



PEYNİRALTI SULARININ ARITILDIĞI JET LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖRÜN MEMBRAN FİLTASYONU ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

B. FARİZOĞLU¹, B. KESKİNLER², E. YILDIZ¹, A. ÇAKICI¹

¹Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240, ERZURUM

²Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü, Gebze, KOCAELİ

E-posta:bfoglu@atauni.edu.tr

Öz: Çalışmada yüksek verimli kompakt bir reaktör olan jet loop membran biyoreaktör (JLMB) sisteminde peyniraltı suyunun arıtım performansı ve biyolojik arıtım esnasında oluşan biyokütlenin membran filtrasyonu özellikleri incelenmiştir. Peyniraltı suyu KOİ, TN ve PO₄³⁻ konsantrasyonları sırasıyla 78680, 1125 ve 378 mg/l olarak ölçülmüştür. Çalışma esnasında 1.6 gün çamur yaşı ve 22.2 kgKOİ/m³gün organik yük için %97 KOİ arıtma verimi elde edilmiştir. Oluşan biyokütlenin membran filtrasyonunda AKM konsantrasyonu arttıkça kararlı hal akılarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çapraz akış hızının (V_ç) artışı ile kararlı hal akılarının arttığı ve spesifik kek dirençlerinin azaldığı görülmüştür. Membran kirlenme indeksi (MFI) ise artan AKM ile artmıştır. Membran yüzeyindeki yalancı jel konsantrasyonu (C_g) 54 g/l olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel atık su arıtımı, Jet loop reaktör, Membran biyoreaktör, Membran filtrasyon, Peyniraltı suları

THE INVESTIGATION OF MEMBRANE FILTRATION CHARACTERISTICS OF THE JET LOOP MEMBRANE BIOREACTOR TREATED THE CHEESE WHEY

Abstract: In this study, it was investigated that the cheese whey treatment performance and membrane filtration characteristics of the biomass during the biological treatment in a jet-loop membrane bioreactor (JLMB) system, which is highly efficient compact reactor. The mean concentration values of COD, TN and PO₄³⁻ in cheese whey was found as 78,680 mg/l, 1125 mg/l and 378 mg/l respectively. During the treatment of cheese whey wastewaters in JLMB integrated with cross-flow microfiltration (MF) module, 97% COD removal rate was obtained for 1.6 days of sludge age (θ_c) and 22.2 kgCOD/m³.day of volumetric loads. In membrane filtration of biomass, it was determined that steady-state flux (J) values decreased with increasing AKM concentration. Also it was seen that, increasing cross-flow rate increased J_s values and decreased specific cake resistance values. Membrane fouling index (MFI) increased with increasing AKM concentration. The pseudo gel concentration on the membrane (C_G) was computed as 54 g/l.

Keywords: Industrial wastewater treatment, jet-loop reactor, membrane filtration, cheese whey, membrane bioreactor

NOTASYON

| | | | |
|----------------|--|----------------|---|
| JLMB | : Jet loop membran biyoreaktör | J | : Transmembran akısı (l/m ² saat) |
| B _v | : KOİ cinsinden organik yüklemesi (kg/m ³ .gün) | K _m | : Sıvı ve membran yüzeyi arasındaki partikül kütle transfer katsayısı |
| MFI | : Uyarlanmış kirlenme indeksi | α | : Özgül kek direnci (kg/m) |
| ΔP | : Basınç farkı (kPa-atm) | C _G | : Membran üzerindeki kirlenici madde konsantrasyonu (mg/l) |
| V _ç | : Membran yüzeyindeki çapraz akış hızı (m/s) | V _f | : Birim membran alanından geçen filtrat hacmi (m ³ /m ²) |

