



Termokimyasal Isı Depolama Malzemelerinin Karşılaştırılması

Comparison of Thermochemical Heat Storage Materials

Recep Kaan KARACAN¹, Muhammet ÖZDOĞAN²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye
· 24281118@stu.omu.edu.tr · ORCID > 0009-0006-1123-3557

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye
· muhammet.ozdogan@omu.edu.tr · ORCID > 0000-0002-3523-6035

Makale Bilgisi/Article Information

Makale Türü/Article Types: Araştırma Makalesi/Research Article

Geliş Tarihi/Received: 9 Ekim/October 2025

Kabul Tarihi/Accepted: 24 Ekim/October 2025

Yıl/Year: 2025 | **Cilt-Volume:** 5 | **Sayı-Issue:** 2 | **Sayfa/Pages:** 107-122

Atıf/Cite as: Karacan, R.K., Özdoğan, M. "Termokimyasal Isı Depolama Malzemelerinin Karşılaştırılması"
Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi 5(2), Eylül 2025: 107-122.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Muhammet ÖZDOĞAN

TERMOKİMYASAL ISI DEPOLAMA MALZEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZ

Termokimyasal ısı depolama (TID) sistemleri, özellikle güneş enerjisi gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamakta kritik rol oynamaktadır. Kullanılan bileşiklerin arasında metal hidroksitler, karbonat türleri ve yeniden oksitlenip indirgenebilen metal oksitler bulunur. Isı enerjisi, tersinir kimyasal tepkimeler esnasında önce kimyasal bağların içine hapsedilir; daha sonra ihtiyaç duyulduğunda tepkimelerin tersi gerçekleşerek tekrar açığa çıkarılır. Termokimyasal ısı depolama sistemlerinde tercih edilen malzeme türleri, kullanım koşullarına bağlı olarak farklı avantajlar ve sınırlamalar göstermektedir. Bu çalışmada, literatürde kullanılan termokimyasal ısı depolamada materyalleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda metal oksit tabanlı sistemler öne çıkarken, orta sıcaklık aralığında çalışan sistemler ve mevsimsel ısı depolama uygulamalarında tuz hidratlar tercih edilmektedir. Düşük sıcaklıkta işleyen soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde ise sorpsiyon malzemeleri daha uygun bir seçenek sunmaktadır. Kompozit yapılar ise bu farklı yaklaşımlar arasında performans ve kararlılığı dengeleyen hibrit bir çözüm olarak dikkat çekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Termokimyasal Isı Depolama, Güneş Enerjisi, Sorpsiyon, Tuz Hidratları, Adsorban, Metal Oksitler.



COMPARISON OF THERMOCHEMICAL HEAT STORAGE MATERIALS

ABSTRACT

Thermochemical heat storage (TCS) systems play a crucial role in ensuring the continuity of intermittent renewable energy sources, especially solar power. The compounds used include metal hydroxides, various carbonates, and metal oxides that can be reduced and re-oxidized. Heat is stored by being trapped in chemical bonds during reversible chemical reactions and is released again when those reactions proceed in reverse as needed. In thermochemical heat storage systems, material types show different benefits and limitations depending on operating conditions. This study examines and compares the materials employed for thermochemical heat storage in the literature. Metal oxide-based systems stand out for

high-temperature industrial applications, while salt hydrates are preferred for medium-temperature building and seasonal storage applications. Sorption materials are more suitable for cooling and HVAC systems that operate at low temperatures. Composite materials, meanwhile, attract attention as hybrid solutions that balance performance and stability across these different approaches.

Keywords: Thermochemical Heat Storage, Solar Energy, Sorption, Salt Hydrates, Adsorbents, Metal Oxides.



1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, sürdürülebilirlik ve çevre dostu karakteri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Ancak, doğası gereği kesintili ve zamana bağlı bir üretim profiline sahiptir. Bu nedenle, güneş enerjisinin sürekli, güvenilir ve ekonomik biçimde kullanılabilmesi etkin bir enerji depolama sistemine bağlıdır. Termokimyasal ısı depolama (TID) sistemleri, enerji depolama teknolojileri arasında yüksek enerji yoğunluğu, uzun süreli saklama kapasitesi ve minimum ısı kaybı sağlaması bakımından öne çıkmaktadır [1]–[4].

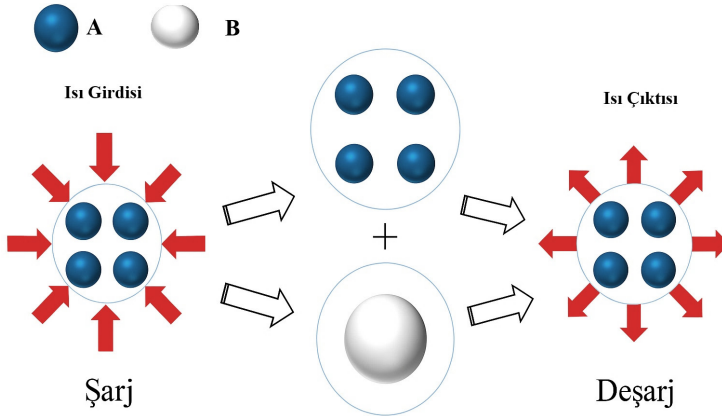
TID sistemlerinde enerji, geri dönüşümlü kimyasal reaksiyonlar yoluyla maddelerin bağ enerjilerinde depolanır ve gereksinim duyulduğunda bu bağların çözülmesiyle enerji geri kazanılır. Bu sistemlerin en büyük avantajları arasında, çevrimsel kararlılığın yüksek oluşu, enerji kaybının düşük olması ve geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilme kabiliyeti sayılabilir [5], [6]. Bu araştırma, güneş enerjisi ile çalışan TID sistemlerinde kullanılan malzemelerin teknik, ekonomik ve çevresel yönlerden karşılaştırmalı olarak analiz edilmesini amaçlamaktadır. Malzeme seçimi; reaksiyon hızı, termodinamik verim, çevrim dayanıklılığı ve maliyet gibi çok boyutlu faktörlerin dengelenmesiyle belirlenmektedir [7], [8].

