

Atf İçin: Coşkun, N. Y., Atalay, H. ve Çoban, M. T. (2023). Biyogaz Enerjisi Destekli Süt Soğutma Sistemi Performansının Simülasyon ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2): 1199-1211.

To Cite: Coşkun, N. Y., Atalay, H. & Çoban, M. T. (2023). Simulation and Experimental Investigation of Biogas Energy Supported Milk Cooling System Performance. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2): 1199-1211.

Biyogaz Enerjisi Destekli Süt Soğutma Sistemi Performansının Simülasyon ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Nevfel Yunus COŞKUN^{1*}, Halil ATALAY², M. Turhan ÇOBAN³

Öne Çıkanlar:

- Deneysel
- Enerji
- Simülasyon

Anahtar Kelimeler:

- Biyogaz
- Çiftlik
- Gaz Motoru
- Soğutma

ÖZET:

Alternatif enerji kaynakları hem temiz enerji üretimi hem de geniş kullanım alanına sahip olmasıyla, tercih edilir bir enerji üretim kaynağı haline gelmiştir. Ayrıca alternatif enerji kaynaklarının yenilebilir olması da enerji devamlılığı konusunda güven vermektedir. Süt üretim çiftlikleri, alternatif enerji kaynaklarından biokütleyle dayalı enerji üretiminde büyük bir potansiyel taşımaktadır. Süt üretim çiftliklerinde hayvan atıklarının değerlendirilerek biyogaz enerji elde edilmesi ve bu enerjinin çiftliğin en önemli giderini oluşturan soğutma sistemlerinde kullanılması mümkündür. Bu çalışmada, bir süt üretim çiftliğinin hayvan atıklardan elde edilen biyogaz enerjisinin kullanımıyla, buhar sıkıştırılmalı süt soğutma sisteminin sayısal hesaplamaları ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalarda Java programlama dili kullanılarak, matematiksel model oluşturulmuştur. Sayısal hesaplamalardan elde edilen verilerle, 2.5 m³ kapasiteye sahip fermentör, filtreleme, depolama ve otomasyon deney sistemi kurulmuştur. Sistemden elde edilen biyogazın içerisinde bulunan karbondioksit, hidrojen sülfür vd. gazlarının filtreleme işlemleri gerçekleştirilmiş ve 10 m³'lük membranda depolanmıştır. Depolanan biyogaz ile çalışan içten yanmalı gaz motoru, 300 litre soğutma kapasitesine sahip buhar sıkıştırılmalı süt soğutma tankı kompresörünü tahrik etmiştir. Biyogaz yakıtlı süt soğutma sistemi, konvansiyonel süt soğutma sistemine göre %54.37 enerji tasarruf sağlamıştır. Deneysel çalışmada, TS EN 13732 numaralı Türk Standardı ve EN 13732 standardına göre her sağımdaki 32 °C' deki çiğ sütü, en fazla 2.5 saat içerisinde +4 °C' ye soğutabilme şartı sağlanmıştır. +4 °C' ye soğutulan süttten alınan numuneye, koloni sayımı yapılmış ve 2.1 x 10⁴ koloni/ml (log₁₀ 4.32) tespit edilmiştir.

Simulation and Experimental Investigation of Biogas Energy Supported Milk Cooling System Performance

Highlights:

- Experimental
- Energy
- Simulation

Keywords:

- Biogas
- Farm
- Gas Engine
- Refrigeration

ABSTRACT:

Alternative energy sources have become a preferred energy production source with both clean energy production and wide usage area. In addition, the fact that alternative energy consumption is renewable gives confidence in the continuity of energy. Dairy farms have a great potential to use energy based on biomass from alternative energy sources. It is possible to obtain biogas energy by evaluating animal wastes in dairy farms and to use cooling, which includes the most important expense of the farm. In this example, numerical calculations and usage studies of a vapor compression milk cooling system were carried out using biogas energy obtained from animal wastes of a dairy farm. It maintains the model in hand, which uses the Java programming language for numerical calculations. With the measurements obtained from numerical calculations, a fermentor, consumption, storage and automation test system with a capacity of 2.5 m³ was established. Carbon dioxide, hydrogen sulfide, etc. in the biogas obtained from the system. The filtering processes of the gases were carried out and stored in a 10 m³ membrane. An internal combustion gas engine powered by stored biogas drove a 300-liter vapor-compression milk tank compressor with cooling. The biogas fueled milk cooling system provided 54.37% energy savings compared to the conventional milk cooling system. According to the experimental situation, TS EN 13732 limitation Turkish Standard and EN 13732 standard, raw feeding at 32 °C in each milking has the ability to cool down to +4 °C in a maximum of 2.5 hours. Colony count was made on the sample taken from the milk cooled to +4 °C and 2.1 x 10⁴ colonies/ml log₁₀ 4.32 were determined.

¹Nevfel Yunus COŞKUN ([Orcid ID: 0000-0002-0464-3818](https://orcid.org/0000-0002-0464-3818)), Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Yozgat, Türkiye

² Halil ATALAY ([Orcid ID: 0000-0002-4549-584X](https://orcid.org/0000-0002-4549-584X)), Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yalova, Türkiye

³ Mustafa Turhan ÇOBAN ([Orcid ID: 0000-0003-1873-2640](https://orcid.org/0000-0003-1873-2640)), Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Nevfel Yunus COŞKUN, e-mail: nevfelyunus.coskun@yobu.edu.tr

Bu çalışma Nevfel Yunus COŞKUN'un Doktora tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

Türkiye nüfusunun sürekli artmasıyla birlikte, insanların ihtiyaçlarının karşılanmasında gerekli olan enerji tüketimi de artış göstermektedir. Ayrıca Türkiye'nin gelişmekte olan ülkeler statüsünde bulunması sanayisinin gelişmesinde de enerji ihtiyacını ortaya çıkartmaktadır. Enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında kullanılacak alternatif enerji kaynakları Türkiye'nin ekonomisine de önemli katkılar sağlayacaktır. Alternatif enerji kaynaklarından, biyogaz enerjisi son zamanlarda Türkiye'de yaygınlaşan bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu enerji kaynağı, özellikle kent merkezlerinde çöp gazı ve biyogaz tesisleriyle, kırsal alanlarda ise çiftlik tipi biyogaz üretim sistemleri şeklinde kullanılmaktadır.

Biyogaz, organik maddelerin kompleks biyokimyasal ayrışmasının ürünü olup, esas olarak %60-70 metan (CH₄), %30-40 karbon dioksit (CO₂) ve diğer gazlarla birlikte, yani nitrojen (N₂), hidrojenden (H₂), hidrojen sülfür (H₂S), amonyak (NH₃) ve ayrıca su buharından oluşmaktadır. Bakteri ve arke birlikteliğiyle anaerobik sindirim (AS) işlemi ile üretilir. Başka bir deyişle, oksijensiz ortamlarda doğal olarak meydana gelen karmaşık bir mikrobiyal süreçtir ve biyokütlenin CH₄e dönüştürülmesi için en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Organik maddelerin oksijensiz ortamda fermantasyonu sonucunda elde edilen biyogazın 1 m³'ü 4.70 kWh enerjiye eşdeğerdir. Tarımsal atıklar, gıda atıkları, endüstriyel atıklar ve atık suların yanı sıra mahsuller de dahil olmak üzere çok çeşitli materyaller AS süreci için hammadde olarak kabul edilebilir. Biyogaz bütün organik maddelerden elde edilebildiği gibi hayvan gübrelerinin fermantasyonundan da üretilebilmektedir (Ekici ve ark., 2010; Devi ve ark., 2022; Jesus ve ark., 2022).

