

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TERMOKİMYASAL ISIL DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF
ÜRÜN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

MAYIS 2020

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TERMOKİMYASAL ISIL DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF
ÜRÜN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

MAYIS 2020



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 181222007 numaralı öğrencisi **Elif YILDIZ**'ın "TERMOKİMYASAL ISIL DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF ÜRÜN GELİŞTİRİLMESİ" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 16/10/2019 tarih ve 2019/18 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından *Oy.b. d. d. p. i* ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

İmzası

Tez Savunma Tarihi : *05.10.2020*

1) Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

.....

2) Jüri Üyesi : Doç. Dr. Behiye YÜKSEL

.....

3) Jüri Üyesi : Doç. Dr. Mehmet Ziya SÖĞÜT

.....

Not: Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum ‘‘Termokimyasal Isıl Depolama Sistemleri İçin Alternatif Ürün Geliştirilmesi’’ adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden olduğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (05/05/2020)

Elif Yıldız

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ve bu projenin başlangıcından tamamlanmasına kadar geçen süreçte gösterdikleri her türlü yardım ve desteklerinden dolayı hocalarım Sayın Prof. Dr. Zafer UTLU ve Sayın Doç. Dr. Behiye YÜKSEL'e, çalışmanın uygulama kısmını destekleyen İstanbul Gedik Üniversitesi'ne ve her zaman yanımda olan, maddi manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme en içten dileklerimde teşekkür ederim.

Mayıs 2020

Elif Yıldız
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Konusu	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Literatür Araştırması	2
2. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ	9
2.1 Duyulur Isı Depolama Yöntemi	9
2.2 Gizli Isı Depolama Yöntemi	11
2.2.1 Faz değişim malzemeleri	13
2.3 Termokimyasal Isı Depolama Yöntemi	15
2.3.1 Anodizasyon.....	18
3. DENEYSEL	21
3.1 Numune Hazırlama	21
3.2 Sistem ve Yapısı.....	25
3.2.1 Nemlendirici.....	27
3.2.2 Isıtıcı ve sensörler	28
3.2.3 Numune kabini.....	29
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	30
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	33
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ.....	39

KISALTMALAR

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
AlCl₃	: Alüminyum Klorür
Ba(OH)₂	: Baryum Hidroksit
CaCl₂	: Kalsiyum Klorür
CaCl₂·6H₂O	: Kalsiyum Klorür Hekzahidrat
H₂O	: Su
H₂SO₄	: Sülfirik Asit
KCl	: Potasyum Klorür
LiCl	: Lityum Klorür
LiNO₃	: Lityum Nitrat
MgCl₂	: Magnezyum Klorür
NaCl	: Sodyum Klorür
NaNO₃	: Sodyum Nitrat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
RH	: Bağlı Nem

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Bazı Duyulur Isı Sıvı Depolama Malzemelerinin Özellikleri.....	10
Çizelge 2.2: Bazı Duyulur Isı Katı Depolama Malzemelerinin Özellikleri.....	10
Çizelge 2.3: Bazı Gizli Isı Depolama Malzemelerinin Özellikleri.....	12
Çizelge 2.4: Bazı Organik Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri.....	13
Çizelge 2.5: Bazı İnorganik Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri	13
Çizelge 2.6: Bazı Ötektik Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri.....	14
Çizelge 2.7: Bazı Termokimyasal Isı Depolama Malzemelerinin Özellikleri.....	17
Çizelge 3.1: Emprenye Edilen Tuzlar ve Oranları.....	23

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Paketlenmiş Yataklı Duyulur Isı Depolama Sisteminin Şematik Gösterimi	4
Şekil 1.2: Faz Değişim Malzemeleri İle Termal Depolama	5
Şekil 1.3: Deşarj Prosesinde Tuz Kullanılan Örnek Sistem Şeması.....	6
Şekil 2.1: Güneş Enerjisinin Kimyasal Reaksiyonlarla Depolanmasının Şematik Gösterimi.....	16
Şekil 2.2: Anodik Oksit Yapısı.....	19
Şekil 2.3: Tek ve İki Aşamalı Anodizasyon Proseslerinin Şematik Gösterimi	20
Şekil 3.1: Numune Hazırlama İşlem Akış Şeması.....	21
Şekil 3.2: NaOH Çözeltisine Yatırılmış Numuneler	22
Şekil 3.3: Por Genişletme İşlemi Öncesi ve Sonrası Por Çapları	23
Şekil 3.4: Tuz Emprenye Edilen Numunelerin Enerji Depolama Yoğunlukları	24
Şekil 3.5: LiNO ₃ Emprenye Edilmiş Alüminyum Numunelerin Prototip Kabinine Yerleştirilmesi	25
Şekil 3.6: Sistem Şeması	26
Şekil 3.7: Sistem Prototipi ve Bileşenleri	27
Şekil 3.8: Nemlendirme Ünitesi	28
Şekil 3.9: Isıtıcı (Sol), Isı ve Nem Sensörü (Sağ).....	29
Şekil 3.10: Numune Kabini	29
Şekil 4.1: Aşama 30 Dakika Deşarj Prosesi	30
Şekil 4.2: Aşama 90 Dakika Şarj Prosesi	31
Şekil 4.3: 2. Aşama 60 Dakika Deşarj Prosesi	31
Şekil 4.4: 2. Aşama 60 Dakika Şarj Prosesi	32

TERMOKİMYASAL ISIL DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF ÜRÜN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Nüfus artışı ve sanayileşmede yaşanan gelişmelerle birlikte fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi, var olan kaynaklara ulaşımın daha maliyetli hale gelmesi ve bu kaynakların çevre üzerindeki olumsuz etkileri yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir ve etkin kullanımı konusu, enerji depolama konularını ön plana çıkarmıştır. Bu nedenle, günümüzde termal enerji depolama sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Termal enerji depolama sistemleri sayesinde enerji, istenilen yerde ve zamanda kullanıma hazır bulunur. Termokimyasal ısı depolama, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve düşük ısı kayıpları nedeniyle umut verici bir teknoloji olarak görülmektedir.

TÜBİTAK 315M524 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada, düşük sıcaklıklı termokimyasal ısı depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yeni bir kompozit malzeme geliştirilmiştir. Kompozit malzeme yapısında laboratuvar ortamında oluşturulan porlara LiCl, LiNO₃, MgCl₂ ve CaCl₂ tuzları empenye edilerek depolama malzemesi olarak kullanılması amaçlanmıştır. Numuneler, tasarlanan prototipte farklı koşullar altında şarj ve deşarj döngüleri ile enerji depolama performansları test edilmiştir. Geliştirilen yeni kompozit malzemenin geleneksel olanlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Depolama materyali olarak kullanılan LiNO₃ higroskopik tuzun 252 kJ/kg ile ileriki çalışmalar için umut verici olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra 221 kJ/kg'lık enerji depolama yoğunluğu ile en kötü sonucu CaCl₂ göstermiştir.

Anahtar Kelimeler : *Termal Enerji Depolama, Termokimyasal Isı Depolama.*

DEVELOPMENT OF NEW COMPOSITE MATERIAL FOR THERMOCHEMICAL HEAT STORAGE SYSTEMS

ABSTRACT

With the developments in population growth and industrialization, the depletion of fossil fuel resources, the cost of access to existing resources and the negative effects of these resources on the environment increased the interest in renewable energy resources. The issue of sustainable and efficient use of renewable energy sources has highlighted energy storage issues. Therefore, the use of thermal energy storage systems is becoming widespread. Thanks to thermal energy storage systems, energy is available at the desired location and time. Thermochemical heat storage, high energy storage density, and low heat losses are seen as a promising technology.

In the study carried out within the scope of TÜBİTAK 315M524 project, a new composite material has been developed for use in low temperature thermochemical heat storage systems. It is intended to be used a storage material by impregnating LiCl, LiNO₃, MgCl₂ and CaCl₂ salts to the pores created in the laborator environment in the composite material structure. Samples were tested in the designed prototype for charge and discharge cycles and energy storage performance under different conditions. The new composite material developed has been shown to give better results than traditional ones. LiNO₃ hygroscopic salt used as storage material has been shown to be promising for future studies with 252 kJ/kg. In addition, CaCl₂ showed the worst result with an energy storage density of 221 kJ/kg.

Keywords : *Thermal Energy Storage, Thermochemical Heat Storage.*

1. GİRİŞ

1.1 Çalışma Konusu

Günümüzde enerji tüketimi ülkelerin gelişmişlik seviyesiyle doğrudan ilişkili olarak görülmektedir. Endüstri ve teknoloji alanında yaşanan gelişmeler, hızlı nüfus artışı ve dünya nüfusunun hayat kalitesini arttırmak için yapılan faaliyetler enerji tüketimini her geçen gün daha da arttırmaktadır. Mevcut fosil kaynakların giderek azalması, çevre ve insanlar üzerinde zararları göz önünde bulundurulduğunda artan enerji gereksiniminin karşılanması için güneş enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili yapılan çalışmalar ön plana çıkmaya başlamıştır.

Son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yapılan çalışmalar mevcut teknolojiyi önemli ölçüde geliştirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları sayesinde mevcut yerel enerji kaynaklarının varlığı korunur. Ülkeler için karlı olmasının yanı sıra güvenli, çevreyle uyumlu kaynaklardır ve kendilerini yenileyebilme özelliğine sahiptirler [1]. Bu enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı fosil yakıt kaynaklarına olan bağılılığı önemli ölçüde azaltır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sınırlıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut verici kaynaklardan biri olan güneş enerjisinden sadece gündüz saatlerinde ve özellikle yaz aylarında yararlanılabilmesi güneş enerjisinin efektif kullanımı açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Güneş enerjisinin ısı enerjisi olarak kullanılabilmesinde en büyük sorun, kaynağın süresiz olmasıdır [2]. Bu sorunun çözümü için en akılcı yöntem güneş enerjisinin ısı enerjisi olarak depolanmasıdır. İstenilen zamanda ve yerde enerjinin hazır olabilmesi depolama yöntemleri ile mümkündür. Bu nedenle termal enerji depolama alanında yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Termal enerji depolama sistemlerinde enerji arz ve talep arasındaki dengenin sağlanmasında sahip olduğu avantajlar sayesinde güneş enerjisi umut verici bir teknoloji olarak görülmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Fosil yakıt kaynaklarının giderek azalması ve enerji arz-talep farkının giderek büyümesi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimi arttırmıştır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının doğa koşullarına olan bağlılığı nedeniyle yalnızca belirli zamanlarda enerji verebilmeleri kullanımlarını sınırlandırmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut vaad edici görülen kaynak güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin termal kullanımı, hem konut hem endüstriyel alanda ısıtma, iklimlendirme ve havalandırma gibi konularda geniş çapta araştırmalara konu olmuştur. Ancak güneş enerjisinin sadece gündüz saatlerinde ve özellikle yaz aylarında etkili olması sürekli kullanımını engellemektedir. Termal enerji depolama sistemlerinin güvenilir ve ekonomik olarak uygulanabilmesi ve geliştirilebilmesi için güneş enerjisinin verimli sürdürülebilir kullanımı hayati öneme sahiptir. Güneş enerjisinin sürdürülebilir kullanımının en önemli yolu depolanmasıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ve iyileştirilmesi için depolama sistemleri, büyük ölçüde yeni enerji kaynakları geliştirmek kadar önemlidir.

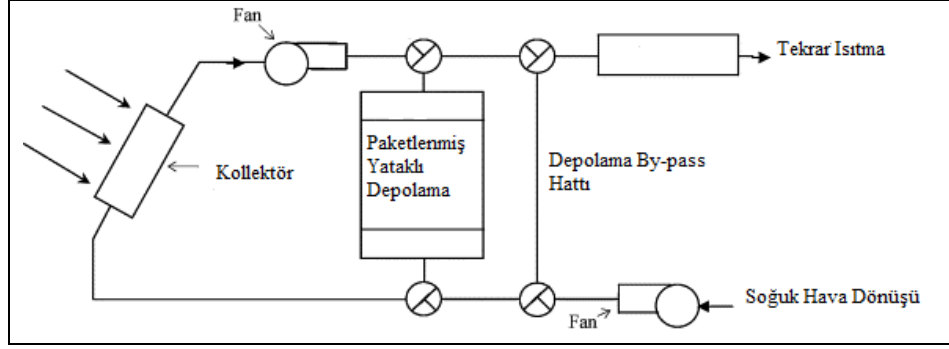
Son zamanlarda sorbent malzemelerin özellikle ısı depolama uygulamalarındaki kullanımını birçok farklı yönden araştırılmaktadır. Ancak bu malzemelerin pratikteki kullanımlarını engelleyen çeşitli dezavantajlar mevcuttur. Bunlardan en önemlileri yüksek şarj sıcaklığı ve ısı/ kütle transferinin etkin bir şekilde sağlanamamasıdır. Özellikle literatürde sıkça rastalanan zeolit ve silika jel 150°C'nin üzerinde şarj sıcaklığına ihtiyaç duyar. Bu durum ısı depolama uygulamaları için verimi azaltırken maliyeti arttırmaktadır. Bu çalışmada güneş enerjisinin termokimyasal olarak depolanmasını sağlamak amacıyla laboratuvar ortamında geliştirilen düşük şarj sıcaklığına sahip yeni bir emici kompozit sorbent malzemenin, bu proje kapsamında hazırlanan prototipte enerji depolama performans analizleri yapılması amaçlanmıştır. Depolanan ısının daha sonra mahal ve su ısıtması için kullanılması mümkün olacaktır.

