



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN NANO KARBON KÜRELER
İLE ENKAPSÜLE EDİLMESİ VE BATARYA TERMAL YÖNETİM
SİSTEMLERİ İÇİN POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI**

VEDAT EMİN AYAZ

DANIŞMAN

DOÇ. DR. MAHİR GÜLEN

BARTIN-2025



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN NANO KARBON KÜRELER İLE
ENKAPSÜLE EDİLMESİ VE BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ
İÇİN POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Vedat Emin AYAZ

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN- 2025

KABUL VE ONAY

Vedat Emin AYAZ tarafından hazırlanan “FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN NANO KARBON KÜRELER İLE ENKAPSÜLE EDİLMESİ VE BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, 08.04.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Mahir GÜLEN danışmanlığında hazırlamış olduğum “FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN NANO KARBON KÜRELER İLE ENKAPSÜLE EDİLMESİ VE BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı Yüksek Lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

08.04.2025

Vedat Emin AYAZ

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bana değerli bilgiler aktaran ve her konuda bilgi ve desteğini eksik etmeyen, beni teşvik ederek yönlendiren saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Mahir GÜLEN'e teşekkür ederim.

Laboratuvar bilgilerini özveri ile aktaran ve bilgi birikimlerini benimle paylaşan, tezimin aşamalarında yardımlarını esirgemeyen saygı değer Dr. Öğr. Üyesi Hamza DÜNYA ve birçok alanda gelişimime destek olan sayın Doç. Dr. Recep TAŞ'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tezimde çalışmalarımı tamamlama aşamalarında yanımda olan ve BİÇABA programıyla eğitim hayatıma katkı sağlayan TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme burs programına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca büyük özveriyle beni destekleyen her zaman yanımda olan babam Murat AYAZ, annem Habibe AYAZ, kardeşlerim Enes Faruk AYAZ, Bedirhan AYAZ, Ertuğrul AYAZ ve nişanlım Elif GÖL'e teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarında benim yanımda olan, bilgilerini paylaşan ve deney aşamalarında beni destekleyen çalışma arkadaşlarım Abdurrahman OBAİD, Abdurrazzak HANNAN ve Ebru KÖROĞLU'na teşekkürlerimi sunuyorum.

Laboratuvarda bulunan tüm olanakları benimle paylaşan, tezimin analiz aşamasında bana yardımcı olan Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yer alan hocalarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Vedat Emin AYAZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN NANO KARBON KÜRELER İLE ENKAPSÜLE EDİLMESİ VE BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Vedat Emin AYZ

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahir GÜLEN

Bartın- 2025, sayfa: 55

Bataryaların ticari kullanımının başlamasıyla birlikte taşınabilir cihazlar, elektrikli araçlar ve sanayi gibi alanlarda enerji verimliliğinin önemi giderek artmaktadır. Batarya sistemlerinde ticari olarak yaygın kullanılan batarya türü Lityum İyon bataryalardır (LIB'ler). Fakat bataryaların kullanımı sırasında, batarya paketlerinin optimum sıcaklık değerleri dışına sapması hem bataryanın ömrünün azalmasına hem de termal kaçaklara sebep olmaktadır. Bu güvenlik riski ve enerji depolama verimliliğinin azalması ile sonuçlanmaktadır. Bunun üstesinden gelebilmek için termal yönetim sistemleri (TYS) geliştirilmektedir. TYS'ler karmaşık ekipman ve ekstra enerji gerektiren aktif ve FDM bazlı olan pasif olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Kurulum ve bakım maliyeti düşük etkinliği yüksek olmasından dolayı FDM esaslı TYS'ler son dönemlerde ilgi çekici hale gelmiştir.

Tez çalışmasında, 60 nm çapa sahip içi boş ve mezogözenekli olarak sentezlenen karbon kürelerle ilk defa faz değiştiren malzeme (FDM) ile yüklenerek nano-kapsüller üretilmiştir. Yüksek termal iletkenliği, mukavemeti ve kimyasal kararlılığı sebebi ile kabuk malzeme olarak karbon seçilirken, bataryaların ideal çalışma sıcaklığı (42 °C) göz önünde bulundurulduğunda, erime sıcaklığı 34-36 °C arasında ve gizli ısı kapasitesinin (ΔH) yüksek olmasından dolayı RT35HC FDM olarak seçilmiştir. Üretilen malzemelerin fiziksel ve

termal karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından, karbon küre kabukların yüksek saflıkta (%99,8), 60 nm çapında, aktif yüzey alanının 1990.663 m²/g ve toplam gözenek hacminin 7,628 cc/g olduğu, FDM'nin karbon kabuklara homojen bir şekilde %70 oranında yüklendiği, üretilen nano-kapsüllerin ΔH değerinin 163,8 j/g olduğu, termal kararlılığının yüksek olduğu ($T_{onset} = 150$ °C), 70 °C'de sızıntı oranının sadece %1,4 olduğu ve FDM'nin termal iletkenlik değerinin 0,197 W/mK'den 0,532 W/mK'ye iyileştirildiği rapor edilmiştir. Ayrıca, Elastisite modülü ve Sertlik değerlerinin sırasıyla, 1,03-1,5 GPa ve 23,6-39,1 MPa aralıklarında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, RT35HC/Karbon küre yapılı nano-kapsüllerin özellikle LIB'lerin termal yönetim sisteminde ve bunun yanı sıra akıllı termal yalıtım, atık ısı geri kazanımı, yenilenebilir enerji entegrasyonu, tarım ve gıda saklama gibi birçok termal enerji depolama uygulamalarında kullanımının uygun olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Batarya paketi, batarya termal yönetim sistemi, faz değiştiren malzemeler, termal enerji depolama

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ENCAPSULATION OF PHASE CHANGE MATERIALS WITH NANO CARBON SPHERES AND INVESTIGATION OF THEIR POTENTIAL FOR BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS

Vedat Emin AYAZ

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mahir GÜLEN

Bartın-2025, pp: 55

The increasing commercialization of battery technologies has heightened the importance of energy efficiency in portable devices, electric vehicles, and industrial applications. Lithium-ion batteries (LIBs) currently dominate the commercial battery market. However, operational temperature deviations from optimal ranges (typically around 42°C) in battery packs lead to reduced cycle life and potential thermal runaway events, resulting in safety hazards and diminished energy storage efficiency. To address these challenges, thermal management systems (TMS) have been developed, which are categorized into active (requiring complex equipment and auxiliary energy) and passive (phase change material-based) systems. Due to their low installation/maintenance costs and high effectiveness, PCM-based TMS have recently gained significant research attention.

In the thesis study, nano-capsules were produced by loading phase change material (FDM) with hollow and mesoporous carbon spheres with a diameter of 60 nm for the first time. While carbon was selected as the shell material due to its high thermal conductivity, strength and chemical stability, considering the ideal operating temperature of the batteries (42 °C), RT35HC FDM was selected due to its melting temperature being between 34-36 °C and its high latent heat capacity (ΔH). Physical and thermal characterizations of the produced materials were carried out. From the analysis results, it was reported that the carbon sphere

shells were of high purity (99.8%), 60 nm in diameter, active surface area was 1990.663 m²/g and total pore volume was 7.628 cc/g, PCM was loaded homogeneously to the carbon shells at a rate of 70%, ΔH value of the produced nanocapsules was 163,8 j/g thermal stability was high (Tonset = 150 0C), leakage rate was only 1.4% at 70 0C and thermal conductivity value of PCM was improved from 0.197 W/mK to 0.532 W/mK. In addition, it was determined that the elasticity modulus and hardness values were in the ranges of 1.03-1.5 GPa and 23.6-39.1 MPa, respectively. The results obtained show that RT35HC/Carbon sphere structured nano-capsules are suitable for use especially in the thermal management system of LIBs as well as in many thermal energy storage applications such as smart thermal insulation, waste heat recovery, renewable energy integration, agriculture and food storage.

Keywords: Battery pack, battery thermal management system, phase change materials, thermal energy storage

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Batarya Termal Yönetim Sistemleri	3
1.1.1.Sıvı Soğutma Sistemi.....	4
1.1.2.Hava Soğutma Sistemi	5
1.1.3.ısı Borusu Soğutma Sistemi	6
1.1.4.FDM Esaslı Termal Yönetim Sistemi.....	7
1.1.4.1.İnorganik FDM.....	8
1.1.4.2.Organik FDM	8
1.2.Enerji Depolama Sistemlerinde Gizli ısı ve Duyulur ısı	9
1.3.Faz Değıştiren Malzemelerinin Kullanım Alanları	10
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	11
3.MATERYAL METOT	17
3.1.Materyal.....	17
3.2.Kullanılan Analiz Cihazları	18
3.2.1.X-Işını Difraktometresi (XRD)	18
3.2.2.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	18
3.2.3.Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)	19
3.2.4.Yüzey Alanı Ölçüm Analizi (BET)	20
3.2.5.Termogravimetrik Analiz ve Kızıl Ötesi Spektrometre (TGA ve FTIR)...	20
3.2.6.Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)	21
3.2.7.Termal İletkenlik Ölçümü.....	21
3.2.8.Nanoindentasyon Testi	22
3.3.Deneysel Süreçler	23

3.3.1.SiO ₂ Küre Sentezi	23
3.3.2.Karbon Küre Kabukların İçerisine RT35HC'nin Kapsüllenmesi	26
3.3.3.Sızdırmazlık Testi	27
4.BULGULAR VE TARTIŞMA	28
4.1.Üretilen Malzemelerin Fiziksel Analizi.....	28
4.2.Sentezlenen Nano-kapsüllerin Termal Analizi.....	34
4.3.Nano-kapsüllerin Sızdırmazlık Testi	38
4.4.Sentezlenen Nano-kapsüllerin Nano-mekanik Analizi.....	39
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Sıvı soğutma sistemi (Deng vd., 2018b)	5
1.2: Hava soğutma sistemi (Xin vd., 2023).....	6
1.3: Isı borusu ile soğutma sistemi tasarımı (Smith vd., 2018).....	7
1.4: FDM Çeşitleri (Patel ve Rathod, 2020).....	8
3.1: XRD analiz cihazı	18
3.2: SEM analiz cihazı.....	19
3.3: Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)	19
3.4: BET analiz cihazı	20
3.5: TGA ve FTIR analiz cihazları.....	21
3.6: DSC analiz cihazı.....	21
3.7: Termal İletkenlik ölçüm cihazı	22
3.8: Nano-mekanik test cihazı.....	23
3.9: Deneysel metodun şematik gösterimi	24
3.10: Ara ürün olan SiO ₂ @RF/CTAB'ın toz formu.....	24
3.11: Yakma işlemi için kullanılan fırın.....	25
3.12: SiO ₂ @C numunesi	25
3.13: Karbon küre kabukların dijital görüntüsü	26
3.14: a) BKNK ile RT35HC'nin agat havanla karıştırılması b) Nano-kapsüllerin (BKNK/RT35HC) dijital görüntüsü	27
3.15: Sızıntı test düzeneği	27
4.1: Ara ürün ve karbon küre kabukların (BKNK) XRD desenleri.....	28
4.2: a) ve d) SiO ₂ RF@CTAB'ın, b) ve e) SiO ₂ @C, c) ve f) karbon küre kabukların SEM göründüleri ve EDX verileri.....	30
4.3: Karbon küre kabukların a) izoterm eğrisi ve b) Gözenek boyutu dağılım grafiği	32
4.4: Saf RT35HC, karbon küre kabukların ve nano-kapsüllerin FT-IR eğrileri	33
4.5: a) karbon küre kabukların, b), c) ve d) nano-kapsüllerin farklı büyütmelelerde alınan TEM görüntüleri.....	34
4.6: Nano-kapsüllerin TGA eğrileri	36
4.7: Üretilen nano-kapsüllerin DSC analizi	38
4.8: Üretilen nano-kapsüllerin farklı kuvvetler altında ölçülen kuvvet-derinlik eğrileri	40

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: BTYS'lerin karşılaştırması (Murali vd., 2021)	4
1.2: Yağ asitlerinin özellikleri	9
2.1: Parafin RT35HC özellikleri	16
3.1: Deney için kullanılan materyaller	17



SİMGELER DİZİNİ

°C	: Derece
nm	: Nanometre
mL	: Mililitre
µg	: Mikrogram
µL	: Mikrolitre
mg	: Miligram



KISALTMALAR DİZİNİ

FDM	: Faz Değiştiren Malzemeler
TYS	: Termal Yönetim Sistemi
LIB	: Lityum İyon Bataryalar
CTAB	: Hekzadesiltrimetilamonyum Bromür
TEOS	: Tetraetilortosilikat
HF	: Hidroflorik Asit
C	: Karbon
BTYS	: Batarya Termal Yönetim Sistemi
BKNK	: Boşluklu Karbon Nano Küre
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termal Gravimetrik Analiz
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
HR-TEM	: Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu
DSC	: Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi
BET	: Brunauer-Emmett-Teller
BJH	: Barrett, Joyner ve Halenda
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

1. GİRİŞ

Enerji, modern dünyada toplumsal ve ekonomik gelişimin yapı taşlarından biridir. Teknolojinin gelişim gösterdiği koşullarda enerjiye olan ihtiyaç artmaktadır. Nüfusun artması ve sanayileşme gibi teknolojik ilerlemeler enerjiye olan talebi arttırmaktadır. Bu artan talep beraberinde enerji üretimi konusunda gelişime sebep olmaktadır. Enerji üretim yöntemi olarak kullanılan fosil yakıtlar zaman içerisinde araştırmacıları alternatif enerji elde etme yöntemleri geliştirmeye yöneltmektedir. Bunun sebebi fosil yakıtların zaman içinde azalması ve çevreye verdikleri zarar olarak belirlenmektedir. Bu dezavantajlar fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına geçilmesini zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, gelgit ve jeotermal enerji olarak sınıflandırılmaktadır .(Halkos vd, 2020). Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli olarak kendini yenileme, çevreye zarar vermeme, sürdürülebilir ve temiz enerji üretimi gibi avantajları bu alanda araştırmaları arttırmaktadır (Zhang vd., 2024). Yenilenebilir enerji sistemlerinin dezavantajları olarak sürekli ve sabit enerji üretimi yapmaması olarak sıralanabilir (Öymen, 2020). Bu sebeple, enerji depolama birimlerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji depolama birimleri, enerji üretim sistemlerinde sürdürülebilirliği ve enerji verimliliğini arttıran en önemli etkidir. Enerji depolama birimleri, üretilen fazla enerjiyi bünyesinde saklayarak ihtiyaç duyulan zamanda kimyasal reaksiyon gerçekleştirerek enerjinin kullanımını sağlamaktadır. Enerji depolama birimlerinde en yaygın kullanılan sistem, kimyasal enerji depolama birimi olan bataryalardır. Bataryalar elektrikli araçlarda, taşınabilir aletlerde, ev aletlerinde ve yüksek enerji gerektiren sanayi ortamlarında kullanılmaktadır. Bataryalar enerjiye ihtiyaç duyulması halinde devreye girer ve enerji ihtiyacını karşılar. Ticari olarak kullanılan en yaygın bataryalar lityum iyon bataryalardır (LIB'ler).

Bataryalar içerisinde bulundurduğu anot ve katot yapıları kullanarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Anot ve katot arasında bir ayırıcı ve iyonların hareket edebilmesi için elektrolit malzeme bulunmaktadır. Bataryanın enerji depolama kapasitesi, iyonların hareketine ve elektron sayılarına bağlı olarak değişmektedir (Borah vd., 2020). Batarya çeşitlerinden biri olan LIB'ler yüksek güç ve enerji yoğunluğuyla enerji depolama sistemi olarak ilgi çekmektedir. Ayrıca LIB'ler mükemmel depolama yetenekleri, uzun çevrim ömrü ve hafızasız şarj özelliklerine sahiptir (Maiorino vd., 2024). Özellikle, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek güç yoğunluğu gibi özelliklerinden dolayı elektrikli araç

(EV) ve hibrit elektrikli araçlarda (HEVs) LIB'ler tercih edilmektedir. Zhang ve arkadaşları LIB'lerin EV'ler için uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yapmışlardır. Araç sektöründe LIB'lerin uygulanabilmesi için güvenlik, maliyet ve enerji verimliliği gibi konular dikkate alınması gerektiğini ortaya atmışlardır (X. Zhang vd., 2022). Bunun yanında, bu tip enerji depolama sistemlerinin kullanımı sırasında ortam sıcaklığının çok düşük veya çok yüksek olması LIB'lerde büyük sorunlara sebebiyet vermektedir. Söz konusu bu problemlerin üstesinden gelebilmek için birçok araştırma geliştirme çalışması yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir (Elalfy vd., 2024). Daha da önemlisi, bataryanın şarj/deşarj süreçleri sırasında büyük miktarda ısı açığa çıkmaktadır. Bu durum bataryanın yüzeyindeki sıcaklığın artmasına neden olur ve bu da bataryanın daha yüksek sıcaklara çıkmasına neden olarak termal kaçaqlara sebep olmaktadır (Chidambaranathan vd., 2020). Ayrıca, teorik araştırmalar, batarya sıcaklığı çok yüksek olduğunda, batarya tarafındaki tepkimelerin hızlanacağını ve bataryaların performansının ve ömrünün zayıflayacağını, hatta bataryanın termal kaçağın yanında güvenlik kazasıyla sonuçlanacağını ortaya koymaktadır (Richard ve Dahn, 1999). Diğer taraftan, batarya sıcaklığı çok düşük olduğunda, bataryanın açığa çıkardığı güç ve kapasite önemli ölçüde azalacak, bu da batarya kapasitesinin geri döndürülemez şekilde azalmasına yol açacak ve bunun sonucunda potansiyel bir güvenlik tehlikesi oluşturacaktır (S. S. Zhang vd., 2003). Batarya sıcaklığı kritik sıcaklık değerini aştığında, bataryanın şarj vedeşarj karakteristikleri ciddi bir şekilde bozulabilir (Kizilel vd. Batarya sıcaklığı 50 °C'nin üzerine çıktığında, batarya verimliliğinin ve kullanım ömrünün azalma hızı belirgin şekilde artar (Sato ve Yagi, 2000). Aşırı ısınmanın yanı sıra, düşük sıcaklıklarda çalışırken lityum-iyon hücrelerinin enerji ve güç kapasiteleri de önemli ölçüde düşer (Shiao vd., 2000). Bu nedenle, şarj vedeşarj işlemi 15–35 °C aralığındaki uygun bir sıcaklıkta gerçekleştirilmelidir. Aynı zamanda, batarya modülü içindeki sıcaklık farkı, her bir batarya hücresinin enerji dengesini etkileyebilir ve sıcaklık düzensizliği, bataryalar arasında iç tüketime yol açarak batarya paketinin ömrünü ve kararlılığını azaltabilir, hatta güvenliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Batarya paketi içindeki maksimum sıcaklık farkının 5 °C'nin altında tutulması önerilmektedir (Park ve Jaura, 2003). Bu yüzden, batarya paketinin ortam koşullarına uyum sağlayarak optimum sıcaklık seviyesinde çalışma koşullarının oluşturulması gerekmektedir. Bu yüzden, LIB paketinin termal kaçak oluşumundan ileri gelen zararlar nedeniyle LIB'lerin uygulanabilirliği kısıtlanmaktadır. Batarya paketinin özellikle yüksek enerji ve güç yoğunluğu gerektiren uygulamalarda verimli ve uzun ömürlü çalışabilmesi için sıcaklık aralığının optimum seviyede tutulması

gerekmektedir. Bu kapsamda, batarya paketinin ortam koşullarında verimli ve güvenilir çalışabilmesi için Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS) geliştirilmiştir (Murali vd., 2021). BTYS'ler batarya paketine entegre edilerek hücre içerisinde sıcaklığın eşit dağıtılmasını ve bataryanın kullanım ömrünün ve veriminin arttırılmasında kilit rolü oynamaktadır (Liu vd., 2017).

