

Yeşil Teknolojiler ve Enerji: Rüzgar, Güneş, Biyogaz

Editör
MELTEM KOŞAN

BİDGE Yayınları

Yeşil Teknolojiler ve Enerji: Rüzgar, Güneş, Biyogaz

Yazarlar: Dr. Öğr. Üyesi Himmet Erdi TANÜRÜN & Doç. Dr. Meltem KOŞAN & Doç. Dr. Kerim MARTİN

Editör: Doç. Dr. Meltem KOŞAN

ISBN: 978-625-372-325-5

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 03.12.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara



İçindekiler

H-Darrieus Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Tüberkül Yapısının Kapsamlı İncelenmesi	4
Güneş Destekli Isı Pompası Sistemlerinde PVT Kollektörlerin Kullanımına Genel Bir Bakış	37
Biyogaz Üretiminde Kullanılan Ön Arıtma Teknikleri: Güncel Bir Değerlendirme.....	69

H-Darrieus Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Tüberkül Yapısının Kapsamlı İncelenmesi

1. Giriş

Refah seviyesindeki artışın enerji talebini doğrudan artırdığı göz önünde bulundurulduğunda [1-2]küresel arz-talep dengesini sürdürülebilir kılmak amacıyla enerji çeşitliliğinin sağlanması hayati önem taşımaktadır. Günümüzde fosil yakıtlar enerji üretiminde dominant bir rol oynamakta olup [3-4], bu kaynakların kullanımı birçok olumsuz etkiye yol açmaktadır. Fosil yakıtların yanmasıyla açığa çıkan sera gazları, küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olmakta, ayrıca hava kirliliği ve insan sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır [5-6]. Ayrıca, fosil yakıtların sınırlı ve tükenbilir oluşu [7], enerji arzında kırılganlığa ve enerji güvenliğinin tehlikeye girmesine yol açmaktadır. Ekonomik açıdan ise, fosil yakıtların fiyat istikrarsızlığı ve dışa bağımlılık sorunları, enerji maliyetlerinde öngörülemez dalgalanmalara neden olmaktadır.

Bu olumsuz etkiler doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son yıllarda hızla artmaktadır. Özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar, çevresel sürdürülebilirliği sağlamada ve enerji güvenliğini artırmada önemli avantajlar sunmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin üretimdeki payının artmasının temel nedenleri arasında düşük karbon salımı, kaynaklarının sınırsız ve yerel [8] olması ve uzun vadede maliyet etkinliği sağlamaları yer almaktadır [9]. Yenilenebilir enerji

kaynakları, yalnızca çevresel faydalar sunmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji bağımsızlığını artırarak küresel enerji geçişine katkı sağlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi, bölgeden bağımsız üretim kapasitesi ve sürekli çalışma potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Rüzgâr türbinleri yakıt gerektirmeden çalışarak düşük operasyonel maliyet sunmakta ve karbon salımı yapmadıkları için çevreye zarar vermemektedir. Aynı zamanda, yerel kaynaklardan enerji sağladıkları için enerji bağımsızlığını artırmakta ve uzun ömürlü kullanım sunmaktadır. Bu özellikleri, rüzgâr enerjisini güvenilir ve ekonomik bir enerji kaynağı haline getirmektedir.

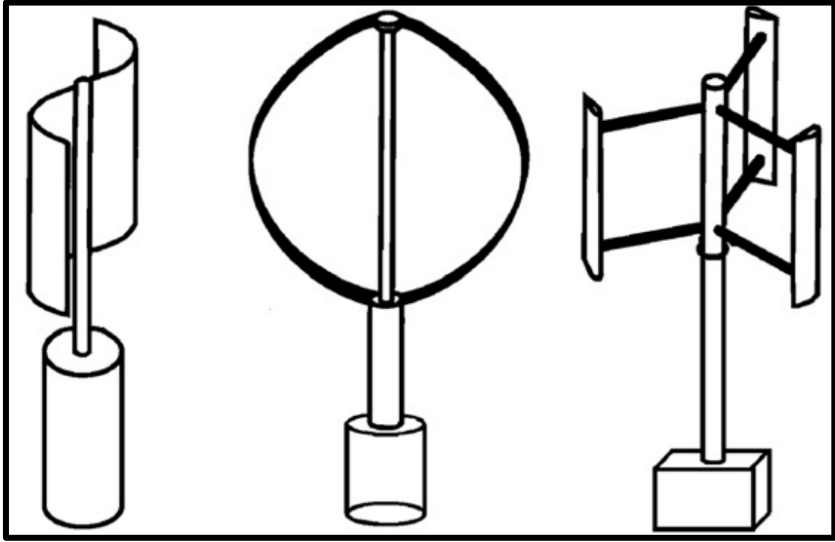


Şekil.1 Dikey eksenli ve yatay eksenli rüzgâr türbinlerini çatı tipi uygulamaları [10]

Şekil 1'de görüldüğü üzere [11], [12], ticari olarak en yaygın rüzgâr türbini türleri yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT) ve dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT) olarak ikiye ayrılmaktadır [13].

Ticari uygulamalarda YERT'ler tercih edilse de, bu türlerin bazı dezavantajları bulunmaktadır. YERT'ler, rüzgar yönüne göre sapma (yaw) hareketi gerektirdiğinden daha karmaşık kontrol sistemleri ve yüksek kule yapıları gerektirir; bu durum kurulum maliyetlerini artırmakta ve bakım işlemlerini zorlaştırmaktadır. Ek olarak, daha yüksek gürültü seviyeleri üretmekte ve yerleşim alanlarına yakın kullanımlarda dezavantaj oluşturmaktadır

DERT'ler ise her yönden rüzgâr alabilme yetenekleri [14-15] ve zemine daha yakın kurulabilmeleri sayesinde bakım ve kurulum maliyetlerinde avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, düşük gürültü seviyeleriyle öne çıkmaları, yerleşim alanlarına yakın bölgelerde kullanımını kolaylaştırmaktadır [16] Bu özellikler, DERT'leri küçük ölçekli, yerel ve kent içi uygulamalar için uygun bir seçenek haline getirmektedir. Şekil 2'de gösterildiği üzere, DERT'ler Savonius ve Darrieus türleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır [11, 17]. Savonius türbinler basit yapılarıyla dikkat çekerken, verim açısından sınırlıdır. Darrieus türbinler ise daha yüksek verimlilik sunarak çatı tipi kurulumlar ve yerel uygulamalar için avantaj sağlamaktadır. Bu verim avantajı, Darrieus türbinleri kentsel alanlarda ve düşük rüzgâr hızlarında bile etkin bir enerji üretim aracı haline getirmektedir.



Şekil. 2 Darrieus and Savonius Türbinlerinin Şematik gösterimi
[11]

2. Akış Kontrol Sistemleri

Darrieus türbinlerin bir çok avantajı olmasına rağmen yaygınlaşmasının önündeki en temel engellerden biri, ilk uyarı problemi sorunudur; türbinin kendi kendine çalışmaya başlaması için genellikle bir başlangıç momentine ihtiyaç duymasıdır. Ayrıca, YERT'lere göre daha düşük verimlilik sunması da Darrieus türbinlerin ticari uygulamalarda tercih edilme oranını sınırlamaktadır [12]. Bu dezavantajlar, özellikle yüksek verim gerektiren büyük ölçekli uygulamalarda Darrieus türbinlerin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu dezavantajları gidermek amacıyla literatürde, Darrieus türbinlerde akış kontrol tekniklerinin uygulanması üzerinde durulmaktadır. Akış kontrol yöntemleri, genel olarak pasif ve aktif kontrol teknikleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

Aktif akış kontrol yöntemleri, dış bir enerji kaynağı gerektirir ve bu nedenle ek maliyet ve bakım yükü getirir. Bu tekniklerin uygulanması, başlangıç momenti oluşturmak için dış uyartı sağlamayı gerektirir, bu da operasyonel maliyetleri artırabilir. Pasif akış kontrol yöntemleri ise herhangi bir dış enerji kaynağı gerektirmeden, türbin yapısına eklenen sabit unsurlarla aerodinamik performansı iyileştirmeyi amaçlar. Pasif kontrol yöntemlerinin avantajları arasında düşük maliyet, basit kurulum ve daha az bakım gereksinimi bulunmaktadır.

Literatürde, pasif kontrol tekniklerinin Darrieus türbinler üzerinde birçok olumlu etkisi olduğu gösterilmiştir. Darrieus türbinlerde, akış kontrolünü sağlamak için kullanılan pasif kontrol teknikleri arasında çeşitli kanat modifikasyonları bulunmaktadır. Bu tür modifikasyonlar arasında farklı flap (adaptive [18], gurney[19] ve slot vb.) çeşitleri, tüberkül yapılar, çukur, pürüzlülük [20] ve J-şekil [21-22] kanat yapıları gibi düzenlemeler yer almaktadır. Pasif kontrol yöntemleri, türbin performansını artırmada etkili olup herhangi bir dış enerji kaynağı gerektirmediği için maliyet açısından da avantaj sağlar. Literatürde, bu pasif kontrol tekniklerinin her biri, akışın düzenlenmesi ve verimliliğin artırılması amacıyla Darrieus türbinlerde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Bu pasif kontrol elemanları, düşük maliyetle uygulanabilir olmaları ve bakım ihtiyaçlarının az olması sebebiyle Darrieus türbinlerde verimlilik sorununu çözmede umut vadeden yaklaşımlar olarak görülmektedir.

3. Kambur Balinanın Yüzgeç Yapısının Tarihçesi ve Biyomimetik Tasarıma Etkisi

Şekil.3’de görülen Kambur balina (*Megaptera novaeangliae*), yaklaşık 15,6 metre uzunluğa ve 34 ton ağırlığa ulaşabilen bir dişsiz

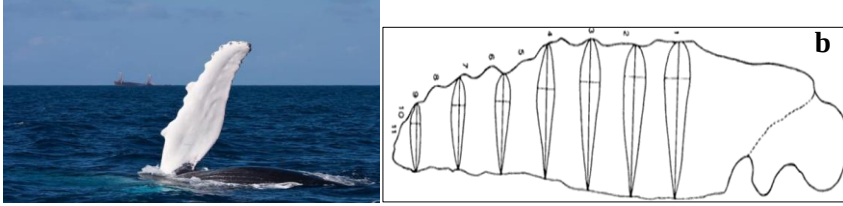
balina türüdür.[23-24]. Kambur balinaların avlanma sırasında sergiledikleri, 'baloncuk ağı' olarak bilinen akrobatik davranış, avlarını çember içine alarak yakalamalarına olanak tanır [25-26]. Balinanın yüzgeçlerinde bulunan tüberküller sayesinde, dönüş yeteneği artar ve yaklaşık 14,8 metrelik bir dönüş çapına ulaşabilir [23]. Yüzgeçleri, 9 metreden uzun olup, eliptik şekle ve yüksek bir en boy oranına sahiptir. Dalgalı hücum kenarı ise tipik olarak 10 veya 11 yuvarlak tüberkül içerir [27-28].



Şekil 3. Kambur balina [29].

Deniz biyoloğu Frank Fish, kambur balinaların Şekil. 4 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere yüzgeçlerindeki tüberkülleri fark etmiş ve bu yapılar üzerine ilk araştırmalarını başlatmıştır. Yüzgeçlerdeki tüberküllerin balinanın çevikliğini artırdığı gözlemi, bu biyomimetik yapıyı aerodinamik tasarımlara uyarlama fikrini doğurmuştur. Fish ve Battle [30], ölü bir kambur balina üzerinde yüzgeç morfolojisini detaylı bir şekilde incelemiş ve yüzgecin eliptik formda olduğunu, uzunluk eksenine göre 19°'lik bir süpürme açısına sahip olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, uç kısmına doğru daralan bu yüzgecin profili,

NACA 634-021 kanat profiline benzer bir yapıya sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüzgeçlerdeki bu tüberkül yapılarının balinanın manevra yeteneğini arttırdığı, akışın daha verimli kontrol edilmesini sağladığı ve bu sayede balinanın hızlı ve çevik hareketler yapabildiği gözlemlenmiştir.

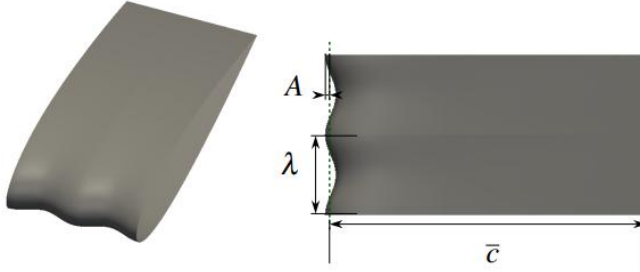


Şekil. 4 Kambur balinanın yüzgeç yapısının a) gerçek [31] ve b) şematik gösterimi[30].

Bu özellikler, bilim insanlarının dikkatini çekmiş ve tüberkül yapılarının aerodinamik uygulamalar için bir model olarak kullanılabileceği fikrini doğurmuştur. Bu biyomimetik yaklaşım, aerodinamik tasarımlar için yeni bir perspektif sunmakta ve tüberkül yapılarının verimliliği artırıcı etkilerini göstermektedir.

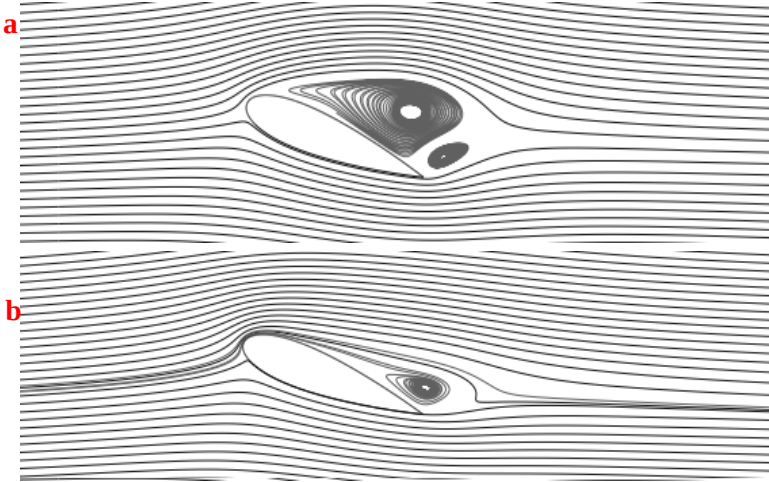
4. Tüberkül Kanat Modelinin DERT Uygulamaları

Daha önceki bölümde değinildiği üzere, tüberkül yapısı uzun zamandır aerodinamik araştırmalarda statik olarak incelenmiş ve performans üzerindeki olumlu etkisi geniş bir biçimde kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, tüberkül yapısının DERT'in dinamik koşulları olan tork ve güç performansına olan etkisi, son yıllarda araştırmacılar tarafından ele alınmaya başlamış ve literatürde hızla kendine önemli bir yer edinmiştir.



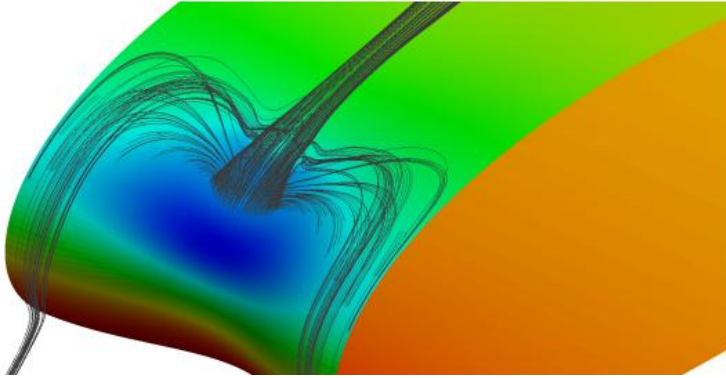
Şekil. 5 Tüberkül yapısının geometrik özellikleri [32]

Skillen ve ark., Şekil. 5’de görüldüğü üzere tüberkül hücum kenarına sahip bir NACA 0021 kanadı üzerindeki akışı, Large eddy simulation (LES) simülasyonları ile nümerik olarak incelenmiştir. Bu dalgalanmaların, aynı ortalama veter uzunluğuna sahip düz kanatla kıyaslandığında irtifa kaybı sonrası aerodinamik performansı artırdığı gözlemlenmiştir. Ortalama hız ve veter uzunluğuna dayalı Reynolds sayısı (RE) 120.000 olarak belirlenmiş ve hücum açısı 20° olarak ayarlanmıştır [32].



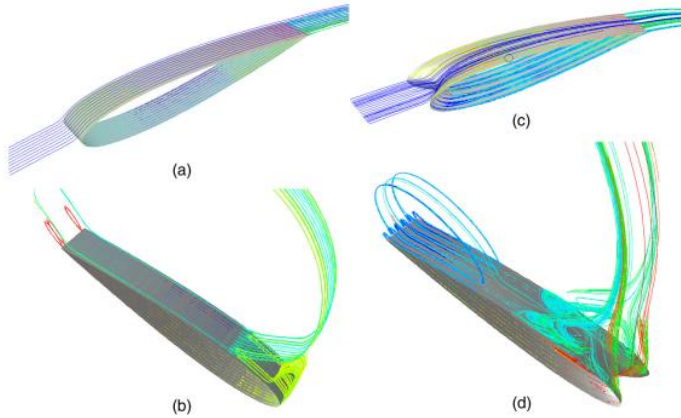
Şekil. 6 a) Düz kanat ve b) modifiyeli kanat modeli için [32].

Hücum kenarı tüberkül yapısı için 1.5% veter genliği (A) ve 21% veter dalga boyu (λ) kullanılarak, ortalama kaldırma kuvvetinde %36 artış ve sürüklenme kuvvetinde %25 azalma sağlanmıştır. Dalgalanmaların güçlü bir yan basınç gradyanı oluşturarak, düşük ataletli sınır tabaka akışını emiş tepe noktasına taşıdığı ve yüksek momentumlu akışın veter maksimum noktasından itibaren arkasındaki sınır tabakasını yeniden enerjiyle besleyerek ayrılmayı geciktirdiği Şekil.6’da gösterilmiştir. Bu performans artışının, Şekil. 7 gösterildiği üzere, standart NACA 0021 kanadına kıyasla ayrılma bölgesinin küçülmesiyle elde edildiği belirlenmiştir. Bu mekanizmanın, literatürde öne sürülen diğer fikirlerden ve düşük RE’de gözlemlenen davranıştan farklı olduğu, ancak bazı durumlarda Kelvin-Helmholtz kaynaklı mekanizmaların da etkili olabileceği belirtilmiştir. Ek simülasyonlar, bu mekanizmanın farklı geometrik parametrelerde ve mevcut RE’lerde tutarlı olduğunu, ancak aşağı akıştaki fiziksel detayların ve performans artışının büyüklüğünün değişiklik gösterebileceğini göstermiştir [32].



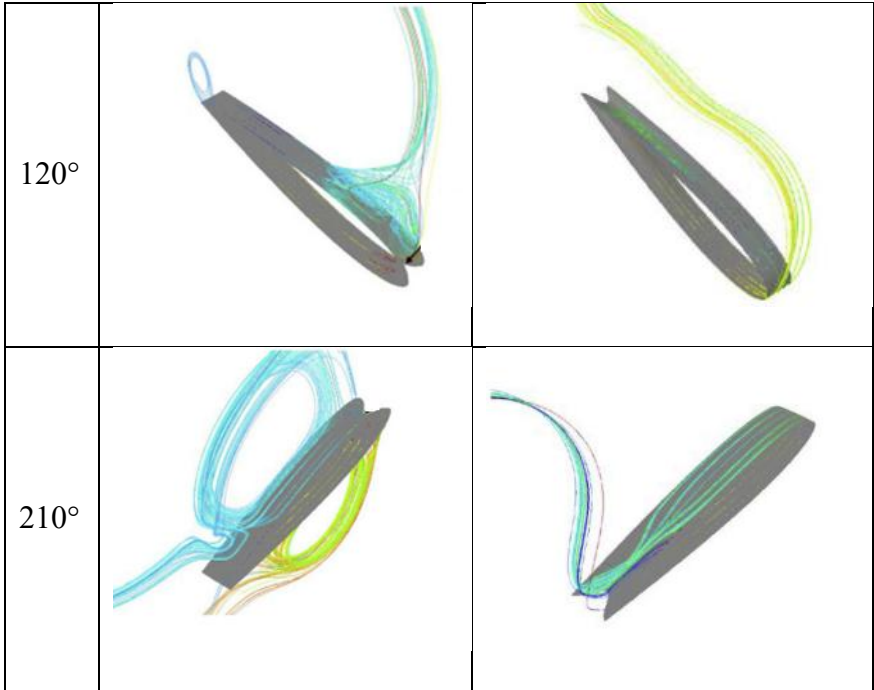
Şekil. 7 Zaman ortalamalı akış çizgileri ikincil akış özelliğini gösterimi [32].

Bai ve ark., NACA0015 kanat profiline sahip bir DERT kanadının performansını, $k-\omega$ kayma gerilmesi taşınım (SST) türbülans modeli ile nümerik olarak incelenmiştir. Tüberküllü hücum kenarına sahip modifiye kanadın itme kuvveti, düz kanada göre daha düşük olup %1–10 oranında ve 20–240 N aralığında azalma göstermiştir. Artan A ve azalan λ ile birlikte, hücum kenarında oluşan girdap yapısındaki değişiklik nedeniyle itme kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil. 8’de de görüldüğü üzere, dönme açısı 20° olduğunda, düz kanatta akış yüzeye tamamen yapışmış halde iken, 140° ’de hücum kenarında ayrılma meydana gelmiş ve kanat yüzeyinde yoğunlaşan girdaplar düşük itme kuvvetine yol açmıştır. Tüberküllü kanatta ise, 20° ’lik dönme açısında akış yüzeye yapışmış; ancak, 140° ’lik açıda hücum kenarı boyunca girdap hızının azalması, yüzeydeki basınç farkında azalma yaratmış ve itme kuvvetinde düşüşe neden olmuştur [33].



Şekil. 8. (a) 20° ve, (b) 140° için düz kanat, (c) 20° , ve (d) 140° için modifiyeli kanat için akım çizgileri [33]

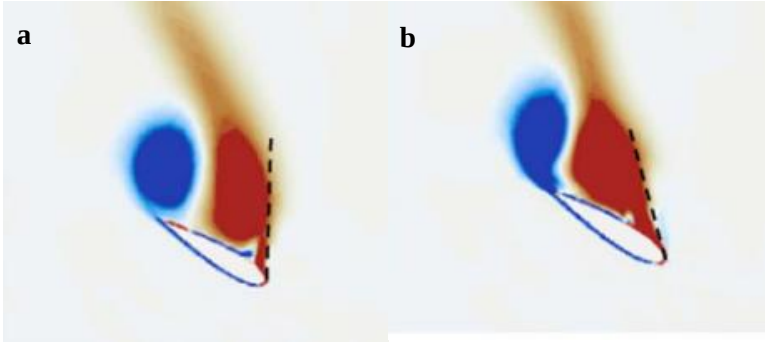
Sevinç ve ark., NACA 0015 kesitine sahip DERT kanadının sınır tabaka kontrolü, kambur balina yüzgecindeki tüberkül geometrisinin uygulanması ile incelenmiştir. Uç hız oranı (TSR) 2.12 için referans modelde güç katsayısının (C_p) doğrulamasında %1.05 bağıl hata ile uyum sağlanmıştır. Modifiye edilen kanatlarda C_p yaklaşık %54 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Sonuçlar, modifiyenin geometrinin irtifa kaybı eğiliminde olduğunu ve sınır tabaka kontrolünün performans iyileştirmede etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir [34].