1.3 Literatür Araştırması

Literatürde termal enerji depolama alanında pek çok çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar depolama yöntemlerinin enerji analizlerini kendi içlerinde incelemiş,

diğer yöntemlere göre üstünlükleri konusunda çeşitli sonuçlara varmış ve sistemlerin nasıl daha verimli hale getirilebileceği konusunda fikirler öne sürmüşlerdir.

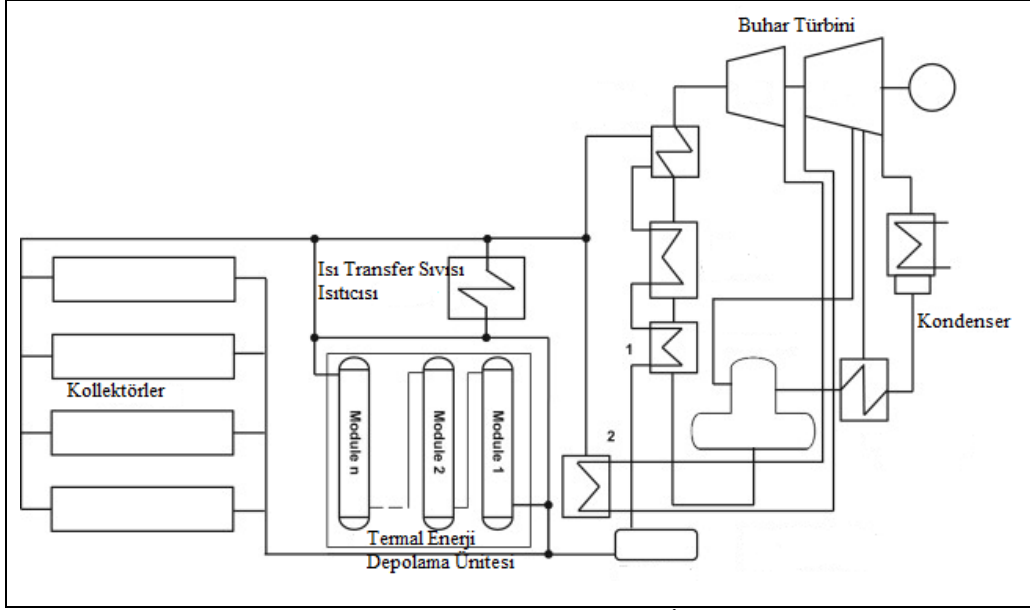
Lakshmi ve çalışma arkadaşları yaptıkları çalışmada trapez şekilli güneş enerjili hava ısıtıcısının enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmişler. Yapılan çalışmada duyulur ısı depolama materyali olarak seçilen çakıl taşı, emici plaka altına yerleştirilmiştir. Duyulur ısı depolama materyali içeren ve içermeyen güneş enerjili hava ısıtıcılarının performans analizleri yapılmış ve bu analizler düz plaka hava ısıtıcıları ile karşılaştırılmıştır. Performans analizi karşılaştırması yapılırken güneş radyasyon yoğunluğu ve hava hızı yoğunluğu gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışma sonucunda düz levha güneş enerjili hava ısıtıcısının günlük ortalama termal verimi %15,8 olarak ölçülmüştür. Bunun yanı sıra duyulur ısı depolama materyali kullanılmayan trapez şekilli ısıtıcı veriminin %21,5 ve duyulur ısı depolama materyali içeren trapez şekilli ısıtıcı veriminin %58,16 olduğu görülmüştür [3]. Duyulur ısı depolama üzerine Günerhan ve Hepbaşı'nın yaptığı güneş enerjili su ısıtması çalışmasında ise duyulur ısı depolama malzemesi olarak su seçilmiştir. Sistemin temel bileşenleri; yassı plakalı güneş kolektörü, sirkülasyon pompası ve su deposu bulunan ısı eşanjörüdür. Çalışma prensibi suyun, kapalı kolektör çevrimi boyunca ısı eşanjöründe dolaştırılır, burada sahip olduğu ısıyı depolama malzemesine aktarma esasına dayanır. Yapılan testler boyunca sistemin genel ekserji verimliliğinin %3,27 ve %4,39 arasında değiştiği gözlemlenmiştir [4]. Duyulur ısı depolama yöntemi katı depolama materyali kullanılarak paket yataklı pasif sistem uygulamaları için uygundur. Bu sistemler 100°C'ye kadar olan sıcaklıklarda güneş enerjisi destekli hava ısıtıcıları ile birlikte kullanılır. Güneş kolektörleriyle ısıtılan hava katı depolama materyalinin bulunduğu yatağa iletilir. Sıcaklığını yatağa ileten hava soğur ve tekrar ısıtılmak üzere kolektörlere gönderilir. Döngünün başlangıcında sıcak hava sadece yatağın kolektöre daha yakın olan kısmını ısıtabilir. Ancak çevrim sayısı arttıkça çıkış havasının sıcaklığı da artar. Yatak tamamen şarj olur ve böylece sıcaklık homojen hale gelir. Enerji gereksinimi olduğu zamanlarda deşarj işlemi başlar, sistem ters yönde çalışır. Bu tarz duyulur ısı depolama sistemlerinin en önemli dezavantajı tekrarlanan çevrim sayısı arttıkça yatak boyunca olan sıcaklığın ve katı depolama materyal hacminin korunamamasıdır. Singh ve Saini'nin bu konuda yaptığı çalışmanın şematik gösterimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir. [5].



Şekil 1.1: Paketlenmiş Yataklı Duyulur Isı Depolama Sisteminin Şematik Gösterimi

Kaynak: (Singh, H., Saini R.P., Saini J.S., 2010)

Literatürde en sık rastlanan ısı depolama biçimi gizli ısı depolamadır. Faz değişim malzemeleri esasına dayanan bu yöntemde Benli ve Durmuş yaptıkları çalışmada faz değişim malzemesi olarak 29°C'lik erime sıcaklığına sahip $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılan termal enerji depolama sisteminin performansını incelemişlerdir. Çalışmada, faz değişim malzemesinin şarj edilmesi için on adet güneş kolektörü kullanılmıştır. Güneş kolektörleriyle ısıtılan sıcak hava, depolama ünitesini şarj etmek için faz değişim malzemesi üzerinden geçirilip depolanan ısının ortam havasını ısıtması amaçlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda günlük enerji ihtiyacının ortalama %18 ile %23 arasında karşılanabildiği görülmüştür [6]. Hasse ve çalışma arkadaşlarının faz değişim malzemeleriyle ilgili yaptıkları bir diğer çalışmada ise bal peteği formunda alüminyumdan oluşan üç adet numune hazırlanmıştır. Numunelerin sırasıyla su, parafin ve havayla doldurulmuştur. Çok sayıda bal peteği formundan oluşan paneller ısı eşanjörü arasına, sıcaklığın her tarafa etki ettiğinden emin olunacak şekilde yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda faz değişim malzemesinin termal değişikliklere verdiği tepkinin su ve havadan farklı olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık artışının su üzerindeki etkisinin havaya göre daha geç olduğu görülürken, parafin sıcaklık artışıyla beraber açıkça termal depolama etkisi göstermiştir [7]. Faz değişim malzemeleri ile yapılan genişletilmiş yüzeyler, termal enerji depolama uygulamalarında rastlanan bir yöntemdir. Bu yöntemde faz değişim malzemesinin termal iletkenliğini arttırmak amacıyla ısı transfer sıvısı kullanılır. Cardenas ve Leon'un bu konuda yaptıkları araştırma çalışmasında kullandıkları sistem şeması Şekil 1.2.'de gösterilmiştir [8].

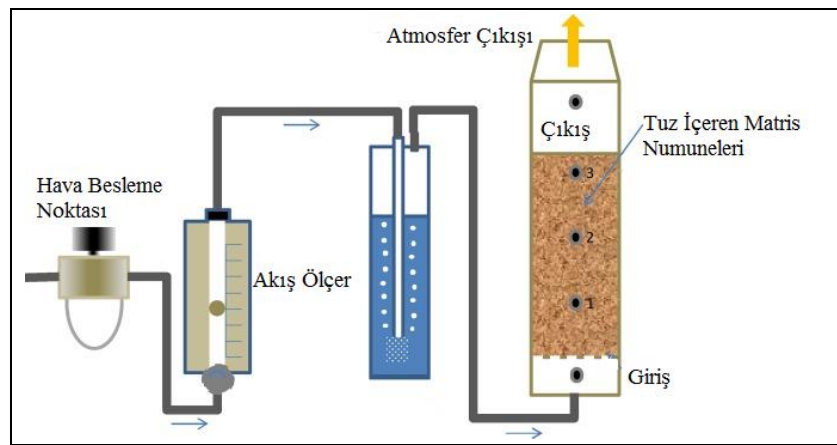


Şekil 1.2: Faz Değişim Malzemeleri İle Termal Depolama

Kaynak: (Cardenas, B., Leao, N., 2013)

Bu çalışmanın da konusu olan termokimyasal ısı depolama ile ilgili Brancato ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada su LiCl/ vermikülit kompozitinin deneysel verilerini elde etmişlerdir. Analizler, mevsimsel ve günlük depolama koşulları olarak iki grupta ele alınmıştır. Malzemenin on dört ardışık çevrim sonunda termal depolama kapasitesinin mevsimsel depolama koşullarında 75 ve 85 °C çalışma sıcaklık aralığında 1,23-2,15 kJ/g ve günlük depolama koşullarında 1,89 kJ/g olduğu görülmüştür [9]. Termokimyasal enerji depolama alanında Zhang ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada aktive edilmiş alümina/LiCl kompozitleri, ısıyı 120 °C sıcaklığın altında depolama yapılması için üretmişlerdir. Emilim kinetiğinin LiCl eklenmesiyle saf alüminaya göre önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Çalışma sonucunda 120 °C'lik şarj sıcaklığı ve %80 RH koşullarında, %14,68 tuz içeriğine sahip alümina/ LiCl kompozitin 1041,5 kJ/kg enerji depolama yoğunluğuna sahip olduğu ölçülmüştür [10]. Hichri'nin çalışma arkadaşlarıyla yaptıkları çalışmada ise ağırlıkça %15 CaCl₂ emdirilmiş alümina silika jel ve bentonit enerji depolama yoğunluklarına göre karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Deneysel veriler sonucunda en yüksek ısı depolama özelliğini 746 J/g olarak silika jel/ CaCl₂ kompozitinin gösterdiği elde edilmiştir [11]. Hichri, Bennici ve Auroux'un yaptığı başka bir çalışmada ise mevsimsel ısı depolama için silika- alümina konak malzemeye CaCl₂, LiNO₃ ve Ba(OH)₂ olmak üzere üç farklı tuz emdirerek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Deneysel veriler her materyal için salınan ısının CaCl₂ ve LiNO₃

miktarı ile arttığını, Ba(OH)₂ emdirilmesiyle neredeyse sabit kaldığını göstermiştir. Ağırlıkça %15 CaCl₂ içeren kompozit malzemenin 738 kJ/kg değeriyle diğer malzemelerden (LiNO₃ için 609 kJ/kg ve Ba(OH)₂ için 408 kJ/kg) termokimyasal enerji depolamak için daha umut verici olduğu görülmüştür [12]. Janchen ve çalışma arkadaşları higroskopik tuzlar emdirilmiş zeolit ve silikaların ısı depolama özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Zeolit bazlı malzemelerin 810 kJ/kg ısı depolama yoğunluğuna sahipken gözeneklere tuz emdirilmesi sonucu 864 kJ/kg'lık bir ısı depolama yoğunluğuna ulaşılmıştır. Bu sonuca ek olarak tuz emdirilen yeni kompozitlerin daha düşük şarj olma sıcaklığına sahip olduklarını görmüşlerdir [13], [14]. Başka bir çalışmada %30 CaCl₂ içeren silika jel kompozitinin ısı depolama yoğunluğu 1020 kJ/ kg olarak bulunmuştur [15]. Termal enerji depolama uygulamaları için kompozit sorbentler hakkında Zhu ve arkadaşları da kapsamlı çalışmalar yapmıştır. Kompozit sorbentin emme kapasitesinin 500'den fazla tekrarlı sorpsiyon/ desorpsiyon çevrimi boyunca kararlı olduğu ve CaCl₂/ silika jel 'in ısı depolama kapasitesinin 950 kJ/ kg olduğu görülmüştür [16]. Düşük sıcaklık uygulamaları için Sapienza ve çalışma arkadaşlarının geliştirdiği LiNO₃/ vermikülit kompoziti 900 kJ/ kg ısı depolama özelliği göstererek umut verici bir materyal olduğunu kanıtlamıştır [17]. Literatürde çeşitli neme duyarlı tuzlar kullanılarak termokimyasal ısı depolama işlemi yapan çalışmalar incelendiğinde higroskopik tuzların etkin şekilde enerji depolama özelliği gösterememesinin önündeki en büyük engelin tuzları taşıyan matrisler olduğu görülmektedir. CaCl₂ ve LiNO₃ tuzlarının vermikülit içinde deşarj prosesindeki özelliklerinin analiz edildiği örnek bir çalışmanın şematik gösterimi Şekil 1.3'deki gibidir [18].