GİRİŞ

Peyniraltı suları süt endüstrisinin peynir yapımı esnasında sütün kazeininin çöktürülerek alınması işlemleri gerçekleştirilirken meydana çıkarılan içeriği zengin bir yan üründür. Bu yan ürün işlenen sütün hacminin yaklaşık olarak %85-95'ini temsil eden, süt besinlerinin %50'si kadarını bünyesinde bulunduran esasen değerli bir maddedir. Laktoz, protein ve yağlar peyniraltı sularında büyük oranlarda bulunan değerli maddelerin başında gelmektedir (Siso 1996, Kalyuzhnyi ve diğ. 1997). Peyniraltı sularının kullanımı 50 yıldan beri yaygınlaşmasına rağmen, halen dünya genelinde üretilen bu suların yarısına yakın kısmı herhangi bir arıtıma tabi tutulmaksızın alıcı ortamlara direk olarak atılmaktadır. Peyniraltı suları eğer bir geri kazanım seçilmemiş ise oldukça yüksek organik madde içerikleri (KOİ=60–80 g/l, BOİ=30–50 g/l) nedeniyle alıcı ortamlarda son derece önemli çevre problemleri yaratmaktadırlar (Siso 1996, Kalyuzhnyi ve diğ. 1997, Patel ve Madamwar 1997, Ergüder ve diğ. 2001). Peyniraltı atık suların arıtımı genellikle anaerobik parçalanma prosesleri ile gerçekleştirilmektedir (Patel ve Madamwar 1997, Ramasamy ve Abbasi 2000). Anaerobik arıtım metotları net yakıt üretimini (metan üretimi) gerçekleştirmesi, atıkların stabilizasyonunu sağlaması, ortaya çıkan çamurlarının gübre olarak kullanılabilmesi gibi avantajlar sağlamasına rağmen, peyniraltı sularının direk arıtımında kullanıldığında birtakım işletme problemleri ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda ham peyniraltı sularının düşük alkalinite, yüksek KOİ konsantrasyonu içermesinin yanı sıra çok hızlı asitleşme eğilimi, granülleştirilmenin sağlanmasında karşılaşılan güçlükler nedeniyle anaerobik arıtım için oldukça problemlerli bir substrattır (Malaspina ve diğ. 1996). Bu noktada peyniraltı sularının aerobik metotlarla ve yeni tip reaktörlerle arıtımının incelenmesi düşünülmüştür.

Jet loop biyoreaktörler, klasik aerobik sistemlerle (aktif çamur sistemleri gibi) karşılaştırıldıklarında havalandırma için mekanik gereçleri (pedal, türbin vb.) bulundurmaya, yüksek H/D (yükseklik/çap) oranı (5–10/1) nedeniyle inşası için az arazi ihtiyacı ve daha etkili bir karışımın sağlanabilmesi gibi birçok avantaj sunmaktadır (Bloor ve diğ. 1995). Püskürtme başlığı sayesinde meydana getirilen çift akımın hava kabarcıklarını küçük parçalara bölmesi ile etkili bir karışım ve yüksek etkin yüzey alanının oluştuğu jet loop reaktörler birçok ünitenin yaptığı işi tek başına yaptığı için büyük enerji tasarrufu sağlayarak yüksek difüzyon katsayısı ve oksijenlenme temin etmektedir. Bu

özellikleri nedeniyle JLB'ler yüksek konsantrasyonlarda organik madde içeren endüstriyel atık suların arıtımında verimli bir şekilde kullanılmaktadırlar (Lübecke ve diğ. 1995, Bloor ve diğ. 1995, Vogelpohl 2000, Petruccioli ve diğ. 2002, Farizoglu ve diğ. 2004).

Biyolojik arıtım esnasında oluşturulan biyolojik katıların ayrılmasında membran ayırma tekniklerinin (mikro veya ultrafiltrasyon) uygulanması ile çöktürme tanklarından veya biyolojik arıtma basamaklarından doğan dezavantajlar ortadan kaldırılabilmektedir. Membran süspansiyon katı için tam bir bariyer görevi görürken daha yüksek kalitede çıkış suyu üretilmesine imkân sağlamaktadır. Atık su arıtımında membran prosesler üç şekilde kullanılmaktadır:

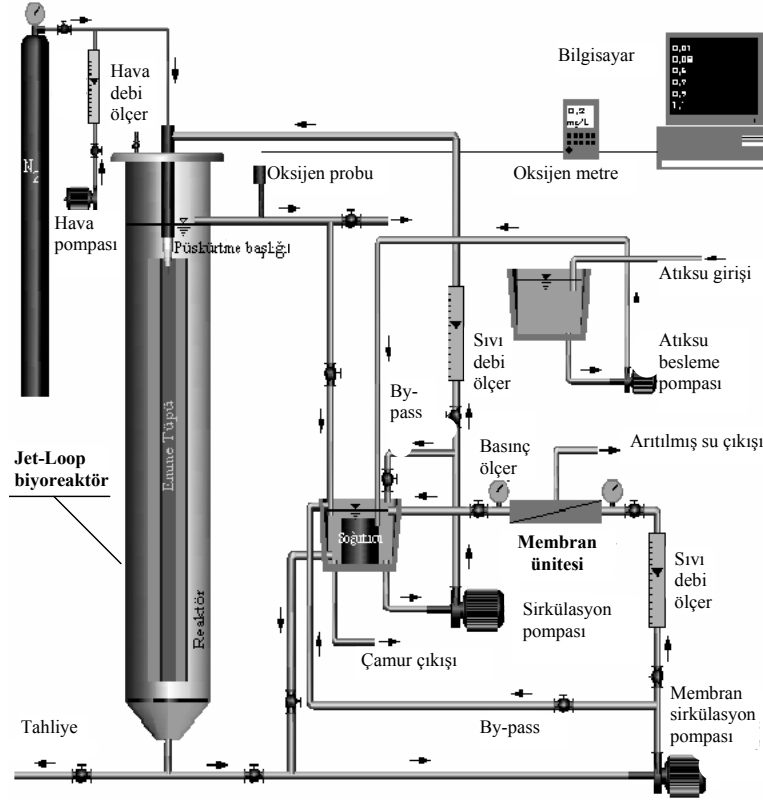
- Biyolojik arıttıktan sonra biyokütlenin sudan ayrılması,
- Biyokütlenin havalandırılması,
- Ortamdan uzaklaştırılmak istenilen kirleticilerin ekstraksiyonu.