Şekil. 9 120° ve 210° azimut açılarında tüberkül hücum kenarına veya tüberkül fırar kenarına sahip modifiyeli türbin kanatları üzerindeki akış çizgilerinin karşılaştırılması[35]

Lin ve ark., VAWT kanadının tüberkül arka kenar modifikasyonunun performansa etkisini incelemiştir. Tüberkül A ve λ artırıldığında, maksimum itme kuvvetinde %2.31'e, C_P ise %16.4'e varan artışlar sağlanmıştır. 0.4 m veter uzunluğunda, 0.016 m A ve 0.09 m λ ile optimal C_P elde edilmiştir. 90°-270° arasındaki azimut açılarında, tüberkül arka kenarda oluşan girdapların hücum kenarına doğru hareket ettiği ve burada düşük basınç bölgesi oluşturarak itme kuvvetini artırdığı gözlemlenmiştir. Tüberkül arka kenara sahip kanat, tüberkül hücum kenarlı kanada kıyasla girdap yapısını değiştirerek girdapların hücum kenarına taşımış ve burada daha yüksek basınç farkı oluşturarak itme kuvvetini artırmıştır. Şekil. 9'da, 120° ve 210° azimut açılarında, tüberkül arka kenara sahip kanadın itme kuvveti, tüberkül hücum kenarlı kanada göre daha yüksek bulunmuştur. Bu modifikasyon, girdapların kaymasını sağlayarak kaldırma kuvvetini ve kaldırma-sürüklenme oranını artırmıştır. Sonuç olarak, tüberkül arka kenar modifikasyonu, rüzgar türbini kanatlarında itme kuvvetini artırmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [35].

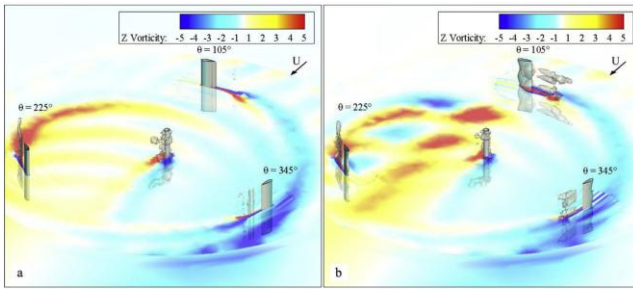
Goh ve ark., soğutma kulesinden boşaltılan rüzgar enerjisinden elektrik üreten DERT tasarımı geliştirmiştir. 4.37 m/s ortalama rüzgar hızında yapılan deneylerde, kanat açısının 0° ile 90° arasında ayarlanması sonucu en yüksek performansın 70° açıda, $A=0.1c$ ve $\lambda= 14.152$ mm elde edildiği belirlenmiştir. İç mekan laboratuvar testlerinde prototip, 372 devir/dakika ile 58.4 V gerilim üretmiştir; ancak, iç ortamda yapılan testler sırasında %2.06'lık hava akış hızında bir azalma gözlemlenmiştir [36].



Şekil. 10 150° azimut açısında a) düz kanat ve b) modifiyeli kanadın girdap dağılımı [37].

Wang ve Zhuang, düşük TSR’de çalışan DERT’in irtifa kaybını kontrol etmek amacıyla, kanatların hücum kenarına tüberkül ekleyerek performansı iyileştirmeyi hedeflemiştir. Çalışmada en iyi akış performansı, $A=0.025c$ ve $\lambda=0.33c$ olan durumda elde edilmiştir; bu durumda C_P %18.7 oranında artış gözlemlenmiştir. Pozitif tork katkısının büyük bir kısmı, 30° ile 160° azimut açıları arasında üretilmiş olup, 75°-160° aralığında önemli tork artışları kaydedilmiştir. İrtifa kaybının özellikle 90° ile 150° azimut açılarında etkili bir şekilde kontrol edildiği tespit edilmiştir. Akım çizgileri, irtifa kaybı başlamadan önce kanat emme ve basınç yüzeyleri arasında büyük bir basınç farkı oluştuğunu ve bu farkın pozitif torkun büyük kısmını sağladığını göstermektedir. İyileştirilmiş modelde maksimum kaldırma katsayısı (C_L) yaklaşık 1.95 olarak ölçülmüş, bu değer başlangıç modeline göre 0.25 daha yüksektir. Şekil 10’da görüldüğü üzere, iyileştirilmiş modelde akış ayrılması dikkate değer ölçüde azaltılmıştır, bu da kaldırma kuvvetinin korunmasına ve irtifa kaybının kontrol edilmesine katkı sağlamaktadır. Bu modifiye edilmiş DERT modeli, düşük rüzgar

hızlarında daha yüksek performans göstermiş ve 3 m/s hızında %50.1 oranında bir artış elde edilmiştir. Mevcut çalışmanın bulguları, hücum açısının büyük olduğu durumlarda akış ayrılmasının etkili bir şekilde azaltıldığını ve irtifa kaybının ertelendiğini göstermektedir. Bu hücum kenarı tüberkül stratejisinin, özellikle düşük TSR'larda, DERT'lerin irtifa kaybı açısını kontrol etmek için uygulanabilir ve etkili bir çözüm olduğu öne sürülmüştür [37].

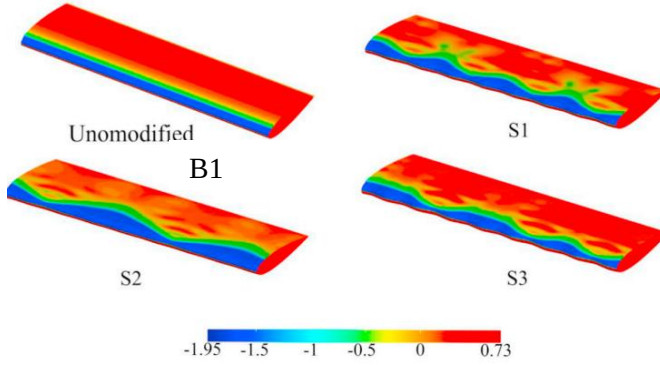


Şekil. 11 İzo yüzeyi ile (a) düz kanatlı DERT ve (b) tüberkül kanatlı DERT'in girdap yapısı gösterimi [38]

Lositaño ve ark., tüberküllü hücum kenarı modifikasyonunun DERT performansını olumsuz etkilediğini bulmuşlardır. Çalışmada, 5 kW gücündeki üç kanatlı H-rotor Darrieus türbini için yapılan simülasyonlarda, tüberkülün akışta büyük girdaplar üreterek sürüklemeyi artırdığı ve torku düşürdüğü gözlemlenmiştir. Şekil. 11'de 106° ile 180° azimut açıları arasında kanat arkasından, kanat vetere boyutunda büyük girdapların oluşması sonucu, $-3.59 \text{ Nm}'ye$ kadar negatif tork değerleri kaydedilmiştir. Standart DERT modeli rüzgar enerjisinin 41.6 W üretirken, tüberkül modifikasyonlu model yalnızca 9.28 W güç üretmiştir. Bu durum, tüberkül modifikasyonunun, kanat arkasındaki sürüklemeyi artıran ve akışın

düzenli ilerlemesini engelleyen büyük girdaplar oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. 180° 'den sonrası iki kanat tipi benzer tork ve C_L değerlerine ulaşsa da, tüberkül modifikasyonlu kanadın akış alanındaki girdap yapısının çarpıcı şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, üç kanatlı yapı nedeniyle her bir tüberkül kanadı, kendisinden önce gelen kanadın oluşturduğu türbülansın etkisinde kalmakta, bu durum türbülansın dağılamadan devam etmesine ve performansın daha fazla düşmesine yol açmaktadır [38].

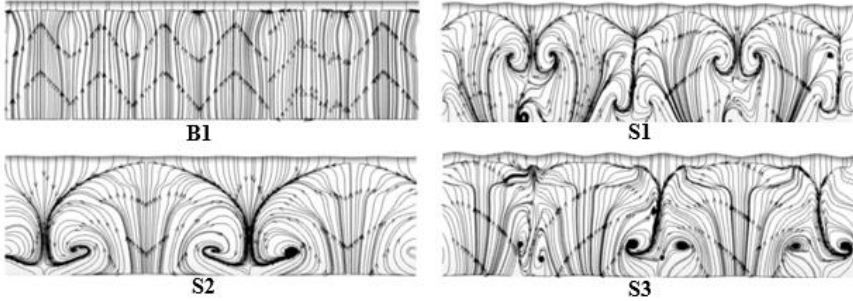
Lokesh ve ark., hücum kenarında tüberküllerine sahip Darrieus tipi DERT farklı TSR'de ve kanat sayılarında dinamik davranışını deneysel olarak analiz etmişlerdir. Düşük TSR'de dört kanatlı türbin, üç ve beş kanatlı türbinlere kıyasla %15 daha az girdap kaynaklı titreşim sergilerken, yüksek TSR'de ise üç kanatlı türbin en düşük titreşim genliğine ulaşmıştır [39].



Şekil. 12 Farklı kanat konfigürasyonlarında, 18° hücum açısında yüzeydeki basınç dağılımı [40]

Yan ve ark., DERT için hücum kenarı tüberküllerinin akış ayrılmasını kontrol etme etkilerini kapsamlı bir sayısal çalışmayla incelemiştir. Çalışmada, üç farklı λ ve A içeren beş farklı tüberkül

hücum kenarı modelini nümerik olarak analiz edilmiştir. Hücum kenarı tüberküllerinin, özellikle irtifa kaybındaki ve sonrasındaki koşullarda kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini olumlu yönde değiştirdiği ve DERT'lerin verimini artırdığı bulunmuştur. Şekil. 12'de, 18° hücum açısında tüberküllü ve referans kanatlardaki yüzey basınç dağılımları gösterilmiş olup, tüberllü kanatlarda düşük basınç alanlarının dalgalı ve daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir. En iyi performans, veter uzunluğunun %1'i A ve %2.5'i λ sahip tüberkül yapısında elde edilmiştir. Şekil. 13'de ise, S1 ve S2 modellerindeki akış ayrılmasının dağılımı gösterilmiştir; özellikle S1'de T2 diliminde laminar akışın daha geniş bir bölgeyi kapladığı, ayrılma öncesi daha bağlı bir akış yapısına sahip olduğu görülmüştür. Hücum kenarı türberküllerinin irtifa kaybı açısını geciktirdiği ve kanadın emme yüzeyinde uyumlu dalgalı akış yapıları oluşturduğu tespit edilmiştir. Tipik irtifa kaybı koşullarının baskın olduğu düşük TSR'lerde C_P 'de önemli artış sağlanmıştır. Bu çalışma, tüberkül A 'nın λ 'ya daha önemli olduğunu, hücum kenarı tüberküllerinin DERT performansını iyileştirmede etkili bir pasif akış kontrol yöntemi sunduğunu göstermektedir [40].



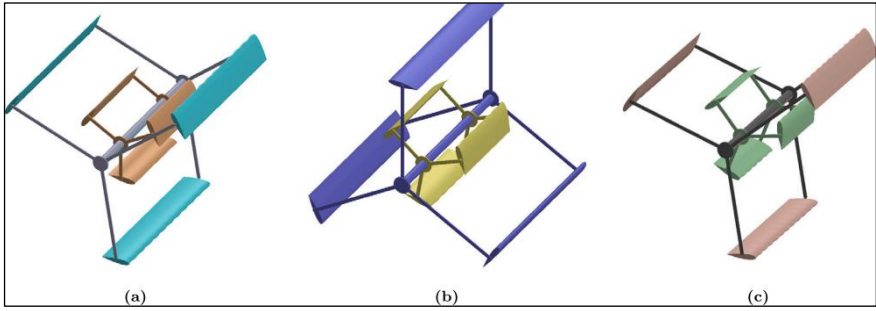
Şekil. 13. 16° hücum açısında tüberküllü ve düz kanatların emme yüzeyi üzerindeki akış çizgileri [40].

Hesketh ve ark., hücum kenarı tüberküllerinin DERT kanatlarına uygulanmasının, özellikle düşük TSR’lerde irtifa kaybı sonrası hücum açılarında akış ayrılmasını geciktirerek, pik ve ortalama güç çıktısında önemli bir iyileşme sağladığını göstermiştir [41].

Sridhar ve ark., dört farklı hücum kenarı tüberkül yapısının DERT üzerindeki irtifa kaybı ve aeroakustik etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Tüberkül eklenmesi, %28 daha yüksek C_p ve maksimum C_L ’de %14 artış sağlamıştır. T2 ($A=0.025c$ ve $\lambda =0.5c$) modelinde, 70° – 160° azimut açılarında akış yalnızca çukur bölgelerinde ayrılırken, tepe bölgelerinde yüzeye bağlı kalmış ve böylece daha yüksek tork ve güç üretilmiştir. En yüksek performans, 2.5 TSR’de büyük λ ve düşük A kombinasyonu ile elde edilmiştir. Düz modele kıyasla, T2 modelinde akış ayrılması firar kenarına doğru kaymış ve irtifa kaybı sırasında anlık sürüklenme katsayısında %28 düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, T2 modelinde düşük ve orta frekanslarda gürültü yayılımında %20 ve %12 azalma sağlanmıştır. Akış çizgileri, tüberküllerin akış yapısını tepe ve çukur bölgelerinde değiştirerek lokal olarak akışı güçlendirdiğini ve daha yüksek C_p değerlerine ulaşıldığını göstermiştir [42].

Gonçalves ve ark., DERT performansını iyileştirmek için hücum kenarı tüberkül etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerde, 5.5 m/s ile 9 m/s arasındaki rüzgar hızlarında modifiye edilen türbinin C_p ’si %20 ila %46 artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Tüberkül kanat geometrisi ($\lambda = 1/6c$; $A = 0.008c$) özellikle başlangıç performansını artırmış; türbinin çalışmaya başlayamadığı rüzgar hızı 7 m/s’den 5.5 m/s’ye düşürülmüştür ve maksimum hızına ulaşma süresi yaklaşık yarı yarıya azalmıştır. 5.5 m/s ile 6.5 m/s arasında,

modifiye edilen türbinin tüm TSR aralığında yaklaşık %40 daha yüksek zirve C_p gösterdiği tespit edilmiştir. 7 m/s üzerinde, performans kazançları yalnızca $\lambda > 1$ olduğunda fark edilmiş ve maksimum C_p artışı 9 m/s'de %20'ye kadar düşmüştür. Sonsuz kanat yaklaşımı, kanat uç girdapları gibi üç boyutlu etkilerin eksikliğinden dolayı rüzgar tüneline elde edilen verim artışlarını tahmin edememiştir, ancak parametrik çalışmalar etkin hücum kenarı geometrisini belirlemekte başarılı olduğunu gözlemlemişlerdir [43].

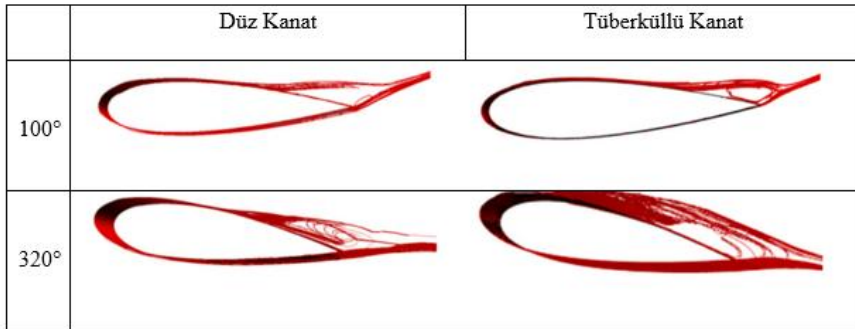


Şekil. 14 a) Dış tüberküllere sahip hibrit rüzgar türbini, b) İç tüberküllere sahip hibrit rüzgar türbini, c) Hem dış hem iç tüberküllere sahip hibrit rüzgar türbini gösterimi [44].

Ahmad ve Zafar, hücum kenarına tüberküller eklenmiş hibrit DERT tasarımının performans üzerindeki etkilerini sayısal ve deneysel analizlerle incelemiştir. Önerilen hibrit DERT, 0.475'lik en yüksek C_p TSR=3'te elde etmiş ve düşük (TSR=1-2.1) ile yüksek (TSR=4.1-5) TSR'lerde hem mevcut hibrit modelden hem de H-Rotor DERT'lerde daha iyi performans göstermiştir. Şekil. 14'da gösterilen türbin modelleri, farklı tüberkül konfigürasyonlarını test etmek için geliştirilmiş olup, dış kanatlarda (Şekil 14.a), iç kanatlarda (Şekil 14.b) ve hem dış hem iç kanatlarda (Şekil 14.c) tüberküllerin etkileri analiz edilmiştir. Dış tüberküllerin düşük TSR

değerlerinde, iç tüberküllerin ise yüksek TSR değerlerinde performansı artırdığı gözlemlenmiştir. Hibrit tasarımın, tüm azimut açılarında pozitif statik tork katsayıları sergilemesi, kendi kendine başlama yeteneğini desteklemektedir ve maksimum statik tork katsayısı 0.319 olarak kaydedilmiştir. Test sonuçları, düşük rüzgar hızlarında güç üretimi için hibrit türbinin büyük bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur [44].

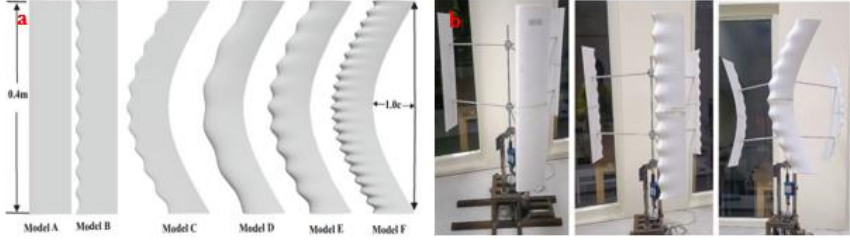
Prakash ve ark., kambur balina yüzgeçlerinden ilham alınarak H-tipi DERT performansını artırmak amacıyla hücum kenarına tüberküller eklemiştir. Subsonik rüzgar tüneline yapılan deneylerde, tüberküllü modelin 7 m/s hızda %16.66 daha yüksek tork ve %25 daha yüksek C_p sergilediği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, hücum kenarı tüberkül modifikasyonlarının torku artırarak düz kanat profillerine göre daha yüksek enerji üretimi sağladığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, şebekeden bağımsız güç uygulamaları için bu tasarımın potansiyelini de ortaya koymaktadır [45].



Şekil. 15 TSR 2.1'de Düz Model ve En İyi Tüberkül Konfigürasyonu Akış Çizgisinin gösterimi [46]

Hassan ve ark., DERT'in hücum kenarı tüberküllerinin güç performansına etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Tüberkülün A'sı, λ 'ya kıyasla güç performansını daha fazla etkilediği ve tasarım koşullarında düşük A -yüksek λ 'nın enerji verimliliğini artırdığı, buna karşın tasarım dışı koşullarda yüksek A -düşük λ 'nın daha etkili olduğu bulunmuştur. Şekil. 15'de görüldüğü üzere, hücum açısındaki artışla firar kenarından kaynaklanan akış ayrılması gözlemlenmiş, bu durum irtifa kaybı ile birlikte moment kaybına neden olmuştur. Tasarım koşullarında tüberküller, DERT performansını başlangıç modeline göre %13.55 oranında düşürürken, tasarım dışı koşullarda %55 oranında artırmıştır. Tüberkül eklemenin düşük güç aralıklarında ve düşük rüzgar hızlarına sahip kent ile kırsal alanlar arasında kalan ortamlarda etkin bir enerji çözümü sunduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, tasarımın karmaşıklığı üretim maliyetlerini artırabilmektedir. Bu araştırma, DERT'lerde tüberkül kullanımına ilişkin literatürdeki çelişkileri ele almış ve farklı TSR koşullarında tüberkül parametre seçimi için yönergeler sunmuştur. Tüberkül konfigürasyonlarının tasarım dışı koşullarda performansı artırdığı göz önüne alındığında, DERT tasarımcıları tüberkül parametrelerini ekonomik etkilerini de gözетerek belirleyebilirler [46].

Zulkefli ve ark., tüberkül eklenmiş NACA 4415 kanatların, geleneksel kanatlara kıyasla H-rotor Darrieus DERT'lerin ortalama güç çıktısını %27, torku %4, tork katsayısını %10 ve hız oranını %15 artırdığını göstermiştir [47].



Şekil. 16 a) Düz Kanat ve 5 Farklı Modifiyeli Kanat ve B) Bunların Türbine Uyarlanmış Hali [48].

Prakash ve ark., kambur balina yüzgeçlerinden ilham alınarak hücum kenarına tüberkül eklenmiş eğimli kanat tasarımının Darrieus tipi DERT performansını iyileştirdiğini deneysel olarak ortaya koymuştur. Şekil. 16’da sunulan test düzeneğinde elde edilen veriler doğrultusunda, yüksek A/c oranı olan 0.5 ile tasarlanan Model F, $TSR=2$ ’de %35’lik bir C_P ve 7 m/s rüzgar hızında 0.24 Nm maksimum tork sağlayarak en iyi performansı göstermiştir. Hücum kenarında daha yakın aralıkla yerleştirilen çok sayıda tüberkül, aerodinamik verimliliği önemli ölçüde artırmıştır. Kalın kanat profiline sahip modellerin, ince aerofoil tasarımlarına kıyasla daha iyi performans gösterdiği, bu artışın biyomimetik tüberkül eklemeleriyle daha da belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Çalışmada, simetrik ve eğimli kanat profillerine uygulanan tüberkül eklemesinin C_P ve tork değerlerinde dikkate değer bir iyileşme sağladığı belirtilmiştir [48].

Joseph ve ark., DERT’in kanatlarında irtifa kaybını azaltmak amacıyla hücum kenarı tüberküllerinin etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, sinüzoidal ve üçgen tüberküllerle modifiye edilmiş kanatların, temel modele göre daha düşük irtifa kaybı açısı ve daha düşük maksimum normal kuvvet (C_N) sergilediği

bulunmuştur. Tüberküller, özellikle düşük frekanslarda histerezis kaybını %77'ye kadar azaltarak türbin verimliliği ve yapısal ömrü artırmada faydalı bulunmuştur. En yüksek frekans olan $k=0.065$ durumunda bile, tüberküller histerezis kaybını ortalama %38 oranında azaltmıştır. Artan A/λ oranı, histerezisi daha da azaltırken düşük normal kuvvet C_N üretmiştir; $A/\lambda=0.5$ olan tüberkül konfigürasyonu genel performansta en iyi sonuçları vermiştir. Sinüzoidal tüberküller, üçgen tüberküllere göre %10 daha fazla histerezis azaltımı sağlamış ve daha düzgün C_N karakteristiği sergilemiştir. Bu deneysel yöntem, salınımlı bir düzenele güç dengesi kullanarak DERT kanatlarının irtifa kaybı sürecini analiz etmenin uygun maliyetli bir yolunu sunmaktadır. Sonuç olarak, tüberkül eklemesi histerezisi azaltarak DERT'lerin verimliliğini ve kullanım ömrünü artırdığını belirlenmiştir [49].

