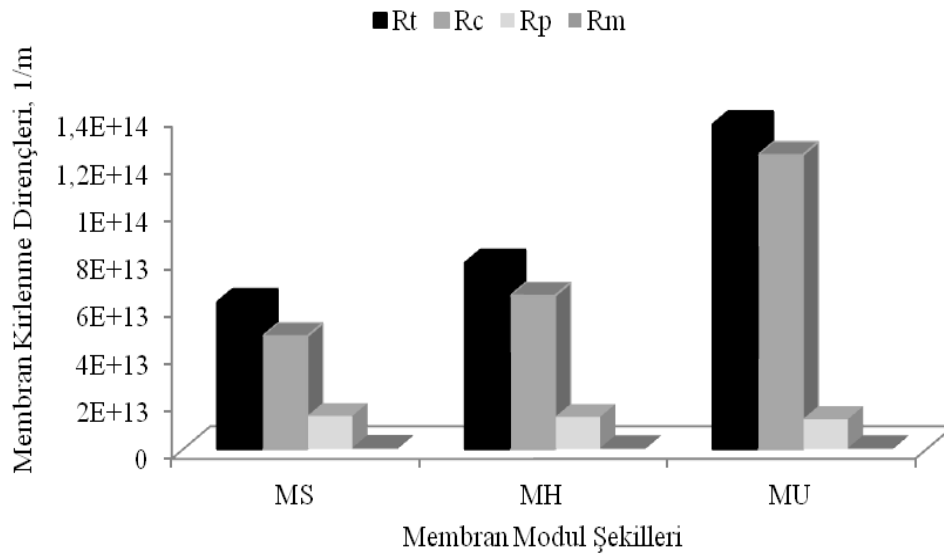
Şekil 3.8. Membran modüllerindeki membran toplam kirlenme direnci değişimi.

Her membran modülü için toplam kirlenme direnci içerisinde spesifik kek direnci (R_c), temiz membran direnci (R_m), gözenek tıkanması ve gözenek tıkanma direnci (R_p) Şekil 3.9’da ve yüzde oranları Şekil 3.10’da gösterilmiştir.

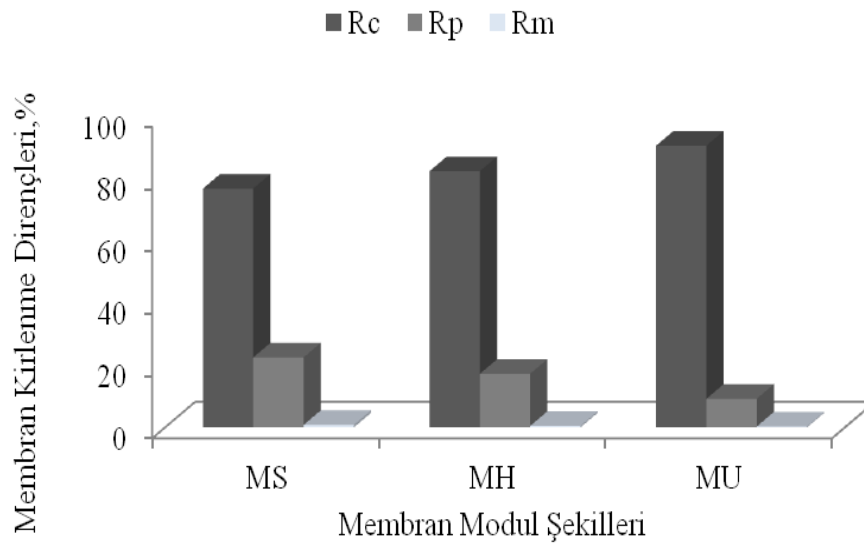
Membran modüllerinde spesifik kirlenme direnç sırasıyla silindir, huni ve U şekilli membran modüllerinde $8.24E+13$, $13.3E+13$, $14.9E+13$ 1/m şeklinde ve gözenek tıkanma direnci sırasıyla $1,38E+13$, $1,32E+13$, $1,23E+13$ 1/m olarak hesaplanmıştır.

Membran modül şekilleri arasında bir kıyaslama yapıldığında, en düşük spesifik kirlenme direncinin silindir şeklindeki membran modülünde olduğu görülmektedir. Bunu huni şeklindeki membran modülü takip etmektedir. En yüksek spesifik kirlenme direnci ise U şeklindeki membran modülünde olduğu belirlenmiştir. Gözenek tıkanma dirençleri ise modüller arasında büyük bir gözlenmemesine rağmen, en düşük değer U şekilli mo-

dölde en yüksek değer silindir şeklindeki modülde olduğu belirlenmiştir. Bu membran modülün geometrisi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Silindir  ekli modülde kek oluşumu diğer modüllere göre düşük olması, geometrisi gereği jel ve organik kaynaklı kekin modül yüzeyinde tutunması ve kalınlaşması düşük olmuştur. Ancak tüm modüllerde inorganik kaynaklı kristal oluşumu belirlenmesinin yanı sıra, U  ekli modülde kristal yapı ile kek yapısı birlikte daha g   l  ve yoğun bir kirlenme tabakası oluşturmuştur.



Şekil 3.9. Membran modüllerindeki kirlenme dirençleri.

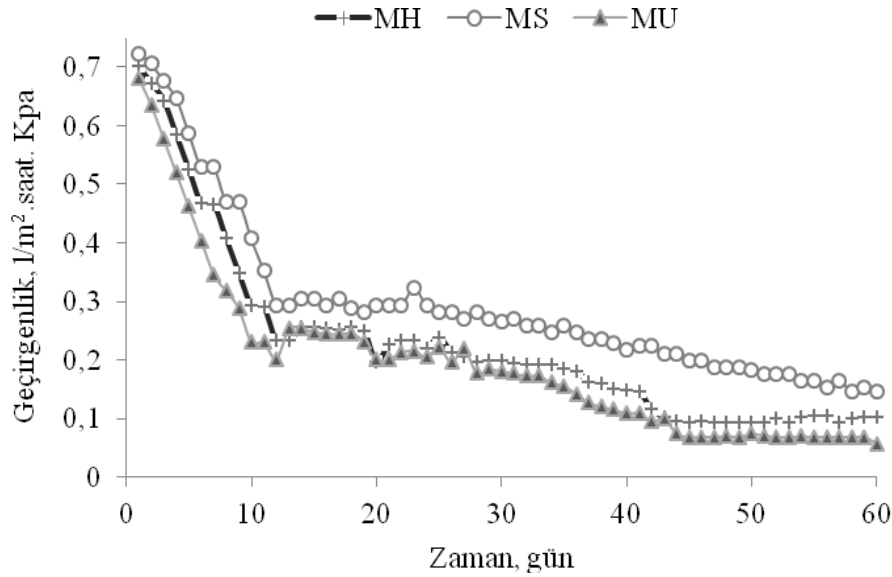


Şekil 3.10. Membran modul şekillerinde kirlenme dirençleri

Bu durum aynı koşullarda beslendiğinde U şeklindeki modülün daha kısa sürede tıkanmış huni ve silindir şeklindeki modüllerinin daha uzun süre kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu durum, membran modüllerindeki lifler arası boşluk ve liflerin gergin durumda olmasıyla açıklanabilir. Membran dirençleri açısından da en verimli membran modülün silindir şeklindeki modül olduğu belirlenmiştir.

3.2.1.2. Membran modül geometrisi ile geçirgenlik ilişkisi

Membran modülü ile geçirgenlik arasındaki ilişki Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Süreç içersinde akıda olduğu gibi, en yüksek geçirgenlik silindir şeklindeki en düşük geçirgenlik ise U şeklindeki membran modülünde tespit edilmiştir. Huni şeklindeki modülde ise geçirgenlik silindir şeklindeki modülden düşük, U şeklindeki modülden yüksektir. Bulgularımıza göre askıda katı maddelerin yanı sıra, kolloidal çözeltiler de geçirgenliğin azalışına sebep olmaktadır.

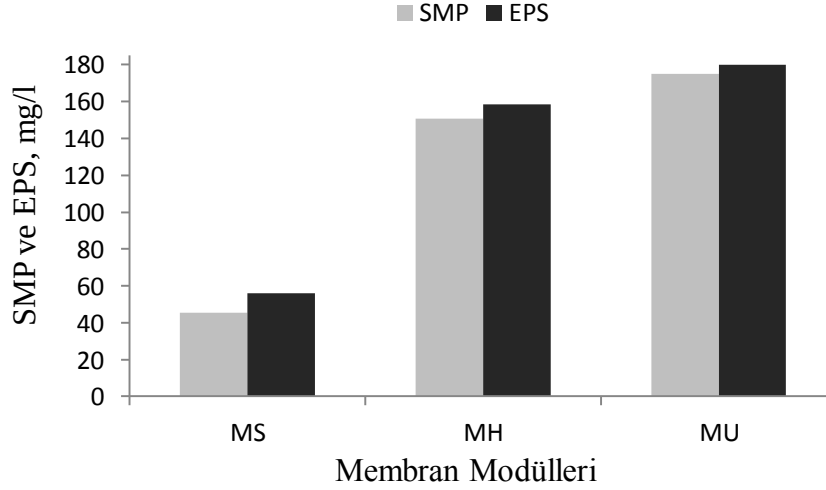


Şekil 3.11. Membran modüllerindeki süzüntü geçirgenliğinin değişimi.

3.2.1.3 Membran modül geometrisi ile SMP ve EPS ilişkisi

SAnMBR sisteminde 63 gün süre ile yapılan çalışmalar sonucunda kirlenmiş membranlarda elde edilen kek tabakasındaki SMP ve EPS Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Membran yüzeyinden oluşan kek tabakasında elde edilen en düşük SMP ve EPS miktarları, silindir şeklindeki modül yüzeyindeki kekten elde edilmiştir. Bunu sırasıyla huni ve

U şeklindeki modül kekleri izlemektedir. Tüm modüllerde SMP, EPS'den daha düşük konsantrasyonlardadır. Ancak U şekilli modülde her ikisi arasındaki konsantrasyon farkı azalmaktadır.



Şekil 3.12.Membran Modülleri yüzeyinde oluşan kekteki SMP ve EPS davranışı.

Literatürde membran kirlenmesinde SMP'nin önemli oranda etkili olduğu belirtilmektedir (Huang vd., 2000; Lee vd., 2003; Meng vd., 2006; Liang vd., 2007). Araştırmacılar SMP'nin direkt olarak membran süzüntü akısını ve/veya geçirgenliğini etkileyen önemli bir kirletici olduğunu belirtmişlerdir. EPS matriksinin fonksiyonları flok ve biyofilmlerdeki bakteriyel hücrelerin tümünü kapsadığı (Laspidou ve Rittmann, 2002) ve membran proseslerinde süzüntü akıları için önemli bir bariyer oluşturma tahminleri doğrultusunda fikir beyan etmişlerdir. Bulgularımızda, AnMBR sistemi içerisinde SMP ve EPS net bir durum sergilemezken, membran yüzeyinde oluşan kek tabakasındaki SMP ve EPS artışı ile, filtrasyon direnci artışının paralel bir durum sergilediği belirlenmiştir. Membran yüzeyinde biriken kekteki EPS ve SMP, çamur sıvısındaki SMP ve EPS'den daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum muhtemelen membran ve kek tabakası tarafından SMP ve organik makromoleküllerin adsorbsiyonu ve etkileşiminden kaynaklanmış olabilir. AnMBR içerisindeki çamur sıvısına göre membran yüzeyinde biriken kekteki SMP ve EPS oranlarının daha yüksek olarak belirlenen çalışmalar mevcuttur (Lin ve diğ., 2009).

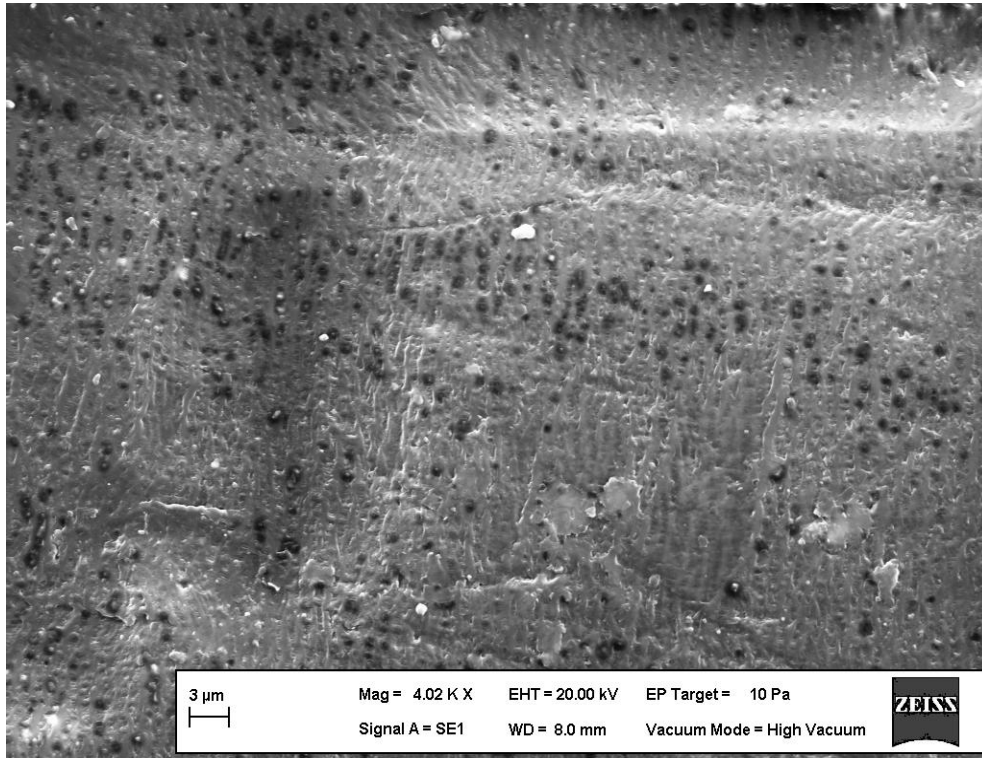
Bulgularımızdaki bu sonuçlar, önceki araştırmacılar (Ke Xie, 2008 ; Gao vd., 2011) tarafından belirtilen verileri destekler niteliktedir. Bulgularımıza göre, SMP ve EPS açıl-

sından en uygun modülün, silindirik şekilli modül olduğu ve bunu huni ve U şekilli modüllerin takip ettiği saptanmıştır.

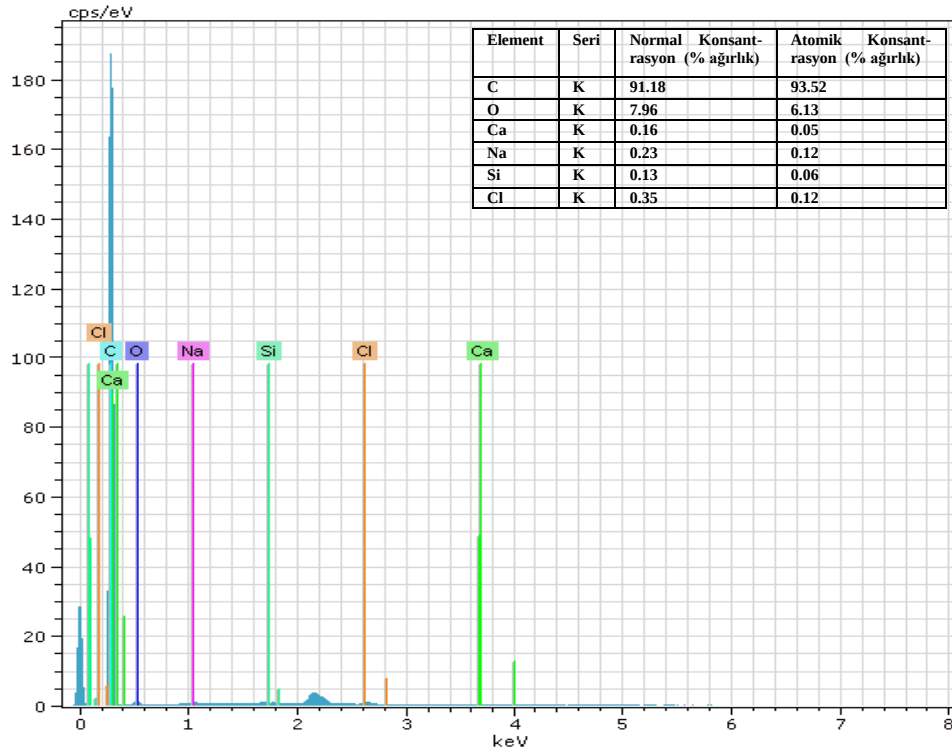
3.2.1.4. Membran modül geometrilerinde SEM görüntüleri ve EDX analizleri

SAnMBR sistemine yerleştirilecek temiz membran modülünden yaklaşık 1cm'lik parçalar alınarak, SEM görüntüsü alınmış ve EDX analizi yapılmıştır. Aynı zamanda SAnMBR sisteminde 63. günün sonunda kirlenen membran modüllerinin kek tabakalarının SEM mikroskobu ile detaylı görüntüleri alınmıştır.

SEM-EDX sistemiyle C, O, Na, Mg, Al, S, Si, P, K, Ca, Zn, Cl ve Fe gibi elementler tespit edilmiştir. Temiz membran görüntüsü değerlendirildiğinde yüzeyinde sadece uniform olmayan membran gözenekleri görülmektedir (Şekil 3.13). Temiz membran elemental yapı açısından %91 C ve % 8 O'den oluşmaktadır. Ayrıca toplam elementlerin % 1'ini Cl, Na ve Si'den oluşturmaktadır (Şekil 3. 14)



Şekil 3.13. Temiz membran SEM görüntüsü.



Şekil 3.14. Temiz membran EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

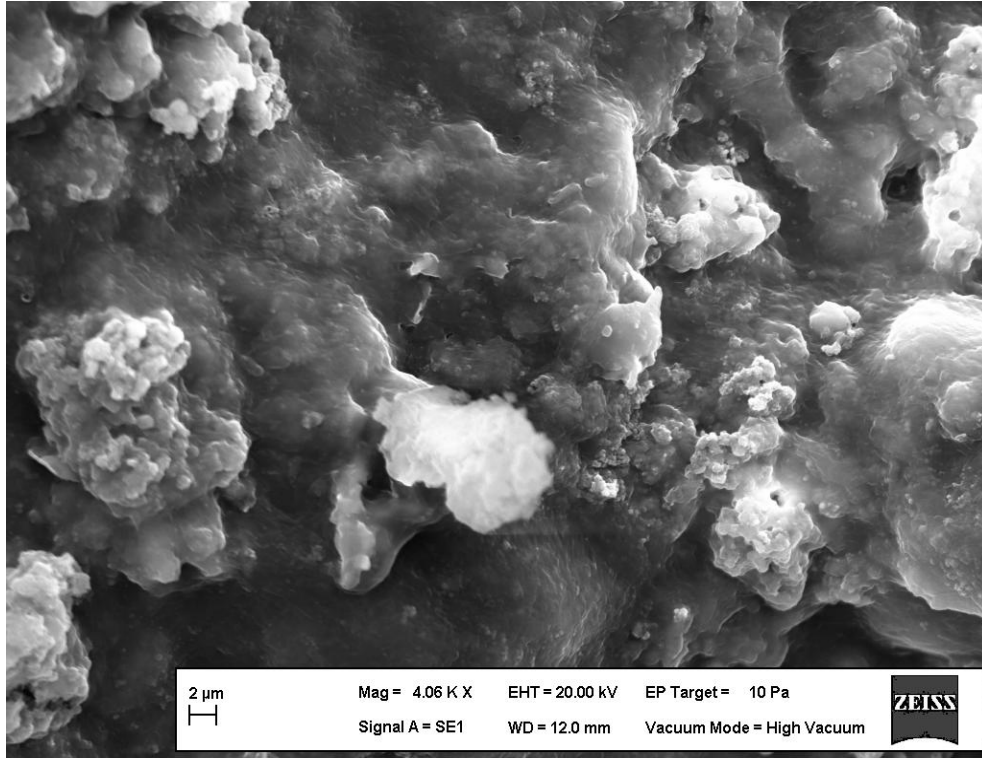
Kirlenmiş membran modüllerinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 3. 15, 3.17 ve 3.19’da görülmektedir. SEM görüntülerinden de anlaşıldığı üzere membran modülleri arasında kirliliği oluşturan çamur kekinin en yüksek yoğunlukta olduğu modülün U şekilli modül olduğu görülmektedir. Bunu huni ve silindir şekilli membran modülleri izlemektedir. Ayrıca EDX analizlerinden (Şekil 3.16, 3.18 ve 3.20) kek tabakasında biriken bir takım kristal yapıların olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla tüm modüllerde hem inorganik ve hem de organik kökenli kirlenmenin iç içe olduğu söylenebilir. Silindir ve huni şekilli modüllerde membran lifleri arasındaki boşluk ve geometrik yapı nedeniyle U şekilli modüle göre kirlenme görüntüsünün daha düşük olduğu söylenebilir. U şekilli modülde daha yoğun olmak üzere sırasıyla huni ve silindir şeklindeki membran modüllerinde kek kısmı, inorganik bileşiklerle birlikte sürekli kalınlaşmıştır.

Burada hem keki oluşturan biyopolimerlerin hem de kristal oluşumunda etkili olan inorganik kirleticilerin bir kompleks ağ oluşturarak süzüntü akısını ve dolayısıyla geçirgenliği yüksek oranda düşürmektedir. Ayrıca tüm modüllerde membran kek kirlenme dirençlerinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna mukabil gözenek tıkanması ve yüzey adsorblanmasından kaynaklanan gözenek tıkanma dirençleri ise daha düşük olarak belirlenmiştir (Şekil 3.9). Tüm modüllerde kek kirlenme direnci (R_c) %85-92 iken göze-

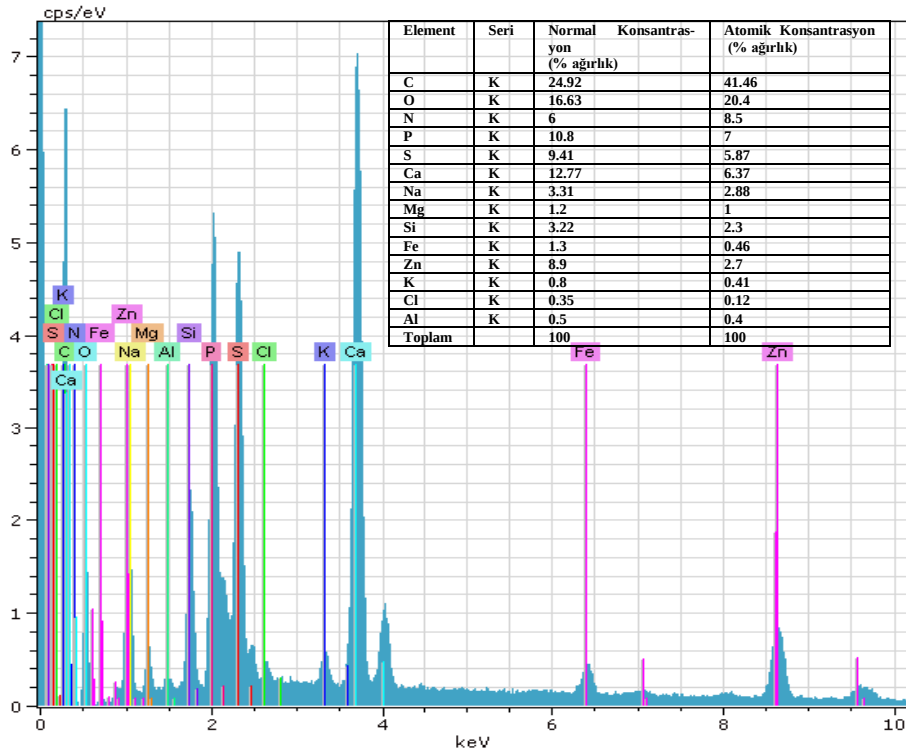
nek tıkanması ve membran yüzeyindeki adsorblanmadan kaynaklanan gözenek tıkanma direnci (R_p) ise % 8-15 arasında değişim göstermiştir (Şekil 3.10).

SEM görüntüntüleri ve EDX grafiklerinde görüldüğü gibi kirlenmiş silindir ve huni şeklindeki modüllerdeki Ca, Mg, Fe ve P oranlarının, U şekilli modüldekinden çok daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu elementlerin yüksek oranda bulunması CaCO_3 , FeS , MgCO_3 ve $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ gibi mineral kaynaklı kristal yapıların oluşumlarına sebep olabilir (Martha Dagneu, 2010). Bulgularımız Martha Dagneu (2010)'in verileri ile uyumludur. Ca, Mg ve Fe gibi metal karbonatları membranların inorganik kaynaklı tıkanma potansiyelini artırabilirler (You vd., 2005). Biyolojik çökelme inorganik kirlenmeye etki eden diğer bir etkidir. CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , OH^- COO^- gibi iyonize olabilen grupları içeren biyopolimerler, bu negatif iyonlar tarafından kolayca yakalanabilirler. Bazı durumlarda, kalsiyum ve asidik fonksiyonlu gruplar R-COOH kompleksi oluşturabilir ve akı düşüşünü artırabilen yoğun bir biyokek tabakası veya jel tabakası geliştirebilir (Costa vd., 2006). Çalışmamızda SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar, kek tabakası üzerinde yoğun bir kristal yapının oluştuğunu ve bu durumun sentetik atık su bileşiminden kaynaklanmış olabileceğini ortaya koymaktadır.

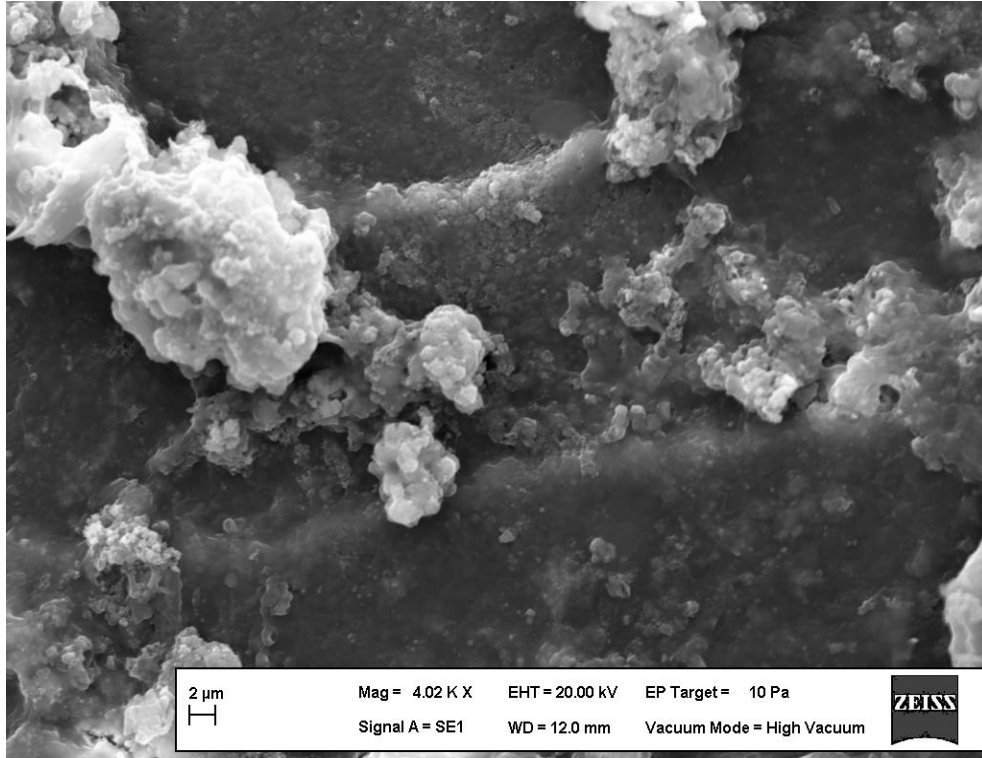
Hem organik hem de inorganik meddelerin birlikte kek oluşturması fosfat ve sulfat gruplarının ağırlıklı olduğu bileşiklerin membran yüzeyinde oluştuğu anlamına gelebilir. Kirlenmiş membranın dış tabakasında gözlenen bağlar nükleik asitlerden ve beslemeden kaynaklanan fosfat ve sülfat gruplarıyla ilgili olabilmektedir. Bu durum organik kirlenmenin yanı sıra toplam membran kirliliğinde inorganik kirlenmenin de sorumlu olduğunu göstermektedir (Gao vd., 2011).



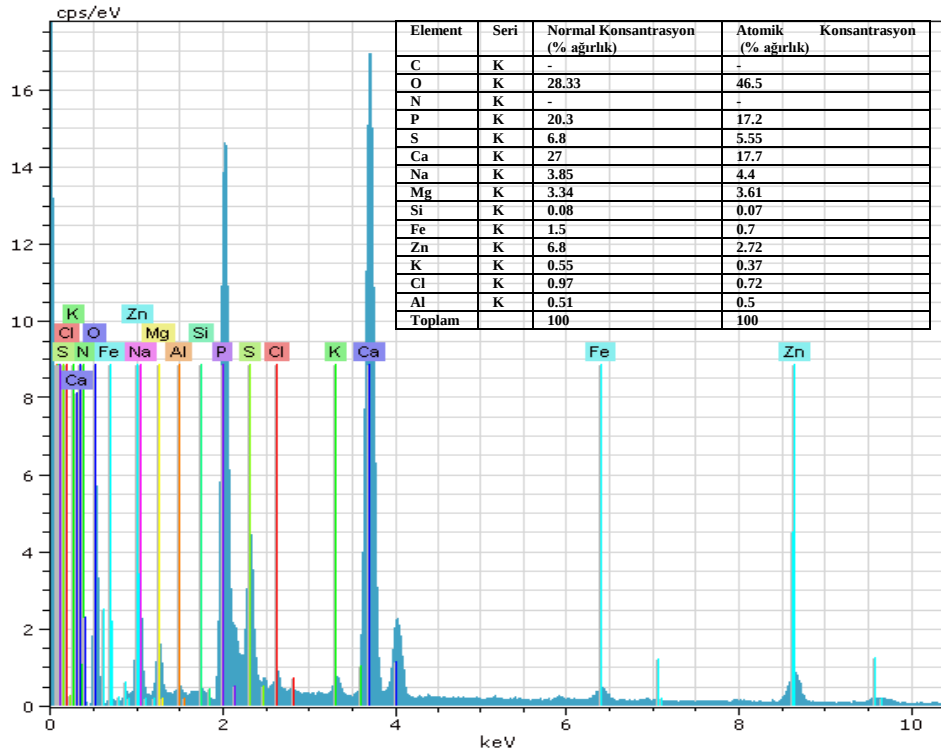
Şekil 3.15. Silindir membran modülün SEM görüntüsü.



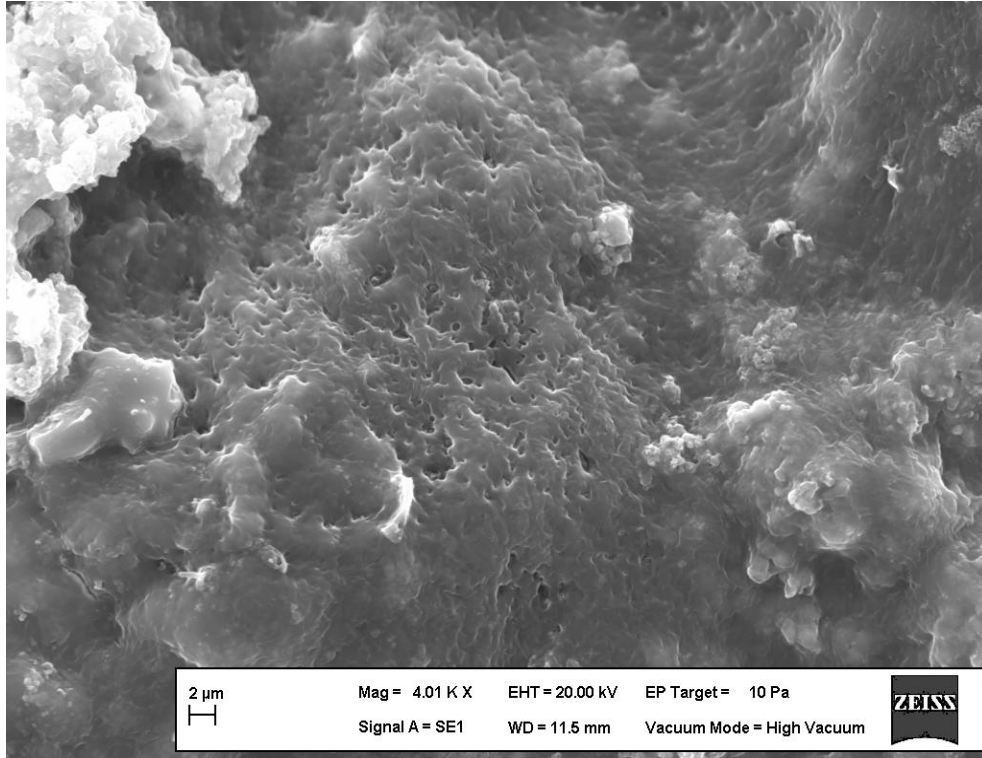
Şekil 3.16. Silindir membran modülün EDX grafiği ve elemetlerin % oranları



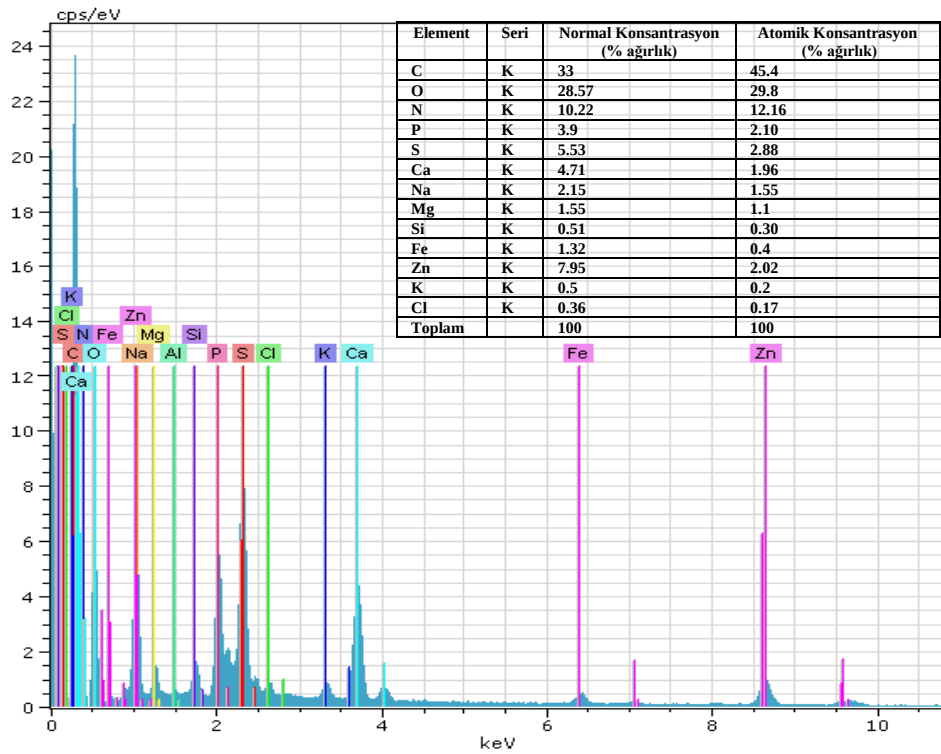
Şekil 3. 17. Huni membran modülün SEM görüntüsü.



Şekil 3.18. Huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



Şekil 3.19. U şekilli membran modülün SEM görüntüsü.

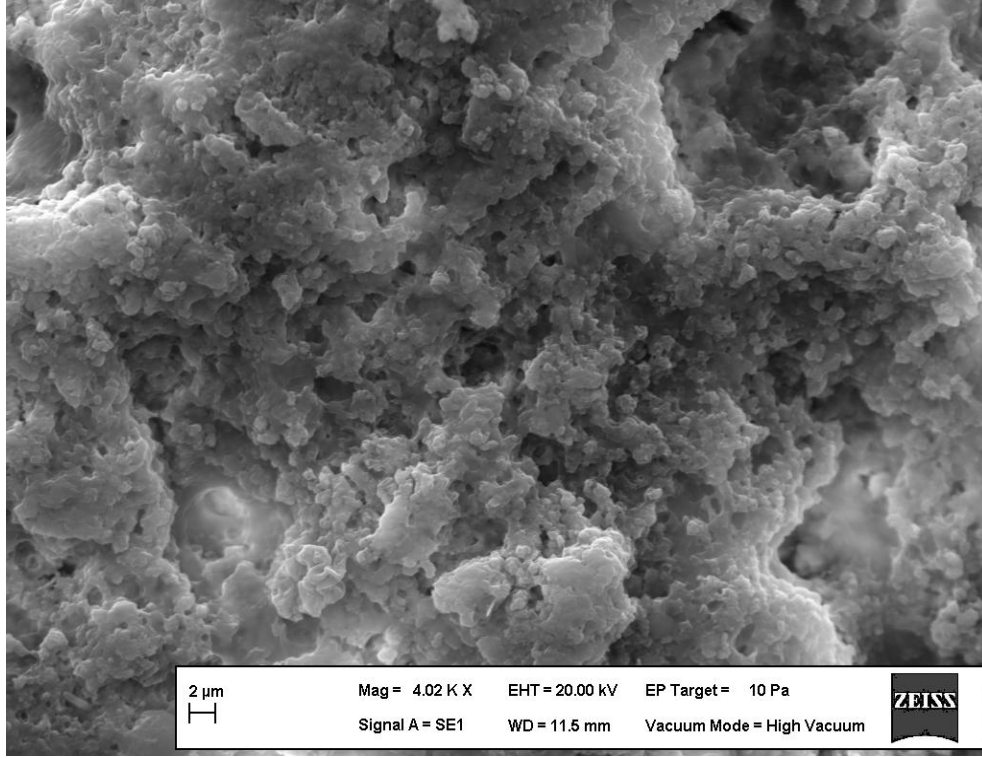


Şekil 3.20. U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

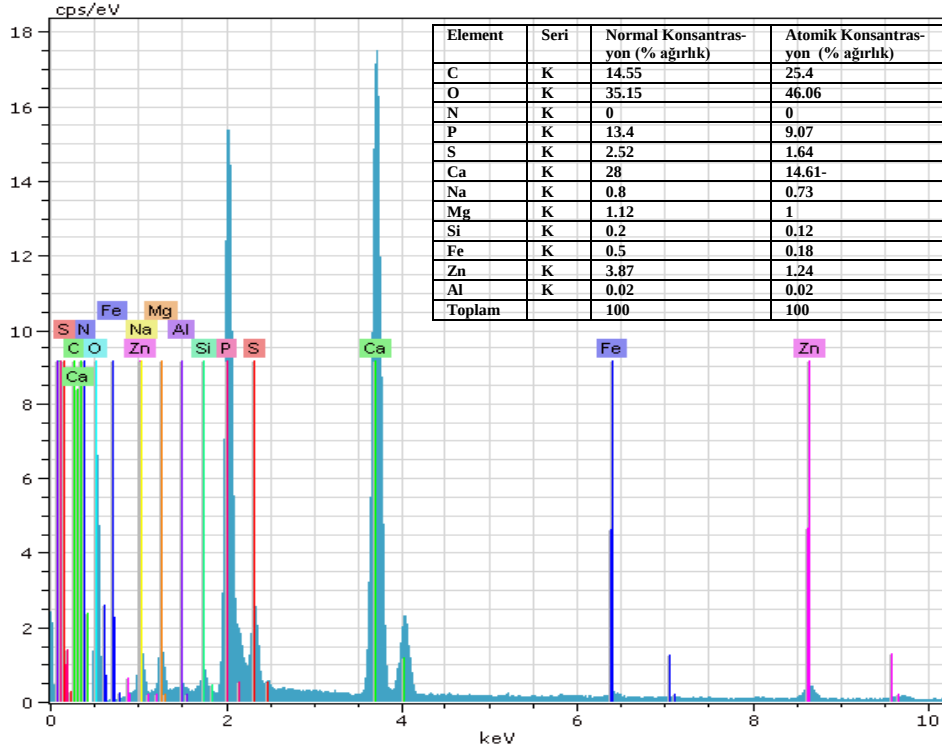
SEM görüntüleme ve EDX analiz çalışmalarının ikinci aşamasında, kirlenmiş membran modüllerindeki kek tabakaları sıyrılarak modül ortasından yaklaşık 1 cm uzunluğunda parçalar kesilerek SEM görüntüleri alınmış ve EDX analizleri yapılmıştır.

Membranların sıyrıldıktan sonraki görüntüleri, U şekilli membran modülünde daha çok organik olmak üzere kristal yapının fiziksel temizleme ile giderilemeyen kirlenmeyi oluşturduğu tespit edilmiştir. Çok az miktarda üst tabakada oluşan jel tabakası giderilmiştir. Huni ve silindir şeklindeki modüllerde ise baskın kirlenmeyi yine fiziksel temizlemeyle giderilemeyen kristal yapının oluşturduğu belirlenmiştir (Şekil 3.21, 3.23 ve 3.25). EDX verileri de, en yüksek silindir şekilli modülde olmak üzere sırasıyla huni ve U şekilli modüllerde yüksek oranda Ca, P, Zn, Ag ve S gibi elementlerin baskın olduğunu doğrulamaktadır (Şekil 3.22, 3.24 ve 3.26). Aynı zamanda, fiziksel olarak temizlenmiş U şeklindeki modüldeki C,O, S oranları da silindir ve huni şekilli modüllerdeki C,O,S ve P değerlerinden yüksek bulunmuştur. Bu durum U şekilli modülde organik kökenli bileşenlerin daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır.