Biyolojik arıtımda membranların kullanımının en yaygın şekli biyokütlenin ayırımı amacıyla kullanımdır ve bu uygulamaya ait endüstri ölçekli prosesler birçok ülkede etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Membran üretimi teknolojisindeki hızlı gelişimler ve uygulamanın yaygınlaşması ile üçüncül veya ileri arıtım basamaklarının yerini ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon proseslerinin alması mümkün olmaktadır (Fane ve Chang 2002). Membran biyoreaktörler (MBR) klasik metotlarla karşılaştırıldığında son derece önemli avantajlar sunmaktadırlar. Çıkış sularının katı madde içermemesi, çamur yaşlarının hidrolik kalış sürelerinden tamamen bağımsız olarak kontrol edilebilmesi, kompakt tesis boyutu, yüksek oranda veya hızda bozunma sağlayabilmesi, düşük oranda çamur üretimi, dezenfeksiyon ve koku kontrolü sağlanması en başta sayılacak avantajlarıdır.

Bu çalışmada oldukça kirli bir atık su olan peyniraltı suyunun JLMB sistemiyle arıtımı sırasında oluşan biyokütlenin membran filtrasyonu karakteristiklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Çalışmalarda kullanılan deney sisteminin şematik bir gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Jet-loop membran biyoreaktör sisteminin şematik gösterimi

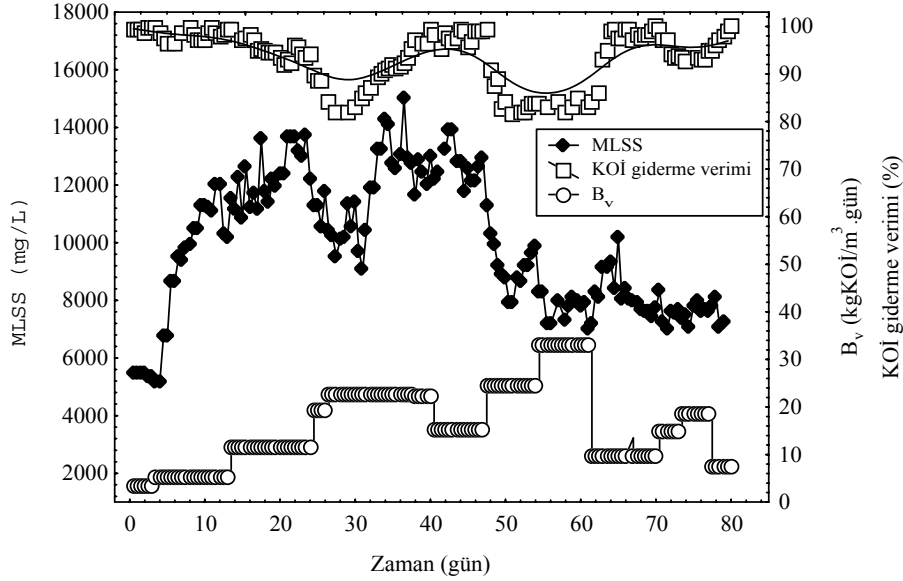
130 cm uzunluğundaki jet loop biyoreaktör (14 cm iç çapında) ve 100 cm uzunluğundaki emme tüpü (kenar uzunluğu 5.2 cm olan kare en kesite sahip) akrilik şeffaf malzemeden yapılmıştır. Reaktörün dışında bir adet ara sirkülasyon tankı bulunmaktadır. Bu tanktan alınan su reaktörün en üstündeki girişe gönderilmektedir. Burada hava ile birlikte bir jet nozzle denilen yapıdan reaktör içerisine püskürtülmektedir. Toplam sirkülasyon debisi bir debi ölçer ile kontrol edilmiştir. Reaktördeki oksijen konsantrasyonu, reaktörün üst tarafındaki çıkışa yerleştirilmiş ORION 850 model bir oksijen metre bağlantılı bir oksijen probu yardımıyla bilgisayar bağlantılı olarak ölçülmüştür. Biyolojik faaliyet sonucu oluşan aktif çamurun sudan ayrılması OSMONICS marka 155 cm² yüzey alanına sahip düz zeminli bir membran ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çelik kafalı bir sirkülasyon pompası ile gerekli çapraz akışı hızı ve membran basıncı sağlanmıştır. Membran filtrasyonu 0.45 µm por çapına sahip asimetrik selüloz asetat membranlar (Schleicher & Schuell) ile gerçekleştirilmiştir. Çamur yaşı sistemden atılan çamur debisi ayarlanmıştır. Çalışmalarda atıksu olarak bir peynir üretim fabrikasından atılan peyniraltı suları kullanılmıştır. Bu tesisten iki günde bir alınan atıksu 1/2–1/10 arasında değişen oranlarda (7000–35000 mgKOİ/l) seyreltilerek doğrudan reaktöre beslenmiştir. KOİ