BTYS'ler, sıvı soğutmaya, hava soğutmaya, ısı borusu soğutmaya ve faz değiştiren (FDM) malzemeye dayalı olarak tasarlanmaktadır. Bu soğutma sistemlerinin verimliliği, kullanılabilirliği, batarya paketine uygulanabilirliği ve kullanılan malzemelerin çalışmaları detaylı olarak sunulmaktadır (Deng vd., 2018). BTYS'de kullanılan soğutma sistemleri arasında, FDM ile soğutma sisteminin uygulanabilirliği, uygun maliyet, kullanım ömrü, entegrasyon ve bakım kolaylığı araştırmacılar tarafından ilgi görmektedir (Murali vd., 2021). Uygun faz değişim sıcaklığı, yüksek gizli ısı depolama kapasitesi sağlamak için büyük erime entalpisi, daha hızlı şarj deşarj işlemleri için termal iletkenlik, kararlı termal kimyasal özellikler, yanıcı ve toksik olmayan malzemeler ve faz değişim esnasında ihmal edilebilir hacim değişimi FDM seçiminde ele alınan kriterlerdir. Bu kapsamda uygun FDM seçilmektedir.

1.1. Batarya Termal Yönetim Sistemleri

BTYS'ler en genel şekliyle, aktif soğutma sistemleri sıvı soğutma ve hava soğutma olarak sınıflandırılırken pasif soğutma sistemleri ise kılcal boru soğutma ve FDM soğutma sistemi olarak sınıflandırılmaktadır (Lu vd., 2020). BTYS tasarımında dikkat edilmesi gereken özellikler olarak basit yapıya sahip olması, maliyetinin düşük olması, enerji tüketiminin uygun olması, hafif ve batarya paketine uyumlu olması dikkat edilecek parametrelerdir. BTYS sistemlerinin avantaj ve dezavantajları açısından değerlendirilmesi Tablo 1.1'de sunulmuştur. Tablo 1.1 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, FDM esaslı soğutma sisteminin uygulanabilirlik, entegrasyon, sıcaklık dağılımı, ömür ve maliyet gibi parametreler açısından değerlendirildiğinde diğer soğutma sistemlerinden üstünlükleri olduğu açıkça görülmektedir (Murali vd., 2021). Bu noktada, ekstra enerji tüketmeyen FDM'lerin kullanımı, günümüzde LIB'lerin sıcaklığını düşürmek, kontrol etmek ve ardından enerji depolama performansını arttırmak için en güvenilir araç olarak öne çıkmaktadır (Souayfane vd., 2016).

Tablo 1.1: BTYS’lerin karşılaştırması (Murali vd., 2021)

Soğutma Türü Özellik	Hava Soğutma	Sıvı Soğutma	Isı Borusu	FDM Soğutma
Uygulanabilirlik	Kolay	Zor	Orta	Kolay
Entegrasyon	Kolay	Zor	Orta	Kolay
Sıcaklık Dağılımı	Dengesiz	Eşit	Orta	Eşit
Bakım	Kolay	Zor	Orta	Kolay
Ömrü	Uzun	Kısa	Uzun	Uzun
Maliyet	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta

1.1.1. Sıvı Soğutma Sistemi

Sıvı soğutmalı termal yönetim sistemleri, özellikle yüksek güç gerektiren uygulamalarda (elektrikli araçlar, veri merkezleri, endüstriyel ekipmanlar vb.) etkili bir şekilde ısıyı dağıtmak ve sıcaklık kontrolü sağlamak için kullanılır. Sıvı soğutmalı sistemler, ısıyı emmek ve taşımak için bir soğutucu sıvı (genellikle su, glikol-su karışımı veya özel soğutma sıvıları) kullanır. Sıvı soğutma sistem yapı örneği şekil 1.1’de verilmektedir. Temel çalışma prensibi şu adımlardan oluşur:

i) Isı Emilimi: Sıvı, sıcak bileşenler (örneğin, batarya hücreleri veya işlemciler) ile temas ederek ısıyı emer.

ii) Isı Taşınımı: Isınan sıvı, bir pompa vasıtasıyla soğutucuya (radyatör veya ısı eşanjörü) taşınır.

iii) Isı Atımı: Soğutucu, sıvıdan emilen ısıyı ortama (genellikle havaya) aktarır.

iv) Soğutulmuş Sıvının Geri Dönüşü: Soğutulan sıvı, tekrar sıcak bileşenlere gönderilerek döngüyü tamamlar.

BTYS sistemlerinde sıvı soğutma sistemi, diğer soğutma sistemleri ile karşılaştırıldığında yüksek kapasite ve yüksek verimliliğe sahip olduğu söylenebilir (Deng vd., 2018b). Ancak,

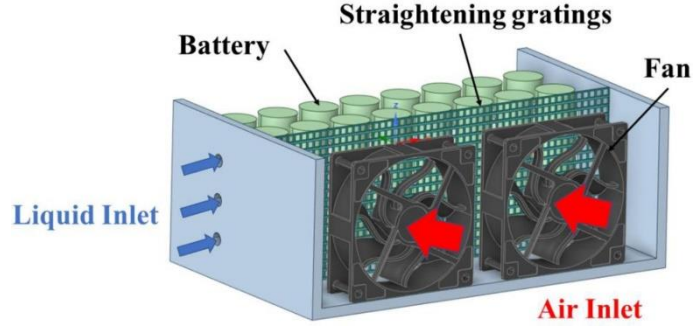
sıvı soğutma sistemlerinin kılcal boru, pompa vb. karmaşık ekipmanlara ihtiyaç duyması, sistemin bakım ve onarım maliyetlerinin yüksek olması, sıvı sızıntı riskinin bulunması ve kısa süreli periyodik bakım gerekliliğinin olması gibi dezavantajlara sahiptir.



Şekil 1.1: Sıvı soğutma sistemi (Deng vd., 2018b)

1.1.2. Hava Soğutma Sistemi

Hava soğutma sistemi nispeten basit yapısı ve maliyetinin düşük olması soğutma sistemleri arasında çokça tercih edilmektedir. Özellikle düşük ve orta güç gerektiren sistemlerin termal kontrolünde tercih edilmektedir. Hava soğutma sistemi, ısınan batarya paketine havayı üfleyerek veya yönlendirerek bataryayı istenilen sıcaklık aralığında tutmaya çalışarak termal yönetimi sağlar. Hava soğutma, fan kullanılmadan doğal olarak kullanıldığında pasif soğutma, fan veya hava üretici kullanıldığında ise aktif soğutma sistemi olarak sınıflandırılmaktadır (Xin vd., 2023). Aktif soğutma sistem tasarımı şekil 1.2’de verilmektedir. Şarj deşarj oranları düşük olduğunda fana ihtiyaç duyulmaz ve sıcaklık doğal hava taşınımı ile istenilen oranlara getirilmesi mümkün olabilir. Bu kapsamda basınçlı hava üretimine gerek duyulmaz. Fakat şarj deşarj oranının artması durumunda fan kullanılarak aktif soğutma yapılır. Ancak, sıvı soğutmaya göre hava soğutmanın verimi ve ısı transfer hızı nispeten düşüktür (Menak vd., 2021). Ayrıca, ısı transferinin düşük olmasından ısı taşıma kapasitesi düşük, sistemde kullanılan fanların gürültülü çalışması, sıcaklık dağılımının homojen olmaması ve ortam şartlarından (ortam sıcaklığı ve hava akışı) çok fazla etkilenmesi gibi dezavantajları bulunmaktadır.

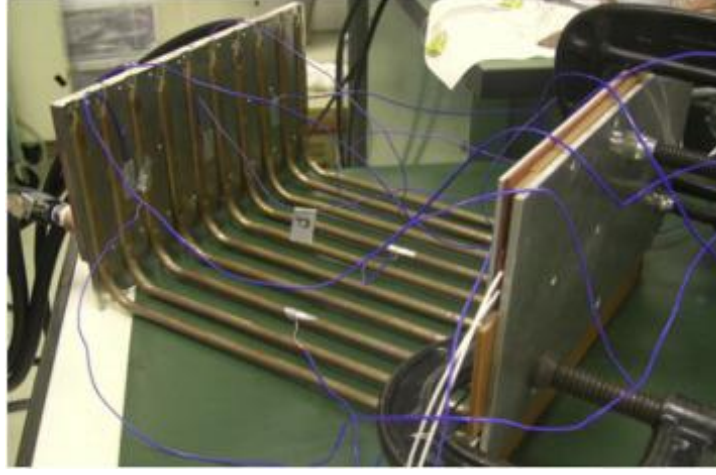


Şekil 1.2: Hava soğutma sistemi (Xin vd., 2023)

1.1.3. Borusu Soğutma Sistemi

Isı borusu ile batarya soğutma sistemleri, yüksek verimli ısı transfer sistemleri olması nedeniyle tercih edilmektedir. Isı borusu ile soğutma sistemi bataryayı hızlı ve etkin bir şekilde soğutması beklenir. Isı borularının içerisinde buharlaşma ve yoğunlaşma yoluyla ısı, boru içerisinde eşit bir şekilde çalışma sıvısı kullanarak taşınım yapar. Isı kaynağı tarafından üretilen ısı, ısı borusu çeperlerini kullanarak çalışma sıvısına iletilir. Çalışma sıvısı daha sonra faz değiştirerek sıvı halden gaz hale geçiş yapar. Buhar ısı borusu içerisinde iletilir ve batarya soğutma işlemi gerçekleşir. Bu işlem sonunda buhar yoğunlaşarak tekrar sıvı hale gelir ve döngü tamamlanmış olur (Weragoda vd., 2023). Isı borusu ile soğutma sistem tasarımı şekil 1.3'te verilmektedir.

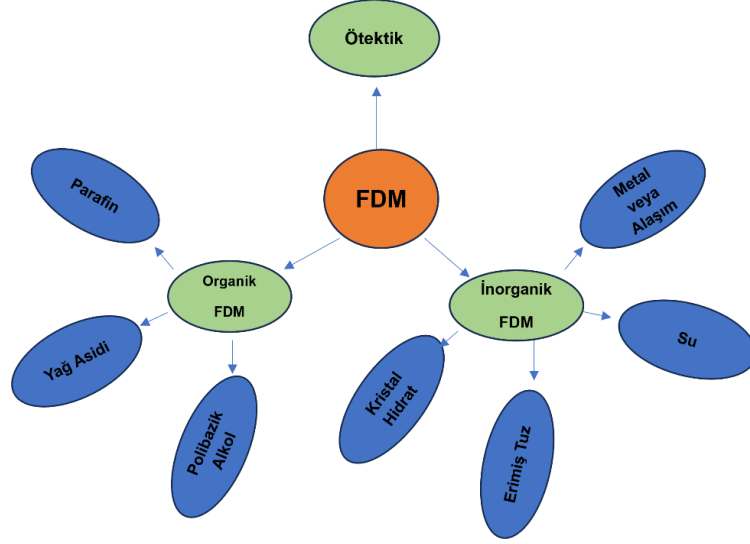
Yönelim Bağımlılığı: Yerçekimi etkisiyle çalışan ısı boruları, belirli bir yönelim gerektirebilir. Ancak, çalışma sıvısının buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıkları, sistemin performansını sınırlaması, kurulum ve bakım maliyetlerinin yüksek olması ve sıvı sızıntı riskinin olması gibi dezavantajlarının olduğu söylenebilir.



Şekil 1.3: Isı borusu ile soğutma sistemi tasarımı (Smith vd., 2018)

1.1.4. FDM Esaslı Termal Yönetim Sistemi

Aktif soğutma sistemlerine alternatif olarak pasif soğutma sistemi olan FDM soğutma sistemleri son zamanlarda çok fazla dikkat çekmeye başlamıştır. Faz değiştiren malzemeler, ısı enerjisini depolamak ve serbest bırakmak için kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, belirli bir sıcaklık aralığında katı ve sıvı fazlar arasında geçiş yaparak, ısıyı emme veya serbest bırakma kapasitesine sahiptir (Patel ve Rathod, 2020). Faz değiştirme süreci, malzemenin sıcaklığını belirli bir seviyede tutarak termal yönetim sistemlerinde kilit bir rol oynar. FDM'ler düşük maliyet, yüksek gizli ve duyulur ısı, yüksek termal iletkenlik ve yüksek özgül ısı kapasitesi gibi üstün özelliklere sahiptirler. FDM'ler inorganik, organik ve ötektik olarak 3 grupta incelenir. FDM sınıflandırması Şekil 1.4'te belirtilmektedir.



Şekil 1.4: FDM Çeşitleri (Patel ve Rathod, 2020)

1.1.4.1. İnorganik FDM

Metal tuzlar, hidrat tuzları ve bazı ötektik bileşikler inorganik FDM olarak kullanılmaktadır. Metal tuzları 200°C ile 1000°C arasında yüksek erime noktalarına sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda çalışma aralığı olan enerji depolama birimlerinde kullanılmak için tercih edilirler. Hidrat tuzları ise 60°C faz değişim sıcaklığına sahip olması metal tuzlarına göre düşük kalmaktadır (Jiang vd., 2020).

Daha yüksek ısı iletkenliğe ve düşük özgül ısıya sahip olan tuz hidratları, parafinle kıyaslandığında tuz hidratların uygulanabilir etkisi daha yüksektir. Tuz hidratlar düşük kristallenme oranı gösterirler (Kapsalis ve Karamanis, 2016).

1.1.4.2. Organik FDM

Araştırmalarda kullanılmak üzere organik FDM olan parafin sıkça tercih edilir. Parafin yapısındaki zincirler içindeki karbonun uzunluğu ve oluşumu fiziksel ve kimyasal farklılıklara yol açar. Isı kapasitesinin 2140 ile 2900 J/kg.K olması geleneksel soğutma sistemlerine göre avantaj sağlamaktadır (Roe vd., 2022). Organik FDM çeşidi olan yağ asitleri doğada kolaylıkla elde edilebilen hayvansal veya bitkisel yağlardan türetilmektedir. Bu kapsamda birçok alanda FDM malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yağ asitlerinin üstün özellikleri olarak erime tutarlılığı, iyi kimyasal kararlılık, uygun erime sıcaklığı ve toksik olmamaları gösterilmektedir. Yağ asitleri faz değişim esnasında küçük hacim farklılığıyla

batarya termal yönetim sistemleri için FDM malzeme seçim kriterlerine uygun adaylar olduğu söylenebilir. Yağ asitlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri tablo 1.2’de gösterilmektedir.

Tablo 1.2: Yağ asitlerinin özellikleri

	Kaprilik Asit	Kaprik Asit	Laurik Asit	Miristik Asit	Palmitik Asit	Stearik Asit
Kimyasal Formül	$C_8H_{16}O_2$	$C_{10}H_{20}O_2$	$C_{12}H_{24}O_2$	$C_{14}H_{28}O_2$	$C_{16}H_{32}O_2$	$C_{18}H_{36}O_2$
Yoğunluk g/cm ³	0,910	0,893	1,007	1,03	0,852	0,9408
Erime Noktası	16,7	31,6 °C	43,8 °C	54,4 °C	62,9 °C	69,3 °C
Isı Kapasitesi (C) J/mol*k	297,9	475,59	404,28	432,01	463,36	501,5
Termal İletkenlik W/m*K	—	0,372	0,442	0,159	—	0,173

1.2. Enerji Depolama Sistemlerinde Gizli Isı ve Duyulur Isı

Isı enerjisi bir madde üzerinde ani sıcaklık değişimlerine sebep olarak fiziksel değişimlere yol açabilir. Bu sıcaklık farklarında gizli ısı ve duyulur ısı kavramları karşımıza çıkar. Gizli ısı, bir maddenin fiziksel halindeki değişim esnasında gerekli olan ısı miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu fiziksel değişim esnasında madde sıcaklığı değişir ancak ısı sabit kalır. Duyulur ısı ise, bir maddenin ısı değerini sabit tutarak sıcaklığındaki değişimi tanımlamaktadır.

FDM’ler termal enerjiyi yüksek gizli enerjisi sayesinde faz değiştirerek bünyesinde depolar. FDM’lerde katı halden sıvı hale geçişte enerjiyi depolar ve sıvı halden katı hale geçişlerde enerjiyi serbest bırakır. Bu faz değişim esnasında karşımıza gizli ısı ve duyulur ısı kavramları çıkar. Katı ve sıvı olmak üzere gizli ısı depolama birimleri bulunmaktadır. Su, yağlar ve alkoller sıvı gizli ısı depolama birimleri olarak kullanılırken tuğla, kaya, toprak ve ahşap katı gizli ısı depolama birimleri olarak kullanılmaktadır (Mabrouk vd., 2022).