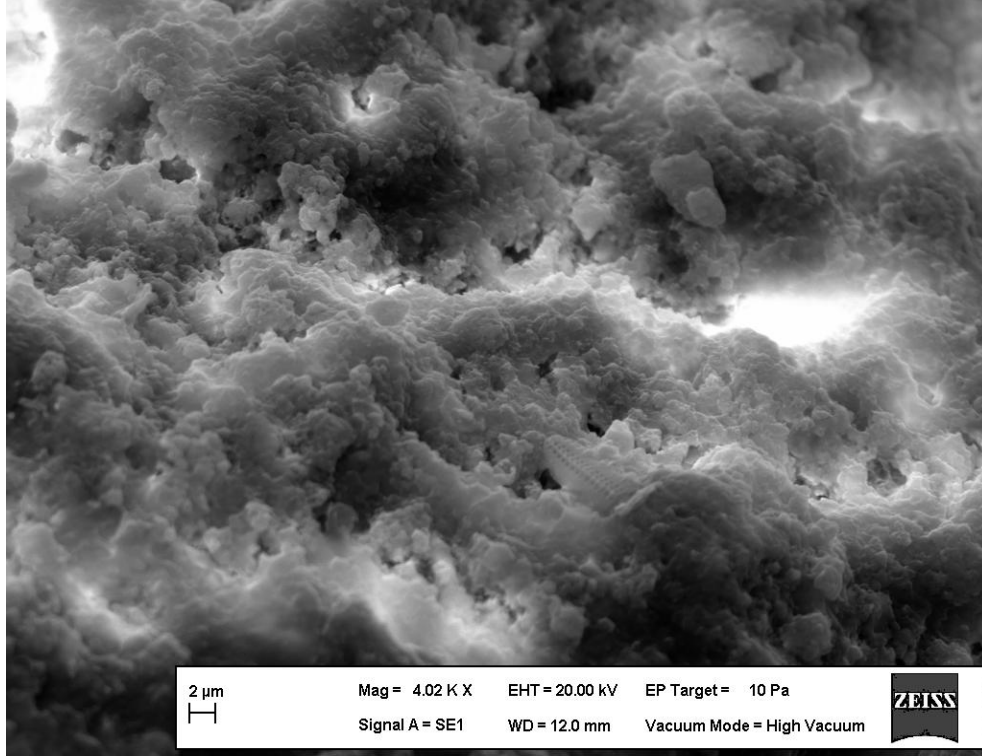
Burada U şekilli modülde fiziksel temizlemeyle, membran yüzeyinde oluşan kirlenmenin daha az giderildiği söylenebilir. Silindir ve huni şeklindeki modüllerde ise kristal yapının giderilmediği sadece bir miktar kek yapısının giderilebildiği söylenebilir. Organik kirlenme kaynağının çoğunlukla C,N,P ve O elementlerinin yoğun olduğu kekten oluştuğu belirlenmiştir.



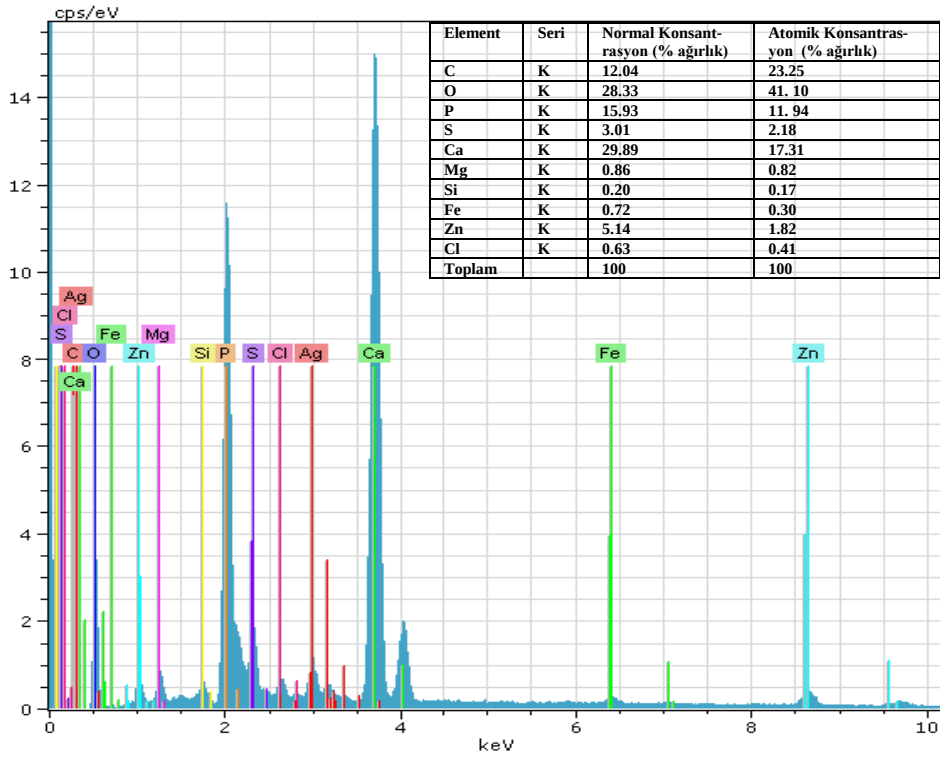
Şekil 3.21. Silindir şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü



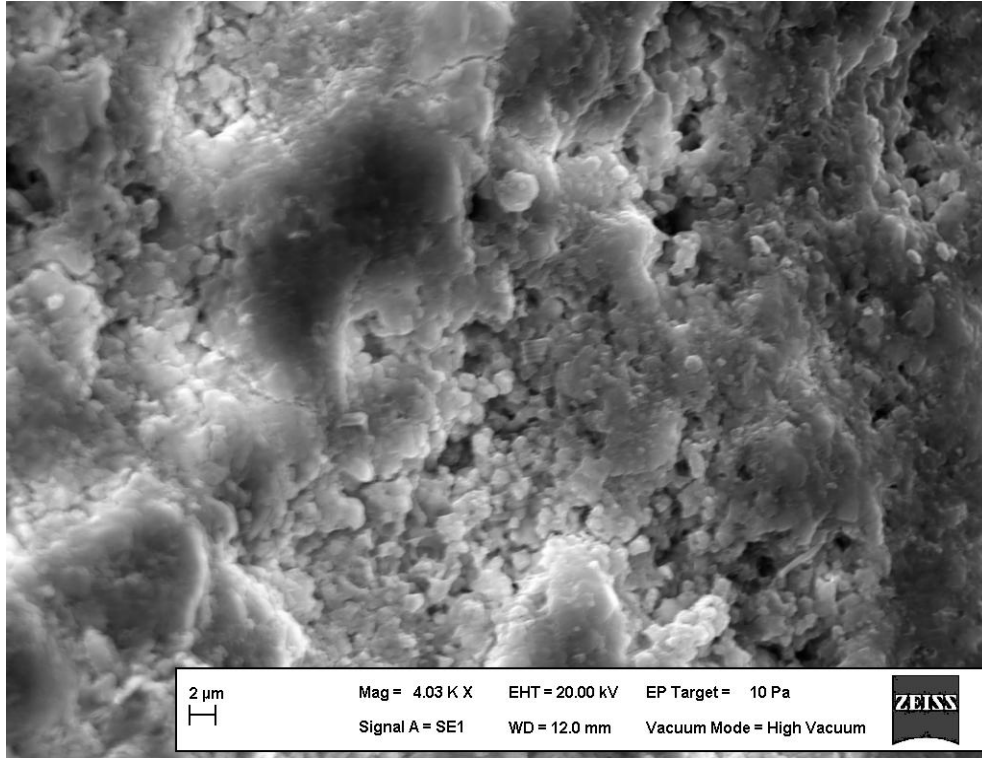
Şekil 3.22. Silindir şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları



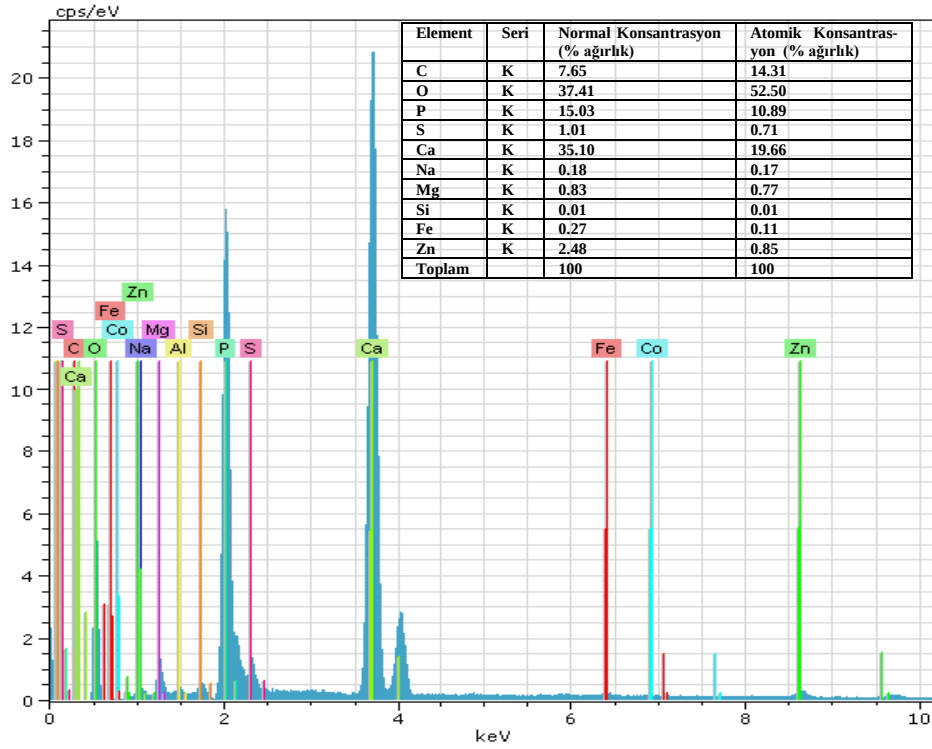
Şekil 3.23. Huni şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü



Şekil 3.24. Huni şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları



Şekil 3.25. U şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü

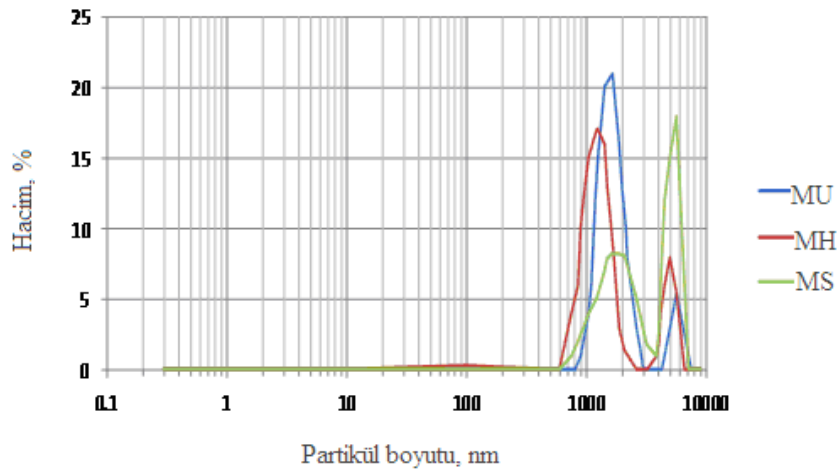


Şekil 3.26. U şekilli modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları

3.2.1.5 Membran modülleri ile partikül boyut dağılımı ilişkisi

Aynı özellikte farklı şekillerdeki membran modüllerinin kullanıldığı SAnMBR sisteminin işletilmesi sürecinde reaktör sıvısı ortamından yaklaşık 20 gün ara ile numuneler alınarak partikül boyut dağılımı belirlenmiştir. Şekil 3. 46 'de görüldüğü gibi sistemdeki partikül süreç içerisinde 10-1000 μ m aralığında olduğu belirlenmiştir. İşletme başlangıcında ortalama partikül boyutu 100 μ m değerlerinde iken, süreç içerisinde partikül boyutları küçülerek ortama 10-100 μ m aralığına düştüğü belirlenmiştir. Ancak yaklaşık bir ay sonra ki süreçte partikül boyutu tekrar büyümüş ve ortalama olarak 100-1000 μ m aralığına yükselmiştir.

Batık Anaerobik Membran Biyoreaktör (SAnMBR) sisteminden periyodik olarak alınan numunelerde ve kirlenmiş membranların deiyonize su içerisinde temizlenmesi ile elde edilen kek tabakasında partikül boyutları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3. 27'de görülmektedir. Silindir, huni ve U şekilli membran modüllerindeki kek yapısı incelendiğinde partikül boyut dağılımının 0.9- 10 μ m arasında olduğu belirlenmiştir. U şekilli membran modülünde kek partikül boyutu genellikle 1- 5 μ m arasında iken huni şekilli membran modülünde kek partikül boyutu 1- 7 μ m arasında ve silindir şeklindeki membran modülünde kek partikül boyutunun 2-10 μ m olduğu belirlenmiştir. Çamur kek tabakası membrandan daha sıkı bir gözenek boyutuna sahip olabileceğinden ve bu partiküller membranda bloke olmayabilir. Buna rağmen çamur kek tabakasında büyük partiküller arasına girerek kanalları tıkayabilir (Xie,2008).



Şekil 3.27. Membran modül şekillerinde PSD değişimi.

Membran yüzeyinde oluşan kek partikül boyut dağılımı ile membran filtrasyon direnci arasında paralel bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. En yüksek filtrasyon direnci U şekilli modul, daha sonra sırasıyla huni ve silindir şekilli modüllerde belirlenirken, en küçük partikül boyutu U şekilli modülde görülmüş, bunu sırasıyla huni ve silindir şeklindeki modül izlemiştir.

Partikül boyut dağılımı küçüldükçe membran filtrasyon direncinin arttığı görülmüştür (Şekil 3.9). Genelde membran kirlenmesine neden olan faktör, başlangıçta gözenek yüzeylerinin jel tabakası ile sıvanması ve bunu takiben kek oluşumudur. Bulgularımıza göre çalışmanın başlangıcında çamur flokları membran gözenek boyutlarına yakın ya da daha büyük olduğundan membran gözeneklerinden geçmedikleri için yüzeyde flog oluşumu ve jel yapısını zenginleştirerek kolayca tıkanmaya sebep olmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda farklı boyutlardaki partiküllerin sayısı, membran üst kek tabakasındaki partiküllerin % 65'i 0.3 μm 'den daha düşük boyutta olduğunu belirtilmiştir (McAdam vd., 2007). Çok küçük partikül veya floklar membran yüzeyinde daha güçlü çökme eğilimine sahiptirler. Membran yüzeyinde biriken küçük partiküller daha yoğun bir kek tabakası şeklindedir ve daha büyük dirençler meydana getirirler (Bai ve Leow, 2002). Bulgularımız da daha önce yapılan çalışmaların (Bai ve Leow, 2002; McAdam vd., 2007) aksine partikül boyutu % 50'nin üzerinde 0,5 μm büyük olduğu belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak SMP ve EPS artışını destekleyen bağlı biyopolimerlerin ve kolloidlerin artışı gerçekleşmiştir. Bunu SEM görüntüleri ve EDX analizleri de desteklemiştir. Ancak bununla birlikte, membran gözenek boyutlarına yakın boyutlarda da partikül belirlenmiştir. Gözenek boyutlarına yakın partikül boyutlarındaki davranışlar önceki çalışmalara paralellik arz etmektedir. Önceki MBR çalışmaları kirleticinin boyutunun kirlenme üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüştür.(Judd 2006). Çözünmüş, koloidal ve bağlı biyopolimerler gibi çamur kompozisyonu ile PSD ilişkisi üzerindeki çalışmalar, koloidal biyopolimerde bir artış olduğunda partikül boyutunda önemli bir azalma gözlenmiştir. Genelde, partikül boyutu membran gözenek boyutundan daha küçük veya yakın olduğu durumlarda, harici ve/veya dahili gözenek tıkanmasından dolayı, partikül boyutu membran kirlenmesini etkilediği ifade edilmiştir.(Bai ve Leow, 2002).

Partikül maddelerin diğer bir mekanizması da yüksek spesifik kek direnci ile bir kekin şekillenmesidir (Kuberkar ve Davis, 2000). Tüm bunlar membran yüzeyinde partiküllerin birikmesi veya çökmesi filtrasyon direncini artırdığının göstergesi olabilir (Martha Dagnew, 2010).

Elde edilen veriler küçük partikül boyutunun özellikle kristal yapı halinde membran gözenek ve yüzeyinde yığılmalar gösterdiğini ve filtrasyon direncini artırdığını ortaya koymuştur. Bu durum literatürdeki bilgilerle paralellik arz etmektedir.

3.2.2. Biyogaz geridevrinin modül geometrisi ve membran kirlenmesi üzerindeki etkisi

3.2.2.1. Akı, TMP ve membran kirlenme direnci

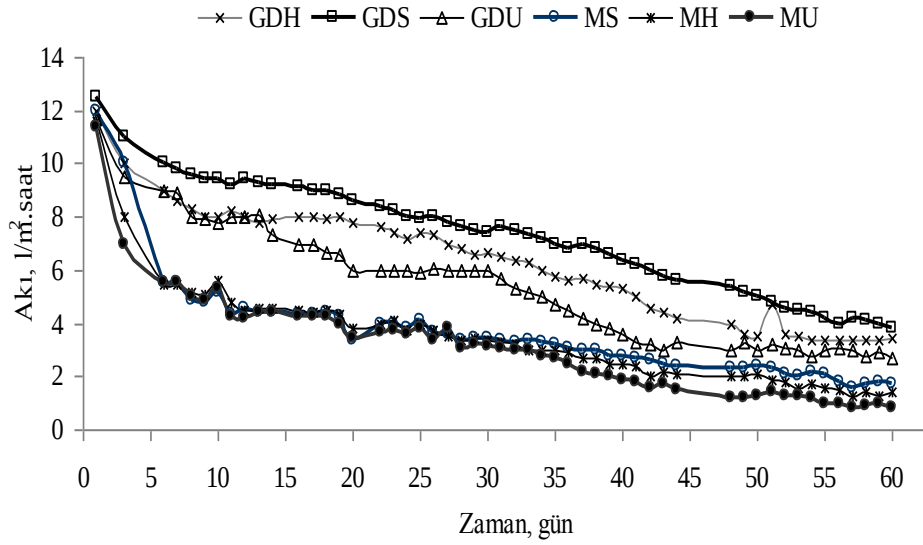
Çalışmanın bu aşamasında SAnMBR sistemi biyogaz püskütmeli ve geridevirsiz ortamda her bir kısma üçer adet membran modülü yerleştirilmiş ve işletmeye alınmıştır. Herbir kısma aynı yüzey alanına sahip silindir, huni ve U şekilli modül yerleştirilmiştir. Sabit trans-membran basıncında membran modüllerinden süzüntü akıları sürekli izlenerek kaydedilmiştir. TMP 17 ± 0.3 KPa arasında iken, çalışma süresince tüm membran modüllerinde süzüntü akısı zamanla azalmıştır.

Biyogaz geridevri yapılan membran modüllerindeki akı değerlerinin, biyogaz geridevir yapılmayan membran modüllerindeki akı değerlerinden daha yüksek düzeyde olduğu saptanmıştır (Şekil 3. 28). Membranlar yerleştirildikten sonraki ilk 5 gün içinde biyogaz geridevirli ve biyogaz geridevirsiz tüm membran modüllerinde ani bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş $20 \text{ l/m}^2 \cdot \text{saat}$ akı değerlerinden, süzüntü akıları biyogaz geridevirli modüllerde $7-10 \text{ l/m}^2 \cdot \text{saat'e}$ ve biyogaz geridevirsiz modüllerde ise $5-6 \text{ l/m}^2 \cdot \text{saat'e}$ düştükten sonra, 63 gün süreç içinde tüm membran modüllerinde süzüntü akıları azalarak biyogaz geridevirli membran modüllerinde $3-4 \text{ l/m}^2 \cdot \text{saat}$, biyogaz geridevirsiz membran modüllerinde ise $1-2 \text{ l/m}^2 \cdot \text{saat'e}$ kadar azalış göstermiştir.

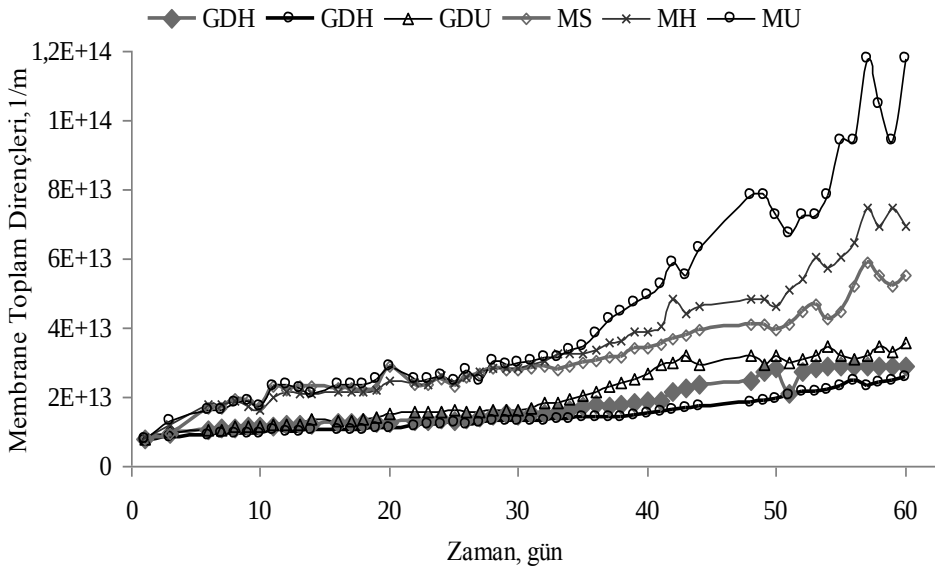
Biyogaz geridevirli membran modüllerinde akının biyogaz geridevirsiz modüllerdeki akıdan 1,5-2 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Daha önce yapılmış çalışmalarda da benzer veriler elde edilmiş ve başlangıç akısı $20 \text{ l/m}^2 \cdot \text{saat}$ iken 196 gün sonra süzüntü akısı $1,0 \text{ l/m}^2 \cdot \text{saat'e}$ kadar düşmüştür (Choo ve Lee, 1996).

Süzütü akılarındaki bu azalış hidrolik bekleme sürelerini uzamasına sebep olmuştur. Choo ve Lee, 1996, yaptığı çalışmada süzüntü akısında azalma sonucu sistem hidrolik bekleme süresi yaklaşık 196 günde 15 güne kadar uzadığı belirtilmiştir. Çalışmamızda başlangıçta hidrolik bekleme süresi 0,5 gün iken akı azalışı sonucu 12 güne kadar uzamıştır.

SAnMBR sisteminin 63 günlük süreç içerisinde işletilmesinde, membran modüllerindeki membran modüllerindeki kirlenme dirençleri de artış göstermiştir. Biyogaz geridevirsiz membran modüllerindeki silindir, huni ve U şekil modüllerde toplam membran kirlenme direnci, biyogaz geridevirli membran modüllerindeki silindir, huni ve U şekil modüllerdeki toplam membran kirlenme dirençlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.29).

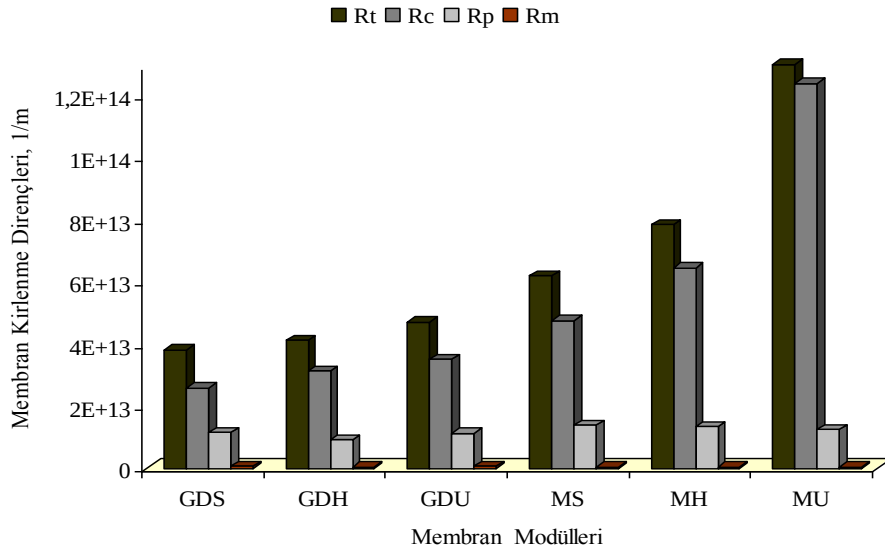


Şekil 3.28. Biyogaz geridevri durumunda membran modüllerindeki süzöntü akılarının zamanla değişimi.



Şekil 3.29. Biyogaz geridevri durumunda membran modüllerindeki toplam membran kirlenme direnci

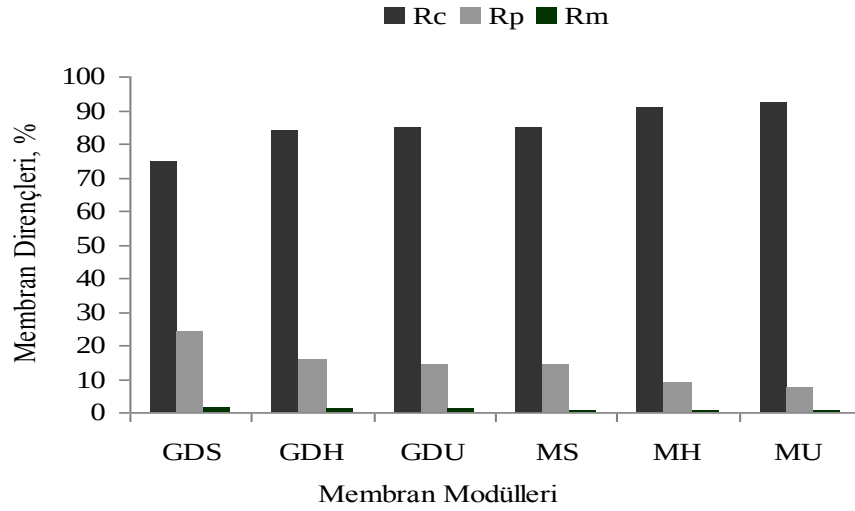
Hem biyogaz geridevirli hem de biyogaz gerideviriz membran modüllerindeki toplam kirlenme dirençleri büyükten küçüğe doğru U, huni ve silindir şeklindeki membran modülü olarak sıralanabilir. Biyogaz geridevirli durumunda hem biyogaz geridevirli hem de biyogaz gerideviriz her membran modülü için toplam kirlenme direnci içerisinde spesifik kek direnci (R_c), temiz membran direnci (R_m) ve gözenek tıkanması ve membran yüzeyindeki adsorplama sonucu oluşan gözenek tıkanma direnci (R_p) (Şekil 3.30) ve bunların yüzde oranları (Şekil 3.31) belirlenmiştir. Tüm membran modülleri için belirlenen kirlenme dirençleri ve yüzde oranları kıyaslanmıştır.



Şekil 3.30. Membran modüllerindeki kirlenme dirençleri

Spesifik kek kirlenme dirençleri kıyaslandığında biyogaz geridevirli membran modüllerindeki spesifik kek kirlenme dirençlerinin sırasıyla huni, silindir, ve U şekilli membran modüllerinde; $2,39E+13$, $2,08E+13$ ve $3,07E+13$ 1/m ve gözenek tıkanma dirençlerinin ise sırasıyla, $4,53E+12$, $4,47E+12$ ve $4,47E+12$ 1/m şeklinde olduğu belirlenmiştir.

Biyogaz geridevirsiz membran modüllerinde spesifik kek kirlenme direnci sırasıyla silindir, huni, ve U şekilli membran modüllerinde $5,03E+13$, $6,43E+13$ ve $11,3E+13$ 1/m ve gözenek tıkanma dirençleri ise $4,53E+12$, $4,47E+12$ ve $4,43E+12$ 1/m şeklinde olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 3.31. Kirlenme dirençlerinin % oranları

Çalışmamızda biyogaz geridevirli membran modüllerinde kek kirlenme dirençlerin toplam dirençlerdeki oranları sırasıyla huni, silindir ve U şekilli membran modüllerinde % 82, % 80, % 85 şeklinde iken, gözenek tıkanması ve adsorbsiyon kaynaklı gözenek tıkanma direncinin sırasıyla %16, %18 ve %13 olduğu saptanmıştır. Biyogaz geridevirli membran modüllerinde spesifik kek direnci % 80- 85 ve gözenek tıkanma direnci ise % 13- 18 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Biyogaz geridevirsiz membran modüllerinde kek kirlenme dirençlerinin toplam dirençlerdeki oranları ise sırasıyla silindir, huni ve U şekilli membran modülleri için % 91, % 93, % 96 düzeyindedir. Gözenek tıkanma direnci silindir, huni ve U şekilli membran modülleri için sırasıyla %7, %5 ve % 3 olarak belirlenmiştir. Biyogaz geridevirsiz membran modüllerinde spesifik kek direnci % 90- 96 arasında ve gözenek tıkanma direnci ise % 3-8 civarında değişim göstermiştir. Elde ettiğimiz bu verilere benzer değerler farklı literatürlerde de sunulmuştur (Lee ve diğ. 2001; Jeison vd., 2007; Gao vd., 2011).

Biyogaz geridevirli modüllerde organik kaynaklı olarak değerlendirilebilen kek direnci geridevirsiz modüllere kıyasla düşük, inorganik kaynaklı değerlendirilebilecek gözenek tıkanma dirençleri ise nispeten yüksek olarak belirlenmiştir. Biyogaz geridevirsiz membran modül şekilleri arasında bir kıyaslama yapıldığında, biyogaz geridevirli membran modüllerinde olduğu gibi, en düşük spesifik kirlenme direncinin silindir şeklindeki membran modülünde olduğu görülmektedir. Bunu huni şeklindeki membran modülü takip etmektedir. En yüksek spesifik kirlenme direnci ise U şeklindeki membran modülle-

rinde gözlenmiştir. Gözenek tıkanma dirençleri ise tam aksi yönde bir durum sergilemiştir. Dolayısıyla silindirik şekilli modülün spesifik kirlenme direnci açısından en uygun modül olduğu belirlenmiştir.

Anaerobik membran biyoreaktörlerde biyogaz geridevri akı artışı etkisi konusunda bilginin sınırlı olduğu ifade edilmiştir (Cui vd., 2003). Her ne kadar Jeison vd., (2007) yaptıkları çalışmada biyogaz püskürtmenin etkisi konusunda net bir durum belirleyemediklerini ifade etmişlerdir. Bulgularımız hem anaerobik harici membran biyoreaktörlerde (Xie, 2008) hem de anaerobik batık membran biyoreaktörlerde (Fermanian, 2007) daha önce yapılan çalışmalarla kıyaslandığında, biyogaz püskürtmenin kirlenme kontrolü üzerinde membran akılarına artış sağladığı ve kirlenme kontrolünde daha uygun olduğu ifade eden görüşleri desteklemektedir. Özellikle anaerobik batık membran biyoreaktörde membran kirlenme kontrolünde biyogaz geridevri, membran temizlenmesinde etkili olacağı değerlendirilmektedir.

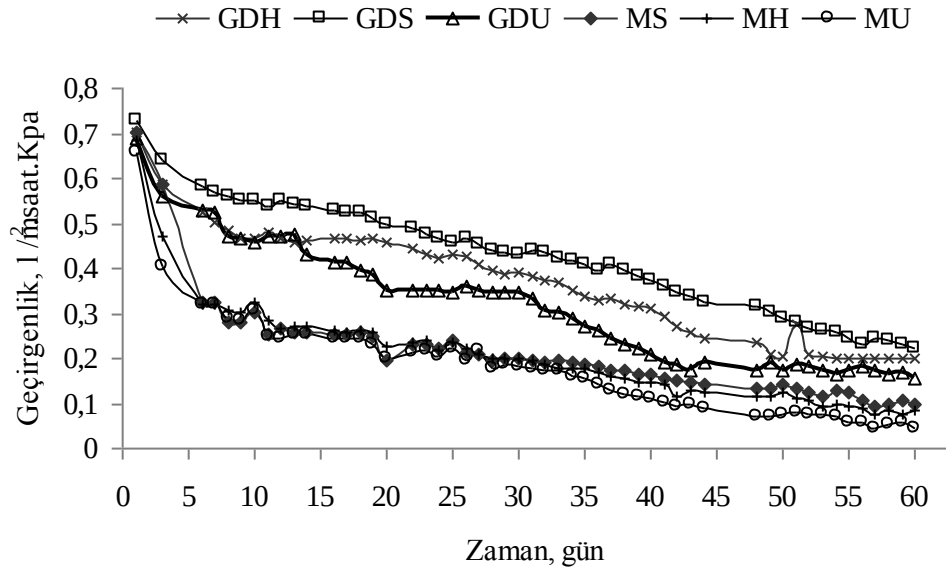
Biyogaz geridevri membran modüllerinde elde edilen sonuçlar, biyogaz geridevri nin kek oluşumunu minimize ettiğini göstermiştir. Aynı şekilli fakat biyogaz geridevri modüllerinde ise kek oluşumu daha yüksek düzeydedir. Benzer şekilde biyogaz geridevri membran modüllerinde gözenek tıkanması ve adsorblanmadan kaynaklanan gözenek tıkanma direncinin, biyogaz geridevri membran modüllerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, biyogaz geridevri sırasında, karbondioksit, hidrojen ve diğer gazların membran yüzeyindeki çözünmüş inorganik maddelerle reaksiyona girip kristal oluşturmaya bağlanabilir. Oluşan kristallerin membran yüzeyinde adsorplanarak kalıcı kirlenmeye neden olduğu düşünülmektedir. Daha önce yapılan benzer bir çalışmada da benzer ifadeler kullanılmıştır (Kwang ve Lee, 1996). Ancak, kristal yapının tam olarak anlaşılabilmesi için detaylı araştırmalara ihtiyaç vardır.

Anaerobik membran biyoreaktörlerde membranlar üzerindeki kek tabakaları hem organik hem de çökebilir inorganik bileşenleri içerdiği rapor edilmiştir. Organik ve biyolojik yapıların etkileşiminin etkisi inorganik bileşenlerinden etkisinden daha fazladır (Choo and Lee, 1996a).

Biyogaz geridevri modüllerde hem organik hem de inorganik bileşenler birlikte kek tabakası oluşturduğundan daha yüksek dirençler oluşmaktadır. Ağ yapıları daha göçlü hale gelmiştir. Çünkü hem organik yapıları bileşenler hem de inorganik bileşenler birlikte bir ağ yapısı oluşturarak membran kirlenme direncini artırmıştır.

3.2.2.2 Biyogaz geridevri ile geçirgenlik ilişkisi

Biyogaz geridevirli membran modüllerindeki geçirgenlik, biyogaz geridevirsiz membran modüllerdeki geçirgenlikten yüksek olduğu ve süreç boyunca aynı durumun devam ettiği tespit edilmiştir (Şekil 3.32). Geçirgenlik davranışı akı davranışıyla aynı durumu sergilemiştir.



Şekil 3.32. Biyogaz geridevri ile membran modüllerindeki geçirgenlik davranışı.

3.2.2.3. Biyogaz geridevri ile çözünmüş mikrobiyal ürünler ve hücre dışı polimerik maddeler ilişkisi

SAnMBR sistemine yerleştirilen membran modüllerindeki kek tabakası içerisindeki SMP ve EPS analizlerinde biyogaz geridevirli silindir, huni ve U şeklindeki membran modüllerinde sırasıyla SMP, 42,2; 141,6 ve 74,1 mg/l ve EPS ise 35,5; 74,9 ve 110,3 mg/l olarak ölçülmüştür. Biyogaz geridevirsiz silindir, huni ve U şeklindeki membran modüllerinde sırasıyla SMP, 45,5; 174,9 ve 150,9 mg/l ve EPS ise 55,9, 180,0 ve 158,6 mg/l olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.33).

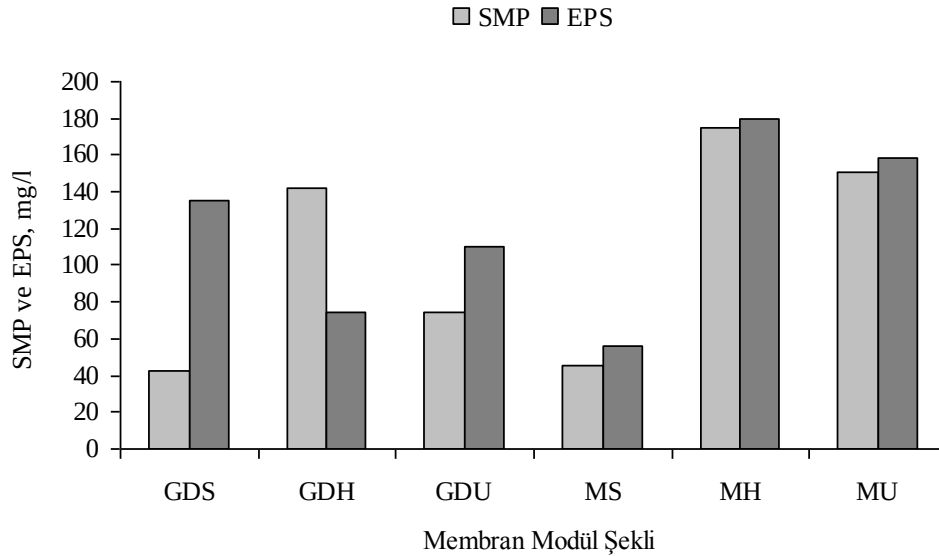
Şekil 3.33’de gösterildiği gibi, biyogaz geridevirli modüllerde SMP, silindir, huni ve U modüllerinde sırasıyla artarken, aynı modüllerde sırasıyla EPS azalış göstermiştir.

SMP kavramı AnMBR’de kirlenme için nispeten yeni bir kavramdır. SMP karakteristikleri membran geçirgenlikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Filtrasyon

sürecinde, SMP biyofilm oluşumu ve süzöntü akısı için hidrolik bir direnç kaynağı olması muhtemel bir besin sağlayarak membran yüzeyinde bir jel yapısı oluşturmakta ve/veya ve membran gözenekleri ve yüzeyinde adsorbe olarak membran gözeneklerini tıkamaktadır (Rosenberger vd., 2005).

SMP membran yüzeyinde veya daha yakınında alıkonmuştur. Biyogaz geridevri yapılmayan modüllerde hem SMP hem de EPS sırasıyla silindir, huni ve U şekilli modüllerde artış göstermiştir.

Biyogaz geridevirsiz modüllerdeki SMP ve EPS, biyogaz geridevirli modüllerdeki SMP ve EPS' den daha yüksek düzeyde bulunmuştur. Benzer şekilde, biyogaz geridevirsiz modüllerdeki membran kirlenme dirençlerinin de biyogaz geridevirli modüllerdeki membran kirlenme direncine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, biyogaz geridevri nin SMP ve EPS oluşumunun ve buna paralel olarak membran kirlenme direncinin kontrolünde etkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü hücre dışı polimerik maddeler kristal yapı ve organik bileşikler arasında bir ağ oluşmasını sağlar. Bu SMP ve EPS artışı ile göçlenir. Böylece direnç artar.



Şekil. 3.33. Biyogaz geridevri ile modül yüzeyinde oluşan kekteki SMP ve EPS ilişkisi

Reaktör sıvısındaki çamurun membran yüzeyine bağlanan çamur kekinin kaynağı olmasına rağmen, EPS ve SMP içeriği açısından reaktördeki çamur ile membran yüzeyindeki kek arasından farklar gözlenmiştir. Özellikle bu durum biyogaz geridevirli membran modüllerinde daha belirgin olarak kendini göstermektedir. Bu da biyogaz

geridevri nin kek tabakası oluşumunu sınırladığı, ancak oluşan kekin ise SMP ve EPS içeriklerinin yüksek olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Biyogaz geridevri durumunda, büyük bir ihtimalle EPS artışı akı artışını sağlarken, SMP artışı ise membran yüzeyinde daha fazla biyofilm tabakasının kalınlaşmasını sağlayabilir. Bir çok çalışmada da membran yüzeyindeki EPS ve SMP, kek tabakası ve biyokirleticilerin oluşmasında önemli rol oynayan bakteriler tarafından salgılandığı ve ayrıca EPS'nin bir kısmının hücre çözünmesinden dolayı SMP artışına katkı sağladığı belirtilmiştir (Liao vd., 2004; Ramesh vd., 2007).

Bu değerlendirmeler ve çalışmamızdan elde edilen bulgular göstermektedir ki, SAnMBR'lerde EPS ve SMP kek oluşumu ve dolayısıyla membran kirlenmesini etkileyen en önemli faktörlerdir. SMP artışı daha etkili olmak üzere hem SMP hem de EPS'nin membran kirlenmesinde birlikte etkili olabileceği şeklinde de yorumlanabilir. Çünkü mikrobiyal ürünlerin artışıyla, ortamdaki polimerlerin tüketimine gerçekleşebilir. Dolayısıyla mikrobiyal ürünler artıkça ortamdaki polimerin tüketileceği için EPS azalacaktır. Ayrıca oluşan bu polimerler biyogaz geridevri ile kekteki kopmalar sonucu ortam EPS oranının artacağı tahmin edilmektedir. Ancak her biri diğerinin oluşumunda etkili olabileceği de göz ardı edilmemelidir.

3.2.2.4. Biyogaz geridevri nin SEM görüntüleri ve EDX analizleri ile ilişkisi

Biyogaz geridevri nin membran kirlenmesine etkileri ile geridevirli ve geridevirsiz ortamlardaki membran kek yapısını incelemek amacıyla membran kek sıyrılmadan ve sıyrıldıktan sonraki durumlarını gösteren SEM görüntüleri alınmış ve EDX analizleri yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 3.34, 3.35, 3.36, 3.37, 3.38 ve 3.39'da görülmektedir.