Yukarıdaki malzemelerin her birinin biyogaz veya daha spesifik olarak biyometan üretimi için kendi potansiyelleri vardır. Uçucu katılar içeriği, biyolojik (biyokimyasal) oksijen ihtiyacı, kimyasal oksijen ihtiyacı, C/N oranı ve inhibitör maddelerin varlığı, dikkate alınması gereken en önemli hammadde parametreleri arasındadır. Besleme stokuna ait özellikler yalnızca AS proseslerinin performansını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda proses geliştirme veya engelleme yoluyla reaktör tasarımı ve operasyonel koşullar dahil olmak üzere birçok faktörü de etkilemektedir (Thiangchanta ve ark., 2022).

Bu çalışmada biyogaz üretimi ve süt soğutma işlemi üzerine durulmuştur. Biyogaz üretimi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

(Adekunle ve Okolie, 2015) anaerobik sindirimin biyokimyasal sürecini ele almışlardır. Anaerobik sindirim sürecinde proste kullanılan farklı aşamalar, substrat ve mikroorganizmalar arasındaki ilişki, pH, sıcaklık ve yükleme hızı gibi işletme parametrelerinin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

(Tufaner ve Avşar, 2016) sığır gübresinden biyogaz üretilmesi üzerine bir derleme çalışması yapmışlardır. Çalışma sıcaklığı, organik yükleme hızı, hidrolik alıkonma süresi, kimyasal oksijen ihtiyacı ve uçucu katı uzaklaştırma verimliliği metan üretiminde dikkat edilmesi gereken koşullar olduğunu vurgulamışlardır. Anaerobik çalışmaların genellikle 30 °C ve 37 °C arasında tutulan mezofilik koşullar altında gerçekleştirilmiş ve organik atık yükleme oranı genellikle 1 kg ile 6 kg arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

Konvansiyonel ve alternatif yakıtlarla çalışan, süt soğutma sistemleri üzerine yapılan çalışmalar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

(Bhurat ve ark., 2022) buhar absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin süt soğutma üniteleri için getirdiği fayda ve zorlukları araştırmışlardır. Buhar absorpsiyonlu soğutma sistemleri, ısıyla çalışan bir teknolojidir ve uzun yıllar boyunca kullanıma uygun sistemlerdir. Bu teknoloji 21. yüzyılda elektriğin bulunmadığı uzak yerlerde kullanılmakta ve soğuk hava deposu, süt soğutma ünitesi ve bölgesel soğutma gibi çeşitli uygulamalara sahiptir. Bu araştırma çalışması, süt üretiminin fazla olduğu, ancak

güç kaynağının kesintili veya düşük olduğu bölgeler için faydalı olacağını vurgulamışlardır. Yenilenebilir enerji sistemleri, geleneksel enerji kaynaklarından daha devamlı olmasından dolayı, uzak bölgeler için bir süt soğutma ünitesinin çalıştırılmasının daha uygun olacağı sonucuna ulaşmışlardır.

(Kasera ve ark., 2021) R290 soğutucu akışkanını kullanan güneş enerjisi destekli süt soğutma sisteminin enerji verimliliği ve performans analizlerini incelemişlerdir. Deney düzeneği 500 W kapasiteye sahip güneş paneli ve bu panelden elde edilen enerjiyi depolamada kullanılan bataryalar, değişken devirli kompresör ve güneş fotovoltaik modülleri içeren süt soğutucu ünitelerinden oluşmuştur. Süt soğutma sistemi, fotovoltaik paneller tarafından üretilen enerjiyle tahrik edilmiştir. Çalışmada farklı oda sıcaklıkları için değişken kompresör devirlerinde soğutma sisteminin performans katsayısı, güneş enerjisi performans katsayısı, soğutma kapasitesi ve enerji tüketimi gibi çeşitli performans parametreleri incelenmiştir. Sıcaklığın artması ile soğutma kapasitesinin düştüğü, güç tüketiminin arttığı ve COP değerinin azalarak 0.61 ile 0.23 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

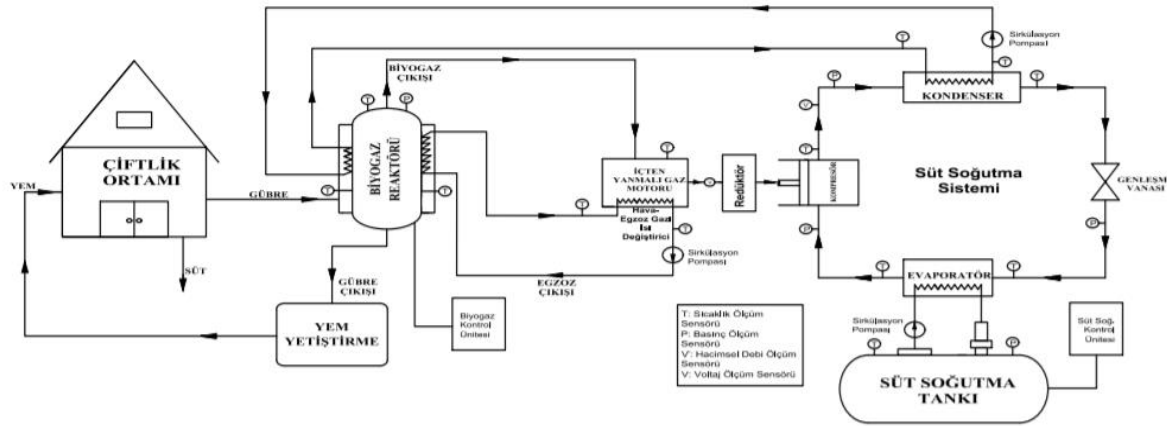
(Sur ve ark., 2020) kırsal bölgelerde güneşin ısıl enerjisiyle çalışan süt depolama sisteminin absorpsiyonlu soğutma sistemiyle soğutulmasını ele almışlardır. 150 litre sütü 15 °C – 20 °C' de 10-12 saat saklamak için, güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemi tasarlamışlardır. Absorpsiyonlu soğutma için absorpsiyon çifti olarak aktif karbon ve metanol kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, 90 °C'de sağlanan sıcak su, 35 °C kondenser sıcaklığı ve 5 °C evaporatör sıcaklığı için sistemin özgül soğutma gücünün 5.4 kW / kg ile 5.7 kW / kg arasında değiştiğini gözlemlenmiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda alternatif enerji kaynakları kullanılarak gerçekleştirilen süt soğutma işlemlerinin bilimsel açıdan buhar sıkıştırımlı soğutma sistemlerine kıyasla yaklaşık %14.5 oranında enerji tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir. Fakat güneş enerjisi destekli olduğu için hibrit yöntemle soğutma süresinin güneşlenme süresinden dolayı yetersiz kalabildiği ve bu nedenden dolayı da şebekeden ek enerji takviyesinin yapıldığı görülmüştür (Vilar ve ark., 2012; Torres ve ark., 2015; Breen ve ark., 2015; Romaniuk ve ark., 2021). Ayrıca, güneş enerjisinin mevsim değişikliği nedeniyle dört mevsim boyunca aynı performansta kullanılması da söz konusu olmamaktadır. Bu sebeple, güneş enerjili soğutma sistemlerinin yerine, çevre ve iklim koşullarından en az oranda etkilenen diğer alternatif enerjilere kaynaklarına yönelmenin daha doğru olacağını söylemek mümkündür.