1.3. Faz Değiştiren Malzemelerinin Kullanım Alanları

FDM'ler, gizli ısı depolama gerektiren alanlarda kullanılmakta ve yapılan araştırmalar sayesinde gelişimine devam etmektedir. FDM'ler birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlar binalarda ısı yönetimi, enerji depolama sistemleri ve elektronik soğutma sistemleri sektöründe kullanılmaktadır. Binalarda yalıtım malzemesi olarak kullanılan FDM'ler, gün içerisinde bina yüzeyine gelen ısı miktarını gizli ısı kapasitesini kullanarak hapseder. Bu kapsamda bina yalıtımları için artan ticari kullanım ivmesi bulunmaktadır. Bir diğer kullanım alanları olan enerji depolama sistemlerinde, enerji elde etme yöntemleriyle üretilen enerjiyi depolama birimleriyle kullanılarak enerji kapasitesini arttırmaktadır. Farklı bir kullanım alanı olarak ürettiği aşırı ısınmayı önlemek amacıyla elektronik cihazlarda kullanılmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

FDM'lerin faz geçişleri katıdan sıvıya, katıdan katıya veya sıvıdan gaz haline olabilir. Bu malzemelerin bazı dezavantajları, faz değişimi sırasında meydana gelen yoğunluk ve hacim değişiklikleri, zamanla özelliklerin kararlılığındaki azalma ve bazı durumlarda faz ayrışması, aşırı soğutma, akma, sızma, alevlenme, toksisite ve düşük termal iletkenliklerdir (Chandel ve Agarwal, 2017). Bu yüzden, FDM'lerin termal yönetim sisteminde yalın halde kullanılması durumunda istenilen performanslara ulaşamamaktadır. Dahası, saf halde kullanılan FDM'nin düşük ısı iletkenliği ($0,2-0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) nedeniyle, ısı enerjisinin verimli bir şekilde depolanması ve boşaltılması konusunda zorluklar yaratmaktadır, bu da FDM'nin füzyon gizli ısı değerinin etkin bir şekilde kullanılmamasına neden olmaktadır (Ben Khedher vd., 2022). Ayrıca, yüksek ısı uzaklaştırma basınçlarında, FDM hızla termal doygunluğa ulaşarak ısı uzaklaştırma yeteneklerini azaltır, dolayısıyla, bataryada soğurulan ısı enerjisi, uzaklaştırılmazsa veya soğutulamazsa FDM'nin yüksek termal ataleti önemli bir dezavantaj haline gelir. FDM'lerin batarya termal yönetim sistemlerinde uygulanabilirliğini mümkün kılabilmek amacı ile ısı iletkenliği yüksek malzemelerle kompozit elde edilmesi ya da kapsülleme metotları uygulanmaktadır (Cárdenas-Ramírez vd., 2020), (Mehrali vd., 2014), (Xu vd., 2022). FDM'lerde yüksek termal iletkenlik elde etmek için temel yaklaşımlar, kabaca iki türe ayrılabilir: i) karbon bazlı malzemelerle ve ii) metal bazlı malzemelerle kombinasyon yapılarak kompozitlerin oluşturulmasıdır. Karbon bazlı malzeme olarak genellikle grafen ya da genişletilmiş grafit (EG) kullanılmaktadır. Örneğin, Malik ve ark., grafeni, FDM ile birleştirerek batarya paketine uygulamışlardır. Grafenin yüksek termal iletkenliği sayesinde, kompozit faz değiştiren malzemenin termal iletkenliği, saf FDM'ye kıyasla önemli ölçüde iyileştirilmiştir (Malik vd., 2017). Bir diğer çalışmada, Zou ve ark., tarafından çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve grafen bazlı kompozit FDM'nin performansını incelemişlerdir. Grafen ve MWCNT bazlı kompozit FDM'nin farklı karışımlarını sentezlemiş ve bunları optimal ekleme miktarında karakterize etmişlerdir. MWCNT ile grafenin 3:7 kütle oranına sahip olan kompozit FDM'nin, en güçlü sinerjik ısı transferi iyileştirme etkisine sahip olduğunu rapor etmişlerdir (Zou vd., 2018). Bu temelde, Zou ve ark., bir FDM türü olan palmitik asit ve EG kullanarak kararlı bir şekilde sahip kompozit FDM hazırlayarak güç batarya modüllerindeki yerel olarak artırılmış ısı transferi özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, dört hücrenin kompozit FDM ile yerel olarak güçlendirilmesi durumunda, 36 batarya modülünün 3C deşarjı sırasında

maksimum sıcaklığın 44,6 °C ve maksimum sıcaklık farkının 0,8 °C olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sonuçlar güçlendirilmiş bölge daraltıldığında batarya modülünün sıcaklığının daha homojen olduğunu da göstermiştir. 16 bataryanın yerel olarak güçlendirilmesiyle karşılaştırıldığında, batarya modülünün maksimum sıcaklığı hafifçe artmış ve sıcaklık farkı %46,7 oranında azalmış, bu da batarya modülünün sıcaklık tutarlılığını geliştirmiştir (Zou vd., 2019). Teppei ve ark., orijinal FDM'den iki kat daha büyük termal iletkenliğe sahip gözenekli bir metal kullanarak bir FDM kompoziti geliştirmişlerdir (Oya vd., 2012). Gözenekli yapının etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, FDM kompozitinin gizli ısısının, gözenek boyutuyla değil, FDM'nin emprenye oranıyla basit bir şekilde açıklanabileceğini göstermiştir. Cheng ve ark., tarafından elektronik cihazların termal yönetimine uygun, yüksek termal iletkenliğe sahip, şekli stabilize edilmiş bir dizi FDM hazırlanmıştır (W. L. Cheng vd., 2012). Bu şekli stabilize edilmiş FDM'ler, faz değişim malzemesi olarak organik n-alkanları, destek malzemesi olarak yüksek yoğunluklu polietileni ve termal iletkenlik artırıcı olarak genişletilmiş grafit kullanmıştır. N-oktadekan bazlı şekillendirilebilen FDM'nin termal özellikleri test edilerek analiz edilmiştir. Termal iletkenliğin malzemenin ısı depolama/salınım performansı üzerindeki etkisi sayısal simülasyonla incelenmiştir. Malzemenin elektronik cihazlar için termal kontrol etkisi de analiz edilmiştir. Frusteri ve ark., karbon fiberlerin inorganik bir FDM'nin ısı iletkenliğinin artırılması üzerindeki etkisini değerlendirdiler. Farklı uzunluklardaki fiberler, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ – $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ – NH_4NO_3 'ün ötektik FDM karışımına rastgele dağıtılmış ve kompozitin termal iletkenlik ölçümleri, sıcak tel yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (Frusteri vd., 2005). Kompozitin homojenlik derecesinin (FDM'deki fiberler) ısı difüzyonunun artırılmasında temel bir rol oynadığı gösterilmiştir.

Gupta ve ark., bir FDM türü olan inorganik nitrat heksahidratın termal iletkenliğini arttırmak amacı ile Cu ve Fe metal nanopartiküllerini inorganik nitrat heksahidratın içerisine dağıtmışlardır (N. Gupta vd., 2020). Ağırlıkça %0.5 Fe nanopartikülleri, ısı iletkenliği 0.4 W/(m·K) olan inorganik nitrat heksahidrata eklendiğinde ısı iletkenlik 0.61 W/(m·K)'ye ve ağırlıkça %0.5 Cu nanopartikülleri eklendiğinde ise 0.63 W/(m·K)'ye iyileşmiştir. Karthikeyan ve arkadaşları, FDM'nin termal iletkenliğini arttırmak amacı ile ağırlıkça %75 FDM'yi %25 EG ile karıştırarak yeni bir kompozit FDM hazırlamışlardır vd., 2020). EG gözenekli köpük ve FDM, dikdörtgen alüminyum borulara doldurularak kompozit elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, parafin mumunun ısı iletkenliği 0.2'den 5.68 W m⁻¹K⁻¹'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Cao ve ark., FDM olarak parafin balmumu (PA), destek malzemesi olarak EG ve yüksek yoğunluklu polietilen, termal iletkenlik katkısı olarak

karbon fiberler kullanarak kompozit FDM hazırlamışlardır. Ayrıca, kompozit FDM'nin mekanik özelliklerini ve termal iletkenliğini artırmak için dikenli yapıya sahip 3-boyut baskılı alüminyum petek de kullanılmıştır. Yapılan test sonuçlarından, 2.5C deşarj hızında bataryanın çalışma sıcaklığının her zaman 50 °C güvenli sıcaklık aralığında tutulabileceği rapor edilmiştir (M. Cao vd., 2020). Metal köpük de batarya termal yönetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, termal iletkenlik katsayısının çok fazla artırılması gizli ısı kapasitesini olumsuz etkileyeceğinden hazırlanan kompozit FDM'nin soğutma performansının önemli derecede azalmasına neden olabilir. Örneğin, Huang ve ark., tasarlanmış lityum-iyon batarya modüllerinin termal yönetimi üzerinde FDM'nin termal iletkenliği ve gizli ısıısının etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, termal iletkenliğin mümkün olduğunca yüksek olmaması gerektiğini göstermiştir, çünkü termal iletkenlik belirli bir aralığı aştığında soğutma etkisi çok daha az artmaktadır. Daha büyük gizli ısı, daha düşük maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkları sağlayabilir. Bu nedenle, FDM bazlı batarya termal yönetiminde hem gizli ısı hem de termal iletkenlik dikkate alınmalıdır (R. Huang vd., 2020). Rehman ve ark., FDM tabanlı bakır köpük radyatörler ve bakır köpük/FDM kompozit radyatörler üzerinde çalışmış ve radyatörlerin belirli şarj ve deşarj sıcaklıklarındaki çalışma süresi davranışını gözlemlemiştir. Sonuçlar, FDM'nin hacim fraksiyonu ne kadar yüksek olursa, substrat sıcaklığının o kadar düştüğünü göstermektedir. Bu nedenle, düşük güç seviyelerinde düşük erime noktalı FDM kullanılması önerilir, çünkü düşük çalışma sıcaklıklarında en iyi performans bu durumda görülebilir. Buna karşılık, yüksek erime noktalı FDM, daha yüksek yük ve çalışma sıcaklıklarında en iyi performansı sergileyeceği söylenebilir (Rehman vd., 2018). Metal bazlı FDM kompozitleri, metal ağ FDM, metal fiber FDM (Pan ve Lai, 2017), metal nanoparçacık FDM (Heyhat vd., 2020) vb. içermektedir. Kompozit sistemindeki FDM miktarı azaldıkça, kompozit FDM'nin gizli ısı değeri de azalır ve bu, BTYS'lerin termal performansını olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle, termal iletkenliği arttırmak amacı ile malzemelerinin eklenmesi, kompozit FDM'nin termal iletkenliği ve gizli ısı değeri üzerindeki etkisini aynı anda dikkate alınmalıdır, böylece daha verimli termal yönetim performansı elde edilebilir. Yapılan araştırmalardan anlaşılabileceği üzere, FDM'lerin yüksek termal iletim katsayısına sahip malzemelerle birleştirilerek elde edilen kompozit FDM'lerin termal iletkenliği iyileştirilse de kompozit içerisinde FDM oranının azalmasından dolayı gizli ısı kapasitesini ciddi oranda düşürmektedir. Bunun yanında, etkin bir sıcaklık kontrolü sağlayabilmek amacıyla batarya paketinin içerisine büyük miktarda FDM kompozitinin eklenmesi gereklidir bu da batarya paketinin toplam ağırlığını kayda değer bir şekilde arttırmaktadır. Ayrıca, katılma sırasında hacim

büzülmesi nedeniyle FDM yığınlarında boşluklar oluşur ve bu da erime sürecini daha da zorlaştırmaktadır (M. J. Huang vd., 2011). Dahası, bataryalardan çekilen ısı oluşan boşluklarda birikip sistemden uzaklaştırılması zorlaşacağından ve homojen bir ısı dağılımı sağlanamayacağından dolayı soğutma verimi ciddi bir oranda düşecektir (Sutradhar vd., 2022). Ayrıca, kompozit FDM'nin erime/katılaşma süreçlerinde kompozit sisteme eklenen termal iletkenlik iyileştirici malzemelerinin topaklanma problemleri olacağından homojen bir soğutma mümkün olmayacaktır. Major problemlerden bir diğeri de kompozit FDM'nin batarya paketinden sızması olduğu söylenebilir (Li vd., 2019)

Sızıntı sorunlarını çözmek termal iletkenliği artırma ve termal özellikleri iyileştirmek için en etkili yöntemlerden biri, FDM'lerin sağlam ve özellik geliştirici malzemelerle sarılması veya kapsüllenmesi işlemi olan kapsülleme teknikleridir (Fang vd., 2010). Kapsülleme teknolojisi, FDM'yi belirli taşıyıcı malzemelerle (kabuk malzemeler) birleştirerek yeni kompozit FDM'ler oluşturmak için gelecek vaat eden bir strateji olarak kabul edilmektedir; bu malzemeler yalnızca sızıntı durumunu engellemekle kalmayıp, böylece aynı zamanda bazı taşıyıcılar FDM'lerin termal iletkenliğini iyileştirme, aşırı soğumayı bastırma ve faz ayrışma davranışı gibi termo-fiziksel özelliklerine de olumlu katkıda bulunur (Azimi Yancheshme vd., 2020). Dahası, kapsülleme sayesinde, kabuk malzeme FDM'yi çevreleyip izole ederek bozulmasını önler ve FDM'yi çevresel etkilerden koruyan bir bariyer görevi görür, yüzey alanı genişleyeceğinden termal iletkenlik iyileşir, FDM'lerin diğer malzemelerle uyumluluğu artar, korozyon riski azalır ve faz değişimi sırasında FDM'nin hacim değişiminin kontrol edilmesi kolaylaşır (Cárdenas-Ramírez vd., 2020b). Bu nedenle, kabuk malzemesinin seçimi kapsülleme teknolojisinde araştırmaların odağı olmuştur. Boyutlarına göre kapsülleme sistemleri genellikle makro-kapsülleme (1000 μm), mikro-kapsülleme (1 μm –1000 μm) ve nano-kapsülleme (1 nm–1000 nm) olarak sınıflandırılır. Makro ve mikro-kapsülleme işlemine kıyasla, yüksek yüzey alanı-hacim oranı nedeniyle FDM'lerin nano-kapsüllemesinin ısı transfer, kararlılık ve sızdırmazlık gibi özellikler daha üstündür (Nikpourian vd., 2020). Kapsüllemede temel olarak organik polimerler (örneğin, polimetilmetakrilat, polietilen, polistiren ve polivinil alkol vb.) ve zayıf ısı iletkenliğe sahip inorganik malzemeler (örneğin, SiO_2 , TiO_2 and ZrO_2 v.b) kabuk malzemeler olarak kullanılmaktadır (Zhu vd., 2016), (Sarı vd., 2018), (Gu vd., 2020), (Liu vd., 2019), (Yuan vd., 2021). Örneğin, Kumar ve ark., 1-dodekanolü FDM ve melamin-formaldehiti ise taşıyıcı malzeme (kabuk malzeme) seçerek 1 μm çapında küresel mikro-kapsüller oluşturmuşlardır (Kumar vd., 2021). Yapılan testlerden, ısı depolama kapasitesinin %91,2 olduğu, 200 erime/katılaşma çevirimi sonunda sızıntı olmadığı ve ısı iletim katsayısının 0,1727 W/m K

olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir çalışmada, Qui ve ark., parafin mumunun FDM ve organik bir polimerin kabuk olduğu çapları 1-100 μm arasında değişen mikro-kapsülleri (MPCM-28) su ile karıştırıp soğutucu sıvı olarak bakır kollektör tüplerde dolaştırarak fotovoltaiik panellerin sıcaklığını kontrol etmede ve aynı zamanda atık ısı geri kazanımında kullanmışlardır (Qiu vd., 2016). Test sonuçlarından, 700 W/m^2 ışınlım altında PV panelin elektrik dönüşüm veriminin %15 ve toplam termal verimliliğin ise %33 arttırıldığı belirlenmiştir. Nikpourian ve ark., parafin mumunu nano-küre formuna getirdikten sonra etrafına poliüretan polimerini kaplayarak 185 nm çapında küre nano-kapsüller oluşturmuşlardır (Nikpourian vd., 2020b). Yapılan testlerden, enerji depolama verimi ve enerji depolama kapasitesini sırasıyla, %80,2 ve 97,5 olarak hesaplanmıştır, ayrıca, 100 erime/katılaşma çevrimi sonunda gizli ısı değerinde bir düşüş gözlenmemiştir. Bir diğer çalışmada, Yuan ve arkadaşları, gözeneksiz küresel SiO_2 kabukların içerisinde laurik asit olacak şekilde nano-kapsüller elde etmişlerdir (Yuan vd., 2019). Termal özellikleri incelemek amacı ile gerçekleştirilen testlerden nano-kapsülleme oranının %85,9 olduğu, gizli ısı kapasitesinin 165.6 J/g gibi yüksek bir değer olduğu ve 1200 erime/katılaşma çevriminden sonra gizli ısı kaybının sadece %10 olduğu belirlenmiştir. Kong ve ark., 3-boyutlu ve 20 μm gözeneklere sahip aerogel grafen tasarlayıp içerisine parafin doldurarak mikro-kapsülleme yapılmıştır (Kong vd., 2021). Yapılan ölçümlerden, ısı iletkenlik 0,2'den 0,92 W/mK 'ye yükseldiği, gizli ısı 225,7 j/g'ın üzerinde olduğu ve 30 erime/katılaşma çevriminden sonra gizli ısı kapasitesinin sadece %2,89 kayba uğradığı tespit edilmiştir. Yuan ve ark., palmitik asitleri (PA) içerisine alacak şekilde 100-600 nm boyutları arasında değişen gözeneksiz Ag kabuklar sentezleyerek nano-kapsülleme yapmışlardır (Yuan vd., 2021b). Termal testlerden, tasarlanan Ag/PA nano-kapsüllerin gizli ısı kapasitesinin 107,87 j/g olduğu, kapsülleme oranının %64,7 olduğu, 2000 erime/katılaşma çevrimi sonunda gizli ısı değerinin %1,13 düştüğü ve ısı iletim katsayısının 4,072 W/mK gibi yüksek bir değere ulaştığı saptanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarından anlaşılağı üzere, kabuk malzemenin seçimi oluşturulacak kapsüllerin termo-fiziksel özellikleri üzerinde ciddi etkileri bulunmaktadır. Polimerik malzemelerin kabuk olarak kullanılması sızıntı problemlerini önüne geçmektedir ancak, ısı iletim katsayıları çok düşük kalmaktadır. Diğer taraftan, metal köpük gibi malzemelerin kabuklar içerisine FDM'lerin kapsüllemesi ısı iletim katsayısını arttırsa da sızıntı problemlerinin üstesinden gelinememektedir.