Özellikle yüksek sıcaklıklarda etkinlik gösteren $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ çiftleri ile düşük sıcaklıkta çalışan zeolit/su ve $\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{SrBr}_2$ sistemleri, literatürde sıkça incelenmiştir [9]–[12]. Zeolit tabanlı sistemler düşük sıcaklıkta yüksek kararlılık sağlarken, tuz hidratlar teorik olarak daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Buna karşın, CaO tabanlı sistemlerde yüksek sıcaklık gereksinimi ve yapısal bozunma riski, uygulama ölçeğinde sınırlayıcı faktörlerdir [13], [14]. Ayrıca, yerli destekli projelerde geliştirilen tuz-hidrat kompozitleri, orta sıcaklıkta çalışan sistemlerin maliyetini düşürme potansiyeli taşımaktadır [15].

Bu çalışma, güneş enerjisi tabanlı termokimyasal ısı depolama sistemlerinde kullanılan malzemeleri teknik, ekonomik ve çevresel yönleriyle karşılaştırmalı olarak analiz etmektedir.

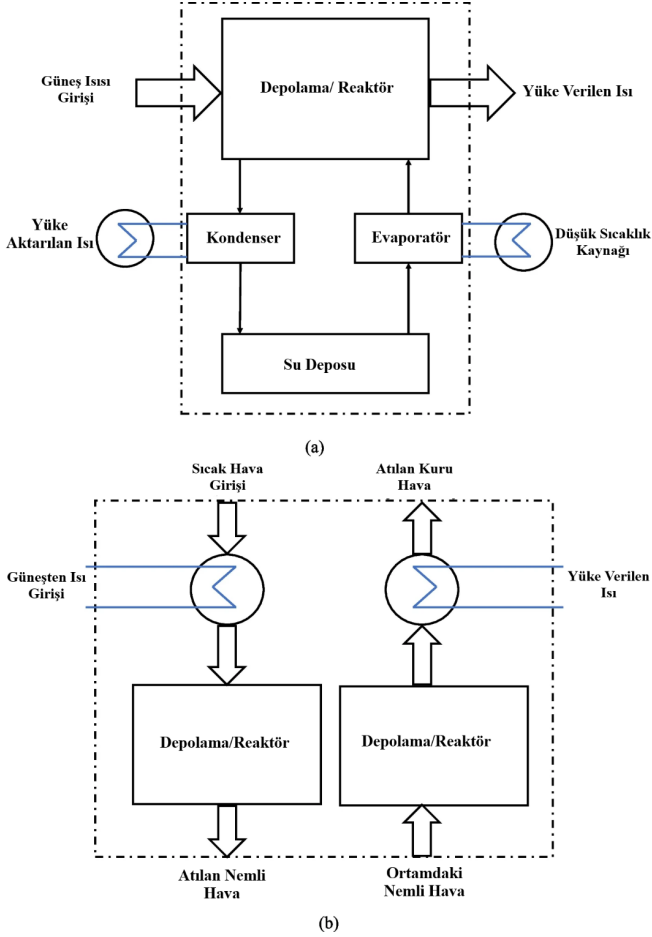
1.1. Termokimyasal Depolamanın Çalışma Prensipleri

Termokimyasal depolama sistemlerde, temel çalışma prensibi Şekil 1'de verilmiş olan kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla termal enerji depolanır ve geri kazanılır. Bu süreçte endotermik reaksiyon ısıyı depolarken, ekzotermik reaksiyon ısının açığa çıkmasını sağlar [16], [17]. TID sistemleri Şekil 2'de görüldüğü gibi açık ve kapalı sistem şeklinde de sınıflandırılabilceği gibi sorpsiyon temelli sistemler (adsorpsiyon/absorpsiyon) ve reaksiyon temelli sistemler. TID sistemler şeklinde iki ana grupta sınıflandırılır.



Şekil 1. Termokimyasal ısı depolama sistemleri temel çalışma prensibi.

Açık sistem, atmosfer basıncında çalışır ve hava akışı sorbenti ve ısıyı sorpsiyon yatağına taşır/uzaklaştırır. Şarj işlemi sırasında sorpsiyon yatağındaki sıcak ve kuru hava su buharını soğuyarak çıkışta daha soğuk ve nemli hava oluşturur. Kapalı sorpsiyon sistemi geleneksel bir buhar sıkıştırma çevrime benzemektedir. Kapalı sistemde mekanik kompresörün yerine sorpsiyon yatağına geçmesidir. Bu yatak soğutucu akışkanlar için gerekli olan ısı sıkıştırma sağlamaktadır. Kapalı sistemlerde şarj işlemi sırasında sıcak akışkan sorpsiyon yatağıyla enerji alışverişini gerçekleştirir ve sonucunda soğutucu akışkan yataktan ayrışır bu akışkan yoğunlaştırıcıda yoğunlaşıp soğutulur [4].



Şekil 2. TID sistemlerinde çevrim. a) Kapalı sistem çevrimi,
b) Açık sistem çevrimi [4]

Sorpsiyon temelli sistemlerde gözenekli bir katı malzeme (örneğin zeolit, silika jel) su buharını yüzeyine adsorplar; bu sırada ekzotermik bir süreçle ısı açığa çıkar. Desorpsiyon aşamasında buhar uzaklaştırılarak enerji depolanır. Bu döngü, kapalı sistemlerde suyun yoğunlaştırılarak geri kazandırılmasıyla veya açık sistemlerde atmosferik nem değişimiyle yürütülür [18], [19].

Reaksiyon temelli sistemlerde ise iki kimyasal tür veya faz arasında tersinir dönüşüm gerçekleşir. Örneğin $\text{Ca(OH)}_2 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ tepkimesi, yaklaşık 500 °C'de endotermik olarak enerji depolar ve hidrasyon sırasında ısı salarak enerjiyi geri verir [20]–[22]. Benzer biçimde, tuz hidratlar (örneğin $\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ veya

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 30–200 °C aralığında dehidrasyon/rehidrasyon döngüleri ile çalışır. Bu mekanizma, enerji kaybının minimuma indiği uzun süreli depolama olanı sağlar [23], [24].