Hem biyogaz üretimi hem de süt soğutma sistemleri için farklı tekniklerin kullanıldığı literatürde, biyogaz enerjisi destekli buhar sıkıştırımlı süt soğutma çalışmasına rastlanılmamıştır. Biyogaz ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı hibrit süt soğutma sistemleri için simülasyon ve deneysel çalışmalar da tespit edilmemiştir. Bu çalışmanın temel amacı, biyogaz enerjisi destekli süt soğutma sisteminin uygulanabilirliğini hem simülasyon hem de deneysel olarak net bir şekilde ortaya koymak ve süt soğutma prosesi ile ilgili yüksek enerji verimliliğine sahip bir teknolojiyi literatüre kazandırmaktır. Böylece ciddi bir maliyet gerektiren süt soğutma işlemi için gerekli olan elektrik enerjisinin tamamının biyogaz enerjisinden karşılanabileceği deneysel olarak net bir şekilde ortaya konmuştur.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında geliştirilen, sistemin akış şeması şekil 1'de gösterilmiştir. Akış şemasına göre, biyogaz destekli süt soğutma sisteminin ana elemanları, biyogaz reaktörü, içten yanmalı gaz motoru ve süt soğutma tankından oluşmuştur. Sistemin yardımcı ekipmanları ise, gübre sıyırıcı, gübre çukuru, gübre aktarım pompası ve gaz depolama membranından oluşmaktadır.



Şekil 1. Biyogaz enerjisi destekli buhar sıkıştırımlı süt soğutma sistemi akış şeması

Biyogaz reaktörünü oluşturan elamanlar, cam fiber takviyeli polyester malzemeden yapılmış 3 m³'lük bir tank, reaktör ısıtma ve karıştırma boruları, reaktör izolasyonu ve reaktörün; sıcaklığı, basıncı ve gaz miktarını ölçen otomasyon sisteminden oluşmuştur. Buhar sıkıştırımlı klasik süt soğutma sistemi; kompresör, kondenser, genleşme vanası ve evaporatörden meydana gelmiştir. İçten yanmalı gaz motoru tek fazlı, 5 kW güç çıkışına sahip, dört zamanlı hava soğutmalı bir motor kullanılmıştır.

Çalışmanın, simülasyon modellemesi java programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar ise, 120 büyükbaş simental süt hayvanına sahip T.C. Gıda ve Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı ve Avrupa Birliği desteğiyle kurulmuş, Yılmaz süt üretim çiftliğinde gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon Modellemesi

Simülasyon modellemesi, sistem kurulumundan önce yapılması, karşılaşılabilecek sistemsel vd. problemlere karşı önlem alınmasında ve ciddi maliyet kayıplarının önlenmesi hususunda önemli bir etkidir. Biyogaz üretim sisteminin kurulumunda karşılaşılabilecek problemlerin önüne geçilebilmesi için sistem şartlarına uygun modelleme çalışması yapılmıştır. Reaktörün kurulacağı bölgenin iklim şartları incelendiğinde, mezofilik reaktörün kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Reaktöre alınacak substratın kırk gün fermente edileceği ve reaktör 35 °C sıcaklığında sabit kalacağı planlanmıştır. Biyogaz anaerobik fermantasyon prosesinin bir bilgisayar modeli oluşturularak (ısı + kütle transferi + biyokimyasal proses) çıkan gazın ve gübrenin karakterizasyonu belirlenmiştir. Bu doğrultuda biyogaz reaktörü ve içten yanmalı gaz motoru için Java dili kullanılarak geliştirilen simülasyon yazılımı ile bu sistemlerin verimliliği ile ilgili bir öngöründe bulunulmuştur. Minimal ve maksimal metan verimi için girdi değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Simülasyon çalışması için kullanılan biyogaz kompozisyonları (Kaya ve Öztürk, 2012)

Yanma Gazları	Minimal Kompozisyon (kmol)	Maksimal Kompozisyon (kmol)
CH ₄	0.4	0.637
CO ₂	0.48	0.3
H ₂	0.1	0.05
N ₂	0.017	0.01

Çizelge 1'de verilen sistem akış şemasına göre oluşturulan simülasyon modellemesinin, biyogaz verileriyle, süt soğutma sisteminin enerji potansiyeli incelenmiştir. Buna göre ilk olarak süt soğutma sistemine yönelik parametrelerin tespiti için eşitlik [1- 6]'da verilen genel enerji denklemleri kullanılarak ayrı bir simülasyon yazılımı geliştirilmiş ve soğutma sistemi ve süt soğutma tankının kapasitesi belirlenmiştir (Çengel ve Boles, 2013). Enerji analizi için sistemi oluşturan her bir bileşene ait sıcaklık

ve basınç değerleri tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde, soğutma sisteminin buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminden oluştuğu ve bu çevrimde R404A soğutucu akışkanı kullanıldığı kabul edilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

$$\dot{W}_{komp.} = \frac{\dot{m}(h_{2a} - h_1)}{\eta_c} \quad (1)$$

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{kond.} = \dot{m}(h_{2a} - h_3) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{eva.} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (4)$$

$$COP_{kond.} = \frac{\dot{Q}_{kond.}}{\dot{W}_{komp.}} \quad (5)$$

$$COP_{eva.} = \frac{\dot{Q}_{eva.}}{\dot{W}_{komp.}} \quad (6)$$

Çizelge 2. R404A soğutucu akışkan ile çalışan buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin girdi verileri (Atalay, 2011; Çoban, 2012)

Soğutma Çevrim Girdi Özellikleri	Değer	Birim
Soğutucu akışkan sıcaklığı	4.5	kW
Q Buharlaştırıcı ısı akışı	2.0	°C
dP Buharlaştırıcı basınç düşümü	2.0	kPa
dT Buharlaştırıcı kızgınlık derecesi	2.0	°C
T Yoğuşturucu doyma sıcaklığı	38.0	°C
dP Yoğuşturucu basınç düşümü	2.0	kPa
dT Yoğuşturucu soğuma derecesi	2.0	°C
Genleşme vanası entalpi değişimi	2.0	kJ/kg
Kompresör çıkış sıcaklığı	42.5	°C
Kompresör mekanik verimi	0.75	

R404A soğutucu akışkan ile çalışan buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin girdi değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Deneysel Sistem Kurulumu

Deneysel çalışmalarda Yozgat’ın Sorgun ilçesinde bulunan Yılmaz süt üretim çiftliğindeki Çizelge 3’te özellikleri verilen süt sığırlarından toplanan gübre kullanılmıştır. Çiftlikte bulunan hayvanların gübresi taze alınarak, pH ve sıcaklık kontrolü yapıldıktan sonra reaktöre aktarılmıştır.

Çizelge 3. Hayvan cinsi ve özellikleri

Hayvan Türü	Vücut Ağırlığı (kg)	Tükettiği Su (L/gün)	Tükettiği Yem (kg/gün)	Atık Verisi (kg/hayvan.gün)
Süt Sığırı	200-850	60	60	43

Reaktöre alınan gübrenin fiziksel özelliklerinin tespitinde alınan numune Yozgat Bozok Üniversitesi, Araştırma Laboratuvarında yapılan ölçümler sonucunda Çizelge 4’te verilen özellikler tespit edilmiştir. Bu özelliklere göre gübrenin sahip olduğu, karbon/azot oranı fermantasyonun gerçekleşmesi için 23/1 düzeyinden fazla ve 10/1 oranından az olmaması şartını sağlamıştır. Ayrıca fermantöre alınacak gübre-su karışımının pH değerinin 7.68 olduğu ve bu değerlerin olması gereken 6.5-8 değerler arasında olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmada, biyogaz oluşumunun gerçekleştiği, fermantör (reaktör) çeşitli sistem ve donanımların bir araya gelmesinden oluşmuştur. Reaktörün iç kısmının alt tarafına yerleştirilmiş borular vasıtasıyla karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Reaktörün dış kısmı ısıtıcı borularla kaplanmıştır.