Biyogaz geridevirli silindir şeklindeki membran modülünde daha yoğun olmak üzere, biyogaz geridevirli huni ve U şeklindeki modüllerde kristal yoğunluklu bir inorganik kirlenme görüntüsü elde edilmiştir. Bir miktar da organik kirlenmenin göstergesi olarak çamur keki bulunmaktadır. Bunu destekler nitelikte, kirlenmeye paralel olarak EDX verilerinde C, O, Ca, mg, Zn ve Na oranları yüksek bulunmuştur. SEM görüntülerinde gösterilen kek tabakası, membranın yüzeyinde oluşan biyolojik kirlenmeyi gösteren biyopolimerlerle kaplı bakteri kültürlerinden meydana gelmektedir (Frølund vd., 1996).

Membran kirlenmesinin belirlenmesi için, EPS, SMP, düşük çözünürlüklü inorganik maddeler doğal kirlenme tabakasının iskeletinin oluşmasına katkı sağlayan makro mole-

küllerin kompleks bir kısmını oluşturarak, inorganik kristaller veya şekilsiz çökeltiler oluşturabilirler. İnorganik kirlenme membran ve gözenek yüzeylerinde inorganik kolloidler ve kristal oluşumuna neden olur. En yaygın inorganik kirletici olarak Struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) çökmesi görünür (Aya ve Namiki, 1992) ve hem organik hem de inorganik membranlarda oluşabilir. Diğer inorganik kirleticiler CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{K}_2\text{NH}_4\text{PO}_4$, silikatlar ve benzeri inorganik maddeleri içerebilir (Norddahl vd., 2000, Koyuncu, 2007, Herrera-Robledo vd., 2011).

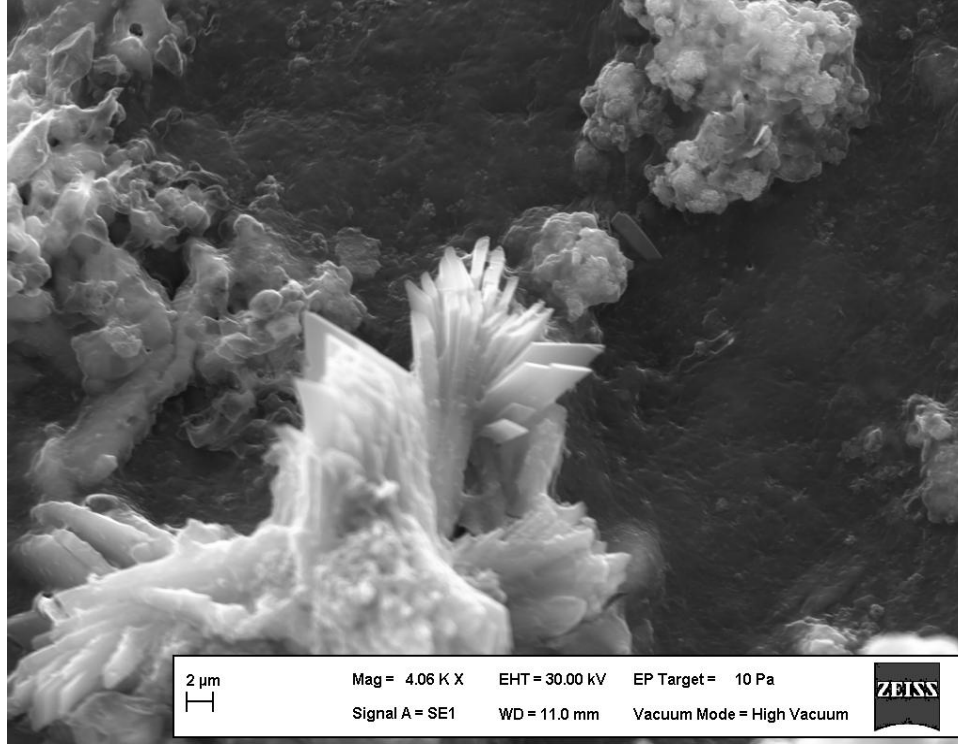
Çalışmamızda kullanılan membranların kek tabakalarında hem organik kirlenme hem de inorganik kirlenmenin göstergesi olan kristaller oluşmuştur. Bu görüntü ve veriler değerlendirildiğinde, biyogaz geridevri nin yapılması sırasında fiziksel temizlemenin gerçekleştiği ve çamur kekinin büyük oranda giderildiği sonucuna varılabilir. Ancak kalıcı kirlenmenin göstergesi olarak gözenek kirlenmenin ise düşük hızda (0.5 l/dak) biyogaz geridevri ile giderilmediği belirtilebilir. Söz konusu modüllerde kek kirlenme direnci (R_c) % 75-85 iken gözenek tıkanması ve membran yüzeyindeki adsorplanmadan kaynaklanan gözenek tıkanma direnci (R_p) ise % 14-25 arasında değişim göstermiştir.

Lyko vd., (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, çalışmamızı da destekler nitelikte membran kirlenmesinde özellikle kalıcı kirlenmenin oluşmasında, metalik inorganik maddelerin biyopolimerlerden daha etkili olduğu belirtilmektedir. Ancak bir miktar kalsiyum ve bileşenlerinin bulunmasının membran süzöntü akısı için faydalı etkiler gösterebileceği de vurgulanmıştır (Kim ve Jang, 2006).

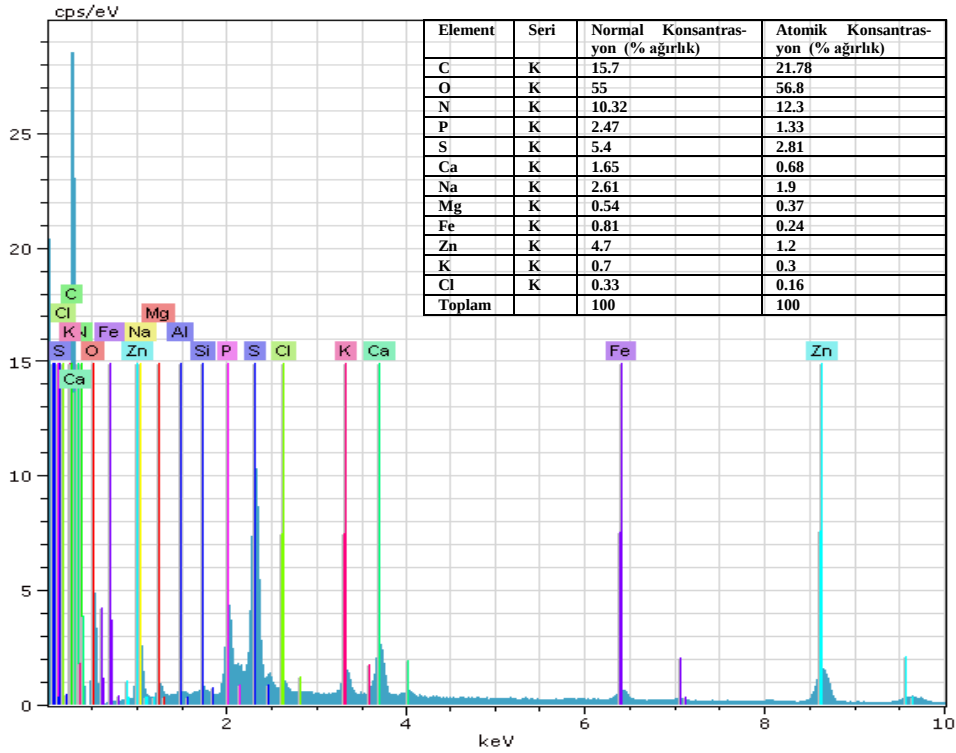
Biyogaz geridevirsiz membran modüllerinde ağırlıklı olarak U şekilli modülde olmak üzere çamur kek görüntüsü daha hâkimdir (Şekil 3.15, Şekil 3.17 ve Şekil 3.19).. Ayrıca bazı kristaller görülmektedir. Bunu destekler EDX verilerinde ise biyogaz geridevirli modüllere kıyasla Ca, Mg, Zn, Na oranları, daha düşük bulunmuştur (Şekil 3.16, Şekil 3.18 ve Şekil 3.20). Bu modüllerde hem inorganik ve hem de organik kökenli kirlenmenin iç içe olduğu söylenebilir. Çünkü biyogaz geridevirli modüllerde kek kısmı sürekli sıyrılırken, bu modüllerde inorganik bileşiklerle birlikte kek kısmı da sürekli kalınlaşmıştır. Burada hem keki oluşturan biyopolimerlerin hem de kristal oluşumunda etkili olan inorganik kirleticilerin bir karmaşık ağ oluşturarak süzöntü akısını ve dolayısıyla geçirgenlikteki yüksek oranda düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca bu modüllerde membran kek kirlenme dirençleri biyogaz geridevirli emsallerine kıyasla oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna mukabil gözenek tıkanması ve yüzey adsorplanmasından kaynaklanan gözenek tıkanma direncinin ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Söz konusu modül-

lerde kek kirlenme direnci (R_c) % 85-92 iken gözenek tıkanması ve membran yüzeyindeki adsorblanmadan kaynaklanan gözenek direnci (R_p) ise % 8-15 arasında değişim göstermiştir.

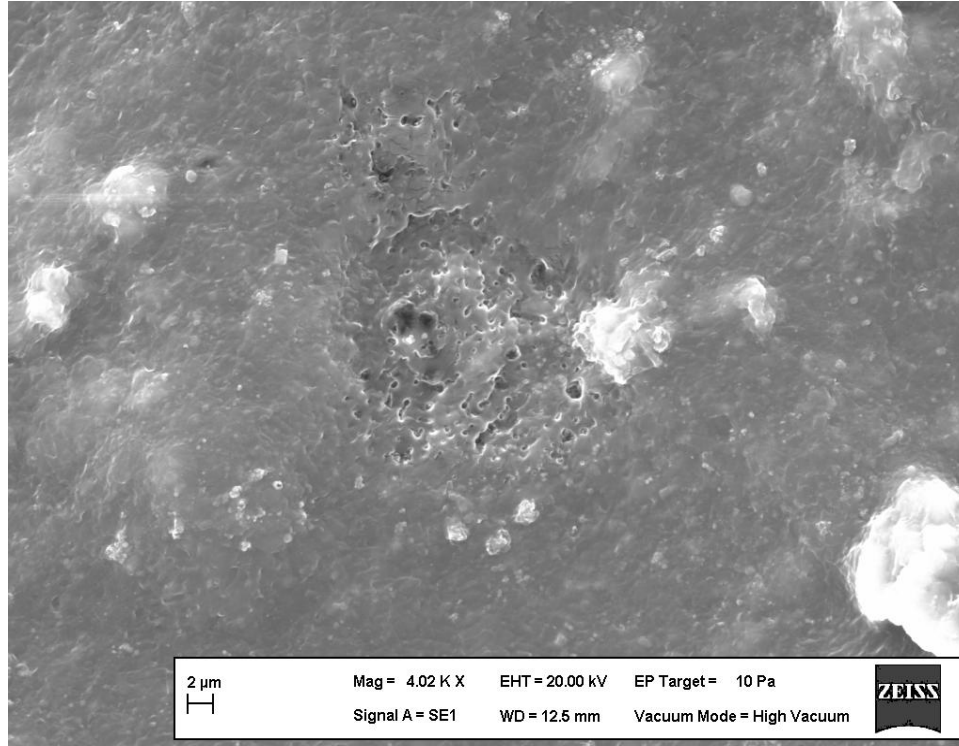
Biyofilm mekanizması, membran ve gözenek yüzeylerinde SMP ve EPS'nin adsorbsiyonu ve birikmesine sebep olmaktadır. Membran SEM görüntülerinde kristaller dışındaki yapı SMP ve EPS'den oluşmaktadır. İnorganik bileşenler dışında keki oluşturan bileşenlerin SMP ve EPS'yi oluşturan protein ve polisakaritlerden oluştuğu belirlenmiştir (3.33). Cho ve Fane (2002), membran yüzey alanında meydana gelen akı azalışının EPS'nin büyük miktarları ile ilişkisini belirlemişler ve EPS birikme yükü ve kirlenme direnci arasında güçlü bir bağ olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca membran görüntüleri de EPS ile kirlenmenin önemli ilişkisini açıklamaktadır.



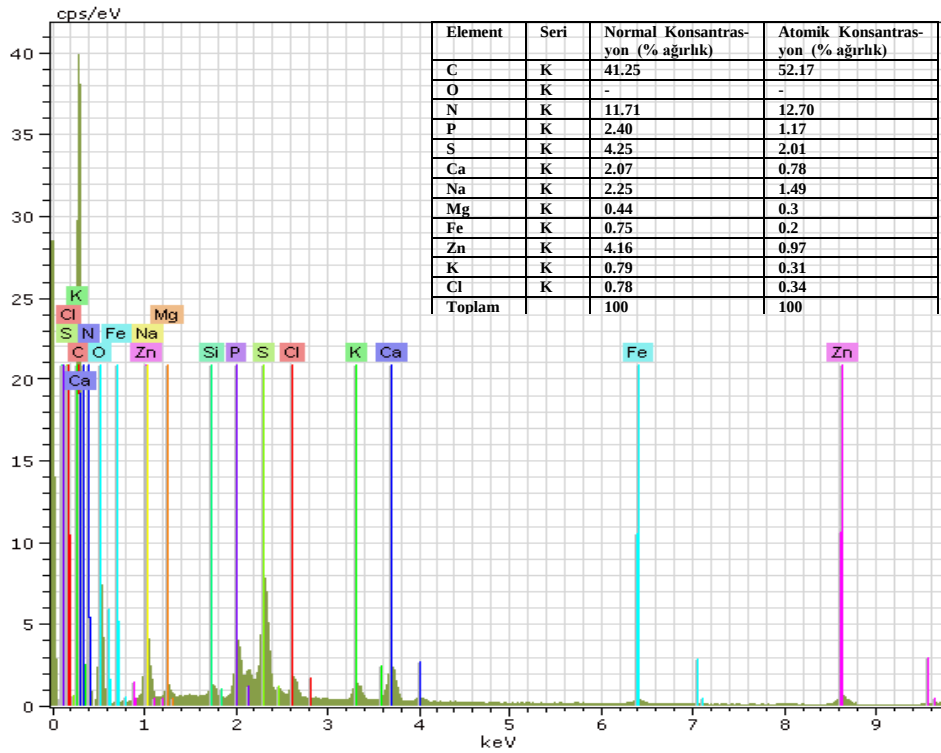
Şekil 3.34. Biyogaz geridevirli silindir şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



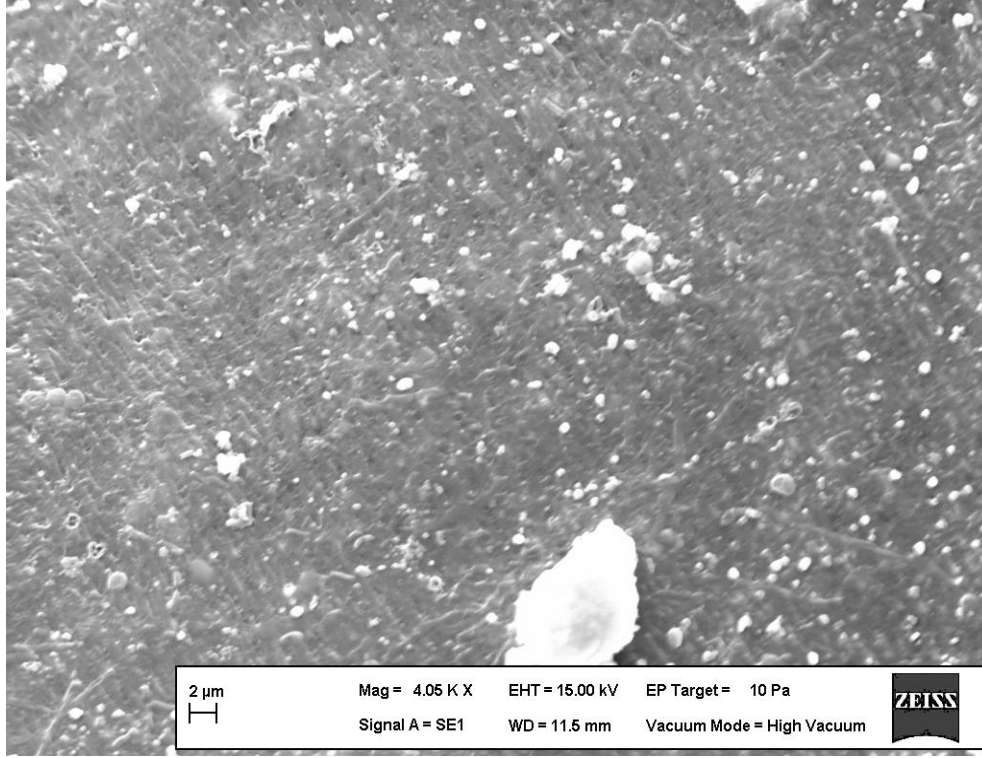
Şekil 3.35. Biyogaz geridevirli silindir şekilli modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



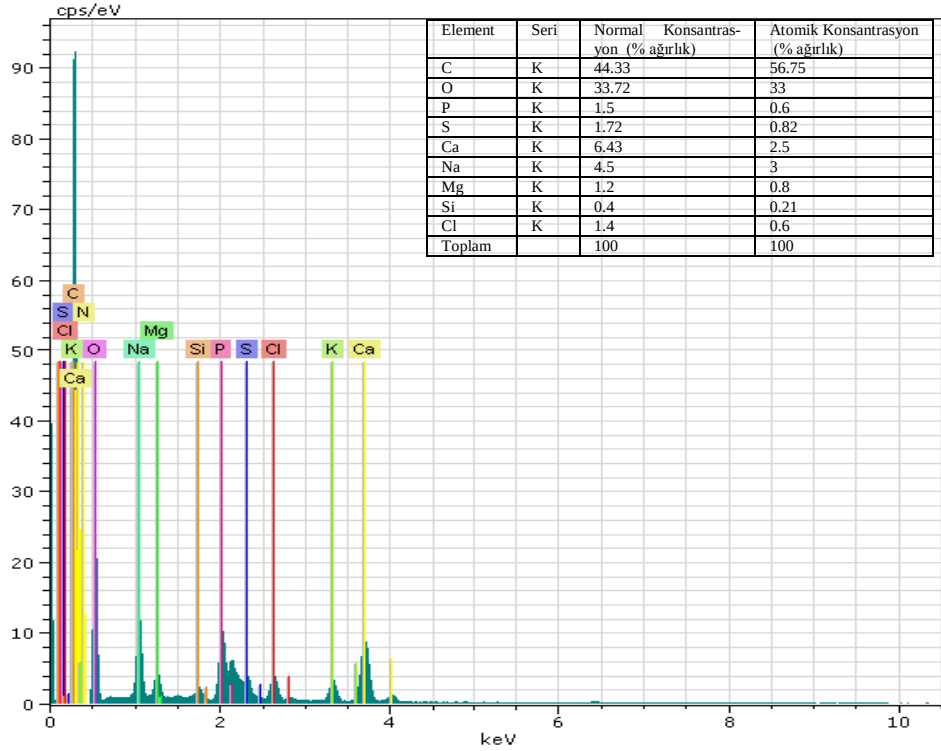
Şekil 3.36. Biyogaz geridevirli huni şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



Şekil 3.37. Biyogaz geridevirli huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementle-rin % oranları.



Şekil 3.38. Biyogaz geridevirli U şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



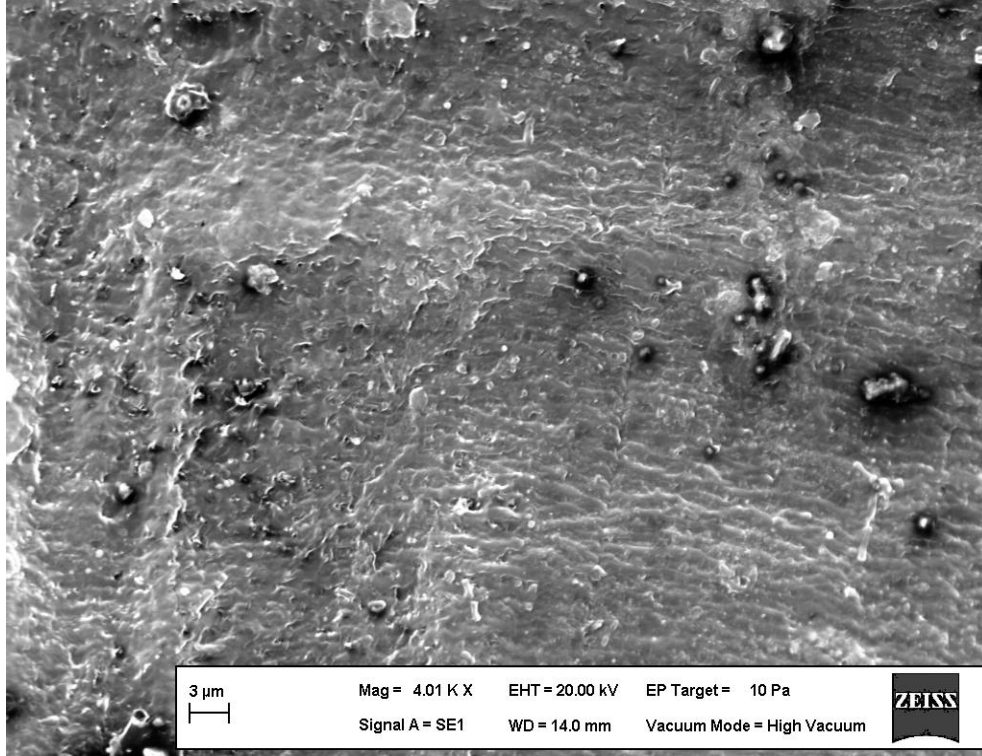
Şekil 3.39. Biyogaz geridevirli U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

Biyogaz geridevirli membran modüllerinin kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüleri, başta huni şeklindeki modül olmak üzere büyük oranda kek yapısı ve bir miktarda kristal yapısının giderildiğini ortaya koymuştur. Görüntülerde, temiz membran görüntülerine yakın görüntüler elde edilmiştir (Şekil 3.40, 3.42 ve 3.44). U ve silindir şeklindeki modülde bir miktar kek ve kristal karışımı görüntüler elde edilmiştir. Huni şeklindeki modülde daha fazla olmak üzere EDX analizlerinde C, O, P ve Zn oranları yüksek, Ca, Mg, Na ve Si verilerinin ise çok düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.41, 3.43 ve 3.45). Biyogaz geridevirli modüllerde, U modülde nispeten düşük, oluşan kek yapısının fiziksel temizleme ile büyük oranda giderilebildiği şeklinde değerlendirilebilir. SEM –EDX analizleri membran kirlenmelerinin C, O,N ve P gibi organik ve Ca, Mg, Zn, Si, Al, Cl ve Fe gibi inorganik kirlenme orijinli olduğunu göstermiştir. SEM-EDX analizleri anaerobik membran biyoreaktörlerde işletme sürecinde giriş suyu ve aktif çamurda büyük oranda birçok metal iyonu veya metal bileşiğinin olduğu belirlenmiştir. Buna benzer olarak, aktif çamur ve besleme suyundaki metal iyonları inorganik kirlenmenin orijini olduğu rapor edilmiştir (Meng vd., 2007). Membran kirlenmesinin spesifik durumu EPS, SMP ve çözünmüş veya çözünür inorganik maddeler, olgun kirlenme tabakası üzerinde iskelet oluşturmaya katkı sağlayan makro moleküllerin kompleks bir parçasını oluşturan inorganik kristaller veya amorf çökeltiler üretebilir.

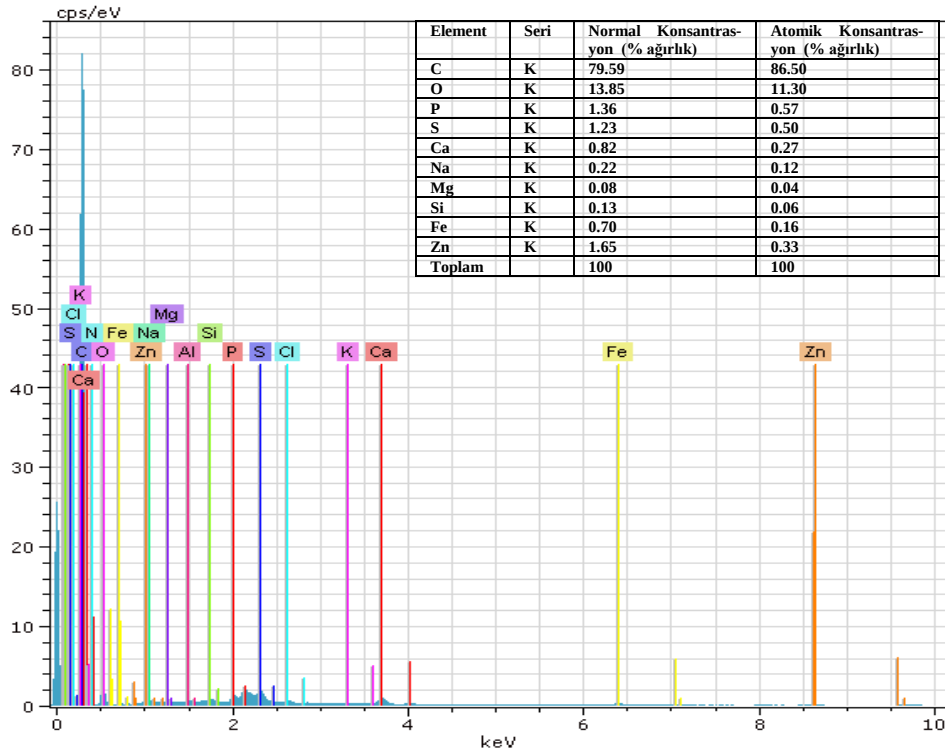
Membran yüzeyinde biriken biyopolimerler ile metal kristalleri arasındaki köprülerin biyogaz geridevirli modüllerde zayıf, biyogaz geridevirsiz modüllerde ise güçlü olduğu söylenebilir. Şekil 3.21, Şekil 3.23 ve Şekil 3.25 SEM görüntüleri ve Şekil 3.22, Şekil 3.24 ve Şekil 3.26 EDX grafik ve elementlerin % verileri bunu desteklemektedir.

Membran kirlenmesi hakkında yaygın bir hipotez, biyomineralizasyon ve çökeltme oluşturan, kompleks ve multi-kanal ağları olarak varsayılan dahili yapı bozulması olduğunda, bir noktaya kadar sürekli kirlenme tabakasının geliştiği tahminine dayanmaktadır.

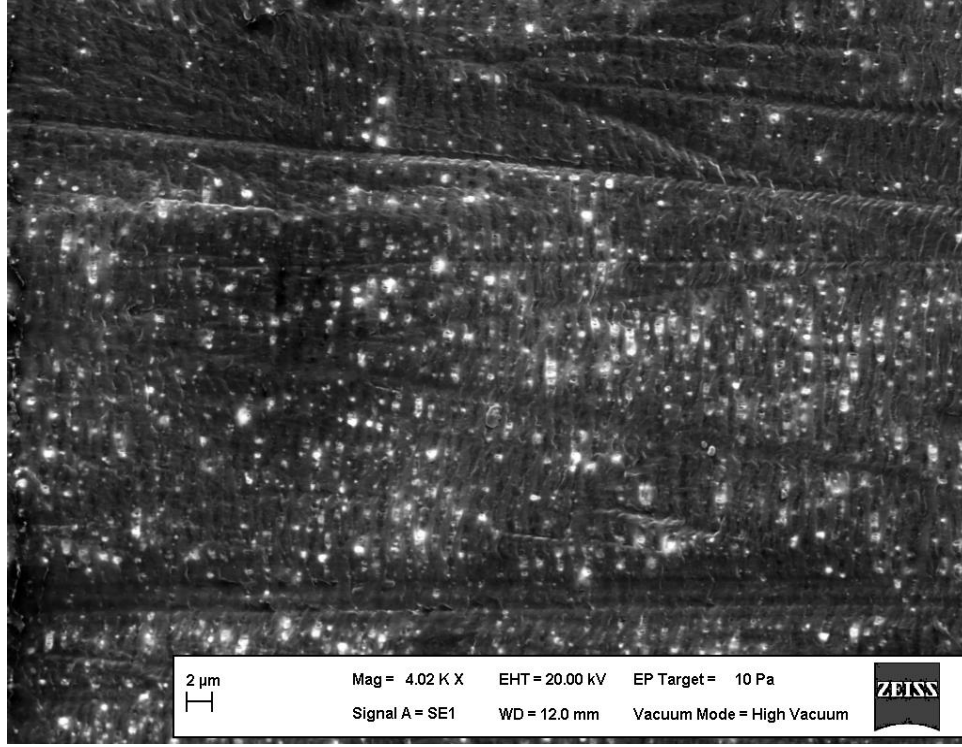
Sonuçta partiküller ana kirlenmeyi üreterek lokal akıda artış sağlar. Lokal akı artışları filtrasyon direncinde keskin bir artış ile kirlenme tabakası yapısının aniden bozulmasına yol açarak membran boyunca katıların birikmesini engellemektedir. Bu olay akı azalışına, TMP artışına ve yeni bir kek tabakası oluşturmaya sebep olur.



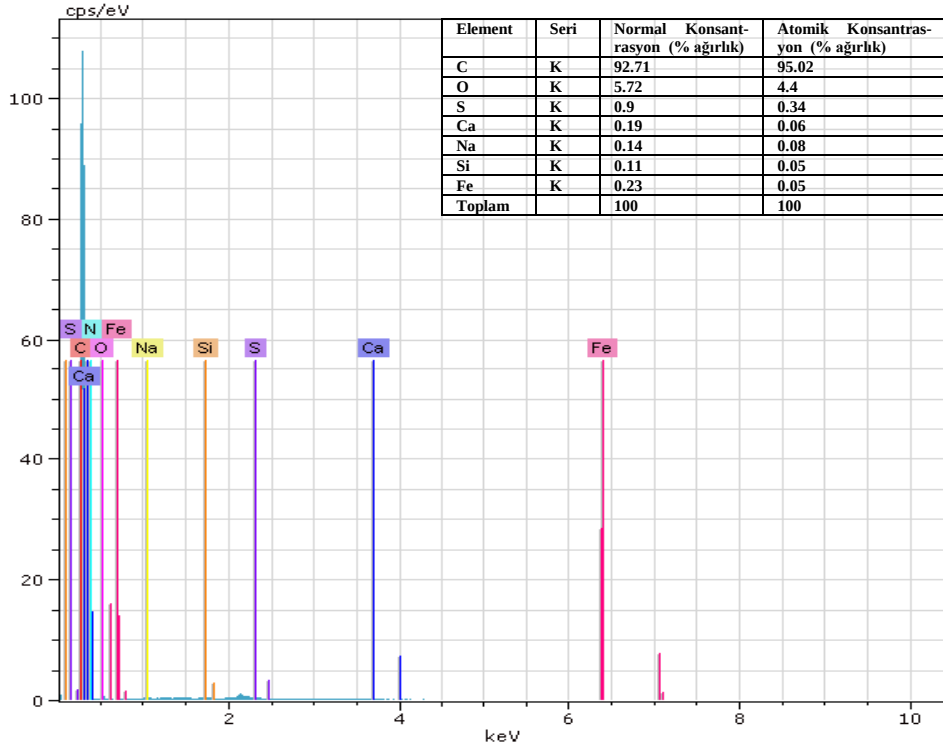
Şekil 3.40. Biyogaz geridevirli silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



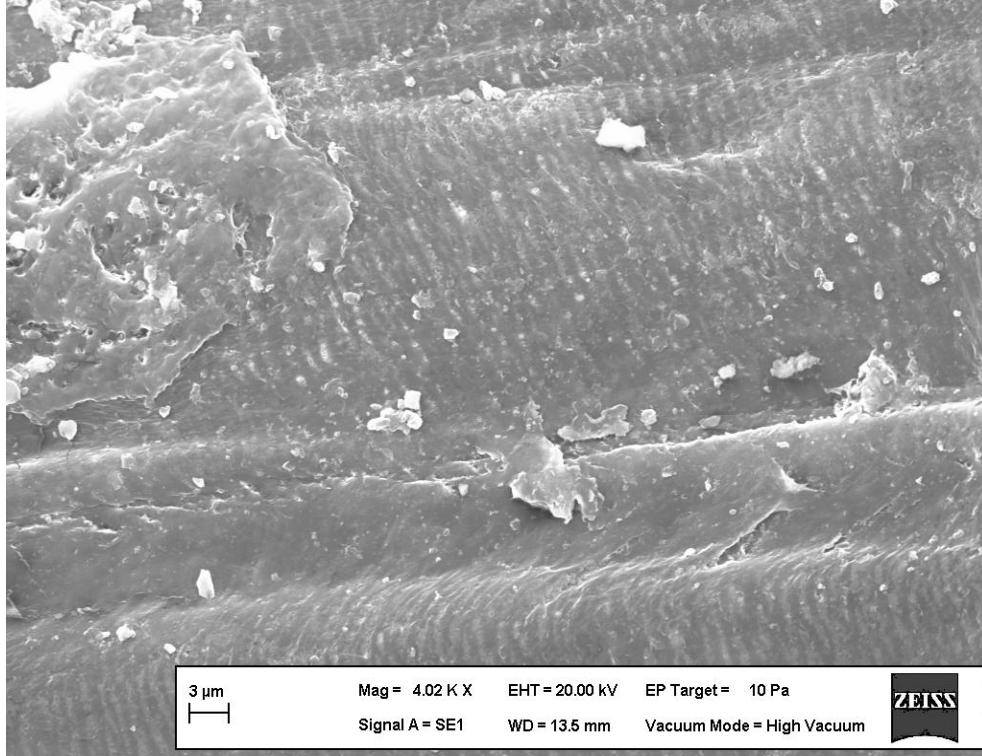
Şekil 3.41. Biyogaz geridevirli silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



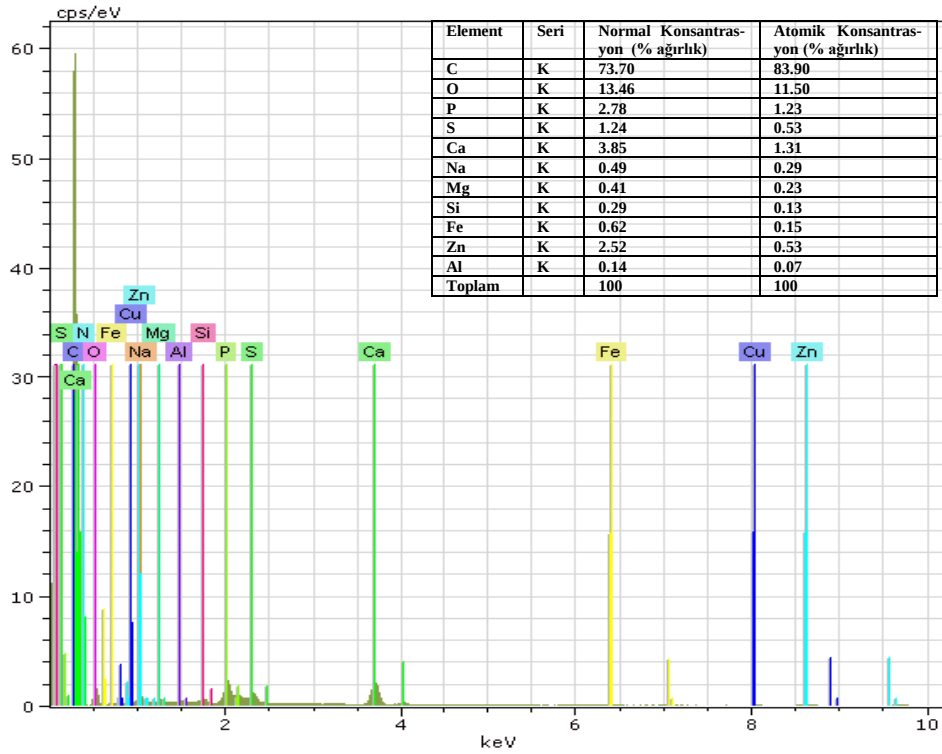
Şekil 3.42. Biyogaz geridevirli huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



Şekil 3.43. Biyogaz geridevirli huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



Şekil 3.44. Biyogaz geridevirli U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.

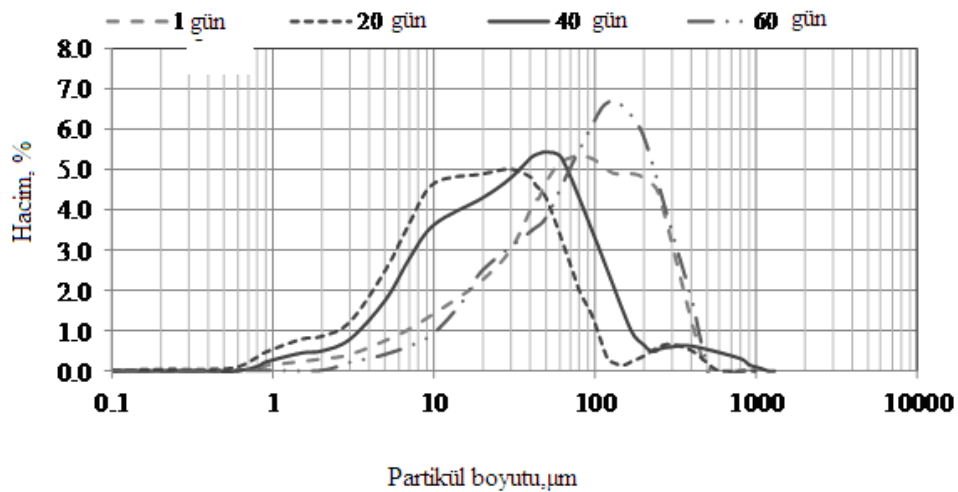


Şekil 3.45. Biyogaz geridevirli U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

3.2.2.5. Biyogaz geridevri ile partikül boyut dağılımı ilişkisi

Aynı özellikte farklı şekillerdeki membran modüllerinin üçüne biyogaz geridevri yapılırken, aynı özellikleri taşıyan diğer üç membran modülüne biyogaz geridevri yapılmamıştır. SAnMBR sisteminin işletilmesi sürecinde reaktör sıvı ortamından yaklaşık 20 gün ara ile numuneler alınarak partikül boyut dağılımı belirlenmiştir (Şekil 3.46).

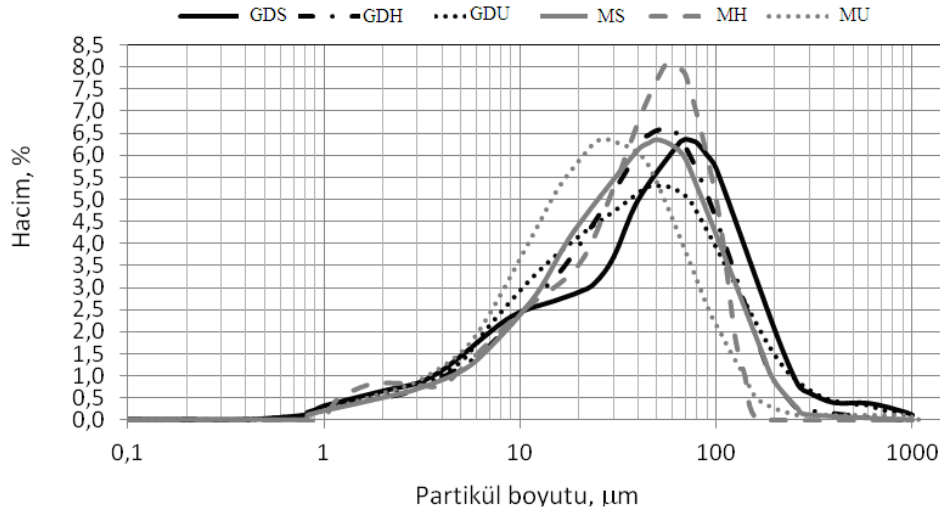
Şekil 3.46 de görüldüğü gibi sistemdeki partikül süreç içerisinde 10-1000 μ m aralığında olduğu belirlenmiştir. İşletme başlangıcında ortalama partikül boyutu 100 μ m değerlerinde iken, süreç içerisinde partikül boyutları küçülerek ortama 10-100 μ m aralığına düştüğü belirlenmiştir. Ancak yaklaşık bir ay sonra ki süreçte partikül boyutu tekrar büyümüş ve ortalama olarak 100-1000 μ m aralığına yükselmiştir.



Şekil 3.46. Biyogaz geridevri ile ilgili çalışmalar süresince reaktör çamurunda PSD.

SAnMBR sistemi içerisindeki kirlenmiş membran modüllerinden sıyrılan kek tabakasında partikül boyutları belirlenmiştir. Böylece biyogaz geridevri nin PSD ile ilişkisi incelenmiştir. Biyogaz geridevri yapılan membran modülleri yüzeyindeki kekte, U, huni ve silindir şekilli modüllerde partikül boyutunun sırasıyla, 0,7-3,0, 1,0-3,0 ve 1,0-6,0 μ m aralığında olduğu belirlenmiştir. Biyogaz geridevirsiz membran modülleri yüzeyindeki kekte, U, huni ve silindir şekilli modüllerde ise partikül boyutunun sırasıyla, 0,5-3,0, 0,7-3,0 ve 0,7-6,0 μ m aralıklarında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.47). Biyogaz geridevirsiz membran modüllerinde partikül boyut dağılımı diğerlerine nispeten daha

küçüktür. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde, püskürtme debisi düşük olması nedeniyle bu fark görülmektedir. Biyogaz geridevri nin membran kirlenme direncinin azaltılmasında etkisi açıktır. Hu ve Stuckey (2006 ve 2007), mezofilik koşullarda seyreltilmiş evsel atıksuları (sentetik besin, 460 mg KOI/l) arıtmak için biyogaz geridevri ile dahili membran temizleme yaparak anaerobik batık membran biyoreaktör (SAnMBR) ile çalışmışlardır. Membran biyoreaktörde bulunan 0.15-0.4 μm boyutunda ince partiküllerden ve ikincil bir membran gibi davranan bir jel tabakasından dolayı membran kirlenmesini gözlemişlerdir. Bulgularımız, PSD açısından kek tabakasının üniform olarak dağılmadığını ve küçük flokların membran yüzeyinde birikme eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bu durumun sentetik atıksu yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.47. Biyogaz geridevirli ve geridevirsiz membran modüllerindeki keklerde PSD.

