

## Süt Endüstrisi Atıksularının Anaerobik Prosesler ile Arıtımı

<sup>1</sup>Esra ÇELİK\*  
celikesra.784@gmail.com

<sup>1</sup>Aslıcan İHTİYAROĞLU  
ihtiyarogluasli@gmail.com

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Özet

Günümüzde sanayileşmenin gelişmesi ve hızlı nüfus artışıyla birlikte doğal kaynaklar hızla tükenmekte olup üretilen atıkların çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri gözler önündedir. Sürekli büyüyen gıda sektöründeki süt endüstrisi de birim üretim başına atıksu miktarı en yüksek olan sektörlerin başında yer almaktadır. Süt endüstrisinde oluşan atıksular peynir, tereyağı, dondurma, yoğurt ve kuru süt tozu gibi diğer yan ürünlerden kaynaklanmakta olup bunun yanında ısıtma ve soğutma sistemlerinden gelen temiz sular, tesis ve makinaların yıkanmasından gelen atıksuları da içermektedir. İçerdiği yüksek miktardaki kirlilik seviyesi sebebiyle atıksu tekrar kullanılamamakta olup uygun şekilde arıtılmadığında çevre için tehdit oluşturmaktadır. Süt endüstrisinin dünya çapındaki geniş dağılımı ve oluşan atıksuyun karakterizasyonu sebebiyle bu alanda birçok çalışma yapılmış olup farklı arıtma teknolojileri uygulanmaktadır. Atıksu arıtımı genel olarak fizikokimyasal ve biyolojik prosesler olmak üzere birbirinden farklı birçok arıtma teknolojisini içermektedir. Anaerobik arıtma aerobik arıtmaya kıyasla daha az enerji ve maliyet ihtiyacı ile düşük miktarda çamur oluşumu gibi avantajlarının yanında metan gazı üretimiyle de enerji geri kazanımı sağlamaktadır. Süt endüstrisi atıksuyu arıtımında, içerdikleri yüksek organik madde ve diğer kirleticilerle birlikte anaerobik arıtma teknolojileri başarıyla uygulanmaktadır. Süt endüstrisi atıksularının arıtımında karşılaşılan sınırlayıcı bir faktör olarak uzun zincirli yağ asitlerinin metanojenik aktiviteyi engellemesidir. Anaerobik proseslerin başarılı bir şekilde işletilebilmesi için optimum işletme parametrelerinin sağlanması gerekmektedir. Süt endüstrisi atıksularında farklı işletme koşullarında birçok anaerobik biyoreaktörler uygulanmaktadır. Yapılan çalışmalarda farklı koşullarda (reaktör tipi, sıcaklık, pH, hidrolik bekletme süresi, organik yük) işletmeye alınan reaktörler incelenmiş olup süt endüstrisi atıksuyunun giderim verimleri ortaya konmuştur. Bu değerlendirme makalesinde kirlilik düzeyi yüksek olan süt endüstrisi atıksularında uygulanan anaerobik prosesler incelenmiş olup arıtma performansı, operasyonel yaklaşımlar, organik madde giderimi ve metan üretim verimi gibi hususlar hakkında bilgilere yer verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Anaerobik arıtım, anaerobik prosesler, süt endüstrisi atıksuyu

## Treatment of Dairy Industry Wastewater by Anaerobic Processes

<sup>1</sup>Esra ÇELİK\*  
celikesra.784@gmail.com

<sup>1</sup>Aslıcan İHTİYAROĞLU  
ihtiyarogluasli@gmail.com

<sup>1</sup>Yildiz Technical University, Civil Faculty, Environmental Engineering Department, İstanbul, Türkiye

### Abstract

Recently, with the development of industrialization and rapid population growth, natural resources are rapidly depleting and the negative effects of the wastes produced on the environment and human health are in sight. The dairy industry in the constantly growing food sector is also one of the sectors with the highest amount of wastewater per unit production. It originates from other by-products such as cheese, butter, ice cream, yoghurt and dry milk powder, as well as clean water from heating and cooling systems, and wastewater from washing plants and machinery.