Bu tez çalışmasında, parafin FDM (RT35HC) malzemesi, sentezlenen 60 nm çapa sahip içi boş ve yüzeyi gözenekli karbon kabuk kürelerle ilk defa kapsüllemiştir. Karbonun yüksek termal iletkenliği, mukavemeti, kimyasal kararlılığı ve doğada bol bulunması sebebi ile

karbon kabuk malzeme olarak seçilirken, bataryaların ideal çalışma sıcaklığı (42°C) göz önünde bulundurulduğunda Tablo 2.1’de görüldüğü üzere RT35HC’nin erime sıcaklığının $34-36^{\circ}\text{C}$ ve gizli ısı kapasitesinin 240 kJ/kg.K olmasından dolayı FDM olarak seçilmiştir. Üretilen nano-kapsüllerin fiziksel ve termal karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, karbon kabuk kürelerin yüksek saflıkta ($\%99,8$) ve 60 nm çapında başarılı bir şekilde sentezlendiği, FDM’nin karbon kabuklara homojen bir şekilde $\%70$ oranında yüklendiği, üretilen nano-kapsüllerin gizli ısı kapasitesinin (ΔH) $163,8\text{ J/g}$ olduğu, termal kararlılığının yüksek olduğu ($T_{\text{onset}} = 150^{\circ}\text{C}$), 70°C ’de 24 saat boyunca ısı işleme tabi tutulduğu halde RT35HC’nin sızıntı oranının sadece $\%1,4$ gibi çok düşük bir değer olduğu ve FDM’nin termal iletkenlik değerinin $0,197\text{ W/mK}$ ’den $0,532\text{ W/mK}$ ’ye iyileştirildiği rapor edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tez çalışmasında üretilen ve karakterize edilen RT35HC/Karbon küre yapılı nano-kapsüllerin özellikle LIB’lerin termal yönetim sisteminde ve birçok enerji depolama uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Tablo 2.1: Parafin RT35HC özellikleri

Erime Sıcaklığı	Isıl İletkenlik (W/mK)	Gizli Isı (J/kg.K)	Özgül Isı (J/kg.K)
34-36	0.2	240.000	2000

3. MATERYAL METOT

Tez çalışmasında kullanılan materyaller ve deney süreçlerinin aşamaları açıklamalı olarak verilmektedir.

3.1. Materyal

Deney esnasında kullanılan malzemeler Tablo 3.1’de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Tablo 3.1: Deney için kullanılan materyaller

Kimyasal Malzeme	Temin Edildiği Firma	Safılık
Hexadecyltrimethylammonium Bromide	Sigma-Aldrich	%98
Resorcinol	Sigma-Aldrich	%99
Silicon(IV) Oxide	Termo Scientific	%30
Tetraethylorthosilicat	Sigma-Aldrich	
Ammonia Solution	MERCK	%28-%30
Formaldehyde Solution	MERCK	%37
Hydrofluoric Acid	ISOLAB	%40
Paraffin RT35HC	Rubitherm	

3.2. Kullanılan Analiz Cihazları

Bu tez çalışmasının deneysel ve analiz aşamalarında, ilgili ölçüm ve değerlendirmelerin gerçekleştirilmesinde çeşitli analiz cihazlarından yararlanılmıştır.

3.2.1. X-Işını Difraktometresi (XRD)

Nano-karbon küre kabukların sentez aşamalarını izlemek amacı ile Şekil 3.1’de gösterilen RIGAKU Powder X-ışını kırınımı spektrometresi (P-XRD) cihazı kullanılarak analizleri yapılmıştır. Toz halinde bulunan numunelerin analizi, Cu-K β radyasyon kaynağı ($\lambda = 1.54$ Å, 40 kV, 30 mA) ile çalışma gerçekleştiren Rigaku Smartlab Difraktometresi kullanılarak incelenmiştir. 10°-80° aralığında, 0.04° örnekleme aralığı ve 2°/dk tarama hızı ile 2 θ parametreleri üzerinden analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1: XRD analiz cihazı

3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Nano-karbon küre kabukların sentez aşamalarını ve elde edilen nano-kapsüllerin Şekil 3.2’de sergilenen TESCAN MAIA3 marka SEM cihazı ile analizleri yapılmıştır. SEM cihazı

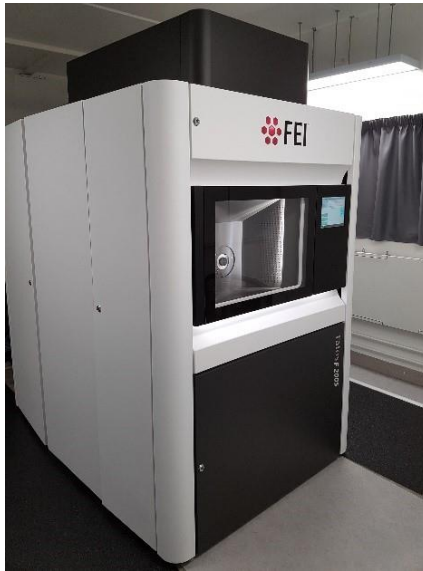
ile ayrıştırılan numunenin 500 nm ve 1 nm değerlerinde yakınlaştırılarak yüzeyi hakkında incelemeler yapılmıştır.



Şekil 3.2: SEM analiz cihazı

3.2.3. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)

Nano-karbon küre kabukların ve nano-kapsüllerin TEM analizleri Şekil 3.3’de gösterilen FEI TALOS F200S TEM 200 kV marka mikroskop ile farklı büyütme yapılarak analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3: Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)

3.2.4. Yüzey Alanı Ölçüm Analizi (BET)

Şekil 3.4’de sergilenen Quantochrome Autosorb-1 marka model bir cihaz kullanılarak numunelerin Brunauer Emmett Teller yüzey alanı (sBET), toplam gözenek hacmi ve gözenek boyutu dağılımı (PSD) analizleri yapılmıştır. Ölçümden önce, numuneler 220 °C’de 10 saat boyunca bir N₂ akışı altında 10⁻⁶ ila 10⁻⁵ Torr aralığında bir basınca kadar gazdan arındırıldı (degaz işlemi).



Şekil 3.4: BET analiz cihazı

3.2.5. Termogravimetrik Analiz ve Kızıl Ötesi Spektrometre (TGA ve FTIR)

Şekil 3.5’te görüldüğü üzere, Hitachi STA 7300 termal analiz cihazı ve bir bağlantı elemanı ile aktif hale getirilen Shimadzu IRAffinity-1 FTIR cihazı kullanılarak nano-karbon küre kabukların, nano-kapsüllerin ve RT35HC’nin analizleri yapılmıştır. TGA analiz özellikleri olarak oda sıcaklığından 700°C’ye kadar, 5°C/dk artış hızı belirlenmiştir.



Şekil 3.5: TGA ve FTIR analiz cihazları

3.2.6. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Merkezinde bulunan ve Şekil 3.6’da sergilenen DSC cihazı için 10 mg nano-kapsül hazırlanmıştır. DSC analiz özellikleri olarak oda sıcaklığından başlayacak şekilde 2°C artış hızı ile 70°C ye kadar ısıtma ve 2°C düşüş hızı ile 20 °C’ye soğutma yapılarak DSC eğrileri kaydedilmiştir.



Şekil 3.6: DSC analiz cihazı

3.2.7. Termal İletkenlik Ölçümü

RT35HC ve nano-kapsüller kullanılarak 1 cm boyutlu ve 2 mm kalınlığa sahip peletler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin termal iletkenlik katsayıları Şekil 3.7’de gösterilen

LINSEIS LFA 1000 lazer flaş ısı iletkenlik/ısı yayılım katsayısı analiz cihazı ile belirlenmiştir.



Şekil 3.7: Termal İletkenlik ölçüm cihazı

3.2.8. Nanoindentasyon Testi

Üretilen nano-kapsüllerle, bağlayıcı olarak etil selüloz ve çözücü olarak ise terpineol kullanılarak pasta kıvamında karışım hazırlanmıştır. Karışımındaki nano-kapsül etil selüloz oranı 9:1 olarak belirlenmiştir. Daha sonra, hazırlanan karışım 150 µm kalınlık olacak şekilde Dr. Blade yöntemiyle cam üzerine kaplanmıştır. Cam üzerine elde edilen film 1 gece boyunca 60 °C’de kurutulmuştur. Hazırlanan filmin mekanik özelliklerini belirleyebilmek amacı ile Berkoviç uç kullanılarak 40 µm dalma derinliği ve farklı kuvvet değerlerinde Nano-indentasyon testi gerçekleştirilmiştir. Testler, Şekil 3.8’de gösterilen Quantochrome HİT300 marka model bir cihazla gerçekleştirilmiştir.



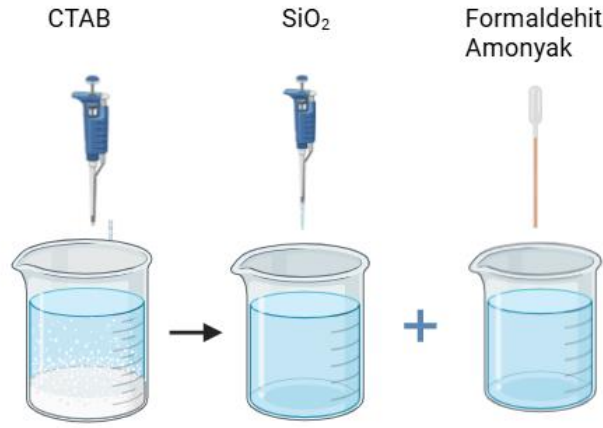
Şekil 3.8: Nano-mekanik test cihazı

3.3. DeneySEL Süreçler

Bu tez çalışması kapsamında yürütölen deneySEL aşamalar, araştırmanın amacına uygun olarak planlanmış ve deneySEL işlemler üç temel aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. SiO₂ Küre Sentezi

SiO₂ sentezi için izlenen deneySEL adımlar kısaca Şekil 3.9’da özetlenmiştir. İlk aşamada beher içerisine 3 g SiO₂ alınarak 10 mL tamamlayacak şekilde deiyonize su eklenmiştir. Ayrı bir beherde 48 mL etanol ve 110 ml deiyonize su içerisine 0,75 gr CTAB eklenerek manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. CTAB çözöndükten sonra iki beher birleştirilerek yarım saat boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen çözölti içerisine ilk olarak 0,32 g resorcinol eklenmiş ve 15 dakika manyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. 15 dakika sonunda çözölti içerisine 0,45 mL Formaldehit ve 2 mL amonyum solösyonu eklenmiştir. Çözölti oda sıcaklığında 24 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. 24 saat sonunda katı kısım sıvı kısımda santrifüj yoluyla ayrıldı. Ürün 3 defa etanol ile yıkanmıştır. Bu işlemler sonunda elde edilen ürün SiO₂@RF/CTAB olarak kodlama işlemi yapılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.9: Deneysel metodun şematik gösterimi



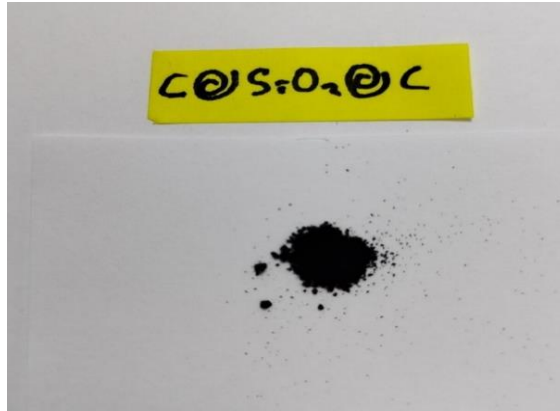
Şekil 3.10: Ara ürün olan $\text{SiO}_2\text{@RF/CTAB}$ 'ın toz formu

Elde edilen son ürün olan $\text{SiO}_2\text{@RF/CTAB}$, 75 mL ethanol ve 10 mL deiyonize su bulunan beher içerisine alınmıştır. Ürün sulu çözelti içerisinde su banyosu kullanılarak dağıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, çözelti manyetik karıştırıcıya alındı ve şiddetli bir şekilde karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözelti içerisinde 3,15 mL amonyum solüsyon eklenerek 10 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra şiddetli karıştırma işlemi devam ederken 1 mL TEOS eklenmiş ve ilave olarak 1 saat manyetik karıştırıcıya tabi tutulmuştur. 1 saat sonunda tekrar olarak 1 mL TEOS eklendi ve 1 saat daha karıştırılmıştır. Son olarak 1 mL TEOS eklendi ve toplam 3 mL TEOS eklenerek karıştırma işlemi devam edilmiştir. Son TEOS eklendikten 1 saat sonra santrifüj işlemi ile sıvı kısım katı kısımdan ayrıştırılmış ve 3 defa deiyonize su ile yıkama işlemi yapılmıştır. Kurutma işlemi için malzeme etüv içerisinde

60 °C ayarlanarak 1 gece boyunca bekletilmiştir. Elde edilen ürün kodu $\text{SiO}_2@\text{RF}/\text{CTAB}@\text{SiO}_2$ olarak kodlanmıştır. Elde edilen $\text{SiO}_2@\text{RF}/\text{CTAB}@\text{SiO}_2$ 'nin yakma işlemi için şekil 3.11'de sergilenen fırının seramik tüpü içerisine konulmuştur. Fırın parametreleri 350 °C ye 1,5 °C/dk artış hızı olacak şekilde çıkış ve 350 °C de 2 saat beklenmiştir. 350 °C den 800 °C ye 1,5 °C/dk olacak şekilde artış ve 800 °C de 4 saat bekleme süresi belirlenmiştir. 800 °C den doğal soğuma ile işlem tamamlanmıştır. Elde edilen ürün şekil 3.12'de görüldüğü üzere, $\text{C}@\text{SiO}_2@\text{C}$ olacak şekilde kodlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.11: Yakma işlemi için kullanılan fırın



Şekil 3.12: $\text{SiO}_2@\text{C}$ numunesi

Elde edilen $\text{SiO}_2@\text{C}$ HF kullanarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Asit kullanarak dağlamamızdaki neden olarak karbon kürelerin içerisinde bulunan SiO_2 yapılarının asitle tepkimeye girerek ortamdan uzaklaştırmak ve içi boş karbon küreler elde etmektir. 25 mL %40 yoğunluğa sahip olan HF 75 mL deiyonize su ile karıştırılarak plastik kaba alınmıştır.

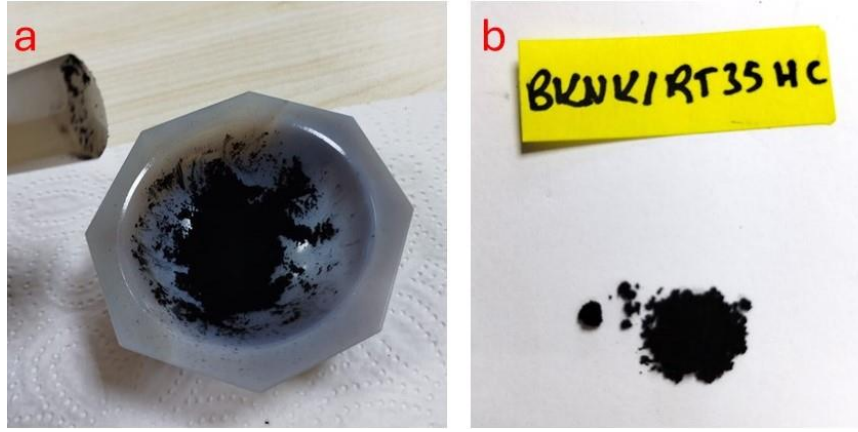
Karbon malzeme asit içerisine eklenerek 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda santrifüj işlemi yapılmış ve 3 defa olacak şekilde deiyonize su ile yıkanarak kurutmaya bırakılmıştır. Kurutma sonunda elde edilen ürün şekil 3.13'te olduğu gibi BKNK olarak kodlanmıştır.



şekil 3.13: Karbon küre kabukların dijital görüntüsü

3.3.2. Karbon Küre Kabukların İçerisine RT35HC'nin Kapsüllenmesi

Elde edilen BKNK yüksek yüzey alanı ve boşluklu karbon küreler sayesinde içerisine FDM malzemesi yüklemesi kolaylıkla yapılmıştır. Bu işlem için hidrotermal sentez yöntemi kullanılmıştır. %70 parafin RT35HC ve %30 karbon olacak şekilde agat içerisine alınmıştır. şekil 3.14'te gösterildiği gibi, malzemeler birbiri içerisinde karışana kadar agat havanda dövölmüştür. Daha sonra, karışım otoklav içerisine alınarak deney ortamında argon gazı ile oksijen uzaklaştırılmış ve kapak kapatılmıştır. Otoklav 80 °C ve 12 saat olarak ayarlanan fırın içerisine yerleştirilmiştir. Süreç tamamlandıktan doğal soğutmaya bırakılan otoklavdan FDM yükleme işlemi sonunda elde edilen ürün alınarak şekil 18b'de sergilendiği üzere BKNK/RT35HC (nano-kapsöller) olarak kodlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.14: a) BKNK ile RT35HC'nin agat havanla karıştırılması b) Nano-kapsüllerin (BKNK/RT35HC) dijital görüntüsü

3.3.3. Sızdırmazlık Testi

Şekil 3.15'te gösterildiği üzere, elde edilen BKNK/RT35HC nano-kapsüller kuma testi düzeneği üzerine yerleştirilmiştir. Sızıntı test düzeneği alt bölümde alüminyum folyo üzerinde filtre kâğıdı olacak şekilde ayarlanmıştır. 50 mg BKNK/RT35HC yapılı nano-kapsüller tartılıp filtre kâğıdının üzerine konularak 24 saat boyunca 70 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Nano-kapsüller oda sıcaklığına soğutulduktan sonra filtre kâğıdı ile nano-kapsüllerin ağırlıkları hassas terazide ölçülmüştür. Ayrıca, nano-kapsüllerin termal kararlılığını belirlemek amacı ile nano-kapsüllerin ısıtma/soğutma işlemi ardışık olarak 15 defa tekrar edilerek son durumdaki filtre kâğıdı ve nano-kapsüllerin ağırlıkları tekrar ölçülmüştür.