Çizelge 4. Hayvansal gübrenin fiziksel özellikleri

Gübre İçerisinde Bulunan Bileşenler	Süt Sığırı Gübresi
C (%)	44.51
N (%)	2.12
C/N	20.99
Toplam katı madde, TKM (%)	23.75
Uçucu katı madde, UKM (%)	86.72
Uçucu yağ asitleri, UYA (mg/L)	58300
Toplam azot (mg/L)	13300
Kimyasal oksijen ihtiyacı, KOİ (mg/L)	45310

Isıtıcı boruların üzerine 10 cm kalınlığında K3 taş yünü ile kaplanmıştır. Tüm reaktörün, iklim şartlarından etkilenmemesi için 2 mm kalınlığında trapez saca kaplanmıştır. Şekil 2’de görüldüğü üzere, trapez sac üzerinde reaktörün ısıtma, karıştırma sistemi ve sıcaklık, basınç, gaz analizi gibi verilerin alındığı otomasyon panoları kurulmuştur. Yapılan ölçümlerde biyogaz üretimi ile ilgili pH değeri, reaktörün dış ve iç sıcaklıkları, reaktör iç basıncı, çevre sıcaklığı, üretilen metan miktarı, CO₂ ve H₂S oluşum miktarları gibi sayısal verilere ulaşılmıştır.



Şekil 2. Biyogaz enerjisi destekli süt soğutma sisteminin montaj resmi

Çalışma kapsamında deneysel çalışmaların yürütülmesinde kullanılan ölçüm cihazları ve bu cihazların hassasiyet değerleri Çizelge 5’te verilmiştir. Sıcaklık ölçümleri için reaktörün giriş-çıkış noktaları, reaktör ceket bölgesi ile reaktör iç kısmına SHT10 Arduino sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. İçten yanmalı motorun egzoz çıkışına ve soğutma tankı iç kısmı ile soğutma sistemini oluşturan ekipmanların (kompresör, kondenser, evaporatör ve genişleme vanası) giriş- çıkış noktalarına ise PT 1000 sıcaklık sensörleri konulmuştur.

Reaktörün basıncı ve atmosfer basıncının ölçümünde DN10-basınç sensörü, elde edilen metanın miktarının ölçümünde G4 gaz sayacı ve debimetre, metanın ve CO₂’nin oranlarının belirlenmesinde metan ve CO₂ sensörleri kullanılmıştır. Tüm sensörlerin verileri datalogger ile veri tabanına aktarılmıştır. İçten yanmalı gaz motorunun süt soğutma tankına sağladığı tahrik haricinde, diğer sistemler için ürettiği elektrik enerjisi Wattmetre ile ölçülmüştür.

Biyogaz reaktörünün otomasyonu sayesinde biyogaz reaktörünün mekanik ve elektronik aygıtları arabirimlerle birbirine bağlanarak işletme fonksiyonlarıyla reaktör ceket bölgesine ait sıcaklık ve basınç kontrol, işlemleri gerçekleştirilmiştir. Süt soğutma tankı üzerinde yapılan otomasyon sistemiyle de tankın otomatik olarak çalıştırılması, süt sıcaklığının kontrolü, soğutma işlemi sonunda süt sıcaklığının istenilen sıcaklık değerine ulaştıktan sonra karıştırma sisteminin devreye alınması söz konusu olmuş ve bu sayede soğutma sisteminin çalışma aralıkları ayarlanmıştır. Ayrıca, sütün tank içerisinde beklemesi durumunda tankın içerisindeki sıcaklık artışının minimum seviyede tutulması, tank kapağının açılması durumunda, sistemin otomatik olarak devre dışı bırakılması gibi kontrollerin de yapılması sağlanmıştır.

Çizelge 5. Ölçüm cihazlarının hassasiyet değerleri

Ölçüm Cihazı	Ölçüm Türü	Hassasiyet
Datalogger	Veri aktarımı ekipmanları	-
PT 1000 Sıcaklık Sensörü	Sıcaklık (°C)	±0.1 °C
Thermokon TF25 Daldırma Tip Sıcaklık Sensörü	Sıcaklık (°C)	±0.1 °C
SHT 10 Arduino Sıcaklık Sensörü	Sıcaklık (°C)	±0.5 °C
PCE-pH 18	pH	±%1
Basınç Sensörü	Basınç (bar)	±%1.5
G4 gaz sayacı	Metan (CH ₄) (m ³)	±%1
Wattmetre	Enerji tüketimi (kWh)	±%2
Debimetre	Gaz miktarı (L/min)	±%3
CH ₄ sensör	Metan Miktarı (m ³ h)	±%1
CO ₂ sensör	Karbondioksit miktarı (ppm)	±%1

3 m³ kapasiteli, pilot ölçekli biyogaz sistemindeki deneme günlük besleme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sisteme organik yüklenmesinde, 2500 L sığır atığı ve su atığının bire bir oranında karışımıyla doldurulmuştur. Deneysel çalışmalar süresince, her gün üretilen biyogaz miktarı belirlenmiştir. Ayrıca üretilen gazın içeriğindeki gazların oranlarında tespit edilmiştir. Haziran-Eylül aylarındaki sıcaklık değerlerinin diğer aylara göre yüksek olmasına rağmen reaktör için gerekli olan 35 °C sıcaklıkta olmamasından dolayı, reaktörün ısıtılmasında üretilen biyogazın kullanıldığı bir ısıtma sistemi kullanılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir büyükbaş hayvanın günlük 45 kg atık ürettiği varsayılmıştır. Standartlara göre 1 kg gübre başına gaz veriminin 18 m³ olduğu göz önüne alındığında hayvan başına bu değer 810 m³ /gün olacağı sonucu ortaya çıkmıştır (Romaniuk ve ark., 2021). Simülasyon hesaplamaları, bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Minimum ve maksimum metan verimi çıktı değerleri Şekil 3'te verilmiştir.

```

1 kmol yakıt için ısı enerjisi çıktısı Q=-317515.30881343636 KJ/kmol yakıt
Yakıtın ısı değeri Q_maksimum =-322002.18053713004 KJ/kmol yakıt
kazan verimi Q/Qmaksimum= 0.9860657101259093
Yakıt giriş sıcaklığı = 298.0 derece K
Hava giriş sıcaklığı = 298.0 derece K
Baca çıkış sıcaklığı = 460.5 derece K
hava fazlalık katsayısı = 1.08
İstenilen ısı çıktısı = 2.5 kW = 2149.51038925kCal/saat
hacimsel yakıt debisi = 0.6353288401066481 Nm3/h
kütlesel yakıt debisi = 0.8014122656035912 kg/h
yakıtın molekül ağırlığı= 28.273407kg/kmol
hacimsel tam hava yanma hava debisi = 2.6715691147173856Nm3/h
oransal tam yanma oksijen katsayısı = 0.8500000000000002kmol/kmol yakıt
hacimsel gerçek yanma hava debisi = 2.7772846438947765 Nm3/h
oransal gerçek yanma oksijen katsayısı = 0.9180000000000001kmol/kmol yakıt
hava /yakıt oranı = 4.460638599799345 kg hava/kg yakıt
hava /yakıt oranı = 4.371428571428572kmol air/kmol fuel
Adyabatik alev sıcaklığı= 2000.2885183481428 derece K Su yoğuşma sıcaklığı= 329.98307028948983 derece K = 56.833070289489854 derece C
Yakıt :
ch4 0.4 0.4
co2 0.48 0.48
h2 0.1 0.1
n2 0.017 0.017
h2o 0.003 0.003
Hava :
o2 0.9180000000000001 0.21000000000000002
n2 3.4534285714285717 0.79
Baca gazı :
Baca gazı su yoğuşma sıcaklığı : 329.98307028948983derece K =56.833070289489854derece C
Baca gazı su kısmi basıncı : 0.1719396845637584 bar
co2 0.88 0.16536912751677854
h2o 0.903 0.16969127516778526
so2 0.0 0.0
n2 3.4704285714285716 0.6521610738255035
o2 0.06800000000000006 0.012778523489932898
Kuru Baca gazı :
co2 0.88 0.1991658314203498
so2 0.0 0.0
n2 3.4704285714285716 0.7854440816062593
o2 0.06800000000000006 0.01539008697339068
Yanma denklemi :
0.4*ch4 + 0.48*co2 + 0.1*h2 + 0.017*n2 + 0.003*h2o + 0.9180000000000001*( o2 + 3.7619047619047614*n2 ) ---->
0.88*co2 + 0.903*h2o + 3.4704285714285716*n2 + 0.06800000000000006*o2

```

(a)

Şekil 3. Minimum (a) ve maksimum (b) metan verimi değerleri

```

1 kmol yakıt için ısı enerjisi çıktısı Q=-484047.6817186794 KJ/kmol yakıt
Yakıtın ısı değeri Q_maksimum =-489210.6573086913 KJ/kmol yakıt
kazan verimi Q/Qmaksimum= 0.9894463141534668
Yakıt giriş sıcaklığı = 298.0 derece K
Hava giriş sıcaklığı = 298.0 derece K
Baca çıkış sıcaklığı = 460.5 derece K
hava fazlalık katsayısı = 1.08
istenilen ısı çıktı = 2.5 kW = 2149.51038926kCal/saat
hacimsel yakıt debisi = 0.41674950729706206 Nm^3/h
kütesel yakıt debisi = 0.44357581504705357 kg/h
yakıtın molekül ağırlığı= 23.85687166kg/kmol
hacimsel tam hava yanma hava debisi = 2.5778933808518265Nm^3/h
oransal tam yanma oksijen katsayısı = 1.289kmol/kmol yakıt
hacimsel gerçek yanma hava debisi = 2.784124851319973 Nm^3/h
oransal gerçek yanma oksijen katsayısı = 1.40292kmol/kmol yakıt
hava /yakıt oranı = 8.07889408066913 kg hava/kg yakıt
hava /yakıt oranı = 6.680571428571429kmol air/kmol fuel
Adyabatik alev sıcaklığı= 2118.552966811353 derece K Su yoğuşma sıcaklığı = 330.4333420761839 derece K = 57.28334207618394 derece C =
Yakıt :
ch4 0.637 0.637
co2 0.3 0.3
h2 0.05 0.05
n2 0.01 0.01
h2o 0.003 0.003
Hava :
o2 1.40292 0.21
n2 5.277651428571429 0.79
Baca gazı :
Baca gazı su yoğuşma sıcaklığı : 330.4333420761839derece K =57.28334207618394derece C
Baca gazı su kısmi basıncı : 0.1756345378715781 bar
co2 0.937 0.12239452126369217
h2o 1.327 0.17333781186437514
so2 0.0 0.0
n2 5.2876514285714284 0.6906932392841814
o2 0.10392000000000001 0.013574427587751218
Kuru Baca gazı :
co2 0.937 0.14805869074492098
so2 0.0 0.0
n2 5.2876514285714284 0.8355205417607222
o2 0.10392000000000001 0.01642076749435666
Yanma denklemi :
0.637*ch4 + 0.3*co2 + 0.05*h2 + 0.01*n2 + 0.003*h2o + 1.40292*(o2 + 3.7619047619047623*n2) ---->
0.937*co2 + 1.327*h2o + 5.2876514285714284*n2 + 0.10392000000000001*o2

```

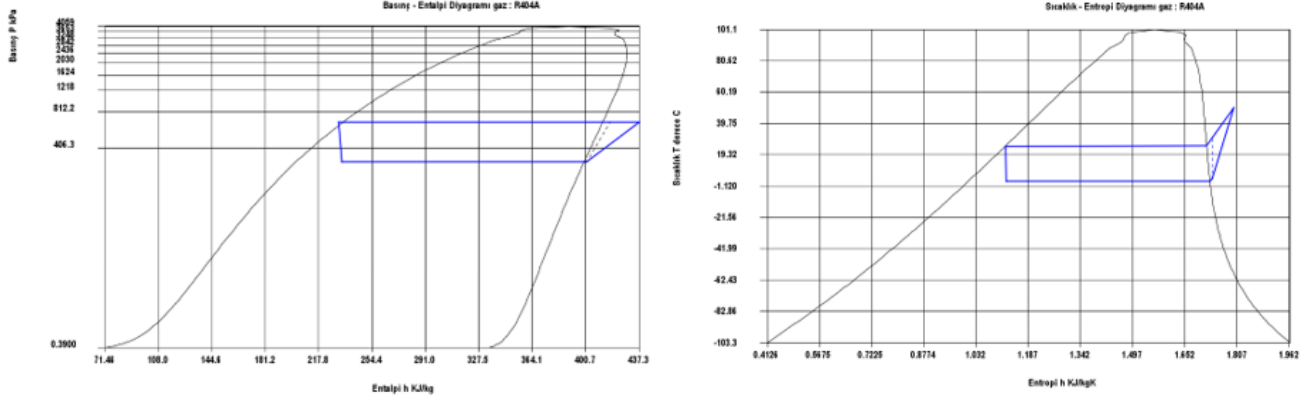
(b)

Şekil 3. Minimum (a) ve maksimum (b) metan verimi değerleri (Devamı)

Çizelge 6. R404A soğutucu akışkan ile çalışan buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin çıktı değerleri

Özellik	Değer	Birim
Gaz İsmi	R-125/R143/R134a(44/52/4)	
m	0.03730201183650847	kg/s
W kompresör	1.2863904190946467	kW
Q buharlaştırma	4.5	kW
Q yoğuşma	5.539396837994001	kW
COP buharlaşma	3.498160382107845	
COP yoğuşma	4.306155235432018	
Buharlaştırıcı çıkışı T1	4.401433614361965	°C
Buharlaştırıcı çıkışı P1	647.5954656191897	kPa
Buharlaştırıcı çıkışı h1	375.59084552404903	kJ/kg
Kompresör çıkışı T2	42.5	°C
Kompresör çıkışı P2	1728.3462358315612	kPa
Kompresör çıkışı h1	401.4552095843466	kJ/kg
Yoğuşturucu çıkışı T3	35.60460370896007	°C
Yoğuşturucu çıkışı P3	1726.3462358315612	kPa
Yoğuşturucu çıkışı h3	252.95392063851966	kJ/kg
Genleşme vanası çıkışı T4	2.1275332343189803	°C
Genleşme vanası çıkışı P4	648.9600767042795	kPa
Genleşme vanası çıkışı h4	254.95392063851966	kJ/kg
İzentropik kompresör çıkışı T5	37.61640620819014	°C
İzentropik kompresör çıkışı P5	1726.3462358315612	kPa
İzentropik kompresör çıkışı h5	396.3899024799734	kJ/kg
Yoğuşturucu doyma buhar x=1 T	38.0	°C
Yoğuşturucu doyma buhar x=1 P	1728.3462358315612	kPa
Yoğuşturucu doyma buhar x=1 h	380.21010178282364	kJ/kg