Şekil 1.3: Deşarj Prosesinde Tuz Kullanılan Örnek Sistem Şeması

Kaynak: (Sutton, R.J., Jewell E., Elvins J., Searl J.R., Jones P., 2018)

Laboratuvar sonuçları iki tuzun da deşarj çevrimi boyunca beklenen performansı gösteremediğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar bu durumun nedenini tuzların delici özelliklerinin vermikülite ve reaktöre zarar vermesi olarak yorumlamışlardır. Bu çalışmadan da anlaşılacağı gibi matrislerin geleneksel kullanımından ziyade gözenekli hale getirilmesi ve alternatif malzemelerin kullanılması sistem performansını pozitif yönde önemli ölçüde etkiler.

Isı depolama uygulamaları için tuzlarla çalışıldığında genellikle gözenekli bir yapıya ihtiyaç duyulur. Reaksiyon hızının ve verilen gücün pratikteki kullanım için yeterli olmadığı zamanlarda malzemenin daha büyük bir yüzeye yayılması gerekir [19]. Gözenekli bir malzemenin sisteme entegre edilmesi reaksiyon kinetiğini etkiler. Gözenekli yapı etkileşim yüzeyini artırır böylece ısı ve kütle transferi iyileştirilir. [20]. Bu çalışmada gözenekli yapı elde etmek amacıyla numunelerin hazırlık sürecinde bahsedilecek olan iki aşamalı anodizasyon yöntemi literatürde ciddi bir yere sahiptir. İki aşamalı anodizasyon yöntemi ilk kez 1995 yılında Masuda ve Fukada tarafından yapılan çalışmada yer almıştır [21]. Yaptıkları çalışmada gözeneklerin çok düzenli olduğunu ve düzgün, sıkı bir petek yapısını aldığını görmüşlerdir. Bu konuda yapılan araştırmalar, iki aşamalı anodizasyon yönteminin tek aşamalı anodizasyona göre daha düzenli bir oksit yapı oluşturduğunu ve ilk aşamada oluşan kusurların giderildiğini doğrulamaktadır. Ayrıca iki aşamalı anodizasyon işlemi sonucunda oluşan hücre yapılarının maksimum alan kullanımı için en iyi şekil olan altıgen gözenek şekline sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Ateş ve çalışma arkadaşları iki aşamalı anodizasyon ile nanoporoz anodik oksit alüminyum üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonuçları, iki aşamalı anodizasyon işleminin anodik alüminyum oksit yapıların en yüksek sertlik derecesine ulaşmasını ve iyi bir termal stabiliteye sahip olduklarını göstermiştir [22]. Absalan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise anodizasyon işlemini iki aşamada ve yüksek voltajda uygulamanın daha geniş ve sıralı gözenek yapısına imkan sağladığı sonucu gözlemlenmiştir [23]. Paşaoğlu'nun 2011 yılında yaptığı çalışma, birinci aşamada oluşan anodik oksit tabakanın ikinci anodizasyon basamağında %6 oranında derinleştiğini göstermektedir. Bunun çalışmanın diğer bir sonucu da anodizasyonun ikinci aşamasında anodik alüminyum oksit katmanı içindeki gözeneklerin daha iyi dağıldığı ve bal peteği formunun oldukça iyi bir biçimde korunduğudur [24]. Zaraska ve arkadaşları ise iki aşamalı anodizasyon işleminin AA1050 alüminyum alaşımı ve

saf alüminyum üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneysel alışmalar AA1050 üzerindeki anodik oksit gözenek düzeni ve dağılımının saf alüminyumdan daha kötü olduğunu göstermiştir [25].

2. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

2.1 Duyulur Isı Depolama Yöntemi

Duyulur ısı depolama, ısı depolama materyalinin sıcaklık değişiminden yararlanılarak yapılan depolama şeklidir. Isı emme işlemi boyunca depolama malzemelerinin sıcaklığı faz değişikliği görülmezsizin artar. Duyulur ısı depolama sisteminde depolanan enerji miktarı, depolama malzemesinin kütlesi, ısı kapasitesi ve depolama ortamıyla olan sıcaklık farkına bağlıdır [26]. Bir duyulur ısı depolama sisteminde katı veya sıvı depolama ortamının ısı depolama kapasitesi 2.1’de gösterilen denklemlerle hesaplanabilir [27]:

$$Q_s = m.C.\Delta T = V.\rho.C.\Delta T \quad (2.1)$$

Yukarıdaki bağıntıda yer alan m , C , ΔT , V ve ρ sırasıyla kütle, özgül ısı, maksimum ve minimum sıcaklık değeri arasındaki fark, hacim ve yoğunluktur.

Isı depolama materyali olarak hem katı hem sıvı materyaller kullanılabilir [28]. Katı depolama materyalleri gözenekli formdadır. Gözeneklerden gaz veya sıvı akışıyla ısının depolanması ve geri kazanılması sağlanır. Katı depolama ortamı olarak en çok beton, kaya, çakıl, granit gibi metal olmayan malzemeler tercih edilir. Sıvı depolama malzemesinin en büyük sorunu çok büyük depolama tankları ve pahalı ısı eşanjörleri kullanımı gerektirmesidir [29]. Bir duyulur ısı depolama sisteminde depolama ortamı boyunca termal tabakalaşma istenir. Depolama süresi boyunca tabakalaşmaya devam etmek, katı depolama malzemelerinde sıvı malzemelere kıyasla daha basittir. Duyulur ısı depolama materyalinin özgül ısısı ve ısı iletkenliği sistemin verimini etkileyen en önemli unsurdur. Bu nedenle bu malzemelerin düşük özgül ısı kapasitesine ve ısı iletkenliğe sahip olmaları kullanımları açısından ciddi engel teşkil etmektedir. Alüminyum gibi metal malzemelerin depolama materyali olarak kullanılmasındaki en önemli dezavantaj ise depolama sisteminin maliyetini arttırmasıdır.

Sıvı depolama ortamının kullanılması sistem içinde sürekli akışının sağlanabilmesi açısından avantaj sağlar. Sıvının ısıtılmasından kaynaklanan yoğunluk farkı nedeniyle depolama işlemi boyunca termal gradyen oluşumu meydana gelir. Sıcak olan sıvı sistemde yukarı doğru hareket ederken soğuk sıvı onları ayırarak aşağıya doğru hareket eder [30]. Düşük sıcaklık uygulamalarında en çok kullanılan sıvı depolama materyali sudur. Ayrıca yeraltı akiferlerinde mevsimsel ısı depolama uygulamalarında da su, depolama ortamı olarak kullanılabilir. Sıvı depolama ortamı olarak suyun kullanılması sahip olduğu özgül ısı kapasitesi nedeniyle 100 °C altındaki depolama uygulamaları için umut vaat edicidir. Aynı zamanda suyun temini ve kullanımı kolay olması, toksik olmaması ve ucuz bir malzeme olması diğer tercih edilme sebeplerindedir. En çok kullanılan katı ve sıvı duyulur ısı depolama malzemelerinin özellikleri Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Bazı Duyulur Isı Sıvı Depolama Malzemelerinin Özellikleri

Depolama Malzemesi	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı Kapasitesi (J/kg.K)	Termal İletkenlik (W/m.K)
Su	0 - 100	1000	4190	38°C için 0,63
Etilen Glikol	-	1116	2382	20°C için 0,249
Sodyum	100 - 760	960	1300	67,5
Lityum	180 – 1300	510	4190	38,1
Etanol	78°C’ye kadar	790	2400	-

Kaynak: (Adeyanju, A., 2015)

Çizelge 2.2: Bazı Duyulur Isı Katı Depolama Malzemelerinin Özellikleri

Depolama Malzemesi	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/kg.K)	Isı Kapasitesi (J/m ³ .K)	Termal İletkenlik (W/m.K)
Alüminyum	1000	896	2,4255	20°C için 204
Tuğla	1116	840	1,4263	29°C için 0,69
Beton	960	1130	2,5310	0,9 – 1,3
Granit	510	820	2,1648	1,73 – 3,98
Kumtaşı	790	710	1,5620	1,83

Kaynak: (Adeyanju, A., 2015)

Günümüzde en çok kullanılan termal enerji depolama yöntemi duyulur ısı depolama yöntemidir. Bunun nedeni depolama sistemi tasarım ve kullanımının diğer depolama yöntemlerine göre daha basit oluşudur. Bunun yanı sıra çok sayıda depolama ve geri kazanma çevriminin gerçekleşmesi sistemin en çekici özelliğidir. Ancak duyulur ısı

depolama sistemlerinde depolama hacminin büyük olması en önemli dezavantajdır. Diğer bir önemli dezavantaj ise sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma işlemlerine olanak sağlamamasıdır. Bu durumun en önemli nedeni sürekli yükselen depolama ortamı sıcaklığı nedeniyle oluşan ısı kayıplarıdır. Ayrıca ısı geri kazanım sürecinde sistemin ısıl iletkenliğinin azalması ve ısı yalıtım maliyetlerinin artması sistemin diğer dezavantajları arasındadır [31].

Bir duyulur ısı depolama sisteminin uygulanabilirliğini etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir [32];

- Sistemin termal yükleri
- Termal ve elektrik yük profilleri
- Atık veya aşırı termal enerji varlığı
- Elektrik maliyetleri
- Termal üretim ekipman tipi
- Bina veya tesisin doluluk oranı

2.2 Gizli Isı Depolama Yöntemi

Isı depolama materyalinin iç enerjisinin ciddi oranda artması malzemenin faz değiştirmesine neden olur. Gizli ısı depolama sistemlerinde enerji, faz değişimi sırasında depolanır. Sıcaklıktaki artış ile ısı depolama materyali, faz değişim sıcaklığına kadar duyulur ısı depolama materyali gibi ısı emmeye başlar, ardından materyal içindeki kimyasal bağlar kopar ve gizli ısı depolama materyali sabit sıcaklıktaki enerjiyi emerek bünyesinde depolar [33]. Gizli ısı depolama materyalinde depolanan enerji miktarı denklem 2.2'deki bağıntıyla hesaplanabilir:

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} m \cdot C_p \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} C_p \cdot dT \quad (2.2)$$

Bu bağıntıda yer alan m (kg) gizli ısı depolama materyalinin kütleini, C_p (kJ/kg.K) özgül ısı kapasitesini, T_1 (K) başlangıç sıcaklığını, T_m (K) ve T_f (K) füzyon sıcaklığını, a_m depolama materyalinin erime kesrini, Δh_m (kJ/kg) füzyon entalpisini ifade etmektedir. Denklemin ilk kısmı depolama materyalinin duyulur ısı materyali gibi davrandığı kısmı, ikinci kısmı füzyon gizli ısısının açığa çıktığı bölümü, son

kısım ise sıvı fazda gizli ısı depolama materyalinde depolanan duyulur ısıyı göstermektedir.

Depolama materyalinde katı-katı, katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar faz değişimleri gerçekleşebilir. Katı-katı faz değişimlerinde malzeme bir kristalinden diğerine geçişinde ısı depolanır. Bu faz değişimi sırasında görülen gizli ısı ve hacim değişikliği genellikle katı-sıvı faz değişiminden daha küçüktür [34]. Bu faz değişimlerinden en çok gizli ısı açığa çıkan katı-buhar ve sıvı-buhar faz değişimleridir. Ancak bu faz değişimlerinde hacim değişikliği de oldukça fazladır. Bu nedenle daha az hacim değişikliği görülüne katı-sıvı faz değişimi gerçekleşen depolama materyalleri tercih edilir.