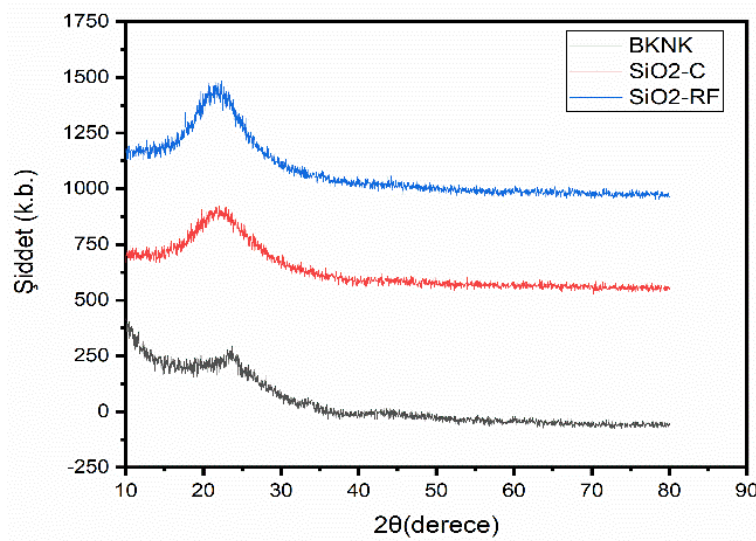
Şekil 3.15: Sızıntı test düzeneği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının deneysel süreci sonucunda elde edilen ara ürünler, karbon küre kabuklar ve sentezlenen nano-kapsüllerin üzerinde kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir.

4.1. Üretilen Malzemelerin Fiziksel Analizi

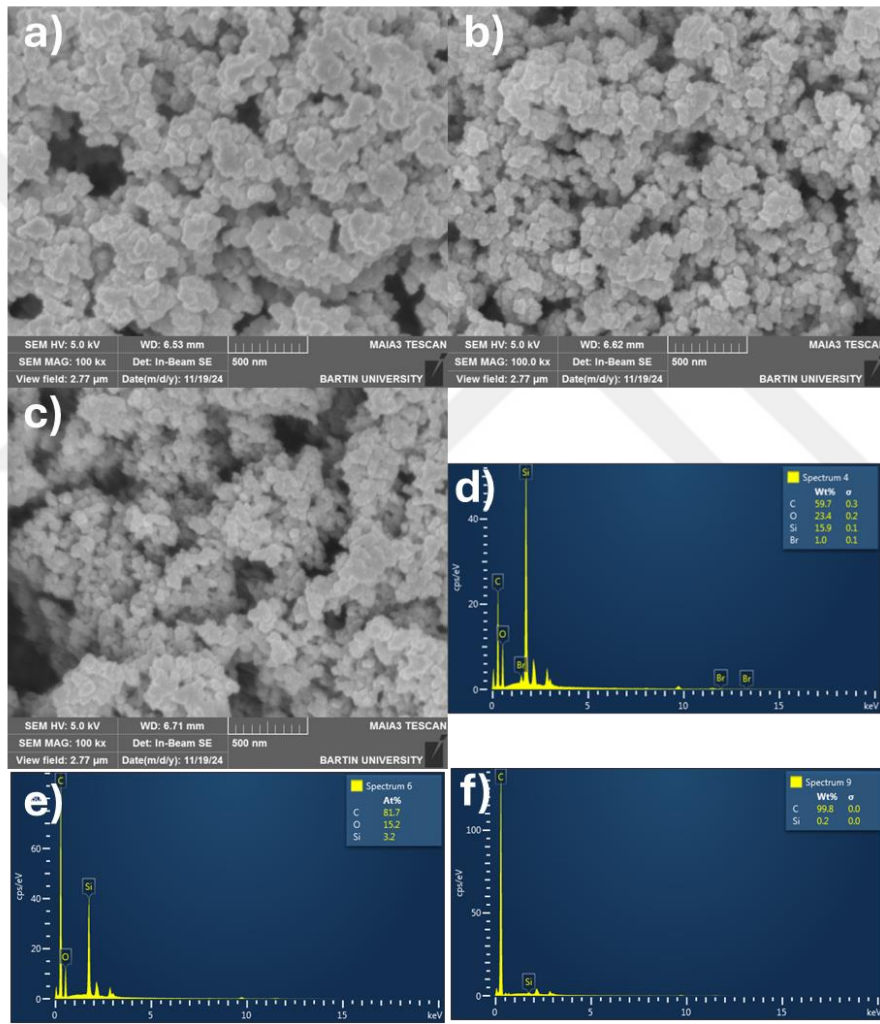
Sentez basamaklarında elde edilen $\text{SiO}_2\text{@RF}$, $\text{SiO}_2\text{@C}$ ara ürünlerin ve son ürün olan karbon küre kabukların (BKNK) XRD spektrumları şekil 4.1’de gösterilmektedir. $\text{SiO}_2\text{@RF}$ ve $\text{SiO}_2\text{@C}$ XRD desenlerinde, 21 ila 23° (2 θ ; amorf SiO_2 için JCPDS Card #850335) arasında geniş kırınım pikleri gözlemlenmiştir (Hao vd., 2016). Bu durum, $\text{SiO}_2\text{@RF}$ ve $\text{SiO}_2\text{@C}$ kompozitlerinin amorf yapıda olduğunu göstermektedir. Yakma işleminden sonra oluşan $\text{SiO}_2\text{@C}$ ’nin kırınım pik şiddetinin $\text{SiO}_2\text{@RF}$ ’ye göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni olarak, $\text{SiO}_2\text{@RF}$ ’in içerisinde bulunan amorf yapılı ve miktarı fazla olan RF’nin yanarak karbon formuna dönüşmesi olduğu söylenebilir. Dahası, asit işleminden sonra 21 ila 23° arasındaki geniş pikin tamamen yok olduğu yerine 2 θ =23,4°’de merkezlenen ve (002) yönelimine sahip karbon piki ortaya çıkmıştır (Penki vd., 2014). Asit işlemi ile SiO_2 ’nin yapıdan uzaklaştığına işaret etmektedir. Karbona ait bu pikin geniş olması ve bunun yanında herhangi bir başka fazın oluşmaması saf yapıda amorf karbon elde edildiğine işaret etmektedir. XRD desenlerinin analizi, saf karbon kabukların başarılı bir şekilde sentezlendiğine işaret etmektedir.



Şekil 4.1: Ara ürün ve karbon küre kabukların (BKNK) XRD desenleri

Sentez basamaklarında elde edilen ara ürünlerin ve karbon küre kabukların SEM görüntüleri ve EDX grafikleri Şekil 4.2’de verilmektedir. İlk aşamada sentezlenen $\text{SiO}_2\text{RF@CTAB}$ SEM görüntüleri şekil 4.2a’da görüldüğü gibi CTAB polimeri SiO_2 küresel tanelerin etrafına kaplanarak küresel geometri korunmaktadır. Taslak malzemesi olarak kullanılan SiO_2 kürelerin çapı 20 nm olduğu halde $\text{SiO}_2\text{RF@CTAB}$ tanelerinin çapları yaklaşık olarak 100 nm civarlarında olup ve kümelenmiş halde olduğu görülmektedir. Bu da CTAB polimerinin SiO_2 kürelerinin etrafına 80 nm kalınlıkta kaplandığına işaret etmektedir (X. Fang vd., 2013) $\text{SiO}_2\text{RF@CTAB}$ malzemesine argon gazı ortamda ısıtıl işlem uygulanarak yakma işleminden sonra oluşan $\text{SiO}_2@\text{C}$ şekil 4.2b’de gösterilmektedir. Şekil 4.2b’de sergilendiği gibi, yapılan ısıtıl işleminden sonra oluşan küresel tanelerin çaplarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Parçacık çaplarının 100 nm’den 65 nm’ye düştüğü bu da polimerik yapıların ısıtıl işlem sonucu karbona (C’ye) dönüştüğüne işaret etmektedir. Ayrıca, ilk aşamayla karşılaştırıldığında yakma işleminden sonra oluşan tanelerdeki kümeleşmesinin azaldığı ve tane dağılımının iyileştiği de görülmektedir (Liang vd., 2012). Bu aşamada, çekirdeğinde SiO_2 olmak üzere kabuk olarak ise karbonun olduğu küresel yapılar oluşmuştur. Şekil 4.2c’de ise küresel yapıların merkezindeki SiO_2 ’lerin HF asit ile dağlanmasından sonra oluşan karbon küre kabukların yüzey morfolojileri gösterilmektedir. Şekil 4.2c dikkatli incelendiğinde, asit işleminin morfolojik yapıda önemli bir değişikliği neden olmadığı görülmektedir. Tane boyut ve çaplarının bunun yanında tane dağılımının neredeyse aynı kaldığı görülmektedir. Bu durum uygulanan asit işleminin karbon yapılarında herhangi bir bozulmaya neden olmadığını göstermektedir. Ayrıca, elde edilen karbon küre kabuklarının çaplarının 60 nm civarında olması, aktif yüzey alanı açısından büyük avantajlar sağlayacağı da söylenebilir (Abakumov vd., 2024). Dahası, sentezde edilen ara ürünlerin ve son ürün olan karbon küre kabukların içerdiği bileşenleri incelemek amacı ile Şekil 4.2d-f’de görüldüğü üzere EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Sentez basamağının ilki olan SiO_2 küreleri üzerine CTAB polimerinin kaplanmasıyla elde edilen $\text{SiO}_2\text{RF@CTAB}$ ’ın EDX grafiği (Şekil 4.2d) incelendiğinde, içeriğinin %59,7’u karbon, %23,4’ü oksijen, %15,9’u silisyum ve %1’i brom elementi olduğu görülmektedir. Silisyum ve oksijen elementlerinin SiO_2 taslak malzemedan ve karbon, oksijen ve bromun ise CTAB polimerinin yapısından ileri gelmektedir. Şekil 4.2e’ye bakıldığında, $\text{SiO}_2\text{RF@CTAB}$ ’ın yakılması ile elde edilen yapının karbon, oksijen ve silisyumdan oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, yapıdaki oksijen oranı önemli ölçüde azalırken karbonun oranı tam tersi olarak dramatik bir şekilde artmıştır.

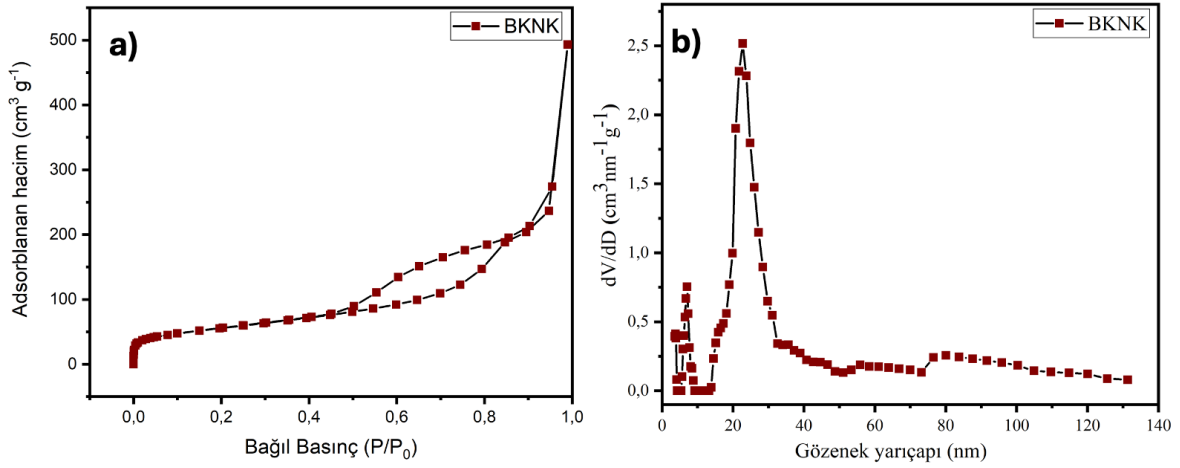
Bunun nedeni olarak CTAB polimerinin organik yapılarının yakma işlemi ile karbona dönüşmesi olduğu söylenebilir. Son olarak, $\text{SiO}_2@\text{C}$ ara ürününe asit işlemi uygulandıktan sonra elde edilen karbon küre kabukların Şekil 4.2f’de sergilenen EDX mikro grafiği incelendiğinde, %99,8’nin karbon elementinden ve %0,2’sinin ise silisyumdan oluştuğu görülmektedir. Karbon oranının oldukça yüksek ve silisyumun ise eser miktarda olması uygulanan deneysel süreçler ile çok yüksek saflıkta karbon elde edildiğini desteklemektedir. Ayrıca, XRD ve SEM analizlerinden elde edilen sonuçların EDX’lerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2: a) ve d) $\text{SiO}_2\text{RF}@\text{CTAB}$ ’ın, b) ve e) $\text{SiO}_2@\text{C}$, c) ve f) karbon küre kabukların SEM göründüleri ve EDX verileri

Üretilen karbon küre kabukların spesifik yüzey alanı ve gözenek özellikleri N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi ile incelenmiştir. Şekil 4.3a’da gösterildiği gibi, adsorpsiyon/desorpsiyon eğrileri tip-IV desenlerine aittir ve bir H3 histerezis döngüsünü

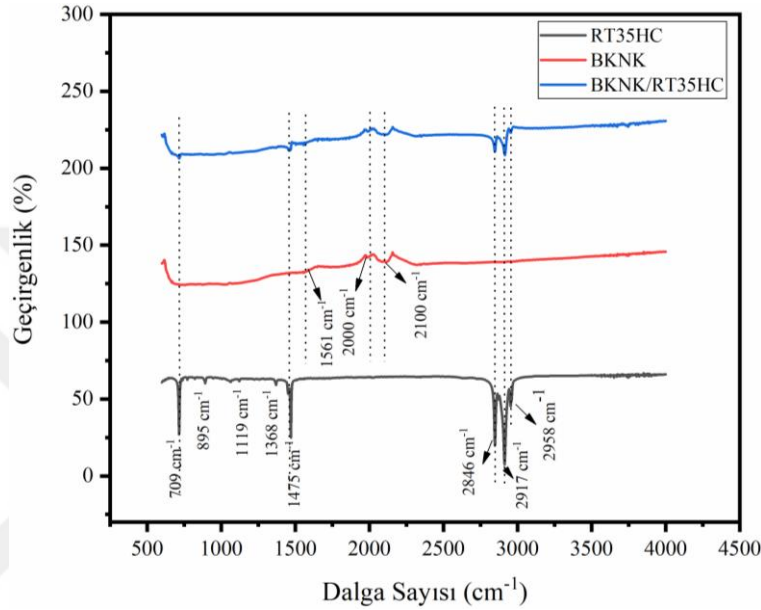
göstermektedir, bu da üretilen karbon küre kabukların mezo-gözenekli yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir (Wang vd., 2017). Düşük bağıl basınç bölgelerinde ($P/P_0 < 0,01$) artan azot alım kapasitesi ve orta ve yüksek bağıl basınç bölgelerinde yatay platolar, karbon malzemeler için tipik mikro gözenekli yapıları gösterir (K. L. A. Cao vd., 2021). Azot adsorpsiyon hacimleri ve izoterm eğimi, P/P_0 'ın 0,1'den 0,9'a kadar olduğu aralıkta sürekli olarak artmış bu da karbon kabuklardaki gözeneklerin oldukça fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca, P/P_0 'ın 0,5-0,9 olduğu aralıkta, adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrileri arasında kayda değer histerezis döngüleri gözlemlenmiştir ve bu da gözenekli karbon kabuklarda mezo-gözeneklerin varlığını açıkça ima etmektedir. İzotermlden elde edilen bu sonuçlar, Şekil 4.3b'deki karbon küre kabuklara ait gözenek boyutu dağılım eğrileriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Şekil 4.3b'de gösterildiği gibi, karbon küre kabuklar, düzgün bir mikro ve mezo gözenek boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, toplam mezo-gözenek hacminin mikro gözenek hacmine nazaran oldukça yüksek olduğu gözenek boyutu dağılım eğrisinden açıkça görülebilmektedir. İzoterm eğrilerinden, nano-kapsüllerin özgül Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı $1990.663 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Karbon kürelerinin içi boş, yüzeylerinin de gözenekli olması ve izoterm ve boyut dağılımı eğrilerinden anlaşılabileceği üzere mezo-gözenek oranının oldukça yüksek olmasından dolayı karbon küre kabukların yüzey alanı anormal yüksek bir değer olarak ölçülmüştür (Yang vd., 2019). Diğer taraftan, toplam gözenek hacminin ise $7,628 \text{ cc/g}$ gibi yüksek bir değer olduğu BET analizinden belirlenmiştir. Karbon küre kabukların yüzey alanının çok geniş olması, RT35HC'nin kapsülleme oranını dramatik bir şekilde arttırarak üretilen nano-kapsüllerin ısı soğurum kapasitesinin iyileşmesine, nano-kapsüllerin yüzey alanı artacağından etkileşim oranı artıp ve termal kontak direnci azalarak ısı transferinin artmasına neden olabilir (Z. Cheng vd., 2021), (Qureshi vd., 2021)



Şekil 4.3: Karbon küre kabukların a) izoterm eğrisi ve b) Gözenek boyutu dağılım grafiği