Tüm TID sistemlerinde ısı alışverişi farklı sıcaklıklarda gerçekleştiğinden, düşük sıcaklıklı enerji kaynakları (örneğin atık ısı veya güneş enerjisi) daha yüksek sıcaklıklı uygulamalara dönüştürülebilir. Böylece termokimyasal depolama, mevsimsel enerji saklama ve şebeke dengeleme açısından avantaj sağlar [25], [26].

1.2. Kullanılan Malzemeler ve Reaksiyonlar

Malzeme seçimi, sistemin çalışma sıcaklığına, çevrim ömrüne ve uygulama tipine bağlı olarak yapılır Gözenekli adsorbanlar (zeolit, silika jel vb.) düşük sıcaklıkta yüksek kararlılık sergilerken; tuz hidratlar ve metal oksitler daha yüksek enerji yoğunluğu sunar. Düşük sıcaklık malzemeleri: Zeolit 13X, silika jel ve NaY tipi adsorbanlar 20–150 °C aralığında çalışarak soğutma ve konut ısıtma uygulamalarında kullanılır. Orta sıcaklık malzemeleri: Potasyum karbonat (K_2CO_3), magnezyum sülfat ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ve sodyum hidroksit çözeltileri, 30–150 °C aralığında su buharını adsorplar ve ekzotermik enerji üretir [17], [19]. Yüksek sıcaklık malzemeleri: Kalsiyum oksit (CaO) ve kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) çifti, 400–600 °C aralığında endotermik/ekzotermik çevrimlerle çalışır [25].

Bu malzemelerde aranan temel özellikler, yüksek enerji yoğunluğu, tekrarlanabilir çevrim kararlılığı, düşük korozyon eğilimi ve uygun kinetik hızlardır. Bununla birlikte, tuz hidratlarda deliquescence (nemle erime) ve metal oksitlerde sinterleşme gibi zorluklar sistem performansını sınırlayabilmektedir [7], [10].

1.3. Sistem Entegrasyonu ve Tasarım

TID sistemleri, güneş enerjili güç üretimi ve bina ısıtma-soğutma altyapılarıyla entegre edilerek kullanılmaktadır. Örneğin konsantre güneş enerjisi (CSP) santrallerinde, yüksek sıcaklıkta elde edilen enerji $\text{CaO}/\text{Ca(OH)}_2$ veya CaCO_3/CaO döngüleriyle kimyasal formda depolanır [13], [14]. Bu sistemlerde reaktör tasarımı, ısı eşanjörleri ve su buharı enjeksiyon üniteleri kritik öneme sahiptir.

Bina ölçeğinde ise “heat battery” projesinde tuz hidratlar kullanılarak yazın depolanan enerji, kışın rehidrasyon yoluyla geri kazanılmaktadır. Bu sistem, mevsimlik enerji depolamanın pratik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir [15].

Kapalı çevrimli sistemlerde reaktif madde sabit bir döngüde tutulurken, açık çevrimli sistemlerde malzeme doğrudan atmosferle etkileşir. Bu tasarım farkı, özellikle konut uygulamaları için maliyet ve bakım kolaylığı açısından önemlidir [8], [19].

1.4. Tipik Örnek Uygulamalar

Dünya genelinde çeşitli TID pilot projeleri yürütülmektedir. Hollanda'da TNO ve Eindhoven Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen "heat battery" prototipi, tuz hidrat temelli enerji depolama prensibini başarıyla göstermiştir. Almanya'da Fraunhofer IKTS Enstitüsü, 900 L zeolit dolu bir sistemle yaklaşık 167 kWh enerji depolamıştır [18].

ABD'de Sandia Ulusal Laboratuvarı'nın "Gen3 CSP" projesi, termokimyasal depolamayı süperkritik CO₂ çevrimleriyle birleştirerek güneş enerjisinin haftalarca saklanması hedeflemektedir [20], [23]. Japonya, Birleşik Krallık ve İsveç'teki araştırmalar da düşük sıcaklıkta çalışan adsorpsiyon sistemlerini geliştirmeye odaklanmıştır [24]–[26].

Bu uygulamalar, TID sistemlerinin yalnızca laboratuvar ölçeğinde değil, saha uygulamalarında da ekonomik ve teknik olarak uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır. Böylece termokimyasal depolama, güneş ve atık ısı kaynaklarının uzun vadeli kullanımında stratejik bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Enerji Depolama Teknolojilerinin Genel Görünümü

Enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz doğasını dengelemek ve enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla stratejik önem taşımaktadır. Bu sistemler genel olarak mekanik, elektriksel, termal ve kimyasal depolama kategorilerine ayrılmaktadır. Termal enerji depolama (TES) ise, duyulur, gizli ve termokimyasal (TID) alt sınıflardan oluşur. Duyulur ısı depolama sistemleri düşük yatırım maliyetiyle kısa vadeli çözümler sunarken, gizli ve termokimyasal sistemler daha yüksek enerji yoğunluklarıyla uzun süreli depolamaya olanak tanır [5], [9], [17]. TID ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Çalışmalar farklı alanlara yoğunlaşmakla birlikte TID sistemlerinde kullanılan malzemeler araştırmacıların ilgi alanı olmuştur. Goodenough [9], enerji depolama malzemelerinin seçiminde kimyasal kararlılık, çevrim ömrü ve enerji yoğunluğu parametrelerinin kritik olduğunu vurgulamıştır. Abdullah vd. [4], termokimyasal sistemlerin, özellikle mevsimlik güneş enerjisi depolama uygulamalarında, yüksek dönüşüm verimi ve düşük kayıplarıyla geleceğin enerji altyapısında önemli bir rol oynayacağını belirtmiştir. Sarbu ve Se-barchievici [17] ise, termal enerji depolama teknolojilerinin karbon emisyonlarını azaltma ve enerji yönetiminde esneklik sağlama potansiyeline dikkat çekmiştir.