Bir katı-sıvı faz değişimli gizli ısı depolama sisteminde faz değişimi sırasında katı-sıvı arayüzü ısı transfer yüzeyinden uzaklaşır. Bu sırada yüzeysel ısı akışı, erimiş veya katılaşmış ortamın termal direnci nedeniyle azalır. Katılaşma durumunda tek ısı transfer mekanizması termal iletkenliktir. Erime durumunda ise erime tabakasında doğal taşınım meydana gelir. Erime işlemi sırasında ısı transfer hızı katılaşma prosesine göre daha fazladır [35]. Literatürde en çok rastlanan gizli ısı depolama malzemelerinin listesi Çizelge 2.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3: Bazı Gizli Isı Depolama Malzemelerinin Özellikleri

Depolama Malzemesi	Sıcaklık Aralığı (°C)	Hal Değişim Sıcaklığı (°C)	Füzyon Isısı (kJ/kg)
Parafin	0 – 100	20 – 60	140 – 280
Tuz Hidratı	0 – 100	30 – 50	170 – 270
LiNO ₃	100 – 400	250	370
AlCl ₃	100 - 400	192	280

Kaynak: (Hasnain, S., 1997)

Gizli ısı depolama yönteminde depolanan enerji miktarı, duyulur ısı depolama yöntemine kıyasla daha fazladır. Diğer ısı depolama yöntemlerine göre sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanım için daha uygundur. Ayrıca gerekli ısı depolama hacminin daha az olması gizli ısı depolama yönteminin diğer bir avantajıdır. Ancak düşük ısı iletkenliği, tekrar şarj/deşarj döngülerinde termofiziksel özelliklerde görülen değişiklik, faz ayrımı, hacim değişikliği ve yüksek maliyet gibi nedenler pratikte karşılaşılan önemli sorunlardır [36].

2.2.1 Faz değişim malzemeleri

Faz değişim malzemeleri şarj ve deşarj dđngüleri sırasında ısıyı emme ve serbest bırakma özelliğine sahiptir. Bu malzemelerin endotermik ve ekzotermik faz değişimleri termal enerji depolama sistemlerine entegre edilerek kısa ve uzun süreli ısı depolama uygulamalarında etkili şekilde kullanılabilir [37]. Faz değişim malzemeleri sabit sıcaklıkta depolama yapabilme özellikleri nedeniyle hem ısıtma hem soğutma uygulamalarında kullanılabilir. Faz değişim malzemelerinin depoladığı enerji miktarı 2.3'deki denklemdeki gibi bulunabilir:

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} m \cdot Cp \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} Cp \cdot dT \quad (2.3)$$

Faz değişim malzemeleri organik, inorganik ve ötektik karışımlar olarak üç ana gruba ayrılır. Bu gruptaki malzemelerin birbirlerine göre ısı iletkenliği, termal kararlılık, yanma kabiliyeti, yapısal bozunma gibi özelliklerinde çeşitli farklılıklar görülür. Bu durum araştırmacıların, faz değişim malzemelerinin termal enerji depolama uygulamalarında verimli kullanılabilmesi için performans geliştirme teknikleri konusundaki çalışmalarını hızlandırmasına neden olmuştur. Faz değişim malzemelerinin türlerine göre özellikleri Çizelge 2.4, 2.5 ve 2.6'da listelenmiştir.

Çizelge 2.4: Bazı Organik Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri

Depolama Malzemesi	Erime Noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)
Formik Asit	7,8	247
Asetik Asit	16,7	273
Setil Alkol	49,3	141
Oksalat	54,3	178
Palmitik Asit	61,8	164
Balmumu	61,8	177

Kaynak: (Sharma, S., 2007)

Çizelge 2.5: Bazı İnorganik Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri

Depolama Malzemesi	Erime Noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)
H ₂ O	0	333
H ₂ SO ₄	10,4	100
NaNO ₃	310	172
NaOH	318	165
MgCl ₂ / KCl/ NaCl	380	400

Kaynak: (Sharma, S., 2007)

Çizelge 2.6: Bazı Ötektik Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri

Depolama Malzemesi	Erime Noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)
AlCl ₃ +NaCl	93	201
AlCl ₃ +NaCl+KCl	93	213
LiNO ₃ +NH ₄ NO ₃ +NaNO ₃	80,5	113
2-Amino-2-Metil-1,3 Propandiol	78	264
Trimetiloletan	81	192
Pentaeritritol (PE)	185	303

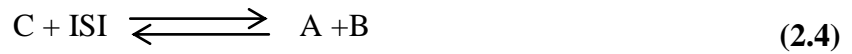
Kaynak: (Sharma, S., 2007)

Organik faz değişim malzemeleri genellikle orta ve düşük sıcaklıktaki uygulamalar için tercih edilirken, inorganik faz değişim malzemeleri yüksek sıcaklıktaki termal enerji depolama uygulamalarında kullanılır. Uygulamada kullanılacak faz değişim malzemesi seçilirken dikkat edilmesi gereken özellikler şu şekilde sıralanabilir;

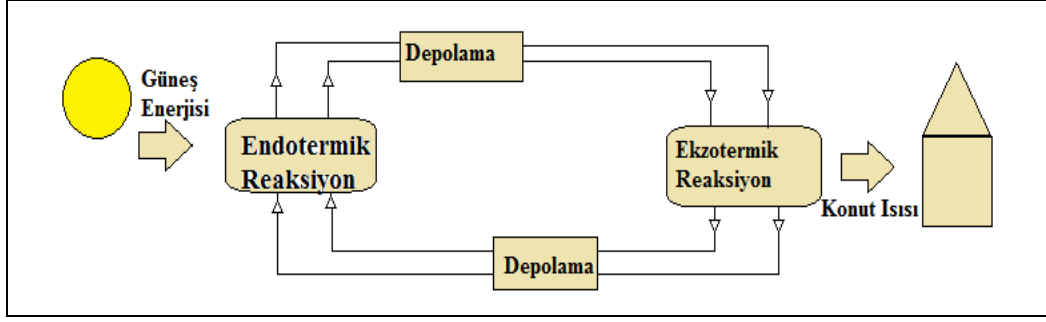
- Malzemenin erime noktası çalışma sıcaklık aralığı için uygun olmalıdır.
- Depolama hacminin küçük tutulabilmesi için malzeme yoğunluğu yüksek olmalıdır.
- Duyulur ısıyı da depolayabilmek için malzemenin özgül ısısı yüksek olmalıdır.
- Malzemenin ısı iletkenliği yüksek olmalıdır.
- Malzeme, faz değişikliği sırasında büyük hacim değişiklikleri göstermemelidir.
- Malzeme, faz ayrışması göstermemelidir.
- Malzemenin aşırı soğutma etkisi çok az olmalıdır veya hiç olmamalıdır.
- Malzemenin, faz değişimi sırasında kimyasal özellikleri değişmemelidir.
- Korozif olmamalıdır.
- Yanıcı, zehirli ve patlayıcı olmamalıdır.
- Ekonomik olmalıdır.

2.3 Termokimyasal Isı Depolama Yöntemi

Termal enerji depolama sistemleri, özellikle güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanımını açısından oldukça önemlidir. Duyulur ve gizli ısı depolama yöntemleri yoğun olarak araştırılmış ve pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak termokimyasal ısı depolama uygulamaları hala araştırma ve geliştirme sürecindedir. Termokimyasal enerji depolama sistemlerinin diğer yöntemlere oranla daha yüksek ısı depolama yoğunluğu, daha düşük depolama hacmi, düşük termal kayıplar ve düşük şarj olma sıcaklığı gibi özellikleri nedeniyle son zamanlarda ilgi odağı olmuş ve bu konuda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Ancak sistem maliyetinin fazla olması ve kurulumunun karmaşık özellikleri nedeniyle yaygın bir ısı depolama yöntemi haline gelememiştir. Termokimyasal bir ısı depolama sistemi geliştirilmesinin en önemli adımları; uygun tersinir reaksiyonun seçilmesi, reaksiyon hızının belirlenmesi, basınç ve sıcaklık gibi sistem çalışma parametrelerinin belirlenmesi ve depolama malzemesinin kinetik ve kimyasal özelliklerinin iyi bilinmesidir [38].



Termokimyasal ısı depolama sistemleri, tamamen tersinir bir kimyasal reaksiyonda moleküler bağların kırılması ve yeniden oluşmasında emilen ve salınan enerji esasına dayanır. Depolanan enerji miktarı reaksiyon entalpisine eşittir. Tersinir kimyasal reaksiyonların meydana gelmesi depolama ömrünü teorik olarak sınırsız kılar. Yukarıdaki 2.4 denkleminde gösterilen reaksiyonda C, termokimyasal malzemeyi temsil eder ve enerjiyi emerek kimyasal olarak ayrı ayrı depolanabilen A ve B bileşenlerine dönüştürülür. Tersinir ekzotermik reaksiyonda ise A ve B bileşenleri bir araya geldiğinde C maddesi oluşurken ısı açığa çıkar. Bu reaksiyon sırasında enerji serbest kalır ve termokimyasal ısı depolama sisteminde geri kazanılan termal enerjiyi ifade eder. Bu sistemin depolama kapasitesi, C maddesi olduğu zamandaki tepkimenin ısısidir. Bir termokimyasal ısı depolama döngüsünde C maddesinin ayrışması şarj prosesi, C maddesinin oluşması ise deşarj prosesi olarak adlandırılır. En yalın haliyle güneş enerjisinin kimyasal reaksiyonunu temsil eden görünüm Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.1: Güneş Enerjisinin Kimyasal Reaksiyonlarla Depolanmasının Şematik Gösterimi

Termokimyasal ısı depolama işleminde ısı, madde ile değil ortam ile değiştirilir. Depolama malzemesinin şarj olma fazında yoğunlaştırılması ve daha sonra deşarj fazında buharlaştırılması prensibine dayanır. Buharlaştırma işlemi için gerekli olan ısı konuttan sağlanabilir, böylece konut soğutulmuş olur. Ters olarak da depolama malzemesinin geçirdiği ekzotermik reaksiyon sonucu salınan ısı ile konut ısıtması yapılabilir. Termokimyasal ısı depolama bu sayede hem ısıtma hem de soğutma uygulamaları için kullanılabilir [39].

Isı enerjisinin tersinir kimyasal reaksiyonlar sonucu kimyasal enerji olarak depolanıp geri kazanımı mümkündür. Termokimyasal ısı depolama sistemleri gerçekleşen tersinir kimyasal reaksiyonlar sayesinde sistemlerin ısı enerjisini kayıp olmaksızın ortam sıcaklığında istenilen süre boyunca muhafaza etme kabiliyetine sahiptir. Termokimyasal ısı depolama sistemleri ısı üretmek için hem emilim hem de tersinir kimyasal reaksiyonları kullanır. Termokimyasal ısı depolama sistemlerinde enerji, ayrışma reaksiyonundan sonra depolanır ve kimyasal tersinir reaksiyonla geri kazanılır. Bu sayede sistem verimi oldukça yüksektir. Termokimyasal ısı depolama materyallerinin enerji depolama yoğunluğu benzer depolama hacmine göre duyulur ısı depolama materyallerinden 8-10 kat, gizli ısı depolama materyallerinden 2-3 kat daha fazladır [40]. Termokimyasal ısı depolama yönteminin bir diğer avantaj -40°C ile 200°C arasında geniş bir çalışma sıcaklığında depolama yapabilmesidir [41]. Termokimyasal ısı depolama yönteminde en çok kullanılan depolama malzemelerinin özellikleri Çizelge 2.7’de gösterilmiştir.

Termokimyasal ısı depolama sistemleri kimyasal reaksiyonlar ve emilim prosesi olarak sınıflandırılabilir. Kimyasal depolama sistemleri, ekzotermik bir reaksiyonun sonucu olarak yüksek miktarda enerji üretilen iki ayrı kimyasal maddenin tersinir reaksiyonuna dayanır.

Çizelge 2.7: Bazı Termokimyasal Isı Depolama Malzemelerinin Özellikleri

Depolama Malzemesi	Sıcaklık Aralığı (°C)	Hal Değişim Sıcaklığı (°C)	Füzyon Isısı (kJ/kg)
CaCl ₂ .H ₂ O	2100	3,06	433,6
Zeolit	650	1,07	1107
Silika Jel	600	1,13	1380

Kaynak: (Aydın, D., 2015)

Termokimyasal reaksiyon depolama sistemleri ise sorpsiyon mekanizmaları ile ilgilidir. Bir sorpsiyon sisteminde daha düşük sıcaklığa sahip bir enerji üretilir, ancak reaksiyonu başlatmak için daha düşük bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum, düşük sıcaklık uygulamaları için yalnızca kimyasal sistemler için avantajlı depolama sağlar. Sorpsiyon prosesinde emici ile sorbat arasındaki bağlanma kuvveti kimyasal potansiyel açısından kırılarak depolanır. Gerçekleşen emilim işleminin özellikleri şu şekilde sıralanabilir [42]:

- Desorpsiyon (şarj etme) prosesi için ısıya ihtiyaç vardır. Gereken ısı sorbatın (nem) buharlaşma veya yoğunlaşma ısısından daha yüksektir.
- Emici ile sorbat temasa geçene kadar sorpsiyon işlemi gerçekleşmez. Böylece sorpsiyon-desorpsiyon prosesleri arasındaki zamandan bağımsız olarak bağlanma enerjisi depolanabilir. Bu nedenle emilim prosesi duyulur ve gizli ısı depolama yöntemine göre dolaylı termal depolama yöntemi olarak adlandırılır. Bu özellik sorpsiyonel termal depolamayı güneş enerjisinin yazın depolanıp kışın ısıtma taleplerini karşılamak amacıyla kullanılmasında umut verici olduğunun göstergesidir.
- Termokimyasal ısı depolama sistemleri ile ısı ve entropi kaybı olmadan uzun süreli depolama imkanı sağlar.
- Güneş enerjisi, yaz aylarında desorpsiyon (şarj etme) ile depolanarak kışın sorpsiyon (deşarj) ile ısıtma ihtiyacı karşılanır.
- Faz değişim malzemeleri gibi ısı depolama materyalleri sadece belirli faz geçiş sıcaklıklarında kullanıma uygundur. Bu durum pratikteki uygulamalar için çalışma sıcaklık aralığı konusunda kısıtlamaya neden olur. Ancak bir sorpsiyon termal depolama sisteminin giriş ve çıkış sıcaklık seviyeleri talepler doğrultusunda belirlenebilir.