RT35HC'nin, karbon küre kabukların ve nano-kapsüllerin kimyasal özelliklerinin analizini yapmak amacıyla FT-IR analizleri gerçekleştirilmiştir. FT-IR analizleri Shimadzu IRAffinity-1 cihazı ile 600 ile 4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. RT35HC, BKNK ve kompozit FDM'nin FT-IR analizi şekil 4.4'te gösterilmektedir. RT35HC'de yaklaşık 2958 cm^{-1} , 2917 cm^{-1} ve 2846 cm^{-1} 'de gözlenen en yoğun soğurum bantları, C-H bağının simetrik ortamına ve asimetrik gerilme metil ($-\text{CH}_3$) ve metilenin ($-\text{CH}_2-$) titreşimine atfedilir. RT35HC'de 1475 cm^{-1} 'de gözlenen bant, sırasıyla $-\text{CH}_2-$ ve $-\text{CH}_3$ 'ün asimetrik gerilmesinin titreşiminin kaymasına ve deformasyonuna karşılık gelmektedir. RT35HC'de yaklaşık 1368 cm^{-1} , 1119 cm^{-1} ve 895 cm^{-1} 'de gözlenen küçük bantlar, C-H'nin kayma ve eğilme titreşimlerine atfedilebilir. Ayrıca, RT35HC'de yaklaşık 709 cm^{-1} 'deki bant, C-H'nin sallanma titreşimini doğrulamaktadır (Arshad vd., 2020) (Arshad vd., 2021). Karbon küre kabukların FTIR eğrisi incelendiğinde, 2000 ile 2350 cm^{-1} aralığında gözlenen zayıf soğurum bantları, genellikle karbon ve azot arasındaki çift veya üçlü bağların titreşimlerine atfedilir (Pieczyńska vd., 2014). Ayrıca, karbon küre kabukların FTIR eğrisindeki görülen 1561 cm^{-1} 'de merkezlenen bant ise sp^2 hibritlenmiş karbon atomuna bağlı olan C-C gerilmesini ($\text{C}=\text{C}$) gösterir (Debnath vd., 2020) Karbon küre kabukların FTIR eğrisinde, karbon bağlarına işaret eden bantlar dışında oksijen, hidroksil ve azot içeren farklı fonksiyonel gruplara atfedilen bantların gözlenmemesi üretilen karbon küre kabukların saf karbondan oluştuğuna işaret etmektedir. Diğer taraftan, nano-kapsüllere ait FTIR eğrisi gözlemlendiğinde hem RT35HC'de hem de karbon küre kabuklarda beliren 2958 cm^{-1} , 2917 cm^{-1} , 2846 cm^{-1} , 2100 cm^{-1} , 2000 cm^{-1} , 1561 cm^{-1} ve 709 cm^{-1} bantlarını içermektedir. Dolayısıyla, RT35HC'nin karbon küre kabukların içerisine dolarak nano-kapsüllerin oluştuğu söylenebilir. Ayrıca, nano-kapsüllenmiş RT35HC'nin FT-IR

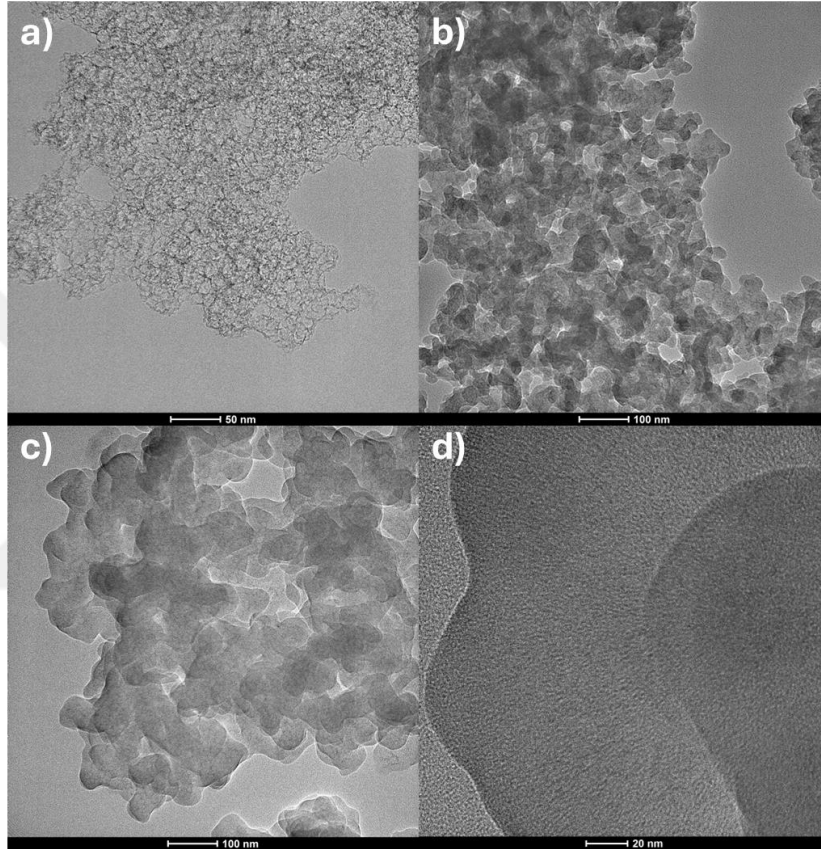
spektrumlarındaki karakteristik bantlarında çok az veya hiç kayma meydana gelmemiş olması, nano-kapsüllenmiş RT35HC ile karbon kabuk arasında kimyasal bir etkileşimin olmadığını açıkça göstermektedir. Bu nedenle, etkileşimlerin fiziksel nitelikte olduğu ve geliştirilen nano-kapsüllerin kimyasal olarak uyumlu olduğu sonucuna varılabilir. Dolayısıyla, tasarlanan nano-kapsüllerin kimyasal olarak kararlı olmasından dolayı uygulanan yüzeylerde korozyon ve buna benzer durumların oluşması da engellenmiş olur.



Şekil 4.4: Saf RT35HC, karbon küre kabukların ve nano-kapsüllerin FT-IR eğrileri

Yüzey morfolojisi özelliklerini ve RT35HC'nin karbon küre kabukların içerisine ne ölçüde dolduğunu incelemek amacı ile karbon küre kabukların ve nano-kapsüllerin alınan TEM görüntüleri Şekil 4.5'te sergilenmiştir. Karbon kabuk kürelere ait TEM görüntüsü (Şekil 4.5a) incelendiğinde, karbon küre kabukların geçirgen ve parlak olduğu görülmektedir bu da kabukların içlerinin boş olduğuna işaret etmektedir (Z. Cao vd., 2021). Dahası, karbon kabukların kümeleştiği ve cidar kalınlıklarının sadece birkaç nm kadar olduğu da görülmektedir. Şekil 4.5b-d incelendiğinde, tanelerin geçirgenliğinin ve parlaklığının azaldığı görülmektedir bu da RT35HC'nin karbon kabuklara başarılı bir şekilde doldurulduğuna işaret etmektedir (Yoo vd., 2022). Nano-kapsüllerin çapları yaklaşık 50-60 nm olduğu ve homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Daha da önemlisi RT35HC'nin ara-yerlerde bulunmadığı ve yüklenen FDM miktarının (%70) tamamının karbon kabuklara girdiği tespit edilmiştir. Bu da nano-kapsüllerin ısıya maruz kaldığında FDM erime sürecinden sonra herhangi bir sızıntının olmayacağına işaret ettiği söylenebilir. Dahası,

karbon küre kabuklara FDM'nin doldurulması kümeleşmenin önüne geçtiğini ve nano-kapsül dağılımının homojen hale geldiği de görülmektedir. Şekil 4.5c dikkatli bir şekilde incelendiğinde, karbon kabukların tam kapasitede dolmadığı görünmektedir ki bu istenilen bir durumdur. Çünkü FDM'lerin erime sürecinde hacim genişlemesinden dolayı kabuk malzemenin zarar görmemesi ve bunun sonucunda sızıntı olayının gerçekleşmemesi için hacim genişlemesinin tolere edilebilmesi açısından önemli bir durumdur.



Şekil 4.5: a) karbon küre kabukların, b), c) ve d) nano-kapsüllerin farklı büyütme ölçeklerinde alınan TEM görüntüleri

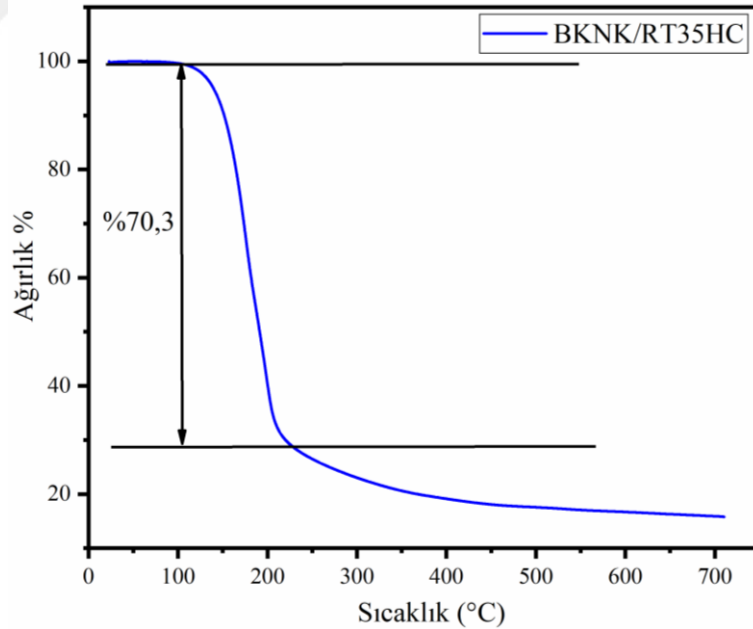
4.2. Sentezlenen Nano-kapsüllerin Termal Analizi

FDM'lerin termal uygulamalardaki en önemli işlevi, erime ve katılaşma süreçleri sırasında termal enerjiyi depolamak ve serbest bırakmaktır. FDM'lerin termal iletkenliği (k), füzyon ve kristalleşme sırasında enerji depolama ve geri kazanım oranlarını önemli ölçüde etkiler. FDM'lerin termal iletkenlik değerleri azaldıkça, enerji depolama ve geri kazanım oranları da azalır ve böylece FDM'lerin uygulama aralıkları önemli ölçüde sınırlanmış olur. Bu nedenle, daha yüksek termal iletkenlik değerlerine sahip FDM'ler termal enerji yönetimindeki

verimlilikleri nedeniyle tercih edilir (Arshad vd., 2020a). Oda sıcaklığında pelet haline getirilen saf RT35HC ve nano-kapsüllerin termal iletkenlik değerleri sırasıyla, 0,197 ve 0,532 W/mK olarak ölçülmüştür. RT35HC'nin karbon küre kabuklara yüklenmesi sayesinde meydana gelen termal iletkenlik değerindeki %170'lik iyileşme, karbonun yüksek termal iletkenlik değerine sahip olmasına ve karbon küre kabukların çaplarının çok düşük (bakınız SEM ve TEM analizi) olmasından ileri gelen aktif geniş yüzey alanı sayesinde karbon küre kabuklar ile RT35HC'nin arasındaki etkileşim oranının iyileşerek arayüzey termal kontak dirençlerinin düşmesine atfedilebilir (Tumirah vd., 2014), (Arshad vd., 2021b), (Öztop vd., 2024), (P. Kumar vd., 2024). Literatürde çalışılan benzer malzemelerin termal iletkenlikleri mevcut tez çalışmasında elde edilen termal iletkenlik değerine yakın olduğu görülmektedir (Chen vd., 2020), (Wan vd., 2019), (Wu vd., 2021). Nano-kapsülleme sayesinde termal iletkenliğin artması, ısı enerjisinin batarya yüzeyinden soğutulması ve soğurulan enerjinin dış ortama aktarılması süreçlerinin iyileşmesine ve bu erime/katılaşma çevrimlerinin kolaylaşmasına yardımcı olarak nano-kapsüllerin soğutma performansının artmasına neden olmaktadır.

Nano kapsüllenmiş RT35HC'nin termal kararlılığı TGA ile belirlenmiştir. Bu test, bir malzemenin kontrollü bir ortamda kontrollü bir sıcaklık programına tabi tutulmasıyla birlikte ağırlığındaki değişimi sıcaklığa bağlı olarak belirlemek için kullanılmıştır. Üretilen nano-kapsüllerin çalışma sıcaklığı aralığında termal kararlılığını ve karbon küre kabuklara yüklenen RT35HC oranının belirlenebilmesi amacıyla 25-700 °C aralığında dakikada 5°C artışlarla Şekil 4.6'da sergilendiği üzere TGA analizi yapılmıştır. Geniş sıcaklık aralığında verilen TGA eğrisinden anlaşılabileceği üzere, önemli ölçüdeki kütle kaybı yaklaşık olarak 120-225 °C aralığında gerçekleşirken 225-610 °C aralığında kütle kaybı daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Ayrıca, 610 °C'den sonra kütle kayıp oranı neredeyse sabit olduğu görülmektedir. İlk olarak, 120 °C'ye kadar ısıtılmalarda gerçekleşen kütle kaybı nano-kapsüllerde biriken nemden kaynaklanan suya atfedilir (Gülener, 2023). Ancak, TGA eğrisinin 120 °C'ye kadar düz olmasının diğer bir değişle nem kaybının çok az olması, RT35HC'nin aşırı hidrofobik doğasından dolayı nano-kapsüllerdeki nem oranının oldukça düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ağırlık kaybı (R_{wl}) sıcaklığın artmaya devam etmesi birlikte ortaya çıkmaya başlamış ve sıcaklığın daha da artmasıyla arttığı gözlemlenmektedir. Nano-kapsüllerdeki RT35HC'nin başlangıç bozunma sıcaklığı (T_{onset}) 150 °C'de başlamakta ve maksimum bozunma sıcaklığı ise ($T_{maks, bozunma}$) 225°C'dir. Kalıntı miktarı (γ) ise yaklaşık %28,96 olarak belirlenmiştir. RT35HC'nin tamamen bozunması, RT35HC'nin hidrokarbon zincirini monomerlere ($CH_3CH:CH+C$) parçalayan buharlaşmadan kaynaklanmaktadır (P.

Kumar vd., 2024b), (Arshad vd., 2021c). 150-225 °C aralığında meydana gelen %70,3'lük kütle kaybının nano-kapsüllerdeki RT35HC'ye ait olduğu söylenebilir ve bu da RT35HC'nin karbon kabuklara dolum oranının %70'e yakın olduğunu göstermektedir. TEM analizinden görüleceği üzere, RT35HC'nin sadece karbon küre kabuklarda bulunduğu ara yerlerde olmadığı görülmesinden dolayı RT35HC'nin dolum oranının %70 olduğunu desteklemektedir. Dahası elde edilen bu sonuçlar, deneysel yöntemde hedeflenen karbon küre kabuk: RT35HC oranını (30:70) doğrulamaktadır. Ayrıca, 150 °C'ye kadar nano-kapsüllerde bir bozunma gözlemlenmemesi, üretilen nano-kapsüllerin termal kararlılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Termal kararlılığın yüksek olması, karbon küre kabukların yüksek özgül ısı kapasitesine (C_p) ve ısıyı daha hızlı ve düzgün bir şekilde aktarabilen karbon küre kabukların yüksek termal iletkenliğine atfedilebilir (Chen vd., 2017). Dahası, karbon küre kabuklar RT35HC'nin yüzeyini sararak termal bozunma sırasında buharlaşmasını geciktiren koruyucu bir tabaka görevi görmesinden dolayı termal kararlılık iyileştirilmiştir. Bu nedenle, üretilen nano-kapsüllerin LIB'ler ve fotovoltaik modüllerin termal yönetimi için ve termal enerji depolama uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

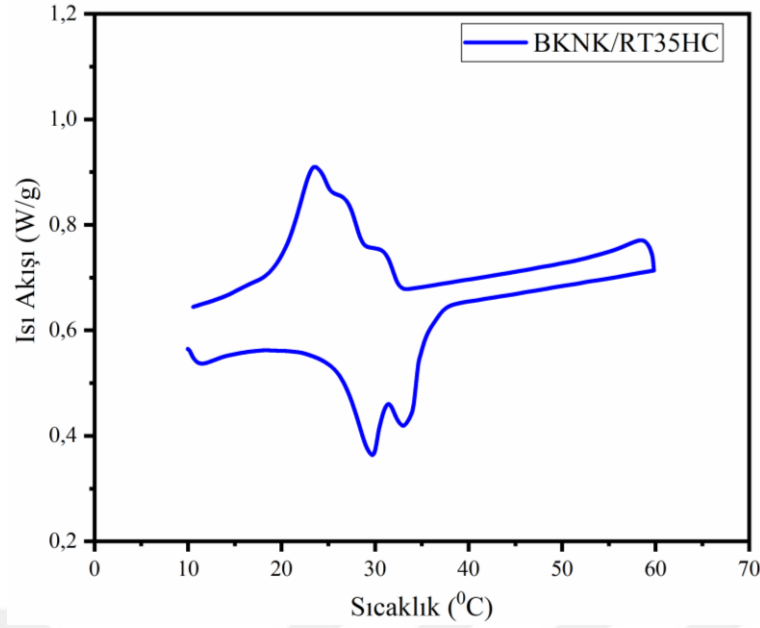


Şekil 4.6: Nano-kapsüllerin TGA eğrileri

DSC, malzemelerin termal özelliklerini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçmek için kullanılır ve elde edilen DSC eğrisi, toplam ölçüm süreci hakkında hızlı bilgi sunar. DSC,

termal özellikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçmek için kullanılır ve bir DSC eğrisi, ölçüm sürecinin tamamına ilişkin hızlı bilgi sunar. Malzemede termal olarak aktif hale geçen ısı üretimi veya tüketimi nedeniyle kararlı durum bozukluğunda, ölçülen ısı akış eğrisinde bir pik gözlenir (He vd., 2004).