Wastewater is not reused due to the amount of pollution in the high concentrate it contains, and it poses a threat to the environment if not treated properly. Poses a threat to due to the worldwide distribution of the dairy industry and the characterization of the wastewater generated, many studies have been carried out in this area and different technologies are applied. Many different treatment technologies are applied in the wastewater treatment, generally physicochemical and biological processes. Anaerobic treatment provides energy recovery with methane gas production, besides its advantages such as less energy and cost requirement and low amount of sludge formation compared to the aerobic treatment. Anaerobic treatment technologies with high organic matter and other pollutants are successfully applied in dairy industry wastewater treatment. Long chain fatty acids, which are limiting factors encountered in the treatment of dairy industry wastewater, prevent methanogenic activity. Optimum operating parameters must be provided for the successful operation of anaerobic processes. In the dairy industry wastewater, many anaerobic bioreactors are applied in different operating conditions. In the studies, the reactors that were put into operation under different conditions (reactor type, temperature, pH, hydraulic retention time, organic loading rate) were examined and the efficiency on the dairy industry wastewater was revealed. In this evaluation article, anaerobic processes applied in dairy industry wastewaters with high pollution levels are examined and information about issues such as treatment performance, operational approaches, organic matter removal and methane production efficiency are given.

**Keywords:** Anaerobic processes, anaerobic treatment, dairy industry wastewater

### 1. Giriş

Son yüzyılda dünya nüfusunun ve endüstrileşmenin her geçen gün hızla artmasıyla doğal kaynaklar tükenirken çevreye bilinçsizce bırakılan atıklar çevre ve insan sağlığı açısından büyük tehdit oluşturmaktadır. Mevcut su kaynaklarının azalması ile sürdürülebilirlik kapsamında atıksuların yeniden kullanılabilir bir kaynak olarak geri kazanılması üzerine yapılan çalışmalar, son yıllarda giderek artmaktadır. Üretim sektörlerinin başında gelen gıda sektöründe, birim üretim başına kullanılan su miktarı ve atıksu oluşumunun süt endüstrisinde oldukça fazla olduğu bilinmektedir. Süt endüstrisi atıksuları, uygun teknolojiler ile arıtılmadığı takdirde çevre ve insan sağlığı açısından yüksek potansiyelde tehlike oluşturan ciddi miktarlarda atıksuyun alıcı ortamlara verilmesine neden olur. Dolayısıyla ekosistem kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Bilir-Ormancı, 2009). Bu senaryo dikkate alındığında, son yıllarda süt üretiminin çevresel etkilerini bir yaşam döngüsü yaklaşımı içinde değerlendirmek ve analiz etmek için birçok çalışma yapılmıştır (Elginöz vd., 2020; Kumar vd., 2021). Süt endüstrisinde, su tüketimi başta olmak üzere enerji gibi doğal kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Üretim süreci boyunca sistemin girdi ve çıktıları, çevresel etkilerini ortaya koyan karbon ayak

izini oluşturmaktadır. Yaşam döngüsü analizi ile (YDA) ham maddeden nihai ürüne kadar prosese giren ve çıkan tüm kaynakların çevreye etkisi incelenmektedir. YDA ile kaynak zinciri belirlenmekte olup, çevresel sürdürülebilirlik hedeflenmektedir (Sala vd., 2017).

Süt endüstrisinde yaygın olarak süt, peynir, yoğurt, tereyağı, dondurma, süt tozu gibi ürünler, çeşitli üretim prosesleri kullanılarak üretilmektedir. Süt ve süt ürünlerinin işlenmesi sürecinde, ısıtma ve soğutma sistemlerinden, tesis ve makinelerin yıkanmasından, kalite laboratuvar analizlerinden, peyniraltı sularından, üretim proseslerinin yan ürünlerinden atıksular oluşmaktadır (Stasinakis vd., 2022). Süt endüstrisinde, işlenmiş sütün litresi başına yaklaşık olarak 2 – 6 kat arasında büyük miktarlarda atıksu oluşumu meydana gelmektedir (Karadag vd., 2014).

Süt endüstrisinin, birim üretim başına atıksu üretiminin fazla olması sebebiyle arıtımı büyük önem arz etmektedir. Atıksuyun türüne, miktarına ve oluşum yerine göre arıtım prosesleri değişiklik göstermektedir (Karadag vd., 2015; Rahul vd., 2022). Bununla birlikte, arıtılmış atıksuyun geri kazanım yoluyla alternatif su, besin ve enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi için uygun teknolojiler uygulanmalıdır.

Diğer taraftan enerji verimli atıksu arıtma teknolojilerine olan ilginin ve ihtiyacın giderek daha fazla önem kazanması, mevcut kullanılmakta olan konvansiyonel arıtma sistemlerinin yerine alternatif ve ileri düzey arıtma proseslerinin uygulanmasını ön plana çıkarmıştır.