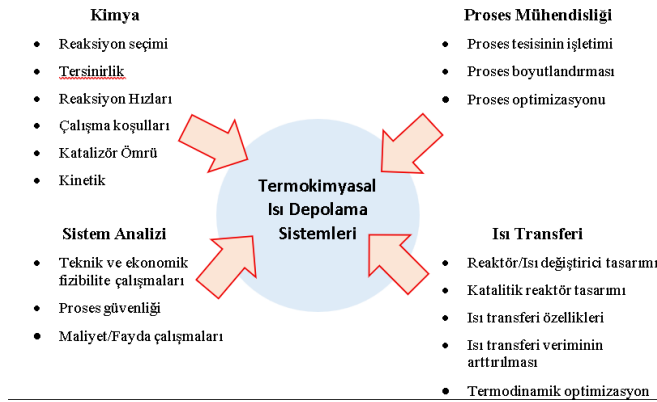
Rana vd. [5] tarafından yapılan geniş kapsamlı bir derleme çalışmasında, enerji depolama sistemlerinin elektrik şebekeleriyle entegrasyonu ve yenilenebilir enerji

geçiş sürecindeki önemi vurgulanmış, özellikle termokimyasal sistemlerin uzun süreli depolama kabiliyeti nedeniyle stratejik bir çözüm olduğu belirtilmiştir.

2.2. Termokimyasal Enerji Depolama Teknolojilerinin Gelişimi

Termokimyasal enerji depolama (TCES), ısı enerjisinin geri dönüşümlü kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla tutulduğu ve serbest bırakıldığı bir mekanizma üzerine kuruludur. Bu teknoloji, özellikle yüksek enerji yoğunluğu, uzun saklama süresi ve düşük ısı kaybı gibi avantajları nedeniyle son yıllarda giderek önem kazanmaktadır. Pardo vd. [3] ve Felderhoff vd. [16], yüksek sıcaklıkta çalışan TCES sistemlerine ilişkin kapsamlı incelemelerinde, oksit-hidrat dönüşümlerinin (örneğin $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ çiftleri) endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Lin [6], düşük sıcaklıkta çalışan tuz hidrat temelli TCES sistemlerinin malzeme sınıflandırmasını yaparak, özellikle su tutma kapasitesi yüksek tuzların (Na_2S , SrBr_2 , MgSO_4 vb.) konut ölçeğinde enerji depolamada avantaj sağladığını belirtmiştir. Ranjha ve Oztekin [12], üç boyutlu sabit yatak reaktörlerin sayısal analizleriyle, ısı transferinin ve nem difüzyonunun sistem performansına olan etkilerini ortaya koymuştur. Shi vd. [11] ise çok-fizikli modeller kullanarak, reaktör içi ısı dağılımını iyileştiren ısı iletim artırıcı yapıların termal verimi ciddi oranda yükselttiğini göstermiştir. Yapılan çalışmalar, TCES sistemlerinin laboratuvar ölçeğinden pilot uygulamalara geçişinde, hem malzeme optimizasyonu hem de reaktör mühendisliği açısından çok yönlü bir gelişim süreci izlendiğini göstermektedir [1], [8], [15].

Termokimyasal ısı depolama sistemlerinin gelişimi birçok disiplinin ortak çalışmasını zorlu kullmaktadır. Termokimyasal ısı depolama sistemlerinin geliştirilmesi için gerekli teknik disiplinler Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Termokimyasal ısı depolama sistemlerinin geliştirilmesi için gerekli disiplinler [3]

2.3. Malzeme Bazlı Çalışmalar ve Kompozit Geliştirmeler

TID sistemlerinde performansın belirleyici unsuru, kullanılan aktif malzemenin termodinamik kararlılığı, entalpi değişimi ve çevrim dayanıklılığıdır. Airò Farulla vd. [2] ile Jabbari Hichri vd. [7], tuz-hidrat kompozitlerinin ısı enerji depolamadaki etkinliğini incelemiş; CaCl_2 ve SrCl_2 gibi tuzların gözenekli taşıyıcılarla (silika jel, vermikülit vb.) birleştirildiğinde kararlılıklarının arttığını belirtmiştir. Benzer biçimde Lehmann vd. [10], tuz-zeolit karışımlarında adsorpsiyon kinetiği ve ısı transferini modelleyerek optimum tane boyutu ve gözeneklilik oranlarının performansa etkisini analiz etmiştir.

Clark ve Farid [21], SrCl_2 tabanlı kompozitlerin hızlı su tutma-salma döngülerinde yüksek enerji yoğunluğu sergilediğini; Chen vd. [22] ise vermikülit esaslı karışımların düşük sıcaklıklı depolama senaryolarında verimlilik artışı sağladığını raporlamıştır. Posern ve Kaps [19] ile Palacios vd. [20], su sorpsiyonuna dayalı malzemelerde üretim süreçlerinin ve tuz-matris etkileşimlerinin uzun vadeli stabilite üzerindeki etkilerine dikkat çekmiştir. Spietz vd. [24] ve Feng vd. [25], özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ çevriminin yüksek enerji yoğunluğu (yaklaşık 1400 kJ/kg) ve geniş sıcaklık aralığına rağmen döngüsel kararlılık sorunlarıyla sınırlı kaldığını belirtmiştir. Lin, Zhao ve Huang [26], çalışmalarında vermikülit- K_2CO_3 kompozitlerinin ısı depolamada optimum termal performans gösterdiğini ve bu tür hibrit sistemlerin düşük maliyetli sürdürülebilir çözümler sunduğunu ifade etmiştir.

2.4. Sistem Entegrasyonu ve Uygulama Perspektifleri

Termokimyasal depolama sistemlerinin başarıyla uygulanabilmesi, malzeme performansının yanı sıra sistem mimarisi ve enerji ağlarına entegrasyon düzeyine de bağlıdır. De Jong vd. [15], TCES sistem tasarımlarında reaktör-ısı değiştirici bütünleşmesinin kritik olduğunu ve sistem ölçeklendirmesinin enerji kayıplarını minimize edecek şekilde planlanması gerektiğini vurgulamıştır. N'Tsoukpoe ve Kuznik [1], hane tipi TCES uygulamalarında enerji verimliliği ile sistem güvenilirliğini dengeleyecek hibrit depolama çözümleri önermiştir. Elkholy vd. [8], mikro şebeke uygulamalarında gerçek zamanlı enerji yönetimi stratejileri geliştirerek, TCES sistemlerinin yenilenebilir enerji üretimindeki dalgalanmaları dengelemede etkin rol oynayabileceğini göstermiştir. Le vd. [13], hidrojen, batarya ve termokimyasal depolama sistemlerinin birleşik kullanımının ekonomik analizini yapmış; TCES'in özellikle uzun dönemli enerji saklama kabiliyeti açısından diğer yöntemlerle hibrit kullanımının en uygun strateji olduğunu belirtmiştir. Buna ek olarak, yüksek sıcaklıklı endüstriyel süreçlerde CaO temelli çevrimlerin konsantre güneş enerjisi (CSP) santralleriyle birleştirilmesi üzerine yapılan uygulamalı çalışmalar, sistem düzeyinde entegre enerji üretimi için yeni bir yönetim oluşturmuştur [14], [16].