Tez çalışmasında üretilen nano-kapsüllerin DSC grafiği şekil 4.7’de sergilenmektedir. Grafikte belirgin endotermik (aşağı yönlü) ve ekzotermik (yukarı yönlü) pikler gözlemlenmektedir. Endotermik pik, RT35HC’nin erime sıcaklığını; ekzotermik pik ise katılaşma sıcaklığına işaret etmektedir. Karbon küre/RT35HC nano-kapsüllerin, erime sırasında iki tepe gözlemlenirken katılaşma sırasında 3 tepe gözlemlenmiştir. Çift erime piki, RT35HC’nin izomorfik kristal formunu gösteren endotermik tepeler atfedilir. Nano-kapsüllerin erime sürecindeki DSC eğrisinde, 29,64 °C ve 33,61 °C’de birbirinden net şekilde ayrılmış iki pik gözlenmektedir. İlk pik, bir kristal fazın başka bir kristal faza dönüşümüne, yani katı-katı faz geçişine karşılık gelmektedir. İkinci pik ise kristalitlerin erime noktası ile ilişkilidir.(Krupa vd., 2007). Dolayısıyla nano-kapsüllerde içerisinde bulunan RT35HC’nin erime sıcaklığının 33,61 °C olduğu rapor edilebilir. Bu elde edilen erime sıcaklığı değeri, üreticinin belirtmiş olduğu değere oldukça yakındır. Diğer taraftan, katılaşma sırasında gözlemlenen üz fazlı geçişin (31,01, 27,08 ve 23,27 °C), soğutma sırasında heterojen çekirdeklenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu gibi durumlarda, tam kristalleşme gerçekleşmeden önce soğutma sırasında metastabil bir rotator faz oluşabilir (Liu, Wang vd., 2017). Bu nedenle, nano-kapsüllerin katılaşmaya başlama sıcaklığının 31,01 °C’de başladığı ve 23,27 °C’de ise katılaşmanın tamamlandığı söylenebilir. Benzer sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarda uyum içerisinde (Öztop vd., 2024b). Dahası ekzotermik profilden, FDM’nin katılaşma sıcaklıklarının erime sıcaklıklarından biraz daha düşük olduğu görülmüştür ki bu da bir aşırı soğutma (supercooling) etkisine işaret etmektedir (Methaapanon vd., 2020). Ayrıca, nano-kapsüllerin erime sürecindeki gizli ısı kapasitesinin (ΔH) 163,8 J/g olduğu tespit edilmiştir. %70 kapsülleme oranı düşünüldüğünde elde edilen ΔH değerinin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, üretilen nano-kapsüllerin erime ve katılaşma sıcaklıkları daha da önemlisi gizli ısı kapasitesi birlikte düşünüldüğünde, nano-kapsüllerin BTYS’de kullanımının oldukça uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.7: Üretilen nano-kapsüllerin DSC analizi

4.3. Nano-kapsüllerin Sızdırmazlık Testi

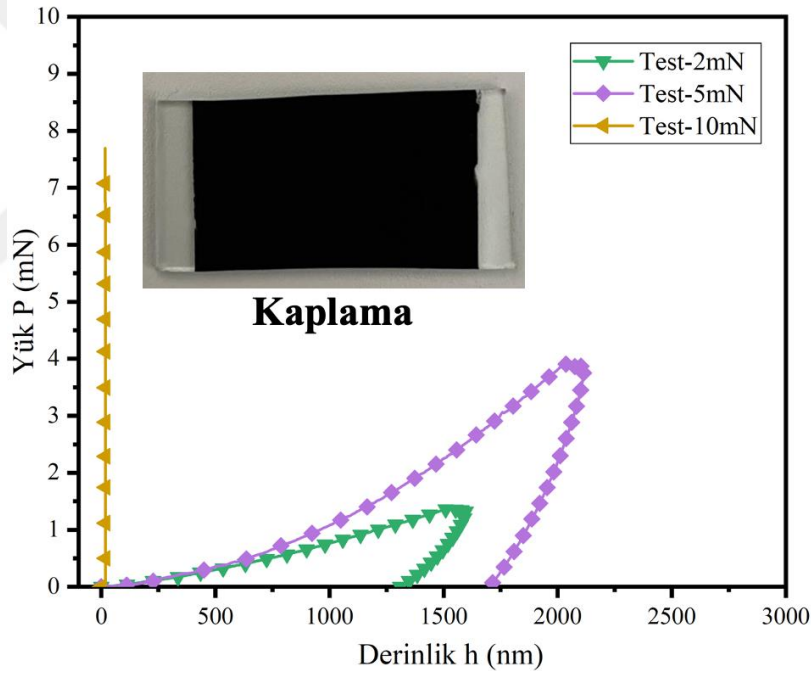
Sızdırmazlık testleri, üretilen nano-kapsüllerdeki RT35HC'nin erime sürecinde karbon kabuklardan sızıntı durumlarını ve çoklu erime/katılaşma çevrimleri sonucunda herhangi bir sızıntının olup olmadığını gözlemlemek amacı ile gerçekleştirilmiştir. İlk etapta, 50 mg ağırlığındaki nano-kapsüllere oda koşullarında 24 saat boyunca 70 °C sıcaklık uygulanmış ve daha sonra doğal soğumaya bırakılmıştır. Bu sürecin sonunda nano-kapsüllerin ağırlıkları 49,3 mg olarak ölçülmüştür. Filtre kâğıdı gözlemlendiğinde, herhangi bir ıslaklık görülmemesine karşın ilk ve son ağırlıklar kıyaslandığında yaklaşık olarak %1,4 gibi küçük bir sızıntının gerçekleştiği ortaya çıkmıştır. Üretilen nano-kapsüllerin 70 °C gibi yüksek sıcaklığa sürekli olarak uzun bir süre (24 saat) maruz bırakıldığı halde içerisindeki FDM'nin karbon kabukların dışına sızmadığının nedeni olarak karbon kabukların gözenekli yapısı sayesinde kapiler etkinin (kuvvetlerinin) en üst düzeye çıkararak FDM'nin gözeneklere tutunmasını sağlaması olduğu söylenebilir (Zang vd., 2015). Ayrıca, RT35HC'nin mezogözenekli karbon kabuklarla olan geniş etkileşimi, yüzey etkileşimleri olan Van der Waals kuvvetleri ve hidrofilik/hidrofobik yüzey özellikleri ile güçlendirilir. Karbon küre kabukların yüzeyi genellikle hidrofobik olup, RT35HC ile uyumlu bir yüzey enerjisine sahiptir. Van der Waals kuvvetleri, RT35HC'nin moleküllerinin karbon kabuğun gözeneklerine tutunmasını sağlayarak karbon küre içinde hapsolmesini sağlar. Böylece

sızdırmazlık sağlanmış olur. Dahası, mezogözenekli karbon kabuklar, faz değişimi sırasında FDM'nin sıvı halde akmasını önlemek için fiziksel bir bariyer görevi görür. FDM'nin gözenek içinde tutulması, gözeneklerin iç yapısına bağlıdır. Mezogözeneke çaplarının küçük olması ve yüksek yüzey alanı (bakınız BET analizi), FDM'nin gözenek içinde kapalı kalmasını destekler. Gözenek içindeki nano boyutlu karbon duvarları, RT35HC'nin faz geçişi sırasında dışarı akmasını engelleyen bir çerçeve oluşturur (X. Kong vd., 2024). Diğer taraftan, aynı sızdırmazlık düzeneği kullanılarak, 49,3 mg ağırlığındaki nano-kapsüller 1 saat 70 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 1 saat doğal soğutmaya bırakılmıştır. Bu erime/katılaşma çevrimi 15 defa ardışık olarak tekrar edilmiştir. Sürecin tamamlanmasından sonra nano-kapsüllerin ağırlığı ölçülmüş ve herhangi bir ağırlık kaybı gözlemlenmemiştir bu da herhangi bir sızıntının olmadığına işaret etmektedir. Bu da üretilen nano-kapsüllerin termal karlılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Dahası, RT35HC/Karbon küre yapılı nano-kapsüllerin başta LIB'ler olmak üzere fotovoltaik modüllerin termal yönetimi için ve ayrıca birçok termal enerji depolama uygulamalarında kullanılması sızıntı açısından güvenli ve termal olarak uzun süreli kullanılabilmesi söylenebilir.

4.4. Sentezlenen Nano-kapsüllerin Nano-mekanik Analizi

Üretilen nano-kapsüllerin termal yönetim sisteminde kullanılmak üzere batarya yüzeyine ya da herhangi bir yüzeye kaplanması durumunda sahip olabileceği mekanik dayanımlarını incelemek amacı ile nano-kapsüller Şekil 4.8 iç kısımda gösterildiği gibi cam yüzeyine kaplanarak Nano İndentasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de, 2, 5 ve 10 mN yük uygulanarak elde edilen yük-derinlik eğrileri gösterilmektedir. Yük-derinlik eğrileri girinti testi yükleme, tutma ve boşaltma aşamalarından oluşmaktadır. 2 mN ve 5 mN yük durumunda batma derinliğinin maksimum değerleri sırasıyla, 1603 ve 3504 nm olarak belirlenmiştir. Elde edilen eğriler kullanılarak nano-kapsül tabakanın Elastisite Modülü (E) ve Sertlik Değeri (H) belirlenmiştir. Sertlik değeri, mikro-yapıda bulunan nano/mikro yapısal özüllere bağlı olup, atomlar arasındaki bağlara ve bağların sıkıştırma, büzülme veya kırılma sebebi ile meydana gelen şekil değişikliğine gösterdiği zorlukla ilgilidir (T. K. Gupta vd., 2013). Elastisite modülü ise, malzemenin kimyasal bileşimi, mikroyapısı, birim alandaki tane sınırı sayısı, sıcaklığı ve gözeneklilik derecesi gibi faktörlere bağlıdır. Malzeme mühendisliğinde bu faktörler kontrol edilerek istenen rijitlik özellikleri sağlanabilir. Yük-batma derinliği eğrilerinden, 2 mN yük uygulandığında E ve H değeri sırasıyla, 1,03 GPa ve

23,6 MPa ve 5 mN yük uygulanması durumunda 1,50 GPa ve 39,1 MPa olarak hesaplanamamıştır. Bu, artan yük ile derinliğin etkilediği alan ve hacmin sürekli olarak arttığını, dolayısıyla batma tepkisinin kademeli olarak tüm kaplama tepkisine yaklaştığını gösterir. Bu sonuç, artan batma yükü ile mekanik verilerin azalan standart sapmalarından da türetilir (J. Wang vd., 2022). Ayrıca, artan yük değeri ile elde edilen E ve H değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, 10 mN yük uygulandığında Şekil 4.8’de gösterildiği gibi yük-derinlik eğrisi oluşmamaktadır bu da 10 mN yük altında kaplamanın mekanik dayanımının düşük olduğuna işaret etmektedir. Dolayısıyla, 10 mN yük uygulandığında mekanik özellikler de hesaplanamamıştır. Ortalama olarak nano-kapsül kaplamanın E ve H değerlerinin sırasıyla, 1,03-1,5 GPa ve 23,6-39,1 MPa aralıklarında olduğu söylenebilir. Elde edilen bu sonuçlardan üretilen nano-kapsüllerin yüzeylere kaplanarak termal yönetim sistemlerinde kullanılması mekanik açıdan kararlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.8: Üretilen nano-kapsüllerin farklı kuvvetler altında ölçülen kuvvet-derinlik eğrileri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mezogözenekli küre kabuklar başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Sentezlenen küre kabukların fiziksel karakterizasyonları tamamlandıktan sonra, parafin bazlı faz değiştiren malzeme (FDM) olan RT35HC ile yüklenerek RT35HC/karbon küre yapıları nano-kapsüller ilk defa bu tez çalışmasında üretilmiştir. Üretilen nano-kapsüllerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Karbon küre kabuk ve nano-kapsüllerin karakterizasyon analizleri sonucunda;

- 1) Üretilen karbon kürelerin çapının 60 nm ve saflık derecesinin ise %99,8 olduğu (SEM, TEM ve EDX),
- 2) Karbon kürelerinin içi boş (küre kabuk), yüzey alanının 1990.663 m²/g ve toplam gözenek hacminin 7,628 cc/g olduğu (BET ve TEM),
- 3) Karbonun yüksek termal iletkenliği ve karbon küre kabukların geniş yüzey alanı sayesinde RT35HC'nin termal iletkenliğinin 0,197 W/m·K'den 0,532 W/m·K'ye yükseltildiği,
- 4) RT35HC'nin tamamının karbon kabuklara başarılı bir şekilde %70 oranında yüklendiği (TGA ve DSC),
- 5) Nano-kapsüllerin bozunmaya başlama sıcaklığının 150 °C olduğu ve termal olarak kararlı olduklarını (TGA),
- 6) Nano-kapsüllerin gizli ısı kapasitesinin (ΔH) 163,8 J/g olduğu (DSC)
- 7) 70°C'de 24 saatlik ısıtıl işlem sonrası sızıntı oranının yalnızca %1,4 gibi düşük bir değerde kaldığı ve 15 defa erime/katılaşma çevriminden sonra herhangi bir sızıntının olmadığı (Sızdırmazlık Testi),
- 8) Ortalama olarak nano-kapsül kaplamasının Elastisite modülü ve Sertlik değerlerinin sırasıyla, 1,03-1,5 GPa ve 23,6-39,1 MPa aralıklarında olduğu tespit edilmiştir (Nano İndentasyon testi).

Elde edilen bulgular, RT35HC/karbon küre nano-kapsüllerin özellikle LIB'lerin ve fotovoltaiik termal yönetim sistemlerinde ve akıllı termal yalıtım, atık ısı geri kazanımı, yenilenebilir enerji entegrasyonu, tarım ve gıda saklama gibi birçok termal enerji depolama uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, gelecek çalışmaları olarak, nano-kapsüllerin termal performansını daha da iyileştirmek amacı ile üretilen karbon küre kabukların çapları değiştirilerek ısı depolama kapasitesi ve termal iletim katsayısı açısından en uygun küre çapları belirlenebilir. Dahası, RT35HC'nin kabuklara en

uygun yükleme oranının belirlenmesi de nano-kapsüllerin termal performansı açısından önem arz etmektedir. Söz konusu optimizasyonlar yapıldıktan sonra uygun şartlarda üretilen nano-kapsüller LIB’lerin termal kontrolünde oldukça verimli olacağı söylenebilir.



KAYNAKLAR

- Abakumov, A. A., Bychko, I. B., Voitsihovska, O. O., Rudenko, R. M., & Strizhak, P. E. (2024). Tuning the surface area of reduced graphene oxide by modulating graphene oxide concentration during hydrazine reduction. *Materials Letters*, 354, 135417. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2023.135417>
- Arshad, A., Jabbal, M., Shi, L., Darkwa, J., Weston, N. J., & Yan, Y. (2021a). Development of TiO₂/RT-35HC based nanocomposite phase change materials (NCPCMs) for thermal management applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100865. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100865>
- Arshad, A., Jabbal, M., Shi, L., Darkwa, J., Weston, N. J., & Yan, Y. (2021b). Development of TiO₂/RT-35HC based nanocomposite phase change materials (NCPCMs) for thermal management applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100865. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100865>
- Arshad, A., Jabbal, M., Shi, L., Darkwa, J., Weston, N. J., & Yan, Y. (2021c). Development of TiO₂/RT-35HC based nanocomposite phase change materials (NCPCMs) for thermal management applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100865. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100865>
- Arshad, A., Jabbal, M., & Yan, Y. (2020a). Preparation and characteristics evaluation of mono and hybrid nano-enhanced phase change materials (NePCMs) for thermal management of microelectronics. *Energy Conversion and Management*, 205, 112444. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112444>
- Arshad, A., Jabbal, M., & Yan, Y. (2020b). Thermophysical characteristics and application of metallic-oxide based mono and hybrid nanocomposite phase change materials for thermal management systems. *Applied Thermal Engineering*, 181, 115999. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115999>
- Azimi Yancheshme, A., Allahdini, A., Maghsoudi, K., Jafari, R., & Momen, G. (2020). Potential anti-icing applications of encapsulated phase change material-embedded coatings; a review. *Journal of Energy Storage*, 31, 101638. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101638>
- Ben Khedher, N., Mahdi, J. M., Majdi, H. S., Al-Azzawi, W. K., Dhahbi, S., & Talebizadehsardari, P. (2022). A hybrid solidification enhancement in a latent-heat storage system with nanoparticles, porous foam, and fin-aided foam strips. *Journal of Energy Storage*, 56, 106070. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.106070>
- Borah, R., Hughson, F. R., Johnston, J., & Nann, T. (2020). On battery materials and methods. *Materials Today Advances*, 6, 100046. <https://doi.org/10.1016/J.MTADV.2019.100046>

- Cao, K. L. A., Kitamoto, Y., Iskandar, F., & Ogi, T. (2021). Sustainable porous hollow carbon spheres with high specific surface area derived from Kraft lignin. *Advanced Powder Technology*, 32(6), 2064–2073. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2021.04.012>
- Cao, M., Huang, J., & Liu, Z. (2020). The Enhanced Performance of Phase-Change Materials via 3D Printing with Prickly Aluminum Honeycomb for Thermal Management of Ternary Lithium Batteries. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 8167386. <https://doi.org/10.1155/2020/8167386>
- Cao, Z., Yang, Y., Qin, J., & Su, Z. (2021). A core-shell porous MnO₂/Carbon nanosphere composite as the anode of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 491, 229577. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2021.229577>
- Cárdenas-Ramírez, C., Jaramillo, F., & Gómez, M. (2020a). Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 30, 101495. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101495>
- Cárdenas-Ramírez, C., Jaramillo, F., & Gómez, M. (2020b). Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 30, 101495. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101495>
- Chandel, S. S., & Agarwal, T. (2017). Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 581–596. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.09.070>
- Chen, Y., Ding, H., Gao, J., Tang, X., Liu, Y., & Yang, M. (2020). A novel strategy for enhancing the thermal conductivity of shape-stable phase change materials via carbon-based in situ reduction of metal ions. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118627. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118627>
- Chen, Y., Luo, W., Wang, J., & Huang, J. (2017). Enhanced Thermal Conductivity and Durability of a Paraffin Wax Nanocomposite Based on Carbon-Coated Aluminum Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(23), 12603–12609. https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.7B02651/ASSET/IMAGES/LARGE/JP-2017-02651K_0010.JPEG
- Cheng, W. L., Liu, N., & Wu, W. F. (2012). Studies on thermal properties and thermal control effectiveness of a new shape-stabilized phase change material with high thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 36(1), 345–352. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.10.046>
- Cheng, Z., Xu, R., & Jiang, P. X. (2021). Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 170, 120902. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.120902>

- Chidambaranathan, B., Vijayaram, M., Suriya, V., Sai Ganesh, R., & Soundarraj, S. (2020). A review on thermal issues in Li-ion battery and recent advancements in battery thermal management system. *Materials Today: Proceedings*, 33, 116–128. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.03.317>
- Debnath, N., Panwar, V., Roy, T., Saha, M., & Pal, K. (2020). Improved dispersion of carbon black in ABS/PANI blend through its acid functionalization and addition of nanoclay, thereby enhancing mechanical and thermal properties. *Polymer Bulletin*, 77(9), 4759–4772. <https://doi.org/10.1007/S00289-019-02979-6/TABLES/3>
- Deng, Y., Feng, C., E, J., Zhu, H., Chen, J., Wen, M., & Yin, H. (2018a). Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*, 142, 10–29. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.06.043>
- Deng, Y., Feng, C., E, J., Zhu, H., Chen, J., Wen, M., & Yin, H. (2018b). Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*, 142, 10–29. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.06.043>
- Elalfy, D. A., Gouda, E., Kotb, M. F., Bureš, V., & Sedhom, B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101482. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2024.101482>
- Fang, G., Chen, Z., & Li, H. (2010). Synthesis and properties of microencapsulated paraffin composites with SiO₂ shell as thermal energy storage materials. *Chemical Engineering Journal*, 163(1–2), 154–159. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2010.07.054>
- Fang, X., Liu, S., Zang, J., Xu, C., Zheng, M. Sen, Dong, Q. F., Sun, D., & Zheng, N. (2013). Precisely controlled resorcinol–formaldehyde resin coating for fabricating core–shell, hollow, and yolk–shell carbon nanostructures. *Nanoscale*, 5(15), 6908–6916. <https://doi.org/10.1039/C3NR01723K>
- Frusteri, F., Leonardi, V., Vasta, S., & Restuccia, G. (2005). Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers. *Applied Thermal Engineering*, 25(11–12), 1623–1633. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2004.10.007>
- Gu, Z., Li, W., Chen, Y., Xia, X., & Liu, H. (2020). Synthesis of the microspherical structure of ternary SiO_x@SnO₂@C by a hydrothermal method as the anode for high-performance lithium-ion batteries. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(5), 2333–2341. <https://doi.org/10.1039/D0SE00053A>
- Gülena, M. (2023). Rapid synthesis of SrTiO₃ nanocubes and replacement of the high-cost platinum electrode with SrTiO₃@PANI nanocomposite in dye-sensitized solar cells. *Synthetic Metals*, 293, 117297. <https://doi.org/10.1016/J.SYNTHMET.2023.117297>