analizleri kolorimetrik olarak 600 nm’de SPEKOL JENA1100 (Carl Zeiss Technology) marka spektrofotometre ile yapılmıştır. AKM değerleri standart metotlarda belirtildiği gibi gerçekleştirilmiştir (AWWA 1985). Reaktörden alınan çamurun katı madde kısmının 600°C sıcaklıkta yakılması sonucunda aktif çamurun MLVSS miktarının AKM’nin %85’i olduğu tespit edilmiştir.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

JLMB Sisteminin KOİ Arıtma Performansı

Yaklaşık 10 gün boyunca kesikli olarak çalıştırılan JLMB’de çamur çoğaltılırken bir yandan da reaktörün yüksek türbülans şartlarına aktif çamurun alıştırılması sağlanmıştır. Biyoreaktördeki AKM konsantrasyonu 5800 mg/l değerine ulaşınca sürekli arıtıma başlanmıştır. Şekil 2’de KOİ giderme verimlerinin ve AKM konsantrasyonlarının organik yüklemeye ile değişimi gösterilmektedir. Çalışmalar sırasında peyniraltı suyu 0.83–2.78 gün hidrolik kalış süresi olacak şekilde reaktöre beslenmiştir. KOİ cinsinden organik yüklemeye 3.04 ile 33.15 kg/m³.gün arasında değiştirilmiştir. Sistem değişik şartlarda yaklaşık 85 gün çalıştırılarak performansı incelenmiştir. Her yüklemeye sistem kararlı hale gelinceye kadar devam edilmiş ve daha sonra yüklemeye değeri



Şekil 2. JLMB sisteminin arıtma performansı

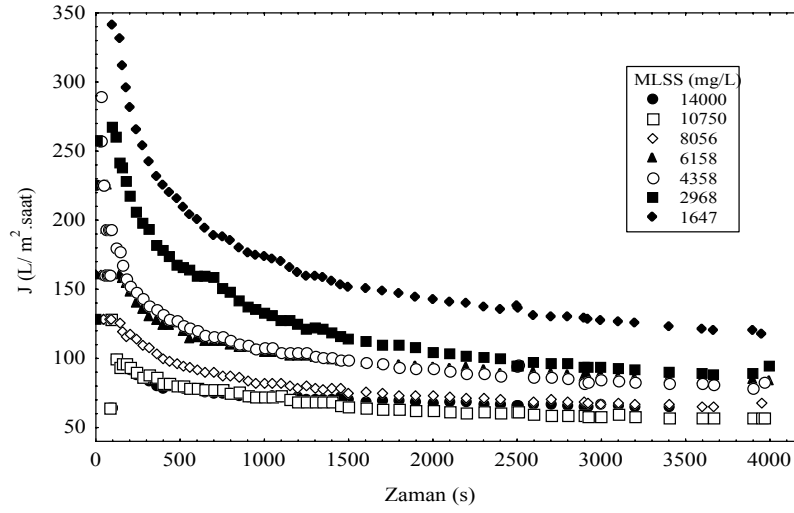
değiştirilmiştir. Sistemde oldukça yüksek yüklemelere rağmen %85'in üstünde arıtma verimleri elde edilebilmiştir.