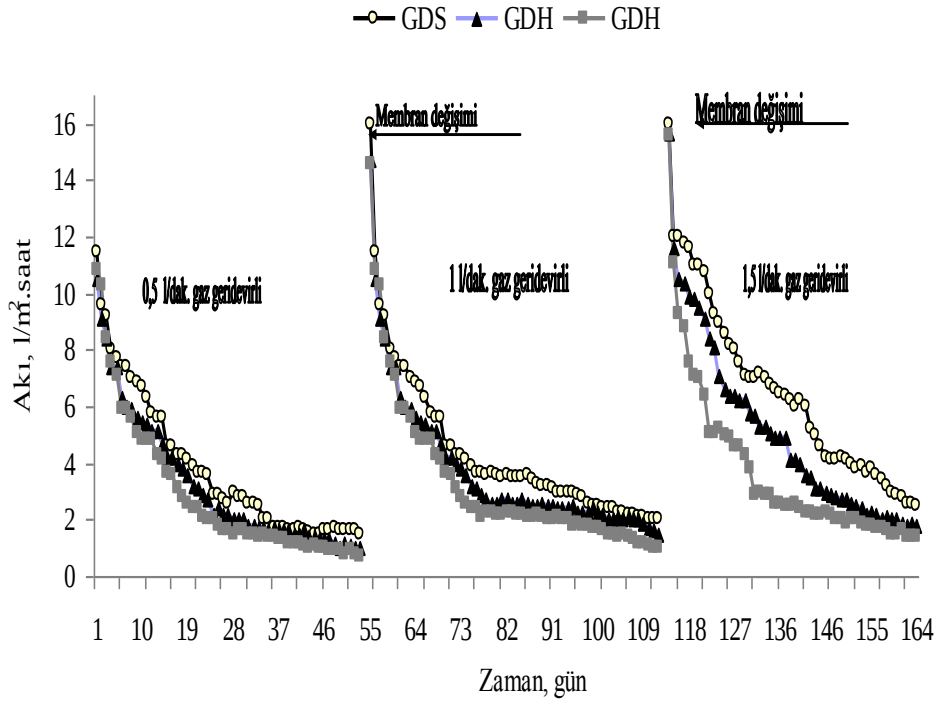
3.2.3. Biyogaz geridevir debisinin kirlenmeye etkisi

3.2.3.1. Akı, TMP ve membran kirlenme dirençleri

Üç farklı biyogaz püskürme debisinde biyogaz geridevri yapılmıştır. Bu amaçla, 0,5, 1 ve 1,5 l/dak biyogaz debilerinde çalışılmıştır. Her farklı biyogaz debisi için sisteme aynı özellikte membran modülleri yerleştirilmiş ve süreç içerisinde biyogaz debisinin kirlenmeye etkisi incelenmiştir. Her biyogaz debisi aşaması için yaklaşık olarak sistem 2 ay süresince izlenmiştir. Gaz geri devirli kısımda oluşan biyogaz bir toplama balonunda

biriktirilmiş ve sürekli geridevirli şekilde verilmiştir. Çalışmada yüzey alanları eşit silindir, Huni ve U şekilli membran modülleri kullanılmıştır.

Başlangıç akıları 11-12 l/m².saat olup yaklaşık olarak iki ay sonunda 2-2,5 l/m².saat seviyelerine düştüğü tespit edilmiştir. Süreç sonunda membran modülleri değiştirilmiş ve 1 l/dak debide biyogaz püskürtülmüştür. Başlangıç akısı, biyogaz debisinin artmasıyla, 15-16 l/m².saat akı değerlerinden yine yaklaşık 2 ay süre sonunda 2,5-3,5 l/m².saat seviyelerine düşmüştür. Daha membran modülleri tekrar değiştirilmiş ve 1,5 l/dak debi ile biyogaz püskürtülmüştür. Bu durumda da başlangıç akı, 16-17 l/m².saat değerlerinden süreç sonunda 3-4,5 l/m².saat değerlerine azalma göstermiştir (Şekil 3.48) .

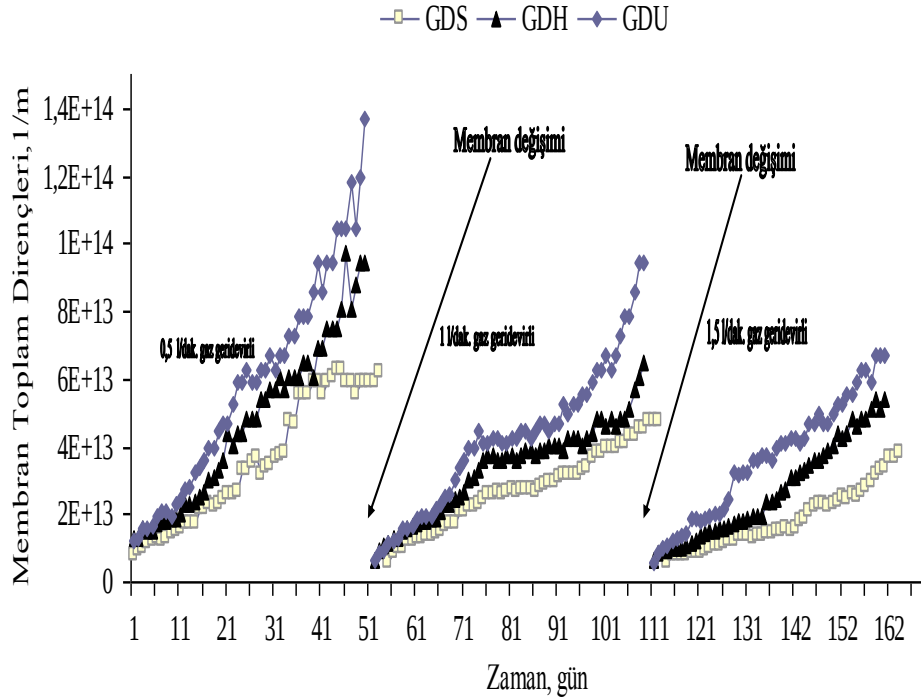


Şekil 3.48. Farklı biyogaz geridevir debilerinde membran modüllerinde zamana bağlı akı değişimleri.

Şekil 3.48'de görüldüğü gibi biyogaz geri devir püskürtme debisi artırıldıkça akı, değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Membran modül şekilleri arasında da akı değerlerinde az da olsa bir fark gözlenmiştir. Akı davranış sıralaması büyükten küçüğe sırasıyla silindir, huni ve U modülü şeklinde olduğu belirlenmiştir.

Biyogaz geridevir debisi artıkça toplam akı artışı yanı sıra, modüller arasındaki akı farkıda açık bir şekilde belirginleşmiştir. SAnMBR sisteminde her biyogaz geridevir de-

bisi artışında, membran modüllerindeki süzöntü akısı artışının aksine paralel olarak membran modüllerindeki toplam kirlenme dirençleri de azalmıştır (Şekil 3.49).



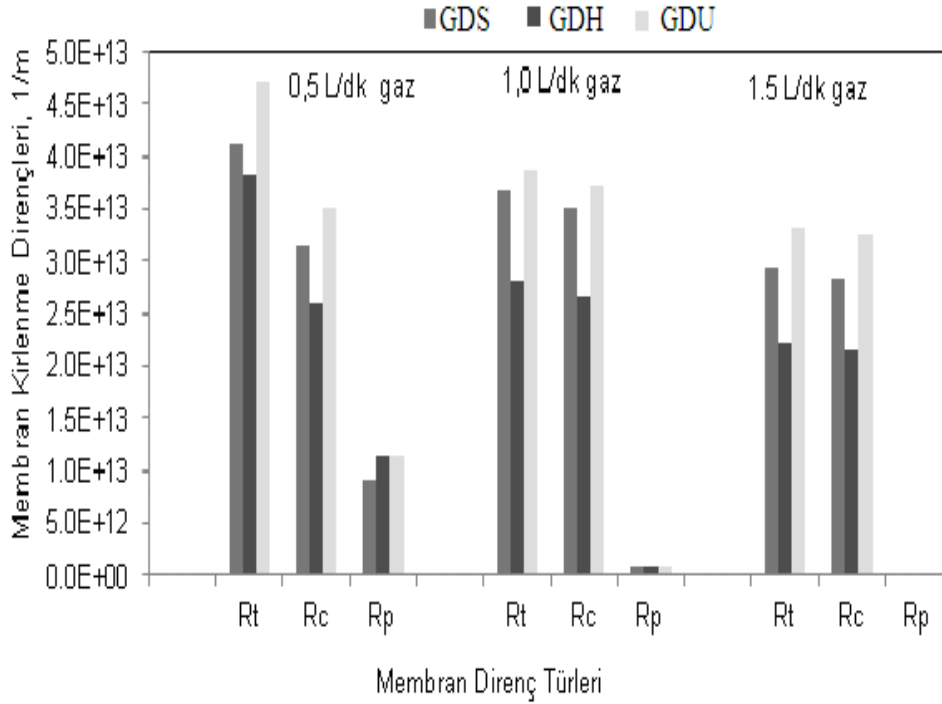
Şekil 3.49. Farklı biyobiyogaz geridevir debilerinde zamana bağlı membran toplam dirençlerinin değişimi.

0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde toplam direnç, sırasıyla silindir, huni ve U şekillerinde $3,81046E+13$, $4,11773E+13$ ve $4,70769E+13$ 1/m olduğu belirlenmiştir. 1,0 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde toplam direnç sırasıyla $2,80816E+13$, $3,67742E+13$ ve $3,87E+13$ 1/m iken, 1,5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde ise $2,23377E+13$, $2,9203E+13$ ve $3,33621E+13$ 1/m olarak belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında her biyogaz geri devir püskürtme debisi artışında aynı süre içerisinde toplam membran kirlenme dirençleri düşmüştür.

Toplam dirençlerin spesifik kek kirlenme dirençleri kıyaslandığında toplam dirençlerde olduğu gibi kek kirlenme dirençleri de her biyogaz geri devir püskürtme debisi artışında azalış göstermiştir (Şekil 3.50).

0.5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde kek dirençleri sırasıyla silindir, huni ve U şekillerinde, $2,59012E+13$, $3,13716E+13$ ve $3,50154E+13$ 1/m iken gözenek tıkanma dirençleri yine sırasıyla, $9,22052E+12$, $11,5636E+12$ ve $11,3811E+12$ 1/m olduğu belirlenmiştir. 1,0 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde kek dirençleri

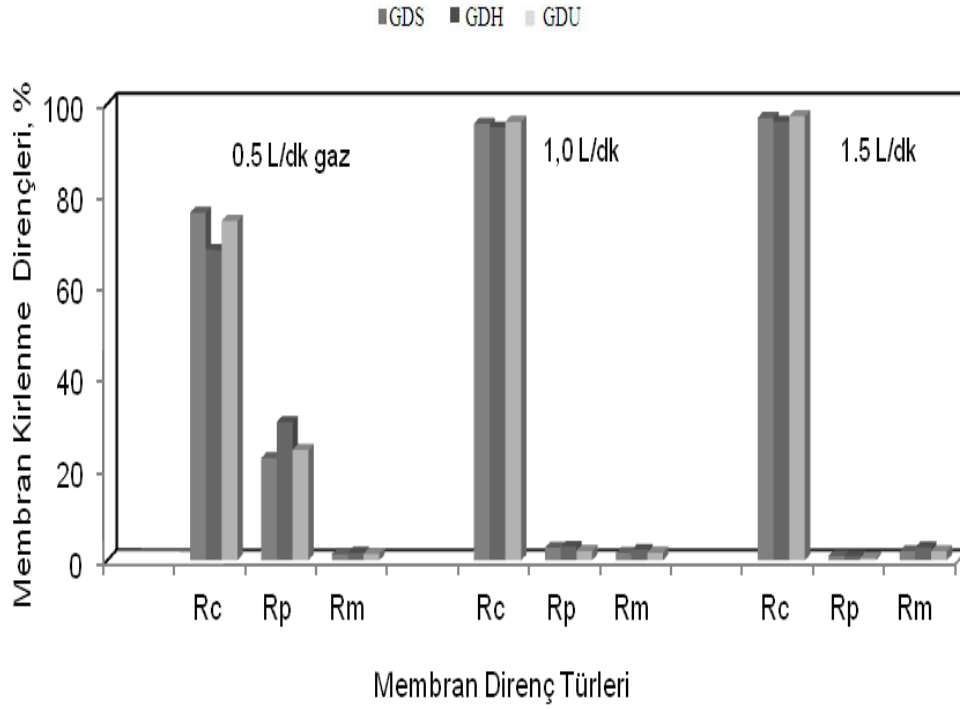
sırasıyla, $2,66224\text{E}+13$, $3,51842\text{E}+13$ ve $3,72052\text{E}+13$ 1/m olurken, gözenek tıkanma dirençlerinin sırasıyla $1,00483\text{E}+12$, $8,19487\text{E}+11$ ve $8,14345\text{E}+11$ 1/m olduğu tespit edilmiştir. 1.5 l/dak'lık biyogaz geridevir debisinde ise kek kirlenme direncinin sırasıyla $2,14714\text{E}+13$, $2,83305\text{E}+13$ ve $3,24748\text{E}+13$ 1/m ve gözenek tıkanma dirençlerinin ise yine sırasıyla, $2,26448\text{E}+11$, $2,87371\text{E}+11$ ve $2,06887\text{E}+11$ 1/m olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.50. Farklı biyogaz geridevir debilerinde membran kirlenme dirençleri.

Şekil 3.51'de görüldüğü gibi, biyogaz püskürtmesi yapılan membran modüllerinde; 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde kek kirlenme dirençleri toplam dirençlerdeki oranları sırasıyla huni, silindir ve U şekilli membran modüllerinde % 76, % 68, % 74 şeklinde iken, gözenek tıkanması ve adsorbsiyon kaynaklı gözenek tıkanma direncinin ise sırasıyla % 22, % 30 ve % 24 olduğu belirlenmiştir.

1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde, kek direnci sırasıyla, % 96, % 95 ve % 96 ve gözenek tıkanma direncinin sırasıyla, % 3, % 3 ve % 2 olduğu tespit edilmiştir. 1,5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde kek direnci her üç modülde de % 97 iken, gözenek tıkanma direncinin ise sadece % 1 civarında belirlenmiştir. Biyogaz geridevir ile membran yüzeyinde oluşan kristallerin dağıldığı ve süspansiyona geçtiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.51. Farklı biyogaz püskürtme debilerinde membran kirlenme dirençleri % oranları.

Biyogaz geridevir debisi arttıkça genellikle organik yapıdaki giderilebilen ve kek direnci artarken, toplam içerisinde oranının arttığı, bunun aksine kalıcı ve fiziksel temizleme yöntemleri ile nispeten giderilemeyen göznek tıkanma direncinin oranlarının azaldığı söylenebilir.

Biyogaz geridevir ile kek tabakasının oluşmasını engellenebilir (Hulse vd., 2009). Kek direncindeki artış kek yapısının dağılmasına ve/veya kırılmasını sağlayarak daha küçük partiküllerin oluşmasında etkili olur. Oluşan küçük flok partiküller biyomasın süspanse halde kalmasını sağlar. Bu durumda sıvı çamur karışımından biyommas ayrılma süreci gözlenmez. Küçük partiküllerden oluşan kek tabakası, biyomas kek tabakası ile kıyaslandığında, daha büyük dirençler oluşturduğu gözlenmiştir (Gan, 1999; Min, 2006; Xie, 2008). Benzer direnç testleri Nuengjamnong (2005) tarafından da gerçekleştirilmiştir. Bu püskürtme debisi ve dolayısıyla biyogaz artışı, membran yüzeylerinde biyolojik faaliyeti ve dolaylı olarak biyokütle kaynaklı kek tabakasında artış sağlanmıştır. Aynı zamanda çözünmüş inorganik bileşiklerden çökebilir veya daha büyük partikül boyutlarına sahip kristal oluşumunu sağladığı ve oluşan kristal yapıların kırılarak membran yüzeylerinde birikmesinin önlendiği gözlenmiştir. Artan biyokütle kaynaklı kek gevşek olduğundan

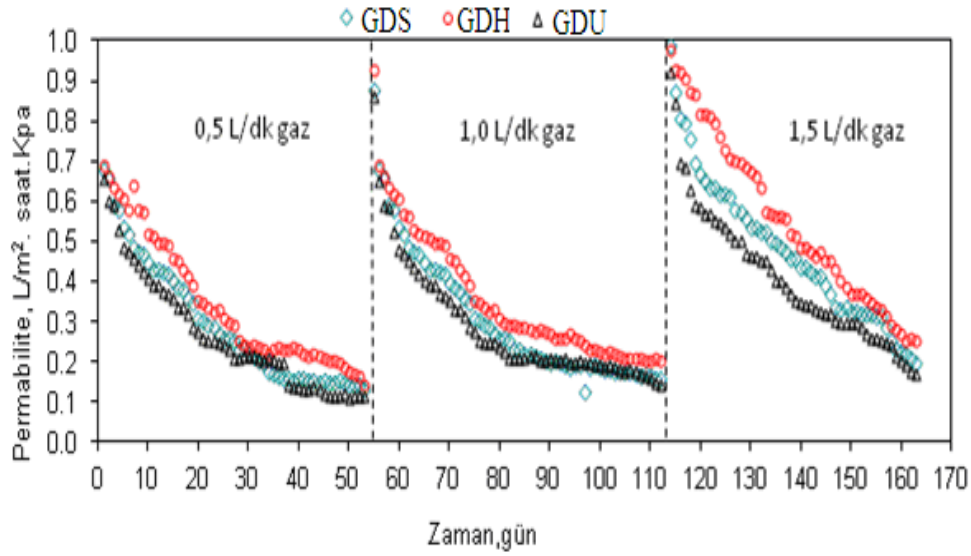
bir nevi filtrasyon görevi de görebilir (Meng ve diğ.2006). Bunun olabilmesi için kritik akı üzerinde sistemin çalıştırılması gerekir (Jeison 2007).

Çalışmamızda da biyogaz geri devir püskürtme debisi arttıkça membran yüzeylerinde kek kalınlaşması azalmıştır. Ayrıca oluşabilecek kristal yapı kırıldığı anlaşılmaktadır. Böylece püskürtme debisinin kirlenme kontrolünde etkili olduğu belirlenmiştir. Anaerobik membran biyoreaktörlerde biyogaz geridevri akı artışı ve kirlenme kontrolü konusunda bilgi oldukça sınırlıdır (Cui vd., 2003; Gao vd., 2011).

3.2.3.2. Biyogaz geridevir debisi ile geçirgenlik ilişkisi

Biyogaz biyogaz geridevir debisi artışında hem geçirgenlik artışı hem membran modüllerindeki geçirgenlik farkının arttığı belirlenmiştir (Şekil 3.52).

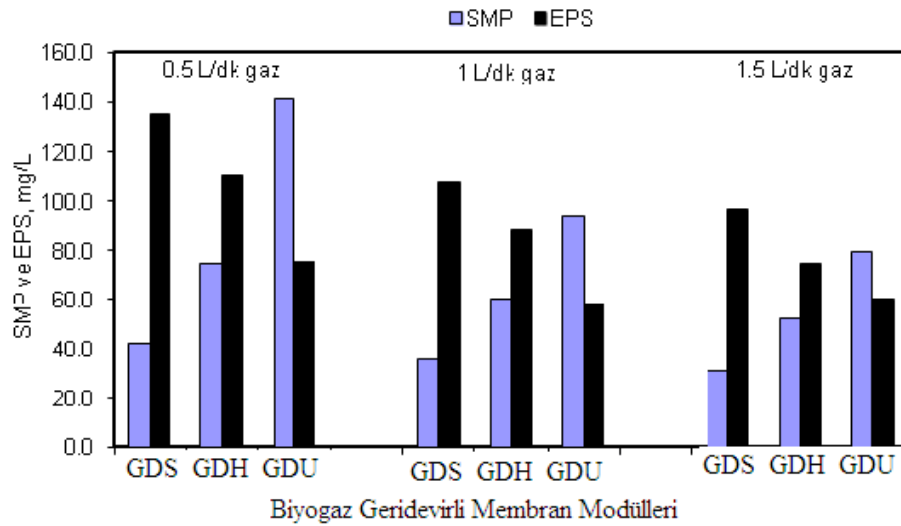
Biyogaz geridevir debisi artışı ile akıdaki davranışa paralel olarak geçirgenlik artışı da gözlenmiştir. Akı davranışını etkileyen tüm faktörler burada da etkili olmuştur. TMP sabit olduğundan geçirgenlik ile akı kıyaslanabilir.



Şekil 3.52. Farklı biyogaz geri devir debilerinde membran modüllerindeki geçirgenlik değişimi.

3.2.3.3. Biyogaz geridevir debisi ile SMP ve EPS ilişkisi

0.5 l/dak biyogaz geridevir debisinde SMP miktarı, sırasıyla silindir, hüni ve U şekilli modüllerde artarken, EPS yine sırasıyla azalma göstermiştir. Bu durum davranış biçimi, miktarlarında azalma gerçekleşerek hem 1,0 l/dak biyogaz geridevir ve 1,5 l/dak biyogaz püskürme hızlarında tekrarlanmıştır. 0,5 l/dak biyogaz geridevri nde SMP ve EPS miktarları, 1,0 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde SMP ve EPS miktarları biraz daha azalmıştır. 1.5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde SMP ve EPS miktarları daha da azalış göstermiştir (Şekil 3.53).



Şekil 3.53. Farklı biyogaz geridevir debilerinde membran modüllerindeki kekte SMP ve EPS ilişkisi.

Biyogaz geridevir debisi artıkça davranış biçimi her üç biyogaz geri devir püskürtme debisinde aynı olmak üzere, SMP ve EPS miktarlarında azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, filtrasyon direnci ile paralellik arz etmektedir. Bir SANMBR sisteminde daha çok biyogaz sıyırmasıyla oluşan kesme kuvvetine her zaman maruz kalan üst kek tabakasından dolayı özellikle daha yüksek EPS içerikli flokların kek tabakasını kalınlaştırmasının olabileceği belirtilmiştir (Gao vd., 2011).

EPS artığında SMP oranları azalmaktadır. Burada kalınlaşan ve EPS floklarının yoğun olduğu kek tabakasının bir nevi membran görevi gördüğü şeklinde değerlendirilebilir. Burada net bir şekilde, biyogaz geridevir debisinin artışı durumunda, SMP ve EPS

oranlarında, özellikle membran kirlenme üzerinde daha fazla etkili olan SMP oranların düşürülmesinde etkili olduğu söylenebilir (Rosenberger vd., 2005). Biyogaz geri devir püskürtme debisi artışı durumunda membran filtrasyon dirençlerinde de, SMP'deki azalışa benzer olarak, azalma gerçekleştiği belirlenmiştir.

3.2.3.4. Farklı biyogaz geridevir debilerinde membran modüllerindeki SEM görüntüleri ve EDX analizleri

0,5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde silindir şeklindeki modülde SEM görüntüsü incelendiğinde ağırlıklı olarak kristallerin oluştuğu ve bir miktarda da biyokek olduğu görülmüştür (Şekil 3.54). EDX analizleri; Fe, P, S, Ca, Zn, Al ve O ağırlıkça % oranları, sırasıyla, 43, 13, 7, 4, 3,3, 1,5 ve 28 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.55). Fe, P, Ca gibi metaller ağırlıkça fazla görülmektedir. Bu elementler ise ortamda CaCO_3 , FeS , MgCO_3 ve $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ gibi mineral kaynaklı kristallerin oluşmalarına sebep olabilir (Martha Dagneu, 2010). Biyogaz geridevir debisi düşük olduğu için, ağırlıkça yüksek oranlarda belirlenen Fe, P, S ve Ca gibi elementlerin CaCO_3 , FeS , MgCO_3 ve $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ gibi bileşikler oluşmasını artırdığı sanılmaktadır. Ayrıca SMP ve EPS miktarları da yüksek olarak belirlenmesi (Şekil 3.53), organik biyokek oluşumunun da gerçekleştiğini göstermektedir. Böylece hem organik hem de inorganik kirlenme birlikte bağlar oluşturarak membran direncinin artışını sağlamıştır. Hem organik hem de inorganik maddelerin birlikte kek oluşturması, fosfat ve sülfat gruplarının ağırlıklı olduğu bileşiklerin oluştuğu anlamına gelebilir. Membran yüzeyi üzerinde gözlenen bağlar nükleik asitlerden ve beslemeden kaynaklanan fosfat ve sülfat gruplarıyla ilgili olabilmektedir. Bu durum organik kirlenmenin yanı sıra toplam membran kirliliğinde inorganik kirlenmenin de sorumlu olduğunu göstermektedir (Gao vd., 2011).

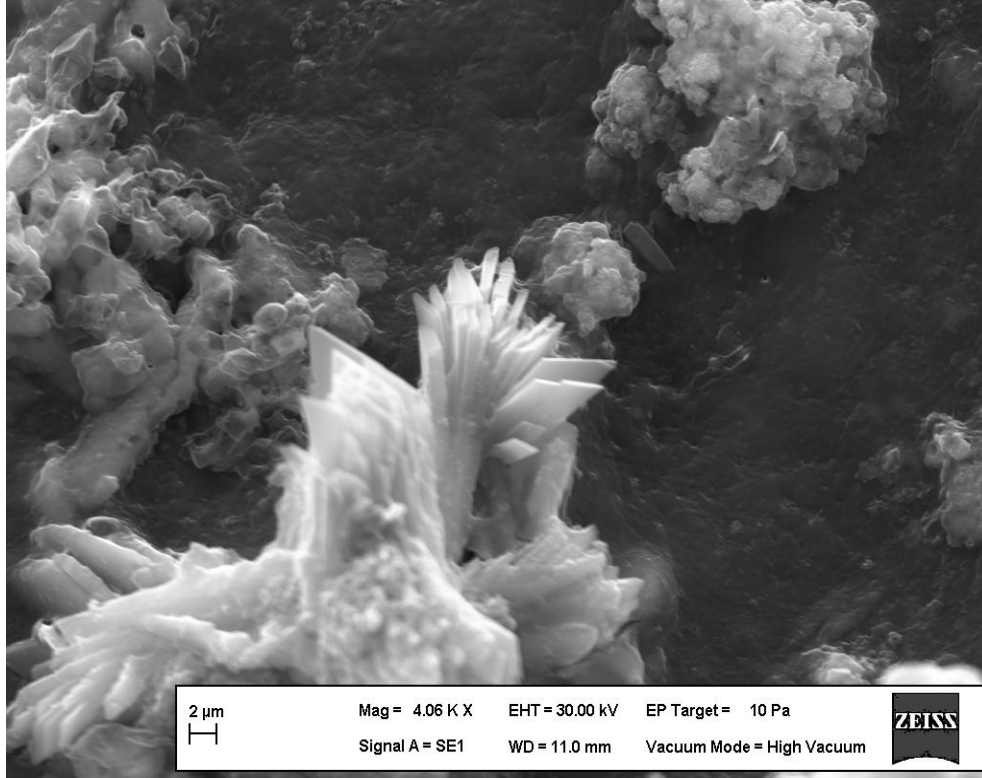
Bulgularımız, 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisi ile kıyaslandığında 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şeklindeki modülde kristal oluşumunun daha az, biyokek yoğunluğu fazla olduğunun ortaya koymuştur (Şekil 3.54, Şekil 3.56). EDX verilerine göre; C, Zn, Pb, Fe, P, Ca, Si, S, Na, Al ve O elementlerinin ağırlıkça % oranlarının sırasıyla, 48, 6, 3,6, 0,6, 1,8, 1,0, 3,3, 3,2, 2,5 ve 0,6 olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.57). Bu veriler değerlendirildiğinde Fe, Ca, P gibi elementlerin düşük biyogaz geridevir debisine göre oldukça düşük olduğu söylenebilir. Ayrıca inorganik kirlenme düşük olduğun-

dan oluşan bağların daha zayıf olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle biyogaz geri devir püskürme debisi artışı ile kek oluşumu daha az olmuştur.

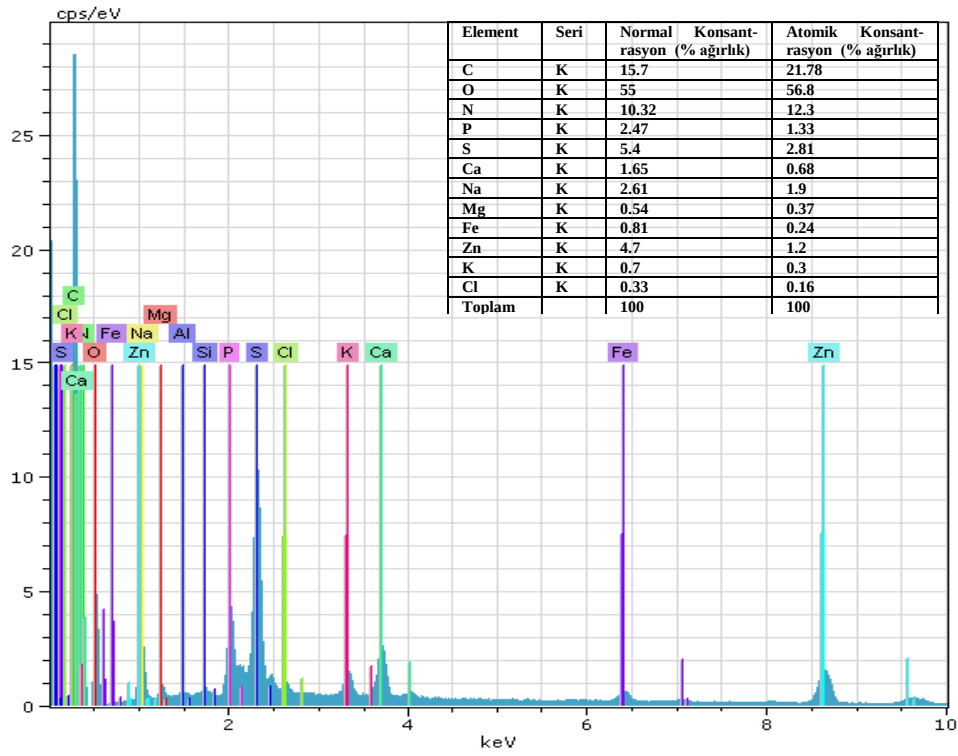
1,5 l/dak biyogaz debisinde silindir şeklindeki modüldeki SEM görüntüleri incelendiğinde, membran yüzeyinde hem organik kaynaklı hemde inorganik kaynaklı kek oluşumunun en düşük seviyede olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.58). EDX analizleri ise; C, Zn, Fe, Ca, Si, S ve O elementlerinin ağırlıkça % oranlarının sırasıyla, 52, 8, 0.4, 0.4, 0.6, 4.3, 47 olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 3.59). 1,5 l/dak püskürtme debisiyle 0,5 ve 1,0 /dak biyogaz geridevir debileri kıyaslandığında, EDX analizinde belirlenen Fe, Ca, Si ve diğerleri gibi metallerin % ağırlıkça oranlarının çok düşük olduğu belirlenmiştir. Neticede biyogaz geridevir debisi artırıldığında membran yüzeyinden sıyrılma da artmaktadır ve bu durum kek oluşumunu sınırlamaktadır.

Biyogaz debisi aşamalı olarak artırılan silindir şeklindeki membran modülleri kek tabakası sıyrıldıkta sonraki görüntüleri SEM ile elde edilmiştir (Şekil 60, Şekil 62 ve Şekil 64). Ayrıca elementel analizleri belirlenmiştir (Şekil 3.61, Şekil 63 ve Şekil 65). 0,5, 1,0 ve 1,5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme hızlarında sıyrılan silindir şeklindeki modüller arasında 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinin uygulandığı membranlarda bir miktar kek tabakası kalırken, 1 ve 1,5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme hızlarında kek oluşumu minimize olmuştur.

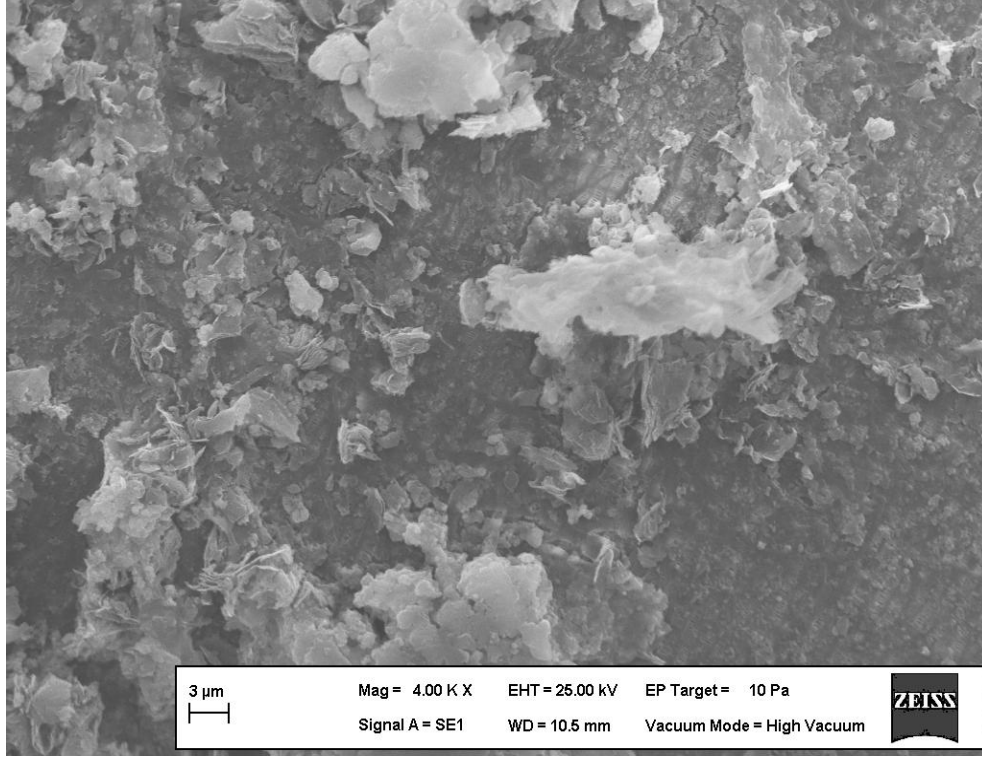
Elementel analiz verileri de bunu destekler niteliktedir. Çünkü, biyogaz debisi artıkça kalıcı kirlenme göstergesi olan gözenek tıkanma dirençleri sırasıyla azalma göstermiştir (Şekil 3.50). Hem membran görüntüsü hem de gözenek tıkanma dirençleri göstermektedir ki; biyogaz geridevir debisi artırıldıkça kek oluşumu azalmakta ve/veya tamamen giderilebilmektedir.



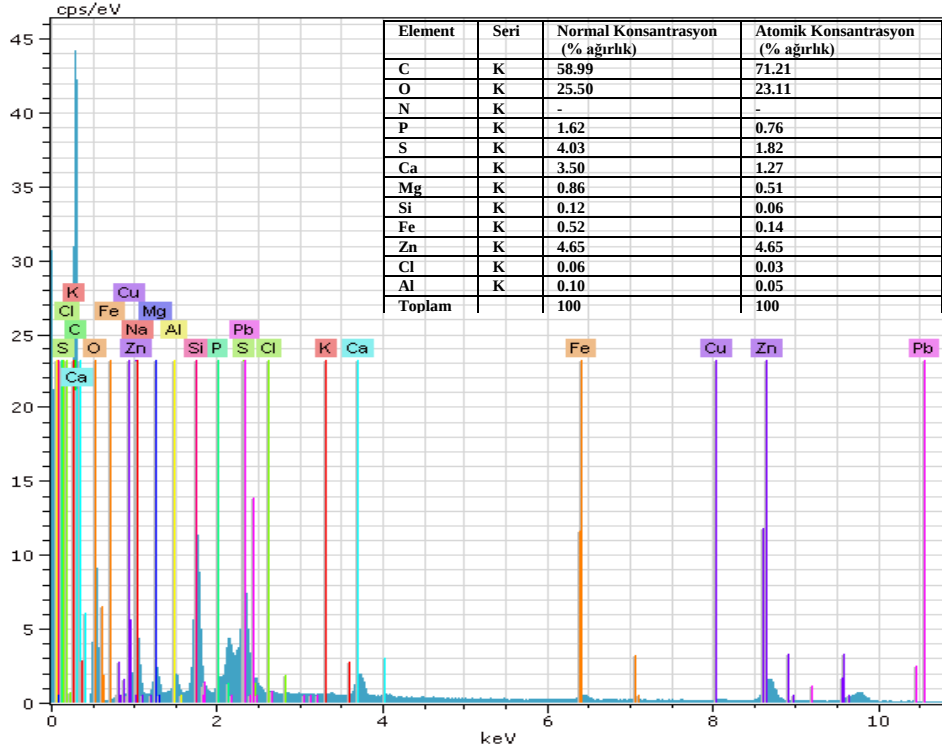
Şekil 3.54. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



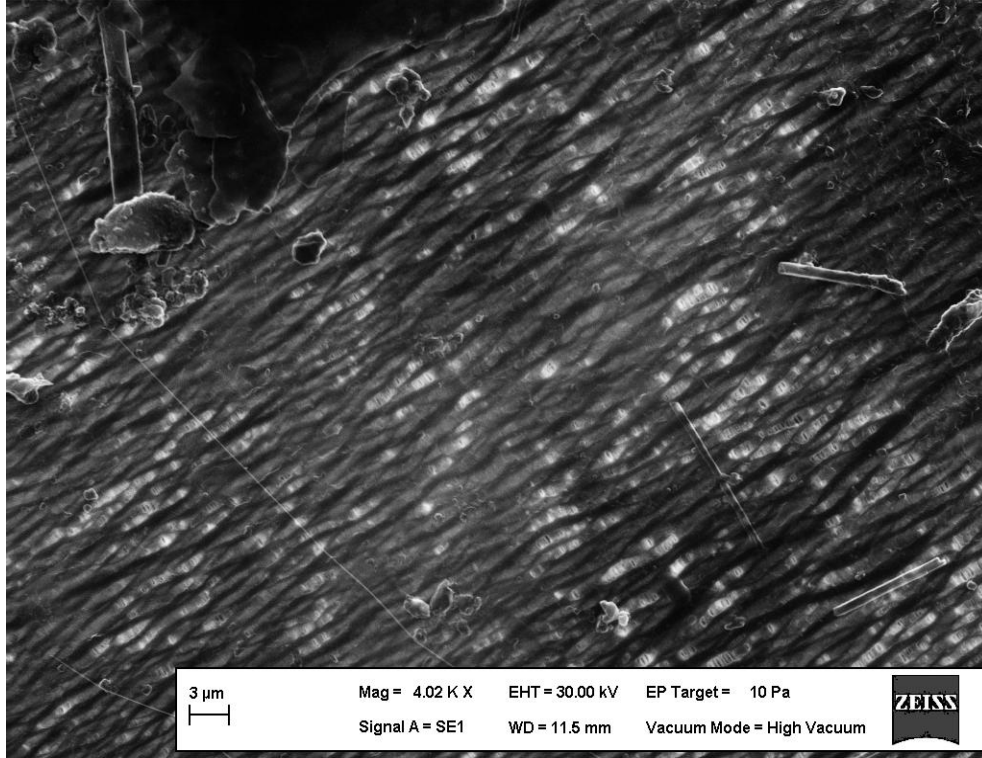
Şekil 3.55. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



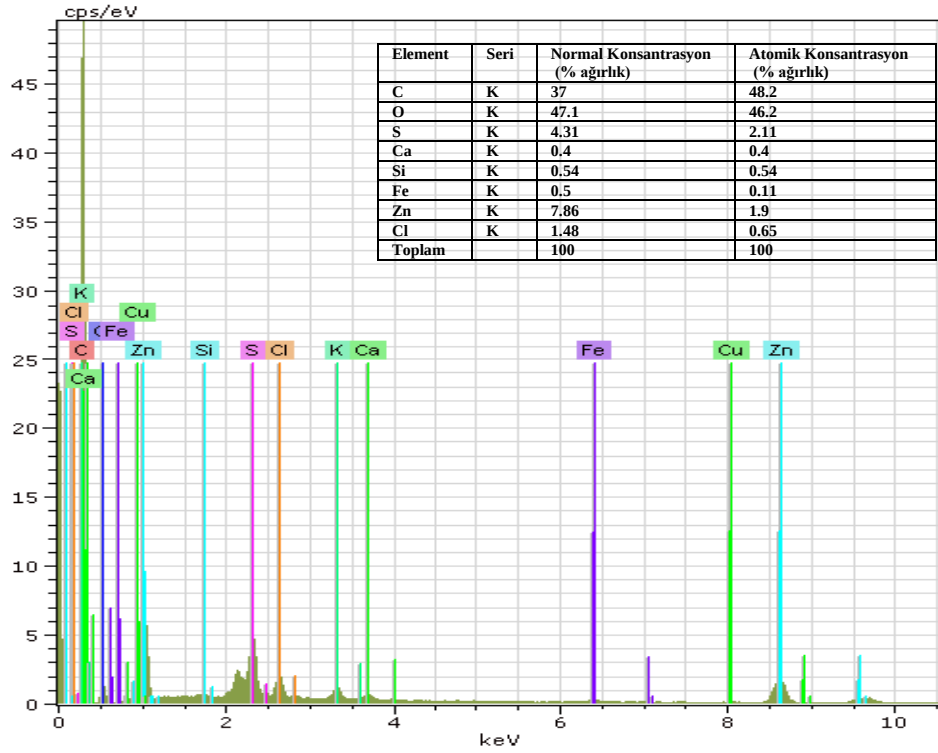
Şekil 3.56. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



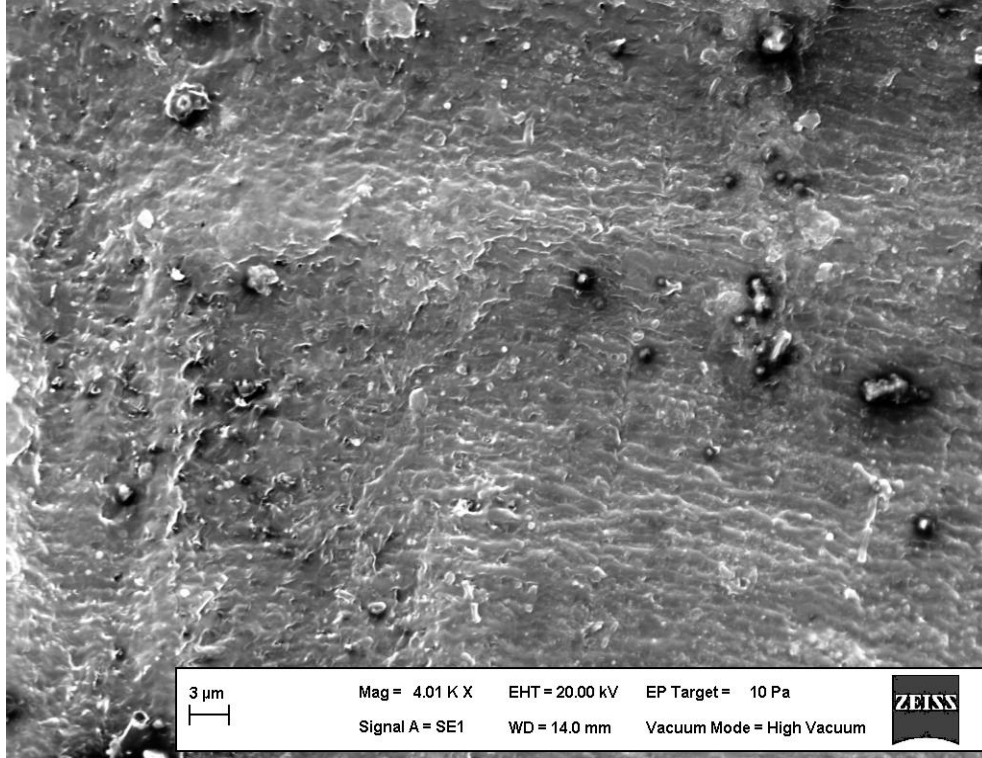
Şekil 3.57. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



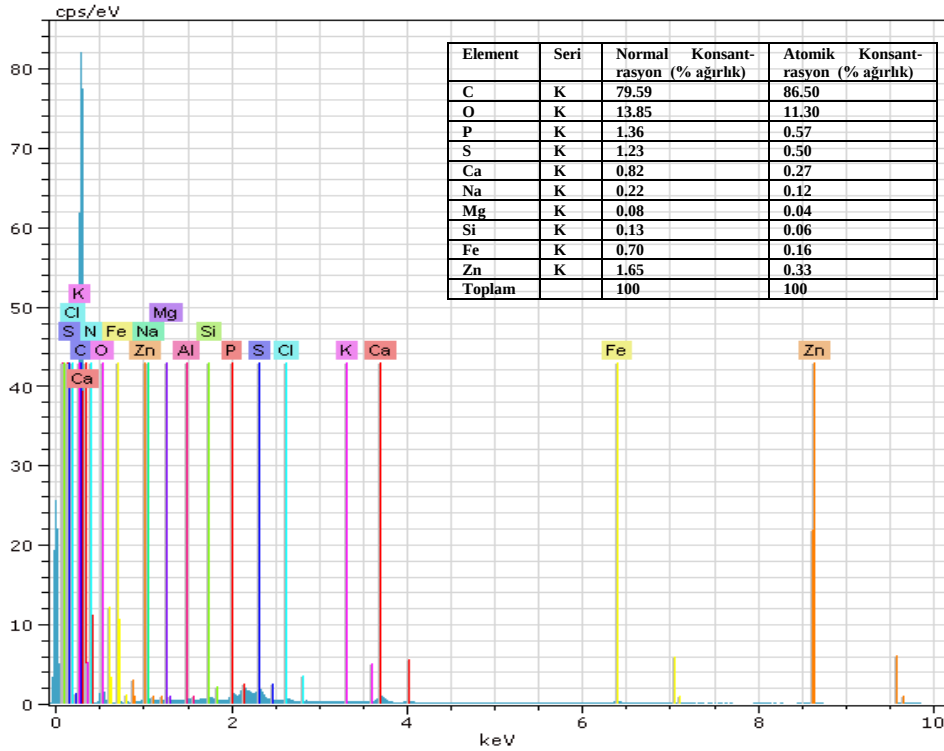
Şekil 3.58. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



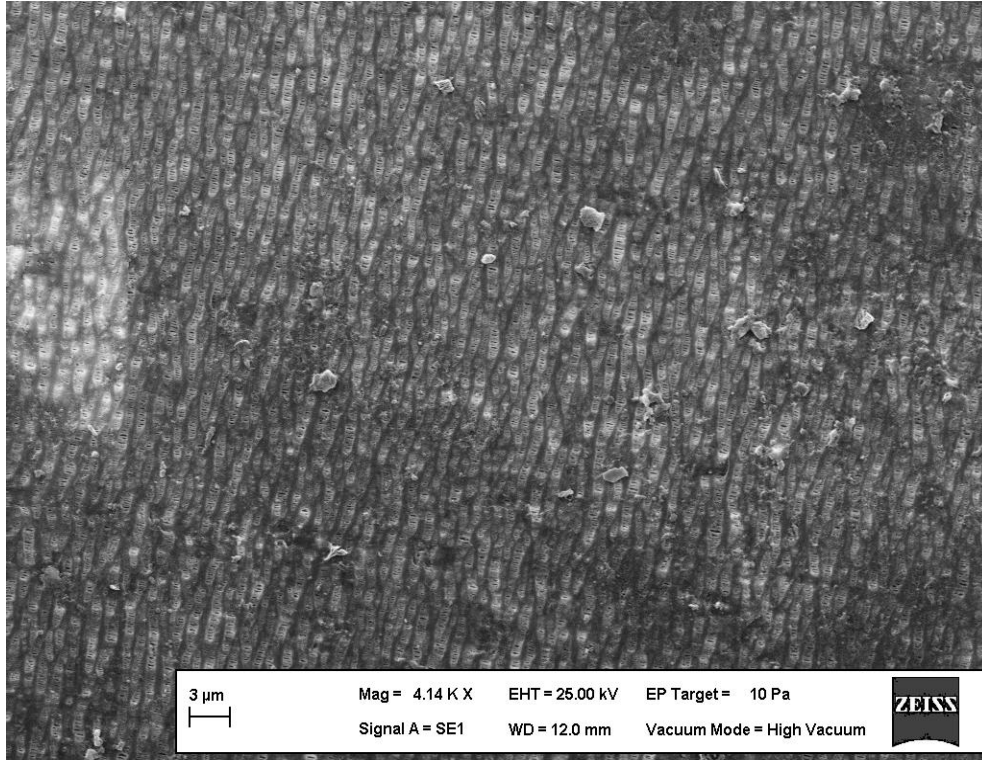
Şekil 3.59. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün EDX grafiği



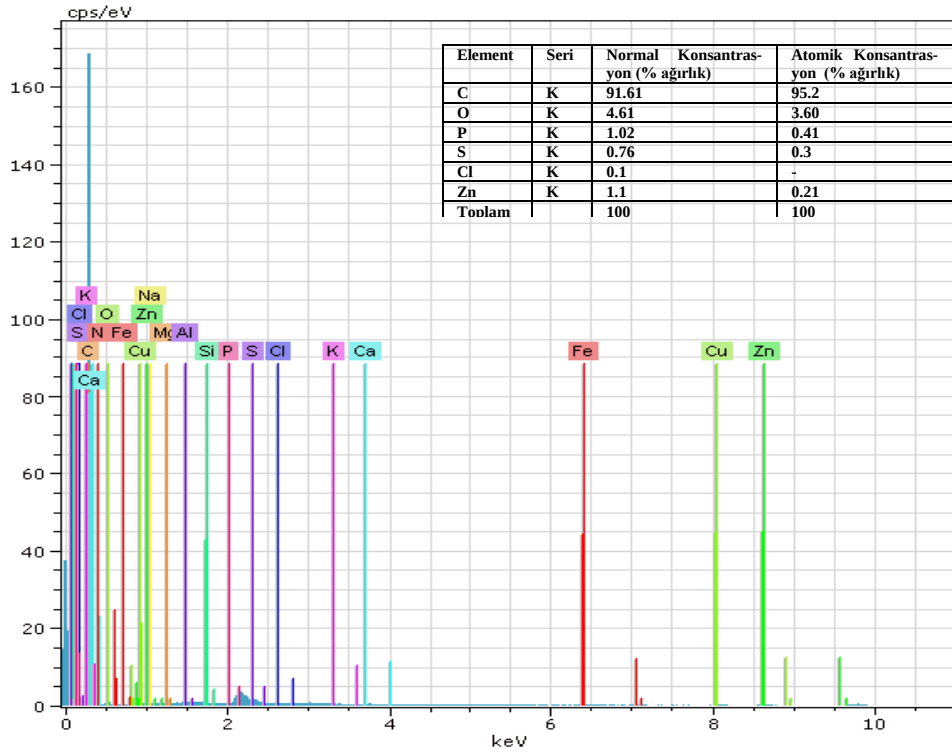
Şekil 3.60. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



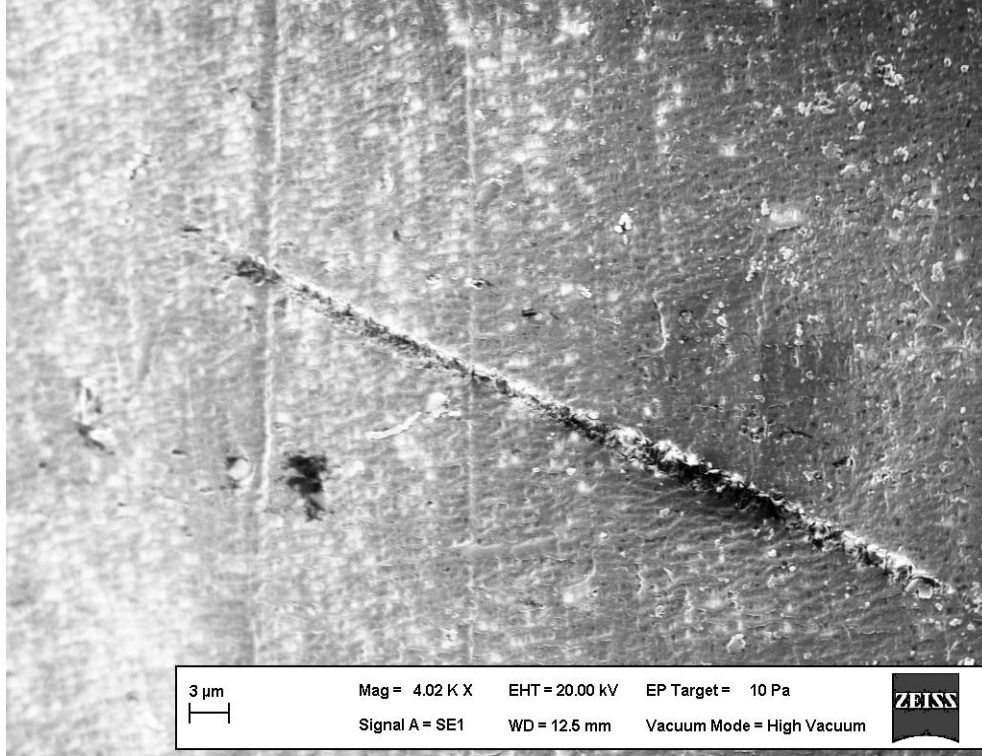
Şekil 3.61. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği.



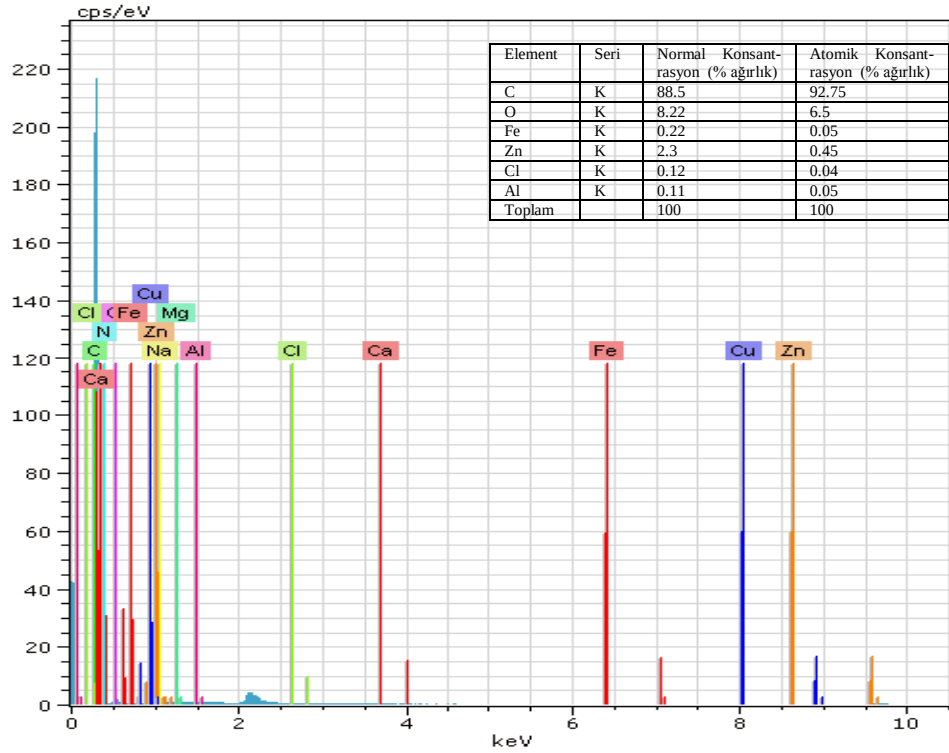
Şekil 3.62. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



Şekil 3.63. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

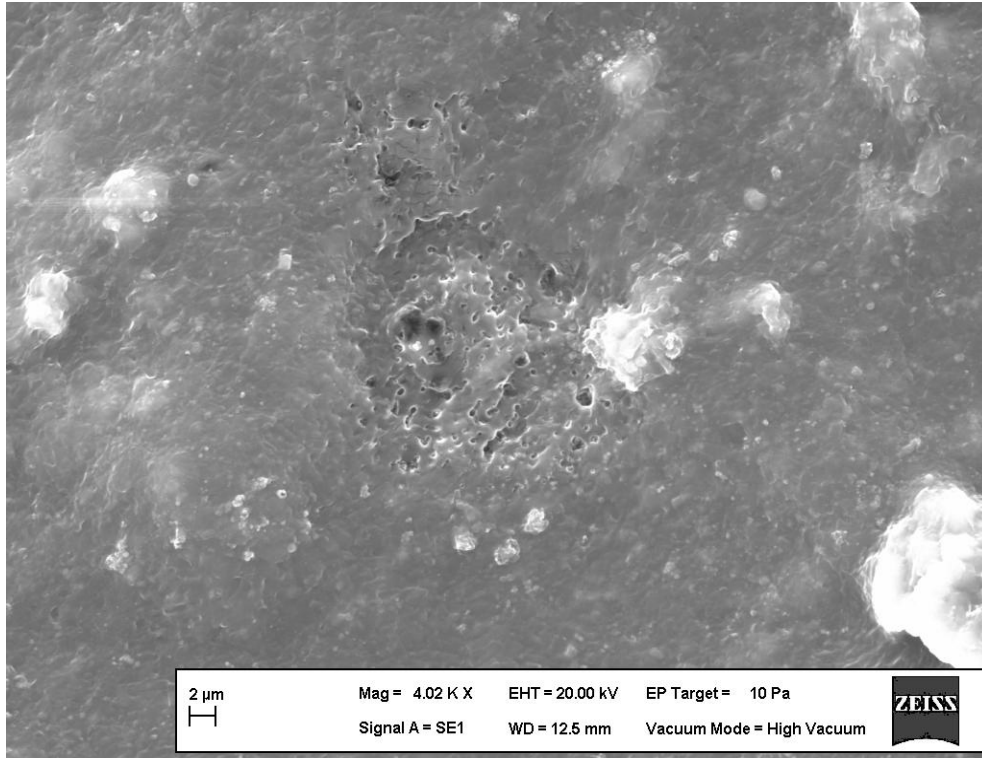


Şekil 3.64. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.

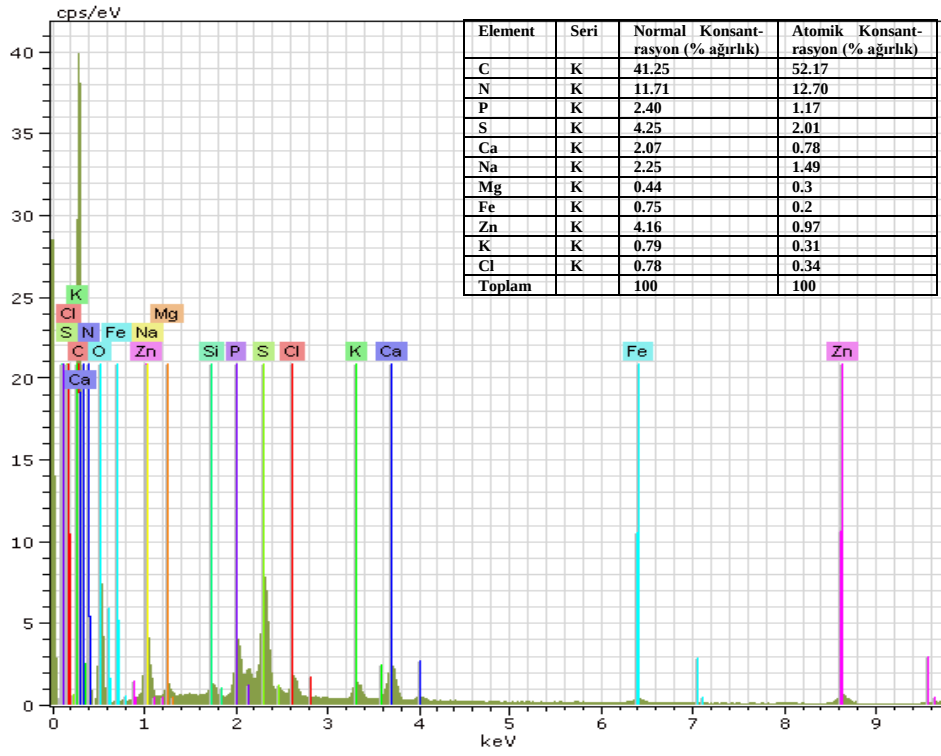


Şekil 3.65. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

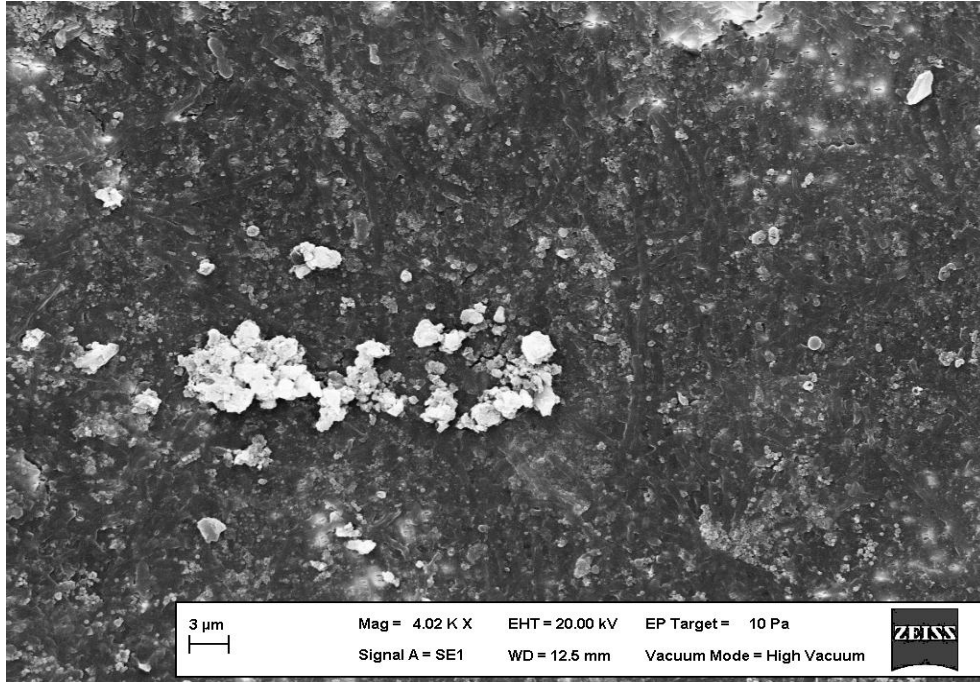
Biyogaz geridevir debisi artışı ile huni şeklindeki membran modülü görüntüleri, silindirik şeklindeki membran modüllerinin SEM görüntülerine benzer davranış sergilemişlerdir. Ancak huni şeklindeki modülü ile silindirik şeklindeki modül kıyaslandığında kek oluşumunun biraz daha fazla (Şekil 3.66, Şekil 3.68 ve Şekil 3.70) ve U şeklinli modülle kıyaslandığında kek oluşumunun biraz daha az olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.78, Şekil 80 ve Şekil 82). Elementel analizleri de bunu destekler nitelik göstermiştir (Şekil 3.67, Şekil 69 ve Şekil 71) ve (Şekil 3.79, Şekil 81 ve Şekil 83).



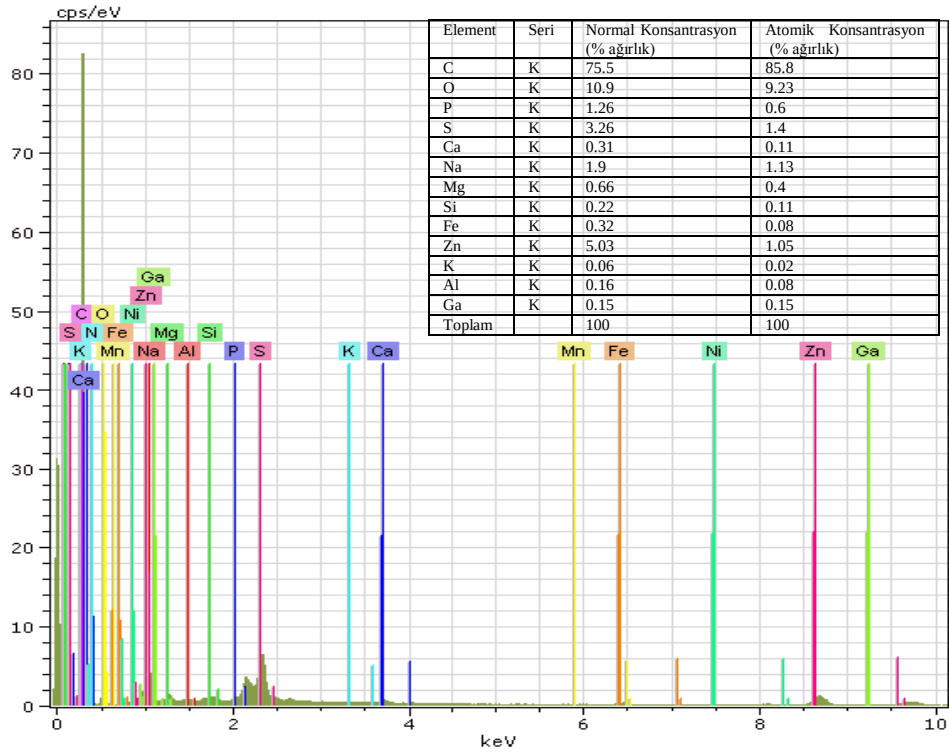
Şekil 3.66. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



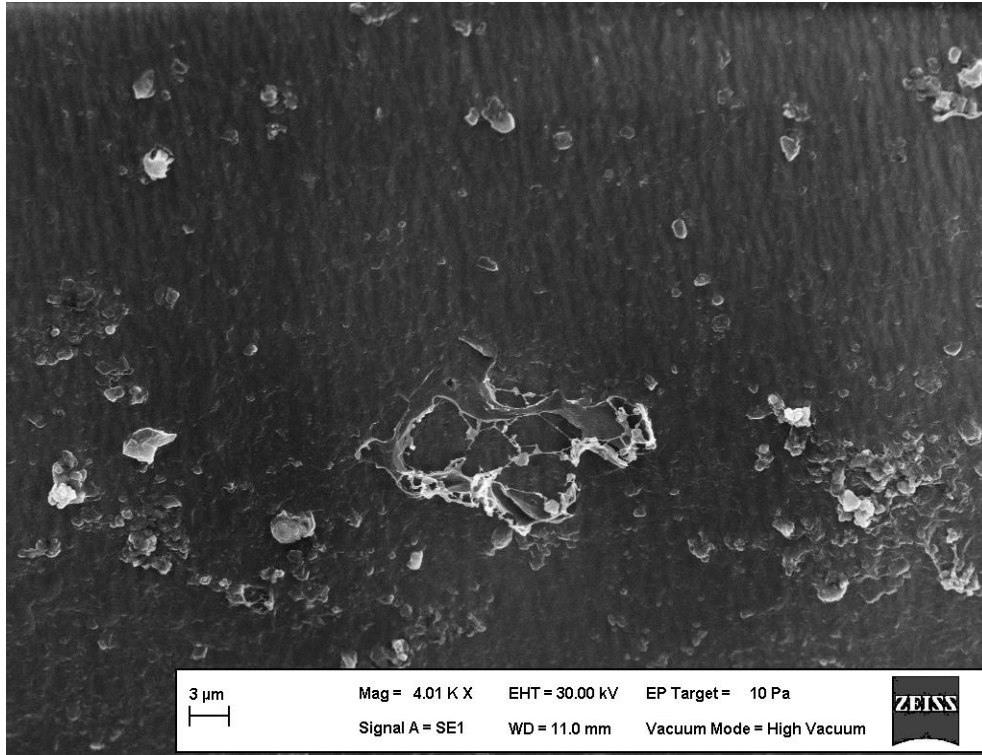
Şekil 3.67. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



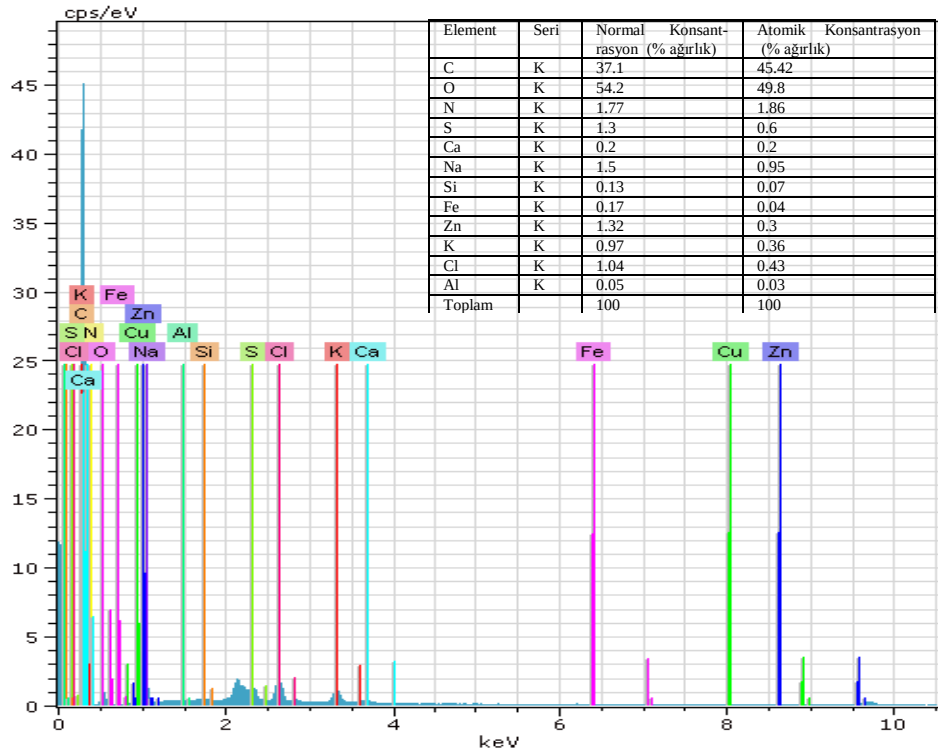
Şekil 3.68. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



Şekil 3.69. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



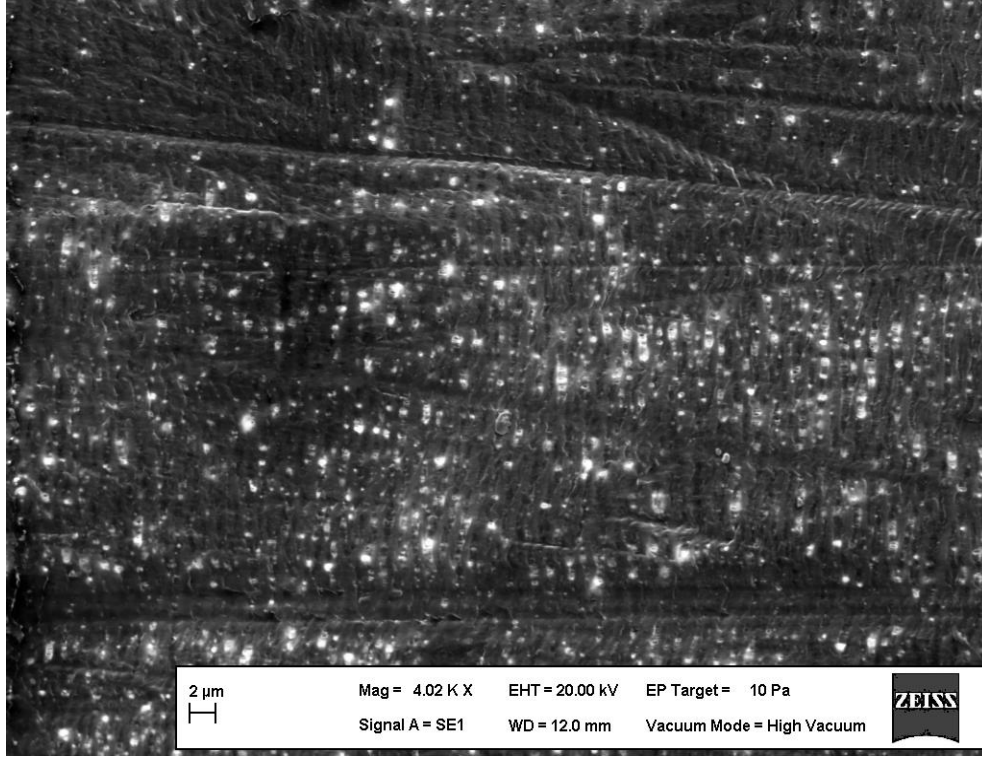
Şekil 3.70. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



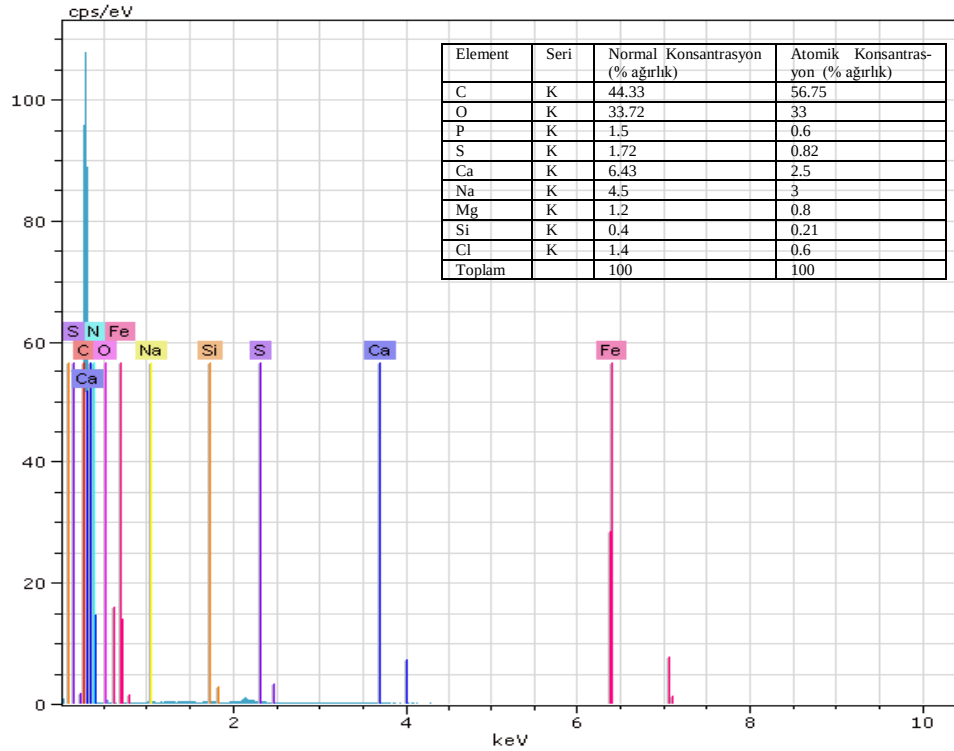
Şekil 3.71. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

Biyogaz debisi aşamalı olarak artırılan huni ve U şeklindeki membran modülleri kek tabakası sıyrıldıkta sonraki SEM görüntüleri (Şekil 3.72, Şekil 3.74 ve Şekil 3.76) ve (Şekil 3.78, Şekil 3.80 ve Şekil 3.82)'de verilmiştir. Aynı zamanda elementel analiz sonuçları da belirlenmiştir. (Şekil 3.73, Şekil 3.75 ve Şekil 3.77) ve (Şekil 3.79, Şekil 3.81 ve Şekil 3.83) şekillerinde gösterilmiştir.

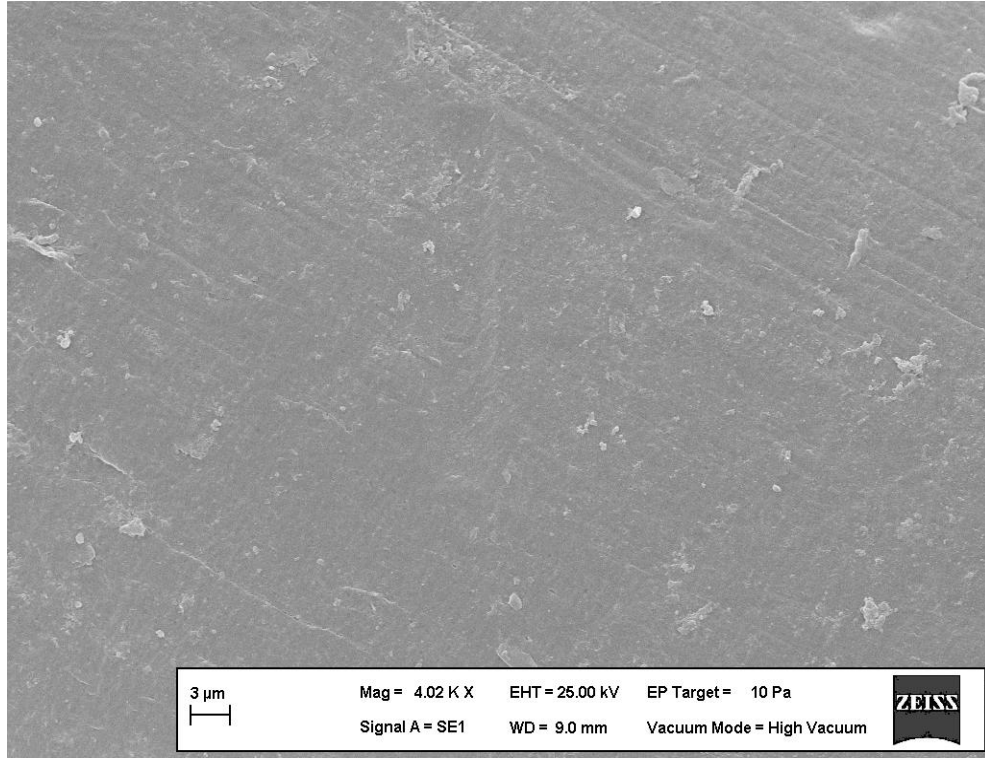
Farklı gaz püskürtme hızlarında çalıştırılan sistemde kirlenmiş membranlardaki kekin sıyrılması sonucunda 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinin uygulandığı huni ve U şeklindeki modüllerde bir miktar kek tabakası kalırken, 1,0 ve 1.5 l/dak biyogaz geri devir püskürtme hızlarında kek oluşumu en düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Bulgularımıza göre, biyogaz debisi artıkça kalıcı kirlenme göstergesi olan gözenek tıkanma dirençleri de azalma göstermiştir (Şekil 3.50).



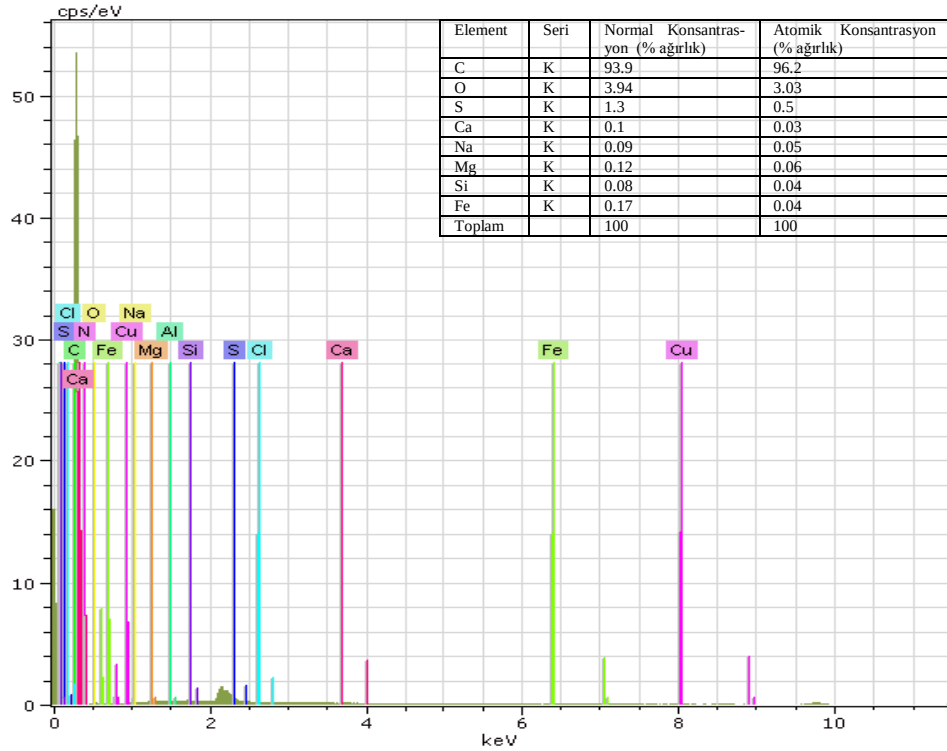
Şekil 3.72. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



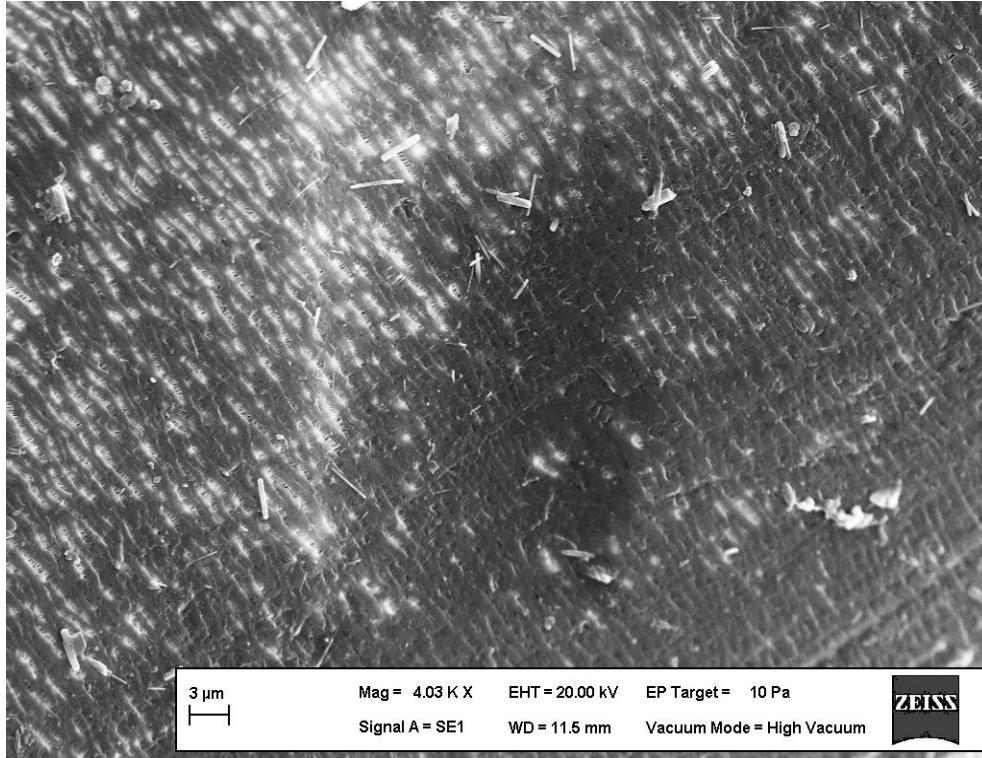
Şekil 3.73. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



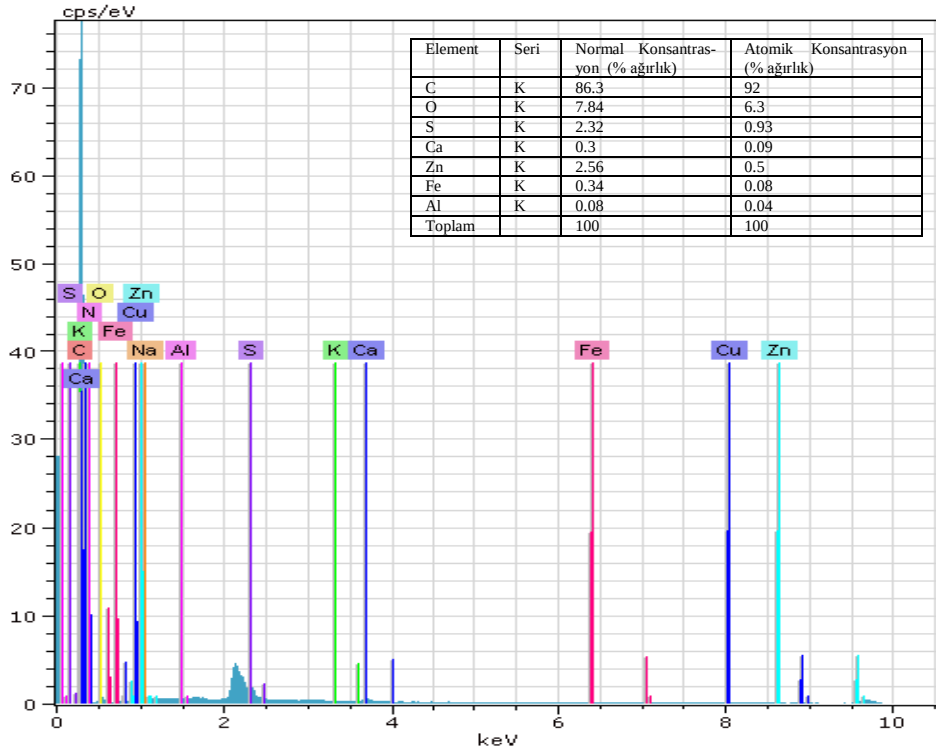
Şekil 3.74. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



Şekil 3.75. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

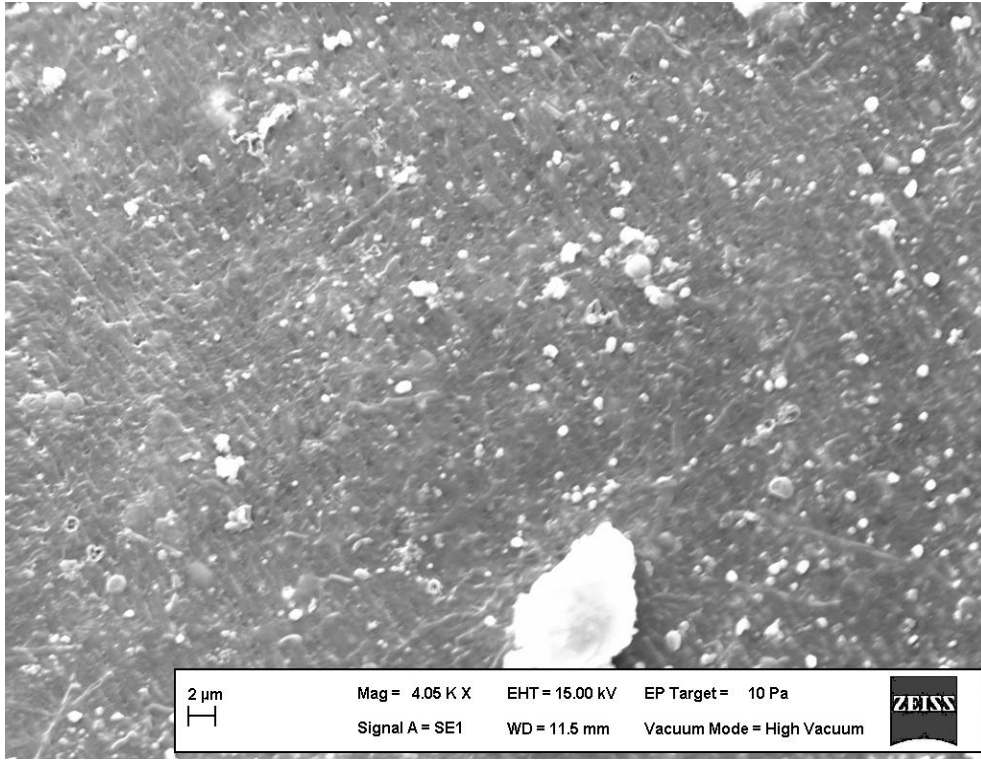


Şekil 3.76. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.

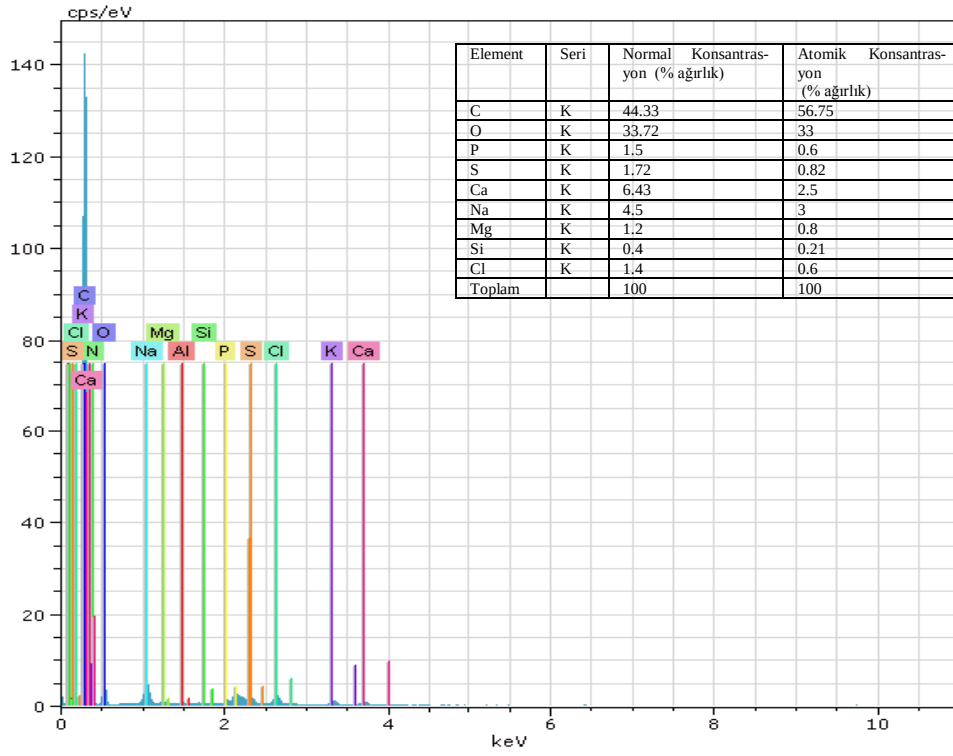


Şekil 3.77. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde huni şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

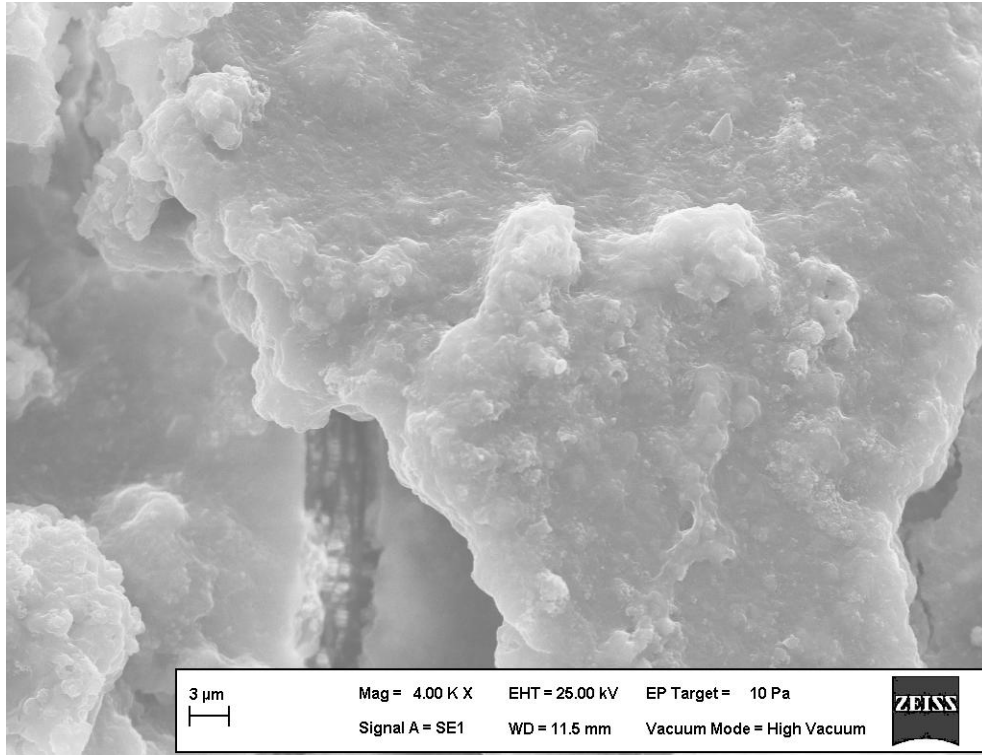
Kek yapıları sıyrılan huni şeklindeki membran modüllerinde gaz püskürtme debisinin artışına bağlı olarak daha düşük kek oluşumunun gerçekleştiği saptanmıştır. Özellikle biyogaz debisi artıkça membran yüzeyleri, temiz membran yüzeyleri ile benzerlik arz etmiştir (Şekil 3.72, Şekil 3.74 ve Şekil 3.76). Diğer iki modülle kıyaslandığında U şeklinli modülde bir organik ve inorganik kirlenme göstergesi olan kristal ve biyokek oluşumu görülmektedir (Şekil 3.78, Şekil 3.80 ve Şekil 3.82). Elementler analiz verileri de bu durumu destekler niteliktedir. Diğer modüllerin geometrik yapıları püskürtülen biyogazın temasına uygun iken U şeklinli modüller yumak şeklini aldığından püskürtülen biyogazın membranın iç kısımlarına etkisinin daha düşük olabileceği değerlendirilmektedir.



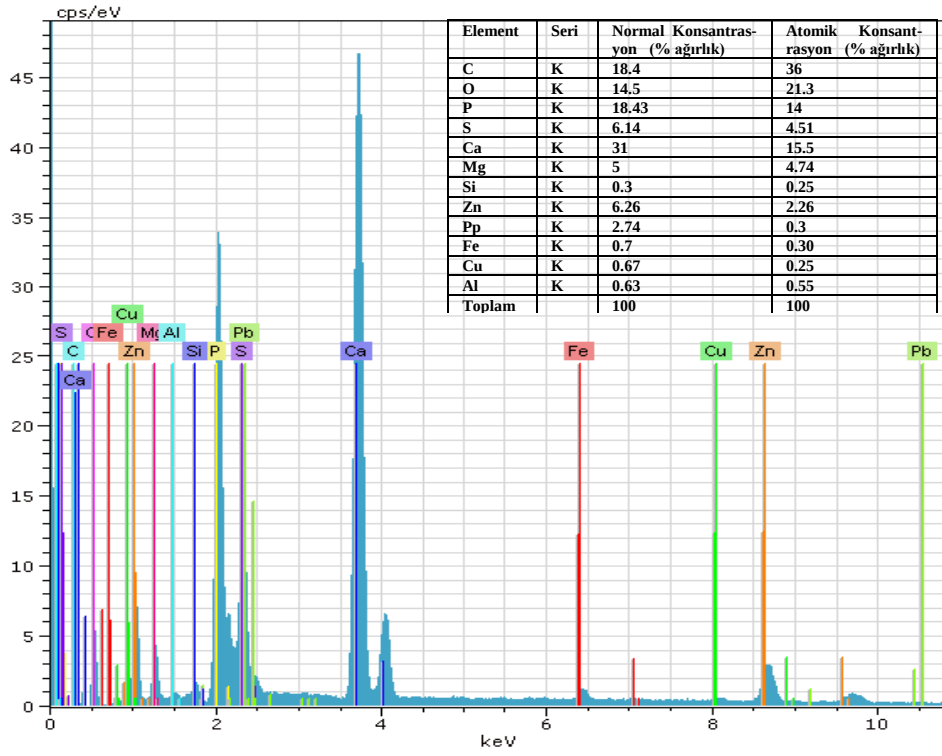
Şekil 3.78. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şeklinli membran modülün SEM görüntüsü.



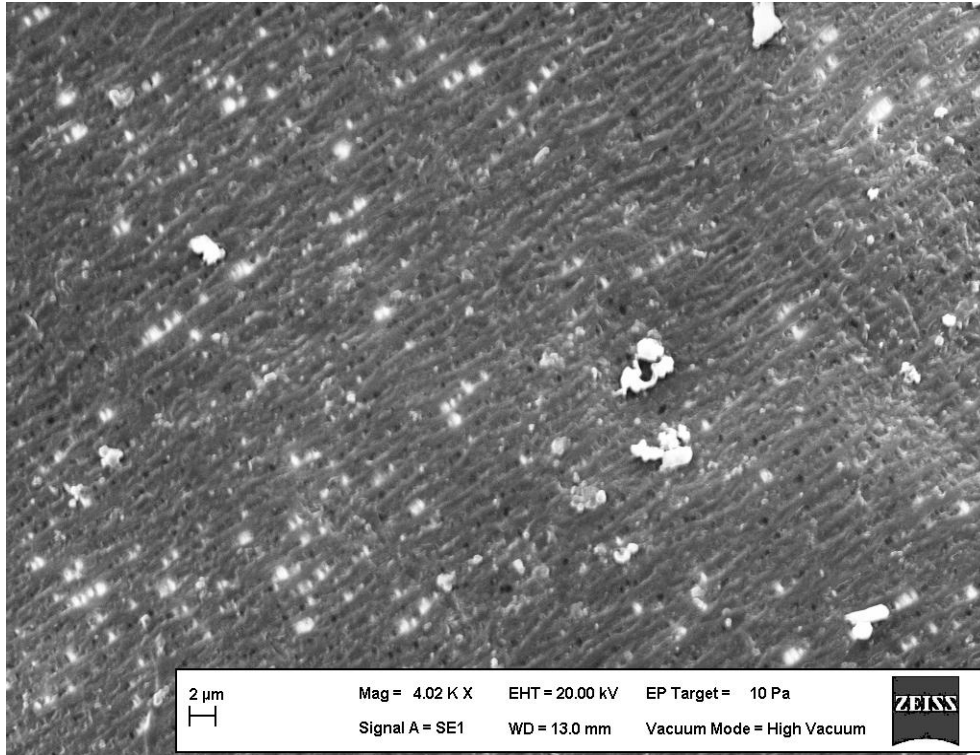
Şekil 3.79. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



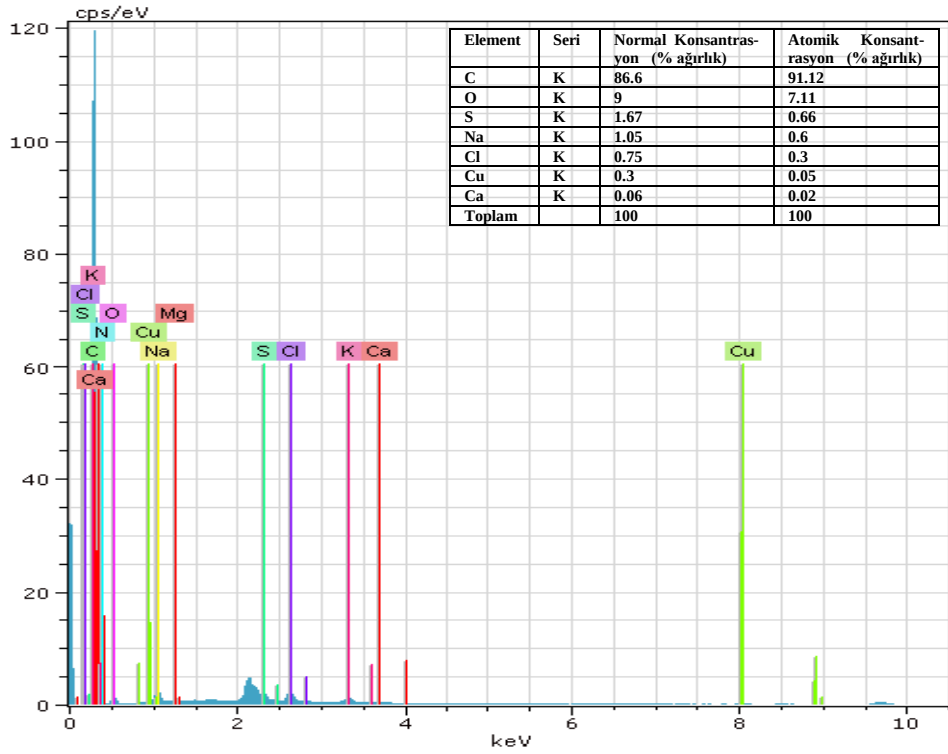
Şekil 3.80. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün SEM görüntüsü.



Şekil 3.81. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

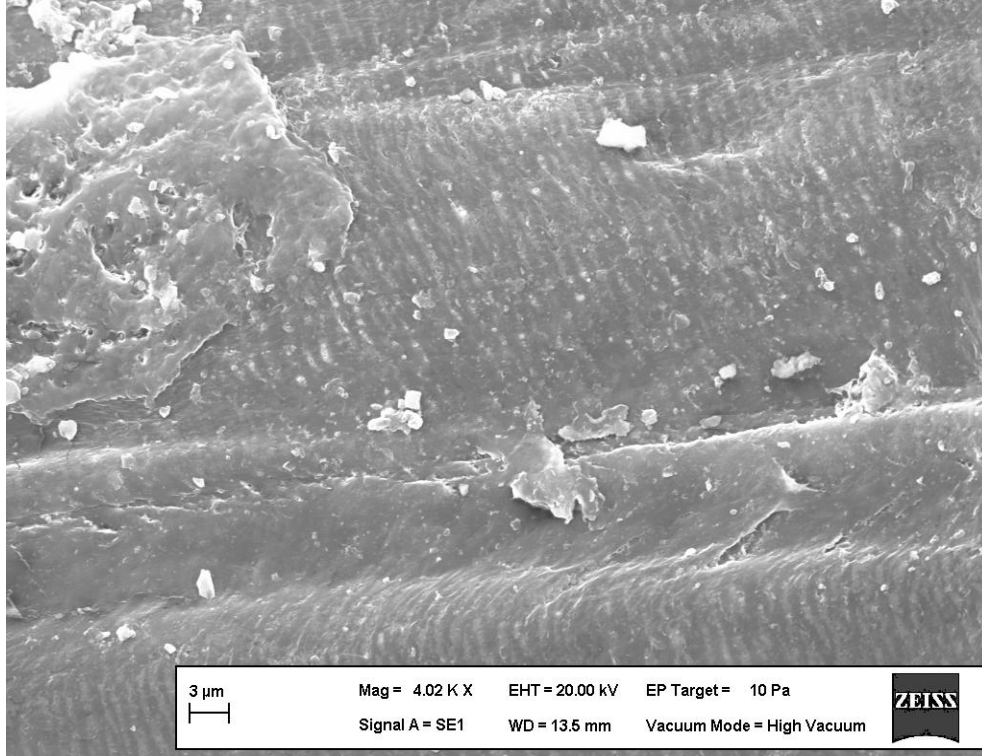


Şekil 3.82. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün SEM görüntüsü.

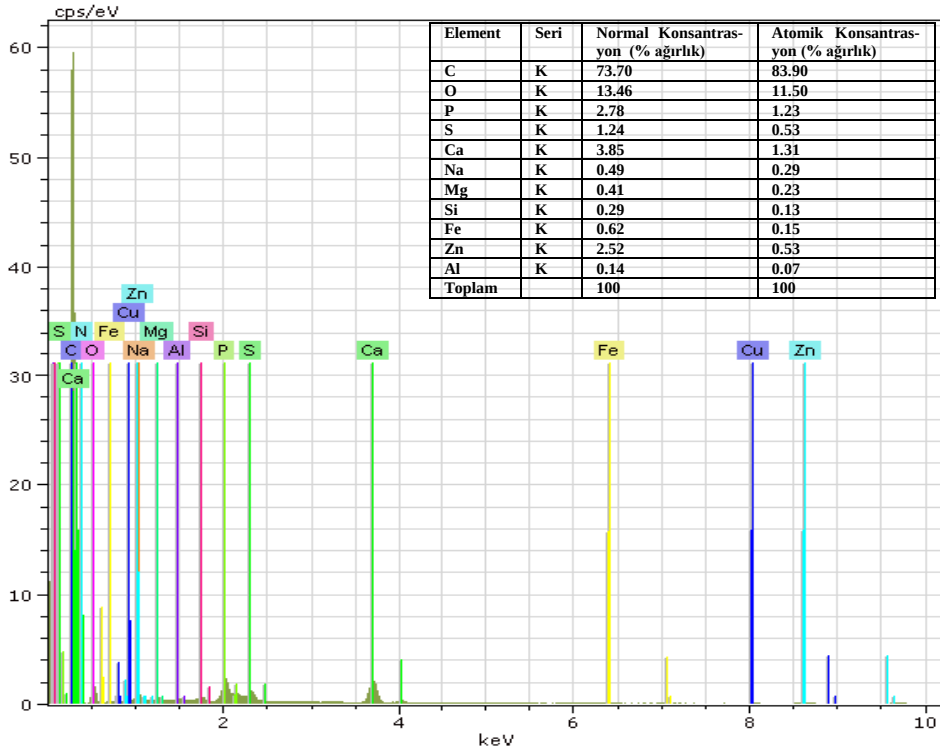


Şekil 3.83. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

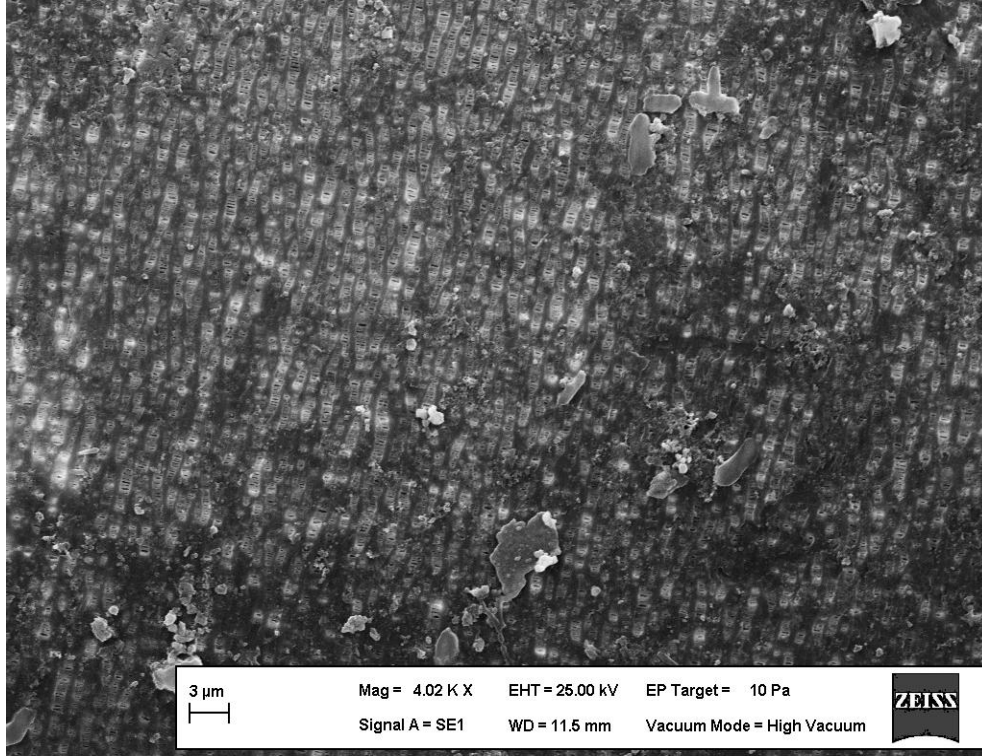
U şeklindeki membran modüllerinin de kek yapıları sıyrıldıktan sonra biyogaz geridevir debisinin artışına bağlı olarak daha az düşük kek oluşumu sergiledikleri tespit edilmiştir. Ancak membran modülü yumak şeklinde olduğundan lifler arasında bir miktar organik ve/veya inorganik kirleticinin kaldığı görülmektedir (Şekil 3.84, Şekil 3.86 ve Şekil 3.88). Elementel analiz verileri de bunu desteklemektedir (Şekil 3.85, Şekil 3.87 ve Şekil 3.89). Bu durumda, biyogaz geri devir püskürtme hızlarının etkisinin etkili olabilmesi için uygun membran modül şeklinin seçilmesi gerektiği değerlendirilebilir. Biyogaz geridevir debisi artıka diğer iki modül geometrisinde olduğu gibi U şekilli modülde de kek oluşumu özellikle de gözenek tıkanma direnci azalmıştır. Ancak azalma oranının, silindir ve huni şeklindeki modüle göre daha az olduğu belirlenmiştir.



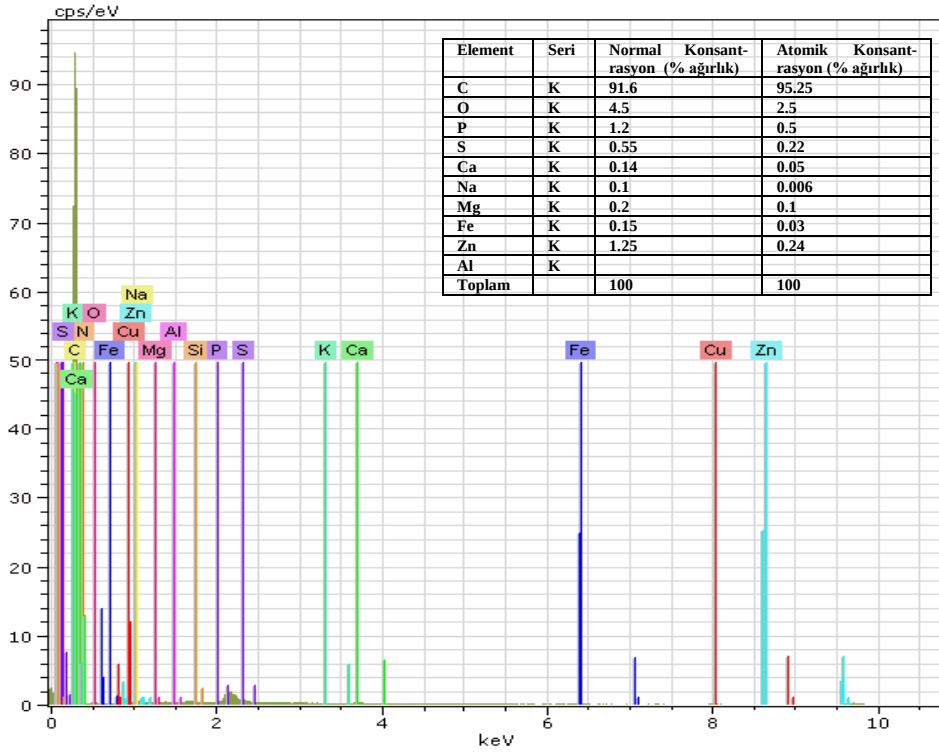
Şekil 3.84. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyırıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



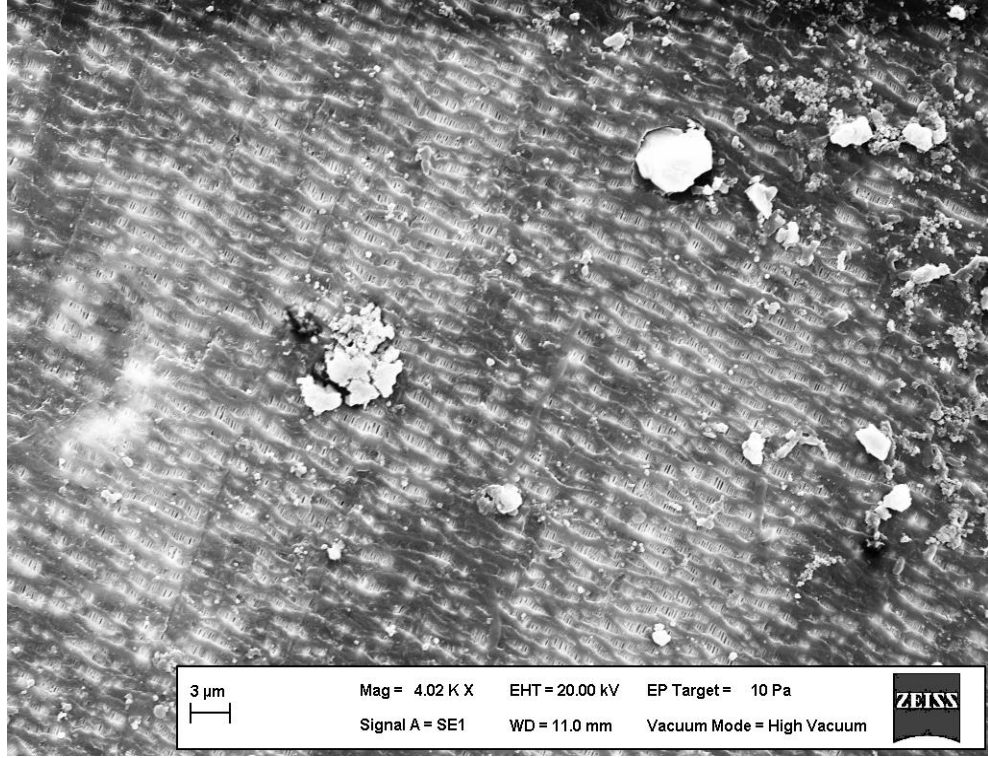
Şekil 3.85. 0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyırıldıktan sonraki EDX grafiği.



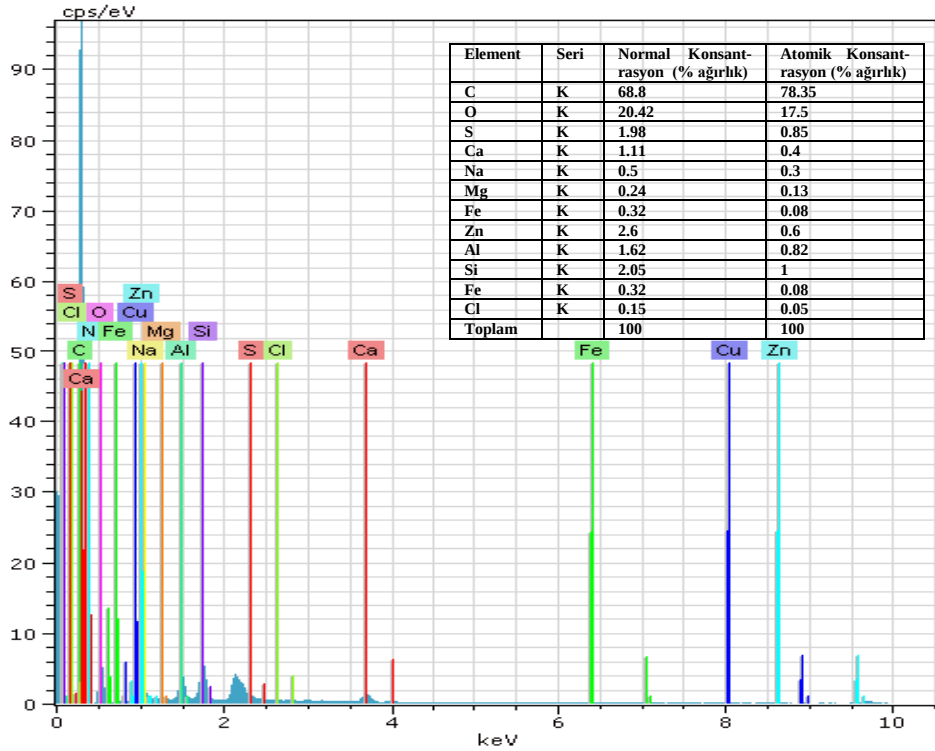
Şekil 3.86. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



Şekil 3.87. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.



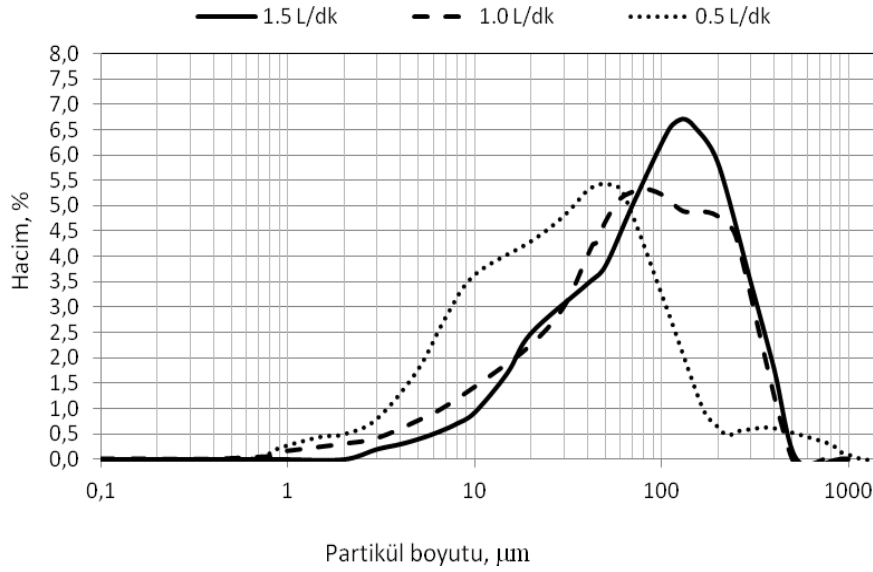
Şekil 3.88. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki SEM görüntüsü.



Şekil 3.89. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde U şekilli membran modülün kek tabakası sıyrıldıktan sonraki EDX grafiği ve elementlerin % oranları.

3.2.3.5. Farklı biyogaz geridevir debilerinde partikül boyut dağılımı ilişkisi

0,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde silindir, huni ve U şekilli membran modüllerinde ortalama partikül boyutu 1-10 μ m iken, 1,0 l/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde ortalama partikül boyutu 5-100 μ m ve 1.5 L/dak biyogaz geri devir püskürtme debisinde ortalama partikül boyutu 10-1000 μ m olarak belirlenmiştir (Şekil 3.90).



Şekil 3.90. Farklı biyogaz geridevir debilerinde membran modüllerindeki kek PSD.

Biyogaz geri devir püskürtme debisinin artışına bağlı olarak partikül boyut dağılımları büyürken, buna paralel olarak membran filtasyon direnç artışlarında azalma sağlanmıştır (Şekil 3.10). Küçük partiküller önce membran gözeneklerini tıkadığından, biyogaz püskürmesinin görünmez kirlenmeye neden olan partikülleri gidermede yetersiz olabileceği, ancak kek ve jel kaynaklı membran kirlenmesinin giderilmesinde etkili olabileceği belirtilmiştir (Xie, 2008). Çalışmamızda, biyogaz geridevir debisi artışına bağlı olarak kirlenme direncinin azaltıldığı ve oluşan kekin giderildiği belirlenmiştir. Bu bulgular, Hu ve Stuckey (2006)'ın harici çapraz akışlı AnMBR'deki biyogaz püskürmeden kaynaklanan kesme kuvvetinin, sıvı karışımı resirkülasyon pompasından kaynaklanan kesme kuvvetinden çok daha etkili ve daha az flock kırılmasına neden olduğunu bulması ile uyumludur. Bu durum atıksuların arıtılmasında, harici çapraz akışlı AnMBR ile kıyaslanırken, SAnMBR'in kullanılmasının bir avantajıdır. Küçük ince partiküller membran kirlenme-

sinde önemli bir rol oynamaktadır. İnce partiküller bir çamur kek tabakası şeklini alması ve membran gözeneklerini tıkaasında membran yüzeyinde daha yüksek bir çökelme eğilimi gösterirler (Xie, 2008). Bulgularımız aynı zamanda Meng vd., (2007) tarafında ileri sürülen benzer hipotezler ile de uyumludur.

4. SONUÇLAR

Anaerobik Batık Membran Biyoreaktörlerde Biyogaz geridevir ve Membran Modül Şekillerinin Membran Kirlenmesine Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmada optimizasyon çalışmaları esnasında düşük akı şartlarında işletilen sistemde, gaz geridevirli membran modüllerinde akının gaz geridevirsiz modüllerdeki akıdan 1,5-2 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çalışmamızda amaçlarından biri olan gaz geridevri nin, membran kirlenmesinin azaltılmasında önemli rol oynayabileceğinin bir göstergesidir.

Biyogaz geridevirli ve geridevirsiz ortamlarda farklı şekillerde oluşturulan hollow fiber membran modülerinin arıtma performansı ve kirlenme düzeylerini belirlemek amacıyla, SAnMBR sistemi membran yıkanmaksızın 240 gün işletilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Reaktör alıştırma devresinden itibaren pH, toplam alkalinite, toplam uçucu asit (TUA) ve katı madde konsantrasyonları (tam karışımli sıvıda toplam katı madde (TKM), askıda katı madde (AKM) ve uçucu katı madde (UKM)) açısından da izlenmiştir. pH değerleri 7,2 ile 7,9 arasında değişmiştir. Reaktörün kurulmasından itibaren toplam alkalinite 1500-2000 mg CaCO_3/L aralığında değişmiştir. TUA konsantrasyonları ise 120-180 mg HoAc/L arasında değişim göstermiştir. 32 hafta süresince analizlerde kullanılan çamur dışında reaktörden çamur atımı yapılmamıştır. TKM konsantrasyonu kademeli olarak artmış ve 4360 mg/l’den 13320 mg/L’ye yükselmiştir. TUKM konsantrasyonu 2440 mg/l’den 9720 mg/l yükselmiştir.

Besleme reaktörden çekilen toplam akıya bağlı olduğundan HBS kademeli olarak artmıştır. Hacimsel organik yük (HOY), sabit KOİ besleme (yaklaşık 4600 mg KOİ/l) şartlarında akıdaki azalmaya bağlı olarak 1. gün 3,36 kg KOİ/m³.gün değerinde iken 124. gün 0,154 kg KOİ/m³.gün değerine düşmüştür.

İşletme periyodunun yaklaşık ilk 10 gününde akı azalmasına bağlı olarak hacimsel organik yükleme hızla azaldığından üretilen toplam gaz miktarı da hızla azalmıştır. Toplam gazdaki CH_4 %71-83, CO_2 , %11-24 ve diğer gazlar %5-6 arasında değişmiştir.

Geridevirsiz kısımdan elde edilen toplam gaz biraz daha yüksek bulunmuştur. Ancak, gaz geridevirli kısımdan elde edilen toplam gazın CH₄ içeriğinin yüksek, CO₂ içeriğinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Çalışmamızda AnMBR sistemlerinde de biyogaz geridevri nin akı artışını sağladığı belirlenmiştir. Sistemdeki membran modüllerindeki süzöntü akıları ve toplam kirlenme dirençleri değerlendirildiğinde gaz geridevri, biyogaz geridevir debisi ve Membran modül geometrisinin membran kirlenme kontrolünde etkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Membran modüllerindeki süzöntü akıları değerlendirildiğinde silindir şeklindeki membran modülün kirlenme kontrolünde daha etkili olduğu söylenebilir. Bunu huni şeklindeki membran modülü takip etmiştir. Kirlenme kontrolü açısından U şekilli membran modülün silindir ve huni şekilli membran modülleri ile kıyaslandığında, en verimsiz modül geometrisi olduğu belirtilebilir.

Sonuçlar, gaz geridevirli membran modüllerinde, gaz geridevri ile kek oluşumunun minimize olduğunu göstermektedir. Aynı şekilli fakat gaz püskürtme yapılmayan membran modüllerinde kek oluşumunun daha yüksek düzeyde olduğu belirlenmiştir. Düşük biyogaz geridevir debisinde modüllerdeki kek direncinin giderilebildiği, görünmez kirlilik olarak ifade edilen gözenek tıkanma direncini oluşturan kristallerin gideriminde yetersiz kaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, gaz geridevirsiz membran modüllerinde gözenek tıkanması ve adsorlanmadan kaynaklanan kirlenme direncinin, gaz geridevirli membran modüllerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, gaz geridevri sırasında geridevri yapılan karbondioksit, hidrojen ve diğer gazların membran yüzeyindeki çözünmüş inorganik maddelerle reaksiyona girip kristal oluşturmaya bağlanabilir. Ayrıca sisteme geri verilen metan, CO₂, hidrojen ve diğer gazlarının kristal oluşturmaya bir derece pH'ı artırdığı belirlenmiştir. Reaktör pH değerinin zaman zaman 8'in üzerine çıkması buna bağlanabilir.

SAnMBR'lerde EPS ve SMP ve PSD kek oluşumu ve dolayısıyla membran kirlenmesini etkileyen en önemli parametreler olduğu belirlenmiştir. Membran modül geometrisi açısından en düşük SMP ve EPS, silindir şeklindeki membran modülünde, yine en yüksek geçirgenlik ve en düşük membran kirlenme direnci de aynı modülde elde edilmiştir. Bulgularımızda membran modül yüzeylerinde oluşan kekteki SMP ve EPS oranındaki artışa paralel olarak membran kirlenme direncinin arttığı ve akı ve/veya geçirgenliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Partikül boyut dağılımı küçüldükçe membran yüzeyinde görünmez ve filtrasyon direncini yükselten kirlenmenin arttığı gözlenmiştir. Ancak PSD dağılımı ile ilgili çalışmaların devam etmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

SEM görüntüleri ve veriler değerlendirildiğinde gaz geridevri nin yapılması sırasında fiziksel temizlemenin gerçekleştiği ve çamur kekinin büyük oranda giderildiği sonucuna varılabilir. Ancak kalıcı kirlenmenin göstergesi olarak inorganik kirlenmenin ise düşük gaz püskürtme debileri ile giderilmediği veya çok az giderilebildiği değerlendirilebilmektedir. U şekilli modülde fiziksel temizlemeyle, membran yüzeyinde oluşan kekin çok az giderildiği, silindir ve huni şeklindeki modüllerde ise kristal yapının giderilmediği sadece bir miktar kek yapısının giderilebildiği söylenebilir. Membran yüzeyinde biriken biyopolimerler ile metal kristalleri arasındaki köprülerin gaz geridevirli modüllerde zayıf, gaz geridevirsiz modüllerde ise güçlü olduğu savunulabilir.