Süt endüstrisi atıksularının arıtımında yaygın olarak uygulanan aerobik arıtma sistemleri, havalandırma dayalı yüksek enerji ihtiyacı ve büyük miktarlarda çamur oluşumu gibi kullanımını sınırlandıran dezavantajlara sahiptir (Prazeres vd., 2012). Enerji tüketimi ve olumsuz çevresel etkileri azaltmasının yanında biyoenerji kazanımı da sağlayan sürdürülebilir teknolojilerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Anaerobik arıtma prosesleri, havalandırma ihtiyacının olmayışı sebebiyle düşük enerji tüketimi, düşük çamur oluşumu ve biyoenerji kazanımı ile konvansiyonel aerobik arıtma proseslerine üstünlük sağlamaktadırlar (Liao vd., 2006; Lei vd., 2018; Shoener vd., 2016). Sürdürülebilir bir yöntem olarak kabul gören anaerobik arıtma prosesleri bu önemli avantajları sebebiyle süt endüstrisi atıksularının arıtımında da araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Süt endüstrisi atıksuları 80 g/L'ye ulaşan KOİ konsantrasyonları ile zengin organik madde içeriğine sahip olup, yüksek biyobozunurluğu sebebiyle anaerobik arıtma teknolojileri ile başarılı bir şekilde arıtılabilmektedir (Karadag vd., 2015). Süt endüstrisi atıksularının sahip olduğu yüksek sıcaklık (35 – 40°C) anaerobik arıtma proseslerinin avantajlarından biri olan ekonomik değeri yüksek metan gazı oluşum potansiyeline katkı sağlamaktadır (Erguder vd., 2001).

Anaerobik arıtma prosesleri, asidojenik ve metanojenik mikroorganizmaların uygun koşullar altında aktivitesi sonucu gerçekleşmektedir. Anaerobik proseslerin performansını pH, sıcaklık, organik yükleme hızı (OLR), reaktör konfigürasyonu gibi çeşitli parametreler etkilemektedir (Amini vd., 2013). Tavsiye edilen pH aralığı 6 – 7,5 olup metan üretim miktarı bu aralık için optimumdur (Sivakumar vd., 2012). Süt endüstrisi atıksuları laktoz, protein ve yağlar gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır (Demirel vd., 2005). Süt endüstrisi atıksularının arıtımında karşılaşılan

sınırlayıcı bir faktör olan uzun zincirli yağ asitlerinin birikimi ile birlikte anaerobik reaktörlerde ani pH düşüşleri olabilmektedir. Bu durum, metanojenik aktivite için sınırlayıcı olup, ani pH düşüşünü tamponlamak için alkalinitenin artırılması gerekmektedir. Dolayısıyla, anaerobik proseslerin başarılı bir şekilde işletilebilmesi için optimum işletme parametrelerinin sağlanması gerekir.

Anaerobik arıtma proseslerinin teknolojik yönü yapılan çalışmalar üzerinden rapor edilmiştir. Bu çalışmalardan birisi Ji vd. (2020) tarafından süt ürünleri için entegre bir biyolojik atıksu arıtma sistemi olarak geliştirilmiştir. Sistem, anaerobik perdeli reaktör (ABR), yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktör (UASB) ve oksidasyon havuzu olarak tasarlanmış olup, Çin'de iki farklı süt işletme tesisinde üç yıldan fazla süre ile kullanılmıştır. Entegre sistem ile oksidasyon havuzu için gerekli enerji ihtiyacı düşürülmüştür. Bunun nedeni, UASB aşamasında organik madde miktarının büyük ölçüde giderilmesinden kaynaklanmıştır. Elde edilen KOİ giderimi %98'den yüksek olup, aylık toplam güç tüketimi 1980 kWh olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte aynı sistem, UASB aşaması olmadığında ayda 31000 kWh güç tüketmiştir. Entegre sistemde çamur üretimi ciddi miktarda azalırken, biyogaz verimi büyük ölçüde artmıştır. Sistem ile gerekli enerji etkili bir şekilde düşürülmüş ve yüksek maliyetlerin önüne geçilmiştir. Ek olarak, UASB'nin sisteme entegre edilmesiyle çamur arıtımı için gerekli maliyet de azalmış ve işletme tasarrufu sağlanmıştır. Sonuç olarak anaerobik arıtma proseslerinin kanıtlanmış birçok avantajı dikkate alındığında, yapılan çalışmalar yeni araştırmalara zemin hazırlamaktadır.

Bu çalışmada; süt endüstrisi atıksularının arıtımında uygulanan anaerobik proseslerin performansı, operasyonel yaklaşımları, organik madde giderimi ve metan üretim miktarı gibi hususlar eleştirel bir şekilde incelenmiştir.

## 2. Süt Endüstrisi Atıksuyu Karakterizasyonu

Süt endüstrisi atıksuları, toksik olmakla birlikte yüksek oranda organik madde içeren

mevsimsel değişikliklere bağlı olarak miktarı değişen kuvvetli karakterde bir özelliğe sahiptir (Demirel vd., 2005).