Meydana gelen yüksek sirkülasyondan dolayı jet loop biyoreaktörde flok yapıları parçalanmakta ve sistem içerisinde dağılmaktadır. Bununla beraber sistemin yüksek oksijen transfer kapasitesi nedeniyle çok yüksek AKM konsantrasyonları temin edilerek, yüksek organik yüklerin etkili bir şekilde arıtımı gerçekleştirilmektedir. Jet loop biyoreaktörlerde flok boyutunun küçülmesi etkin yüzey alanının artmasına neden olacağından kütle transferini de artırmaktadır. Bir anlamda elde edilen küçük boyutlu floklar jet loop reaktörlerin yüksek yüklerde etkili bir arıtım gerçekleştirmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Jet loop biyoreaktörlerin geliştirilmesinin ana amaçlarından bir tanesi de genellikle anaerobik arıtımın uygulanabildiği çok yüksek yüklerde aerobik arıtımın gerçekleştirilmesidir.

Aktif Çamurun Membran Filtrasyonu Özelliklerinin İncelenmesi

Biyolojik arıtma ünitelerinde çözünmüş formdaki biyolojik olarak parçalanabilen organik maddelerin giderilmesinden sonra istenilen çıkış suyu kalitesini sağlamak için meydana getirilen biyokütlenin sudan ayrılması gerekmektedir. Bu katı-sıvı ayırımında son çöktürme havuzları yaygın

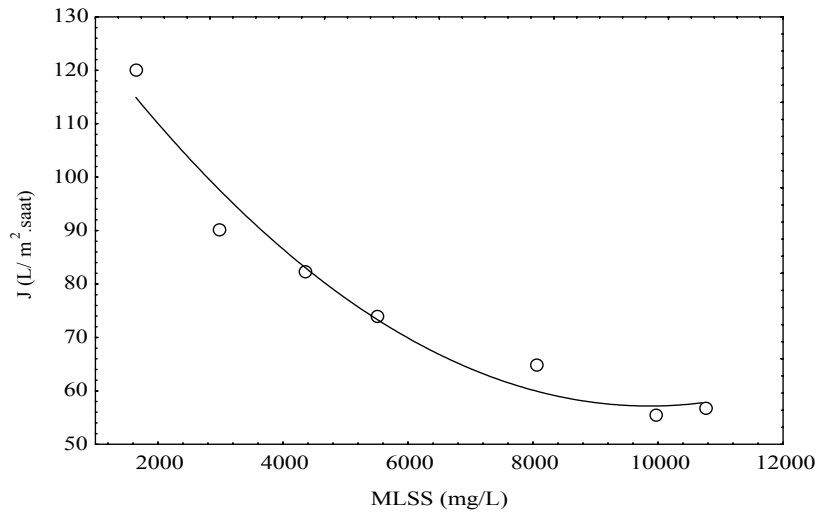
olarak kullanılan ayırma üniteleridir. Çoğunlukla da çöktürme işlemi çıkış suyu kalitesinde sınırlayıcı faktördür. Bir başka ifadeyle katı sıvı ayırımı, prosesin genel veriminin anlaşılmasında son derece önemli bir konumdadır. Çalışma sırasında jet-loop biyoreaktörde oluşturulan biyokütlenin çıkış suyundan ayrılmasında kullanılan MF ünitesinin filtrasyon karakteristikleri belirlenmiştir. Kullanılan membran ünitesi ile 4.49–35.21 l/m².saat arasında akı değerlerinde arıtılmış su elde edilmiştir. Bu sayede biyoreaktör AKM konsantrasyonunun artışı sağlanabilmiş ve mikroorganizmaların sistemde kalış sürelerinin ayarlanması yapılmıştır. Denemeler boyunca reaktör içerisindeki AKM konsantrasyonu 5800–13930 mg/l arasında değişmiştir. Bu değerler klasik aktif çamur sistemlerinden oldukça yüksektir. Biyolojik atık su arıtımında reaksiyon hızı direk olarak biyokütle (AKM) konsantrasyonu ile orantılı olduğu için yüksek bir biyokütle konsantrasyonu reaktör hacminde ve dolayısıyla yatırım maliyetlerinde azalmaya neden olmaktadır. Klasik çöktürme yüksek bir biyokütle konsantrasyonuna müsaade etmeyeceğinden dolayı bu çalışmada membran sisteminin katkısıyla oldukça yüksek AKM konsantrasyonlarına çıkılabilmiştir. Bu aşamada akıların zamanla azalmasına AKM konsantrasyonunun etkisi çalışılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Akı-zaman grafiği ($\Delta P=196$ kPa, $V_{\dot{c}}= 5.2$ m/s)