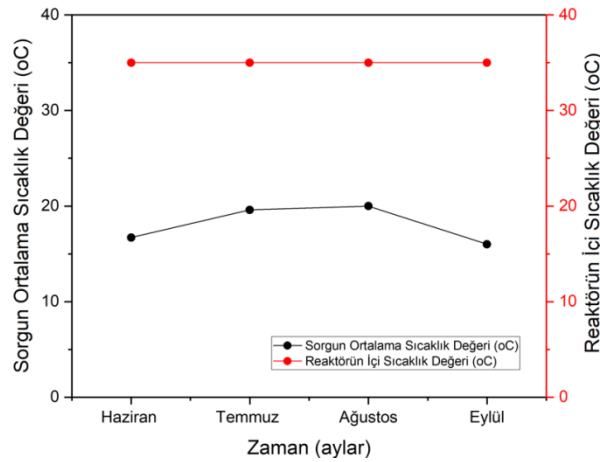
Gerçekleştirilen simülasyon analizlerinde, buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi için R404A soğutucu akışkanı kullanıldığı kabul edilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Soğutma çevrimi analizi sonuçlarına göre Çizelge 6’da görüldüğü üzere, kompresör gücünün yaklaşık 1.28 kW ve kompresör veriminin %80 olacağı sonucu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, yoğuşturucu ve buharlaştırıcı için gerekli güç değerleri sırasıyla 5.5 kW ve 4.5 kW olarak tespit edilmiştir. Buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminin simülasyon modellemesi çalışmasından elde edilen soğutma çevriminin T-s ve log P-h diyagramları Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Soğutma çevriminin T-S ve log P-h diyagramı

Deneysel Çalışma Bulguları

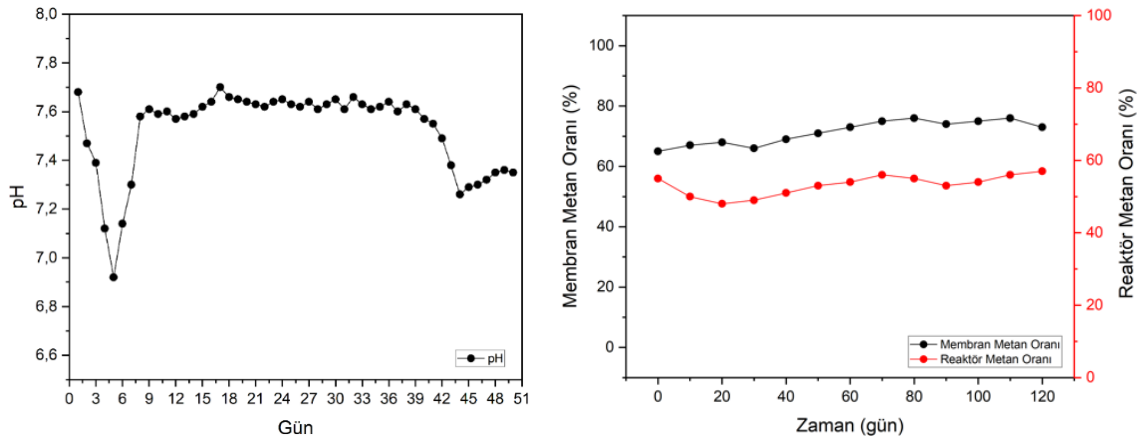
Biyogaz üretiminde sıcaklık, pH, basınç ve gübre özellikleri gibi etmenler önemli bir rol oynamaktadır. Ancak bu etkilere sıcaklık etmeni metan bakterilerinin yaşam döngüsünü ciddi derecede etkilemektedir. Bu sebeple mezofilik sıcaklık aralığında çalışması planlanan fermantörün sıcaklığı 35 °C’ de sabit tutulmuştur. Şekil 5’te verilen, Sorgun’un ve reaktörün sıcaklık değerlerine bakıldığında, çevre sıcaklığının değişken olması ve istenile sıcaklık değerinin altında bir sıcaklık görülmesinden dolayı reaktöre eklenen ısıtma sistemiyle ve otomasyonla reaktör sıcaklığı sabit kalmıştır.



Şekil 5. Sorgun’un ve reaktörün sıcaklık değerleri

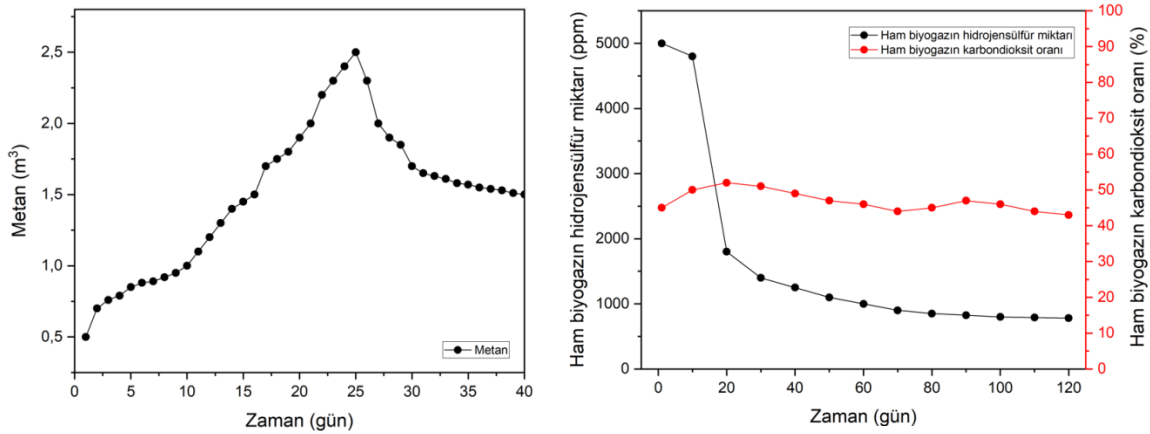
Reaktör içerisindeki bulamacın günlük pH ölçümü şekil 6’da verilmiştir. Hayvan gübresinin su ile karışımının ilk pH değeri 6.69 olarak ölçülmüştür. Reaktöre yüklenen bulamaca, kırk gün boyunca yükleme yapılmamış ve kırk birinci gün günlük 200 L atık beslemesi yapılmıştır. Fermantöre yüklemenin yapılmasından sonraki ilk bir haftalık süreçte pH seviyesi düşerek asidik bölgeye gelmiştir. Bu durumun sebebi sindirimin ilk olduğu zamanlarda mikroorganizmaların substratı hızlı parçalamasıyla organik asit oluşturmalarıdır. Daha sonraki günlerde reaktörün içerisindeki sindirim

devam etikçe ve amonyak konsantrasyonunun artmasıyla, azotun sindirimi nedeniyle pH artış göstermiştir. PH'nın 7.6 seviyelerine kadar artış göstermesinden sonra, reaksiyonlar daha stabil bir seviyede devam etmiştir.