Süt endüstrisi süt, tereyağı, yoğurt, dondurma, peynir gibi farklı ürünler ürettiğinden, tesis kapasitesi, proses süreçleri ve işletme

yöntemlerine bağlı olarak atıksu oluşum miktarı ve özellikleri değişkenlik göstermektedir (Karadağ vd., 2015; Vidal vd., 2000). Süt endüstrisi atıksularının genel özellikleri için literatürden elde edilen verilerin bir özeti Çizelge 2.1’de yer almaktadır.

**Çizelge 2.1** Süt endüstrisi atıksuyu karakterizasyonu (Karadağ vd., 2015)

Atıksu kaynağı	pH	BOİ (g/L)	KOİ (g/L)	Uçucu Katı(g/L)	Toplam Katı(g/L)	Azot (mg/L)	Fosfor (mg/L)	Yağ ve gres (g/L)
Süt atıksuyu	4-7	3-5	5-10	TE	3-7	20-150 (TKN)	50-70	TE
Süt süzüntü atıksuyu	5,55-6,52	TE	55,20-63,48	TE	2,67-3,80(TAKM)	300-400 (TN)	350-450	TE
Dondurma atıksuyu	6,96	TE	4,94	0,99	1,1(TAKM)	TE	TE	TE
Dondurma atıksuyu	5,2	2,45	5,2	2,6	3,9	60 (TKN)	14	TE
Peyniraltı atıksuyu	4,46	40	60	1,5	59	TE	TE	TE
Peyniraltı atıksuyu	4,9	7,71	68,6	TE	1,35	1120 (TKN)	500	9,44
Süt ürünleri atıksuyu	7,12	TE	4,59	2,1	4,35	89 (TKN)	9,9	TE
Süt ürünleri atıksuyu	8-11	1,2-4	2-6	0,33-0,94	0,35-1(TAKM)	50-60 (TKN)	20-50	0,3-0,5
Süt ürünleri atıksuyu	7,1	2,8	5	1,35	3,88	16,5 (TKN)	38,6	TE

TE: Tespit edilemedi, TAKM: Toplam askıda katı madde, TKN: Toplam Kjeldahl Azotu, TN: Toplam Azot

### 3. Süt Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Uygulanan Anaerobik Prosesler

Literatür araştırması kapsamında, süt endüstrisi atıksularının arıtımında anaerobik proseslerin uygulandığı bazı çalışmaların arıtma performansları ile birlikte genel tasarım ve işletme parametrelerine ait değerler Çizelge 3.1’de listelenmiştir. Süt endüstrisi

atıksuyu arıtımına yönelik yapılan çalışmalar dikkate alındığında avantajlarından dolayı anaerobik proseslerin kullanımının oldukça yaygın olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda farklı koşullarda (reaktör tipi, sıcaklık, pH, hidrolik bekletme süresi (HBS), OLR) işletmeye alınan proseslerin arıtma verimleri incelenmiş olup bu alanda yapılan çalışmalar sonraki çalışmalara temel oluşturmuştur.

**Çizelge 3.1** Süt endüstrisi atıksularının arıtımında kullanılan bazı anaerobik uygulamalar

Reaktör Konfigürasyonu	Sıcaklık (°C)	pH	HBS (saat)	OLR (kg/m <sup>3</sup> .gün)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Kaynak
UASB	28 – 32	-	3 – 12	2,4 – 13,5	1440	80-96	Ramasamy vd., 2004
UASFF	-	5,1	-	0,28-2,33	8500-14500	70,6-93,60	Sivaprakasam vd., 2021
HABR+MSABP	33	7,35	24	-	2000	99,89	Chang vd., 2020
ABR+UASB	12 – 35	6-9	20 – 48	-	1574	92,7	Ji vd., 2020
ASBR	50	5,1 – 8	5 – 40	1,6-12,8	-	68-95	Göblös vd., 2008
UASB, EGSB, EGSB-AF	15 – 37	7,3-7,6	48 – 8	7,5-9,0	2500	64,2- 82,9	McAteer vd., 2020
EGSB, IFB	37	8	72 – 12	-	4000	75 – 95	Bialek vd., 2011

UASB: Yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktör, UASFF: Yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı film reaktör, HABR: Hibrit anaerobik perdeli reaktör, MSABP: Yüksek kademeli aktif biyolojik proses, ABR: Anaerobik perdeli reaktör, ASBR: Ardışık kesikli anaerobik reaktör, EGSB: Genişletilmiş granüler çamur yataklı reaktör, EGSB-AF: Genişletilmiş granüler çamur yataklı reaktör-Anaerobik filtre, IFB: Ters akışkan yataklı reaktör