- Termokimyasal ısı depolama ile yazın soğutma (şarj) ve kışın ısıtma (deşarj) uygulamaları için de uygundur.

Sorpsiyon prosesini geliştirmek için gözenekleri matris içinde tuz barındıran kompozitler ısı depolama uygulamaları için kullanılmaya başlanmıştır. Konakçı matris (silica jel, vermikülit, alumina gibi) ve inorganik tuz (CaCl_2 , LiNO_3 , MgCl_2 , LiCl gibi) olmak üzere iki bileşenden oluşur. Tuzlar matris içindeki gözeneklere yerleştirilir. Bu sistemlerde sorbat genel sudur. Su emme işlemi iki mekanizma içerir; tuz ve su arasındaki kimyasal reaksiyon, sıvı emilimi [43], [44]. Gözenekli matris içinde tuz barındıran kompozitler artırılmış emme kapasiteleri nedeniyle oldukça umut verici bir teknoloji olarak görülmektedir. Tuz ve sorbat buharı reaksiyona girerek kompleks bir tuz-sorbat oluşumuna neden olur. Yapıda yer alan matrisin rolü oldukça önemlidir. Matris tuz parçacıklarının dağılmasına yardımcı olur, tuz emilim mekanizmasını etkiler ve tuz parçacıklarına ısı iletimini sağlar [45].

Emici malzemenin termokimyasal ısı depolama sisteminde kullanılabilmesi için sahip olması gereken özellikler şu şekilde sıralanabilir;

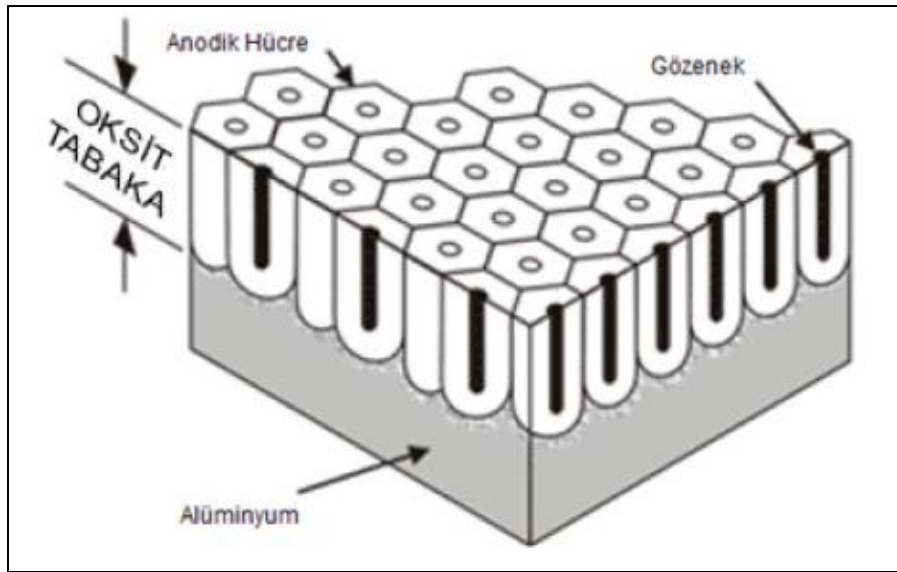
- Yüksek enerji depolama yoğunluğu
- Düşük şarj sıcaklığı
- Etkin soğurma özelliği ve hızı
- Uygun ısı ve kütle transfers özellikleri
- Yapısal bozunma göstermemesi
- Zehirli ve toksik olmaması
- Ekonomik olması

2.3.1 Anodizasyon

Alüminyum sahip olduğu yüksek mukavemet, süneklik, korozyon ve aşınma direnci gibi avantajları sayesinde pek çok uygulamada tercih edilen bir malzemedir. Alüminyumun sahip olduğu yüksek korozyon direnci doğal oksit tabakasına sahip olmasından kaynaklanır. Bu tabaka, alüminyum korozyon oluşumuna karşı korumaktadır. Ancak bu doğal oksit tabakası oldukça ince olduğu için kimyasal reaksiyonlara olan direnci düşüktür. Yüzeyde oluşan bu oksit tabakasını

kalınlaştırarak direncini arttırmayı sağlayan en önemli yöntemlerden birisi anodizasyon işlemidir [46].

Anodizasyon yöntemi ile metal yüzeyi üzerinde oksit bir tabaka oluşturmak için kontrollü oksidasyon gerçekleşir. Anodizasyon, klasik elektroliz prensibine dayanmaktadır. Sisteme akım verilmesiyle anotta oksijen salınımı başlar. Salınım oksijen anot yüzeyini kaplar. Böylece alüminyum oksit (Al_2O_3) yapısı meydana gelir [47]. Anodizasyon sonucu oluşan oksit tabaka ile alüminyum; mükemmel aşınma özelliklerine sahip, sert, korozyona dayanıklı bir kaplama ile kaplanmış olur. Anodik oksit tabakasının yapısı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



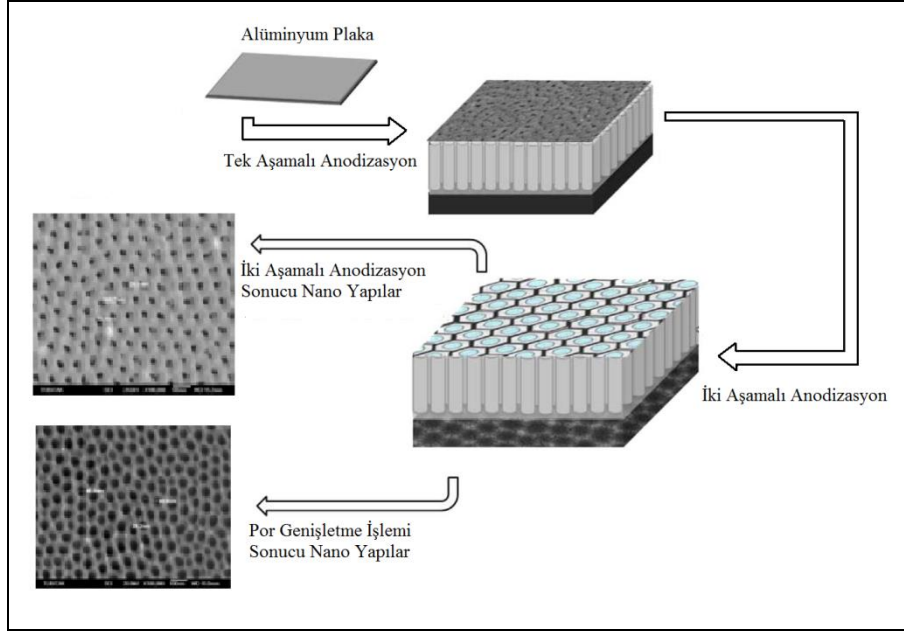
Şekil 2.2: Anodik Oksit Yapısı

Kaynak: (Alpay, N., 2009)

Anodizasyon sırasında ilk olarak sisteme gerilim uygulandığında sistemden geçen yüksek akımla birlikte saf alüminyum üzerinde düz bir oksit tabakası oluşur. Daha sonra oksit tabaka ve elektrolit ara yüzeyinde meydana gelen çatlaklar ilerleyen zamanlarda por oluşumuna neden olur [48]. Gözenekli alüminyum oksit tabakası, düzenli gözenek dağılımı ve yüksek gözenek yoğunluğu gibi olumlu özellikleri sayesinde tuz emdirme çalışması için oldukça uygun ve güvenilirdir.

Son zamanlarda anodizasyon sonucu oluşan birbirine yakın şekilde yüzey alanında oluşan küçük çaplı porlar ön plana çıkmaya başlamıştır. Anodik reaksiyonlar sonucu oluşan bu porlu yapının gözenek çapı, boşluk mesafesi, gözenek yoğunluğu ve oksit tabakasının kalınlığı gibi parametreleri; elektrolit tipi, anotlama potansiyeli, akım yoğunluğu, hücre içinde bulunan çözeltinin sıcaklığını ve derişim oranı ve işlem

süresi gibi koşulların ayarlanmasıyla kolayca kontrol edilebilir. Anodizasyon aşamalarına göre meydana gelen yapıların gösterimi Şekil 2.3’de yer almaktadır.



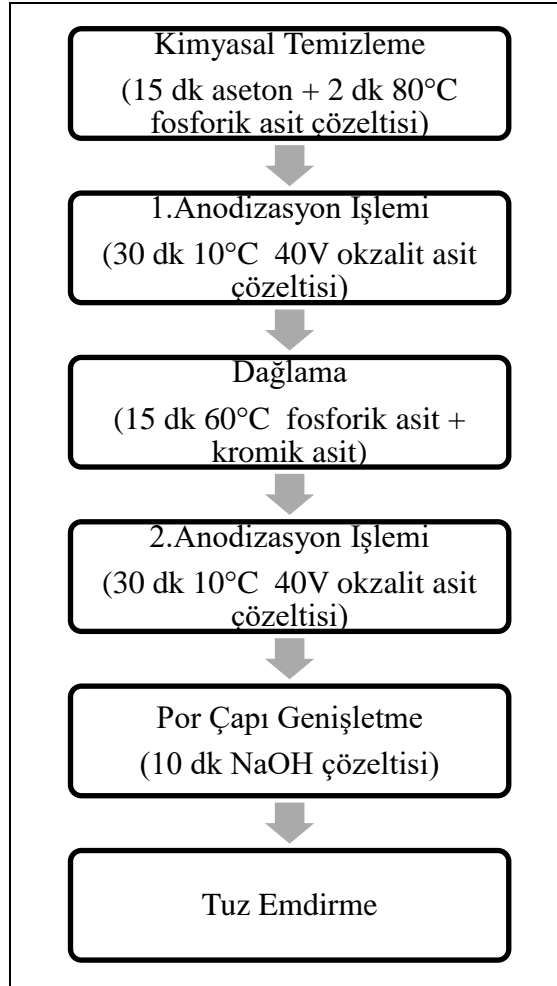
Şekil 2.3: Tek ve İki Aşamalı Anodizasyon Proseslerinin Şematik Gösterimi

Anodizasyon işleminden önce alüminyum malzeme muhakkak çok iyi temizlenmelidir. Malzeme, yüzeyindeki yağlar, kirler ve özellikle su kalıntılarında iyice arındırılmalıdır. Yüzeydeki çizik vb. kusurlardan kurtulmak, homojen bir yüzey yapısı elde etmek için temizleme işleminden sonar aşındırma işlemi uygulanır. Aşındırma işlemi genel olarak bir çözeltisi içinde gerçekleştirilir. Zaman, sıcaklık, asit çözeltisinin konsantrasyonu gibi parametreler malzemenin son haldeki özelliklerini etkiler [49].

3. DENEYSEL

3.1 Numune Hazırlama

Bu çalışmada termokimyasal ısı depolama sisteminde kullanılmak üzere %99,99 saflıkta ve 10 cm x14 cm boyutlarındaki alüminyum plakalardan anodik alüminyum oksit numuneler hazırlanmıştır. Proseslerin hazırlık aşamaları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Numune Hazırlama İşlem Akış Şeması

Alüminyum plakalar ilk aşamada kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem için öncelikle asetona daldırılarak 15 dakika boyunca ultrasonik titreşim cihazında tutulmuştur. Daha sonra 80 °C’ye ısıtılmış fosforik asit çözeltisinde 2

dakika bekletilmiştir. Yüzey temizleme ve cilalama işlemi biten numuneler anodizasyonun ilk aşaması için hazır hale gelmiştir. 10°C sıcaklığa sahip oksalit asit çözeltisine sahip hücreye anot olarak yerleştirilen numuneler, katot olarak seçilen paslanmaz çeliğe paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Anodizasyon prosesi 30 dakika boyunca 40V gerilim koşullarında gerçekleştirilmiştir.