Vel ve Pillai'nin çalışması, DERT yapısal titreşim kontrolünü inceleyerek, tüberkül profil kanatların etkisini deneysel olarak analiz etmiştir. Deneyler, 5 m/s ila 15 m/s arasında değişen rüzgar hızlarında gerçekleştirilmiş ve tüberküllü kanatlar sayesinde titreşimlerde belirgin azalmalar elde edilmiştir. Orta hızlarda yanal titreşimlerde %33.7, yüksek hızlarda ise %62.54 azalma sağlanmıştır. Düşük rüzgar hızlarında ileri-geri titreşimlerde %23'lük, orta hızlarda %30.64'lük ve yüksek hızlarda %57.34'lük bir azalma gözlenmiştir. Tüberkül ile donatılan türbinin frekans spektrumu analizinde, düşük, orta ve yüksek hızlarda çift yönlü titreşim kontrolü sağlanmış ve yan-yana titreşimlerde %22, %33, %52'lik azalma elde edilmiştir. Yapısal tepki frekanslarında gözlemlenen azalmaların, aerodinamik dengesizliklerin azalmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Tüberküllü DERT,

özellikle $V_{\infty}=15$ m/s hızda irtifa kaybı açısı kaynaklı titreşimlerin azaldığı görülmüştür. Yapısal frekanslar ve dönme frekansları arasındaki ilişki doğrulanmış, tüberkül kanatları geleneksel düz kanatlar yerine kullanmanın pasif titreşim azaltımı için etkili bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır [50].

5. Sonuçlar

Bu çalışmalardan elde edilen bulgular, tüberküllerin DERT üzerindeki potansiyel etkilerinin karmaşık ve çok boyutlu olduğunu göstermektedir. Tüberküller, doğadan ilham alınarak geliştirilen pasif bir akış kontrol yöntemi olarak, özellikle düşük TSR'lerde ve dinamik irtifa kaybı koşullarında DERT performansını optimize etmek için umut vaat etmektedir. Ancak bu etkiler, tasarım parametrelerine, tüberkülün boyutlarına ve konumlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Tüberküllerin, aerodinamik yüzeylerde akış ayrılmasını geciktirdiği ve dolayısıyla kanatların verimliliğini artırdığı yönündeki önceki çalışmalar, DERT'lere uygulanabilirliği açısından da önemli bir temel sunmaktadır.

Skillen ve ark. [32] tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, tüberkül yapıların özellikle düşük RE'de performans üzerinde belirgin bir iyileştirme sağladığını ortaya koymuştur; ancak aynı performans iyileştirmesi yüksek hızlarda veya daha yüksek RE'de görülmemektedir. Bu durum, tüberkül etkisinin sınır tabaka davranışıyla sınırlı kaldığını ve performansın λ -A oranlarına bağlı olarak farklılaştığını göstermektedir. Örneğin, 1.5% veter genliği ve 21% dalga boyu kombinasyonu, akış ayrılmasını azaltırken sürüklenme kuvvetini de önemli ölçüde düşürmüştür. Ancak bu konfigürasyonun optimize edilmemiş kanat tasarımlarında benzer

sonuçları veremeyebileceği, akış yönündeki değişikliklere karşı daha hassas hale gelebileceği gözlemlenmiştir.

Tüberküllerin DERT kanatlarında özellikle yüksek açısız hızlarda, yani tipik irtifa kaybı açısı koşullarında etkili olduğu da öne çıkan bir sonuçtur. Lin ve ark. [35], bu etkiyi detaylandırarak, tüberküllerin girdap oluşumunu kanat yüzeyinde belirli bir sırada kontrol ettiğini ve girdapları hücum kenarına doğru yönlendirerek düşük basınç bölgeleri yarattığını göstermiştir. Bu durumun, belirli açılarda pozitif tork üretimine katkı sağlayarak genel performansı artırdığı tespit edilmiştir. Ancak Lositano ve Danio'nun [38] çalışmasında olduğu gibi, akış yapısındaki bu değişiklikler her zaman olumlu sonuçlanmamaktadır; zira büyük girdaplar yüksek hızda negatif tork oluşturarak sistemin genel dengesini bozabilmektedir.

Genel olarak, tüberküllerin DERT kanatlarına uygulanmasıyla sağlanan iyileştirmeler, belirli tasarım koşulları ve uygulama alanları için uygun görünmektedir. Tüberküllerin düşük TSR koşullarında performansı artırdığı, ancak yüksek hızlarda veya akış hızının yüksek olduğu koşullarda performans üzerinde negatif etkiler yaratabileceği anlaşılmaktadır. Bu durum, DERT tasarımında tüberkül uygulamalarının dikkatli bir optimizasyon gerektirdiğini göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, tüberkül parametrelerinin ve geometrik özelliklerinin hassas bir şekilde optimize edilmesi, ayrıca tüberkül uygulamasının hava akışı ve enerji dönüşüm verimliliği üzerindeki etkilerinin daha detaylı analiz edilmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] H. E. Tanürün, A. G. Akın, and A. Acır, “Rüzgâr Türbinlerinde Kiriş Yapısının Performansa Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi,” *Politeknik Dergisi*, vol. 24, no. 3, pp. 1219–1226, Sep. 2021, doi: 10.2339/POLITEKNIK.845804.
- [2] H. E. Tanürün, A. G. Akın, A. Acır, and Şahin, “Experimental and Numerical Investigation of Roughness Structure in Wind Turbine Airfoil at Low Reynolds Number,” *International Journal of Thermodynamics*, vol. 27, no. 3, pp. 26–36, Sep. 2024, doi: 10.5541/IJOT.1455513.
- [3] S. Seker and N. Aydin, “Assessment of hydrogen production methods via integrated MCDM approach under uncertainty,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 5, pp. 3171–3184, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.07.232.
- [4] S. Kuşkaya and F. Bilgili, “The wind energy-greenhouse gas nexus: The wavelet-partial wavelet coherence model approach,” *J Clean Prod*, vol. 245, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118872.
- [5] W. H. Chen, C. Y. Chen, C. Y. Huang, and C. J. Hwang, “Power output analysis and optimization of two straight-bladed vertical-axis wind turbines,” *Appl Energy*, vol. 185, pp. 223–232, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.076.
- [6] H. Ishaq, I. Dincer, and C. Crawford, “A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 62, pp. 26238–26264, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.11.149.

- [7] H. E. Tanürün, İ. Ata, M. E. Canlı, and A. Acır, “Farklı Açıklık Oranlarındaki NACA-0018 Rüzgâr Türbini Kanat Modeli Performansının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi,” *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 2, pp. 371–381, Jun. 2020, doi: 10.2339/POLITEKNIK.500043.
- [8] HE Tanürün, “Comprehensive review of the effect of flap technologies in H-Darrieus vertical axis wind turbines,” *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, doi: 10.5505/pajes.2024.09147.
- [9] J. Li, G. Wang, Z. Li, S. Yang, W. T. Chong, and X. Xiang, “A review on development of offshore wind energy conversion system,” *Int J Energy Res*, vol. 44, no. 12, pp. 9283–9297, Oct. 2020, doi: 10.1002/ER.5751.
- [10] D. Ayhan and A. Sağlam, “A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 1040–1049, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2011.09.028.
- [11] S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Evaluation of different turbine concepts for wind power,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1419–1434, Jun. 2008, doi: 10.1016/J.RSER.2006.05.017.
- [12] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal, and J. E. Quaiçoe, “Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review,” *Appl Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823–1835, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.APENERGY.2009.02.017.

- [13] H. E. Tanürün and A. Acır, “Investigation of the hydrogen production potential of the H-Darrieus turbines combined with various wind-lens,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 55, pp. 23118–23138, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.04.196.
- [14] R. Farzadi and M. Bazargan, “3D numerical simulation of the Darrieus vertical axis wind turbine with J-type and straight blades under various operating conditions including self-starting mode,” *Energy*, vol. 278, p. 128040, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128040.
- [15] H. E. Tanürün, “Taguchi Yöntemiyle Sağlamlık Oranının Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Performansına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi,” *Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM)*, vol. 2023, no. 2, pp. 355–372, 2023, doi: 10.55546/jmm.1295748.
- [16] M. Maizi, M. H. Mohamed, R. Dizene, and M. C. Mihoubi, “Noise reduction of a horizontal wind turbine using different blade shapes,” *Renew Energy*, vol. 117, pp. 242–256, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.RENENE.2017.10.058.
- [17] A. F. Kaya, H. E. Tanürün, and A. Acır, “Numerical Investigation of Radius Dependent Solidity Effect on H-Type Vertical Axis Wind Turbines,” *Politeknik Dergisi*, vol. 25, no. 3, pp. 1007–1019, Oct. 2022, doi: 10.2339/POLITEKNIK.799767.
- [18] H. E. Tanürün, “Improvement of vertical axis wind turbine performance by using the optimized adaptive flap by the Taguchi method,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 46, no. 1, pp. 71–90, Dec. 2024, doi: 10.1080/15567036.2023.2279264.

- [19] R. Çakıroğlu, H. E. Tanürün, A. Acır, F. Üçgül, and S. Olkun, “Optimization of NACA 4412 augmented with a gurney flap by using grey relational analysis,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 1–18, Mar. 2023, doi: 10.1007/S40430-023-04089-X/FIGURES/13.
- [20] H. E. Tanürün, A. G. Akin, A. Acır, and Şahin, “Experimental and Numerical Investigation of Roughness Structure in Wind Turbine Airfoil at Low Reynolds Number,” *International Journal of Thermodynamics*, vol. 27, no. 3, pp. 26–36, Sep. 2024, doi: 10.5541/IJOT.1455513.
- [21] S. Al Hamad, O. Habash, A. Hasan, and R. S. Amano, “Effect of the J-Shaped Wind Turbine Airfoil Opening Ratio and Thickness on the Performance of Symmetrical Airfoils,” *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, vol. 144, no. 5, May 2022, doi: 10.1115/1.4053743/1134917.
- [22] M. Zamani, M. J. Maghrebi, and S. R. Varedi, “Starting torque improvement using J-shaped straight-bladed Darrieus vertical axis wind turbine by means of numerical simulation,” 2016. doi: 10.1016/j.renene.2016.03.069.
- [23] S. M. A. Aftab, N. A. Razak, A. S. Mohd Rafie, and K. A. Ahmad, “Mimicking the humpback whale: An aerodynamic perspective,” *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 84, pp. 48–69, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2016.03.002.
- [24] J. H. Johnson and A. A. Wolman, “The Humpback Whale, *Megaptera novaeangliae*,” *Marine Fisheries Review*, vol. 46, pp. 30–37, 1984.

[25] F. Fish, P. Legac, T. Wei, and T. Williams, “Vortex mechanics associated with propulsion and control in whales and dolphins,” *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, vol. 150, no. 3, pp. S65–S66, Jul. 2008, doi: 10.1016/J.CBPA.2008.04.077.

[26] L.K. Winn and H.E. Winn, *Wings in the Sea: The Humpback Whale*, 1st ed. Lebanon, New Hampshire, United States: University Press of New England, 1985.

[27] F. E. Fish, L. E. Howle, and M. M. Murray, “Hydrodynamic flow control in marine mammals,” *Integr Comp Biol*, vol. 48, no. 6, pp. 788–800, Dec. 2008, doi: 10.1093/ICB/ICN029.

[28] F. E. Fish and G. V. Lauder, “Passive and active flow control by swimming fishes and mammals,” *Annu Rev Fluid Mech*, vol. 38, no. Volume 38, 2006, pp. 193–224, Jan. 2006, doi: 10.1146/ANNUREV.FLUID.38.050304.092201/CITE/REFWORK S.

[29] C. Papadopoulos, V. Katsiadramis, and K. Yakinthos, “Numerical 3D study on the influence of spanwise distribution of tubercles on wings for UAV applications,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 304, p. 02014, 2019, doi: 10.1051/MATECCONF/201930402014.

[30] F. E. Fish and J. M. Battle, “Hydrodynamic design of the humpback whale flipper,” *J Morphol*, vol. 225, no. 1, pp. 51–60, Jul. 1995, doi: 10.1002/JMOR.1052250105.

[31] H. E. Tanürün and A. Acır, “Modifiye Edilmiş NACA-0015 Kanat Yapısında Tüberkül Etkisinin Sayısal Analizi,” *Journal of*

Polytechnic, vol. 22, no. 1, pp. 185–195, Mar. 2019, doi: 10.2339/POLITEKNIK.391800.

[32] A. Skillen, A. Revell, J. Favier, A. Pinelli, and U. Piomelli, “Investigation of wing stall delay effect due to an undulating leading edge: An les study,” *International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP 2013*, vol. 3, 2013, doi: 10.1615/TSFP8.1960.

[33] C. J. Bai, Y. Y. Lin, S. Y. Lin, and W. C. Wang, “Computational fluid dynamics analysis of the vertical axis wind turbine blade with tubercle leading edge,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, May 2015, doi: 10.1063/1.4922192/672040.

[34] K. Sevinc, G. Ozdamar, U. Şentürk, and A. Ozdamar, “Computational investigation of flow control by means of tubercles on Darrieus wind turbine blades,” *J Phys Conf Ser*, vol. 640, no. 1, p. 012034, Sep. 2015, doi: 10.1088/1742-6596/640/1/012034.

[35] S. Y. Lin, Y. Y. Lin, C. J. Bai, and W. C. Wang, “Performance analysis of vertical-axis-wind-turbine blade with modified trailing edge through computational fluid dynamics,” *Renew Energy*, vol. 99, pp. 654–662, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2016.07.050.

[36] J. B. Goh, Z. Jamaludin, F. A. Jafar, N. Ali Mokhtar, and M. Mat Ali, “THE EXPERIMENTAL STUDY OF WASTE KINETIC ENERGY RECOVERY SYSTEM (WKERS) ,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 16, pp. 4831–4836, 2017.

[37] Z. Wang and M. Zhuang, “Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind turbine at low tip-

speed-ratios,” *Appl Energy*, vol. 208, pp. 1184–1197, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.09.034.

[38] I. C. M. Lositaño and L. A. M. Danao, “Steady wind performance of a 5 kW three-bladed H-rotor Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) with cambered tubercle leading edge (TLE) blades,” *Energy*, vol. 175, pp. 278–291, May 2019, doi: 10.1016/J.ENERGY.2019.03.033.

[39] U. Lokesh, N. Kirthika, K. Madhu Madhan, C. B. Maheswaran, S. Ramaswami, and S. Nadaraja Pillai, “Effect of solidity on the dynamic behaviour of the Darrieus turbine with leading-edge protuberance,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 850, no. 1, p. 012038, Nov. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/850/1/012038.

[40] Y. Yan, E. Avital, J. Williams, and J. Cui, “Aerodynamic performance improvements of a vertical axis wind turbine by leading-edge protuberance,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 211, p. 104535, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JWEIA.2021.104535.

[41] D. Hesketh, R. E. Perez, P. W. Jansen, and L. Diatchenko, “Analysis of Leading Edge Tubercles Applied to Vertical Axis Wind Turbines,” *AIAA AVIATION 2022 Forum*, 2022, doi: 10.2514/6.2022-3891.

[42] S. Sridhar, J. Joseph, and J. Radhakrishnan, “Implementation of tubercles on Vertical Axis Wind Turbines (VAWTs): An Aerodynamic Perspective,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102109, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102109.

[43] A. N. C. Gonçalves, J. M. C. Pereira, and J. M. M. Sousa, "Passive control of dynamic stall in a H-Darrieus Vertical Axis Wind Turbine using blade leading-edge protuberances," *Appl Energy*, vol. 324, p. 119700, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.119700.

[44] M. Ahmad and M. H. Zafar, "Enhancing vertical axis wind turbine efficiency through leading edge tubercles: A multifaceted analysis," *Ocean Engineering*, vol. 288, p. 116026, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2023.116026.

[45] P. Prakash, L. K. Pendyala, R. C. Teladevalapalli, and S. Mitra, "A real-time experimental investigation of thin cambered tubercle blades for performance improvement of Darrieus vertical axis wind turbine," *2023 7th International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2023*, pp. 257–261, 2023, doi: 10.1109/ICGEA57077.2023.10125996.

[46] S. S. ul Hassan, M. T. Javaid, U. Rauf, S. Nasir, A. Shahzad, and S. Salamat, "Systematic investigation of power enhancement of Vertical Axis Wind Turbines using bio-inspired leading edge tubercles," *Energy*, vol. 270, p. 126978, May 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.126978.

[47] N. F. Zulkefli, M. A. Nurdin, and N. M. Nur, "Performance Analysis of H-Rotor Darrieus Wind Turbine with Whale Tubercles Leading Edge Blades," *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, vol. 56, no. 1S, pp. 365–373, Mar. 2024, doi: 10.6125/JOAAA.202403_56(1S).25.

[48] P. Prakash, L. K. Pendyala, and S. Mitra, "An experimental investigation of novel bio-inspired curved bladed VAWTs having

leading-edge tubercles for enhanced power production,” *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 49, no. 4, Dec. 2024, doi: 10.1007/S12046-024-02619-4.

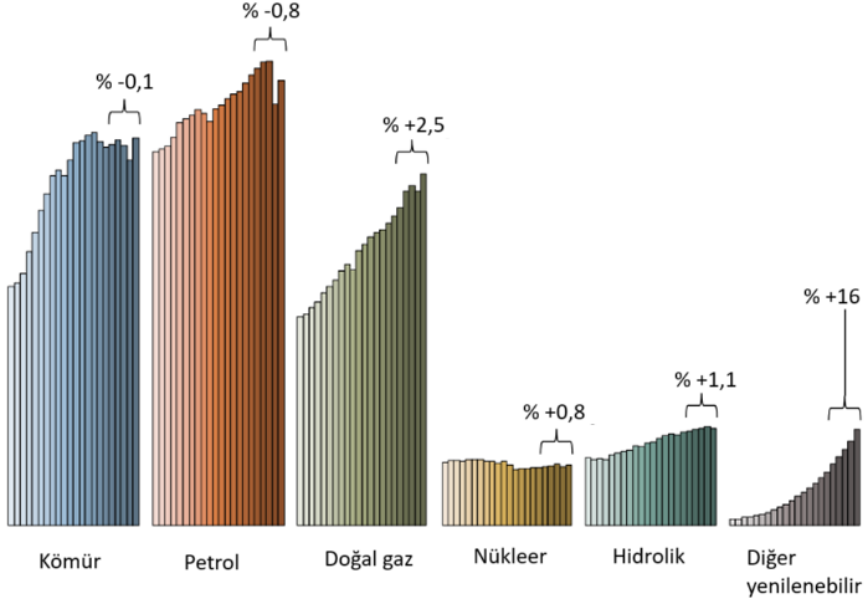
[49] J. Joseph, S. Sridhar, S. A., and J. Radhakrishnan, “Analyzing dynamic stall on tubercle mounted VAWT blades: A simplistic experimental approach using an oscillating rig,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 71, p. 103962, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.SETA.2024.103962.

[50] E. Karthik Vel and S. Nadaraja Pillai, “Vibration control of the straight bladed vertical axis wind turbine structure using the leading-edge protuberanced blades,” *Eng Struct*, vol. 319, p. 118806, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118806.

Güneş Destekli Isı Pompası Sistemlerinde PVT Kollektörlerin Kullanımına Genel Bir Bakış

1. Giriş

Günümüz yüzyılın en büyük sorunlarından bir tanesi küresel ısınmadır. Artan nüfus, hızla sanayileşen gelişmekte olan ülkeler ve teknolojik yeni yaşam tarzı iyileştirmelerine güç sağlamak için dünyada artan enerji kullanımı bugün hala bu soruna katkıda bulunmaktadır. Enerji kaynağı olarak günümüzde hala büyük oranda fosil yakıtlar kullanılmaktadır [1]. Bunun sonucu olarak, karbondioksit salınımı ve diğer emisyonlar artmakta ve küresel ısınmaya ve çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Araştırmalara göre, çevre kirliliği sorunlarının insan yaşamları üzerinde çeşitli doğrudan olumsuz sağlık etkileri vardır [2]. Çevresel partikül maruziyetinin birçok hastalığın riskinin artmasına neden olmaktadır [3]. Diğer taraftan küresel ısınma da zararlı sonuçlar doğurmaktadır, yani aşırı hava koşulları (örneğin sıcak hava dalgaları ve tropikal siklonlar), sel, kuraklık ve orman yangınları. Sonuç olarak, bu durum doğal biyolojik sistemleri güçlü bir şekilde etkilemektedir. Küresel ısınmanın neden olduğu çok sayıda zararlı sonuca rağmen, mevcut ısınma eğilimi yirminci yüzyılın ortalarından bu yana kontrol edilemeyen bir alanda ilerlemektedir [4]. Özellikle, dünyanın ortalama yüzey sıcaklığı 1890'lardan bu yana yaklaşık 1,14 °C artmıştır. Bu önemli değişim, atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının artmasından kaynaklanmaktadır [5].



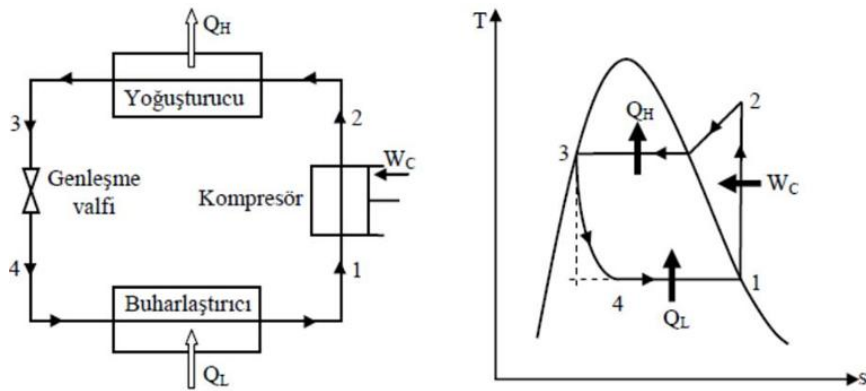
Şekil 1. Dünya enerji tüketim oranları [6]

Şekil 1’de enerji kaynaklarına göre dünyada 2000 ile 2021 yılları arasında tüketilen enerji oranları gösterilmiştir. 2016 ve 2021 yılları arasında kömür ve petrol fosil yakıt tüketiminde sırasıyla %0,1 ve %0,8 oranında azalma olsa da Şekil 1’den görüleceği üzere enerji tüketimi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Buna karşılık, yenilenebilir enerjinin payı %16’lık bir artış göstermesine rağmen, dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %7’sini oluşturmaktadır [6]. Küresel ısınmanın hızını yavaşlatmak ve çevre kirliliği sorunlarını hafifletmek için yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde temiz, sınırsız ve bedava bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi en önemli enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, dünya çapında serbestçe bulunabildiği ve

güneş radyasyonunun bir termal kollektör kullanılarak kolayca ısıya veya Fotovoltaik (PV) kullanılarak elektriğe dönüştürülebildiği için çekici bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Enerji, Güneş'ten Dünya'ya radyasyon yoluyla aktarılır. Dünya'ya düşen toplam yıllık güneş enerjisi miktarı yaklaşık $5,4 \times 10^{24}$ J/yıldır ve bu miktar toplam küresel enerji tüketiminden yaklaşık 14 bin kat daha fazladır [7]. Güneş enerjisi toplama ekipmanının üretimi ve kurulumu için ilk yatırım maliyeti hariç, güneş enerjisi sistemleri çok az veya hiç işletme maliyeti olmadan ve sıfır sera gazı emisyonuyla çalışmaktadır.