Ramasamy vd. (2004), süt endüstrisi atıksularının arıtılması için iki farklı granül çamurun ve değişen KOİ besleme oranlarının UASB reaktörlerinin performansı üzerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada her iki granüler çamurda 3 saatlik HBS için %95–96 KOİ giderim verimi elde edilmiş iken bu değer 12 saatlik HBS’de %90-92 oranlarında kaydedilmiştir. Her iki reaktörde de en iyi KOİ giderim verimi 3 saatlik HBS’de ve 10,8 kg/m<sup>3</sup>.gün OLR için gerçekleşmiştir. 10,8 kg/m<sup>3</sup>.gün üzerindeki organik yüklerde reaktörlerin performansı %80-83 seviyelerine düşmüştür. Reaktörlerde kullanılan granüler çamurların performansında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ji vd. (2020), süt endüstrisi atıksularının arıtımı için farklı mevsim sıcaklıkları altında üç yıldan fazla bir süre boyunca tam ölçekli entegre ABR ve UASB reaktörlerini izlemişlerdir. ABR, UASB’den önce yer almakta olup, UASB aşaması için uygun bir çamur yatağı oluşturmuştur. Böylece UASB’lerde karşılaşılan granüler çamur yapısının bozularak reaktör performansının düşüşü engellenmiştir. Bu sistem ile KOİ konsantrasyonunda ciddi bir düşüş gözlenmiş, giderim verimi %96 seviyelerine ulaşmıştır. Bununla birlikte üretilen yüksek biyogaz miktarı ve düşük enerji tüketimi sistemin önemli çıktıları olarak tespit edilmiştir. Bir diğer çalışmada süt endüstrisi atıksuyunun arıtılabilirliğini araştırmak amacıyla genişletilmiş granüler çamur yataklı (EGSB) ve ters akışkan yataklı reaktörler (IFB)

kullanılmıştır (Bialek vd., 2011). Reaktörler 200 gün boyunca 37°C’de HBS kademeli olarak 72 saatten 12 saate düşürülerek işletilmiştir. EGSB’de 72-12 saat HBS arasında KOİ giderim veriminde belirgin bir fark gözlenmemiş, en kısa HBS’de bile benzer bir arıtma verimliliği seviyesi korunmuştur. IFB’de yüksek uçucu yağ asiti (UYA) konsantrasyonu sebebiyle düşük KOİ giderimi elde edilmiştir. 60 günden sonra UYA konsantrasyonunun düşmesi ile stabil bir performans (%80 KOİ giderim verimi) elde edilmiştir. 160. günden sonra HBS 12 saate düşürüldüğünde IFB reaktöründe UYA konsantrasyonu artışı ile KOİ giderim veriminde azalma kaydedilmiştir. Göblös vd. (2008), çalışmalarında fermente edilmiş peyniraltı suyu ve işlenmemiş peyniraltı suyu olan iki farklı substrat için anaerobik sıralı kesikli reaktörlerin performansını incelemiştir. 5-40 saat HBS’lerinde işletilen reaktörlerin organik yükleri 1,6-12,8 kg/m<sup>3</sup>.gün arasında değiştirilmiştir. Her iki substrat için de en yüksek KOİ giderim verimi 1,6 kg/m<sup>3</sup>.gün’de gözlenmiştir. OLR 12,8 kg/m<sup>3</sup>.gün’e çıkarıldığında fermente edilmiş peyniraltı suyunun arıtım verimi, işlenmemiş olana kıyasla daha yüksek olmuştur. Aynı OLR’de beslenen fermente edilmiş peyniraltı suyu yaklaşık olarak iki katı CH<sub>4</sub> üretim verimine sahiptir. Başka bir çalışmada süt endüstrisi atıksularının arıtımı için 443 gün boyunca ilk olarak 37°C’de UASB, daha sonra 15°C’ye düşürülen işletme koşullarında UASB, EGSB,