2.5. Güncel Eğilimler ve Araştırma Boşlukları

Son yıllarda yapılan kapsamlı incelemeler, TCES sistemlerinin performansını sınırlayan temel unsurların başında malzeme bozunması, kütle transfer kısıtları ve yüksek yatırım maliyetlerinin geldiğini göstermektedir. Spietz vd. [24], tuz hidrat temelli sistemlerin döngüsel kararlılığını artırmak amacıyla yeni kompozit formülasyonlarının geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Feng vd. [25] ve Lin vd. [26] çalışmalarında, yeni nesil vermikülit-karbonat kompozitlerinin hem düşük sıcaklıkta çalışabilirlik hem de yüksek enerji yoğunluğu açısından umut verici olduğunu göstermiştir. Ancak halen, endüstriyel ölçekli TCES uygulamalarında uzun dönemli dayanıklılık, nem kontrolü ve sistem mühendisliği konularında kapsamlı saha verilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doğrultuda gelecekteki araştırmaların; malzeme mühendisliği, reaktör optimizasyonu, sistem modelleme ve ekonomik sürdürülebilirlik ekseninde bütünleşik olarak ilerlemesi beklenmektedir [20], [23]–[26].

3. TERMOKİMYASAL ISI DEPOLAMA MALZEMELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Termokimyasal ısı depolama (TID) sistemleri, enerji dönüşüm ve depolama teknolojileri içerisinde yüksek enerji yoğunluğu, uzun süreli depolama kabiliyeti ve düşük ısı kayıpları sayesinde öne çıkmaktadır [3], [4], [5]. Bu sistemlerde enerji, tersinir kimyasal reaksiyonlar yoluyla depolanır ve gerektiğinde geri kazanılır. Özellikle güneş enerjisi sistemlerinde mevsimsel enerji depolama uygulamaları açısından termokimyasal yöntemler, duyulur ve gizli ısı depolama yöntemlerine göre daha avantajlıdır [1], [6], [17].

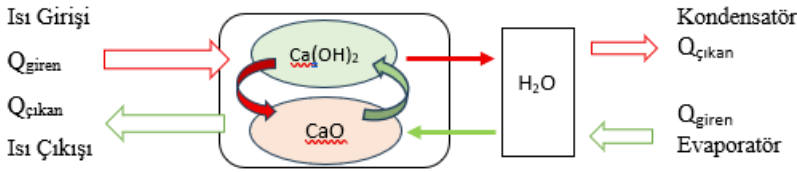
TID sistemlerinde temel hedef, yüksek enerji yoğunluğu, kararlı çevrim performansı, uygun reaksiyon sıcaklığı aralıkları ve düşük maliyetli malzeme seçimi arasındaki dengenin sağlanmasıdır [2], [10], [16]. Bu nedenle farklı malzeme grupları metal oksitler, tuz hidratlar, sorpsiyon temelli adsorbanlar ve kompozit malzemeler çeşitli araştırmalarda karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [7], [9], [24]. Her bir malzeme grubunun avantaj ve dezavantajları, termodinamik özellikleri, kinetik davranışları ve uygulama ölçekleri bakımından farklılık göstermektedir.

Bu bölümde, literatürde yaygın olarak incelenen TID malzemeleri sistematik biçimde ele alınmış, malzemelerin termodinamik performansları, çevrim kararlılıkları ve uygulama potansiyelleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca Tablo 4.4.1'de özetlendiği üzere, farklı malzeme sınıflarının karakteristik özellikleri nicel olarak değerlendirilmiştir [8], [10], [14], [20], [23]–[26].

3.1. Malzeme Gruplarının Termodinamik ve Yapısal Özellikleri

Termokimyasal enerji depolamada kullanılan malzemeler, genellikle metal oksit, tuz hidrat, adsorban (sorpsiyon) ve kompozit grupları altında incelenir [3], [15], [19]. Her bir malzeme grubunun enerji depolama performansı, reaksiyon entalpisi (ΔH), dönüşüm sıcaklığı, geri kazanım oranı ve çevrim kararlılığı gibi kriterlere bağlı olarak belirlenmektedir.

Metal oksit sistemleri, özellikle $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ reaksiyon çiftleri, yüksek sıcaklık aralıklarında (300–600 °C) çalışan ve teorik olarak 1400 kJ/kg'a kadar enerji depolayabilen malzemelerdir [25]. CaO 'nun hidrasyon süreçlerinin şematik gösterimi Şekil 4'de verilmiştir. Bu sistemler, yüksek sıcaklıkta endüstriyel uygulamalara ve yoğun güneş enerjisi toplama sistemlerine (CSP) uygun olmalarına karşın, döngüsel kararlılıkta cürufişma ve hacim değişimi gibi yapısal sınırlılıklar göstermektedir [5], [14].



Şekil 4. CaO 'nun hidrasyon süreçlerini gösteren termokimyasal ısı depolama sisteminin şematik gösterimi [25].

Tuz hidrat temelli sistemler (ör. $\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{SrBr}_2$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}/\text{MgSO}_4$), orta sıcaklık aralıklarında (30–150 °C) çalışabilmekte ve 2000 kJ/kg'a kadar teorik enerji depolama kapasitesi sunabilmektedir [21], [22], [24]. Bu malzemelerin en önemli avantajı, düşük sıcaklıklarda yüksek reaksiyon entalpisi göstermeleri ve mevsimsel enerji depolama sistemleri için uygun olmalarıdır. Ancak suyun kristal yapıdan buharlaşması nedeniyle çevrimsel kararlılık sınırlıdır [19], [20].