Çalışma sırasında membran süzöntü debisi, kaydedicisi olan bir terazi sistemine alınarak zamana karşı ağırlıklar tespit edilmiş ve değerler bilgisayara aktarılmıştır. Ölçülen süzöntü ağırlığından ise V_f değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra V_f-t/V_f grafikleri çizilerek eğimlerden spesifik kek dirençleri hesaplanmıştır. Şekil 4’de akıların AKM konsantrasyonu ile değişimi verilmektedir. Membran akılarının biyoreaktör AKM konsantrasyonu arttıkça azalmakta olduğu görülmektedir. 1650 mg/l AKM konsantrasyonunda membran ünitesinden elde edilen limit akı 120 $l/m^2.saat$ iken, konsantrasyon 8000 mg/l ’ye çıkarıldığında 65 $l/m^2.saat$ ve 11000 mg/l AKM konsantrasyonunda ise 57 $l/m^2.saat$ limit akı (J) elde edilmiştir. Çalışma esnasında jet loop membran biyoreaktörde yüksek konsantrasyona ve oldukça küçük flok boyutuna sahip bir çamur meydana getirilmiştir. Çökeltme

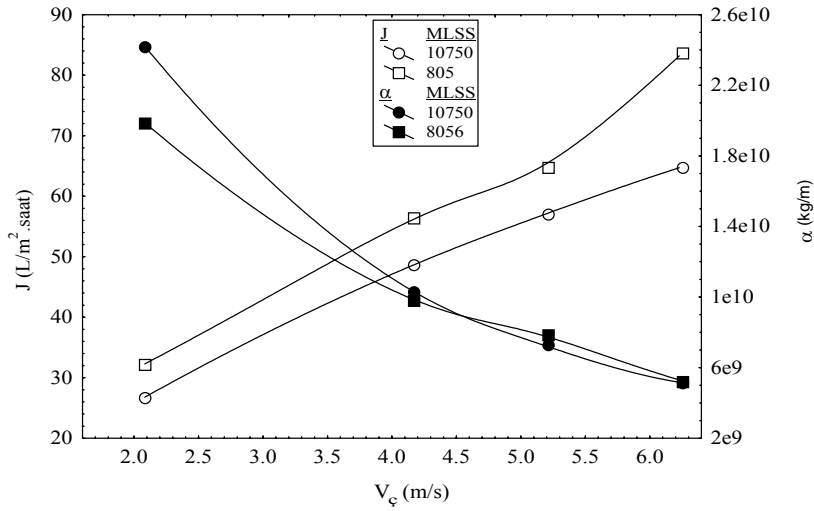
kabiliyeti son derece zayıf olan bu çamur süspanse ve dağılık haldeki floklardan oluşmaktadır. Bu dağılık ve küçük boyutlu flok oluşumuna jet loop biyoreaktördeki yüksek türbülanslı akımın ve büyük kesme kuvvetlerin yanı sıra çapraz akış membran modülünün ürettiği türbülans da katkıda bulunmaktadır. Buna ilaveten peyniraltı suyunun spesifik bileşimi de da flok özelliklerinin oluşumunda etkili olmaktadır. Peyniraltı sularının biyolojik arıtımı sırasında granüleştirmenin sağlanmasında güçlüklerle karşılaşmaktadır. Çünkü muhtemelen bakteriyel orijinli aşırı derecede viskoz ekzopolimerik materyalleri üretme eğilimine sahip bir aktif çamur meydana getirilmiştir (Malaspina ve diğ. 1996). Bunun yanı sıra oluşan bu küçük flokları ve süspanse aktif çamur membran filtrasyonu sırasında düşük akı elde edilmesine yol açmaktadır.



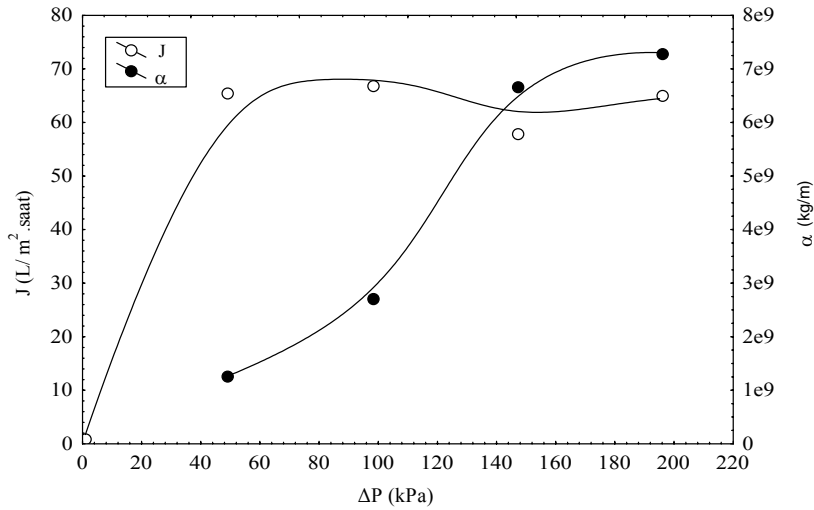
Şekil 4. AKM konsantrasyonu ile limit akıların değişimi ($\Delta P=196$ kPa, $V_{\dot{c}}=5.2$ m/s)