EGSB-AF ve son olarak 37°C'de EGSB reaktörlerinin performansı beş farklı aşamada incelenmiştir. Sonuçlar reaktör konfigürasyonunun arıtma performansı üzerine önemini vurgulamış olup UASB reaktörlerde EGSB'ye kıyasla daha iyi KOİ giderim verimi elde edildiğini göstermiştir. Anaerobik arıtma esnasında düşük sıcaklıklarda biyolojik bozulma sınırlayıcı bir etken olmakla beraber, bu çalışmada 15°C'de sırasıyla %65,3, %64,2 ve %77,3 KOİ giderim verimleri kaydedilmiştir. Sonuçlar düşük sıcaklıklar altında da süt endüstrisi atıksularının arıtımının mümkün olabileceğini göstermiştir. Yapılan bir başka çalışmada süt endüstrisi atıksuyu arıtımında hibrit anaerobik perdeli reaktör (HABR) ile yüksek kademeli aktif biyolojik prosesin (MSABP) birlikte uygulandığı konfigürasyonun verimi araştırılmıştır (Chang vd., 2020). Sıcaklık ve HBS'lerin de arıtma verimindeki etkisi değerlendirilmiş olup çalışmanın sonunda; 33°C sıcaklık, 24 saat HBS, 7,35 pH değerlerinde uygulanan konfigürasyon ile %99,89 KOİ giderim verimine ulaşıldığı ve sistemin başarılı olduğu gözlenmiştir. Yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı film reaktör (UASFF) prosesinin uygulandığı süt endüstrisi atıksuyu çalışmasında ise farklı organik yüklerde KOİ giderim verimi incelenmiştir (Sivaprakasam vd., 2021). Çalışmada 0,28-2,33 kg/m<sup>3</sup>.gün arasında değişen organik yüklerde %70,60-%93 arasında arıtma verimi gözlenmiştir. Omil vd.(2003), süt endüstrisi atıksuyunun arıtımı, anaerobik filtre ve sıralı kesikli biyoreaktör entegre sistemi ile iki sene boyunca incelemiştir. Anaerobik filtre ve sıralı kesikli biyoreaktör sistemiyle arıtılan atıksuyun, organik yüklenme hızı 5-6 kg/m<sup>3</sup>.gün olup, KOİ giderim verimi %90'ın üzerinde elde edilmiştir. Başka bir çalışmada, anaerobik membran biyoreaktör prosesi (AnMBR), süt endüstrisi atıksuyunun arıtımında farklı besleme oranlarının (4 saatte bir 15 dk. ve sürekli) etkisi incelenmiştir. İki AnMBR prosesi, 37°C'de 1 – 5 g/L-gün organik yüklenme hızlarında ve 40 günlük çamur bekleme süresinde çalıştırılmıştır. Biyogaz üretimi ve organik madde giderimi açısından iki farklı besleme rejiminde reaktör performansına bakıldığında fark gözlenmemiştir. Her iki rejimde de %98'lik KOİ giderimi elde edilmiş olup, başarılı bir arıtım gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, biyogaz üretimi sürekli beslemede kesikli besle-

meye kıyasla daha yüksek ölçülmüştür (Lea vd., 2021). Najafpour vd. (2009), peyniraltı suyunun ortam sıcaklığında bir pilot ölçekli yukarı akışlı anaerobik sabit yataklı biyoreaktörde (UFPB) arıtımını incelemiştir. Reaktörde yüksek OLR ve kısa HBS'lerde (6 – 24 saat) etkili KOİ giderme verimi ve yüksek metan üretimi elde edilmiştir. En yüksek KOİ ve laktöz giderimleri 16 saatlik HBS'de gözlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek metan üretimi 16 saatlik HBS'de sağlanmıştır. Patil vd. (2012), peyniraltı suyunun arıtımı için iki aşamalı bir anaerobik filtre (AF)'nin fizibilitesini araştırmıştır. Etkili bir arıtım gerçekleşmiş olup, 9 günlük HBS'de KOİ giderim verimi %94 iken, 12 günlük HBS'de %96'ya yükselmiştir. Başka bir çalışmada süt endüstrisi atıksularının arıtımı 3 aylık bir süre boyunca pilot ölçekli yukarı akışlı anaerobik filtre (UFAF) ile incelenmiştir (Ince, 1998). Reaktörde %85 üzerinde KOİ ve %90 BOİ<sub>5</sub> giderimi sağlanmıştır. Bununla birlikte, reaktörde günlük yaklaşık olarak 770 L CH<sub>4</sub> üretimi olmuştur. Böylece araştırmacılar CH<sub>4</sub> üretiminin anaerobik arıtma için gerekli enerji ihtiyacının yaklaşık olarak en az %40'inin karşılanacağını öne sürmüş, önemini vurgulamıştır. Wang vd. (2009), peynir yapım sürecinde elde edilen atıksuyun, mezofilik sıcaklık koşulu altında anaerobik hareketli biyofilm reaktöründe arıtımını araştırmıştır. KOİ giderme verimi, 2 – 20 g/L-gün organik yüklenme hızlarında %73,2 ve %86,3 arasında gözlenmiştir. Giderilen organik maddenin %88,8 CH<sub>4</sub>'e dönüştürülmüş olup, bununla birlikte kısa HBS'lerde uçucu yağ asitlerinin oluşumu reaktörde birikime sebep olmuş, bu durum ani pH düşüşü ile sonuçlanmıştır. Damasceno vd. (2007), seyreltilmiş peyniraltı suyunun arıtımı için farklı besleme süreleri ve farklı OLR, anaerobik sıralı kesikli biyofilm reaktörünün performansını incelemiştir. Uygulanan organik yükler 2, 4, 8 ve 12 g/L-gün olup, daha yüksek organik madde giderimi 2 ve 4 g/L-gün yüklerinde sağlanmıştır. Çalışmada yüksek OLR'lerde (8 ve 12 g/L-gün), reaktör performansını artırmak için besleme süresinin yükseltilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 3.1'de belirtilen süt endüstrisi atıksularının arıtımına yönelik yapılan çalışmalar dikkate alındığında; anaerobik proseslerin işletilmesini optimize edebilmek için reaktör kon-