Sorpsiyon (adsorban) temelli malzemeler, genellikle silika jel, zeolit ve metal-organik çerçeveler (MOF) gibi poroz yapılu malzemeleri içerir. Bu malzemeler, yüzey etkileşimleri yoluyla su buharını adsorbe eder ve düşük sıcaklıklarda (~50–350 °C) geri dönüşümlü enerji depolama olanağı sağlar [23]. Adsorban sistemler, yüksek çevrim ömrü ve kararlılığı ile küçük ölçekli ısıtma/soğutma uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

Kompozit sistemler, tuz hidratların veya aktif adsorbanların gözenekli bir matris (örneğin SiO_2 , EV veya K_2CO_3) içinde dağıtılmasıyla elde edilir [7], [26]. Bu tür

sistemler, hem yüksek enerji yoğunluğu hem de mekanik stabilite sağlar. Ayrıca kompozit yapı, aktif tuzun aglomerasyonunu engelleyerek çevrim ömrünü artırır ve suyun hızlı difüzyonunu destekler [20], [22].

3.2. Uygulama Alanlarına Göre Değerlendirme

Termokimyasal ısı depolama sistemleri, çalışma sıcaklık aralığına, reaksiyon hızına ve malzemenin çevrim kararlılığına bağlı olarak farklı enerji sistemlerinde kullanılabilir [2], [4], [11].

Düşük sıcaklık aralığında (30–150 °C) çalışan tuz hidrat sistemleri, konut ve ticari binalarda güneş enerjili mevsimlik ısı depolama uygulamaları için uygundur [18], [21]. Bu sistemler, özellikle sıcak su üretimi ve ısıtma amaçlı entegre güneş enerjisi sistemlerinde kullanılmaktadır [6], [12].

Orta sıcaklık aralığında (100–350 °C) çalışan adsorban temelli sistemler (örneğin zeolit veya silika jel bazlı) daha çok soğutma, iklimlendirme ve atık ısı geri kazanımı uygulamalarında tercih edilmektedir [23], [24]. Bu sistemler, yüksek çevrim ömrü ve tekrarlanabilirlikleri sayesinde taşınabilir ve bina entegre çözümlerde avantaj sağlar.

Yüksek sıcaklık (>350 °C) gerektiren metal oksit sistemleri (özellikle CaO/Ca(OH)₂ ve MgO/Mg(OH)₂ çiftleri), yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) ve endüstriyel atık ısı geri kazanımı uygulamalarında kullanılmaktadır [3], [5], [25]. Bu sistemler, yüksek enerji yoğunluğu ve iyi termodinamik verimlilikleri nedeniyle enerji santrali ölçeğinde termal enerji depolama çözümleri için öne çıkmaktadır.

Kompozit sistemler ise çok yönlü uygulama esnekliği sunar. Örneğin, CaCl₂/SiO₂ veya K₂CO₃/EV kompozitleri düşük sıcaklıkta çalışabilen ve yüksek çevrim kararlılığına sahip sistemler olarak öne çıkar [7], [26]. Bu tür hibrit sistemler, hem mevsimsel hem de kısa süreli depolama gereksinimlerinde kullanılabilir.

3.3. Karşılaştırmalı Analiz

Tablo 1’de, her bir malzeme grubuna ait tipik performans değerleri ve uygulama karakteristikleri literatürden derlenmiştir [8], [10], [14], [20], [23]–[26]. Verilen değerler, sistem ölçeği, numune saflığı ve deney koşullarına göre değişiklik gösterebilir.

Tablo 1. Termokimyasal yöntemle ısı depolamada kullanılan malzemelerin karşılaştırılması [8], [10], [14], [20], [23]–[26].

Özellik	Sorpsiyon (Silika/Zeolit)	Tuz-Hidrat ($\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	Metal Oksit ($\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$)	Kompozit (EV/ K_2CO_3 , $\text{CaCl}_2/\text{SiO}_2$)
Enerji Yoğunluğu (J/g)	160–300 kJ/kg (su ads.)	500–2000 kJ/kg (teorik)	104 kJ/mol ≈ 1400 kJ/kg (teorik)	1200–1600 kJ/kg (tuz oranına bağlı)
Enerji Yoğunluğu (MJ/m ³)	~ 400 – 900 MJ/m ³ (adsorbent dep.)	1000 – 3000 MJ/m ³ (teorik)	≈ 3100 MJ/m ³ (teorik)	500 – 1000 MJ/m ³ (matris ile seyrelmiş)
Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	50–350 °C (desorpsiyon)	30–150 °C (hidrasyon/ deshidrasyon)	Dehidrasyon ~ 350 °C / Hidras- yon ~ 20 – 100 °C	Tuzun çalışma aralığı (K_2CO_3 : ~ 10 – 60 °C hidrasyon)
Çevrim Kararlılığı	Çok yüksek (yüzlerce döngü)	Orta (10–100 döngü; stabil tuzlar)	Orta (CaO stabil, cürufişma riski mevcut)	Çok yüksek (matris koruması sayesinde)
Geri Kazanılabilir Enerji Oranı	Yüksek (~ 80 – 100)	Yüksek ancak kayıplı (ortalama verim ~ 70 – 90)	Yüksek (ideal reversibilite)	Yüksek (benzer tuz verimi)
Termodinamik Verim	Carnot'a yakın (teorik)	İyi, ancak hidrasyon/ deshidrasyon basınç kayıpları mevcut	Carnot'a yakın (yüksek sıcaklık kayıpları)	İyi (aksesuar kayıpları sınırlı)
Uygun Sistemler	Ev/tesisat ısıtma, soğutma, günlük döngü	Güneş enerjisi mevsimlik depolama (bina ısıtma, sıcak su)	Yüksek sıcaklık endüstriyel uygulamalar, CSP sistemleri	Mevsimlik depolama, düşük sıcaklıkta dayanımlı sistemler

Bu karşılaştırma, farklı malzeme sınıflarının performans odaklı avantaj ve sınırlılıklarını ortaya koymaktadır:

- 1. Enerji Yoğunluğu:** Teorik olarak en yüksek enerji depolama kapasitesi $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ sisteminde görülmektedir [25]. Bunu tuz-hidrat sistemleri (ör. $\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) izlemektedir. Sorpsiyon bazlı ve kompozit malzemeler ise genellikle daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmakla birlikte, yüksek çevrim kararlılığı sunar [10], [23].