Biyogaz geridevir debisi artışının membran kirlenme kontrolünde etkili olduğu görülmüştür. Düşük biyogaz geridevir hızlarında hem çamur ve biyo kek hem de inorganik kristallerin birlikte bağ oluşturarak membran kirlenme direncinin azaltılmasında yetersiz kaldığı belirlenmiştir. 1,0 l/dak biyogaz geridevir debisinde genelde biyolojik faaliyetler sonucu görünür ve giderilebilir kek oluşurken, görünmez veya kalıcı kirlenmeye neden inorganik veya kristal yapı çok düşük olduğu gözlemlendi. Sonuç olarak bu biyogaz geridevir debisinin kirlenme kontrolünde etkili olduğu belirlendi. Bu debi üzerinde biyogaz geridevir debilerinin kek oluşumunu sınırlayacağı ve filtrasyon direncini düşürebileceği belirlendi. 1,5 l/dak biyogaz geridevir debisinde ise zor giderilebilen inorganik kirlenmeye neden olan Ca, Mg, P, Fe ve Si gibi elementlerin en düşük düzeyde oldukları belirlendi. Filtrasyon direncinin de diğer biyogaz geridevir debilerine göre çok düşük olduğu belirlendi.

Sonuç olarak, sentetik atıksularla yapılan çalışmalarda membran lif aralıklarının ve geometrisinin kirlenme kontrolünde etkili olduğu, gaz püskürtme debisinin kirlenme kontrolünde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ancak iç kirlenme veya gözenek tıkanması batık anaerobik membran biyoreaktörler için en önemli sorunu teşkil etmektedir.

AnMBR gelişen bir teknolojiyi simgelemektedir. AnMBRs konusunda yapılacak çalışmalar, kirlenme konusunu çözmek, kek tabakası oluşumunu kontrol etmek, membran performansını artırmak ve membran alan gereksinimlerini azaltmak için optimum işletme koşulları bulmak ve uygun membranları geliştirme olacaktır. Bu amaçla ifade edile konu-

lara ilave olarak AnMBR sistemlerinin tasarım ve işletme maliyetlerinin belirlenmesi ve fizibil ekonomik koşulların sağlanması amacıyla daha fazla çalışmalara ihtiyaç vardır.

Mikroorganizma etkisini artırıcı ve gerekirse genetik çalışmaların yanı sıra, PSD membran kirlenmesinde ve membran kirlenme direncinde en etkili parametre olması nedeniyle, gelecek çalışmalarda ince partiküllerin minimize stratejileri çalışılmalıdır. Benzer şekilde gerçek atıksularla ve farklı membran materyalleri ile yapılacak çalışmalarda membran kirlenmesi kontrol stratejileri belirlenmelidir.

5. KAYNAKLAR

- Akram A. and Stuckey D. C.** 2008. Flux and performance improvement in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) using powdered activated carbon (PAC). *Process Biochemistry*, **43**, 93-102.
- Altmann, J. and Ripperger, S.** 1997. Particle deposition and layer formation at the crossflow bioreactor coupled with membrane filtration. *Process Biochemistry* **35**(3-4), 335-340.
- APHA, AWWA,** 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16 th Ed., 20th ed. APHA, AWWA, and WEF, Washington, DC.
- An, Y., Wang, Z., Wu, Z., Yang, D. and Zhou, Q.** 2009. Characterization of membrane foulants in an anaerobic non-woven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, **155**, 709-715.
- Aquino, S.F., Hu, A.Y., Akram, A., Stuckey, D.C.,** 2006. Characterization of dissolved compounds in submerged anaerobic membrane bioreactors (SAMBRs). *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **81** (12), 1894-1904.
- Aya, H., and Namiki, K.** 1992 Anaerobic digestion of sewage sludge by membrane separated bioreactor, *Mizu Kankyo Gakkaishi (Japanese)* **15**, 187, 1992.
- Bai,R., Leow, H.F.,** 2002. Microfiltration of activated sludge wastewater-the effect of system operation parameters. *Separation and Purification Technology* **29** (2), 189-198.
- Bérubé, P. R., & Hall, E. R and Sutton, P. M.,** 2006. Parameters governing permeate flux in an anaerobic membrane bioreactor treating low-strength municipal wastewaters: A literature review. *Water Environment Research*, **78**(8), 887-896.
- Beaubien, A., Bâty, M., Jeannot, F., Francoeur, E. and Manem, J.,**1996. Design and operation of anaerobic membrane bioreactors: Development of a filtration testing strategy. *Journal of Membrane Science*, **109**(2), 173-184.
- Brockman, M., and Seyfried, C.F.,** 1996, Sludge activity and cross-flow microfiltration a non-beneficial relationship, *Wat. Sci. Technol.* **34**(9), 205.
- Brockmann, M., and Seyfried, C.F.,** 1997. Sludge activity under the conditions of cross-flow microfiltration. *Water Science and Technology* **35** (10), 173-181.
- Fan, F., Zhou, H., & Husain, H.** 2006. Identification of wastewater sludge characteristics to predict critical flux for membrane bioreactor processes. *Water Research*, **40**(2), 205-212.
- Chang, I.S. and Lee, C.H.** 1998. Membrane filtration characteristics in membrane coupled activated sludge system – the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling. *Desalination*, **120**, 221-233.
- Chang, I; Clech P.L.;Jefferson, B.; Judd, S.,** 2002, Membran fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment, *J. of Environmental Engineering*, **128** (11),1018-1029
- Choi, H., Zhang, K., Dionysiou, D. D., Oerther, D. B., & Sorial, G. A.,** 2005. Effect of permeate flux and tangential flow on membrane fouling for wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, **45**(1), 68-78.
- Choo, K., & Lee, C.H.,**1996a. Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor. *Water Research*, **30**, 1771.

- Choo, K., & Lee, C.H.** 1996b. Effect of anaerobic digestion broth composition on membrane permeability. *Water Science and Technology*, **34**(9), 173.
- Choo, K. H. and Lee, C. H.,** 1998. Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor. *Wat. Res.* **32**, 3387- 3397. Page 16 of 32
- Choo, K.H., Kang, I.J., Yoon, S.H., Park, H., Kim, J.H., Adiya, S. and Lee, C.H.** 2000, Approaches to membrane fouling control in anaerobic membrane bioreactors. *Water Science and Technology*, **41**(10–11), 363–371.
- Cho, B.D. and Fane, A.G.,**2002. Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, **209**, 391-403.
- Cui, Z.F., Chang, S., Fane, A.G.,** 2003. The use of gas bubbling to enhance membrane processes, *J. Membr. Sci.* **221**, 1–35.
- Chu, H.P. and Li, X.Y.** 2005. Membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR): sludge cake formation and fouling characteristics. *Biotecnol. Bioeng.*, **90**, 323-333.
- Çiçek, N., Franco, J. P., Suidan, M. T., Urban, V., Manem, J.** 1999. Characterization and Comparison Of A Membrane Bioreactor And A Conventional Activated-Sludge System In The Treatment Wastewater Containing High-Molecular-Weight Compounds. *Water Environment Research*, **71**, 64-70.
- Dagnew, M., Parker, W. and Seto, P.** 2008. Anaerobic membrane bioreactors for digestion of WAS: Short term membrane fouling Tests. *WEFTEC 2008*, Chicago, IL. 169
- Dagnew, M., Parker, W. and Seto, P.** 2009. Digester performance of a pilot scale AnMBR digesting WAS under normal and higher VS loading condition. 5th Canadian Residuals and Biosolids Conference, Niagara Falls, Ontario
- Dagnew, M., Parker, W. and Seto, P.** 2010. A pilot study of anaerobic membrane bioreactors for concurrent thickening and digestion of WAS. *Water Science and Technology*, **61** (6), 1451-1458.
- Dias, J.C.T., Rezende, R.P., Silva, CM. and Linardi, V.R.** 2005. Biological treatment of Kraft pulp mill foul condensates at high temperatures using a membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, **40**, 1125-1129.
- Drews, A.** 2010, Membrane fouling in membrane bioreactors-Characterisation, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*, **363** (1-2), 1-28.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F.,** 1956. Colorimetric method for determination of sugar and related substances. *Analytical Chemistry* **28**, 350–356.
- Dufresne, R., Liard, A., and Blum, S.M.** 2001. Anaerobic treatment of condensates at a Kraft pulp and paper mill. *Water Environ. Res.*, **73**(1), 103-109.
- Ergin Taşkan, Halil Hasar,** 2012. Effect of different leachate/acetate ratios in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAnMBR). *CLEAN: soil, air, water.* **40**(5), 487-492
- Frølund, B., Palmgren, P., Keiding, K., Nielsen, P.H.,** 1996, Extraction of polymers from activated sludge using a cation exchange resin. *Wat. Res.* **30**, 1749- 1758.
- Fuchs, W., Binder, H., Mavrias, G. and Braun, R.,**2003. Anaerobic treatment of wastewater with high organic content using a stirred tank reactor coupled with a membrane filtration unit. *Water Research* **37**(4), 902–908.
- Gan, Q.,** 1999. Evaluation of solids reduction and backflush technique in crossflow microfiltration of a primary sewage effluent, *Resour. Conserv. Recy.*, **27**,14

- Gao, D-W., Zhang, T., Tang, C-Y.Y., Wu, W-M., Chuen,** 2010. Membrane fouling in an anaerobic membrane bioreactor: Differences in relative abundance bacterial species in the membrane foulant layer and in suspension, *Journal of Membrane Science*, **364**, 331-338
- Garnier, C., Görner, T., Lartiges, B. S., Abdelouhab, S., De Donato, P.,** 2005. Characterization of Activated Sludge Exopolymers From Various Origins: A Combined Size-Exclusion Chromatography And Infrared Microscopy Study. *Water Research*, **39**, 3044-3054.
- Gander, M., Gefferson, B., and Judd, S.** 2000. "Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations." *Sep. Purif. Technol.* **18**(2), 119-130.
- Ghyoot, W.R. and Verstraete, W.H.,** 1997. Coupling membrane filtration to anaerobic primary sludge digestion. *Environmental Technology*, **18** (6), 569-580
- Harada, H., Momonoi, k., Yamazaki, S., & and Takizawa, S.,** 1994. Application of anaerobic-UF membrane reactor for treatment of a wastewater containing high strength particulate organics. *Water Sci. Technol.* **30**(12), 307-319.
- He, Y. Xu, P., Li, C., Zhang. B.,** 2005. High-concentration food wastewater treatment by an anaerobic membrane bioreactor. *Water Research*, **39**, 4110–4118.
- Hernandez, A.E., Belalcazar, L.C., Rodrigouez, M.S. and Giraldo, E.,** 2002. Retention of granular sludge at high hydraulic loading rates in an anaerobic membrane bioreactor with immersed filtration. *Water Science and Technology*, **45**(10), 169.
- Herrera-Robledo, M., Arenas, C., Morgan-Sagastume, J.M., Castaño, V. and Noyola, A.A.,** 2011. Chitosan/ albumin/CaCO₃ as mimics for membrane bioreactor fouling: genesis of structural mineralized-EPS-building blocks and cake layer compressibility, doi: 10.1016/ j.chemosphere.2011.04.059.
- Ho, J. and Sung, S.,** 2009. Anaerobic membrane bioreactor treatment of synthetic municipal wastewater at ambient temperature. *Water Environment Research*, **81**(9), 902-928. 171
- Ho, J. and Sung, S.,** 2010, Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater, *Bioresource Technology*, **101**, 7, 2191–2196.
- Huang, Z., Say, L. Ong, H., Ng, Y.,** 2011. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: Effect of HBS and ÇY on treatment performance and membrane fouling, *Water Research* **45**, 705-713.
- Hu, A.Y and Stuckey, D.C.,** 2006. Treatment of dilute wastewaters using a novel submerged anaerobic membrane bioreactor. *Journal of Environmental Engineering* **132** (2), 190–198.
- Hulse, C.A., Singh, K.S. and Grant, S.R.** 2009. An innovative submerged anaerobic membrane bioreactor treatment for potato solids and bioenergy production. *WEFTEC 2009*, 2216-2230.
- Hu, A.Y. and Stuckey, D.C.,** 2007. Activated Carbon Addition to a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor: Effect on Performance, Transmembrane Pressure, and Flux. *Journal of Environmental Engineering*, **133**(1), 73-80.
- Huang, X., Liu, R. and Qian, Y.** 2000. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, **36**, 401-406.
- Huang, Z., Ng, H.Y. and Ong, S.L.,** 2009. The Impact of Sludge Retention Time on Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor for Low-strength Wastewater Treatment. *WEFTEC 2009*, 2761-2770.

- Huang, Z., Ong, S.L., Ng, H.Y.,** 2011, Submerged anaerobic membrane bioreactors for low-strength wastewater treatment: Effect of HBS and ÇY on treatment performance and membrane fouling. *Water Res.* **45**, 705–713.
- Hulse, C.A., Singh, K.S. and Grant, S.R.** 2009. An innovative submerged anaerobic membrane bioreactor treatment for potato solids and biyoenergy production. *WEFTEC* 2009, 2216-2230.
- Imasaka, T., Kamekuni, N., So, H. and Yoshino, S.,** 1989. Cross-flow filtration of methane fermentation broth by ceramic membranes. *Journal of Fermentation and Biyoengineering*, **68**, 200-206.
- Jeison, D.,** 2007. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: Feasibility and potential applications. PhD-Thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands - with references - with summaries in English and Dutch.
- Jeison, D. and van Liera, J.B.,** 2006. Cake layer formation in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, **284**(1-2), 227-236
- Jeison, D. and van Liera, J.B.** 2007. Cake formation and consolidation: Main factors governing the applicable flux in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) treating acidified wastewaters. *Separation and Purification Technology*, **56**, 71-78.
- Jeison, D., van Lier, J.B.,** 2007. Thermophilic treatment of acidified and partially acidified wastewater using an anaerobic submerged MBR: factors affecting long-term operational flux. *Water Research* **41** (17), 3868–3879.
- Jeison, D. and van Lier, J.B.,** 2008, Feasibility of thermophilic anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) for wastewater treatment. *Desalination* **231** (1–3), 227–235.
- Judd, S.,** 2006. *The MBR Book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*, Elsevier, Oxford. 172
- Kang, I. J., Yoon, S.H. and Lee, C.H.,** 2002. Comparison of the filtration characteristics of organic and inorganic membranes in a membrane-coupled anaerobic bioreactor. *Water Research*, **36**, 1803-1813.
- Ke Xie,** 2008, Submerged Anaerobic Membrane Bioreactors for Kraft Evaporator Condensate Treatment: Feasibility and Membrane Fouling Studies, M.Sc. Environmental Engineering, Lakehead University
- Kim I.S. and Jang N.,** 2006. The effect of calcium on the membrane biyofouling in the membrane bioreactor (MBR). *Water Research*, **40**, 2756–2764.
- Kimura, K., Hane, Y., Watanabe, Y., Amy, G. and Ohkuma, N.,** 2004. Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water. *Water Research*, **38**, 3431-3441.
- Koyuncu I., Wiesner MR.,** "Morphological variations of precipitated salts on RO and NF membranes", *Environmental Engineering Science*, 2007
- Kuberkar, V., Czekaj, P. and Davis, R.,** 1998. Flux enhancement for membrane filtration of bacterial suspensions using high-frequency backpulsing. *Biyotechnology and Biyoengineering*, **60**, 77-87.
- Le-Clech, P., Jefferson, B. and Judd, S.J.,** 2003. Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, **218**, 117-129.
- Le Clech, P., Jefferson, B., Chang, I.S., Judd, S.J.** 2003. Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, **227**(1-2), 81-93.

- Le-Clech, P., Chen, V., Fane, T. A. G.,**2006. Fouling In Membrane Bioreactors Used in Wastewater Treatment. *Journal Of Membrane Science*, **284**, 17-53.
- Lee, S., Jung, J. and Chung, Y.,** 2001. Novel method for enhancing permeate flux of submerged membrane system in two-phase anaerobic reactor. *Water Research*, **35**(2), 471-477.
- Lee, W., Kang, S. and Shin, H.,** 2003. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, **216**, 217-227.
- Le-Clech, P., Chen, V. and Fane, T.A.G.,** 2006. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment, *Journal of Membrane Science* **284** (2006) 17–53.
- Lew, B., Tarre, S., Beliafski, M., Dosoretz, C., Green, M.,** (2009), Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for domestic wastewater treatment. *Desalination* **243**, 51– 257
- Liang, S., Liu, C., Song, L.F.,** 2007. Soluble microbial products in membrane bioreactor operation: behaviors, characteristics, and fouling potential. *Water Research* **41** (1), 95–101.
- Liao, B.Q., Bagley, D. M., Kraemer, H.E. Leppard. G.G. and Liss, S.N.** 1994. A review of biofouling and its control in membrane separation bioreactors, *Water Environment Research*, **76**, 425.
- Liao, B.Q., Kraemer, J.T. and Bagley, D.M.,** 2006. Anaerobic membrane bioreactors: Applications and research directions. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **36**(6), 489–530.
- Lim, A.L., Bai, R.** 2003. Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater. *Journal of Membrane Science*, **216**, 279–290.
- Lin , H., Liao, B-Q., Chen , J., Gao , W., vd.,** 2011. New insights into membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor based on characterization of cake sludge and bulk sludge. *Bioreour. Technol.* **102**, 2373–2379
- Lin, H.J., Xie, K., Mahendran, B., Bagley, D.M., Leung, K.T., Liss, S.N., Liao, B.Q.,** 2009. Sludge properties and their effects on membrane fouling in submerged anaerobic membrane bioreactors (SAnMBRs). *Water Res.* **43**, 3827–3837.
- Liu, H. and Fang H.H.P.,** 2002b. Extraction of hücre dışı polymeric substances (EPS) of sludges. *J. Biotechnol.* **95** (3), 249-256.
- Liu, Y. Fang, H.H.P.** 2003. Influences of hücre dışı polymeric substances (EPS) on flocculation, settling and dewatering of activated sludge. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **33**, 237–273.
- Lowery, O.H., Rosebrough,N.J., Farr, A.L., Randall, R.J.,** 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry* **193**, 265–275.
- M. Herrera-Robledo, D.M. Cid-León, J.M. Morgan-Sagastume, A. Noyola,** 2011. Biofouling in an anaerobic membrane bioreactor treating municipal sewage, *Separation and Purification Technology* **81** (2011) 49–55
- Madeni, S.S.; Fane, A.G.;Wiley, D.,** 1999. Factors influencing critical flux in membrane filtration of activated sludge, *J. Chemical Technol. Biotechnol.*, **74** (6), 593-543
- Martinez-Sosa, D., Helmreich, B., Netter, T., Paris, S., Bischof, F., Horn, H.,** 2010. Pilot scale Anaerobic Submerged Membrane Bioreactor (AnSMBR) treating municipal wastewater: The fouling phenomenon and long term operation. IWA. 12th World Congress on Anaerobic Digestion., October 31- November 4, Guadalajara, Mexico.

- Meng, F.G., Chae, S.R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., Yang, F.L.** 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, **43**(6), 1489-1512.
- Melamane, X.**, 2003. Cleaning of fouled membranes using enzymes from a sulphidogenic bioreactor. MSc. Thesis, Rhodes University, Grahamstown, South Africa.
- Meng, F.G., Zhang, G.M., Yang, F.L., Zhang, S.T., Li, Y.S and Zhang, X.W.** 2006. Identification of activated sludge properties affecting membrane fouling in submerged membrane bioreactor. *Separation and purification technology*, **51**(1), 95-103.
- Meng, F., Hang, H., Yang, F. and Filial, F.**, 2007. Characterization of cake layer in submerged membrane bioreactor, *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 4065-4070.
- Meng, F.G., Chae, S.R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., Yang, F.L.** 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water Research* **43**(6), 1489–1512.
- Mikkelsen, L. H.**, 1999. A Physico-Chemical Approach To The Floc Strength Concept–With Dewatering Implications. Thesis (Phd). Aalborg University. Characterization of Sludge In A Submerged Membrane Bioreactor
- Mikkelsen, L. H., Keiding, K.**, 1999. Equilibrium Aspects Of The Effects Of Shear And Solids Content On Aggregate Deflocculation. *Advances In Colloid And Interface Science*, **80**, 151-182.
- Mikkelsen, L. H., Keiding, K.**, 2002. The Shear Sensitivity of Activated Sludge: An Evaluation of The Possibility For A Standardised Floc Strength Test. *Water Research*, **36**, 2931-2940.
- Ng, H.Y., Hermanowicz, S.W.**, 2005. Specific resistance to filtration of biyokütle from membrane bioreactor reactor and activated sludge: effects of exocellular polymeric substances and dispersed microorganisms. *Water Environment Research* **77** (2), 187–192.
- Ng, H. Y., Tan, T. W.**, 2006. Membrane fouling of submerged membrane bioreactors: Impact of mean cell residence time and the contributing factors. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 2706-2713.
- Padmasiri, S.I., Zhang, J., Fitch, M., Norddhal, B., Morgenroth, E. and Raskin, L.**, 2007. Methanogenic population dynamics and performance of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating swine manure under high shear conditions. *Water Research*, **41**, 131-144.
- Pillay, V. L., & Townsend, B. and Buckley, C. A.**, 1994. Improving the performance of anaerobic digesters at wastewater treatment works: The coupled cross-flow microfiltration/digester process. **30** (12), 329-337.
- Ramesh, A., Lee, D-J., Hong, S.G.**, 2006. Soluble microbial products (SMP) and double hücre dışı polymeric substances (EPS) from waste water sludge, *Appl Micobiyol Biyotechnol.*, **73**; 219-225.
- Rittman, B.E. and McCarty, P.L.** 2001. *Environmental Biyotechnology: Principles and applications*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Rosenberger, S., Evenblij, H., Te Poele, S., Wintgens, T., & Laabs, C.**, 2005. The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes - six case studies of different european research groups. *Journal of Membrane Science*, **263**(1-2), 113-126.
- Rosenberger, S., Laabs, C., Lesjean, B., Gnirss, R., Amy, G., Jekel, M. and Schrotter, J.C.**, 2006. Impact of colloidal and soluble organic material on

- membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. *Water Research*, **40**(4), 710-720.
- Saddoud, A., Hassairi I. and Sayadi, S.**, 2007. Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey, *Bioresource Technol.* **98**, 2102–2108.
- Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., and Brindle, K.**, 2000. *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*, IWA Publication, London, UK,
- Stephenson, T., Turra, E. and Jefferson, B.**, 2003. Biyokütle characterization in membrane bioreactors. in: *Proceedings of the IMSTEC*, Sydney, Australia.
- Tansel, B., Bao, W.Y. and Tansel I.N.**, 2000. Characterization of fouling kinetics in ultrafiltration systems by resistances in series model. *Desalination*, **129**, 7-14.
- Tansel, B., Sager, J., Garland, J., Xu, S., Levine, L., Bisbee, P.**, 2006. Deposition of hücre dışı polymeric substances (EPS) and micro topographical changes on membrane surfaces during intermittent filtration conditions. *Journal of Membrane Science*, **285** (1–2), 225–231.
- Vallero, M.V.G., Lettinga, G. and Lens, P.N.L.** 2005. High rate sulfate reduction in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) at high salinity. *Journal of Membrane Science*, **253**, 217-232.
- Visvanathan, C., Ben Aim, R. and Parameshwaran K.** 2000. *Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment*, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **30**(1):1–48.
- Yamato, N., Kimura, K., Miyoshi, T. and Watanabe, Y.**, 2006. Difference in membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) caused by membrane polymer materials. *Journal of Membrane Science*, **280**, 911-919.
- Yoon, S. H., & Kang, I. J. and Lee, C. H.**, 1999. Fouling of inorganic membrane and flux enhancement in membrane-coupled anaerobic bioreactor, *Separation science and technology*, **34**(5), 709-724.
- Wang, X.M., Li, X.Y. and Huang, X.**, 2007. Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (SMBR): Characterization of the sludge cake and its high filtration resistance. *Separation and Purification Technology*, **52**, 439-445.
- Wen, C, Huang, X. and Qian, Y.**, 1999. "Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor couple with membrane filtration." *Process Biochem.* (Oxford, U.K.), **35**(3-4), 335-340.
- Xing, C. H. Qian, Y. Wen, X. H. Wu, W. Z. and D. Sun**, 2001. Physical and biological characteristics of a tangential-flow MBR for municipal wastewater treatment, *J.Membrane Science*, **191**, 31-42.
- Zhang, J., Chua, H.C., Zhou, J., Fane, A.G.**, 2006. Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science* **284** (1–2), 54–66.
- Zhang, J., Padmasiri, S. I., Fitch, M., Norddahl, B., Raskin, L., & Morgenroth, E.** 2007. Influence of cleaning frequency and membrane history on fouling in an anaerobic membrane bioreactor. *Desalination*, **207**(1-3), 153-166.
- Zhou, L.X., Liang, J.R., Zhan, X.H. and Wong, J.W.C.**, 2001. Fractionation and characterization of sludge bacterial hücre dışı polymers by FT-IR, C-NMR and H-NMR. *Water Science and Technology*, **44**(10), 71-78.
- Zhou, W.L., Imai, T., Ukita, M., Li, F.S. and Yuasa, A.** 2007. Effect of limited aeration on the anaerobic treatment of evaporator condensate from a sulfite pulp mill. *Chemosphere*, **66**, 924-929.

EKLER

EK-1

SANMBR SİSTEMİNİN FARKLI GEOMETRİK MEMBRAN MODÜLLÜ ŞEKİLLERDE İŞLETİLMESİ DURUMUNDAKİ AKI, TMP, MEMBRAN TOPLAM DİRENCİ VE GEÇİRGENLİK VERİLERİ

Gün	ORTALAMA AKI (L/m2.saat)						TMP (Pa)						VİSKOZİTE (Pa.s)						MEMBRAN TOPLAM DİRENCİ (1/m)						PERMABİLİTE (L/m2.saat.Pa)					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	11,9	11,6	11,2	11,5	10,5	10,84	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,0007	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	7,652E+12	8,01312E+12	8,2792E+12	8,139E+12	9,36524E+12	8,4491E+12	0,6918605	0,68070175	0,65882353	0,67017544	0,62	0,626589595
2	11,4	11,2	10,2	9,6	9,16	10,3	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,0007	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	7,98762E+12	8,30567E+12	9,0909E+12	9,7159E+12	1,07762E+13	8,89206E+12	0,6627907	0,65672515	0,6	0,56140351	0,5388235	0,595375723
3	10,9	10,1	10	9,18	8,43	8,4	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,0007	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	8,34636E+12	9,20757E+12	9,2358E+12	1,016E+13	1,17093E+13	1,09034E+13	0,6343023	0,59239766	0,59058824	0,53684211	0,4958824	0,485549133
4	10,6	9,95	9	8	7,4	7,6	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,0007	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	8,59046E+12	9,37414E+12	1,0303E+13	1,1659E+13	1,33391E+13	1,20511E+13	0,6162791	0,58187135	0,52941176	0,46783626	0,4352941	0,439306358
5	10,4	9,18	8,3	7,7	7,4	7,1	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,0007	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	8,75566E+12	1,01604E+13	1,1172E+13	1,2113E+13	1,33391E+13	1,28998E+13	0,6046512	0,53684211	0,48823529	0,4502924	0,4352941	0,410404624
6	9,8	8,91	8,1	7,4	6,3	5,9	17100	16900	17000	17200	17000	17300	0,00066	0,0007	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	9,12965E+12	1,04683E+13	1,1448E+13	1,2678E+13	1,56682E+13	1,55234E+13	0,5798817	0,52105263	0,47647059	0,43023256	0,3705882	0,341040462
7	9,7	8,3	7,8	7,4	6	5,9	17100	15190	17000	17200	17000	17300	0,00068	0,0007	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	8,29048E+12	1,09072E+13	1,1538E+13	1,2305E+13	1,5E+13	1,55234E+13	0,638578	0,48538012	0,45882353	0,43023256	0,3529412	0,341040462
8	9,11	8,13	7,5	7	5,9	5,6	17100	15700	17000	17000	17200	17300	0,00068	0,0007	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	9,12378E+12	1,11352E+13	1,2E+13	1,2857E+13	1,54337E+13	1,6355E+13	0,5802548	0,4754386	0,44117647	0,41176471	0,3430233	0,323699422
9	8,9	8,04	7,2	6,9	5,6	5,1	17100	15470	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,0007	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	9,62697E+12	1,19636E+13	1,371E+13	1,4711E+13	1,73469E+13	1,96964E+13	0,575307	0,47017544	0,42352941	0,40116279	0,3294118	0,294797688
10	8,84	7,6	6,9	6,7	5,48	4,8	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,0007	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,07135E+13	1,26563E+13	1,4306E+13	1,515E+13	1,77268E+13	2,09274E+13	0,5169591	0,44444444	0,40588235	0,38953488	0,3223529	0,277456647
11	8,78	7,4	6,7	6,3	5,36	4,8	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,0007	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,07868E+13	1,29983E+13	1,4733E+13	1,6112E+13	1,81237E+13	2,09274E+13	0,5134503	0,43274854	0,39411765	0,36627907	0,3152941	0,277456647
12	8,5	7,36	6,7	5,8	5,18	4,8	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,0007	0,00062	0,00061	0,00063	0,00067	1,11421E+13	1,3069E+13	1,4733E+13	1,7501E+13	1,87534E+13	1,93657E+13	0,497076	0,43040936	0,39411765	0,3372093	0,3047059	0,277456647
13	8,54	7,29	6,4	5,6	5,13	4,3	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0007	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,11547E+13	1,36201E+13	1,4489E+13	1,7551E+13	1,86404E+13	2,33608E+13	0,4965116	0,42631579	0,37647059	0,3255814	0,3017647	0,248554913
14	8,45	7,17	6,3	5,6	4,7	4,1	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0007	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,12736E+13	1,3848E+13	1,4719E+13	1,7551E+13	2,03457E+13	2,45004E+13	0,4912791	0,41929825	0,37058824	0,3255814	0,2764706	0,23699422
15	7,9	6,8	6,1	4,6	4,2	3,7	16900	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0007	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,20584E+13	1,44307E+13	1,5201E+13	2,1366E+13	2,27679E+13	2,71491E+13	0,4593023	0,40236686	0,35882353	0,26744186	0,2470588	0,213872832
16	7,74	6,57	5,7	4,6	4,2	3,6	16900	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0007	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,23077E+13	1,49359E+13	1,6268E+13	2,1366E+13	2,27679E+13	2,79032E+13	0,45	0,3887574	0,33529412	0,26744186	0,2470588	0,208092486
17	7,4	6,4	5,7	4,3	4	3,1	16900	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0007	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,28732E+13	1,53327E+13	1,6268E+13	2,2857E+13	2,39036E+13	3,24037E+13	0,4302326	0,37869822	0,33529412	0,25	0,2352941	0,179190751
18	7,1	6,1	5,4	4,3	3,8	2,8	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,38431E+13	1,62771E+13	1,7708E+13	2,2154E+13	2,55639E+13	3,37013E+13	0,4127907	0,35672515	0,31764706	0,25	0,2235294	0,161849711
19	6,7	5,9	4,89	4,1	3,6	2,6	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,46695E+13	1,68289E+13	1,9555E+13	2,3235E+13	2,69841E+13	3,62937E+13	0,3895349	0,34502924	0,28764706	0,23837209	0,2117647	0,150289017
20	6,1	5,3	4,7	3,9	3,2	2,4	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,61124E+13	1,8734E+13	2,0346E+13	2,4426E+13	3,03571E+13	3,93182E+13	0,3546512	0,30994152	0,27647059	0,22674419	0,1882353	0,138728324
21	6	5,2	4,4	3,7	3,1	2,4	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,6381E+13	1,90943E+13	2,1733E+13	2,5746E+13	3,13364E+13	3,93182E+13	0,3488372	0,30409357	0,25882353	0,21511628	0,1823529	0,138728324
22	5,8	5	4,3	3,7	2,9	2,1	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,69458E+13	1,98581E+13	2,2238E+13	2,5746E+13	3,34975E+13	4,49351E+13	0,3372093	0,29239766	0,25294118	0,21511628	0,1705882	0,121387283
23	5,6	4,9	4,3	3,6	2,7	2	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,7551E+13	2,02633E+13	2,2238E+13	2,6462E+13	3,59788E+13	4,71818E+13	0,3255814	0,28654971	0,25294118	0,20930233	0,1588235	0,115606936
24	5,7	4,6	4,24	2,9	2,2	2	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,72431E+13	2,15849E+13	2,2553E+13	3,2849E+13	4,41558E+13	4,71818E+13	0,3313953	0,26900585	0,24941176	0,16860465	0,1294118	0,115606936
25	5,3	4,4	4,1	2,9	2,4	1,8	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,85445E+13	2,2566E+13	2,3323E+13	3,2849E+13	4,04762E+13	5,24242E+13	0,3081395	0,25730994	0,24117647	0,16860465	0,1411765	0,104046243
26	5,1	4,4	3,9	2,7	2,2	1,6	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,92717E+13	2,2566E+13	2,4519E+13	3,5282E+13	4,41558E+13	5,89773E+13	0,2965116	0,25730994	0,22941176	0,15697674	0,1294118	0,092485549
27	5	4,3	3,6	2,6	2,2	1,6	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,96571E+13	2,30908E+13	2,6563E+13	3,6639E+13	4,41558E+13	5,89773E+13	0,2906977	0,25146199	0,21176471	0,15116279	0,1294118	0,092485549
28	4,35	4	3,6	3	2,3	1,5	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,25944E+13	2,482265										

EK 1'İN DEVAMI

Gün	ORTALAMA AKI (L/m2.saat)						TMP (Pa)		VİSKOZİTE (Pa.s)						MEMBRAN TOPLAM DİRENCİ (l/m)						PERMABİLİTE (l/m2.saat.Pa)									
43	3,8	2,6	2,3	2	1,6	1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,58647E+13	3,81886E+13	4,1576E+13	4,7077E+13	6,07143E+13	9,43636E+13	0,2209302	0,15204678	0,13529412	0,11764706	0,0941176	0,057803468
44	3,7	2,5	2,2	2,2	1,6	1,1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,65637E+13	3,97161E+13	4,3466E+13	4,2797E+13	6,07143E+13	8,57851E+13	0,2151163	0,14619883	0,12941176	0,12941176	0,0941176	0,063583815
45	3,7	2,6	2,1	2	1,5	1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,73016E+13	3,81886E+13	4,5536E+13	4,7077E+13	6,47619E+13	9,43636E+13	0,2093023	0,15204678	0,12352941	0,11764706	0,0882353	0,057803468
46	3,6	2,5	2	2,2	1,7	1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,80816E+13	3,97161E+13	4,7813E+13	4,2797E+13	5,71429E+13	9,43636E+13	0,2034884	0,14619883	0,11764706	0,12941176	0,1	0,057803468
47	3,5	2,6	2	2,1	1,6	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,80816E+13	3,97161E+13	4,7813E+13	4,4835E+13	6,07143E+13	1,04848E+14	0,2034884	0,14619883	0,11764706	0,12352941	0,0941176	0,052023121
48	3,5	2,5	2	1,9	1,6	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,89076E+13	3,81886E+13	4,7813E+13	4,9555E+13	6,07143E+13	1,04848E+14	0,1976744	0,15204678	0,11764706	0,11176471	0,0941176	0,052023121
49	3,4	2,4	2,1	2	1,6	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,97161E+13	3,07143E+13	4,5536E+13	4,7077E+13	6,07143E+13	1,04848E+14	0,1461988	0,18604651	0,12352941	0,11764706	0,0941176	0,052023121
50	3,2	2,4	1,9	2,1	1,5	0,8	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	4,1371E+13	3,27619E+13	5,0329E+13	4,4835E+13	6,47619E+13	1,17955E+14	0,1403509	0,1744186	0,11176471	0,12352941	0,0882353	0,046242775
51	3	2,5	2	1,8	1,4	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	4,1371E+13	3,38916E+13	4,7813E+13	5,2308E+13	6,93878E+13	1,04848E+14	0,1403509	0,16860465	0,11764706	0,10588235	0,0823529	0,052023121
52	2,9	2,4		1,8	1,3	1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,0006	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,97161E+13	9,82857E+13	4,7813E+13	5,2308E+13	7,47253E+13	9,43636E+13	0,1461988	0,05813953	0,11764706	0,10588235	0,0764706	0,057803468
53	1	2,5	2	2	1,3	0,8	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	3,94615E+13	3,4022E+13	4,7077E+13	4,7077E+13	7,2426E+13	1,19769E+14	0,1403509	0,1627907	0,11764706	0,11764706	0,0764706	0,046242775
54	2,8	2,3		1,9	1,4	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	3,78831E+13	3,52821E+13	4,4835E+13	4,9555E+13	6,72527E+13	1,06462E+14	0,1461988	0,15697674	0,12352941	0,11176471	0,0823529	0,052023121
55	2,7	2,6	2	2	1,2	0,7	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	4,11773E+13	3,81046E+13	4,7077E+13	4,7077E+13	7,84615E+13	1,36879E+14	0,1345029	0,14534884	0,11764706	0,11764706	0,0705882	0,040462428
56	2,5	2,5		2,1	1,2	0,7	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	3,6426E+13	3,28488E+13	4,9555E+13	4,4835E+13	7,84615E+13	1,36879E+14	0,1520468	0,16860465	0,11176471	0,12352941	0,0705882	0,040462428
57	2,9	2,5		1,8	1,2	0,7	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	3,78831E+13	3,4022E+13	4,7077E+13	5,2308E+13	7,84615E+13	1,36879E+14	0,1461988	0,1627907	0,11764706	0,10588235	0,0705882	0,040462428
58	2,8	2,6		1,7	1,2	0,6	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	3,78831E+13	3,4022E+13	4,7077E+13	5,5385E+13	7,84615E+13	1,59692E+14	0,1461988	0,1627907	0,11764706	0,1	0,0705882	0,034682081
59	2,8	2,3		1,6	1,1	0,6	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	3,6426E+13	3,52821E+13	4,9555E+13	5,8846E+13	8,55944E+13	1,59692E+14	0,1520468	0,15697674	0,11176471	0,09411765	0,0647059	0,034682081
60	2,7	2,3		1,7	1	0,6	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,0007	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	4,11773E+13	3,4022E+13	5,2308E+13	5,5385E+13	9,41538E+13	1,59692E+14	0,1345029	0,1627907	0,10588235	0,1	0,0588235	0,034682081