Şekil 5’de çapraz akış hızı ile limit akıların ve kek dirençlerinin değişimi verilmektedir. Membran modülünde çapraz akış hızı (V_c) ve trans-membran basıncı (ΔP) membran hattı üzerine yerleştirilen vanalar yardımıyla birbirinden bağımsız olarak ayarlanmıştır. V_c arttıkça limit akıların da arttığı görülmektedir. Çapraz akış hızındaki artış ile kesme kuvveti de arttığından membran yüzeyine biriken kek tabakası daha büyük bir kuvvetle süpürülmektedir. Bu nedenle kek tabakasının çok daha fazla kalınlaşması engellenmektedir. Sonuç olarak çapraz akış hızının artması ile membrandan geçen akı da artmaktadır. Ayrıca şekil 5’de çapraz akış hızının artması ile kek dirençlerinin azaldığı görülmektedir. Artan V_c membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının kalınlığını azaltmakta bu da spesifik kek dirençlerini düşürmektedir.

Şekil 6’da ΔP ile limit akıların ve kek dirençlerinin değişimi gösterilmektedir. ΔP artışıyla spesifik kek dirençlerinin arttığı ve buna bağlı olarak limit akıların ise azaldığı görülmektedir. Artan ΔP membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının daha fazla sıkışmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak da yoğun bir kek tabakası oluşmaktadır. Kekin sıkışması ve daha yoğun bir özellik kazanması sonucunda geçirimsizliği azalmakta ve dolayısıyla akışa direnci artmaktadır. Sonuç olarak da artan direnç membrandan süzülen akıların azalmasına yol açmaktadır. Yapılan çalışmalarda aktif çamurun membran filtrasyonu özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara benzer şekilde literatürdeki çalışmalarda da aktif çamurun sıkışabilirliği oldukça yüksek bir kek tabakası oluşturduğu tespit edilmiştir (Sorensen ve Sorensen 1997).



Şekil 5. V_c ile limit akıların ve kek dirençlerinin değişimi ($\Delta P=196$ kPa)



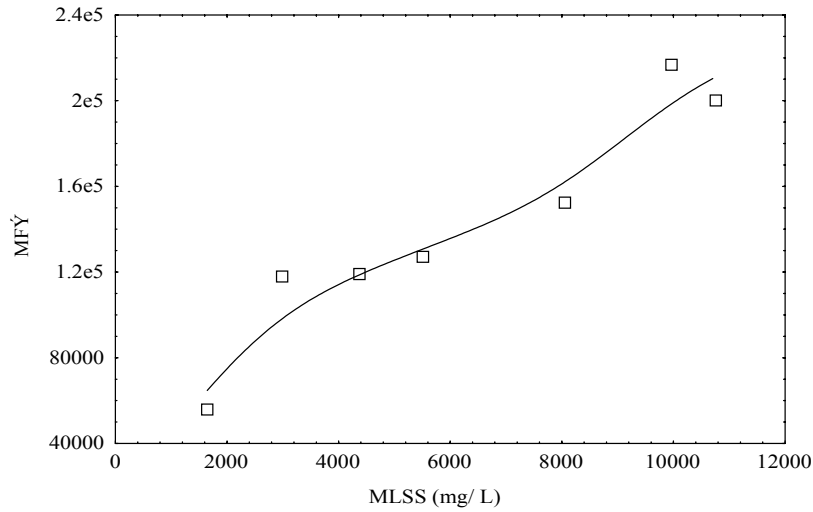
Şekil 6. ΔP ile limit akıların ve dirençlerin değişimi (AKM=10750 mg/l, $V_c=5.2$ m/s)

Peyniraltı Sularının Arıtıldığı Jet Loop Membran Biyoreaktörün Membran Filtrasyonu