2. **Çevrim Kararlılığı ve Mekanik Dayanım:** Kompozit malzemeler ve adsorbanlar, döngüsel kararlılık açısından üstün performans sergiler. Matris içinde dağıtılmış aktif tuz fazı, genleşme ve büzülme kaynaklı yapısal stresleri azaltarak uzun ömür sağlar [24], [26]. Buna karşın, tuz-hidrat sistemlerinde çözünme ve yeniden kristalleşme süreçleri kararsızlık yaratabilir. Metal oksit tabanlı sistemlerde ise sinterleşme (cürufleşme) riski önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır [25].
3. **Çalışma Sıcaklığı Aralıkları:** Sorpsiyon ve tuz-hidrat sistemleri, geniş bir sıcaklık bandında çalışabilir. Bu da onları bina ısıtma-soğutma ve mevsimsel depolama uygulamaları için ideal kılar [14], [20]. Buna karşılık $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ çevrimi yalnızca yüksek sıcaklıklarda (350–550 °C) geri yüklenebilir ve bu nedenle konsantre güneş enerjisi sistemleri (CSP) gibi uygulamalarda tercih edilir [16], [25].
4. **Enerji Verimliliği:** Tüm malzeme grupları uygun sistem tasarımıyla yüksek enerji geri kazanım oranlarına ulaşabilir. Ancak açık devre sistemlerde **buhar basıncı farklarından** kaynaklı kayıplar görülebilmektedir [8], [23]. Kapalı devrelerde bu verim %90 seviyelerine ulaşabilmektedir [24].
5. **Uygulama Alanları:**
 - **Sorpsiyon sistemleri:** Küçük ve orta ölçekli termal gereksinimler (ör. konut ısıtma/soğutma)
 - **Tuz-hidrat sistemleri:** Mevsimsel ve yüksek hacimli enerji depolama
 - **$\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$:** Yüksek sıcaklıklı endüstriyel ısı geri kazanımı ve CSP uygulamaları
 - **Kompozit sistemler:** Geniş sıcaklık aralığına uyumlu, dayanıklı hibrit çözümler [23], [24], [26].

Tablodan da görüldüğü üzere, metal oksit sistemleri teorik olarak en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Tuz hidrat sistemleri orta düzeyde enerji depolama kapasitesine rağmen düşük sıcaklıkta çalışabilirlik avantajı sunar. Sorpsiyon temelli malzemeler, yüksek çevrim ömrüyle küçük ölçekli uygulamalarda ön plana çıkar. Kompozit sistemler ise enerji yoğunluğu, kararlılık ve maliyet dengesi açısından çok yönlü bir çözüm sunmaktadır [19], [22], [24], [26].

4. SONUÇLAR

Yapılan inceleme, termokimyasal ısı depolama sistemlerinde malzeme seçiminin sistem performansını belirleyen temel faktör olduğunu ortaya koymuştur. Termokimyasal ısı depolama sistemleri, sürdürülebilir enerji dönüşüm süreçlerinde yüksek enerji yoğunluğu ve uzun süreli depolama imkânı sunmaları bakımından dikkat çekmektedir. Ancak farklı malzeme grupları arasında performans, maliyet ve uygulama ölçeği açısından önemli farklılıklar bulunmaktadır [3], [5], [11], [17].

Metal oksit sistemleri ($\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$) yüksek enerji yoğunlukları ve kararlı geri dönüşüm davranışları ile yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda en uygun seçenekler arasında yer almaktadır [25]. Bununla birlikte, yüksek reaksiyon sıcaklıkları, partikül aglomerasyonu ve cürufişma gibi problemler, bu malzemelerin döngüsel performansını sınırlayabilmektedir [12], [19]. Bu nedenle, malzeme modifikasyonu, destekleyici matris kullanımı ve reaktör tasarımında ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar, bu sistemlerin uygulanabilirliğini artırmak açısından önemlidir [11], [14].

Tuz hidrat sistemleri (ör. $\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) orta düzey enerji yoğunluğu ve düşük sıcaklık aralığında çalışma avantajlarıyla mevsimsel ısı depolama uygulamalarında öne çıkmaktadır [6], [21], [24]. Ancak hidratasyon–dehidratasyon döngülerinde tuz kaybı, faz ayrışması ve kristal yapı bozulmaları gibi sorunlar performansı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, yeni nesil stabilizatörler ve matris destekli kompozit sistemler geliştirilerek bu sorunların giderilmesi hedeflenmektedir [7], [26].

Sorpsiyon temelli sistemler (özellikle zeolit ve silika jel) düşük sıcaklıkta çalışabilirlikleri ve çok yüksek çevrim kararlılıkları sayesinde küçük ölçekli ısıtma–soğutma uygulamalarında tercih edilmektedir [10], [23]. Bu malzemeler düşük enerji yoğunluğuna sahip olsalar da modüler sistem tasarımları ve yüksek tersinebilitesi ile bina ölçeğinde yenilenebilir enerji entegrasyonu için uygun çözümler sunmaktadır.

Kompozit sistemler ise farklı malzeme gruplarının avantajlarını birleştirerek, daha dengeli bir performans elde etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle $\text{CaCl}_2/\text{SiO}_2$ veya $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{EV}$ tabanlı kompozitler hem yüksek çevrim dayanımı hem de kontrollü reaksiyon davranışı ile öne çıkmaktadır [26]. Kompozitlerin bu çok yönlülüğü, gelecekte termokimyasal depolama sistemlerinin geniş bir yelpazede kullanılmasının önünü açmaktadır.