Şekil 6. Substratın pH değişim grafiği ve biyogazın metan oranı

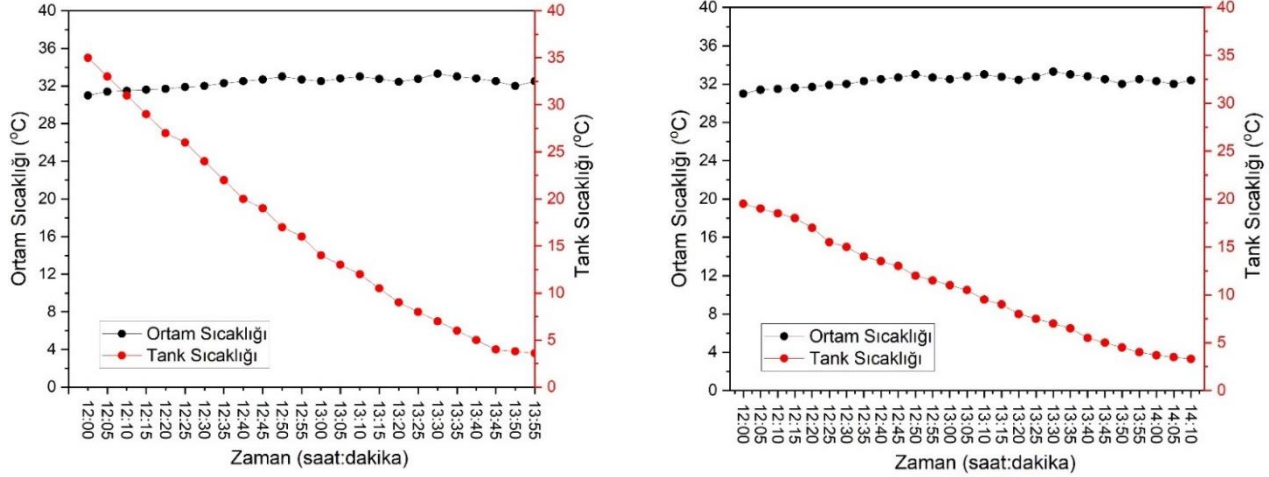
Ham biyogaz; metan (CH_4), karbondioksit (CO_2), azot (N_2), H_2S ve O_2 gibi gazlardan oluşmaktadır. Fermantasyon sonucu verimli kullanılacak biyogaz; yaklaşık %40-75 CH_4 , %25-60 CO_2 ve %2 kadarı hidrojen sülfür ve diğer gazlardan oluşmuş olmalıdır (Khanal, 2011). Şekil 6'da verilen reaktör ve membran içerisindeki biyogazın metan oranlarına bakıldığında ilk üretilen biyogazın metan oranı %55-58 seviyelerinden, filtrasyon işlemleriyle %65-68 seviyelerine çıkarılmıştır. Fermantöre alınan organik atık kırk günlük fermantasyonu sonucunda Şekil 7'de görüldüğü üzere toplamda 18.55 m^3 'lük bir gaz üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu değer, simülasyon verilerinde elde edilen değerden %20 daha az olmuştur. Buna sebep olarak, fermantasyon sürecinde reaktördeki kaçaklar, antibiyotik kullanımı veya hasta olan hayvanların dışkılarında bulunan yabancı maddelerin ve kimyasalların etkili olduğu düşünülmüştür. Bu olumsuz etkilerin kontrol altına alınmasıyla verimin daha da artırabileceğine inanılmaktadır.



Şekil 7. Günlük olarak üretilen metan miktarı ve H_2S - CO_2 miktarı

Deneylerde elde edilen biyogazın içerisindeki CO_2 , su hazneli bir depodan geçirilerek serbest haldeki CO_2 'nin bir kısmı tutulmuştur. Karbondioksit oranlarının Şekil 7'de görüldüğü üzere %45-42 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Biyogazın depolanmasından önce bu değerler %10 oranında filtrelenerek, CO_2 oranı %35-32 seviyelerine indirgenmiştir. H_2S 'nin arındırılması işlemi aktif karbon yöntemi kullanılmıştır. Biyogaz içindeki arındırılan H_2S bileşiği 1000 ppm seviyelerine kadar düşürülmüştür. İlk sağım soğutma deneyinde hayvanlardan alınan süt soğutma tankına alınmıştır. Soğutma tankı TS EN 13732 +A2 numaralı Türk Standardına göre her sağımdaki sütü $32 \text{ }^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı koşullarında en çok 2.5 saat içerisinde başlangıç sıcaklığından $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ ' ye soğutabilmelidir. Süt

soğutma makinesi ilk sağımda +35 °C’ deki 150 L sütü, tank içerisinde bulunan sıcaklık algılayıcısı ile tankın enerji tüketim verilerini kayıt altına alan wattmetre ile tank içerisindeki sütün +4 °C’ ye ulaşma süresi belirlenmiştir. Şekil 8 incelendiğinde +35 °C’ deki sütün, +4 °C’ ye düşmesi bir saat elli dakika sürmüştür ve bu değere ulaşmasından sonra beş dakika sonra ise termostat soğutmayı kapatmıştır.



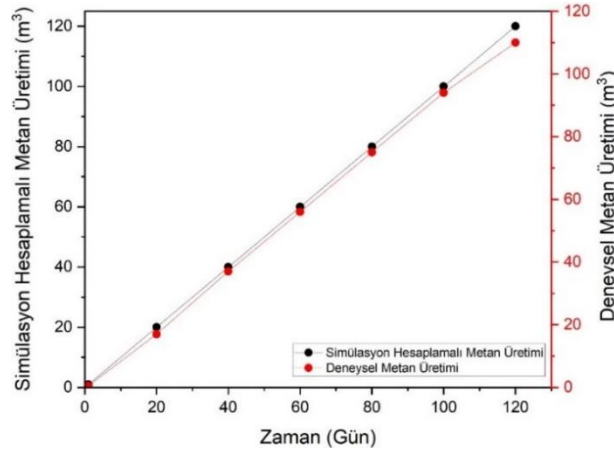
Şekil 8. Süt soğutma tankının 15.06.2022 tarihinde, ilk ve son sağımdaki sütün sıcaklık değişimi ve soğutma süresi

Süt soğutma tankının son sağımda denemesinde tank içerisindeki 19.5 °C’ deki 300 L sütün +4 °C’ ye ulaşması iki saat beş dakika sürmüştür ve beş dakika sonrasında da termostat soğutmayı kapatmıştır. Soğutmanın kesildiği bu sürede tank içerisindeki sütün sıcaklığı Şekil 8’de görüldüğü üzere 3.3 °C ölçülmüştür. Soğutma tankı deney süresince deneyin başlamasından itibaren otomatik çalışma konumunda on iki saat süresince bırakılarak bu süre sonundaki enerji tüketim değeri kaydedilmiştir. İlk ve son sağımda soğutma deneyinde sisteminin performansına ait sonuçlar Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Buhar sıkıştırımlı soğutma yöntemiyle süt soğutma performans ölçümleri

Performans Özellikleri	Birim	İlk Sağımda	Son Sağımda
4 °C’ye soğutma süresi	(saat, dakika)	1 saat 50 dakika	2 saat 5 dakika
Termostat kapatma süresi	(saat, dakika)	1 saat 55 dakika	2 saat
Enerji tüketimi	(kWh)	4.3	4.45
Maksimum güç tüketimi	(kW)	2.6	2.35
Ortalama güç tüketimi	(kW)	2.25	2.20
Özgül enerji ihtiyacı	(Wh/L)	29.16	

Simülasyon Çalışmasından Elde Edilen Veriler ile Deneysel Verilerin Karşılaştırılması



Şekil 9. İkinci deneysel çalışmaların metan üretiminin simülasyon ve deneysel karşılaştırması

Yaz ve sonbahar aylarında sıcaklıkların yüksek olması ve sistemdeki kaçak vs. eksiklerin giderilmesiyle elde edilen biyogaz miktarı, şekil 9’da görüldüğü üzere simülasyon verilerine yakın çıkmıştır. Ancak deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen biyogaz miktarının, matematiksel modelleme sonucunda hesaplanan biyogaz miktarına göre düşük çıkmasının sebepleri arasında, çevre şartlarındaki ani değişimlerde sistemin tepki süresi, fermantasyon sürecindeki etkenler ve hayvanların tedavi sürecinde aldıkları antibiyotik gibi sorunlar sayılabilir. Fakat geliştirilen otomasyon sistemi ile değişken çevre koşulları kontrol altında tutularak sistem üzerinde meydana gelebilecek aksaklıklar minimize edilmeye çalışılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada biyogaz enerjisi destekli buhar sıkıştırırmalı süt soğutma sistemi tasarımı ve performans değerlendirmesi, sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Simülasyon çalışmasından elde edilen veriler, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve deneysel çalışmalardan elde edilen metan üretimi verilerinin, simülasyon çalışmasından ortaya çıkan sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ortaya çıkan sonuçlar:

- I. Biyogaz enerjisi ile süt soğutma prosesi, ilk sağımda 38 °C’ deki 150 litre sütü +4 °C’ ye 1 saat 55 dakika süresinde soğutabilmiştir. Son sağımda ise 300 litre sütün ortalama 19.5 °C’ den 4 °C sıcaklığa ise 2 saat 5 dakika içerisinde ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu soğutma süresi, çiğ sütün uygun şekilde soğutma ve muhafazasını sağlayacak teknik ve işlevsel özellikler konusunda ulusal ve uluslararası platformlarda kabul edilmiş ve yayınlanmış olan TS EN 13732 numaralı Türk Standardı ve EN 13732 standardına göre her sağımdaki 32 °C ortam sıcaklığı koşullarında en çok 2.5 saat içerisinde başlangıç sıcaklığından +4 °C’ ye soğutabilme şartını sağlamıştır.
- II. +4 °C’ ye soğutulan süttten alınan numuneye, koloni sayımı yapılmış ve 2.1×10^4 koloni/ml ($\log_{10} 4,32$) tespit edilmiştir. Bu değer Gıda ve Hayvancılık Bakanlığının, hayvansal gıdalar için özel hijyen kuralları yönetmeliğinin çiğ süt hijyen şartlarına göre 30 °C’ de her mililitrede 300.000’den az koloni sayısına sahip olması şartını sağlamıştır.
- III. Reaktörün sıcaklığının sabit tutulması, metan üretimini sağlayan bakterilerin sıcaklık değişimlerine maruz kalması önlenmiş ve günlük metan üretimindeki dalgalanmaların önüne geçilmiştir.
- IV. Biyogaz yakıtlı süt soğutma sistemi, konvansiyonel süt soğutma sistemine kıyasla %54.37 oranında enerji tasarrufu sağlamıştır. Biyogaz üretim süreci için reaktörün enerji verimliliği ise yaklaşık %42.5 olarak bulunmuştur. Buhar sıkıştırırmalı süt soğutma sistemi için genel COP değeri ise 3.47 olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak geliştirilen buhar sıkıştırırmalı süt soğutma sistemi için elde edilen deneysel verilerin simülasyon verileriyle önemli ölçüde uyum sağladığı gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 3501 Kariyer Geliştirme Programı kapsamında, 120M772 proje numarasıyla desteklenmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Adekunle, K. F. & Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion, *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(3), 205. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- Atalay, H. (2011). *Soğutucu Akışkan ve Çevrimlerin Termodinamik ve Termofiziksel Modellenmesi* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir).
- Bhurat, S. S., Pasupuleti, S. R., Kunwer, R., Gugulothu, S. K., & Joshi, A. (2022). Technical challenges and opportunities for milk chilling unit based on vapor absorption refrigeration systems, *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.155>
- Breen, M., Murphy, M. D., & Upton, J. (2015). Development and validation of photovoltaic and wind turbine models to assess the impacts of renewable generation on dairy farm electricity consumption Paper presented at the 2015 ASABE Annual International Meeting. <https://doi.org/10.13031/aim.20152189379>
- Çengel, Y. A. ve Boles, M. A. (2013). Kapalı sistemlerin enerji analizi. A. Pınarbaşı, (Ed.), *Termodinamik mühendislik yaklaşımıyla* (s. 150-180) içinde. Yer:Ankara PalmeYayıncılık.
- Çoban, M. T. (2012). Biyogaz yakıtlı motor ile tahrik edilen süt soğutma sisteminin teorik modellenmesi. In: 1. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu, (s. 601-609). Balıkesir, Türkiye. Erişim adresi: <http://ikses12.balikesir.edu.tr/>
- De Jesús Vargas-Soplín, A., Prochnow, A., Herrmann, C., Tscheuschner, B., & Kreidenweis, U. (2022). The potential for biogas production from autumn tree leaves to supply energy and reduce greenhouse gas emissions—A case study from the city of Berlin, *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106598. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106598>
- Devi, M. K., Manikandan, S., Oviyapriya, M., Selvaraj, M., Assiri, M. A., Vickram, S., ... & Awasthi, M. K. (2022). Recent Advances in Biogas Production Using Agro-Industrial Waste: A Comprehensive Review Outlook of Techno-Economic Analysis, *Bioresource Technology*, 127871. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127871>
- Ekinci, K., Kulcu, R., Kaya, D., Yaldiz, O., Ertekin, C., & Öztürk, H.H., (2010). The prospective of potential biogas plants that can utilize animal manure in Turkey *Energy Exploration & Exploitation*, Vol. 28, no. 3, pp. 187-206. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.28.3.187>
- Kasera, S., Nayak, R., & Bhaduri, S. C. (2021). Performance analysis of solar milk refrigerator using energy efficient R290, *Case Studies in Thermal Engineering*, 24, 100855. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100855>
- Kaya, D., ve Öztürk, H. H. (2012). Biyogaz teknolojisi: üretim-kullanım-projeleme (s. 20-50) içinde. İstanbul: Umuttepe Yayıncılık.
- Khanal, S. K. (2011). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications*: John Wiley & Sons.
- Romaniuk, W., Mazur, K., Borek, K., Borusiewicz, A., Wardal, W. J., Tabor, S., & Kuboń, M. (2021). Biomass energy technologies from innovative dairy farming systems. *Processes*, 9(2), 335. <https://doi.org/10.3390/pr9020335>
- Sur, A., Sah, R. P., and Pandya, S. (2020). Milk storage system for remote areas using solar thermal energy and adsorption cooling, *Materials Today: Proceedings*, 28, 1764-1770. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.170>
- Thiangchanta, S., Khiewwijit, R., & Mona, Y. (2022). Environmental impact of the biogas production from dairy cows, *Energy Reports*, 8, 290-295. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.204>
- Torres-Toledo, V., Meissner, K., Coronas, A., & Müller, J. (2015). Performance characterisation of a small milk cooling system with ice storage for PV applications, *international journal of refrigeration*, 60, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.025>
- Tufaner, F. ve Avşar, Y. (2016). Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review, *International journal of environmental science and technology*, 13(9), 2303-2312. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1069-1>
- Vilar, M., Rodriguez-Otero, J., Sanjuán, M., Diéguez, F., Varela, M., & Yus, E. (2012). Implementation of HACCP to control the influence of milking equipment and cooling tank on the milk quality, *Trends in Food Science & Technology*, 23(1), 4-12. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.08.002>