- Gupta, N., Kumar, A., Dhawan, S. K., Dhasmana, H., Kumar, A., Kumar, V., Verma, A., & Jain, V. K. (2020). Metal nanoparticles enhanced thermophysical properties of phase change material for thermal energy storage. *Materials Today: Proceedings*, 32, 463–467. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.164>
- Gupta, T. K., Singh, B. P., Dhakate, S. R., Singh, V. N., & Mathur, R. B. (2013). Improved nanoindentation and microwave shielding properties of modified MWCNT reinforced polyurethane composites. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(32), 9138–9149. <https://doi.org/10.1039/C3TA11611E>
- Halkos, G. E., & Gkampoura, E. C. (2020). Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources. *Energies 2020, Vol. 13, Page 2906*, 13(11), 2906. <https://doi.org/10.3390/EN13112906>
- Hao, S., Wang, Z., & Chen, L. (2016). Amorphous SiO₂ in tunnel-structured mesoporous carbon and its anode performance in Li-ion batteries. *Materials & Design*, 111, 616–621. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.09.020>
- He, B., Martin, V., & Setterwall, F. (2004). Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials. *Energy*, 29(11), 1785–1804. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2004.03.002>
- Heyhat, M. M., Mousavi, S., & Siavashi, M. (2020). Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle. *Journal of Energy Storage*, 28, 101235. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101235>
- Huang, M. J., Eames, P. C., Norton, B., & Hewitt, N. J. (2011). Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7), 1598–1603. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.01.008>
- Huang, R., Li, Z., Hong, W., Wu, Q., & Yu, X. (2020). Experimental and numerical study of PCM thermophysical parameters on lithium-ion battery thermal management. *Energy Reports*, 6, 8–19. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2019.09.060>
- Jiang, K., Liao, G., E, J., Zhang, F., Chen, J., & Leng, E. (2020). Thermal management technology of power lithium-ion batteries based on the phase transition of materials: A review. *Journal of Energy Storage*, 32, 101816. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101816>
- Kapsalis, V., & Karamanis, D. (2016). Solar thermal energy storage and heat pumps with phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 99, 1212–1224. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.01.071>
- Karthikeyan, V., Sirisamphanwong, C., Sukchai, S., Sahoo, S. K., & Wongwuttanasatian, T. (2020). Reducing PV module temperature with radiation based PV module incorporating composite phase change material. *Journal of Energy Storage*, 29, 101346. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101346>

- Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 194(2), 1105–1112. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2009.06.074>
- Kong, Q. Q., Jia, H., Xie, L. J., Tao, Z. C., Yang, X., Liu, D., Sun, G. H., Guo, Q. G., Lu, C. X., & Chen, C. M. (2021). Ultra-high temperature graphitization of three-dimensional large-sized graphene aerogel for the encapsulation of phase change materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106391. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2021.106391>
- Kong, X., Nie, R., & Yuan, J. (2024). ZIF-derived carbon/BN/CMF composite PCM for enhanced latent thermal storage, photothermal conversion, and thermal insulation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 278, 113167. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2024.113167>
- Krupa, I., Miková, G., & Luyt, A. S. (2007). Phase change materials based on low-density polyethylene/paraffin wax blends. *European Polymer Journal*, 43(11), 4695–4705. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2007.08.022>
- Kumar, G. N., Al-Aifan, B., Parameshwaran, R., & Ram, V. V. (2021). Facile synthesis of microencapsulated 1-dodecanol/melamine-formaldehyde phase change material using in-situ polymerization for thermal energy storage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 610, 125698. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2020.125698>
- Kumar, P., Thomas, S., Sobhan, C. B., & Peterson, G. P. (2024a). Activated carbon foam composite derived from PEG400/ Terminalia Catappa as form stable PCM for sub-zero cold energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139993. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.139993>
- Kumar, P., Thomas, S., Sobhan, C. B., & Peterson, G. P. (2024b). Activated carbon foam composite derived from PEG400/ Terminalia Catappa as form stable PCM for sub-zero cold energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139993. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.139993>
- Li, Z., Ma, T., Zhao, J., Song, A., & Cheng, Y. (2019). Experimental study and performance analysis on solar photovoltaic panel integrated with phase change material. *Energy*, 178, 471–486. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.04.166>
- Liang, Y., Ouyang, J., Wang, H., Wang, W., Chui, P., & Sun, K. (2012). Synthesis and characterization of core-shell structured SiO₂@YVO₄:Yb³⁺,Er³⁺ microspheres. *Applied Surface Science*, 258(8), 3689–3694. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2011.12.006>
- Liu, H., Wang, X., & Wu, D. (2017). Fabrication of Graphene/TiO₂/Paraffin Composite Phase Change Materials for Enhancement of Solar Energy Efficiency in Photocatalysis and Latent Heat Storage. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(6), 4906–4915.

https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.7B00321/ASSET/IMAGES/LARGE/S-C-2017-003214_0006.JPEG

- Liu, H., Wang, X., Wu, D., & Ji, S. (2019). Morphology-controlled synthesis of microencapsulated phase change materials with TiO₂ shell for thermal energy harvesting and temperature regulation. *Energy*, 172, 599–617.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.01.151>
- Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304–330.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.08.016>
- Lu, M., Zhang, X., Ji, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2020). Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101155.
<https://doi.org/10.1016/J.EST.2019.101155>
- Mabrouk, R., Naji, H., Benim, A. C., & Dhahri, H. (2022). A State of the Art Review on Sensible and Latent Heat Thermal Energy Storage Processes in Porous Media: Mesoscopic Simulation. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 6995, 12(14), 6995.
<https://doi.org/10.3390/APP12146995>
- Maiorino, A., Cilenti, C., Petruzzello, F., & Aprea, C. (2024). A review on thermal management of battery packs for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 238, 122035. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.122035>
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M., & Fowler, M. (2017). Experimental Investigation of a New Passive Thermal Management System for a Li-Ion Battery Pack Using Phase Change Composite Material. *Electrochimica Acta*, 257, 345–355.
<https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2017.10.051>
- Mehrali, M., Tahan Latibari, S., Mehrali, M., Mahlia, T. M. I., Sadeghinezhad, E., & Metselaar, H. S. C. (2014). Preparation of nitrogen-doped graphene/palmitic acid shape stabilized composite phase change material with remarkable thermal properties for thermal energy storage. *Applied Energy*, 135, 339–349.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.08.100>
- Methaapanon, R., Kornbongkotmas, S., Ataboonwongse, C., & Soottitantawat, A. (2020). Microencapsulation of n-octadecane and methyl palmitate phase change materials in silica by spray drying process. *Powder Technology*, 361, 910–916.
<https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2019.10.114>
- Murali, G., Sravya, G. S. N., Jaya, J., & Naga Vamsi, V. (2021). A review on hybrid thermal management of battery packs and its cooling performance by enhanced PCM. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111513.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111513>

- Nikpourian, H., Bahramian, A. R., & Abdollahi, M. (2020a). On the thermal performance of a novel PCM nanocapsule: The effect of core/shell. *Renewable Energy*, 151, 322–331. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.11.027>
- Nikpourian, H., Bahramian, A. R., & Abdollahi, M. (2020b). On the thermal performance of a novel PCM nanocapsule: The effect of core/shell. *Renewable Energy*, 151, 322–331. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.11.027>
- Oya, T., Nomura, T., Okinaka, N., & Akiyama, T. (2012). Phase change composite based on porous nickel and erythritol. *Applied Thermal Engineering*, 40, 373–377. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.02.033>
- Öymen, G. (2020). YENİLENEBİLİR ENERJİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNDEKİ ROLÜ. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(39), 1069–1087. <https://doi.org/10.46928/ITICUSB.769022>
- Öztop, H. F., Gürgeç, E., & Gür, M. (2024a). Thermophysical properties and enhancement behavior of novel B4C-nanoadditive RT35HC nanocomposite phase change materials: Structural, morphological, thermal energy storage and thermal stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 272, 112909. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2024.112909>
- Öztop, H. F., Gürgeç, E., & Gür, M. (2024b). Thermophysical properties and enhancement behavior of novel B4C-nanoadditive RT35HC nanocomposite phase change materials: Structural, morphological, thermal energy storage and thermal stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 272, 112909. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2024.112909>
- Pan, M., & Lai, W. (2017). Cutting copper fiber/paraffin composite phase change material discharging experimental study based on heat dissipation capability of Li-ion battery. *Renewable Energy*, 114(PB), 408–422. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.07.004>
- Park, C., & Jaura, A. K. (2003). Dynamic Thermal Model of Li-Ion Battery for Predictive Behavior in Hybrid and Fuel Cell Vehicles. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-2286>
- Patel, J. R., & Rathod, M. K. (2020). Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 480, 228820. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2020.228820>
- Qiu, Z., Ma, X., Zhao, X., Li, P., & Ali, S. (2016). Experimental investigation of the energy performance of a novel Micro-encapsulated Phase Change Material (MPCM) slurry based PV/T system. *Applied Energy*, 165, 260–271. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.11.053>
- Qureshi, Z. A., Elnajjar, E., Al-Ketan, O., Al-Rub, R. A., & Al-Omari, S. B. (2021). Heat transfer performance of a finned metal foam-phase change material (FMF-PCM)

- system incorporating triply periodic minimal surfaces (TPMS). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 170, 121001.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121001>
- Rehman, T. ur, Ali, H. M., Saieed, A., Pao, W., & Ali, M. (2018). Copper foam/PCMs based heat sinks: An experimental study for electronic cooling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 381–393.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.07.120>
- Review, D. M., Elektrikli, A., Batarya, A., Sistemleri, Y., Bir, Ü., Çalışması, D., Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., Tan, N., Kelimeler, A., Elektrikli, Ö., Batarya, A., Sistemi, Y., Termal, B., Batarya, Y., Kestirimi, D., Yönetim, B., & Türleri, S. (n.d.). *A Review Study on Battery Management Systems in Electric Vehicles*. Retrieved November 3, 2024, from <http://dergipark.gov.tr/gujisa>
- Richard, M. N., & Dahn, J. R. (1999). Accelerating Rate Calorimetry Study on the Thermal Stability of Lithium Intercalated Graphite in Electrolyte. I. Experimental. *Journal of The Electrochemical Society*, 146(6), 2068–2077.
<https://doi.org/10.1149/1.1391893/XML>
- Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., Li, C., Zhang, F., Null, V., Parkes, M., Patel, Y., Wang, Y., Wang, H., Ouyang, M., Offer, G., & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. *Journal of Power Sources*, 525, 231094. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2022.231094>
- Sarı, A., Alkan, C., Bilgin, C., & Bicer, A. (2018). Preparation, Characterization and Thermal Energy Storage Properties of Micro/Nano Encapsulated Phase Change Material with Acrylic-Based Polymer. *Polymer Science - Series B*, 60(1), 58–68.
<https://doi.org/10.1134/S1560090418010128/METRICS>
- Sato, N., & Yagi, K. (2000). Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles. *JSAE Review*, 21(2), 205–211. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(99\)00096-X](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(99)00096-X)
- Shiao, H. C., Chua, D., Lin, H. P., Slane, S., & Salomon, M. (2000). Low temperature electrolytes for Li-ion PVDF cells. *Journal of Power Sources*, 87(1–2), 167–173.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00470-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00470-X)
- Smith, J., Singh, R., Hinterberger, M., & Mochizuki, M. (2018). Battery thermal management system for electric vehicle using heat pipes. *International Journal of Thermal Sciences*, 134, 517–529.
<https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2018.08.022>
- Souayfane, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Energy and Buildings*, 129, 396–431.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.04.006>

- Sutradhar, J., Kothari, R., & Sahu, S. K. (2022). Melting and solidification analysis of phase change material-metal foam composite with expansion/shrinkage void in rectangular system. *Journal of Energy Storage*, 47, 103596. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.103596>
- Tumirah, K., Hussein, M. Z., Zulkarnain, Z., & Rafeadah, R. (2014). Nano-encapsulated organic phase change material based on copolymer nanocomposites for thermal energy storage. *Energy*, 66, 881–890. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.01.033>
- Wan, Y. chao, Chen, Y., Cui, Z. xing, Ding, H., Gao, S. feng, Han, Z., & Gao, J. kai. (2019). A promising form-stable phase change material prepared using cost effective pinecone biochar as the matrix of palmitic acid for thermal energy storage. *Scientific Reports* 2019 9:1, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47877-z>
- Wang, J., Yang, C., Liu, Y., Li, Y., & Xiong, Y. (2022). Using Nanoindentation to Characterize the Mechanical and Creep Properties of Shale: Load and Loading Strain Rate Effects. *ACS Omega*, 7(16), 14317–14331. https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.2C01190/ASSET/IMAGES/LARGE/AO2C01190_0015.JPEG
- Wang, L., Zhang, G., Zhang, X., Shi, H., Zeng, W., Zhang, H., Liu, Q., Li, C., Liu, Q., & Duan, H. (2017). Porous ultrathin carbon nanobubbles formed carbon nanofiber webs for high-performance flexible supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(28), 14801–14810. <https://doi.org/10.1039/C7TA03445H>
- Weragoda, D. M., Tian, G., Burkitbayev, A., Lo, K. H., & Zhang, T. (2023). A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120070. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120070>
- Wu, S., Chen, Y., Chen, Z., Wang, J., Cai, M., & Gao, J. (2021). Shape-stabilized phase change material with highly thermal conductive matrix developed by one-step pyrolysis method. *Scientific Reports* 2021 11:1, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-80964-8>
- Xin, S., Wang, C., & Xi, H. (2023). Thermal management scheme and optimization of cylindrical lithium-ion battery pack based on air cooling and liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120100. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120100>
- Xu, C., Zhang, H., & Fang, G. (2022). Review on thermal conductivity improvement of phase change materials with enhanced additives for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 51, 104568. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.104568>
- Yang, S., Wang, S., Liu, X., & Li, L. (2019). Biomass derived interconnected hierarchical micro-meso-macro- porous carbon with ultrahigh capacitance for supercapacitors. *Carbon*, 147, 540–549. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2019.03.023>

- Yoo, J. M., Shin, H., Chung, D. Y., & Sung, Y. E. (2022). Carbon Shell on Active Nanocatalyst for Stable Electrocatalysis. *Accounts of Chemical Research*, 55(9), 1278–1289.
https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.1C00727/ASSET/IMAGES/LARGE/AR1C00727_0006.JPEG
- Yuan, H., Bai, H., Chen, H., Zhang, Z., An, H., & Tian, W. (2021a). Synthesis and properties of high thermal conductivity Ag shell-coated phase change materials. *Renewable Energy*, 179, 395–405. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.07.025>
- Yuan, H., Bai, H., Chen, H., Zhang, Z., An, H., & Tian, W. (2021b). Synthesis and properties of high thermal conductivity Ag shell-coated phase change materials. *Renewable Energy*, 179, 395–405. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.07.025>
- Yuan, H., Bai, H., Lu, X., Zhang, X., Zhang, J., Zhang, Z., & Yang, L. (2019). Size controlled lauric acid/silicon dioxide nanocapsules for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 243–257.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2018.11.019>
- Zang, J., An, T., Dong, Y., Fang, X., Zheng, M., Dong, Q., & Zheng, N. (2015). Hollow-in-hollow carbon spheres with hollow foam-like cores for lithium–sulfur batteries. *Nano Research*, 8(8), 2663–2675. <https://doi.org/10.1007/S12274-015-0773-3/METRICS>
- Zhang, S. S., Xu, K., & Jow, T. R. (2003). The low temperature performance of Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 115(1), 137–140. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00618-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00618-3)
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., & Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, 238, 121652.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121652>
- Zhang, Y. Q., Li, L., Sadiq, M., & Chien, F. S. (2024). The impact of non-renewable energy production and energy usage on carbon emissions: Evidence from China. *Energy and Environment*, 35(4), 2248–2269.
https://doi.org/10.1177/0958305X221150432/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0958305X221150432-FIG3.JPEG
- Zhu, Y., Liang, S., Wang, H., Zhang, K., Jia, X., Tian, C., Zhou, Y., & Wang, J. (2016). Morphological control and thermal properties of nanoencapsulated n-octadecane phase change material with organosilica shell materials. *Energy Conversion and Management*, 119, 151–162. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.04.049>
- Zou, D., Liu, X., He, R., Zhu, S. X., Bao, J., Guo, J., Hu, Z., & Wang, B. (2019). Preparation of a novel composite phase change material (PCM) and its locally enhanced heat transfer for power battery module. *Energy Conversion and Management*, 180, 1196–1202. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.11.064>

Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., & Hu, Y. (2018). Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 33–41.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2017.12.024>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Vedat Emin AYAZ

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Yüksek Lisans Öğrenimi : Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller :

İş Deneyimi

Yayınlar

- 1- Tas,R., Koroglu,E., Ayaz, V.E., (2023), Synthesis o NiSe₂ materials directly on Ni foam microwave assisted technique and employin electrode material in supercapacitors, Journal Advanced Applied Sciences, 18.12.2023
- 2- Mahir Gülen, Recep Taş, Hamza Dünya, Veda Emin Ayaz, “Design of MnS@MWC Nanocomposite Cathode for Ultra-high Effic Supercapacitors”, 20/06/2023, Internation Conference on Pioneer and Innovative Stud 2023, Konya, Tam Metin
- 3-Vedat Emin AYAZ, Mahir GÜLEN, Recep TAŞ a Hamza DÜNYA, ‘’Applicability of Micro Synthesized BaO/CaO Composite Supercapacitor as Cathode’’, 20/09/2024 International Conference on Scientific Innovative Studies 2024, Konya, Tam Metin