figürasyonu, sıcaklık, HBS, OLR gibi çeşitli parametrelerin seçimi oldukça önemlidir. Anaerobik arıtım teknolojisinin kanıtlanmış birçok avantajı dikkate alındığında, anaerobik prosesler süt endüstrisi atıksularının arıtımında uygulanmakta ve etkili bir performans göstermektedir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında değerlendirilen literatür araştırmalarından anaerobik proseslerin kanıtlanmış birçok avantajı olduğu, süt endüstrisi atıksularının arıtımında yaygın bir şekilde uygulandığı ve etkili bir arıtım performansı gösterdiği görülmüştür. Bu proseslerde optimum işletme parametreleri altında, yüksek organik madde giderimi ve yüksek metan üretimi sağlanmaktadır. Bu çalışmada süt endüstrisi atıksularının arıtımında uygulanan çeşitli reaktör konfigürasyonları ve işletme performansları ortaya konmuştur. Bu anlamda anaerobik reaktör performansını büyük ölçüde etkileyen çeşitli işletme parametreleri (pH, sıcaklık, HBS ve OLR) arasındaki farklara yapılan çalışmalar üzerinden dikkat çekilmiştir. Bununla birlikte, düşük sıcaklık (<15°C) koşulları altında yapılan çalışmalarda arıtım veriminin düşük olduğu ve süt endüstrisi atıksularının düşük sıcaklıklarda arıtılmasına ilişkin sınırlı sayıda araştırma olduğundan, bu konuda fizibilite çalışmalarına ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, farklı reaktör konfigürasyonlarının entegre edilmesi ile hibrit biyoreaktör konfigürasyonları genişletilebilir ve böylece anaerobik arıtım teknolojisi geliştirilebilir.

#### Kaynaklar

- Amini M., Younesi H., Lorestani AAZ., Najafpour G.D., Najafpour. G.D. (2013). Determination of optimum conditions for dairy wastewater treatment in UAASB reactor for removal of nutrients, *Bioresource Technology*, 145:71–9.
- Bialek K., Kim J., Lee C., Collins G., Mahony T., O'Flaherty V. (2011). Quantitative and qualitative analyses of methanogenic community development in high-rate anaerobic bioreactors, *Water Research*, 45, 1298–1308.
- Bilir-Ormancı F.S. (2009). Detection of the important pollution parameters in dairy plants Wastewater, *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 56, 137-139
- Chang M., Wang Y., Zhong R., Zhang K., Pan Y., Lyu L., Zhu T. (2020). Performance of HABR + MSABP system for the treatment of dairy wastewater and analyses of microbial community structure and low excess sludge production, *Bioresource Technology*, 311, 123576.
- Damasceno LHS., Rodrigues, A.D., Ratusznei, S.M., Zaiat, M., Foresti, E. (2007). Effects of feeding time and organic loading in an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR) treating diluted whey, *Journal of Environmental Management*, 85:927–35.
- Demirel B., Yenigün O., Onay. T.T. (2005). Süt endüstrisi atıksularının havasız arıtımı, *İtü Dergisi Su Kirlenme Kontrolü*, 15:1-3, 3-16.
- Elginoz N., Atasoy M., Finnveden G., Cetecioglu Z. (2020). Ex-ante life cycle assessment of volatile fatty acid production from dairy wastewater, *Journal of Cleaner Production*, 269, 122267.
- Erguder TH., Tezel U., Guven E., Demirel GN. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors, *Waste Management*, 21:643–50.
- Göblös SZ., Portörö P., Bordas D., Kalman M., Kiss I. (2008). Comparison of the effectivities of two-phase and single-phase anaerobic sequencing batch reactors during dairy wastewater treatment, *Renewable Energy*, 33, 960–965.
- Ince O. (1998). Potential energy production from anaerobic digestion of dairy wastewater, *Journal of Environmental Science Health, Part A*, 33:1219–28.
- Ji S., Ma W., Wei Q., Zhang W., Jiang F., Chen J., (2020). Integrated ABR and UASB system for dairy wastewater treatment: Engineering design and practice, *Science of the Total Environment*, 749, 142267.
- Karadag A., Köroğlu OE., Ozkaya B., Cakmakci M. (2015). A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater, *Process Biochemistry*, 50, 262–271.
- Karadag D., Köroğlu O E., Ozkaya B., Cakmakci M., Heaven S., Banks, C. (2014). A review on fermentative hydrogen production from dairy industry wastewater, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 89(11), 1627-1636.
- Kumar M., Choubey VK., Deepak A., Gedam VV., Raut RD. (2021). Life cycle assessment (LCA) of dairy processing industry: A case study of North India, *Journal of Cleaner Production*, 326, 129331.