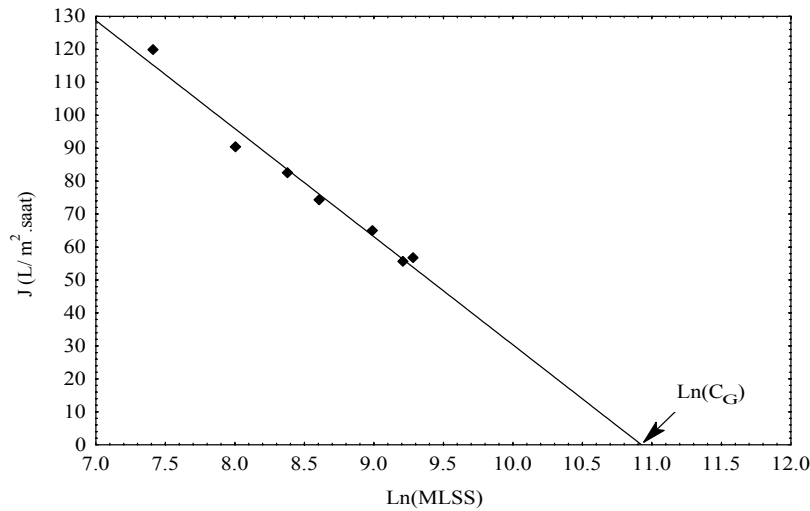
Şekil 7’de AKM konsantrasyonu ile MFİ’nin değişimi gösterilmektedir. Süspansiyon halinde çok küçük flok yapısına sahip olan aktif çamur, peyniraltı suyunun özel yapısından kaynaklanan yapışkan bir özellik kazanmıştır. Bu yapışkan özellikteki çamur membran filtrasyonu esnasında membranın yüzeyine hemen yapışarak akıların azalmasına neden olmaktadır ve MFİ değerlerini artırmaktadır. AKM konsantrasyonu arttıkça MFİ değerlerinin de artmakta olduğu görülmüştür.

Şekil 8’de $\ln(\text{AKM})$ ile limit akı değerleri arasında çizilen grafik gösterilmektedir. Buradan K_m değeri 33 olarak tespit edilirken C_G ise 54 g/l

olarak bulunmuştur. Membran üzerindeki yalancı jel tabakasının konsantrasyonunu ifade eden C_G oldukça yüksek bulunmuştur. Membran yüzeyinde yüksek C_G elde edilmesine jet loop biyoreaktördeki yüksek AKM konsantrasyonunun, yüksek F/M oranlarının ve biyoreaktördeki çok değişik mikroorganizma türlerinin neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca peyniraltı sularının yapısından kaynaklanan yapışkan özellikteki çamurun yüksek yalancı jel konsantrasyonunun elde edilmesine katkıda bulunduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 7. AKM ile MFİ değişimi



Şekil 8. Ln(AKM)- limit akı grafiği

KAYNAKLAR

- AWWA, APHA, WPCF (1985). Standart methods for water and wastewater examination. 16. Baskı, New York.
- Bloor, C.J., Anderson, G., Willey, A.R. (1995). High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor. *Wat Res.*, **29**(5), 1217-1223.
- Ergüder, T. H., Tezel, U., Güven, E., Demirer, G.N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, **21**, 643–650.
- Fane, A. and Chang, S. (2002). Membrane bioreactors: design & operational options. *Filtration & Separation*, June, 27–28.
- Farizoglu, B., Keskinler, B., Yildiz, E., Nuhoglu, A. (2004). Cheese whey treatment performance of an aerobic jet loop membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, **39**, 2283–2291.
- Kalyuzhnyi, S.V., Martinez, E.P. & Martinez, J. R. (1997). Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors. *Bioresearch Technology*, **60**, 59–65.
- Lübbecke, S., Vogelpohl, A., Dewjanin, W. (1995). Wastewater treatment in a biological high performance system with high biomass concentration. *Wat. Res.*, **29**, (3), 793-802.
- Malaspina, F., Cellamare, C.M., Tilche, A. (1996). Anaerobic treatment of cheese-whey with a downflow-upflow hybrid reactor, *Bioresearch Technology*, **55**, 131–139.
- Patel, P. and Madamwar, D. (1998). Surfactants in anaerobic digestion of salty cheese whey using up flow fixed film reactor for improved biomethanation. *Process Biochemistry*, **33**, 199-203.
- Petruccioli, M., Duarte J.C., Eusebio, A., Federici, F. (2002). Aerobic treatment of winery wastewater using a jet loop activated sludge reactor. *Process Biochemistry*, **37**, 8, 821–829.
- Ramasamy, E.V., Abbasi, S.A. (2000). Energy recovery from dairy waste-waters: impacts of biofilm support systems on anaerobic CST reactors. *Applied Energy*, **65**, 91–98.
- Siso, G.M.I. (1996). The biotechnological utilization of cheese whey: a review. *Bioresearch Technology*, **57**, 1-11.
- Sorensen, B.L. and Sorensen, P.B. (1997). Applying cake filtration theory on membrane filtration data. *Wat. Res.*, **31**(3), 665-670.
- Vogelpohl, A. (2000). Wastewater treatment by the HCR-Process. *Acta Biotechnol*, **20**, 2, 119–128.