EK-2

SAnMBR SİSTEMİNİN BİYOGAZ GERİ DEVİRLİ İŞLETİLMESİ DURUMUNDAKİ AKI, TMP, MEMBRAN TOPLAM DİRENCİ VE GEÇİRGENLİK VERİLERİ

ORTALAMA AKI (l/m².saat)							TMP (Pa)						VİSKOZİTE (Pa.s)						MEMBRAN DİRENCİ (l/m)						PERMABİLİTE (L/m².saat.KPa)					
G	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	13	12	11,7	12	11,6	11,4	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	7,77273E+12	7,28471E+12	7,92541E+12	7,77273E+12	8,50945E+12	8,03406E+12	0,70175439	0,7267442	0,6882353	0,70175	0,682352941	0,658959538
3	11	10	9,5	10	8	7	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	9,32727E+12	8,27807E+12	9,76077E+12	9,32727E+12	1,23387E+13	1,3084E+13	0,58479532	0,6395349	0,5588235	0,5848	0,470588235	0,404624277
6	10	9	9	5,5	5,46	5,54	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	1,03636E+13	9,10588E+12	1,0303E+13	1,68362E+13	1,80787E+13	1,65322E+13	0,52631579	0,5813953	0,5294118	0,32398	0,321176471	0,320231214
7	9,8	8,6	8,9	5,5	5,46	5,54	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	1,08457E+13	9,29172E+12	1,04188E+13	1,68362E+13	1,80787E+13	1,65322E+13	0,50292398	0,5697674	0,5235294	0,32398	0,321176471	0,320231214
8	9,6	8,3	8	4,9	5,2	5,02	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	1,12377E+13	9,43015E+12	1,15909E+13	1,9344E+13	1,89826E+13	1,82447E+13	0,48538012	0,5614035	0,4705882	0,28198	0,305882353	0,29017341
9	9,4	8	7,9	4,8	5,12	4,9	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	1,13162E+13	9,63079E+12	1,13924E+13	1,89706E+13	1,75781E+13	1,86915E+13	0,46783626	0,5497076	0,4647059	0,27907	0,301176471	0,283236994
10	9,4	8	7,8	5,2	5,6	5,3	17100	17100	17000	17000	17200	17300	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	1,13162E+13	9,63079E+12	1,15385E+13	1,74419E+13	1,62605E+13	1,72808E+13	0,46783626	0,5497076	0,4588235	0,30353	0,325581395	0,306358382
11	9,2	8,2	8	4,4	4,8	4,3	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,17302E+13	1,02943E+13	1,23387E+13	2,33352E+13	2,02381E+13	2,33608E+13	0,47953216	0,5380117	0,4705882	0,25291	0,282352941	0,248554913
12	9,4	8	8	4,6	4,5	4,2	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,20234E+13	1,00753E+13	1,23387E+13	2,2067E+13	2,15873E+13	2,39171E+13	0,46783626	0,5497076	0,4705882	0,26744	0,264705882	0,242774566
13	9,3	7,8	8,1	4,4	4,58	4,4	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,23317E+13	1,01836E+13	1,21864E+13	2,29138E+13	2,12102E+13	2,28299E+13	0,45614035	0,5438596	0,4764706	0,25756	0,269411765	0,25433526
14	9,2	7,9	7,3	4,4	4,6	4,4	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00067	1,21756E+13	1,02943E+13	1,35219E+13	2,307E+13	2,1118E+13	2,11262E+13	0,4619883	0,5380117	0,4294118	0,25581	0,270588235	0,25433526
16	9,1	8	7	4,4	4,48	4,26	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,24113E+13	1,04683E+13	1,32468E+13	2,2491E+13	2,13449E+13	2,35802E+13	0,46783626	0,5290698	0,4117647	0,25407	0,263529412	0,246422775
17	9	8	7	4,3	4,41	4,23	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,24113E+13	1,05846E+13	1,32468E+13	2,26465E+13	2,16837E+13	2,37474E+13	0,46783626	0,5232558	0,4117647	0,25233	0,259411765	0,244508671
18	9	7,9	6,7	4,4	4,48	4,26	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,25684E+13	1,05846E+13	1,38399E+13	2,23377E+13	2,13449E+13	2,35802E+13	0,4619883	0,5232558	0,3941176	0,25581	0,263529412	0,246422775
19	8,8	8	6,6	4,3	4,35	4	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,24113E+13	1,08252E+13	1,40496E+13	2,28571E+13	2,19828E+13	2,51129E+13	0,46783626	0,5116279	0,3882353	0,25	0,255882353	0,231213873
20	8,6	7,8	6	3,4	3,83	3,48	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,27295E+13	1,10769E+13	1,54545E+13	2,89076E+13	2,49674E+13	2,88654E+13	0,45614035	0,5	0,3529412	0,19767	0,225294118	0,201156069
22	8,4	7,6	6	4	4	3,7	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,30645E+13	1,17007E+13	1,59375E+13	2,38154E+13	2,42857E+13	2,55037E+13	0,44444444	0,4883721	0,3529412	0,23256	0,235294118	0,213872832
23	8,2	7,4	6	4	4,11	3,74	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,34176E+13	1,19861E+13	1,59375E+13	2,38154E+13	2,36357E+13	2,52309E+13	0,43274854	0,4767442	0,3529412	0,23256	0,241764706	0,216184971
24	8	7,2	6	3,8	3,71	3,56	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,37903E+13	1,22857E+13	1,59375E+13	2,50688E+13	2,61841E+13	2,65066E+13	0,42105263	0,4651163	0,3529412	0,22093	0,218235294	0,205780347
25	7,9	7,4	5,9	4,1	4	3,84	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,34176E+13	1,24412E+13	1,62076E+13	2,32345E+13	2,42857E+13	2,45739E+13	0,43274854	0,4593023	0,3470588	0,23837	0,235294118	0,221965318
26	8	7,3	6,1	3,7	3,75	3,4	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,36014E+13	1,22857E+13	1,56762E+13	2,58863E+13	2,59048E+13	2,7754E+13	0,42690058	0,4651163	0,3588235	0,21395	0,220588235	0,196531792
27	7,8	7	6	3,6	3,53	3,8	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,41843E+13	1,26007E+13	1,59375E+13	2,67589E+13	2,75192E+13	2,48325E+13	0,40935673	0,4534884	0,3529412	0,20698	0,207647059	0,219653179
28	7,6	6,8	6	3,4	3,4	3,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,46015E+13	1,29323E+13	1,6125E+13	2,81839E+13	2,85714E+13	3,04399E+13	0,39766082	0,4418605	0,3488372	0,19651	0,2	0,179190751
29	7,5	6,6	6	3,4	3,42	3,2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,5044E+13	1,31048E+13	1,6125E+13	2,7773E+13	2,84043E+13	2,94886E+13	0,38596491	0,4360465	0,3488372	0,19942	0,201176471	0,184971098
30	7,4	6,7	6	3,4	3,4	3,14	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,48195E+13	1,32819E+13	1,6125E+13	2,7773E+13	2,85714E+13	3,00521E+13	0,39181287	0,4302326	0,3488372	0,19942	0,2	0,18150289
31	7,6	6,5	5,7	3,4	3,32	3,07	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,52754E+13	1,29323E+13	1,69737E+13	2,83516E+13	2,92599E+13	3,07373E+13	0,38011696	0,4418605	0,3313953	0,19535	0,195294118	0,177456647
32	7,5	6,4	5,3	3,3	3,2	3	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063													

EK-3

SA_nMBR SİSTEMİNİN BİYOGAZ GERİ DEVİRLİ DEBİLERDE İŞLETİLMESİ DURUMUNDAKİ AKI, TMP, MEMBRAN TOPLAM DİRENCİ VE GEÇİRGENLİK VERİLERİ

0,5l /dak BİYOGAZ GERİ DEVİR DEBİSİ

0,5l /dak BİYOGAZ GERİ DEVİR DEBİSİ																														
Gün	ORTALAMA AKI (l/m ² .saat)						TMP (Pa)						VİSKOZİTE (Pa.s)						MEMBRAN DİRENCİ (l/m)						PERMABİLİTE (l/m ² .saat.KPa)					
	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6
1	11,64	11,9	11,2	11,5	10,5	10,8	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	8,01312E+12	7,652E+12	8,27922E+12	8,13898E+12	9,36524E+12	8,4491E+12	0,680701754	0,691860465	0,65882353	0,67017544	0,62	0,626589595
2	11,23	11,4	10,2	9,6	9,16	10,3	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	8,30567E+12	7,98762E+12	9,09091E+12	9,71591E+12	1,07762E+13	8,89206E+12	0,656725146	0,662790698	0,6	0,56140351	0,538823529	0,595375723
3	10,13	10,9	10	9,18	8,43	8,4	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	9,20757E+12	8,34636E+12	9,23578E+12	1,01604E+13	1,17093E+13	1,09034E+13	0,592397661	0,634302326	0,59058824	0,53684211	0,495882353	0,485549133
4	9,95	10,6	9	8	7,4	7,6	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	9,37414E+12	8,59046E+12	1,0303E+13	1,16591E+13	1,33391E+13	1,20511E+13	0,581871345	0,61627907	0,52941176	0,46783626	0,435294118	0,439306358
5	9,18	10,4	8,3	7,7	7,4	7,1	17100	17200	17000	17100	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	1,01604E+13	8,75566E+12	1,1172E+13	1,21133E+13	1,33391E+13	1,28998E+13	0,536842105	0,604651163	0,48823529	0,4502924	0,435294118	0,410404624
6	8,91	9,8	8,1	7,4	6,3	5,9	17100	16900	17000	17200	17000	17300	0,00066	0,00068	0,00066	0,00066	0,00062	0,00068	1,04683E+13	9,12965E+12	1,14478E+13	1,26781E+13	1,56682E+13	1,55234E+13	0,521052632	0,579881657	0,47647059	0,43023256	0,370588235	0,341040462
7	8,3	9,7	7,8	7,4	6	5,9	17100	15190	17000	17200	17000	17300	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	1,09072E+13	8,29048E+12	1,15385E+13	1,23052E+13	1,5E+13	1,55234E+13	0,485380117	0,638578012	0,45882353	0,43023256	0,352941176	0,341040462
8	8,13	9,11	7,5	7	5,9	5,6	17100	15700	17000	17000	17200	17300	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	1,11352E+13	9,12378E+12	1,2E+13	1,28571E+13	1,54337E+13	1,6355E+13	0,475438596	0,580254777	0,44117647	0,41176471	0,343023256	0,323699422
9	8,04	8,9	7,2	7	5,6	5,1	17100	15470	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,19636E+13	9,62697E+12	1,37097E+13	1,47113E+13	1,73469E+13	1,96964E+13	0,470175439	0,575307046	0,42352941	0,40116279	0,329411765	0,294797688
10	7,6	8,84	6,9	7	5,48	4,8	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,26563E+13	1,07135E+13	1,43058E+13	1,51505E+13	1,77268E+13	2,09274E+13	0,444444444	0,516959064	0,40588235	0,38953488	0,322352941	0,277456647
11	7,4	8,78	6,7	7	5,36	4,8	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00062	1,29983E+13	1,07868E+13	1,47328E+13	1,61124E+13	1,81237E+13	2,09274E+13	0,432748538	0,513450292	0,39411765	0,36627907	0,315294118	0,277456647
12	7,36	8,5	6,7	7	5,18	4,8	17100	17100	17000	17200	17000	17300	0,00064	0,00065	0,00062	0,00061	0,00063	0,00067	1,3069E+13	1,11421E+13	1,47328E+13	1,75014E+13	1,87534E+13	1,93657E+13	0,430409357	0,497076023	0,39411765	0,3372093	0,304705882	0,277456647
13	7,29	8,54	6,4	7	5,13	4,3	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,36201E+13	1,11547E+13	1,4486E+13	1,7551E+13	1,86404E+13	2,33608E+13	0,426315789	0,496511628	0,37647059	0,3255814	0,301764706	0,248554913
14	7,17	8,45	6,3	7	4,7	4,1	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,3848E+13	1,12736E+13	1,47186E+13	1,7551E+13	2,03457E+13	2,45004E+13	0,419298246	0,49127907	0,37058824	0,3255814	0,276470588	0,23699422
15	6,8	7,9	6,1	7	4,2	3,7	16900	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,44307E+13	1,20584E+13	1,52012E+13	2,13665E+13	2,27679E+13	2,71491E+13	0,402366864	0,459302326	0,35882353	0,26744186	0,247058824	0,213872832
16	6,57	7,74	5,7	7	4,2	3,6	16900	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,49359E+13	1,23077E+13	1,62679E+13	2,13665E+13	2,27679E+13	2,79032E+13	0,388757396	0,45	0,33529412	0,26744186	0,247058824	0,208092486
17	6,4	7,4	5,7	7	4	3,1	16900	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00065	0,00066	0,00063	0,00064	0,00062	1,53327E+13	1,28732E+13	1,62679E+13	2,28571E+13	2,39063E+13	2,34037E+13	0,378698225	0,430232558	0,33529412	0,25	0,235294118	0,179190751
18	6,1	7,1	5,4	7	3,8	2,8	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,62771E+13	1,38431E+13	1,77083E+13	2,21538E+13	2,55639E+13	3,37013E+13	0,356725146	0,412790698	0,31764706	0,25	0,223529412	0,161849711
19	5,9	6,7	4,89	7	3,6	2,6	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,68289E+13	1,46695E+13	1,95552E+13	2,32345E+13	2,69841E+13	3,62937E+13	0,34502924	0,389534884	0,28764706	0,23837209	0,211764706	0,150289017
20	5,3	6,1	4,7	7	3,2	2,4	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,8734E+13	1,61124E+13	2,03457E+13	2,4426E+13	3,03571E+13	3,93182E+13	0,30994152	0,354651163	0,27647059	0,22674419	0,188235294	0,138728324
21	5,2	6	4,4	7	3,1	2,4	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,90943E+13	1,6381E+13	2,1733E+13	2,57464E+13	3,13364E+13	3,93182E+13	0,304093567	0,348837209	0,25882353	0,21511628	0,182352941	0,138728324
22	5	5,8	4,3	7	2,9	2,1	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,98581E+13	1,69458E+13	2,22384E+13	2,57464E+13	3,34975E+13	4,49351E+13	0,292397661	0,337209302	0,25294118	0,21511628	0,170588235	0,121387283
23	4,9	5,6	4,3	7	2,7	2	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,02633E+13	1,7551E+13	2,22384E+13	2,64615E+13	3,59788E+13	4,71818E+13	0,286549708	0,325581395	0,25294118	0,20930233	0,158823529	0,115606936
24	4,6	5,7	4,24	7	2,2	2	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,15849E+13	1,72431E+13	2,25531E+13	3,28488E+13	4,41558E+13	4,71818E+13	0,269005848	0,331395349	0,24941176	0,16860465	0,129411765	0,115606936
25	4,4	5,3	4,1	7	2,4	1,8	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,2566E+13	1,85445E+13	2,33232E+13	3,28488E+13	4,04762E+13	5,24242E+13	0,257309942	0,308139535	0,24117647	0,16860465	0,141176471	0,10404624
26	4,4	5,1	3,9	7	2,2	1,6	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,2566E+13	1,92717E+13	2,45192E+13	3,52821E+13	4,41558E+13	5,89773E+13	0,257309942	0,296511628	0,22941176	0,15697674	0,129411765	0,092485549
27	4,3	5	3,6	7	2,2	1,6	17100	17200	17000	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,30908E+13	1,96571E+13	2,65625E+13	3,66391E+13	4,41558E+13	5,89773E+13	0,251461988	0,290697674	0,21176471	0,15116279	0,129411765	0,092485549
28	4	4,35	3,6	7	2	1,5	17100	17200	17000	17																				

EK-3'ÜN DEVAMI

Gün	ORTALAMA AKI (l/m ² .saat)						TMP (Pa)				VİSKOZİTE (Pa.s)						MEMBRAN DİRENCİ (l/m)						PERMABLİTE(L/m ² .saat.KPa)							
	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6
43	2,6	3,8	2,3	7	1,4	1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,81886E+13	2,58647E+13	4,15761E+13	6,0355E+13	6,93878E+13	9,43636E+13	0,152046784	0,220930233	0,13529412	0,09176471	0,082352941	0,057803468
44	2,5	3,7	2,2	7	1,4	1,1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,97161E+13	2,65637E+13	4,34659E+13	6,27692E+13	6,93878E+13	8,57851E+13	0,14619883	0,215116279	0,12941176	0,08823529	0,082352941	0,063583815
45	2,6	3,6	2,1	7	1,3	1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,81886E+13	2,73016E+13	4,55357E+13	6,27692E+13	7,47253E+13	9,43636E+13	0,152046784	0,209302326	0,12352941	0,08823529	0,076470588	0,057803468
46	2,5	3,5	2	7	1,3	1	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,97161E+13	2,80816E+13	4,78125E+13	5,88462E+13	7,47253E+13	9,43636E+13	0,14619883	0,203488372	0,11764706	0,09411765	0,076470588	0,057803468
47	2,5	3,5	2	7	1,4	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,97161E+13	2,80816E+13	4,78125E+13	5,88462E+13	6,93878E+13	1,04848E+14	0,14619883	0,203488372	0,11764706	0,09411765	0,082352941	0,052023121
48	2,6	3,4	2	7	1,3	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,81886E+13	2,89076E+13	4,78125E+13	5,53846E+13	7,47253E+13	1,04848E+14	0,152046784	0,197674419	0,11764706	0,1	0,076470588	0,052023121
49	2,5	3,2	2,1	7	1,2	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,97161E+13	3,07143E+13	4,55357E+13	5,88462E+13	8,09524E+13	1,04848E+14	0,14619883	0,186046511	0,12352941	0,09411765	0,070588235	0,052023121
50	2,4	3	1,9	7	1,2	0,8	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	4,1371E+13	3,27619E+13	5,03289E+13	5,88462E+13	8,09524E+13	1,17955E+14	0,140350877	0,174418605	0,11176471	0,09411765	0,070588235	0,046242775
51	2,4	2,9	2	7	1,3	0,9	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	4,1371E+13	3,38916E+13	4,78125E+13	5,88462E+13	7,47253E+13	1,04848E+14	0,140350877	0,168604651	0,11764706	0,09411765	0,076470588	0,052023121
52	2,4	2,8	2	7	1,2	0,8	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	3,94615E+13	3,4022E+13	4,70769E+13	5,88462E+13	7,84615E+13	1,19769E+14	0,140350877	0,162790698	0,11764706	0,09411765	0,070588235	0,046242775
53	2,3	2,5	2	7	1,2	0,7	17100	17200	17000	17000	17000	17300	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	0,00065	4,11773E+13	3,81046E+13	4,70769E+13	6,19433E+13	7,84615E+13	1,36879E+14	0,134502924	0,145348837	0,11764706	0,08941176	0,070588235	0,040462428
1,0 l/dak BİYOGAZ GERİ DEVİR DEBİSİ																														
55	15	16	14,8	16	14,7	14,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00064	0,00064	0,00064	0,00064	0,00064	0,00064	6,4125E+12	6,04688E+12	6,53716E+12	6,04688E+12	6,5051E+12	6,66524E+12	0,877192982	0,930232558	0,86046512	0,93023256	0,864705882	0,843930636
56	11,64	11,9	11,2	11,5	10,5	10,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	8,5301E+12	8,2593E+12	8,63839E+12	8,31253E+12	9,21659E+12	8,70513E+12	0,680701754	0,691860465	0,65116279	0,66627907	0,62	0,626589595
57	11,23	11,4	10,2	9,6	9,16	10,3	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	8,84152E+12	8,62155E+12	9,48529E+12	9,92308E+12	1,06051E+13	9,16152E+12	0,656725146	0,662790698	0,59302326	0,55813953	0,538823529	0,595375723
58	10,13	10,9	10	9,18	8,43	8,4	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	9,80161E+12	9,00877E+12	9,63645E+12	1,03771E+13	1,15235E+13	1,12338E+13	0,592397661	0,634302326	0,58372093	0,53372093	0,495882353	0,485549133
59	9,95	10,6	9	8	7,4	7,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	9,97893E+12	9,27224E+12	1,075E+13	1,19077E+13	1,31274E+13	1,24163E+13	0,581871345	0,61627907	0,52325581	0,46511628	0,435294118	0,439306358
60	9,18	10,4	8,3	7,7	7,4	7,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,08159E+13	9,45055E+12	1,16566E+13	1,23716E+13	1,31274E+13	1,32907E+13	0,536842105	0,604651163	0,48255814	0,44767442	0,435294118	0,410404624
61	8,91	9,8	8,1	7,4	6,3	5,9	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,11437E+13	1,00292E+13	1,19444E+13	1,28732E+13	1,54195E+13	1,59938E+13	0,521052632	0,569767442	0,47093023	0,43023256	0,370588235	0,341040462
62	8,3	9,7	7,8	7,4	6	5,9	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,19627E+13	1,01325E+13	1,24038E+13	1,28732E+13	1,61905E+13	1,59938E+13	0,485380117	0,563953488	0,45348837	0,43023256	0,352941176	0,341040462
63	8,13	9,11	7,5	7	5,9	5,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,22128E+13	1,07888E+13	1,29E+13	1,36089E+13	1,64649E+13	1,68506E+13	0,475438596	0,529651163	0,43604651	0,40697674	0,347058824	0,323699422
64	8,04	8,9	7,2	6,9	5,6	5,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,23495E+13	1,10433E+13	1,34375E+13	1,3806E+13	1,73469E+13	1,85027E+13	0,470175439	0,51744186	0,41860465	0,40116279	0,329411765	0,294797688
65	7,6	8,84	6,9	6,7	5,48	4,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,30645E+13	1,11183E+13	1,40217E+13	1,42181E+13	1,77268E+13	1,96591E+13	0,444444444	0,513953488	0,40116279	0,38953488	0,322352941	0,277456647
66	7,4	8,78	6,7	6,3	5,36	4,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,34176E+13	1,11943E+13	1,44403E+13	1,51209E+13	1,81237E+13	1,96591E+13	0,432748538	0,510465116	0,38953488	0,36627907	0,315294118	0,277456647
67	7,36	8,5	6,7	5,8	5,18	4,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,34905E+13	1,1563E+13	1,44403E+13	1,64244E+13	1,87534E+13	1,96591E+13	0,430409357	0,494186047	0,38953488	0,3372093	0,304705882	0,277456647
68	7,29	8,54	6,4	5,6	5,13	4,3	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,36201E+13	1,15089E+13	1,51172E+13	1,7011E+13	1,89362E+13	2,1945E+13	0,426315789	0,496511628	0,37209302	0,3255814	0,301764706	0,248554913
69	7,17	8,45	6,3	5,6	4,7	4,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,3848E+13	1,16314E+13	1,53571E+13	1,7011E+13	2,06687E+13	2,30155E+13	0,419298246	0,49127907	0,36627907	0,3255814	0,276470588	0,23699422
70	6,8	7,9	6,1	4,6	4,2	3,7	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,46015E+13	1,24412E+13	1,58607E+13	2,0709E+13	2,31293E+13	2,55037E+13	0,397680819	0,459302326	0,35465116			

EK-3'ÜN DEVAMI

Gün	ORTALAMA AKI (l/m ² .saat)						TMP (Pa)										VİSKOZİTE (Pa.s)										MEMBRAN DİRENCİ (l/m)										PERMABİLİTE (l/m ² .saat.KPa)				
	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6											
88	3,6	4,8	3,5	3,3	2,5	2,2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,75806E+13	2,04762E+13	2,76429E+13	2,88671E+13	3,88571E+13	4,28926E+13	0,210526316	0,279069767	0,20348837	0,19186047	0,147058824	0,12716763											
89	3,5	4,7	3,5	3,2	2,6	2,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,83687E+13	2,09119E+13	2,76429E+13	2,97692E+13	3,73626E+13	4,49351E+13	0,204678363	0,273255814	0,20348837	0,18604651	0,152941176	0,121387283											
90	3,4	4,6	3,6	3,2	2,5	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,9203E+13	2,13665E+13	2,6875E+13	2,97692E+13	3,88571E+13	4,71818E+13	0,198830409	0,26744186	0,20930233	0,18604651	0,147058824	0,115606936											
91	3,5	4,5	3,5	3,1	2,5	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,83687E+13	2,18413E+13	2,76429E+13	3,07295E+13	3,88571E+13	4,71818E+13	0,204678363	0,261627907	0,20348837	0,18023256	0,147058824	0,115606936											
92	3,4	4,5	3,5	3	2,4	2,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,9203E+13	2,18413E+13	2,76429E+13	3,17538E+13	4,04762E+13	4,49351E+13	0,198830409	0,261627907	0,20348837	0,1744186	0,141176471	0,121387283											
93	3,3	4,5	3,6	3	2,4	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,0088E+13	2,18413E+13	2,6875E+13	3,17538E+13	4,04762E+13	4,71818E+13	0,192982456	0,261627907	0,20930233	0,1744186	0,141176471	0,115606936											
94	3,2	4,6	3,4	3	2,4	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,10282E+13	2,13665E+13	2,84559E+13	3,17538E+13	4,04762E+13	4,71818E+13	0,187134503	0,26744186	0,19767442	0,1744186	0,141176471	0,115606936											
95	3,3	4,5	3,4	3	2,5	1,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,0088E+13	2,18413E+13	2,84559E+13	3,17538E+13	3,88571E+13	5,24242E+13	0,192982456	0,261627907	0,19767442	0,1744186	0,147058824	0,104046243											
96	3,3	4,4	3,5	2,9	2,3	1,9	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,0088E+13	2,23377E+13	2,76429E+13	3,28488E+13	4,2236E+13	4,96651E+13	0,192982456	0,255813953	0,20348837	0,16860465	0,135294118	0,10982659											
97	2,2	4,2	3,4	2,8	2,3	1,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	4,5132E+13	2,34014E+13	2,84559E+13	3,4022E+13	4,2236E+13	5,24242E+13	0,128654971	0,244186047	0,19767442	0,1627907	0,135294118	0,104046243											
98	3,2	4	3,4	2,6	2,3	1,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,10282E+13	2,45714E+13	2,84559E+13	3,66391E+13	4,2236E+13	5,24242E+13	0,187134503	0,23255814	0,19767442	0,15116279	0,135294118	0,104046243											
99	3,3	4	3,3	2,5	2,4	1,7	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,0088E+13	2,45714E+13	2,93182E+13	3,81046E+13	4,04762E+13	5,5508E+13	0,192982456	0,23255814	0,19186047	0,14534884	0,141176471	0,098265896											
100	3,2	3,9	3,3	2,5	2,3	1,7	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,10282E+13	2,52015E+13	2,93182E+13	3,81046E+13	4,2236E+13	5,5508E+13	0,187134503	0,226744186	0,19186047	0,14534884	0,135294118	0,098265896											
101	3,1	3,8	3,2	2,4	2,2	1,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,20291E+13	2,58647E+13	3,02344E+13	3,96923E+13	4,41558E+13	5,89773E+13	0,18128655	0,220930233	0,18604651	0,13953488	0,129411765	0,092485549											
102	3,1	3,9	3,3	2,4	2	1,5	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,20291E+13	2,52015E+13	2,93182E+13	3,96923E+13	4,85714E+13	6,29091E+13	0,18128655	0,226744186	0,19186047	0,13953488	0,117647059	0,086705202											
103	3	3,8	3,2	2,4	2	1,5	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,30968E+13	2,58647E+13	3,02344E+13	3,96923E+13	4,85714E+13	6,29091E+13	0,175438596	0,220930233	0,18604651	0,13953488	0,117647059	0,086705202											
104	3	3,7	3,1	2,3	2,1	1,4	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,30968E+13	2,65637E+13	3,12097E+13	4,14181E+13	4,62585E+13	6,74026E+13	0,175438596	0,215116279	0,18023256	0,13372093	0,123529412	0,080924855											
105	3	3,6	3	2,3	2	1,5	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,30968E+13	2,73016E+13	3,225E+13	4,14181E+13	4,85714E+13	6,29091E+13	0,175438596	0,209302326	0,1744186	0,13372093	0,117647059	0,086705202											
106	3	3,6	3,1	2,2	2,1	1,4	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,30968E+13	2,73016E+13	3,12097E+13	4,33007E+13	4,62585E+13	6,74026E+13	0,175438596	0,209302326	0,18023256	0,12790698	0,123529412	0,080924855											
107	2,9	3,6	3	2,2	2	1,3	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,4238E+13	2,73016E+13	3,225E+13	4,33007E+13	4,85714E+13	7,25874E+13	0,169590643	0,209302326	0,1744186	0,12790698	0,075144509	0,057144509											
108	2,8	3,6	2,9	2,1	2	1,2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,54608E+13	2,73016E+13	3,33621E+13	4,53626E+13	4,85714E+13	7,86364E+13	0,16374269	0,209302326	0,16860465	0,12209302	0,117647059	0,069364162											
109	2,9	3,5	2,8	2,1	1,9	1,2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,4238E+13	2,80816E+13	3,45536E+13	4,53626E+13	5,11278E+13	7,86364E+13	0,169590643	0,203488372	0,1627907	0,12209302	0,111764706	0,069364162											
110	2,8	3,5	2,7	2	1,7	1,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,54608E+13	2,80816E+13	3,58333E+13	4,76308E+13	5,71429E+13	8,57851E+13	0,16374269	0,203488372	0,15697674	0,11627907	0,1	0,063583815											
111	2,7	3,6	2,6	2	1,6	1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,67742E+13	2,73016E+13	3,72115E+13	4,76308E+13	6,07143E+13	9,43636E+13	0,157894737	0,209302326	0,15116279	0,11627907	0,094117647	0,057803468											
112	2,7	3,5	2,5	2	1,5	1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	3,67742E+13	2,80816E+13	3,87E+13	4,76308E+13	6,47619E+13	9,43636E+13	0,157894737	0,203488372	0,14534884	0,11627907	0,088235294	0,057803468											
1,5 l /dak BİYOGAZ GERİ DEVİR DEBİSİ																																									
114	16,9	16,8	15,9	16	15,7	15,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	5,87517E+12	5,85034E+12	6,08491E+12	5,95385E+12	6,18744E+12	6,04895E+12	0,988304094	0,976744186	0,9244186	0,93023256	0,923529412	0,901734104											
115	14,9	16	14,5	10,9	11,6	11,1	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	6,66378E+12	6,14286E+12	6,67241E+12	8,73959E+12	8,37438E+12	8,50123E+12	td																

EK-3'ÜN DEVAMI

Gün	ORTALAMA AKI (l/m ² .saat)						TMP (Pa)						VİSKOZİTE (Pa.s)						MEMBRAN DİRENCİ (l/m)						PERMABLİTE(L/m ² .saat.KPa)					
	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6	M2	M1	M3	M4	M5	M6
134	8,6	9,8	7,4	4,6	5,1	2,9	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,15454E+13	1,00292E+13	1,30743E+13	2,0709E+13	1,90476E+13	3,25392E+13	0,502923977	0,569767442	0,43023256	0,26744186	0,3	0,167630058
135	8,5	9,7	6,9	4,6	4,9	2,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,16812E+13	1,01325E+13	1,40217E+13	2,0709E+13	1,98251E+13	3,62937E+13	0,497076023	0,563953488	0,40116279	0,26744186	0,288235294	0,150289017
136	8,3	9,7	6,9	4,5	4,9	2,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,19627E+13	1,01325E+13	1,40217E+13	2,11692E+13	1,98251E+13	3,62937E+13	0,485380117	0,563953488	0,40116279	0,26162791	0,288235294	0,150289017
137	8,1	9,6	6,6	4,4	4,9	2,5	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,22581E+13	1,02381E+13	1,46591E+13	2,16503E+13	1,98251E+13	3,77455E+13	0,473684211	0,558139535	0,38372093	0,25581395	0,288235294	0,144508671
138	7,8	8,9	6,4	4,2	4,1	2,5	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,27295E+13	1,10433E+13	1,51172E+13	2,26813E+13	2,36934E+13	3,77455E+13	0,456140351	0,51744186	0,37209302	0,24418605	0,241176471	0,144508671
139	7,8	8,8	6,1	4,2	4,1	2,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,27295E+13	1,11688E+13	1,58607E+13	2,26813E+13	2,36934E+13	3,62937E+13	0,456140351	0,511627907	0,35465116	0,24418605	0,241176471	0,150289017
140	7,5	8,4	6	4,2	4	2,4	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,32387E+13	1,17007E+13	1,6125E+13	2,26813E+13	2,42857E+13	3,93182E+13	0,438596491	0,488372093	0,34883721	0,24418605	0,235294118	0,138728324
142	7,5	8,4	5,9	4,2	3,6	2,3	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,32387E+13	1,17007E+13	1,63983E+13	2,26813E+13	2,69841E+13	4,10277E+13	0,438596491	0,488372093	0,34302326	0,24418605	0,211764706	0,132947977
143	7,3	8,2	5,9	4	3,5	2,3	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,36014E+13	1,19861E+13	1,63983E+13	2,38154E+13	2,77551E+13	4,10277E+13	0,426900585	0,476744186	0,34302326	0,23255814	0,205882353	0,132947977
144	7,1	8	5,7	4,1	3,1	2,2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,39846E+13	1,22857E+13	1,69737E+13	2,32345E+13	3,13364E+13	4,28926E+13	0,415204678	0,465116279	0,33139535	0,23837209	0,182352941	0,12716763
145	7,1	8,2	5,6	4,2	3,1	2,2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,39846E+13	1,19861E+13	1,72768E+13	2,26813E+13	3,13364E+13	4,28926E+13	0,415204678	0,476744186	0,3255814	0,24418605	0,182352941	0,12716763
146	6,7	7,8	5,5	4,2	3	2,3	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,48195E+13	1,26007E+13	1,75909E+13	2,26813E+13	3,2381E+13	4,10277E+13	0,391812865	0,453488372	0,31976744	0,24418605	0,176470588	0,132947977
147	6,3	7,8	5,5	4,1	2,9	2,2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,57604E+13	1,26007E+13	1,75909E+13	2,32345E+13	3,34975E+13	4,28926E+13	0,368421053	0,453488372	0,31976744	0,23837209	0,170588235	0,12716763
148	5,8	7,4	5,2	4,1	2,8	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,7119E+13	1,32819E+13	1,86058E+13	2,32345E+13	3,46939E+13	4,71818E+13	0,339181287	0,430232558	0,30232558	0,23837209	0,164705882	0,115606936
149	5,7	6,9	5,1	4,2	2,7	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,74194E+13	1,42443E+13	1,89706E+13	2,26813E+13	3,59788E+13	4,71818E+13	0,333333333	0,401162791	0,29651163	0,24418605	0,158823529	0,115606936
150	5,8	6,6	5,1	4,1	2,7	1,9	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,7119E+13	1,48918E+13	1,89706E+13	2,32345E+13	3,59788E+13	4,96651E+13	0,339181287	0,38372093	0,29651163	0,23837209	0,158823529	0,10982659
151	5,6	6,4	5,1	4	2,6	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,77304E+13	1,53571E+13	1,89706E+13	2,38154E+13	3,73626E+13	4,71818E+13	0,32748538	0,372093023	0,29651163	0,23255814	0,152941176	0,115606936
152	5,6	6,4	5,1	3,8	2,5	2	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,77304E+13	1,53571E+13	1,89706E+13	2,50688E+13	3,88571E+13	4,71818E+13	0,32748538	0,372093023	0,29651163	0,22093023	0,147058824	0,115606936
153	5,5	6,4	4,9	3,9	2,4	1,9	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,80528E+13	1,53571E+13	1,97449E+13	2,4426E+13	4,04762E+13	4,96651E+13	0,321637427	0,372093023	0,28488372	0,22674419	0,141176471	0,10982659
154	5,5	6,2	4,6	3,7	2,2	1,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,80528E+13	1,58525E+13	2,10326E+13	2,57464E+13	4,41558E+13	5,24242E+13	0,321637427	0,360465116	0,26744186	0,21511628	0,129411765	0,104046243
155	5,5	6	4,5	3,8	2,3	1,8	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,80528E+13	1,6381E+13	2,15E+13	2,50688E+13	4,2236E+13	5,24242E+13	0,321637427	0,348837209	0,26162791	0,22093023	0,135294118	0,104046243
156	5,4	5,8	4,5	3,6	2,2	1,7	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,83871E+13	1,69458E+13	2,15E+13	2,64615E+13	4,41558E+13	5,5508E+13	0,315789474	0,337209302	0,26162791	0,20930233	0,129411765	0,098265896
157	5,4	5,7	4,4	3,4	2	1,7	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	1,83871E+13	1,72431E+13	2,19886E+13	2,80181E+13	4,85714E+13	5,5508E+13	0,315789474	0,331395349	0,25581395	0,19767442	0,117647059	0,098265896
158	4,9	5,4	4,3	3,2	2,1	1,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,02633E+13	1,82011E+13	2,25E+13	2,97692E+13	4,62585E+13	5,89773E+13	0,286549708	0,313953488	0,25	0,18604651	0,123529412	0,092485549
159	4,3	5	4,2	3	2	1,5	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,30908E+13	1,96571E+13	2,30357E+13	3,17538E+13	4,85714E+13	6,29091E+13	0,251461988	0,290697674	0,24418605	0,1744186	0,117647059	0,086705202
160	4	4,8	3,7	2,9	2	1,5	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,48226E+13	2,04762E+13	2,61486E+13	3,28488E+13	4,85714E+13	6,29091E+13	0,233918129	0,279069767	0,21511628	0,16860465	0,117647059	0,086705202
161	3,9	4,6	3,5	2,8	1,9	1,6	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,54591E+13	2,13665E+13	2,76429E+13	3,4022E+13	5,11278E+13	5,89773E+13	0,228070175	0,26744186	0,20348837	0,1627907	0,111764706	0,092485549
162	3,8	4,4	3,3	2,6	1,8	1,4	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,6129E+13	2,23377E+13	2,93182E+13	3,66391E+13	5,39683E+13	6,74026E+13	0,222222222	0,255813953	0,19186047	0,15116279	0,105882353	0,080924855
163	3,6	4,5	3	2,6	1,9	1,4	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,75806E+13	2,18413E+13	3,225E+13	3,66391E+13	5,11278E+13	6,74026E+13	0,210526316	0,261627907	0,1744186	0,15116279	0,111764706	0,080924855
164	3,4	4,4	2,9	2,5	1,8	1,4	17100	17200	17200	17200	17000	17300	0,00062	0,00063	0,00064	0,00065	0,00063	0,00066	2,9203E+13	2,23377E+13	3,33621E+13	3,81046E+13	5,39683E+13	6,74026E+13	0,198830409	0,255813953	0,16860465	0,14534884	0,105882353	0,080924855

EK-4

**SAnMBR SİSTEMİNİN İŞLETİLMESİ SÜRECİNDE MEMBRAN KİRLENME
DİRENÇLERİ**

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
0,5 l/dak Biyogaz geridevir Debisi						
Rt	4,11773E+13	3,81046E+13	4,70769E+13	6,19433E+13	7,846E+13	1,369E+14
Rm+Rp	9,80567E+12	1,22034E+13	1,20615E+13	1,44E+13	1,385E+13	1,293E+13
Rm	5,85146E+11	6,39789E+11	6,8041E+11	4,82734E+11	3,517E+11	3,704E+11
Rc	3,13716E+13	2,59012E+13	3,50154E+13	4,75433E+13	6,462E+13	1,239E+14
Rp	9,22052E+12	1,15636E+13	1,13811E+13	1,39173E+13	1,349E+13	1,256E+13
Rc	76,18668366	67,97398502	74,37918802	76,75294118	82,352941	90,552326
Rp	22,39227395	30,34698276	24,17549603	22,46774263	17,198866	9,1770367
Rm	1,421042395	1,679032216	1,445315948	0,77931619	0,4481931	0,2706378
1,0 l/dak Biyogaz geridevir Debisi						
Rt	3,67742E+13	2,80816E+13	3,87E+13	4,76308E+13	6,476E+13	9,436E+13
Rm+Rp	1,58997E+12	1,45928E+12	1,49476E+12	1,66344E+12	2,223E+12	1,908E+12
Rm	5,85146E+11	6,39789E+11	6,8041E+11	4,82734E+11	3,517E+11	3,704E+11
Rc	3,51842E+13	2,66224E+13	3,72052E+13	4,59673E+13	6,254E+13	9,246E+13
Rp	1,00483E+12	8,19487E+11	8,14345E+11	1,18071E+12	1,872E+12	1,538E+12
Rc	95,676387	94,80345023	96,13758335	96,50762949	96,567132	97,977941
Rp	2,732425728	2,918232213	2,104250562	2,478877917	2,8898652	1,6294854
Rm	1,591187271	2,278317561	1,758166091	1,013492597	0,5430031	0,3925735
1,5 l/dak Biyogaz geridevir Debisi						
Rt	2,9203E+13	2,23377E+13	3,33621E+13	3,81046E+13	5,397E+13	6,74E+13
Rm+Rp	8,72517E+11	8,66237E+11	8,87298E+11	1,65991E+12	1,607E+12	1,967E+12
Rm	5,85146E+11	6,39789E+11	6,8041E+11	4,82734E+11	3,517E+11	3,704E+11
Rc	2,83305E+13	2,14714E+13	3,24748E+13	3,64447E+13	5,236E+13	6,544E+13
Rp	2,87371E+11	2,26448E+11	2,06887E+11	1,17718E+12	1,255E+12	1,597E+12
Rc	97,01223751	96,12207897	97,34039986	95,64380536	97,023059	97,081565
Rp	0,98404519	1,013750383	0,620127477	3,089328897	2,3253368	2,3688326
Rm	2,003717304	2,864170648	2,039472666	1,266865746	0,6516037	0,5496028

EK-5**SAnMBR SİSTEMİNİN İŞLETİLMESİ SÜRECİNDE SMP VE EPS DEĞİŞİMİ**

Zaman		Abs , nm		Konsantrasyon, mg/l		Abs., nm		Konsantrasyon, mg/l		TKM, g/l	Konsantrasyon, mg/l			
Gün	Tarih	SMPc	EPSc	SMPc	EPSc	SMPp	EPSp	SMPp	EPSp		SMP	EPS	SMP,mg/gKM	EPS, mg/gKM
20	21.03.2011	0,047	0,298	2,4	15,1	0,071	0,469	13,6538462	90,1923	5,8	16,0	105,2	2,7633	18,1453
40	11.04.2011	0,108	0,587	5,5	29,6	0,109	0,375	20,9615385	72,1153	6,3	26,4	101,8	4,19302	16,1526
55	26.04.2011	0,174	0,404	8,8	20,4	0,568	0,238	109,230769	45,7692	7,7	118,0	66,2	15,3270	8,59393
77	17.05.2011	0,103	0,717	5,2	36,2	0,242	0,645	46,5384615	124,0384	7,6	51,7	160,3	6,80795	21,08560
111	21.06.2011	0,081	0,620	4,1	31,3	0,276	0,478	53,0769231	91,9230	5,0	57,2	123,2	11,4335	24,6472
124	04.07.2011	0,087	0,213	4,4	10,8	0,597	0,511	114,807692	98,2692	4,9	119,2	109,0	24,3268	22,2503
154	29.09.2011	0,173	0,590	7,5	25,7	0,260	0,14	16,7741935	9,0322	7,2	24,3	34,7	3,37443	4,81728
174	17.10.2011	0,300	0,540	13,0	23,5	0,340	0,88	21,9354839	56,7741	8,3	35,0	80,3	4,21433	9,66897
200	20.11.2011	0,104	0,850	4,5	37,0	0,210	0,93	13,5483871	60,0000	7,8	18,1	97,0	2,3166	12,43032
230	16.01.2012	0,49	0,630	21,3	27,4	0,200	0,28	12,9032258	18,0645	7,5	34,2	45,5	4,56100	6,06077

SMPc: Çözünmüş Mikrobiyal Ürünlerde Karbondihidrat

SMPp: Çözünmüş Mikrobiyal Ürünlerde Protein

EPSc: Hücre dışı Polimerik Maddelerde Karbondihidrat

EPSp: Hücre dışı Polimerik Maddelerde protein

7. ÖZGEÇMİŞ

Ocak 1970 yılında Şanlıurfa ili, Bozova ilçesi, Çakmaklı Köyü'nde doğdu. İlk orta ve lise öğrenimi Şanlıurfa'da tamaladı. 1990 yılında Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'ne başladı ve 1994 yılında mezun oldu. Yüksek Lisans eğitimini 1996 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yaptı. Aynı zamanda bir yıl Alka Metal Kaplama Sanayiinde Çevre Mühendisi olarak çalıştı. 1997-2001 yılları arasında İstanbul Pendik İlçe Belediyesi'nde çalıştı. Bu arada Nisan 1999-2000 yılları arasında Hava Kuvvetleri Komutanlığında Hava Mühendis Asteğmen olarak askerlik görevini yerine getirdi. Askerlik süresi içerisinde Hava Kuvvetleri Komutanlığı Çevre Yönergesi'ni hazırladı. Ekim 2001 yılında Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak akademisyenliğe başladı. 2002 yılında ise halen görevli bulunduğu Harran Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'ne Öğretim Görevlisi olarak atandı. Mustafa ASLAN evli ve 3 çocuk babası olup, İngilizce bilmektedir.

Mustafa ASLAN