Sonuç olarak, her malzeme grubu belirli uygulama koşullarına göre avantaj ve sınırlılıklar sunmaktadır. Yüksek sıcaklık gereksinimi olan endüstriyel sistemlerde

metal oksit temelli çözümler, orta sıcaklıklı bina ve mevsimsel depolama sistemlerinde tuz hidratlar, düşük sıcaklıkta çalışan soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde ise sorpsiyon malzemeleri tercih edilmektedir. Kompozit sistemler, tüm bu yaklaşımlar arasında performans ve kararlılığı optimize eden hibrit bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, özellikle düşük maliyetli ve çevrimsel olarak kararlı kompozitlerin geliştirilmesi, alanın ilerlemesi açısından kritik önem taşımaktadır. Gelecekteki araştırmaların, bu sistemlerin ölçeklenebilirliğini, çevrimsel verimliliğini ve ekonomik uygulanabilirliğini artırmaya odaklanması beklenmektedir [2], [16], [20], [24].

Yazar Katkı Oranları

Çalışmanın Tasarlanması (Design of Study): RKK(%50), MÖ(%50)

Veri Toplanması (Data Acquisition): RKK(%50), MÖ(%50)

Veri Analizi (Data Analysis): RKK(%50), MÖ(%50)

Makalenin Yazımı (Writing Up): RKK(%50), MÖ(%50)

Makale Gönderimi ve Revizyonu (Submission and Revision): RKK(%50), MÖ(%50)

KAYNAKLAR

- [1] K. E. N'Tsoukpoe and F. Kuznik, "A reality check on long term thermochemical heat storage for household applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, 2021, Art. no. 110683.
- [2] G. Airò Farulla, M. Cellura, F. Guarino, and M. Ferraro, "A review of thermochemical energy storage systems for power grid support," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 9, 2020, Art. no. 3142.
- [3] P. Pardo et al., "A review on high temperature thermochemical heat energy storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 591-610, 2014.
- [4] M. Abdullah, M. Koushaeian, N. A. Shah, and J. D. Chung, "A review on thermochemical seasonal solar energy storage materials and modeling methods," *Int. J. Air Cond. Refrig.*, vol. 32, no. 1, 2024.
- [5] M. M. Rana et al., "Applications of energy storage systems in power grids with and without renewable energy integration—A comprehensive review," *J. Energy Storage*, vol. 68, 2023, Art. no. 107811.
- [6] J. Lin, "Applications of low-temperature thermochemical energy storage systems for salt hydrates based on material classification: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, 2022, Art. no. 112129.
- [7] A. Jabbari Hichri, S. Bennici, and A. Auroux, "CaCl₂ containing composites as thermochemical heat storage materials," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 172, pp. 177-185, 2017.
- [8] M. H. Elkholy et al., "Design and implementation of a real time energy management system for an isolated microgrid: Experimental validation," *Appl. Energy*, vol. 327, 2022.
- [9] B. Goodenough, "Energy storage materials: A perspective," *Energy Storage Mater.*, vol. 1, pp. 158-161, 2015.
- [10] C. Lehmann, O. Kolditz, and T. Nagel, "Modelling sorption equilibria and kinetics in numerical simulations of dynamic sorption experiments in packed beds of salt/zeolite composites for thermochemical energy storage," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 128, pp. 1102-1113, 2019.
- [11] T. Shi et al., "Multi-physics modeling of thermochemical heat storage with enhanced heat transfer," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 198, 2021, Art. no. 117508.
- [12] Q. Ranjha and A. Oztekin, "Numerical analyses of three-dimensional fixed reaction bed for thermochemical energy storage," *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 825-835, 2017.

- [13] T. S. Le, T. N. Nguyen, D.-K. Bui, and T. D. Ngo, "Optimal sizing of renewable energy storage: A techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage," *Appl. Energy*, vol. 336, 2023, Art. no. 120817.
- [14] A. L. Opah Lele, "Thermal synthesis of a thermochemical heat storage with heat exchanger optimization," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 101, pp. 669–676, 2015.
- [15] A.-J. de Jong, F. Trausel, C. Finck, L. van Vliet, and R. Cuypers, "Thermochemical heat storage – system design issues," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 309–319, 2014.
- [16] M. Felderhoff, R. Urbanczyk, and S. Peil, "Thermochemical heat storage for high temperature applications – A review," *Green*, vol. 3, no. 2, pp. 113–123, 2013.
- [17] I. Sărbu and C. Sebarchievici, "A comprehensive review of thermal energy storage," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, 2018, Art. no. 191.
- [18] A. Abdullah, M. Koushaeian, N. A. Shah, and J. D. Chung, "A review on thermochemical seasonal solar energy storage materials and modeling methods," *Int. J. Air Cond. Refrig.*, vol. 32, 2024.
- [19] K. Posern and C. Kaps, *Thermochimica Acta*, vol. 502, nos. 1–2, pp. 73–76, 2010.
- [20] A. Palacios, M. E. Navarro, C. Barreneche, and Y. Ding, "Water sorption-based thermochemical storage materials: A review from material candidates to manufacturing routes," *Energies*, 2022.
- [21] R. J. Clark and M. Farid, "Experimental investigation into the performance of novel SrCl_2 based composite material for thermochemical energy storage," *J. Energy Storage*, vol. 36, 2021, Art. no. 102390.
- [22] Z. Chen, Y. Zhang, Y. Zhang, Y. Su, and S. Riffat, "A study on vermiculite based salt mixture composite materials for low grade thermochemical adsorption heat storage," *Energy*, vol. 278, 2023.
- [23] S. Vasta et al., "Adsorption heat storage: State of the art and future perspectives," *Nanomaterials*, vol. 8, no. 7, 2018, Art. no. 522.
- [24] T. Spietz, R. Fryza, J. Lasek, and J. Zuwała, "Thermochemical energy storage based on salt hydrates: A comprehensive review," *Energies*, vol. 18, no. 10, 2025, Art. no. 2643.
- [25] Y. Feng et al., "Critical review of $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ thermochemical energy storage materials," *Energies*, vol. 16, no. 7, 2023, Art. no. 3019.
- [26] J. Lin, Q. Zhao, and H. Huang, "Performance analysis of vermiculite-potassium carbonate composite materials for efficient thermochemical energy storage," *Energies*, vol. 17, no. 12, 2024, Art. no. 2847.