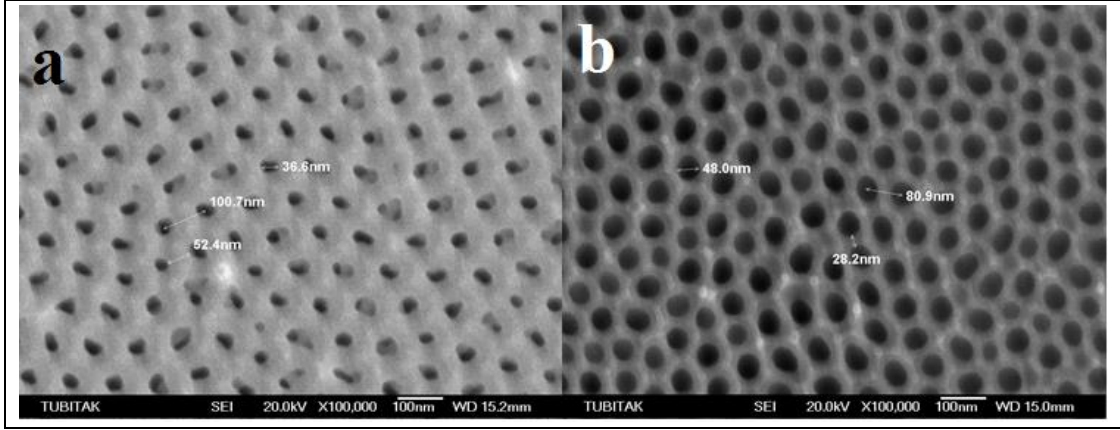
1.aşama anodizasyon işlemiyle oluşmaya başlayan porların ana yapılarının incelenmesi için saf sudan geçirilen numunelere, önceden 60°C'ye ısıtılmış deoksidasyon çözeltisinde 15 dakika bekletilerek dağlama prosesi yapılmıştır. İşlem sonunda yüzeydeki çözelti fazlalığı saf suyla giderilerek numune 2.aşama anodizasyon işlemi için tekrar hücreye alınır. Dağlama prosesi gerçekleşirken hücre içindeki oksalit asit çözeltisi yenilenir. 2.aşama anodizasyon işlemi 1.aşamadaki gibi 30 dakika boyunca 40V'da gerçekleşir.

Bu çalışmada enerji depolama işlemi gerçekleştirilmesi amacıyla seçilen tuz çözeltilerinin taşıyıcı bir matrise ihtiyaçları vardır. Taşıyıcı matris 2 aşamalı anodizasyon prosesi sonucunda alüminyum numunelerde meydana gelen poroz yapılarıdır. Tuzlar, poroz yapılar sayesinde alüminyum plakalar içinde zarar görmeden tersinir reaksiyonlar geçirebilir. Tuz emiliminin kontrollü gerçekleştirilmesi amacıyla 2 aşamalı anodizasyon işlemi büyük önem taşımaktadır.

Tuz emdirme işleminden önce anodizasyon prosesi tamamlanan numuneler 10 dakika boyunca NaOH çözeltisinde bekletilerek porların genişletilmesi sağlanır. Bu şekilde hazırlanan taşıyıcı matrisler literatürde sıkça rastlanırlara göre daha yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip olması amaçlanmıştır. Çözeltiye bırakılan numuneler ve çözelti sonrası meydana gelen yapı değişikliği Şekil 3.2 ve 3.3'de yer almaktadır.



Şekil 3.2: NaOH Çözeltisine Yatırılmış Numuneler



a: 2 Aşamalı anodizasyon sonrası por çapı 25 nm, b: 10 dk NaOH çözeltisi sonrası por çapı 45 nm)

Şekil 3.3: Por Genişletme İşlemi Öncesi ve Sonrası Por Çapları

Depolama materyali olarak seçilen CaCl_2 , LiCl , LiNO_3 ve MgCl_2 tuzları neme duyarlı olmaları sebebiyle su buharı ile ekzotermik reaksiyon sonucunda ısı meydana getirir. Bu nedenle yukarıda belirtilen tuzlar literatür incelemesinde de açıklandığı gibi sistem için en uygun adaylar olarak görülmektedir. Seçilen tuzların aşağıda belirtilen oranlarda hazırlanan çözeltilerine por genişletme işleminden geçmiş numuneler daldırılarak $110\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 48 saat boyunca etüvde bırakılmıştır. Numunelere emprenye edilen tuzlar ve oranları Çizelge 3.1’de listelenmiştir.

Çizelge 3.1: Emprenye Edilen Tuzlar ve Oranları

Tuzlar	Oran (g/ ml)
CaCl_2	75 g / 100 ml
LiCl	84 g / 100 ml
LiNO_3	70 g / 100 ml
MgCl_2	55 g / 100 ml

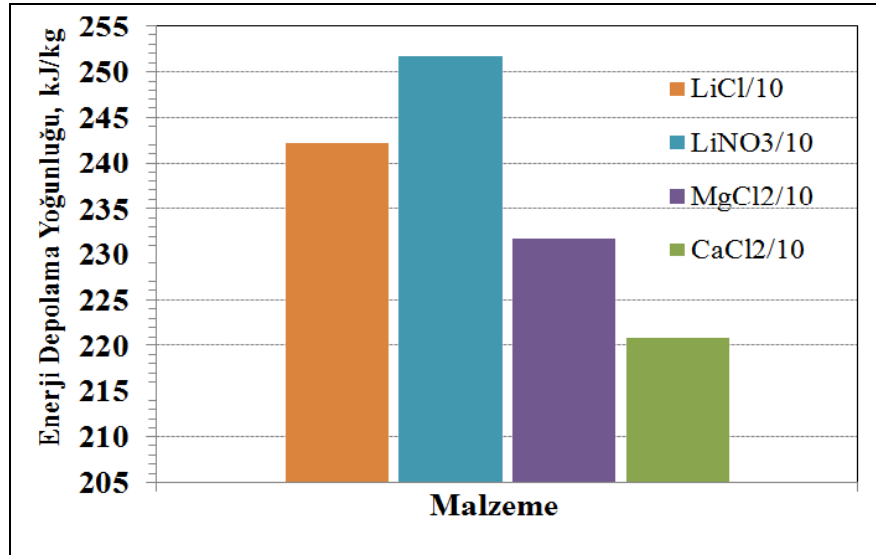
Tuz emprenye edilmiş numuneler proje kapsamında hazırlanan prototipe alınmadan önce termokimyasal ısı depolama için en önemli özelliklerden biri olan enerji depolama yoğunluğuna (E_d) bakılmalıdır. Enerji depolama yoğunluğu erimiş tuz çalışmaları yapılan termal enerji depolama uygulamalarında kapasiteyi ve verimi belirleyen temel özelliklerden biridir. Erime noktası, ısı kapasitesi ve yoğunluğu bilinen bir maddenin termal enerji depolama yoğunluğu denklem 3.1’deki gibi hesaplanabilir [50].

$$E = C_p \cdot \rho \cdot (T - T_m) \quad (3.1)$$

Burada C_p ve ρ sırasıyla T çalışma sıcaklığında malzemeye ait ısı kapasitesi ve yoğunluğu, T_m ise malzemenin erime sıcaklığını temsil eder.

Enerji yoğunluğu bir sistemde birim hacim başına saklanan enerji miktarıdır. Elde edilebilir veya kullanılabilir enerji şeklinde de ifade edilebilir [51]. Bu çalışmada enerji depolama yoğunluğunu belirlemek amacıyla DSC (Differential Scanning Calorimetry) kullanılmıştır. 48 saat sonunda etüvden alınan tuz emprenye edilmiş numunelerin DSC analizleri yapılmıştır. Buna göre numunelerin özgül ısı kapasitesi (C_p) DSC analiz sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Özgül ısı kapasitesi denklem 3.2’de yer alan bağıntıyla hesaplanabilir:

$$C_p = \Delta Q / (m \cdot \Delta T) \quad (3.2)$$



Şekil 3.4: Tuz Emprenye Edilen Numunelerin Enerji Depolama Yoğunlukları

Grafik 3.1’de numunelerin enerji depolama yoğunlukları gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucunda en yüksek enerji depolama yoğunluğunu 252 kJ/kg ile LiNO_3 ve en düşük enerji depolama yoğunluğunu 221 kJ/kg ile CaCl_2 tuzu göstermiştir. Bu sonuçlara göre LiNO_3 tuzu emprenye edilmiş numuneler hazırlanan prototipte kullanılmaya karar verilmiştir. Numunelerin kullanıma hazır hali Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

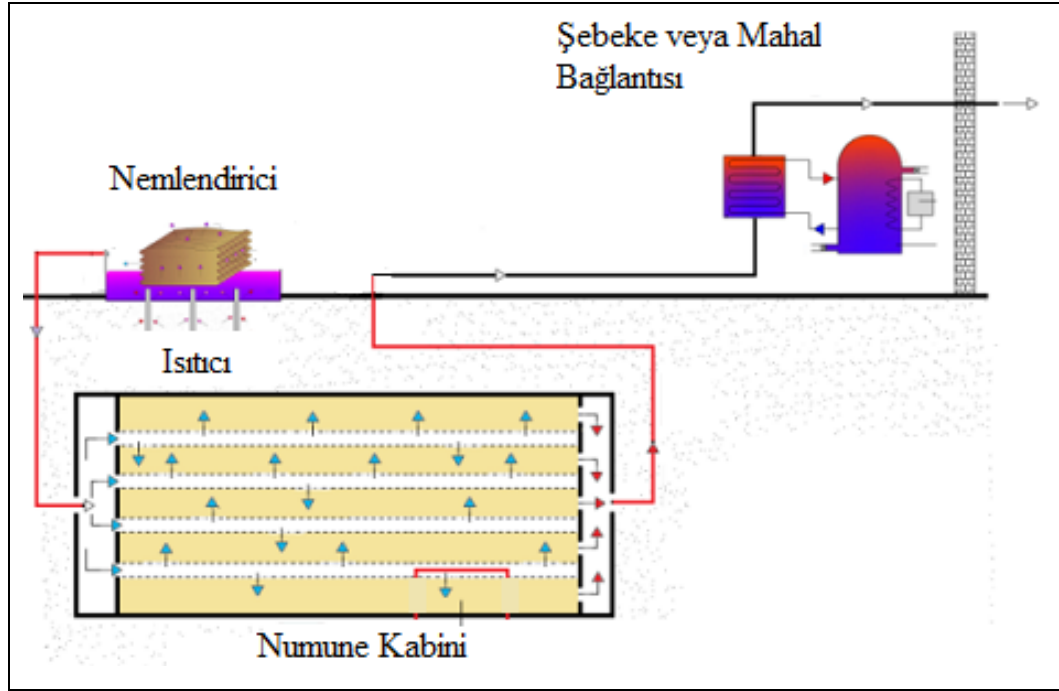


Şekil 3.5: LiNO₃ Emprenye Edilmiş Alüminyum Numunelerin Prototip Kabinine Yerleştirilmesi

3.2 Sistem ve Yapısı

Bu çalışmada yer alan termokimyasal ısı depolama sistemi, güneş enerjisinin geliştirilen yeni bir kompozit malzeme yardımıyla uzun veya kısa dönem depolanmasını amaçlamaktadır. Sistemin temel çalışma prensibi şarj ve deşarj proseslerine dayanmaktadır. Deşarj prosesi; nemli havanın absorbe edilmesi ve oluşan ısının havaya transfer edilmesi esasına dayanmaktadır. Nemlendirici ünitesinde nemi arttırılan havanın, sorbent malzemesi üzerinden homojen akışı sağlanır. Bu sırada havadaki nemi kompozit sorbente emprenye edilmiş tuzlar tarafından absorbe edilmesi ile ısı oluşumu sağlanır. Çıkan sıcak ve kuru hava mahal veya sıcak su ısıtmasında kullanılabilir. Şarj prosesinde ise nemli havanın sahip olduğu ısının malzemeye taşınması ve buharlaşan nemi havaya olan transferi söz konusudur. Reaktöre girmeden önce kuru hava ısıtılır, malzeme tarafından emilen nem havaya serbest bırakılarak desorbe olur. Homojen olarak dağıtılan sıcak havaki nem ısı etkisiyle sorbent malzemedan ayrışır. Nemi alınmış sorbent malzeme bir

sonraki deşarj çevrimine kadar hazır halde bekler. Sistemin genel çalışma prensibini gösteren şema Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6: Sistem Şeması

Şarj prosesinde desorbe olan bileşene adsorbat adı verilir. Diğer bileşeni adsorbe edebilen (emebilen) malzemeye ise adsorban (emici) denir. Bu çalışmada, adsorban malzeme olarak su (buhar), sorbent olarak ise higroskopik tuz emprenye edilmiş gözenekli alüminyum oksit kompoziti kullanılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında üretilen kompozit numunelerin test edileceği prototip hazırlanmıştır. 120°C'ye kadar çalışma olanağı sağlayan bir sistem tasarlanmış ve kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen prototipin genel yapısı şekilde gösterildiği gibidir. Termal depolama sistemi; nemlendirici, ısıtıcı, fanlar, ısı ve sıcaklık sensörleri, numune kabini ve termometreden oluşmaktadır. Sistem prototipinde yer alan elemanlar ve yerleşim düzeni Şekil 3.7'de yer almaktadır.