Isı pompası (IP) sistemleri endüstri ve binaların ısıtılması ve soğutulmasının temel bileşenlerdir ve termal konfor sağlamada ve iç hava kalitesini korumada önemli bir rol oynamaktadır. IP sistemleri fosil yakıt kullanan geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerinden daha verimli çalışan sistemlerdir [8]. Bu sistemler, düşük sıcaklık kaynaklarından termal enerji alır ve daha yüksek sıcaklığa sahip başka bir kaynağa verir. IP'ler ideal buhar sıkıştırma soğutma çevrimi prensibine göre çalışırlar [9].



Şekil 2. İdeal buhar sıkıştırma soğutma çevrimi [10]

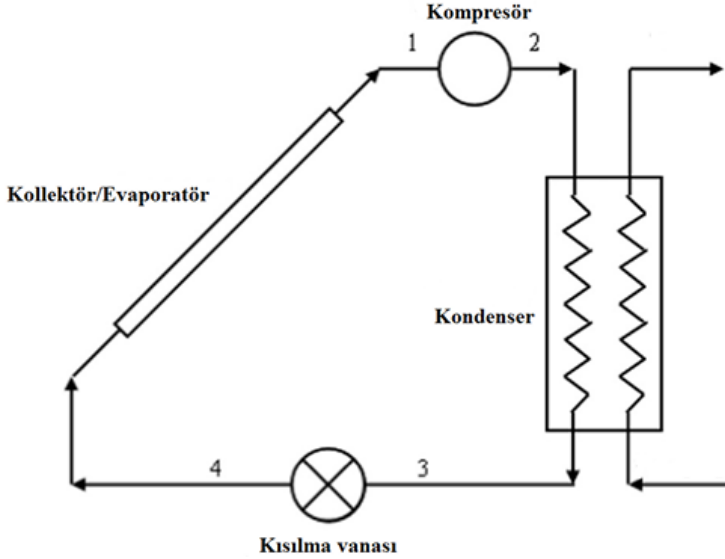
Isı pompalarının ideal buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine göre çalışma prensibi ve T-s diyagramı Şekil 2’de verilmiştir. Bu ideal çevrim; kompresörde izentropik sıkıştırma (1-2), yoğunlaştırıcıdan çevreye sabit basınçta ısı geçişi (2-3), genleşme valfinde kısılma yani basıncın düşmesi (3-4), buharlaştırıcıda akışkana sabit basınçta ısı geçişi (4-1) olarak gerçekleşmektedir. IP’lerde enerji geçişi, iş akışkanı olan soğutucu akışkan ile gerçekleşmektedir. Temel olarak, soğutucu akışkan buharlaştırıcıda soğuk ortamdan ısı çekerek buharlaşır ve kompresörde sıkıştırılarak kızgın buhar halinde yoğunlaştırıcıya girer. Soğutucu akışkan yoğunlaştırıcıda ısısını çevre ortama vererek yoğunlaşır ve sıvı hale gelir. Daha sonra genleşme valfinde gaz hacmi artırılarak basıncı düşen soğutucu akışkan buharlaştırıcıya girer ve döngüyü tamamlar. IP sistemleri ısı kaynağına göre su, toprak ve hava olarak sınıflandırılabilirler [11].

IP sistemler için gerekli termal ve elektrik enerjisi, onları daha çevre dostu hale getirmek için yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden sağlanabilir. Güneş kolektörleri ile entegreli IP hibrit sistemlerine güneş destekli ısı pompası (GDIP) sistemleri denilmektedir [12]. Bu GDIP hibrit sistemlerde termal enerji için sadece güneş kolektörü, elektrik enerjisi için sadece PV panel veya hem termal (ısı) hem de elektrik enerjisini aynı anda elde edebilmek için fotovoltaiik termal (PVT) kolektörler kullanılabilirler.

2. Güneş Destekli Isı Pompası (GDIP) Sistemleri

Güneş enerjisi, GDIP sisteminde bir ısı enerjisi kaynağıdır. Güneş enerjisi, diğer enerji kaynaklarının yanı sıra, GDIP sistemlerinin ana kaynağıdır. Güneş kolektörü destekli ısı pompası, doğrudan güneş enerjisini kullanan ve onu ısı enerjisine dönüştüren

bir teknolojidir. Güneş kollektörü ısı pompasının doğrudan evaporatörü olarak da kullanılabilir. Genel olarak GDIP sistemleri doğrudan ve dolaylı genişmeli olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir [13].

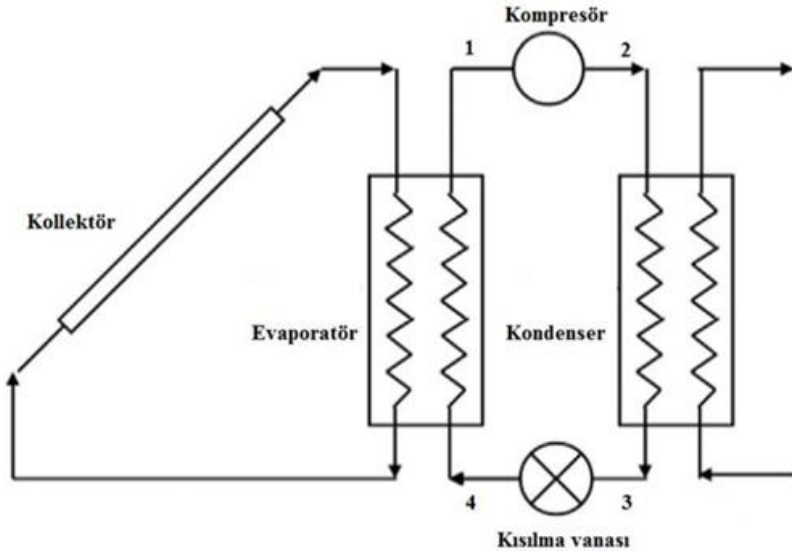


Şekil 3. Doğrudan genişmeli GDIP sistemi [14]

Doğrudan genişmeli GDIP sisteminin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. Doğrudan genişmeli GDIP sisteminde güneş kollektörü ve ısı pompası tek bir ünite de birleştirilir ve soğutucu akışkan güneş kollektörü içerisinde dolaşır. Bu şekilde güneş radyasyonu herhangi bir ara akışkan olmadan buharlaştırıcı için bir ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Güneş kollektörünün buharlaştırıcısı çıplak veya yalıtımlı olabilir, bu seçenek ortam koşullarına bağlı olarak toplayıcının çalışma sıcaklığına göre belirlenmelidir. Son yıllarda doğrudan genişmeli GDIP

sistemlerinin hava ve güneş enerjisini en iyi şekilde kullanabilmesi için yeni yaklaşımların geliştirilmeye başlandığı görülmektedir [14].

Doğrudan genleşmeli GDIP sisteminde güneş kollektörü IP'nın buharlaştırıcısıdır ve güneşten ve havadan aynı anda ısı toplamayı amaçlar. Soğutucu akışkanın buharlaşması, kollektör buharlaştırıcı sıcaklığını geleneksel geleneksel güneş kollektörüne kıyasla önemli ölçüde azaltır ve kollektör buharlaştırıcı sıcaklığı ortam parametreleri şartları altında ortam sıcaklığının altına düşerken, hava güneş enerjisinin yanında bir ısı kaynağı haline gelir. Sıcaklık ortam sıcaklığının üzerine çıksa bile, kollektör ve ortam havası arasındaki sıcaklık farkı hala geleneksel güneş kollektöründen düşüktür ve böylece havaya olan ısı kaybını azaltır [14].



Şekil 4. Dolaylı genleşmeli GDIP sistemi [14]

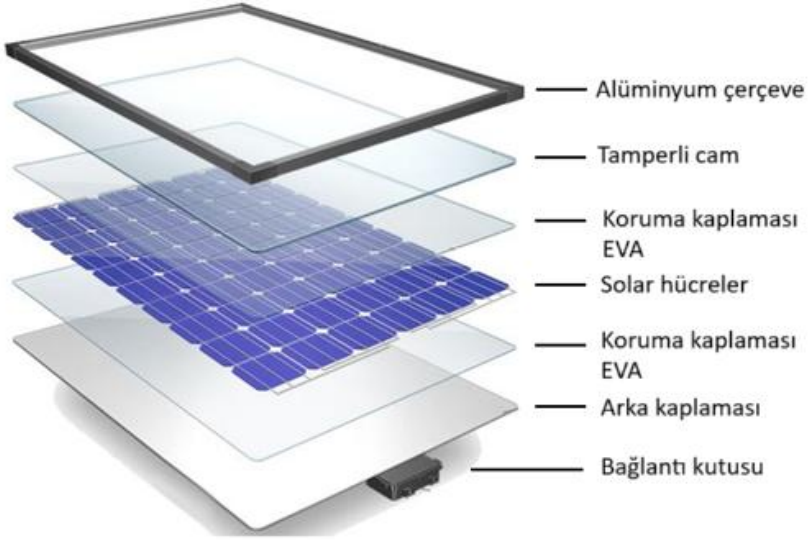
Şekil 4 dolaylı genleşmeli GDIP sisteminin şemasını göstermektedir. Dolaylı GDIP sistemlerinin temeli, güneş ısısı iletici akışkan çevriminin ısı pompası soğutucu çevrimiyle ayrılmasıdır. Hem ısı pompası hem de güneş kollektörü ısıtma talebini birlikte ancak farklı yaklaşımlarla karşılar. Güneş kollektörünün görevi güneş ışınlamını emmek ve genellikle bir antifriz çözeltisi olan su veya havaya ısı iletici akışkana aktarmak ve termal enerjiyi doğrudan alanı ısıtmak veya ısı pompası için ısı kaynağı olarak kullanmaktır. Dolaylı GDIP sistemleri ısıtma ihtiyacını karşılamak için farklı kurulumlara sahip seri, paralel ve çift kaynaklı olmak üzere üç tipe ayrılır [14][15].

Seri dolaylı GDIP sisteminde, güneş ısısı ileten akışkan ve ısı pompası soğutucu akışkanı, genellikle bir ısı depolama tankına yerleştirilen bir ısı değiştiricisinde birbirleriyle etkileşime girer. Isı değiştiricisi, önceki hava ısı kaynağından daha yüksek bir sıcaklığa sahip ısı pompasının buharlaştırıcısı olarak görev yapar ve bu da daha yüksek bir performans katsayısı (COP) değeriyle sonuçlanır. Güneş enerjisi doğrudan alanı ısıtmak için yeterliyse, ısı pompası baypas edilebilir. Paralel dolaylı GDIP sisteminde, güneş termal sistemi, buharlaşma için bir ısı kaynağı olarak ısı pompasını desteklemez. Isı ileten akışkan, ısı pompası soğutucu akışkan döngüsüyle herhangi bir etkileşime girmeden, bir fan coil ısı değiştiricisinden geçerek ısıtma alanına ulaşır. Isı pompası ana ısıtma sistemidir, ancak güneş radyasyonu yeterli olduğunda, ısı pompası durur ve güneş termal sistemi tüm ısıtma talebini doğrudan karşılar. Çift kaynaklı dolaylı GDIP sistemi iki buharlaştırıcıya sahiptir, ilk buharlaştırıcı (güneş tarafı buharlaştırıcı) ısı kaynağı olarak güneş termal enerjisini kullanır, diğer buharlaştırıcı ise (hava

tarafı buharlaştırıcı) hava ısı kaynağını kullanır. Güneş tarafı buharlaştırıcı, güneş ısı verici akışkan döngüsüne entegre edilmiştir ve bir depolama tankı, tüm gün depolanan enerjinin belirli bir zamanda ve uygun miktarda kullanılması olasılığını verir. Hava tarafı buharlaştırıcı, ortam hava sıcaklığı çok düşük olmadığında kullanılır, bu nedenle buharlaştırıcı tipi kullanımının uygun bir kombinasyonu yüksek bir günlük ortalama COP değeriyle sonuçlanır [16].

3. PVT Kollektörler

PV paneller, yarıiletken malzemelerden üretilmiş olup güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. PV panelleri silikon gibi yarı iletken hücreler oluşturur ve bu hücreler, güneş ışınımını soğurur ve bu ışınımın enerjisi, hücre içindeki elektronları hareket ettirir. Güneş ışınımının enerjisiyle serbest kalan elektronlar, elektrik akımı yaratır. Bu akım, hücre içinde bir elektrik devresi aracılığıyla yönlendirilir. Elektrik akımı, PV hücrelerinden panelin terminallerine akar. Bir dizi PV hücresi bir araya gelerek bir PV paneli oluşturur ve bu paneller bir araya getirilerek daha büyük sistemler oluşturulabilir [17].

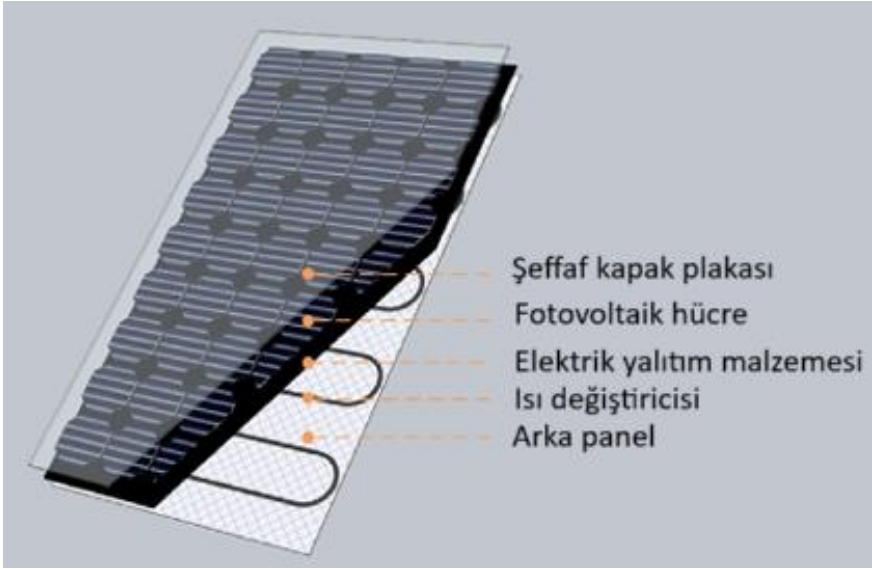


Şekil 5. PV panelin katmanları [18]

PV panelin katmanları genel olarak Şekil 5’te gösterilmiştir. Genel olarak alüminyum çerçeve, temperli cam, EVA, Güneş hücreleri, arka kaplama ve bağlantı kutusundan oluşmaktadır. PV panellerin verimi, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesini gösterir ve birçok faktöre bağlı olarak değişir. Genel olarak, ticari olarak satılan PV panellerin verimi %15 ile %22 arasında değişmektedir [19]. PV panelin verimliliğini sıcaklık, malzeme kalitesi, hücre tasarımı ve teknolojisi, ısıtım yoğunluğu ve açısı, kirlenme ve gölgeleme gibi faktörler etkilemektedir. PV panellerin sıcaklığı arttığında, panellerin içindeki yarı iletken malzemelerin elektriksel özellikleri değişir. Bu, genellikle verimin düşmesine yol açar. Yüksek sıcaklıklarda, elektronlar daha fazla enerji ile hareket eder ve bu durum, panelin elektrik üretim kapasitesini azaltır. PV panelin yüzey sıcaklığı her 1°C arttığında, panel veriminin belirli bir yüzde oranında düştüğü anlamına gelir.

Örneğin, tipik bir PV panelin sıcaklık katsayısı yaklaşık - 0.5%/°C'dir. Bu, panelin sıcaklığı her 1°C arttığında verimin %0.5 oranında azaldığı anlamına gelir. Belirli bir sıcaklık aralığında PV paneller en iyi performansı gösterir. Genellikle bu, Standart Test Koşulları olarak bilinen 25°C sıcaklık ve 1000 W/m² ışıınım koşullarıdır. Yüksek sıcaklıkların PV panel üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için çeşitli soğutma yöntemleri kullanılabilir. Örneğin, PV panellerin arkasında hava akışı sağlamak veya aktif soğutma sistemleri kullanmak, panellerin sıcaklığını kontrol altında tutmaya yardımcı olabilir [20].

PV panellerde yüksek sıcaklıklardan oluşan ısı bir akışkan ile çıkarılarak hem PV panel soğutulmuş ve verimi artmış olur hem de elde edilen ısı faydalı enerjiye dönüşerek kullanılabilir. PV panelin arka tarafı kapatılarak hem elektrik hem de bir akışkan yardımıyla ısı elde edildiği teknolojiye fotovoltaiik-termal (PVT) sistem adı verilmektedir. Kombine PVT sistem güneş teknolojisinde cazip bir buluş olarak kabul edilir. Bu sistemlerde, fotovoltaiik modüllerden gelen ısı çeşitli teknikler kullanılarak çıkarılır. Çıkarılan ısı, termal sistemlerde ayrı ayrı kullanılır [20] [21].



Şekil 6. PVT panelin yapısı [22]

Şekil 6, PVT sisteminin en basit biçimini göstermektedir. PVT kavramı 1970'lerin ortasında belgelenmiştir. Bir güneş kollektörü, modülden fazla ısıyı çıkarmak ve hücrelerin sıcaklığını düşürmek için bir PV panelle birleştirilir ve hücrelerin verimliliğini artırır. Bu tür entegrasyona hibrit PVT kollektörü denir [22]. PVT sisteminde, güneş ışınımı aynı anda hem elektriğe hem de termal enerjiye dönüştürülür. PV modüllerinin sürekli soğutulması kabul edilebilir seviyelerde elektrik verimliliği sağlar. Bu nedenle, PV sistemine en iyi alternatif PVT'dir. PVT güneş sistemlerinin önceliği elektrik dönüşümüdür. Bu nedenle, elektriksel verimliliği en üst düzeye çıkarmak için PV hücrelerini düşük sıcaklıkta tutmak daha iyidir. Elektriksel dönüşümün önceliklendirilmesi, PVT'nin sınırlı düşük sıcaklık aralığında çalışmasını gerektirir. PVT'den çıkarılan ısı, hava veya suyun ön ısıtılması, mekan ısıtması ve binalarda doğal

havalandırma gibi düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir. PV modüllerinden ısıyı çıkarmak için başlangıçta su ve hava yaygın olarak kullanılmıştır. Son zamanlarda ise PV modülü soğutmak ve ısıyı çıkarmak için ısı pompası sistemleri kullanılmaktadır. PVT teknolojisinin genişlemesi, çevresel sorunlar, artan enerji fiyatları ve fosil yakıt kaynaklarındaki azalma gibi endişelerin bir sonucudur [23].

PVT Kollektörler	Hava akışkanlı PVT	Tek geçişli
		Çift geçişli
	Su akışkanlı PVT	Tüplü & Levhalı
		Yuvarlak tüp emicili
		Kare/Dikdörtgen emicili
	Hava & Su akışkanlı PVT	Kanal
		İki emicili
		Serbest akış
	Yoğunlaştırılmış PVT	Düşük bileşik parabolik konsantratör
		Orta doğrusal parabolik reflektör
		Yüksek 3D fresnel lens
	İleri Tasarımli PVT	Termoelektrik
		Isı borulu
		Soğutucu akışkanlı
		Faz değiştiren malzemeli
		Nanoakışkanlı

Şekil 7. PVT sistemlerinin sınıflandırılması [24]

PVT'nin çalışma sıvılarına göre sınıflandırılması Şekil 7'de verilmiştir. Çalışma sıvısına bağlı olarak PVT kollektörleri hava akışkanlı PVT, su akışkanlı PVT, soğutucu akışkanlı PVT, su/hava

akışkanlı PVT, nanofluid akışkanlı PVT veya faz değişim malzemeli PVT olarak sınıflandırılabilir. PVT sistemlerinin temel bir bileşeni emici kollektördür. Emici kollektör, PVT kollektörlerini ayırt etmek için düz bir plaka gösterir. Kapsüllenmiş güneş hücreleri, camsız veya camlı emici kollektörlere monte edilir. Modülü soğutma sürecinde, sıcak çalışma sıvıları toplanır ve termal enerjileri toplanır. İşlem sırasında modüller ve PV hücreleri daha verimli hale gelir. Sıvı bazlı PVT sistemleri genellikle uygulanan çalışma sıvısı ile ayırt edilir. Sistemlerin çoğu su kullanır; ancak, ısıyı etkili bir şekilde iletmek için soğutucu akışkanlar gibi yenilikçi sıvı bazlı PVT sistemler daha verimlidirler [24].

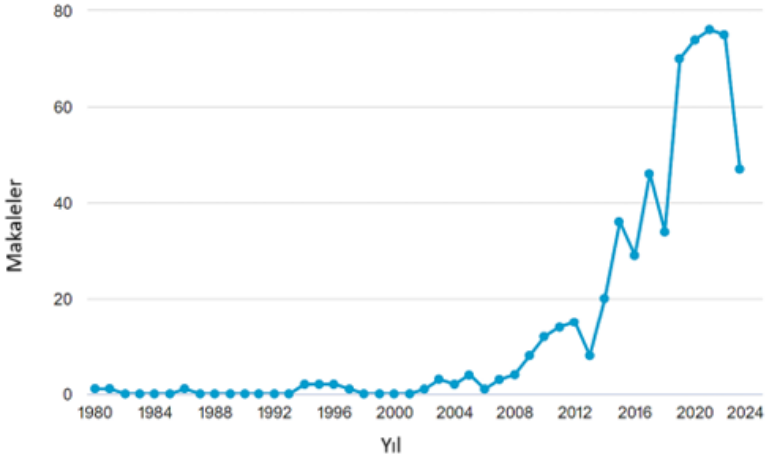
4. PVT kollektörlerin GDIP Sistemlerinde Kullanımı

Bir ısı pompası düşük sıcaklık kaynağından enerji almak ve bu enerjiyi farklı uygulamalar için uygun bir sıcaklık aralığına yükseltmek için kullanılır. Performans katsayısı ısı pompası verimliliğini ölçmek için kullanılır ve verimliliği ısı pompası tarafından sağlanan enerji miktarının tüketilen elektrik enerjisine oranı olarak tanımlanır. Bir ısı pompasının COP'si artan buharlaşma sıcaklığıyla (sabit yoğuşma sıcaklığı için) daha iyi hale gelir. Soğuk günlerde, özellikle dış ortam sıcaklığı 0°C'nin altına düştüğünde, ısı pompasının performansı azalır. Araştırmalar, iki aşamalı bir ısı pompasının sert havalarda daha iyi performans gösterebileceğini göstermiştir [25].

Güneş enerjisiyle ısıtma teknolojisini ısı pompalarıyla entegre etmek, düzensiz güneş ışınımı yoğunluğunun üstesinden gelerek ve ısı pompasının COP'unu artırarak güneş enerjisinin kullanımını en üst düzeye çıkarabilir. Güneş sistemi düşük sıcaklıkta enerji toplar ve doğrudan ısıtmada verimli bir şekilde çalışmayabilir. Bu enerji

kışın ısı pompasına kaynak olarak kullanılabilir [25]. Başka bir deyişle, güneş kolektörü sistemi, ortam sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta enerji sağlar ve ısı pompasının COP'sini iyileştirir. Bu nedenle, ısı pompasıyla entegre güneş enerjisi sistemi, her bir sistemin tek başına sağladığından daha fazla enerji tasarrufu sağladığı için ilginç bir araştırma alanıdır [26].