- Lei Z., Yang S., Li Y., Wen W., Wang X.C., Chen R. (2018). Application of anaerobic membrane bioreactors to municipal wastewater treatment at ambient temperature : A review of achievements, challenges, and perspectives, *Bioresource Technology*, 267, 756–768.
- Lei Z., Yang S., Li Y., Wen W., Wang X.C., Chen R. (2018). Application of anaerobic membrane bioreactors to municipal wastewater treatment at ambient temperature : A review of achievements, challenges, and perspectives, *Bioresource Technology*, 267, 756–768.
- Liao B-Q., Kraemer J.T., Bagley D.M. (2006). Anaerobic membrane bioreactors: applications and research directions, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36:6, 489-530.
- McAteer P.G., Trego A.C., Thorn C., Mahony T., Abram F., O’Flaherty, V. (2020). Reactor configuration influences microbial community structure during highrate, low-temperature anaerobic treatment of dairy wastewater, *Bioresource Technology*, 307, 123221.
- Najafpour G.D., Tajallipour M., Komeili M., Mohammadi M. (2009) Kinetic model for an upflow anaerobic packed bed bioreactor: dairy wastewater treatment, *African Journal of Biotechnology*, 8:3590–6.
- Omil F., Garrido J.M., Arrojo B., Mendez R. (2003). Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater at industrial scale, *Water Research*, 37 (17), 4099-4108.
- Patil S.S., Ghasghse N.V., Nashte A.P., Kanase S.S., Pawar R.H. (2012). Anaerobic digestion treatment of cheese whey for production of methane in a two stage upflow packed bed reactor, *International Journal of Advanced Science and Technology*, 1:1–7.
- Prazeres A.R., Carvalho F., Rivas J. (2012). Cheese whey management: a review, *Journal of Environmental Management*, 110:48–68.
- Rahul K.B., S B., Femin M., Maneesha M.M., Elsint J., Anjali M. (2022). Different treatment methodologies and reactors employed for dairy effluent treatment - A review, *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102622.
- Ramasamy E.V., Gajalakshmi S., Sanjeevi R., Jithesh M.N., Abbasi S.A. (2004). Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters with upflow anaerobic sludge blanket reactors, *Bioresource Technology*, 93, 209–212.
- Sala S., Anton A., McLaren S.J., Notarnicola B., Saouter E., Sonesson U. (2017). In quest of reducing the environmental impacts of food production and consumption, *Journal of Cleaner Production*, 140, 387–398.
- Shoener B.D., Zhong C., Greiner A.D., Khunjar W.O., Hong P-Y., Guest, J.S. (2016). Design of anaerobic membrane bioreactors for the valorization of dilute organic carbon waste streams, *Energy & Environmental Science*, 9, 1102-1112.
- Sivakumar P., Bhagiyalakshmi M., Anbarasu K. (2012). Anaerobic treatment of spoiled milk from milk processing industry for energy re-covery – a laboratory to pilot scale study, *Fuel*, 96:482–6.
- Sivaprakasam S., Balaji K., (2021). Biodegradation performance of UASFF reactor in treating Dairy wastewater under various organic Loading rate, *Materials Today*, 43, 1167–1172.
- Stakinakis A.S., Charalambous P., Vyrides I. (2022). Dairy wastewater management in EU: Produced amounts, existing legislation, applied treatment processes and future challenges, *Journal of Environmental Management*, 303, 114152.
- Tan L.C., Peschard R., Deng Z., Ferreira A.L.M., Lens P.N.L., Pacheco-Ruiz. S. (2021). Anaerobic digestion of dairy wastewater by side-stream membrane reactors: Comparison of feeding regime and its impact on sludge filterability, *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101482.
- Vidal G., Carvalho A., Mendez R., Lema J.M. (2000). Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters, *Bioresource Technology*, 74:231–9.
- Wang S., Rao N.C., Qiu R., Molett R. (2009). Performance and kinetic evaluation of anaerobic moving bed biofilm reactor for treating milk permeate from dairy industry, *Bioresource Technology*, 100:5641–7.