a:Nemlendirici,
b:Isıtıcı,
c:Fan,

d:Sıcaklık ve Nem Sensörü,
e:Numune Kabini,
f:Sıcaklık ve Nem Sensörü)

Şekil 3.7: Sistem Prototipi ve Bileşenleri

3.2.1 Nemlendirici

Nemlendirme ünitesi, deşarj prosesi başlangıcında oda şartlarında bulunan havanın %80-90 oranında bağıl neme ulaşmasını sağlayarak alüminyum folyo kaplı bağlantı elemanları aracılığıyla giriş havasını sisteme gönderir. Nemlendirme prosesi izotermal olarak gerçekleşir. Bu sayede sistem ve çevre arasında ısı kaybı yaşanmadan havanın nemlendirilmesi sağlanmış olur. Şarj prosesi sırasında sistemin nemlendirici ünitesiyle olan bağlantısı kesilir. Kullanılan 3,78 L'lik ultrasonik nemlendirici sistemin %30- %95 bağıl nem aralığında çalışmasına olanak sağlayan bir cihazdır. Kullanılan nemlendirme cihazı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8: Nemlendirme Ünitesi

3.2.2 Isıtıcı ve sensörler

Şarj prosesi sırasında nemlendirici bağlantısı kesilerek numuneler tarafından emilen nemin desorbe edilebilmesi için çalışma havasının ısıtılması ısıtıcı yardımıyla yapılmıştır. Manuel olarak istenilen sıcaklığa ayarlanabilen ısıtıcının sıcaklık kontrolü, numune kabının giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen sensörler ve termometre yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sensörlerin bağlı olduğu yazılım programı sayesinde datalar bilgisayar ortamına aktarılarak system çalışma süresi boyunca görülen sıcaklık değişimi kaydedilmiştir. Sistemde yer alan ısıtıcı ve sensor cihazları Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Isıtıcı (Sol), Isı ve Nem Sensörü (Sağ)

3.2.3 Numune kabini

Şarj ve deşarj döngüleri için test edilecek olan numuneler, tuz emdirme ve kurutma işlemlerinin ardından prototipte özel olarak hazırlanmış kabin içine dizilmiştir. Kabin içine birbirine paralel olacak şekilde 0,4 mm kalınlığında misina yerleştirilmiş ve numuneler misina üstüne asılmıştır. Test edilecek numunelerin yer aldığı kabin ve numune dizilimi Şekil 3.10'daki gibidir. Termal kayıpları önlemek amacıyla kabin içi ve prototip üzerindeki bağlantı elemanları yalıtım elemanları ile kaplanmıştır.

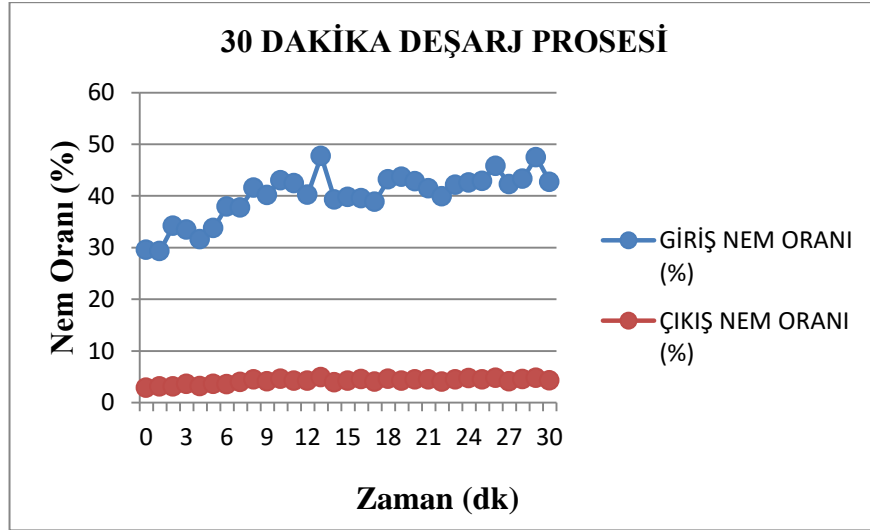


Şekil 3.10: Numune Kabini

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Prototip üzerindeki deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir: 1) 8 adet numuneye deşarj prosesi için 30 dakika nemlendirme ve şarj prosesi için 90 dakika ısıtma uygulanması, 2) 8 adet numuneye deşarj prosesi için 60 dakika nemlendirme ve şarj prosesi için 60 dakika ısıtma uygulanması.

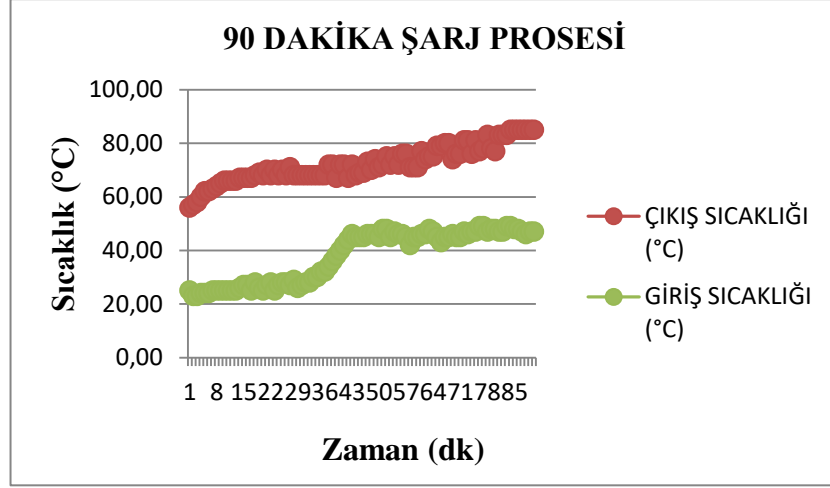
Başlangıçta numuneler kabine yerleştirildikten sonra deşarj prosesi için 30 dakika boyunca sadece nemlendirici ünitesi aktifleştirilmiştir. Bu sayede hazırlanan kompozitlerin neme doyması sağlanmıştır. Deşarj prosesi boyunca kabin içindeki numunelerin giriş ve çıkış nem oranları Grafik 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Aşama 30 Dakika Deşarj Prosesi

30 dakikalık deşarj prosesi boyunca ölçülen en yüksek giriş nem oranı %47,73, en düşük çıkış nem oranı %2,89 ve en yüksek giriş-çıkış nem oranı farkı %42,81’dir. Proses boyunca ölçülen ortalama giriş-çıkış nem oranı %35,87’dir.

Daha sonra kabin ve nemlendirici bağlantısı kesilerek şarj prosesi için 1 saat boyunca ısıtıcı çalıştırılmaya başlanmıştır. Isıtıcı üzerindeki değer manuel olarak 90°C’ye ayarlanmıştır. 90 dakikalık şarj prosesi boyunca meydana gelen sıcaklık değişimi Grafik 4.2’de gösterilmiştir.

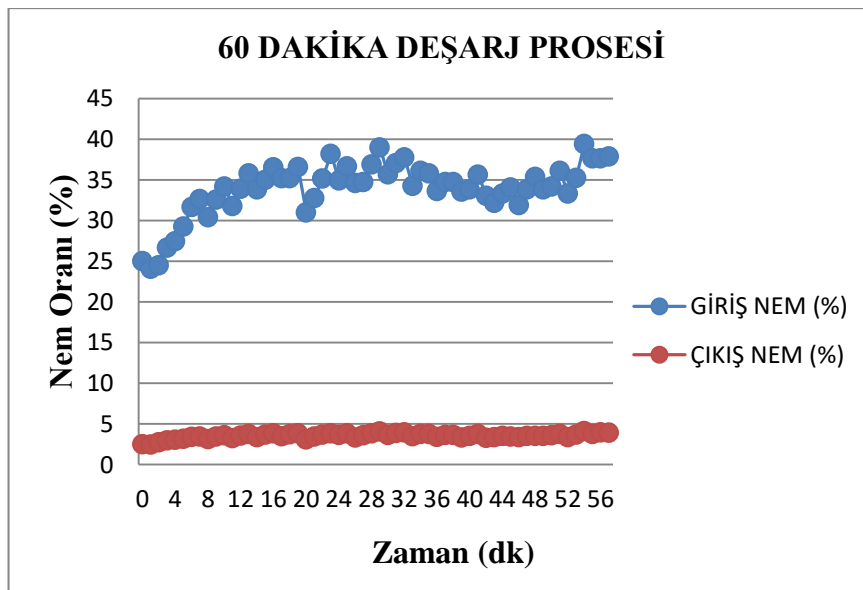


Şekil 4.2: Aşama 90 Dakika Şarj Prosesi

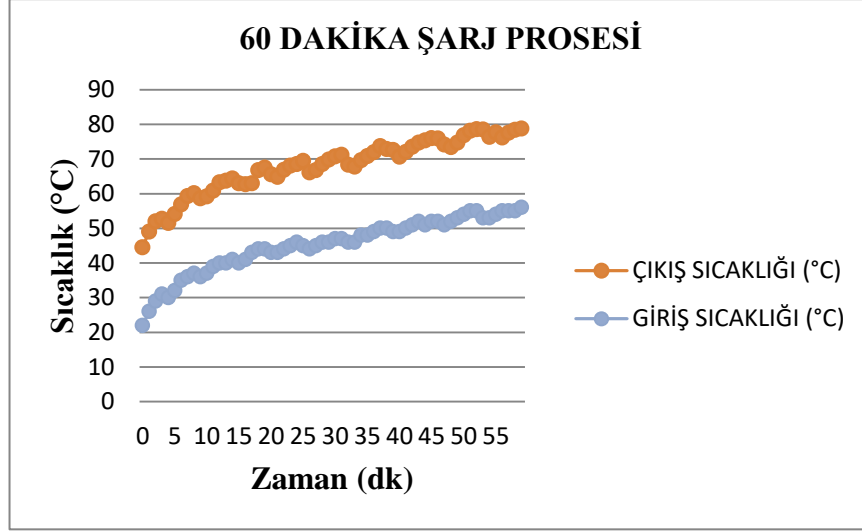
90 dakikalık şarj prosesi boyunca ölçülen en yüksek çıkış sıcaklığı 85°C, en yüksek giriş-çıkış sıcaklık farkı 45°C ve ortalama giriş-çıkış sıcaklık farkı 34,31°C'dir.

1.aşama sonunda deşarj prosesi boyunca reaktördeki çıkış nem oranının azaldığı görülmektedir. Bu durum kabin içindeki numunelerin sisteme verilen nemi emdiğini göstermektedir.

Deneysel çalışmanın 2.aşamasında 8 adet numune prototipe yerleştirilmiş ve deşarj prosesi için 60 dakika boyunca nemlendirici çalıştırılmaya başlanmıştır. Ardından 1.aşamada olduğu gibi nemlendirici bağlantısı kesilerek ısıtıcı 90°C'ye ayarlanmış ve 60 dakikalık şarj prosesine başlanmıştır. 2.aşamada numunelerde meydana gelen değişim Grafik 4.3 ve Grafik 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: 2. Aşama 60 Dakika Deşarj Prosesi



Şekil 4.4: 2. Aşama 60 Dakika Şarj Prosesi

60 dakikalık deşarj prosesi boyunca ölçülen en yüksek giriş nem oranı %39,42, en düşük çıkış nem oranı %2,48 ve en yüksek giriş-çıkış nem oranı farkı %35,3'dür. Proses boyunca ölçülen ortalama giriş-çıkış nem oranı %30,56'dır. 60 dakikalık şarj prosesi boyunca ise ölçülen en yüksek çıkış sıcaklığı 78,78°C, en yüksek giriş-çıkış sıcaklık farkı 25,51°C ve ortalama giriş-çıkış sıcaklık farkı 28,74°C'dir.