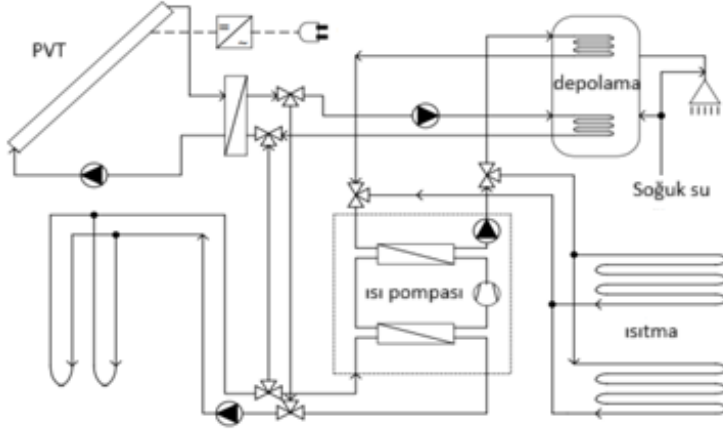
İki sistem birlikte iyi çalıştığı için PVT için ısı pompasına özgü tasarımların geliştirilmekte olması şaşırtıcı değildir. Aslında, bu iki teknolojinin birleştirilmesiyle güneş enerjisi sistemlerinin mevsimsel performans faktörü artırılabilir ve bu da ısı pompası elektrik kullanımının azaltılmasına olanak tanır ve PV üretimi nedeniyle şebekeden satın alınan elektriğin azaltılmasıyla birleştirilir [26]. Aslında, bu iki sistem birleştirildiğinde, elektrik enerjisi üretimi, esasen PVT'den yakalanan ısıyı serbest ve kullanılabilir enerjiye dönüştüren herhangi bir ek pompalamanın elektrik ihtiyaçlarını karşılamaya yetebilir [27]. İki teknolojinin birleşiminin avantajları, ısı pompası sıvısının düşük çalışma sıcaklığının yalnızca güneş ışıınımından değil aynı zamanda ortam sıcaklığından da ısı yakalamasına olanak tanıdığı soğuk iklimlerde daha da belirgin hale gelir; kış aylarında bile bu, termal verimliliği yüksek performanslı bir termal sisteme benzer bir seviyeye çıkarır.



Şekil 8. Yıllara göre PVT-GDIP sistemlerinin literatürde çalışmaları [24]

Şekil 8’de PVT kollektörün GDIP sistemlerinde kullanılmasını araştıran çalışmaların yıllara göre sayısı gösterilmiştir. Özellikle son 20 yılda araştırmalar önem kazanmıştır. Kazem vd., PVT teknolojisi, IP sistemleri ve bunların entegrasyonu sistemleri Scopus, PubMed, IEEE Xplore ve Google Scholar dahil olmak üzere birden fazla veri tabanında arayarak elde etti [24]. PVT kollektörlü GDIP’lerin (PVT-GDIP) enerji verimliliği ve çevresel yönler açısından avantajlarına gelince, bu sistemler son yıllarda çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak çeşitli bakış açılarından araştırılmıştır. Bakker ve diğerleri [28], Hollanda’da 132 m² taban alanına sahip bir konutta PVT-GDIP sisteminin performansını simüle etmişlerdir. Sistem, konut için alan ısıtması ve sıcak su sağlamak için kullanıldı ve bu sistemin şeması Şekil 9’de gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları, 54 m² alana sahip bir PVT

kolektörünün, uzun vadeli ortalama zemin sıcaklığını sabit tutarken konutun ısıtma talebini ve neredeyse tüm elektrik talebini karşılayabileceğini gösterdi.



Şekil 9. Sıcak su temini için tasarlanan PVT-GDIP sisteminin şematik gösterimi [28]

Entchev vd. [29] ve Canelli vd. [30], sırasıyla Ottawa (Kanada) ve Napoli'de (İtalya) yük paylaşımı uygulamalarında soğutma, ısıtma ve sıcak su sağlamak için bir PVT-GDIP sisteminin performansını araştırdılar. Entchev vd. tarafından elde edilen sonuçlar, PVT-GDIP sisteminin kazan ve soğutucuların bulunduğu geleneksel bir sisteme kıyasla %58'lik genel enerji tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir. Canelli vd. geleneksel bir sisteme kıyasla PVT-GDIP sisteminin birincil enerji tasarrufunun %53,1 olduğunu göstermiştir.

Brischoux ve Bernier [31], bir PVT-GDIP sisteminin alan ısıtma ve sıcak su ısıtma performansını inceledi. Sonuçlar, PVT kollektörlerinin sondaj deliğinden gelen ısı transfer sıvısıyla

soğutulduğu birleştirilmiş PVT-GDIP sisteminin, birleştirilmemiş bir sisteme kıyasla daha yüksek bir mevsimsel performans faktörüyle yıllık %7,7 daha fazla elektrik sağlayabileceğini gösterdi. Ek olarak, PVT-GDIP sisteminin geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerine veya bağımsız GDIP sistemlerine kıyasla daha iyi bir enerji performansı ile sonuçlanabileceğini gösterdi. Ancak, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar büyük ölçüde kullanılan PVT kollektörünün boyutuna bağlıydı. Jie ve ekibi [32], PVT kolektörlerinin güneş enerjisi destekli bir ısı pompası ile birleştirildiği ve çalıştırıldığı yeni bir ısı pompası sistemi üzerinde çalışmalar yapmıştır. Sistemde, soğutucu akışkanın soğutma etkisi evaporatör olarak kullanılmıştır. Bu soğutma etkisi, PV modüllerinin daha düşük sıcaklıklarda çalışmasına olanak tanıyarak fotovoltaik verimliliğin artmasını sağlar. Enerji dönüşüm süreçlerinin analizini yapmak amacıyla matematiksel bir model geliştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, fotovoltaik güneş enerjisi destekli ısı pompasının, ayrı ünitelerden dolayı daha iyi bir performans katsayısına ve fotovoltaik verimliliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir.

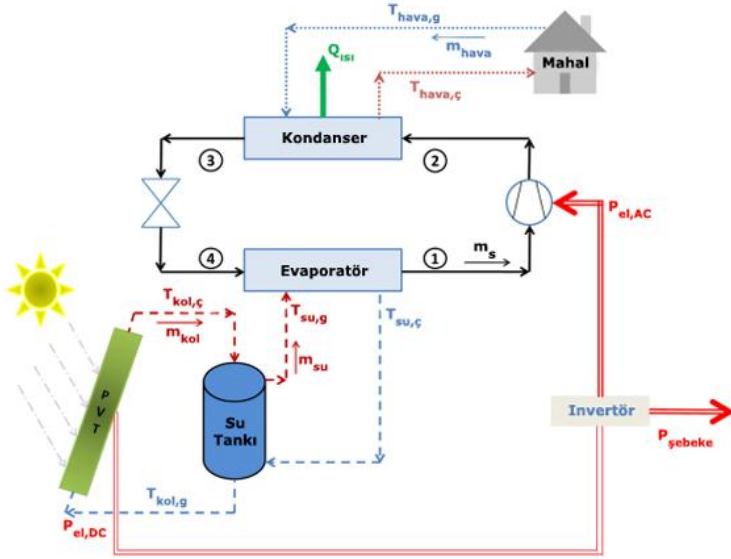
Pei ve diğerleri [33], PVT kollektörler ve güneş enerjisi destekli ısı pompasını deneysel çalışmalar yaparak karşılaştırmışlardır. PVT kollektörleri, cam kapaklı ve kapaksız olarak iki farklı şekilde kullanılmış ve karşılaştırmalar, Çin'in ılıman bir bölgesinde, tipik kış günlerinde gerçekleştirilmiştir. Tek cam kapak kullanılan deneylerde PV-Fototermik dönüşüm verimleri ve toplam PVT dönüşüm verimleri sırasıyla %12,83, %5,26, %18,09 ve %4,85 olarak ölçülmüştür. Cam kapak kullanılmadan yapılan ölçümlerde ise bu değerler sırasıyla %13,36, %3,04, %16,40 ve %3,41 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, deneyler cam kapağın PV

ekserji verimliliğinde az da olsa bir azalmaya, fakat fototermik verimde önemli ölçüde iyileşmeye yol açtığını ortaya koymuştur. James ve ekibi [34], PVT kollektör kullanan ısı pompası sistemlerinin termal analizleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar kapsamında, PVT kollektörlerin modellemesinde kullanılan denklemlere yer verilmiştir. Bu denklemler aracılığıyla ısı pompası sistemlerinin termodinamik performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PVT kollektörlerin su ısıtma, alan ısıtma ve kurutma uygulamaları için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Ammar ve ekibi [35], R-134a soğutucu akışkanına sahip PVT evaporatör ısı pompasının farklı güneş ışıyım değerlerinde enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmişlerdir. 300 ile 1000 W/m² ışıyım değerlerinde yapılan ölçümlerde, PVT'nin ortalama elektrik verimi %11,88, ısı pompasının ortalama COP değeri 6,14 ve ortalama COP ekserji değeri ise 1,49 olarak hesaplanmıştır. Ji ve ekibi [36], 1,01m x 0,73m boyutlarındaki PVT panelini evaporatör olarak kullanan bir ısı pompası sistemi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada hem nümerik hem de deneysel analizler yapılmıştır. Soğutucu akışkan olarak R22 kullanılarak, PVT paneli soğutmuşlardır. Çalışmanın sonuçları, PVT panelin elektrik veriminin %12 ve ısıl veriminin ise %50 olduğunu göstermiştir.

Bellos ve Tzivanidis [37], Şekil 10'da gösterildiği gibi, 10 m² PVT'den alınan ısının ısı pompasının ısı kaynağı olarak kullanıldığı ve mahal ısıtma ile elektrik üretimi sağlayan bir sistem tasarlamışlardır. Atina (Yunanistan) kış iklim koşulları için bu sistemin performansını farklı soğutucu akışkanlar kullanarak incelemişlerdir. Optimum soğutucu akışkanların R32 ve R134a

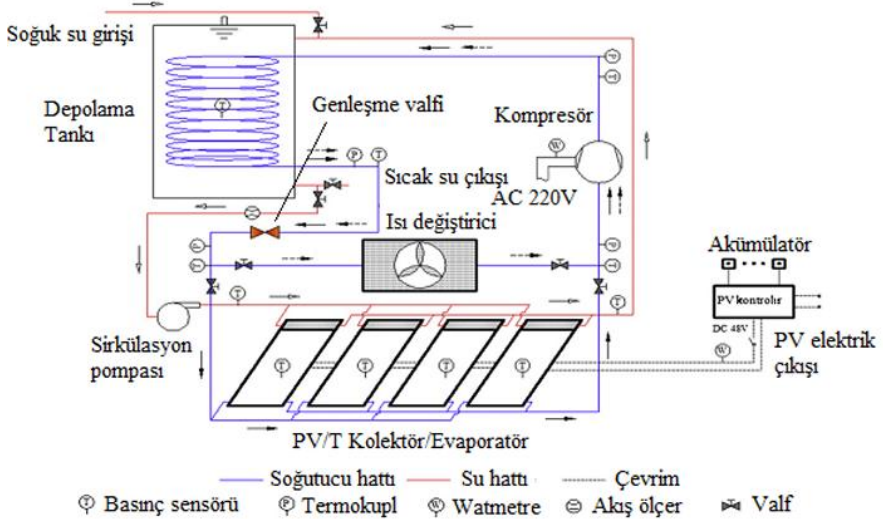
olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sistemin kış dönemi boyunca 545 kWh elektrik ve 4424 kWh ısı enerjisi ürettiğini, ortalama enerji veriminin %65,9 ve ekserji veriminin %8,80 olduğunu hesaplamışlardır.



Şekil 10. Bellos ve Tzivanidis tarafından önerilen PVT-GDIP sistemi [37]

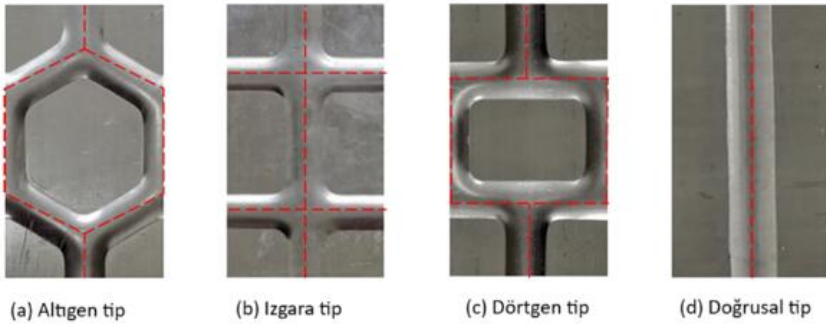
Fu ve ekibi [38], Şekil 11'de gösterilen fotovoltaik güneş destekli ısı pompası/ısı borusu hibrit sistemini sonbahar aylarında Hong Kong'da deneysel olarak analiz etmişlerdir. Ayrıca, sistemin toplam PVT performansını araştırmak amacıyla enerji ve ekserji analizleri yapmışlardır. Hücre alanı 2,912 m² olan dört PVT ısı pompasının evaporatörü ve yardımcı evaporatör olarak hava soğutmalı bir ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Su ve soğutucu akışkan (R-134a) sirkülasyon döngülerinden oluşan bu sistem üç farklı modda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Güneş ışınlamı yeterli

olduğunda, hibrit sistem ısı borusu modunda çalışarak kolektörlerden alınan ısı enerjisi, ısı boruları tarafından kolektörlerden akan suya aktarılır ve depolama tankında depolanır. Güneş ışıını yetersiz olduğunda, hibrit sistem güneş enerjisi destekli ısı pompası modunda çalışır. Yağmurlu günlerde veya güneş ışıını zayıf olduğunda, buharlaşma sıcaklığı ortam sıcaklığından düşük olduğunda hibrit sistem hava kaynaklı ısı pompası modunda çalışır. Sonuçlar, hibrit sistemin ısı pompası modunda çalıştığı durumda günlük ortalama enerji veriminin %61,1-82,1, ekserji veriminin %8,3-9,1 ve ısı pompasının COP'sinin 4,01 değerine ulaşabildiğini göstermiştir. Isı pompası sistemi, ısıtma modunda güçlü güneş ışıını altında çalıştırıldığında, günlük ortalama sistem enerji ve ekserji verimleri sırasıyla yaklaşık %36,5-38,4 ve %7,4-7,8 olarak bulunmuştur.



Şekil 11. PVT-GDIP test ekipmanının şematik diyagramı [38]

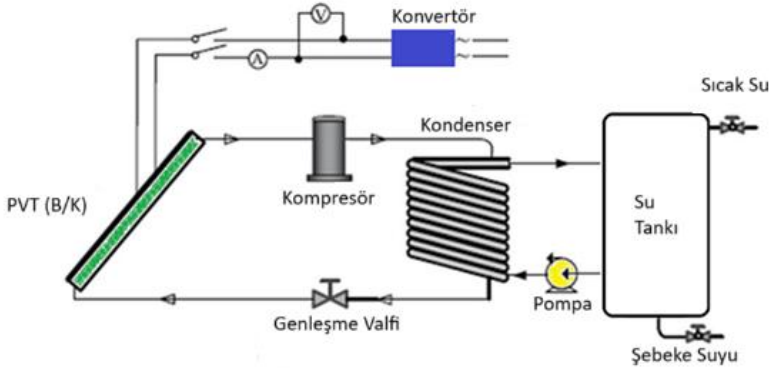
Yao ve diğerkleri [39], PVT destekli ısı pompası sisteminde daha yüksek termal ve elektriksel verimlilikler elde edebilmek için PVT panelde farklı roll-bond geometrik tasarımlarını (Şekil 12) uyguladılar ve nümerik analizlerini gerçekleştirdiler. Güneş pili ünitelerinin düzensiz çalışma sıcaklığının PVT modülünün elektriksel verimliliği üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Optimize edilmiş akışkan kanalı deseninin PV modülünün çalışma sıcaklığını 47,3 °C'ye kadar azaltabileceğini ve tipik bir yaz gününde elektriksel verimliliğini %46,5 oranında artırabileceğini ortaya koyuldu. Bu durumda sistemin ortalama COP değeri 4,37, PVT modülünün ortalama sıcaklık farkı 4,6 °C, ortalama elektriksel ve termal verimlilikler ise sırasıyla %16,7 ve %47,6 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 12. Farklı geometrilerde roll-bond paneller [39]

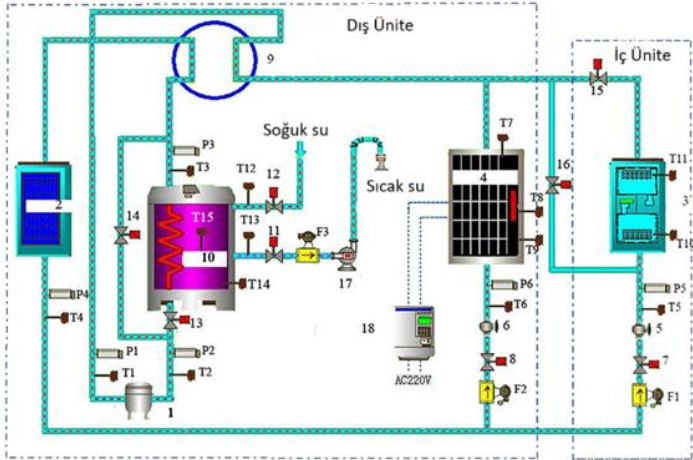
Chow ve diğerkleri [40], bir PVT kollektörünü bir GDIP sistemiyle entegre eden yeni bir yaklaşım geliştirdiler. Araştırmacılar, PVT-GDIP sistemini simüle etmek için dinamik simülasyon teknikleri kullandılar. Soğutucu olarak R-134a kullanılması sonucunda sistem ortalama 5,93 COP ve %12,1 PV verimliliği elde etti. Bu entegre sistemde, IP'ler ve PV modülleri ayrı ayrı ve yan yana monte edilerek önemli ölçüde daha fazla enerji

üretildi. Şekil 13'de gösterildiği gibi, modifiye edilmiş bir "buharlaştırıcı/kolektörü" (B/K) olan bir PVT destekli IP sistemi geliştirdiler. Geleneksel B/K kullanılan yuvarlak bakır boruların yerini ekstrüde edilmiş çok portlu bir alüminyum boru aldı. Sonuç olarak, PVT-GDIP sistemleri ayrıca alan ısıtma ve evsel sıcak su üretimi için de kullanılabilir. Sistemin klasik hava koşulları altında simülasyonu, geleneksel B/K bir PVT-GDIP sistemiyle karşılaştırıldığında, B/K modifikasyonlu en son PVT-GDIP sisteminin %7 daha yüksek COP, %6 daha fazla termal verimlilik ve %20 oranında bir bağıl elektrik verimliliği katsayısı elde ettiğini gösterdi. Tayland ve Nanjing'de (Çin), B/K modifikasyonlu yeni geliştirilen PVT-GDIP sistemi, verimli elektrik üretimi ve 150L suyu tüm yıl boyunca 50 °C'ye kadar ısıtmayı önerdi. Yaz aylarında, kompresörün hızının üç farklı seviyede kontrol edilmesiyle sistemin COP'leri önemli ölçüde iyileştirilirken, kış aylarında ısı çıkışları artırılır ve neredeyse tüm ısıtma yüklerini karşılar.



Şekil 13. Chow vd. analizini yaptıkları PVT-GDIP sisteminin şematik gösterimi [40]

Bir PVT-GDIP klima sistemi [41] tarafından incelenmiştir. IP klima sistemi yoğuşma basıncı, buharlaşma basıncı ve COP özellikleri deneyler yoluyla incelenmiştir. PVT verimliliği, su sıcaklığı, su ısıtıcısındaki ısı kapasitesi ve PV modül sıcaklığı da incelenmiştir. Deney kurulumu ve sonuçları Şekil 14'de gösterilmiştir. İç ve dış üniteler kullanılmıştır. Dış üniteler bir su ısıtıcısı, kompresör, ısı eşanjörü, dört yollu elektromanyetik vana, altı elektromanyetik vana, DC-AC dönüştürücü, gaz kelebeği vanası, sirkülasyon pompası ve PVT buharlaştırıcısı içermektedir. İç ünitelerde gaz kelebeği vanaları, elektromanyetik vanalar ve ısı eşanjörleri bulunur. PVT-GDIP klima sistemi tarafından %10,4'lük bir PV ortalama verimliliği elde edilir ve bu, normal bir PV modülüne kıyasla %23,8 oranında artırılabilir. Su ısıtıcısındaki su sıcaklığında %42'lik bir artışla, IP klima sisteminin ortalama COP'si 2,88'e ulaşabilir. Bu, daha iyi performans ve uzun vadeli istikrar gösterir.



Şekil 14. PVT-GDIP klima sisteminin şematik gösterimi [41]

Chae vd. [42], gerçek bir binaya dayalı olarak doğrulanen dinamik simülasyon kullanılarak PVT-GDIP sisteminin bir tahmin modeli oluşturmuştur. Entegre sistem gerçek uygulama için optimum şekilde tasarlanmıştır ve geleneksel model kullanılarak kapsamlı bir performans değerlendirmesi yapılmıştır. Optimum modelin geri ödeme süresi, geleneksel modelden 3 yıl daha kısa olan 9,42 yıldır. Optimum model, geleneksel modele kıyasla g tüketiminde yaklaşık %4'lk bir artış göstermiştir. Ancak, PVT kullanmayan bir modele kıyasla g tüketiminin hala %43'e kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Bu alışma, önerilen sistemin bina sektörünün karbonsuzlaştırılmasını teşvik ettiğini ve optimum tasarım uygulaması yoluyla önemli ekonomik faydalar sağladığını göstermektedir. Hong Kong'da bir PVT-GDIP sistemi kullanılarak [43], enerji performansı incelendi. Araştırmacılar ağore, her sistem ortalama 5,93 COP ve yıllık %12,1 elektrik verimliliği sağladı ve 25 C'deki referans değerini aşmıştır. Entegre bir sistem, birlikte kurulan IP ve PV modüllerinin geleneksel kurulumundan önemli ölçüde daha fazla enerji üretmiştir. Yaz aylarında, Mayıs ve Ekim ayları arasında, PVT-GDIP sistemi altı veya daha yüksek aylık COP değerlerine ulaştı. Ocak ayında COP 5,05 ve Temmuz ayında 6,89 olduğu elde edilmiştir. Yaz aylarında, sıcak su üretimi kış aylarına göre iki kat daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Hong Kong'un bina sektörlerinin yıl boyunca sıcak suya ihtiyaı vardır. Bu nedenle, PVT-GDIP sistemi potansiyel bir uygulama olarak grlmştir.

5. Sonuçlar

Güneş enerjisi ve ısı pompalarının kullanımı ısıtma ve soğutma karbonsuzlaştırması bağlamında en umut verici yollardan biri olarak grlmektedir. Literatürdeki alışmalar, PVT-GDIP

sistemlerinin genel enerji performansları geleneksel hava kaynaklı ve su kaynaklı sistemlere göre daha iyi olduğunu göstermiştir. PVT kollektörleri ve IP'lerin entegrasyonu, her iki alt sistemin performansını iyileştirerek güneş enerjisi kullanımını ve IP verimliliğini artırırken hem ısı hem de elektrik ihtiyacının karşılanmasında büyük bir katkı sağlamaktadır.

Termal emiciler üzerinde PV hücrelerinin doğrudan laminasyonu ile üretilen düz plakalı PVT kollektörlerinin benimsenmesi, enerji ve maliyet açısından önemli bir çözüm olarak görünmektedir. Dahası, doğrudan PVT ısıtma ve ısıtma/soğutma amaçlı bina amaçları ve yük eşleştirmeli ileri kontrol sistemleri için su termal depoları yüksek performans ve güvenilirlik seviyelerine ulaşmayı sağlar. Sistem karmaşıktıkça dolayısıyla genel maliyet de artmaktadır. PVT-GDIP sistemlerinin geleneksel sistem çözümlerine göre maliyet etkinliğini doğru bir şekilde değerlendirmek için, üretim teknikleri ve kontrol mantığı alanında bilimsel araştırmalar ilerlemeye devam etse bile, hala ayrıntılı ekonomik analizlere ihtiyaç vardır.

Güneş ışığı yoğunluğunda bir azalma genellikle kapalı havalarda veya yağmurlu mevsimde görülür. PVT-GDIP teknolojisi, hava dalgalanmalarının veya mevsimsel değişikliklerin güneş yoğunluğu üzerindeki etkisini azaltabilir. Bu teknoloji, etkili kollektör tasarımı yoluyla düşük yoğunluklu güneş radyasyonunun kullanımını optimize edebilir. Ayrıca, ikincil ısı kaynakları, güneş radyasyonunun olmadığı veya yetersiz olduğu durumlarda ısı üretmenin tamamlayıcı bir yolu olarak kullanılabilir. Ayrıca güneş ışınımının yoğun olduğu zamanlarda ısı ve elektrik enerjisinin depolanması bu sistemlerin sürdürülebilirliği açısından önemlidir.

Kaynaklar

[1] A. Shahsavari, F. T. Yazdi, and H. T. Yazdi, “Potential of solar energy in Iran for carbon dioxide mitigation”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, pp. 507-524, 2019, doi: 10.1007/s13762-018-1779-7.

[2] P. F. Coogan, L. F. White, M. Jerrett, R. D. Brook, J. G. Su, and E. Seto, “Air pollution and incidence of hypertension and diabetes mellitus in black women living in Los Angeles”, *Circulation*, vol. 125, pp. 767–72, 2012, doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.052753.

[3] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information”, *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.

[4] Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers. 2014.

[5] M. E. Baster, “Modelling the performance of Air Source Heat Pump Systems”, *Yüksek Lisans Tezi*, Linköping Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, İsveç, pp. 6-7, 2019.

[6] R. B. Jackson, P. Friedlingstein, R. M. Andrew, J. G. Canadell, C. L. Quéré, and G. P. Peter, “Persistent fossil fuel growth threatens the Paris Agreement and planetary health”, *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 121001, 2019, doi: 10.1088/1748-9326/ab57b3.

[7] L. Wald, “Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems”, *Solar radiation energy (fundamentals)*. Paris, France:

Encyclopedia of Life Support Systems, Eolss Publishers, pp. 48-49, 2009.

[8] A. Buonomano, F. Calise, A. Palombo, and M. Vicidomini, “Transient analysis, exergy and thermo-economic modelling of façade integrated photovoltaic/thermal solar collectors”, *Renew. Energy*, vol. 137, pp. 109–126, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.060.

[9] K. Almutairi, “Applications of intelligent techniques in modeling geothermal heat pumps: an updated review”, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 17, pp. 910–918, 2022, doi: 10.1093/IJLCT/CTAC061.

[10] B. Güleriyüz, “Güneş enerjisi destekli ısı pompası sisteminin termodinamik analizi”, *Yüksek lisans tezi*, Kütahya Dumlupınar üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2019.

[11] Y. A. Çengel, and M. A. Boles, “Thermodynamics: An Engineering Approach 5th Edition”, McGraw-Hill, pp. 607-631, 2006.

[12] M. Koşan, and M. Aktaş, “Experimental investigation of a novel thermal energy storage unit in the heat pump system”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 311, pp. 127607, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127607.

[13] T. T. Chow, “A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology”, *Applied Energy*, vol. 87, pp. 365-379, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.06.037.

[14] Z. Wang, P. Guo, H. Zhang, W. Yang, and S. Mei, “Comprehensive review on the development of SAHP for domestic

hot water”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 871-881, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.127.

[15] M. Koşan, M. Demirtaş, M. Aktaş, and M. Dişli, “Performance analyses of sustainable PVT assisted heat pump drying system”, *Solar Energy*, vol. 199, pp. 657–672, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.02.040.

[16] S. Kutbay, and G. Afsin, “Comparison of solar assisted heat pump systems for heating residences: A review”, *Solar Energy*, vol. 249, pp. 424-445, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2022.11.051.

[17] S. S. Joshi, and A. S. Dhoble, “Photovoltaic-thermal systems (PVT): Technology review and future trends”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 848-882, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.067.

[18] “Fotovoltaik Panel Yapısı Nasıldır?”, Orbit Enerji A.Ş., Erişim: 28 Kasım 2024, <https://www.orbitenerji.com/>.

[19] S. M. Bambrook, and A. B. Sproul, “A solvable thermal circuit for modelling PVT air collectors”, *Sol. Energy*, vol. 138, pp. 77–87, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.09.007.

[20] E. Bisengimana, y. Yanping, M. Binama, G. Nyiranzeyimana, and Z. Jinzhi, “A review on the influence of the components on the performance of PVT modules”, *Solar Energy*, vol. 226, pp. 365-388, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.08.042.

[21] M. Koşan, and M. Aktaş, “Performance investigation of a double pass PVT assisted heat pump system with latent heat storage unit”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 199, pp. 117524, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117524.

[22] N. Shao, L. Ma, C. Zhou, and D. Zhang, “Experimental study on the heat transfer performance of the PVT ventilated roof as heat exchanger for heat pump system”, *Renewable Energy*, vol. 187, pp. 995-1008, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.01.084.

[23] A. Aktaş, M. Koşan, B. Aktekeli, Y. Güven, E. Arslan, and M. Aktaş, “Numerical and experimental investigation of a single-body PVT using a variable air volume control algorithm”, *Energy*, vol. 307, pp. 132793, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132793.

[24] A. H. Kazem, T. Miqdam, A. H. A. Chaichan, and K. Sopian, “A systematic review of photovoltaic/thermal applications in heat pumps systems”, *Solar Energy*, vol. 269, pp. 112299, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2023.112299.

[25] M. Ahmadinejad, and R. Moosavi, “Energy and exergy evaluation of a baffled-nanofluid-based photovoltaic thermal system (PVT)”, *Int. J. Heat Mass Transf.* vol. 203 pp. 123775, 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123775.

[26] G. K. Dolgun, M. Koşan, M. Kayfeci, A. G. Georgiev, and A. Keçebaş, “Life cycle assessment and cumulative energy demand analyses of a photovoltaic/thermal system with MWCNT/Water and GNP/Water nanofluids”, *Processes*, vol. 11, no. 3, pp. 832, 2023, doi: 10.3390/pr11030832.

[27] R. Lazzarin, “Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 116, pp. 146-160, 2020, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.03.031.

[28] M. Bakker, H. Zondag, M. Elswijk, K. Strootman, and M. Jong, “Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump”, *Solar Energy*, vol. 78, no. 2, pp. 331-339, 2005, doi: 10.1016/j.solener.2004.09.019.

[29] E. Entchev, L. Yang, M. Ghorab, and E. Lee, “Performance analysis of a hybrid renewable microgeneration system in load sharing applications”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 71, no. 2, pp. 697-704, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.10.057.

[30] M. Canelli, E. Entchev, M. Sasso, L. Yang, and Ghorab, “Dynamic simulations of hybrid energy systems in load sharing application”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 78, pp. 315-325, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.061.

[31] P. Brischoux, and M. Bernier, “Coupling PV/T collectors with a groundsource heat pump system in a double U-tube borehole”, ASHRAE winter conference. Orlando, Florida, 2016.

[32] J. Ji, K. Liu, T. Chow, G. Pei, W. He, and H. He, “Performance analysis of a photovoltaic heat pump”, *Applied Energy*, vol. 85 pp. 680–693, 2008, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.01.003.

[33] G. Pei, J. Ji, T. Chow, H. He, K. Liu, and H. Yi, “Performance of the photovoltaic solar-assisted heat pump system with and without glass cover in winter: a comparative analysis”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy*, vol. 222, no. 2, pp. 179-187, 2008, doi: 10.1243/09576509JPE43.

[34] A. James, M. Mohanraj, M. Srinivas, and S. Jayaraj, “Thermal analysis of heat pump systems using photovoltaic-thermal collectors: a review”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 144, pp. 1-39, 2019, doi:10.1007/s10973-020-09431-2.

[35] A. A. Ammar, K. Sopian, M. A. Alghoul, B. Elhub, and A. M. Elbreki, “Performance study on photovoltaic/thermal solar-assisted heat pump system”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 136, pp. 79–87, 2019, doi: 10.1007/s10973-018-7741-6.

[36] J. Ji, H. F. He, T. Chow, G. Pei, W. He, and K. L. Liu, “Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump”, *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 52, no. 5-6, pp. 1365-1373, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.08.017.

[37] E. Bellos, and C. Tzivanidis, “Multi-objective optimization of a solar assisted heat pump-driven by hybrid PV”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 528–535, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.059.

[38] H. D. Fu, G. Pei, J. Ji, H. Long, T. Zhang, and T. T. Chow, “Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 40, pp. 343-350, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.036.

[39] Y. Jian, L. Wenjie, Z. Yao, D. Yanjun, Z. Junjie, and N. Vojislav, “Two-phase flow investigation in channel design of the roll-bond cooling component for solar assisted PVT heat pump application”, *Energy Conversion and Management*, vol. 235, pp. 113988, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113988.

[40] G. Xu, S. Deng, X. Zhang, L. Yang, and Y. Zhang, “Simulation of a Photovoltaic/Thermal Heat Pump System Having a Modified Collector/Evaporator”, *Sol. Energy*, vol. 83 no. 11, pp. 1967–1976, 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.07.008.

[41] G. Fang, H. Hainan, and X. Liu, “Experimental investigation on the photovoltaic- thermal solar heat pump air-conditioning system on water-heating mode”, *Exp. Therm Fluid Sci*, vol. 34, no. 6, pp. 736–743, 2010, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.01.002.

[42] C. Soowon, B. Sangmu, and N. Yujin, “Economic and environmental analysis of the optimum design for the integrated system with air source heat pump and PVT”, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 48, pp. 103142, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103142.

[43] T.T. Chow, K.F. Fong, G. Pei, J. Ji, and M. He, “Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong”, *Appl. Therm. Eng*, vol. 30 no. 8–9, pp. 1066–1072, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.01.013.

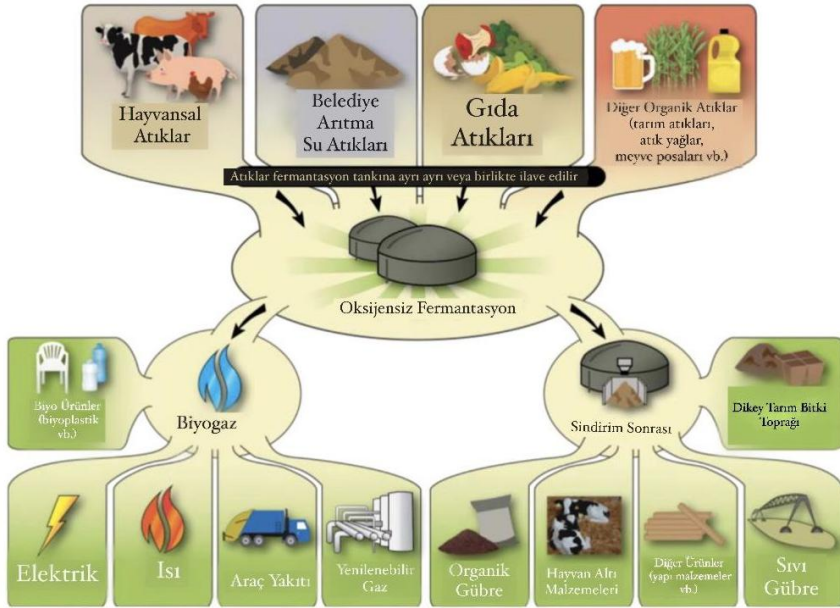
Biyogaz Üretiminde Kullanılan Ön Arıtma Teknikleri: Güncel Bir Değerlendirme

1. Giriş

Sanayileşme, kentleşme ve ekonomik büyümedeki son zamanlarda yaşanan artış fosil yakıtların hızla tükenmesine ve beraberinde enerji fiyatlarının artmasına neden olmakta ve bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. 2050 yılına kadar dünya enerji tüketiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım payının % 50'ye ulaşması ön görülmektedir [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle enerjisi sayılabilir. Bu kaynaklar temiz enerji kaynakları olarak değerlendirilmekte ve çevre dostu yapılarıyla ön plana çıkmaktadırlar [2]. Biyokütle, sürdürülebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesinde kritik bir role sahiptir. Küresel biyokütle üretiminin yıllık yaklaşık 130 milyar ton olduğu tahmin edilmekte ve dünyada en fazla bulunan yenilenebilir enerji kaynağının biyokütle olduğu belirtilmektedir [3]. Biyokütle çeşitli yöntemlerle enerjiye ya da yakıta dönüştürülebilir. Bunlar arasında ısı enerjisi (direkt yakma işlemi), yakıt gazı (kısmı yanma), biyogaz (fermantasyon), biyoalkol (biyokimyasal süreçler), biyodizel; ve kimyasalların ve yakıtların sentezlenebileceği biyo-yag veya sentez gazı yer almaktadır [4].

Biyogaz, organik atık malzemelerden elde edilen ve çoğunluğunu metan ve karbondioksitin oluşturduğu bir gaz

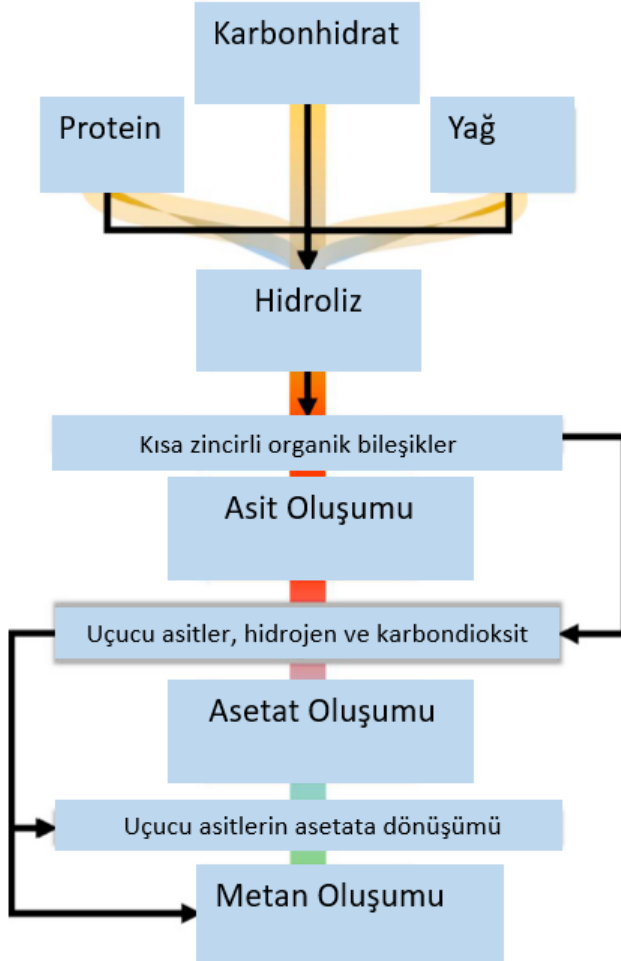
karışımıdır. Biyogazın içeriği genel olarak % 55–65 oranında metan, % 35–45 oranında karbondioksit, % 0–3 oranında azot, % 0–1 oranında hidrojen ve % 0–1 oranında hidrojen sülfürden oluşmaktadır [5]. Biyogaz üretim süreci ve ortaya çıkan ürünler şekil 1’de [6] gösterilmiştir.



Şekil 1: Biyogaz üretimi ve ortaya çıkan ürünler [6].

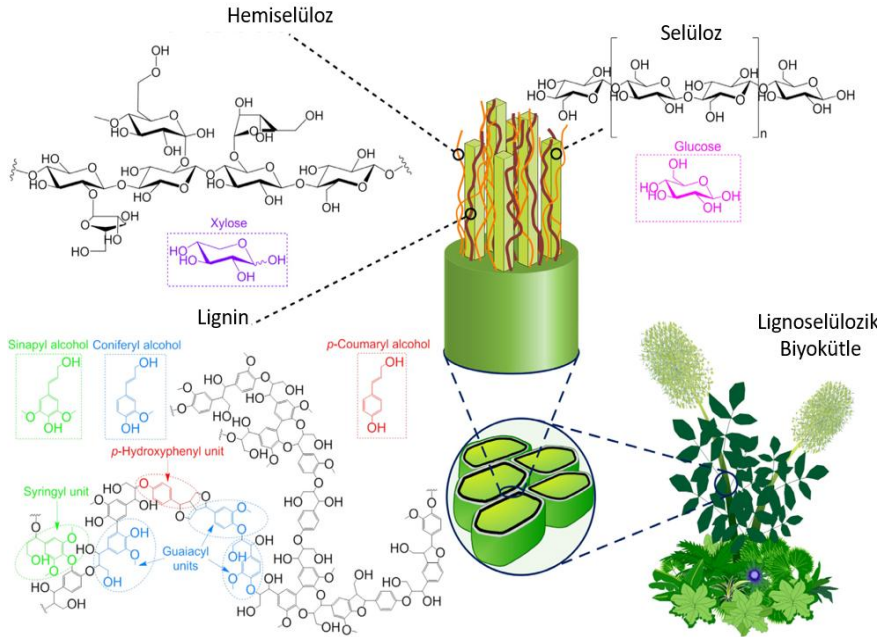
Biyogaz üretiminde oksijensiz fermantasyon yöntemi uygulama genişliği, enerji dönüşümünde etkinlik, düşük çevresel etki ve düşük maliyeti [7] sebebiyle en uygun yöntemdir. Oksijensiz fermantasyon organik maddelerin oksijensiz ortamda yıkımını sağlayan, biyogaz ve besin açısından zengin atık üreten biyolojik bir süreçtir [7]. Oksijensiz fermantasyonda çeşitli sürelerde gerçekleşen biyokimyasal, kimyasal ve fizikokimyasal süreçler vardır. Kimyasal süreçler, fizikokimyasal ve biyokimyasal süreçlerden daha hızlıdır. Fizikokimyasal reaksiyonlar, (sıvı-gaz transferi veya çökme-

çözünme vs.) kimyasal reaksiyonlara göre çok daha düşük bir hızda gerçekleşirken en yavaş olanlar biyokimyasal süreçlerdir [8]. Oksijensiz fermentasyon bir grup mikroorganizma tarafından gerçekleştirilir ve genellikle hidroliz, asidogenez, asetogenez, ve metanogenez olmak üzere 4 aşamadan oluşur [9]. Bu aşamalar şekil 2’ de gösterilmiştir.



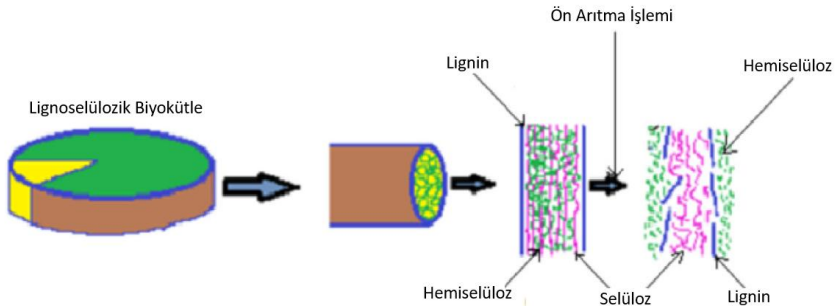
Şekil 2: Oksijensiz fermentasyonun aşamaları [9].

Temelde lignoselülozik malzemeler olan tarımsal atıklar, bollukları ve yenilenebilirlik özelliklerinden dolayı oksijensiz fermantasyon hammaddesi olarak yaygın bir ilgi görmektedir [10]. Tipik olarak lignoselülozik malzemelerin ana bileşenleri şekil 3'te gösterildiği gibi selüloz, hemiselüloz ve lignindir. Bu bileşenlerin ağırlıkça oranları genellikle sırasıyla % 30–55, % 15–40 ve % 10–35 olarak ifade edilmektedir [11]. Bu yapıların varlığı mikroorganizmaların işlevini zorlaştırmakta, işlem süresinin uzun olmasına neden olmakta ve elde edilecek olan biyogaz miktarını da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, biyokütlenin biyolojik olarak daha kolay parçalanabilir hale getirilmesi için ön arıtma teknikleri büyük bir önem kazanmıştır.



Şekil 3: Lignoselülozik biyokütlenin şematik yapısı [11]

Lignin, bitki hücre duvarının en dirençli bileşenidir ve lignin oranı ne kadar yüksekse, kimyasal ve enzimatik bozulmaya karşı direnç o kadar yüksektir. Lignin ve hemiselüloz, hatta selüloz arasında kimyasal bağlar vardır. Bu bağlar fermantasyonu zorlaştırarak lignoselülozik yapıli maddeye kimyasal ve biyolojik bozunma karşısında bir direnç mekanizması oluşturmaktadır [12]. Aslında lignoselülozik malzemede bulunan selüloz ve hemiselüloz oksijensiz fermantasyon mikroorganizmaları tarafından ayrıştırılabilir. Ancak işlenmemiş lignoselülozik hammaddenin biyogaz reaktörüne beslenmesi zordur. Yine de beslenmesi durumunda bu malzemeler yüzecek ve işlem sürecinde sadece kısmen ayrıştırılabilecektir [10]. Biyokütlelerin biyoyakıtı dönüştürülmesi sürecinde çeşitli prosesler ve ön arıtma teknikleri uygulanmaktadır. Bu ön arıtma teknikleri fiziksel, kimyasal, fizikokimyasal, biyolojik ve kombine (bunların bir ya da daha fazlasının birleştirilmesi) olarak sınıflandırılmaktadır [13]. Her bir ön arıtma mekanizması hemiselüloz, selüloz ve lignin yapısı üzerinde belirli bir etkiye sahiptir [14]. Ön arıtmanın etkisi şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4: Ön arıtma işleminin lignoselülozik biyokütle üzerindeki etkisi [13]

Lignoselülozik biyokütlenin yanısıra biyogaz üretimi için kullanılan diğer organik atıklar da ön artıma işlemi ile biyogaz veriminde artış gösterebilmektedir [15], [16], [17]. Bu çalışmada, biyogaz üretiminde kullanılan ön arıtma tekniklerinin ele alınması ve son yıllarda bu alanda kaydedilen ilerlemelerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Değerlendirme güncel (2021 ve sonrası) literatürden elde edilen bulgular doğrultusunda yapılmış ve son yıllardaki gelişmelerin ışığında biyogaz üretiminde daha verimli ve sürdürülebilir ön arıtma tekniklerinin benimsenmesi için önerilerde bulunulmuştur.

2. Biyogaz Üretim Süreci

Organik maddenin biyogaza dönüşüm süreci hidroliz, asitogenez, asetogenez ve metanogenez olmak üzere 4 adımda tamamlanır. İşlemler sonucunda metanın yanında karbondioksit de üretilir [18]. Aşağıda bu 4 adım detaylı olarak anlatılmıştır.

Hidroliz: Organik materyalin (karbonhidratlar, proteinler, lipitler) daha küçük bileşenlere (şekerler, amino asitler, yağ asitleri) parçalandığı aşamadır. Sucul bakteriler proteinler, karbonhidratlar, selüloz ve yağlar gibi büyük organik madde moleküllerini daha küçük moleküler yapıya sahip bileşiklere parçalamak için enzimleri kullanır. Aslında bu bakteriler karmaşık organik maddeleri uçucu yağ asitlerine parçalar ve asetik asit ve propiyonik aside ek olarak bir miktar amonyak ve karbondioksit de üretilir [19].

Asitogenez: Asitogen bakterileri, fermentasyon aşamasında karbondioksit ve hidrojen oluşturmak için hidroliz aşamasının çözünebilir moleküllerini kullanır. Bu aşamadaki başlıca ürün, CH_4

üreten mikroorganizmalar için gerekli, önemli bir organik asit olan CH_3COOH 'dır [20].

Asetogenez: Asitogenez ürünlerinin, asetat, hidrojen ve karbondioksite dönüştürüldüğü aşamadır. Bu aşamanın atık ürünü, oksijensiz fermantasyon sürecinin asitogenez aşamasında oluşan H_2 gazıdır, bu nedenle bu aşama dehidrojenasyon aşaması olarak da bilinir. Bu doğrudur çünkü asetojenik bakterilerin metabolizması üretilen H_2 gazı tarafından engellenir [21].

Metanogenez: Bu aşama, oksijensiz fermantasyonun son aşamasıdır. Bu aşamada CH_3COOH ve H_2 bakteriler tarafından CO_2 ve CH_4 dönüştürülür; bu dönüşümden sorumlu bakterilere metanojen bakteriler denir. Metanojenler, yavaş büyüdükleri ve ortamdaki değişikliklere karşı son derece hassas oldukları için oksijensiz fermantasyon süreçleri için çok önemlidir [21].

3. Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler

Organik malzemelerin biyogaza dönüştürülmesi yukarda da bahsedildiği gibi içlerinde hidroliz, asit, asetat ve metan bakterilerinin bulunduğu çoklu mikrobiyal tropik grupların karmaşık bir dengesi ile sağlanmaktadır [22]. Biyogaz üretim süreci nihayetinde bir dizi biyokimyasal reaksiyon sonucunda gerçekleşmektedir. Üretilen biyogaz miktarı diğer biyokimyasal reaksiyonlar gibi pek çok fiziksel ve kimyasal faktörlerden etkilenmektedir [23]. Bu faktörler aşağıda sıralanmıştır.

PH

Biyogaz üretimini etkileyen faktörlerden bir tanesi reaktörün içindeki PH değeridir. Farklı mikroorganizmalar farklı PH aralıklarında efektif olarak çalışabilmektedirler. Genel olarak asit

bakterileri daha geniş bir aralıkta (4.8-8.0) aktif iken metan bakterileri daha dar bir aralıkta (6.7-7.5) aktiftirler [23]. Literatürde sıklıkla belirtilen ideal PH aralığının 6.5-7.6 olduğunu söylemek mümkündür [24]. PH değerinin düşmesi metan bakterilerinin yaşamasını zorlaştırır ve biyogaz üretimini durdurur [19].

Sıcaklık

Oksijensiz fermantasyon sırasında biyogaz verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri belki de en önemlisi sıcaklıktır. Süreçte yer alan bakterilerin aktif olarak çalışabildikleri sıcaklıklar farklılık göstermektedir. Sıcaklık isteklerine göre bakterileri sakrofilik (20°C'nin altında çalışan bakteriler), mezofilik (20°C-45°C sıcaklık aralığında çalışan bakteriler) ve termofilik (45°C'ten büyük sıcaklıklarda çalışan bakteriler) olarak sınıflandırmak mümkündür [25]. Sıcaklığın yüksek olması reaksiyon zamanını azaltsa da yüksek sıcaklık maliyeti artıracığından sıcaklık seçimi yapılırken dikkatli davranılmalıdır [26]. Optimum sıcaklığın seçilmesi işlemin ekonomikliğini doğrudan etkileyecektir.

C:N Oranı

Organik maddeler azot, hidrojen ve karbon içermektedirler. Metanogenez aşaması C/N oranından etkilendiği için biyogaz üretimi de dolaylı olarak C/N oranından etkilenmektedir [27]. Bu oranın 20 ile 30 arasında olması oksijensiz fermantasyon için idealdir. Yüksek C/N oranı azotun metan bakterileri tarafından protein ihtiyacını karşılamak için tüketilmesine ve geri kalan karbonla tepkimeye girmemesine sebep olur. Düşük C/N oranı ise azot serbest kalır ve amonyak olarak birikir ve ortamın PH'ı yükselir [28]. Bazı organik maddelerin C/N oranları tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Bazı biyo bozunur malzemelerin C/N oranları [28]

Ham madde	C/N
Ördek Gübresi	8
İnsan Dışkısı	8
Tavuk Gübresi	10
Keçi Gübresi	12
Domuz Gübresi	18
Koyun Gübresi	19
İnek Gübresi	24
Su Sümbülü	25
Kentsel Katı Atık	40
Fil Dışkısı	43
Mısır Samanı	60
Pirinç Samanı	70
Buğday Samanı	90
Talaş	>200

Hammadde Konsantrasyonu

Bakterilerin organik malzemeleri ayrıştırabilmesi için seyreltik bir çözeltide olmaları gerekir. Bir biyogaz reaktöründe oksijensiz fermantasyon için uygun hammadde oranı %7- %9 civarındadır. Bu oranın yükselmesi yapışkanlığın artmasına ve bakterilerin gelişememesine neden olurken düşmesi de çözeltinin katmanlı olmasına neden olur [19]. Biyogaz üretimi her iki durumdan da olumsuz etkilenecektir.

Seyreltme

Bazı olduğu durumlarda reaktör içindeki organik hammadde çözeltilsinin seyreltilmesi gerekebilir. Seyreltme işlemi reaktöre su ekleyerek yapılır. Çözelti aşırı akışkan ya da aşırı viskoz olmamalıdır. Seyreltme işlemi fazla yapılır ve çözelti aşırı akışkan olursa katı partiküller yeterince çözünemez. Eğer çözelti aşırı viskoz olursa da karıştırma işlemi zorlaşır ve üretilen gaz üst kısımlara efektif bir şekilde geçemez [28].

Yükleme Oranı

Birim hacim başına günlük reaktöre konulması gereken ham kadı madde miktarına yükleme oranı denir [27]. Yükleme oranının optimize edilmesi reaktörün verimini etkileyecektir. Yükleme oranıyla üretilen biyogaz miktarı arasında belli bir noktaya kadar doğrusal bir ilişkiden bahsedilebilir. Ancak yükleme oranının sürekli artması üretilen biyogaz miktarının da sürekli olarak artması anlamına gelmez. Bir noktadan sonra yükleme oranı artsa bile biyogaz miktarı artış göstermez [29].

Bunların dışında hammaddenin reaktör içinde bekletilme süresi, reaktör içindeki zehirli madde miktarı ve karıştırma gibi faktörler de üretilecek olan biyogaz miktarını etkilemektedir [27].

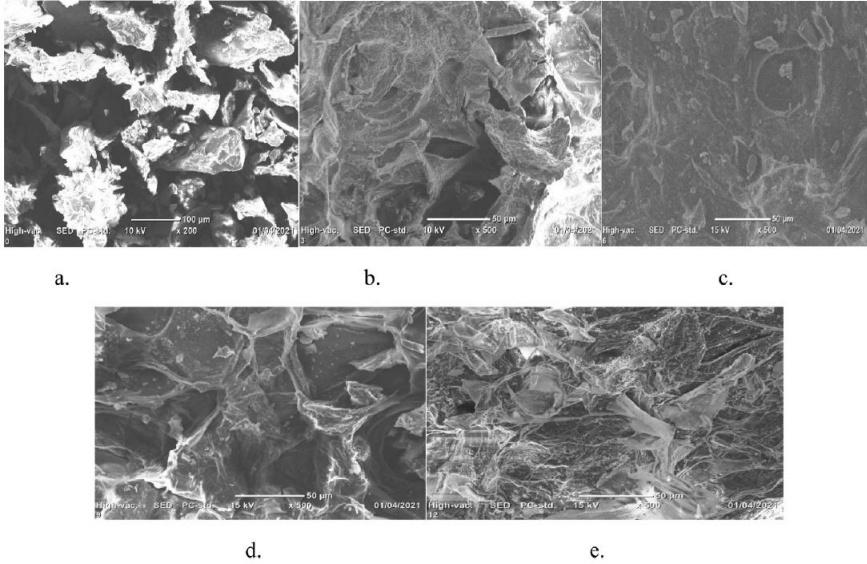
4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Ön Arıtma Teknikleri ve Etkileri

Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak biyogaz uzun yıllardır araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Biyogaz üretiminin, hem sağladığı enerji açısından, hem de atık bertarafı açısından dikkate değer bir yerde olduğu görülür. Ayrıca üretim aşamasında çevreye de herhangi bir zararını olmayışı bir diğer

avantajıdır. Araştırmacılar organik atıklardan üretilen biyogaz miktarının artırılması konusunda da çalışmalar yapmakta ve bazı teknikler uygulamaktadırlar. Bu tekniklerden biri de ön arıtmadır. Literatürde biyogaz üretimini olumlu yönde etkileyen birçok ön arıtma tekniği mevcuttur. Teknolojik gelişmeler bu teknikler üzerinde de olumlu etki yapmış ve verimlerini artırmıştır. Ancak bu tekniklerin uygulamasında başta ekonomi olmak üzere bazı kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir. Çalışmanın bu kısmında literatürde yer alan güncel çalışmalara yer verilmiş ve bu konu üzerine çalışan araştırmacılara yol göstermesi hedeflenmiştir.

Belay ve diğerleri 2021 yılında yaptıkları çalışmada kaktüs kladotlarına alkali hidrojen peroksit ön artıma işlemi uygulamışlar ve biyogaz üretimine etkilerini incelemişlerdir. Ön arıtma işleminde PH değeri 11.5, sıcaklık 30°C ve karıştırıcı hızı 180 rpm olarak belirlenmiştir. Ayrıca alkali hidrojen peroksit konsantrasyonu ağırlıkça %30 (w/w çözelti) ve işlem süreleri 3, 6, 9 ve 12 saat olarak seçilmiştir. Şekil 5'te ön arıtma uygulanan ve uygulanmayan numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Çalışmada 37°C sıcaklıkta mezofilik koşullarda biyogaz üretimi yapılmıştır. Kullanılan hammaddenin selüloz, hemiselüloz ve lignini içeriği sırasıyla %12.51, %16.34 ve %10.45 olduğu belirlenmiştir. Ön arıtma işleminden sonra ise bu oranların selüloz, hemiselüloz ve lignini içeriği sırasıyla %12.50, %13.63 ve 7.49 olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum ön arıtma işleminin daha çok lignin yıkımı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Çalışmanın üretilen biyogaz miktarı üzerindeki etkilerine bakılacak olursa, kg uçucu katı madde başına 877 ml'den 1613 ml'ye bir artışın olduğu görülür. Bu

artış % 83.4'lük bir değere tekabül etmektedir ki bu değer oldukça iyi seviyededir [30].

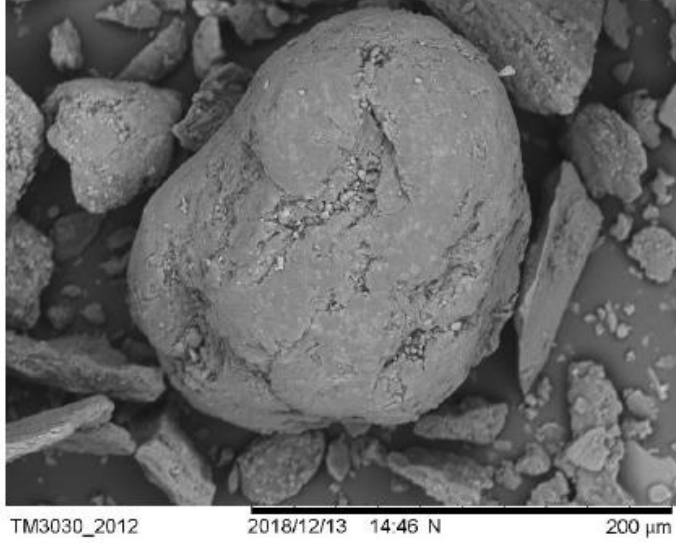


Şekil 5: a)Ön arıtma uygulanmamış, b) 3 saat ön arıtma uygulanmış, c) 6 saat ön arıtma uygulanmış, d) 9 saat ön arıtma uygulanmış, e) 12 saat ön arıtma uygulanmış numuneler [30].

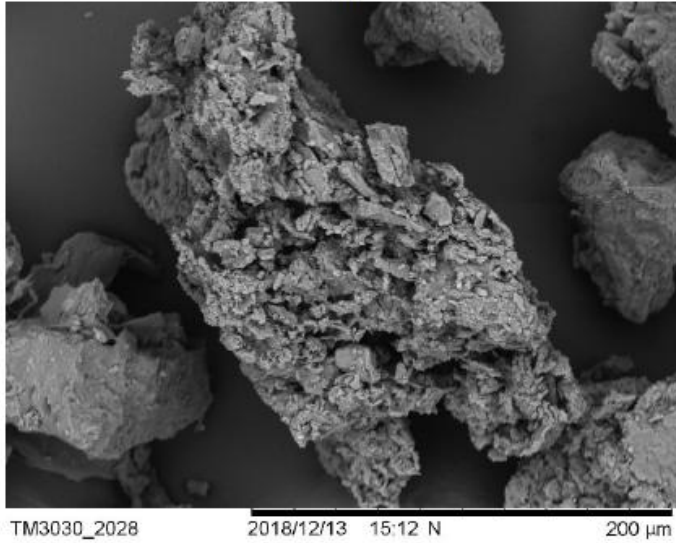
Konkol ve Cenian tavuk gübresine 20 °C ile 60 °C sıcaklık aralığında su ekstraksiyonu ön arıtma işlemi uygulamışlardır. Bu ön arıtma sayesinde oksijensiz fermantasyon işleminde elde edilecek olan metan ve biyogaz miktarında artış hedeflenmiştir. Ön arıtma işlemi 100 ml saf su içerisine 5g numune konulup 10 dakika boyunca sallama yoluyla yapılmıştır. Sallamadan sonra numuneyi sudan ayırtmak için 10 dakika boyunca 5000 rpm ile santrifüj işlemi uygulanmıştır. Araştırmacılar yapılan ön arıtmanın C:N oranını 2 ile 2.7 kat artırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca elde edilen biyogaz ve

metan miktarlarında da sırasıyla %16-%45 ve %18- %39 aralıklarında artışlar kaydetmişlerdir [31].

Bir diğer çalışmada Fenk ve arkadaşları 2021 yılında yeşil alglerden üretilecek olan biyogaz miktarına otoklav ön arıtma işleminin etkisini gözlemlemek için bir çalışma yapmışlardır. Otoklav işlemi 80 °C ve 120 °C olmak üzere 2 farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Bunların yanında bir de herhangi bir ön artmanın uygulanmadığı kontrol grubu vardır. Ön arıtma işleminde katı-sıvı oran 20:1 iken işlem süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir. Ön artıma uygulanmış ve uygulanmamış numunelere ait SEM görüntüleri şekil 6'da gösterilmektedir. Çalışmada elde edilen biyogaz üretim miktarları 120 °C'de ön arıtma uygulanmış, 80 °C'de ön arıtma uygulanmış ve kontrol grubu için sırasıyla 600 ml, 450 ml ve 400 ml olmuştur [32]. Bu değerler göz önüne alındığında yeşil alglere otoklav ön artma uygulanmasının oksijensiz fermantasyon ile elde edilen kümülatif biyogaz üretiminde %50 artış sağladığı gözlemlenebilir. Şekil 6'da verilen SEM görüntüsü otoklav ön artıma işleminin numunenin yapısında bir ayrışma oluşturduğunu göstermektedir.



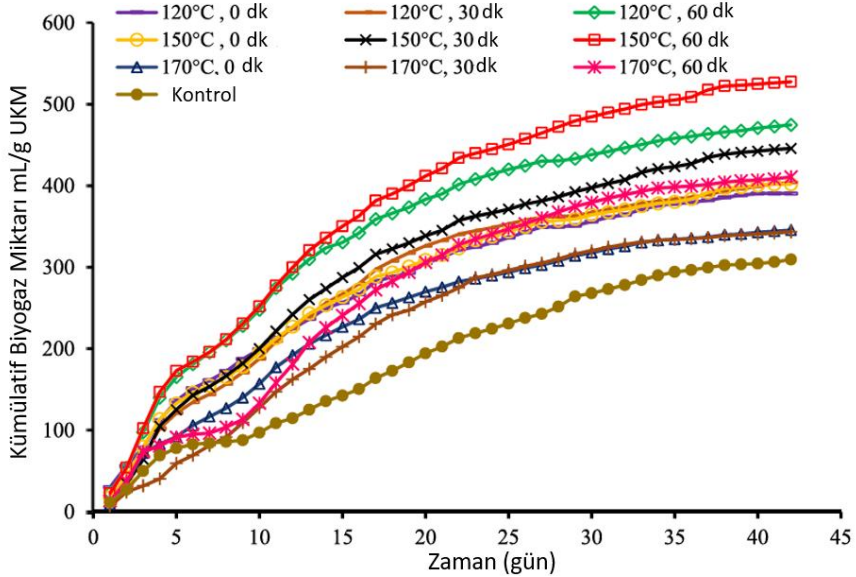
(a)



(b)

Şekil 6: Otoklav ön artıma işlemi a) uygulanmamış ve b) uygulanmış numunelerin SEM görüntüleri [32]

Saleem ve diğ er araştırmacılar 2024 yılında yaptıkları bir çalışmada hidrotermal ön arıtma işleminin sızıntı suyuyla beslenen bir su yosunu cinsinin (*Scenedesmus*) biyogaz üretimine etkisini incelemişlerdir. Yapılan  n arıtmada sıcaklık 120  C, 150  C ve 170  C iken ön arıtma süresi 30 ve 60 dakika olarak belirlenmiştir. Çalışmada     nebilir kimyasal oksijen ihtiyacının (sCOD)  n arıtma yapılmayan numuneye göre 170  C ve 60 dakika ön arıtma yapılan numune için %260 arttığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar,  n arıtma yapılmamış numuneye kıyasla biyogaz üretimindeki en yüksek artış miktarını (%70) ve üretilen metan miktarındaki en yüksek artışı (%100) 150  C sıcaklık ve 60 dakika bekleme süresinde ön arıtma uygulanmış yosun numunesinden elde edildiğini belirtmişlerdir [1]. Hidrotermal  n arıtmanın etkisinin görülmesi için Saleem ve diğ erlerinin çalışmalarında sunduğu grafik şekil 7’de g r lmektedir. Bu grafikten  n arıtmanın biyogaz üretimindeki etkinliğini net olarak g r lmektedir.



Şekil 7: Hidrotermal ön artıma uygulanmış yosunlardan elde edilen kümülatif biyogaz miktarı [1]

Choe ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları bir çalışmada biyogaz hammadresi olarak tofu atığı ve hidrokömür kullanmışlar ve oksijensiz fermentasyon işleminden önce biyogaz verimini artırmak için hidrotermal ön arıtma uygulamışlardır. Ön arıtma işlem parametreleri sıcaklık, basınç ve karıştırma hızı kontrolüdür. Reaktör 1:1 oranında tofu atığı ve saf su ile doldurulup karıştırılmıştır. Sıcaklık değeri 130 °c ve 180 °C arasında değişmiştir. İşlem sırasında basınç kontrol edilmemiş ancak takip edilmiştir. Basınç 8-12 bar aralığında değişmiştir. İçerik 90 rpm hızında karıştırılmıştır. Ön artıma işlemi numunenin toplam katı madde oranını düşürmüştür. Choe ve arkadaşları maksimum biyogaz miktarına 140 °C'ta ön arıtma işlemi uygulanmış numune ile 288 L/g UKM olarak ulaşmışlardır. Çalışmada tofu atığına uygulanabilecek

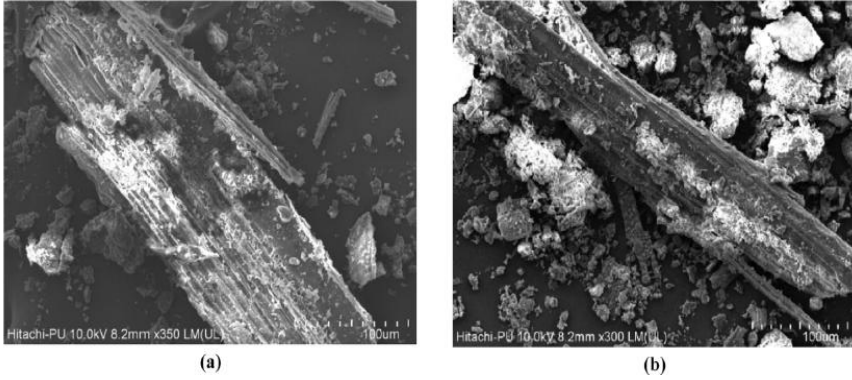
en uygun hidrotermal ön arıtma sıcaklığının 140 °C olduğu belirtilmiştir [33]. Bu çalışmada, ön artıma işleminin numunenin toplam katı madde miktarını %13.28'ten % 7.17 ve daha düşük seviyelere çektiği görülmüştür. Zhu ve diğerlerinin [34] 2014 yılında yaptığı çalışmada yer alan bilgilere göre toplam katı maddenin %20'den yüksek olması oksijensiz fermantasyon için uygun olmamaktadır. Dolayısıyla Choe ve arkadaşlarının yaptığı hidrotermal ön arıtma işlemi tofu atığını oksijensiz fermantasyon için daha uygun bir hale getirmiştir. Yapılan ön artıma işlemlerinin tofu atığının toplam katı madde oranında yaptığı değişiklikler tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2: Hidrotermal ön arıtma işleminin numune üzerindeki etkileri [33]

Ön artıma	HPTR-130	HPTR-140	HPTR-150	HPTR-160	HPTR-170	HPTR-180
TKM (%)	6.73 ± 0.27	7.14 ± 0.25	7.17 ± 0.31	6.63 ± 0.24	6.27 ± 0.23	6.12 ± 0.26
UKM (%)	5.70 ± 0.23	7.02 ± 0.27	6.97 ± 0.23	6.33 ± 0.25	5.95 ± 0.21	5.71 ± 0.23
UKM/TKM (%)	85.27 ± 0.27	98.25 ± 0.25	97.21 ± 0.26	95.54 ± 0.28	94.93 ± 0.31	91.71 ± 0.29
Nem içeriği (%)	93.24 ± 3.52	92.86 ± 2.94	92.83 ± 3.26	93.37 ± 3.52	93.73 ± 3.52	93.88 ± 2.96
PH	4.68 ± 0.19	4.57 ± 0.17	4.49 ± 0.15	4.39 ± 0.17	4.07 ± 0.17	4.0 ± 0.16
Kül içeriği (%)	0.13 ± 0.04	0.17 ± 0.04	0.28 ± 0.05	0.29 ± 0.06	0.28 ± 0.07	0.29 ± 0.07

Sahil ve arkadaşları 2023 yılında yaptıkları çalışmada pirinç samanının biyogaz verimini iyileştirmek için selüloz üreten mikrobiyal konsorsiyum ile biyolojik bir ön arıtma tekniği uygulamışlardır. Araştırmacılar uyguladıkları işlem ile selülozik

aktivitenin iyileştiğini ve biyogaz üretimini ön arıtma yapılmamış numuneye göre % 45.93 oranında artış sağlandığını belirtmişleridir [35]. Yapılan bu çalışma biyolojik ön arıtmanın biyogaz verimini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Ham numunenin ve konsorsiyum ile ön arıtma yapılmış numunenin FESEM görüntüleri şekil 8’de gösterilmiştir.

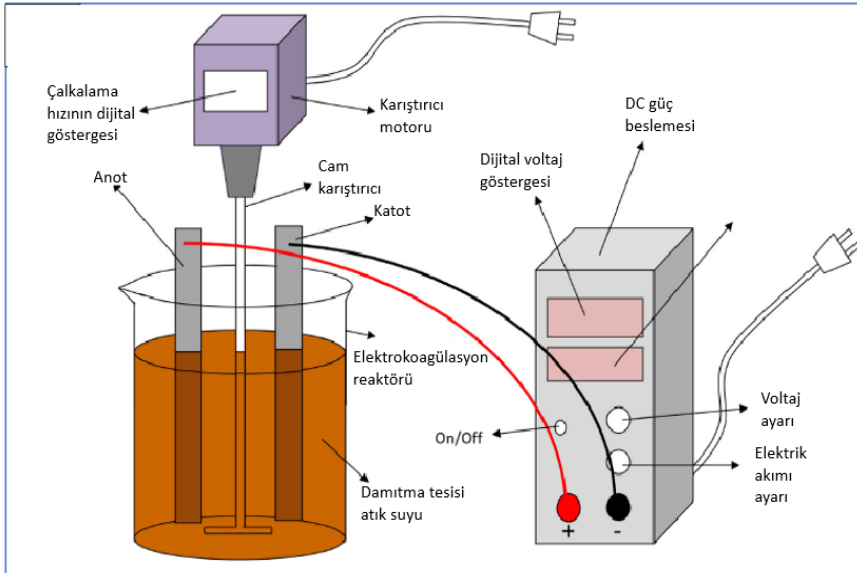


Şekil 8: a) ham numune, b) konsorsiyum ön arıtma işlemi uygulanmış numune [35]

Contreras ve arkadaşları 2024 yılında, kanatlı kesimhane atığında biyogaz üretim verimini artırmak için termal ön arıtma işlemi uygulamışlardır. Ön arıtma 1L’lik şişelerde 80 °C sıcaklık ve 1 saat operasyon süresinde uygulanmıştır. Ön arıtmadan sonra numunelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bozulmaması için dondurucuda muhafaza edilmiştir. Biyogaz üretimi için oksijensiz fermantasyon termofilik koşullarda (55°C) gerçekleştirilmiştir. Contreras ve diğerleri uyguladıkları termal ön arıtma sayesinde üretim oranını iyileştirmiş, hidrolik bekletme süresini azaltmış, reaktörün hacim modifikasyonu gerektirmeden çalışmasını sağlamışlardır. Çalışmada uygulanan ön arıtmanın karbonhidrat,

lipid ve çözümlür protein seviyelerinde kayda değır artışlara yol açtığı ve patojenlerin yüksek oranda inaktivasyonunun sağlandığı da belirtilmiştir [36].

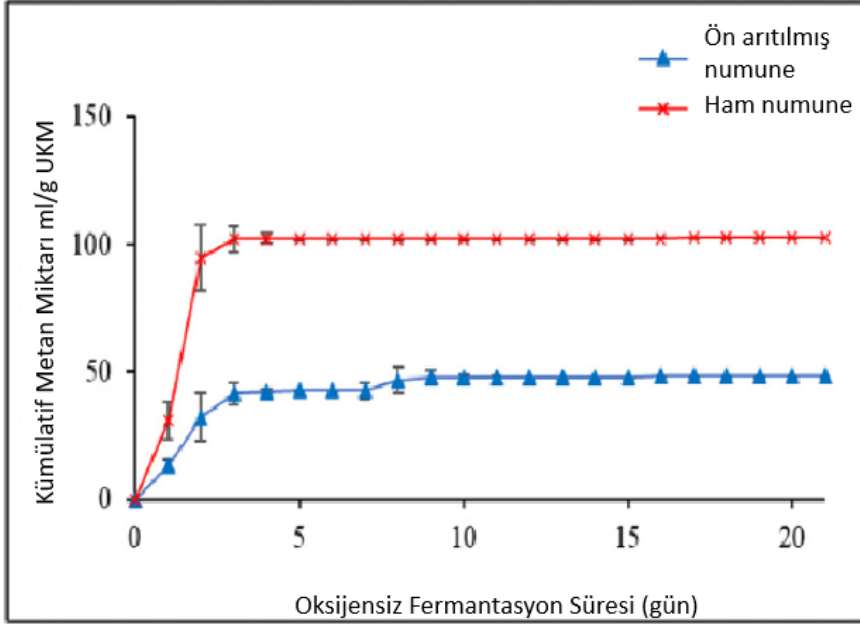
Syaichurrozi ve diğerleri 2023 yılında yaptıkları çalışmada şeker kamışı melası bazlı damıtma tesisi atık suyundan üretilen biyogaz miktarının artırılması için demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagölasyon ön artıma işlemi uygulamışlardır. Ön artıma deney düzeneği şekil 9’da görölmektedir. İşlem 8 saat boyunca farklı akım yoğunluklarında gerçekteştirilmiştir (9.31, 47.17 ve 55.03 mA/cm²). Araştırmacılar ön artıma işlemi ile numunenin kimyasal oksijen talebinde (COD) 116,130 mg-O₂/L değırinde 93,976, 85,122, ve 76,033 mg- O₂/L değırlerine düşüşler gözlemlemişlerdir. Syaichurrozi ve arkadaşları ön artıma işleminden sonra hem ham numune hem de ön artıma uygulanmış numuneleri oksijensiz fermantasyon işlemine tabi tutmuşlar ve akım yoğunlukları 9.31, 47.17 ve 55.03 mA/cm² iken elde ettikleri biyogaz miktarları ön artıma yapılmayan numuneye göre sırasıyla 6.8, 11 ve 12 kat daha fazla olmuştur [37]. Uygulanan bu yöntem literatürde fazla yer almayan bir yöntem olup gelişmeye açıktır.



Şekil 9: Elektrokoagülasyon ön arıtma deney düzeneği [37]

Thompson ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptıkları çalışmada karayip palejik deniz yosununa oksijensiz fermentasyon öncesinde hidrotermal ön arıtma uygulanmış ve biyogaz verimi araştırılmıştır. Hidrotermal ön arıtma 1L'lik yüksek basınçlı reaktörde uygulanmıştır. Her testten önce numunenin toplam katı oranının %15'in altına çekmek için numune saf su ile seyreltilmiştir. Reaktöre yükleme yapılmış ve azot gazıyla 30 bar yüksek basınca maruz bırakılmıştır. Ön arıtma 140 °C sıcaklıkta 30 dakika süreyle uygulanmıştır. Hidrotermal ön arıtma işlemi sindirilemeyen lifler, polisakkaritler, proteinler ve lipidler gibi büyük organik bileşenlerin küçük fermente edilebilir fraksiyonlara ayrıştırılmasını ve çözündürülmesini hızlandırarak numunenin fiziksel yapısında değişiklikler oluşturmuştur. Araştırmacılar ön arıtmanın pelajik deniz yosunu ve gıda atıklarındaki organik maddelerin hidrolizini

kolaylaştırdığını ve elde edilen biyogaz miktarının iyileştirdiğini vurgulamışlardır [38]. Çalışmada elde edilen kümülatif metan miktarını gösteren grafik şekil 10’da verilmiştir.

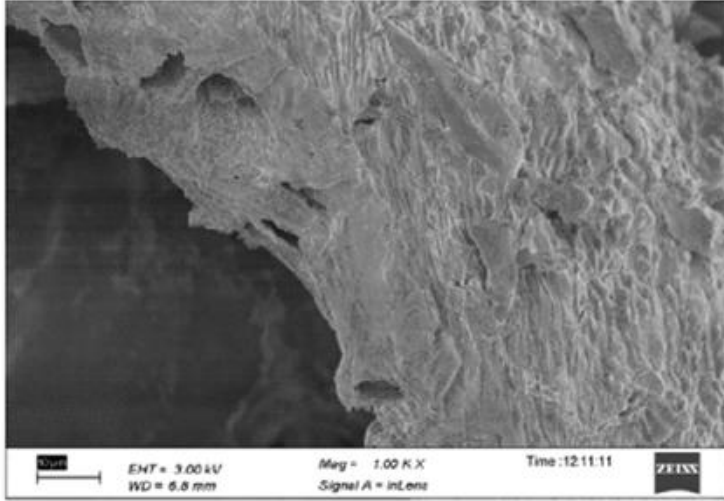


Şekil 10: Kümülatif metan miktarı [38]

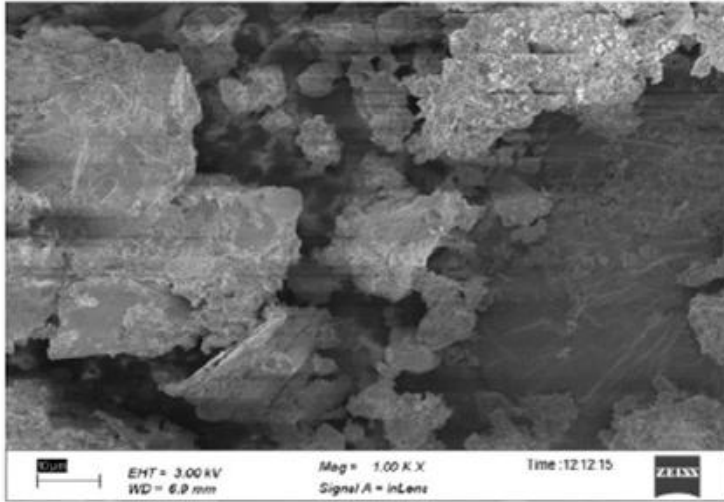
Diğer bir çalışmada Rahmani ve diğer araştırmacılar 2023 yılında yaptıkları çalışmada buğday samanına hidrotermal ve termal alkali ön arıtma uygulamış ve biyogaz üretimine etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar buğday samanını önce 30 dakika boyunca %10 toplam katı oranında suda, daha sonra dört farklı sıcaklık değerinde (100, 125, 150 ve 175 °C) ve dört farklı sürede (30, 60, 90 ve 120 dakika) boyunca hidrotermal reaktörde bekletmişlerdir. 100, 125, 150 ve 175 °C değerlerindeki sıcaklıkların oluşturduğu reaktör içi basınçlar sırasıyla 1.4, 2.5, 4.6, ve 7.6 bar

olmuştur. Termal alkali ön arıtma işlemi farklı konsantrasyonlarda (% 1, % 3, % 5, ve % 7) NaOH ile 60 dakika boyunca yapılmış ardından dört farklı sıcaklıkta termal ön arıtma uygulanmıştır. Rahmani ve diğerleri ön arıtma uyguladıkları numunelere oksijensiz fermantasyon uygulayıp biyogaz miktarını karşılaştırılmıştır. Çalışmada 125 °C sıcaklık ve %7 NaOH konsantrasyonunda termal-alkali ön arıtma işlemi 662 mL/g UKM ile en yüksek kontrole göre %34 daha yüksek) biyogaz verimini gösterirken, bunu 150 °C sıcaklık ve %1 NaOH işleminde 646 mL/g UKM biyogaz verimi (kontrole göre %31 daha yüksek) takip etmiştir [39].

Saha ve arkadaşları 2023 yılında yaptıkları bir çalışmada ağaç minesinin (Lantana) hidroliz hızını ve biyogaz miktarını artırmak için sıcak hava fırını, otoklav, sıcak su banyosu ve mikrodalga gibi çeşitli ön arıtma işlemleri uygulamışlardır. Çalışmada otoklav işleminin diğerlerine göre daha etkili sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır. Bu ön arıtma ile kümülatif metan üretimi 7 haftada 2895 mL'den 5 haftada 3656 mL'ye yükselmiştir. Araştırmacılar, termal ön arıtma işleminin ham numunenin sert lignoselülozik yapısını parçalayarak hidroliz aşamasını hızlandırıldığını ve aynı zamanda biyogaz üretimini de iyileştirdiğini belirtmişlerdir [40]. Ön arıtmanın etkisi şekil 11'deki SEM görüntülerinden anlaşılabilir.



Ön arıtma uygulanmamış numune



Otoklav ön arıtma uygulanmış numune

Şekil 11: Ön arıtma uygulanmamış ve otoklav ön arıtması uygulanmış numunelerin SEM görüntüleri [40]

5. Sonuçlar

Yenilenebilir enerji kaynakları arasından sürdürülebilirliği ile ön plana çıkan biyogaz, oksijensiz fermantasyon yöntemiyle üretilmektedir. Biyogaz retimi 4 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamaları kolaylaştıran ve hızlandıran işlemler elde edilen biyogaz ve biyogazın metan oranını olumlu yönde etkilemektedir. Bu işlemlerden bir tanesi oksijensiz fermantasyon işleminde önce ham numuneye ön arıtma uygulanmasıdır. Literatürdeki alışmalar incelendiğinde farklı numuneler üzerinde farklı ön arıtma tekniklerinin olumlu etkilerinin azımsanamayacak seviyede olduğu grlmektedir. İncelenen alışmalar arasında biyogaz üretimini olumsuz etkileyen bir duruma rastlanmamıştır.

Uygulanan n arıtma tekniklerinin büyük bir kısmının hidroliz aşamasının hızını ve etkisini artırdığı söylenebilir. Bu etkiler çoğu çalışmada SEM görüntüleriyle ifade edilmiştir. Hidrolizin iyileştirilmesi sayesinde mikroorganizmalar işlevini daha etkin yapmakta ve üretilen biyogaz miktarı artmaktadır. n arıtmanın diğer bir etkisi de hidrolik bekleme süresini azaltmasıdır. n arıtma uygulanmış numuneler ile aynı malzeme miktarından, daha kısa zamanda biyogaz elde etmek mümkün olmaktadır.

n arıtma uygulamalarının biyogaz verimi üzerinde olumlu etkileri aşıkrdır. Ancak literatürde bu işlemlerin ekonomikliğiyle alakalı fazla çalışma bulunmamaktadır. n arıtma işleminin uygulama maliyetinin elde edilecek olan biyogazın değerinden fazla olması bu işlemin uygulanabilirliğini mümkün kılmamaktadır. n arıtma işleminin kurulumu için gerekli ekipman, tesis altyapısı ve mühendislik hizmetleri başlangıç maliyetlerini oluşturacaktır. Termal ve kimyasal ön arıtma teknikleri genelde daha yüksek

başlangıç maliyetine sahipken, mekanik yöntemler nispeten daha düşük maliyetlere sahiptir. Kurulum maliyetinin yanında enerji tüketimi, kimyasal kullanımı, bakım ve işletme giderleri de bir maliyet oluşturacaktır. Ön arıtma işlemine karar verirken ekonomik açıdan da bir değerlendirme yapılması enerji verimliliği açısından oldukça önemli bir konudur. Bu konu üzerine yeni çalışmaların yapılması literatüre katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

[1] S. Saleem, Z. Ullah, N. Rashid, and Z. Sheikh, “Effect of hydrothermal pretreatment on leachate fed *Scenedesmus* sp. biomass solubilization and biogas production,” *J Environ Manage*, vol. 365, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121515.

[2] A. Qazi *et al.*, “Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63837–63851, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906402.

[3] F. Shen *et al.*, “Recent advances in mechanochemical production of chemicals and carbon materials from sustainable biomass resources,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 130, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109944.

[4] D. Mignogna, P. Ceci, C. Cafaro, G. Corazzi, and P. Avino, “Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review,” Sep. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app131810219.

[5] K. Ivanovs, K. Spalvins, and D. Blumberga, “Approach for modelling anaerobic digestion processes of fish waste,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2018, pp. 390–396. doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.108.

[6] H. Et Yapılcan and H. Bakırtaş, “Yenilenebilir Enerji Olarak Biyogaz Aksaray İli Örneği,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 298–309, Mar. 2023, doi: 10.21923/jesd.1049878.

[7] Y. Z. Huang, Y. Y. Lee, C. Fan, and Y. C. Chung, "Recycling of domestic sludge cake as the inoculum of anaerobic digestion for kitchen waste and its benefits to carbon negativity," *J Environ Manage*, vol. 370, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122863.

[8] T. Kegl, E. Torres Jiménez, B. Kegl, A. Kovač Kralj, and M. Kegl, "Modeling and optimization of anaerobic digestion technology: Current status and future outlook," Jan. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.pecs.2024.101199.

[9] P. A. Cremonez, J. G. Teleken, T. R. Weiser Meier, and H. J. Alves, "Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review," Mar. 01, 2021, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111854.

[10] S. Mirmohamadsadeghi *et al.*, "Pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: A review on influencing mechanisms and the importance of microbial diversity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110173.

[11] S. Soltanian *et al.*, "A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels," May 15, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112792.

[12] M. J. Taherzadeh and K. Karimi, "Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review," Sep. 2008. doi: 10.3390/ijms9091621.

[13] D. Kumari and R. Singh, "Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review," Jul. 01, 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2018.03.111.

[14] A. T. W. M. Hendriks and G. Zeeman, "Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass," Jan. 01, 2009, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biortech.2008.05.027.

[15] A. Dasgupta and M. K. Chandel, "Enhancement of biogas production from organic fraction of municipal solid waste using hydrothermal pretreatment," *Bioresour Technol Rep*, vol. 7, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100281.

[16] R. Tamilselvan and A. Immanuel Selwynraj, "Enhancing biogas production through photocatalytic pretreatment of rice straw co-digested with cow dung and food waste using a novel g-C₃N₄/SiO₂/bentonite catalyst," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 187, pp. 799–809, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.05.017.

[17] N. Samadamaeng, C. Sawatdeenarunat, and B. Charnnok, "Enhancing biogas production from cattle manure: A circular economy approach with solar thermal pretreatment and soil conditioning," *J Environ Manage*, vol. 368, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122086.

[18] N. Rasaeian, S. Mirmohamadsadeghi, J. F. M. Denayer, and K. Karimi, "Improving biogas production from different parts of spruce tree using leading pretreatments," *Fuel*, vol. 329, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125539.

[19] M. K. Jameel *et al.*, “Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review,” Jan. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rechem.2024.101549.

[20] F. J. Ngabala and J. K. Emmanuel, “Potential Substrates for Biogas Production through Anaerobic Digestion-An Alternative Energy Source,” *Heliyon*, p. e40632, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40632.

[21] A. Anukam, A. Mohammadi, M. Naqvi, and K. Granström, “A review of the chemistry of anaerobic digestion: Methods of accelerating and optimizing process efficiency,” Aug. 01, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/PR7080504.

[22] R. M. Ziels, D. Z. Sousa, H. D. Stensel, and D. A. C. Beck, “DNA-SIP based genome-centric metagenomics identifies key long-chain fatty acid-degrading populations in anaerobic digesters with different feeding frequencies,” *ISME Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 112–123, Jan. 2018, doi: 10.1038/ismej.2017.143.

[23] L. Deng, Y. Liu, and W. Wang, *Biogas technology*. Springer Singapore, 2020. doi: 10.1007/978-981-15-4940-3.

[24] J. K. Helenas Perin, P. L. Biesdorf Borth, A. R. Torrecilhas, L. Santana da Cunha, E. K. Kuroda, and F. Fernandes, “Optimization of methane production parameters during anaerobic co-digestion of food waste and garden waste,” *J Clean Prod*, vol. 272, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123130.

[25] O. Yaldız, *Biyogaz Teknolojisi*, vol. 78. Antalya: Akdeniz Üniversitesi, 2004.

[26] C. Carotenuto, G. Guarino, L. I. D'Amelia, B. Morrone, and M. Minale, "The peculiar role of C/N and initial pH in anaerobic digestion of lactating and non-lactating water buffalo manure," *Waste Management*, vol. 103, pp. 12–21, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.12.008.

[27] K. Martin, "Biyogaz Üretiminde Farklı Ön Aritma İşlemleri Uygulanmış Muz Atıklarının Biyokimyasal Metan Potansiyelinin (Bmp) Araştırılması," Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2017.

[28] T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, *Biogas Energy*. Springer, 2012.

[29] M. T. Sun *et al.*, "Effects of organic loading rate on biogas production from macroalgae: Performance and microbial community structure," *Bioresour Technol*, vol. 235, pp. 292–300, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.03.075.

[30] J. B. Belay, N. G. Habtu, V. R. Ancha, and A. S. Hussien, "Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of cladodes of cactus (*Opuntia ficus-indica*) for biogas production," *Heliyon*, vol. 7, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08002.

[31] I. Konkol, L. Świerczek, and A. Cenian, "Chicken Manure Pretreatment for Enhancing Biogas and Methane Production," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16145442.

[32] R. Feng, Q. Li, A. A. Zaidi, H. Peng, and Y. Shi, "Effect of autoclave pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of green algae," *Periodica Polytechnica*

Chemical Engineering, vol. 65, no. 4, pp. 483–492, Aug. 2021, doi: 10.3311/PPch.18064.

[33] U. Choe, A. M. Mustafa, X. Zhang, K. Sheng, X. Zhou, and K. Wang, “Effects of hydrothermal pretreatment and bamboo hydrochar addition on anaerobic digestion of tofu residue for biogas production,” *Bioresour Technol*, vol. 336, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125279.

[34] J. Zhu, Y. Zheng, F. Xu, and Y. Li, “Solid-state anaerobic co-digestion of hay and soybean processing waste for biogas production,” *Bioresour Technol*, vol. 154, pp. 240–247, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.045.

[35] S. Sahil, P. Karvembu, R. Kaur, P. Katyal, and U. G. Phutela, “Enhanced biogas production from rice straw through pretreatment with cellulase producing microbial consortium,” *Energy Nexus*, vol. 12, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100246.

[36] J. M. Méndez-Contreras, J. Atenodoro-Alonso, L. A. López-Escobar, and N. Nava-Valente, “Enhanced Biogas Production from Thermophilic Anaerobic Digestion of Poultry Slaughterhouse Sludge: Effect of Thermal Pretreatment and Micronutrients Supplementation,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 15, no. 4, pp. 2201–2214, Apr. 2024, doi: 10.1007/s12649-023-02277-3.

[37] I. Syaichurrozi, S. Sarto, W. B. Sediawan, M. Hidayat, N. Darsono, and D. S. Khaerudini, “Enhancement of biogas production from sugarcane molasses-based distillery wastewater with electrocoagulation pretreatment using iron electrodes,”

Bioresour Technol Rep, vol. 24, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2023.101614.

[38] T. M. Thompson, B. R. Young, and S. Baroutian, “Enhancing biogas production from caribbean pelagic Sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste,” *Chemosphere*, vol. 275, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130035.

[39] A. M. Rahmani, V. K. Tyagi, N. Gunjyal, A. A. Kazmi, C. S. P. Ojha, and K. Moustakas, “Hydrothermal and thermal-alkali pretreatments of wheat straw: Co-digestion, substrate solubilization, biogas yield and kinetic study,” *Environ Res*, vol. 216, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2022.114436.

[40] B. Saha, V. B. Barua, M. Khwairakpam, I. Haq, A. S. Kalamdhad, and S. Varjani, “Thermal pretreatment of Lantana camara for improved biogas production: Process parameter studies for energy evaluation,” *Environ Res*, vol. 216, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2022.114661.