Deneylerin her iki aşamasında da deşarj prosesi boyunca kabin içindeki nem oranının arttığı ve numunelerde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda nem oranının zirve değerine ulaştığı görülmüştür. Ancak zaman geçtikçe numunelerin nem emme hızı azaldığı ve bu durumun numunelerin nem emme oranının küçük bir oranda yavaşlamasına neden olduğu kaydedilmiştir. Bu yavaşlamanın bir sonucu olarak şarj prosesi boyunca sıcaklığın zaman zaman düştüğü gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada termokimyasal ısı depolama sistemleri için geliştirilen yeni bir kompozit malzemenin performansı incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı geliştirilen kompozit malzemeye, analizler sonucunda en iyi performansı gösteren higroskopik tuzun emprenye edilmesiyle elde edilen numunelerin çalışma kapsamında yapılan prototip üzerinde termokimyasal enerji depolama uygulamaları için farklı çalışma koşullarında uygunluğunu araştırmaktır. Çalışma sonundaki genel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Geliştirilen yeni kompozit malzeme, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında geleneksel depolama materyallerinden (vermikülit, silika jel, zeolit vb.) daha iyi sonuç vermiştir.
- 30 ve 60 dakika olarak iki farklı koşulda gerçekleştirilen deşarj proseslerinde giriş-çıkış nem oranı farkı sırasıyla %35,87 ve %35,3 ölçülmüştür. Bu durum nemlendirme süresinin arttırılmasının numunelerin absorbe edebildiği nem oranı üzerinde çok etkisi olmadığını göstermektedir. Ancak numune boyutları göz önünde bulundurulduğunda bu değerlerin termokimyasal ısı depolama uygulamaları açısından oldukça umut verici olduğu söylenebilir.
- 90 ve 60 dakikalık şarj proseslerinde en yüksek çıkış sıcaklıkları sırasıyla 85°C ve 79°C olduğu görülmüştür. Sonuçlar doğrultusunda en iyi şarj olma çalışma şartının 60 dakikalık ısıtma işlemi olduğu ortaya çıkmıştır.
- Çalışma kapsamında özel olarak hazırlanan prototipin, konutlarda istenilen bölgeye (çatı, bodrum, yeraltı) yerleştirilebilir olması ve çalışma parametreleri değiştirilerek hem uzun hem kısa dönem enerji depolamaya imkan sağlaması gelecek uygulamalar için oldukça umut verici olduğunu göstermiştir.
- Tasarlanan yeni sistem geniş kullanım alanine sahip, çevre kirliliğine ve artan enerji ihtiyacını karşı çözüm olabilecek sürdürülebilir bir enerji teknolojisidir.
- Yeni sistemde geliştirilen tasarım sayesinde geleneksel yöntemlere oranla sorpsiyon prosesinin verimi ısı ve kütle transferi iyileştirilerek arttırılmıştır.

- Geliştirilen yeni ısı depolama malzemesi uzun vadede endüstriyel atık ısılarından yararlanmak üzere sistemlere entegre edilebilir ve fotovoltaik panelleri de kullanarak enerji verimliliğini üst düzeylere çıkarabilir.
- Çalışma kapsamında geliştirilen yenilikçi depolama sisteminin gelecekte plakalara emdirilen tuz miktarının artırılması ve bu bağlamda oluşturulan por çaplarının genişletilmesi, sistemde depolama görevi gören tuz emdirilmiş kompozit malzeme sayısının artırılması ya da boyutlarının büyütülmesi gibi konularda tekrar analiz edilmesi ve verimliliğinin artırılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Lefebvre, D. ve Tezel, F. (2017). A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **67**, 116-125.
- [2] Uzun, M. (2010). Güneş enerjisi depolama olanakları ve bir yöntemin değerlendirilmesi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- [3] Lakshmi, D. V. N., Layek, A. ve Kumar, P. (2017). Performance analysis of trapezoidal corrugated solar air heater with sensible heat storage material, *Energy Procedia*, **109**, 463-470.
- [4] Günerhan H. ve Hepbaşlı, A. (2007). Exergetic modeling and performance evaluation of solar water heating system for building applications, *Energy and Buildings*, **39**, 509-516.
- [5] Singh H., Saini R.P. ve Saini J.S. (2010). A review on packed bed solar energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 1059-1069.
- [6] Benli H. ve Durmuş, A. (2009). Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating , *Solar Energy*, **83**, 2109-2119.
- [7] Hasse C., Grenet M., Bontemps A., Dendievel R. ve Sallee, H. (2011). Realization, test and modeling of honeycomb wallboards containing a phase change material, *Energy and Buildings*, **43**, 232-238.
- [8] Cardenas B. ve Leon N. (2013). High Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Phase Change Materials, Design Considerations and Performance Enhancement Techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**, 724-737.
- [9] Brancato V., Gordeeva L., Sapienza A., Palomba V., Vasta S., Grekova A., Frazzica A. ve Aristov, Y. (2018). Experimental characterization of the LiCl/vermiculite composite for sorption heat storage applications, *International Journal of Refrigeration*, **000**, 1-9.
- [10] Zhang Y. N., Wang R. Z. ve Li, T. X. (2018). Thermochemical characterization of high-stable alumina/LiCl composites with multistage sorption process for thermal storage, *Energy*, **156**, 240-249.
- [11] Hichri A., Bennici S. ve Auroux, A. (2017). CaCl₂-containing composites as thermochemical heat storage material, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **172**, 177-185.

- [12] Hichri A., Bennici S. ve Auroux, A. (2015). Enhancing the heat storage density of silica-alumina by addition of hygroscopic salts (CaCl_2 , $\text{Ba}(\text{OH})_2$, and LiNO_3), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **140**, 351-360.
- [13] Janchen J., Ackermann D., Stach H. ve Brösicke W. (2004). Studies of The Water Adsorption on Zeolites and Modified Mesoporous Materials for Seasonal Storage of Solar Heat, *Solar Energy*, **76**, 339-344.
- [14] Janchen J., Ackermann D., Stach H. ve Brösicke W. (2005). Calorimetric Investigation on Zeolites, AlPO_4 's and CaCl_2 Impregnated Attapulgitite for Thermochemical Storage of Heat, *Thermochimica Acta*, **434**, 37-41.
- [15] Wu H., Wang S. ve Zhu D. (2007). Effects of Impregnating Variables on Dynamic Sorption Characteristics and Storage Properties of Composite Sorbent for Solar Heat Storage, *Solar Energy*, **81**, 864-871.
- [16] Zhu D., Wu H. ve Wang S. (2006). Experimental Study on Composite Silica Gel Supported CaCl_2 Sorbent for Low Grade Heat Storage, *International Journal of Thermal Sciences*, **45**, 804-813.
- [17] Sapienza A., Glaznev I. S., Santamaria S., Freni A. ve Aristov Y.I. (2012). Adsorption Chilling Driven by Low Temperature Heat: New Adsorbent and Cycle Optimization, *Applied Thermal Engineering*, **32**, 141-146.
- [18] Sutton R.J., Jewell E., Elvins J., Searl J.L. ve Jones P. (2018). Characterising the Discharge Cycle of CaCl_2 and LiNO_3 Hydrated Salts Within A Vermiculite Composite Scaffold for Thermochemical Storage, *Energy and Buildings*, **162**, 109-120.
- [19] N'Tsoukpoe K.E., Liu H., Pierres N.L. ve Luo L. (2009). A Review on Long-Term Sorption Solar Energy Storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 2385-2396.
- [20] Sole A., Fontanet X., Barreneche C., Fernandez A.I., Morterell I. ve Cabeza L.F. (2013). Requirements to Consider When Choosing A Thermochemical Material for Solar Energy Storage, *Solar Energy*, **97**, 398-404.
- [21] Masuda H. ve Fukuda K. (1995). Ordered Metal Nanohole Arrays Made by A Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodized Alumina, *Science*, **268**, 1466-1468.
- [22] Ateş S., Baran E. ve Yazıcı B. (2018). The Nanoporous Anodic Alumina Oxide Formed by Two-Step Anodization, *Thin Solid Film*, **648**, 94-102.
- [23] Absalan G., Bargezar S., Moradi M. ve Behaein S. (2017). Fabricating Al_2O_3 -Nanopores Array by An Ultrahigh Voltage Two-Step Anodization Technique: Investigating the Effect of Voltage Rate and Al Foil Thickness on Geometry and Ordering of the Array, *Materials Chemistry and Physics*, **199**, 265-271.
- [24] Paşaoğlu D.I. (2011). Electrodeposition and Characterization of Ni-W Nanowires on Anodized Aluminum Oxide Template, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [25] **Zaraska L., Sulka G.D., Szeremeta J. ve Jaskula M.** (2010). Porous Anodic Alumina Formed by Anodization of Aluminum Alloy (AA1050) and High Purity Aluminum, *Electrochimica Acta*, **55**, 4377-4386.
- [26] **Abedin A. ve Rosen, M.** (2011). A critical review of thermochemical energy storage systems, *The Open Renewable Energy Journal*, **4**, 42-46.
- [27] **Adeyanju A.** (2015). Thermal energy storage techniques, *Sci-Afric Journal of Scientific Issues, Research and Essays*, **3(5)**, 726-736.
- [28] **Konuklu, Y.** (2008). Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [29] **Rao C., Niyas H. ve Muthukumar, P.** (2018). Performance tests on lab-scale heat storage prototype, *Applied Thermal Engineering*, **129**, 953-967.
- [30] **Gil A., Medrano M., Martorell I., Lazaro A., Dolado P. ve Zalba B.** (2010). State of The Art on High Temperature Thermal Energy Storage for Power Generation. Part 1- Concepts, Materials and Modelling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 34-55.
- [31] **Öztürk, H.** (2015). Isı enerjisi depolama, ISBN:978-605-5100-46-9
- [32] **Dinçer, İ., Dost, S. ve Li, X.** (1997). Performance analyses of sensible heat storage systems for thermal applications, *International Journal of Energy Research*, **21**, 1157-1171.
- [33] **Reddy, K. S. , Mudgal, V. ve Mallick, T. K.** (2018). Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management, *Journal of Energy Storage*, **15**, 205-227.
- [34] **Sharma, S. D. ve Sagara K.** (2007). Latent heat storage material and systems: a review, *International Journal of Green Energy*, **2:1**, 1-56.
- [35] **Velraj, R., Seeniraj R. V., Hafner B., Faber C. ve Schwarzer K.** (1999). Heat transfer enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy*, **65**, 171-180.
- [36] **Medved D., Kvakovsky M. ve Sklenarova V.** (2010). Latent heat storage systems, *Intensive Programme "Renewable Energy Sources"*, UVB, CZ
- [37] **Nazir, H., Batool, M., Osorio F., Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin. ve Kannan, A.** (2019). Recent developments in phase change material for energy storage applications: a review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **129**, 491-523.
- [38] **Pardo P., Deydier A., Anxionnaz-Minvielle Z., Rouge S., Cabassud M. ve Cognet P.** (2014). A Review on High Temperature Thermochemical Heat Energy Storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **32**, 591-610.
- [39] **Bales C., Kerskes H., Van essen M. ve Weber R.** (2008). Final Report of Subtask B'Chemical and Sorption Storage': Report B₇ of Subtask B, A Report of IEA Solar Heating and Cooling Programme, **32**.
- [40] **Aydın, D., Casey, S. ve Riffat, S.** (2015). The latest advancements on thermochemical heat storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **41**, 356-367.

- [41] **Abedin A.H. ve Rosen M.A.** (2011). A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems, *The Open Renewable Energy Journal*, **4**, 42-46.
- [42] **Yu N., Wang R.Z. ve Wang L.W.** (2013). Sorption Thermal Storage for Solar Energy, *Progress in Energy and Combustion Science*, **39**, 489-514.
- [43] **Aristov Y.I.** (2007). New Family of Solid Sorbents for Adsorptive Cooling: Material Scientist Approach, *Journal of Engineering Thermophysics*, **16**, 63-72.
- [44] **Gordeeva L.G., Grekova A.D., Krieger T.A. ve Aristov Y.I.** (2009). Adsorption Properties of Composite Material (LiCl+LiBr)/silica, *Microporous and Mesoporous Material*, **126**, 262-267.
- [45] **Gordeeva L.G. ve Aristov Y.I.** (2012). Composites ‘Salt Inside Porous Matrix’ for Adsorption Heat Transformation: A Current State-of-The-Art and New Trends, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, **7**, 288-302.
- [46] **Şişmanoğlu, T.** (2009). Anodik oksidasyon yöntemiyle 2024, 6082 ve 7075 kalite aluminium alaşımlarının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [47] **Alpay, N.** (2009). Farklı ön işlemlerinin aluminium anodizasyon üzerine etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [48] **Karahasanoğlu C.** (2009). Nikel Nanotellerin Üretimi ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [49] **Bales C., Kerskes H., Van essen M. ve Weber R.** (2008). Final Report of Subtask B ‘Chemical and Sorption Storage’: Report B₇ of Subtask B, *A Report of IEA Solar Heating and Cooling Programme*, **32**.
- [50] **Villalpando, M.D., Neelameggham N.R., Guillen, D.P., Pati, S., Krumdick, G.K.** (2012). Energy Technology: Carbon Dioxide Management and Other Technologies, *ISBN: 978-118-138-2*
- [51] **NIST Guide To The SI**, (2009). The Two Classes of SI Units and The SI Prefixes.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Elif YILDIZ
Doğum Tarihi ve Yeri: 26/ 08/ 1993 - İstanbul
E-posta : elf.yldz@windowslive.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2020, İstanbul Gedik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı