



**T. C.
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİMÜLATİF BİR BATARYA PAKETİNİN PASİF TERMAL
KORUNUMU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serkan COŞKUN
(201492181122)**

Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Ümit Nazlı TEMEL

**SİVAS
MAYIS 2019**

Serkan COŞKUN 'nun hazırladığı “Simülatif Bir Batarya Paketinin Pasif Termal Korunumu “adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ENERJİ BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Dr.Öğr. Üyesi Ümit Nazlı TEMEL**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof.Dr. M. Serdar GENÇ**
Erciyes Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Koray KARABULUT**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İsmail ÇELİK
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-622 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© SERKAN COŞKUN



Çalışma sırasında bana destek olan aileme ve tüm arkadaşlarıma...

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

22.05.2019

SERKAN COŞKUN

TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi ÜmitNazlı TEMEL'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren hocamız Doç. Dr. Kerim YAPICI' ya çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimin başlangıcından beri maddi ve manevi her zaman yanımda olan, yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-622 No' lu projeye desteklenmiştir.

ÖZET

SİMÜLATİF BİR BATARYA PAKETİNİN PASİF TERMAL KORUNUMU

Serkan COŞKUN

Yüksek Lisans Tezi

Enerji Bilimleri ve Teknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ümit Nazlı TEMEL

2019, 54+xvi sayfa

Bu çalışmada simülatif bir batarya paketinin termal olarak korunması amacıyla faz değişken malzemelerin pasif ısı depolama birimi olarak kullanılması ele alınmıştır. Lityum-iyon batarya paketlerinin pasif termal korunması 41°C-44°C arasında gerçekleşmektedir. Farklı kütle oranlarda eklenen GNP nanoparçacık katkısının RT-44 erime sıcaklığı üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. %7 GNP katkılanarak elde edilen GNP/RT-44 kompozitinin DSC özellikleri üzerindeki etkileri incelenip ve en iyi performansı gözlemlenmiştir. Lityum-iyon batarya paketlerinin termal performansları maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkı değerlerinde doğal taşınım ile karşılaştırarak incelenmiştir. Başlıca önemli gözlemler: 1) Isıl iletkenlik RT-44 için katı halden sıvı hale geçerken önemli ölçüde azalmaktadır, 2) RT-44 içerisine eklenen GNP nano parçacıkları hem katı halde hem de sıvı halde termal korunumu artırmaktadır; katı halde ısı iletkenliği daha iyileşmektedir, 3) GNP nanoparçacıkların RT-44 içerisindeki homojen dağılımları ve miktarının (%7 maksimum) ısı transferi açısından önem arz etmektedir, 4) 1.3W,

2.75 W, ve 3.90 W deşarj hızında çalıştırılan batarya paketleri GNP/RT-44 kompoziti ile pasif termal korumasının RT-44 maksimum sıcaklık açısından belli oranlarda termal performansı iyileştirilmiştir, 5) Maksimum sıcaklık kriteri açısından GNP/RT-44 pasif termal korunmasının RT-44'e göre oldukça belirgin gelişim göstermektedir. Kısacası karşılaştırmalarla dinamik termal ısı değerlerin ve deşarj/soğutma çevrimleri neticesinde elde edilen sonuç GNP nano parçacıklarının RT-44'e göre iletkenliği önemli oranlarda artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Li-ion pil, Faz değişken malzemeler(FDM), nanoparçacık, ısı iletkenlik

ABSTRACT


PASSIVE THERMAL PROTECTION OF A SIMULATED BATTERY PACK

Serkan COŞKUN

Energy Science and Technology Engineering Department

Supervisor: Yrd.Doç. Ümit Nazlı TEMEL

2019, 54 pages



In this study, the use of phase variable materials as a passive heat storage unit for thermal protection of a simulated battery pack is studied. Passive thermal protection of lithium-ion battery packs takes place between 41⁰C-44⁰C. The effect of the added GNP nanoparticle with different amounts is investigated in depth on the melting temperature of RT-44. The GNP / RT-44 composite obtained with the amount percentage of 7% GNP is carefully examined on DSC features and the best performance results are obtained. The thermal performance of the lithium-ion battery packs is then compared with the natural convection at maximum temperature and maximum temperature difference. Main crucial observations are: 1) Thermal conductivity is significantly decreased when changing phase from solid to liquid of RT-44, 2) GNP nanoparticles added to RT-44 increase thermal dissipation in both solid and liquid form; solid conductivity presents better results, 3) GNP nanoparticles are important in terms of heat transfer in homogeneous distributions with a certain amount (7% maximum) in RT-44, 4) 1.3W, 2.75 W, and 3.90W discharge speed operated battery packs GNP / RT-44 , the thermal performance of the passive thermal protection RT-44 with GNP composite has been improved at a certain rate in

terms of thermal performance. As a result of the dynamic thermal values and the discharge / cooling cycles, the demonstrated results have proven that the conductivity of GNP nanoparticles is significantly improved.

Key Words: Lithium-ion cell, Phase Change Materials (PCM), nanoparticles, thermal conductivity



İÇİNDEKİLER

ETİK	vi
TEŞEKKÜR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	x
İÇİNDEKİLER	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xv
SİMGELER DİZİNİ	xvi
1.GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOD	9
2.1. GNP\ FDM Kompozitinin Hazırlanması.....	9
2.2. GNP\ FDM Kompozitlerinin Isıl İletkenliklerinin Ölçümü.....	11
2.3 RT-44 ve GNP-RT-44 Kompozitlerinin Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Özelliklerinin Belirlenmesi.....	14
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER	24
3.1 Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçları.....	24
3.2 DSC Ölçüm Sonuçları.....	27
3.3 Simülatif Batarya Paketinin Isıl Performans Testleri.....	31
4. SONUÇLAR	48
5. KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1	GNP/RT-44 kompozitlerinin hazırlanması.....	10
Şekil 2. 2	Numune kalıbı, numunelerin dökümü ve elde edilen numuneler.....	11
Şekil 2. 3	KD2 Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı	13
Şekil 2. 4	Isıl iletkenlik ölçümlerinin yapıldığı iklimlendirme kabini.....	14
Şekil 2. 5	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)	15
Şekil 2. 6	DSC numunelerinin hazırlanma aşamaları ve DSC cihazına yerleştirilmesi	16
Şekil 2. 7	DSC-60 cihazının şematik yapısı	18
Şekil 2. 8	DSC'nin şematik gösterimi: 1. fırın,2. örnek madde, 3.inert referans,4.Isıtıcının kontrol birimi, 5.sıcaklık farkı göstergesi, 6.sıcaklık göstergesi[4]	19
Şekil 2. 9	Tipik bir DSC eğrisi	20
Şekil 2. 10	DSC eğrileri: a)Ts: numunenin sıcaklık-zaman eğrisi, Ti: referansın sıcaklık zaman eğrisi, b) sıcaklık farkı zamanlı eğrisi [4]	21
Şekil 2. 11	Simültif pil paketi için deneysel düzenek.....	22
Şekil 3. 1	Isıl iletkenliklerin GNP kütle oranına ve sıcaklığa bağlı değişimleri.....	25
Şekil 3. 2	Isıl iletkenlikte sağlanan iyileşmeler	27
Şekil 3. 3	RT-44'ün DSC analizi	28
Şekil 3. 4	RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerine ait DSC eğrileri.....	29
Şekil 3. 5	GNP kütle oranının erime gizli ısıları üzerindeki etkisi	30
Şekil 3. 6	Simülatif batarya paketinin 1.3W deşarj hızındaki termal cevapları.....	31
Şekil 3. 7	Simülatif batarya paketinin 2.75W deşarj hızındaki termal cevapları.....	34
Şekil 3. 8	Simülatif batarya paketinin 3.90 deşarj hızındaki termal cevapları	36
Şekil 3. 9	Batarya paketinin soğuma performansları (1.3W).....	37
Şekil 3. 10	Batarya paketinin soğuma performansları (2.75W).....	38
Şekil 3. 11	Batarya paketinin soğuma performansları (3.90W).....	39
Şekil 3. 12	Batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık farkı.....	41
Şekil 3. 13	Deşarj/soğutma çevrimleri.....	43
Şekil 3. 14	Deşarj/soğutma çevrimleri boyunca maksimum sıcaklık farkı	46
Şekil 3. 15	Termal kararlılık testleri	47

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2. 1: Nanoparçacıkların fiziksel özellikleri.....	9
Tablo 2. 2 DSC kalibrasyon standart değerleri	17
Tablo 2. 3 Saf İndium metali için 2 °C/dk ısıtma hızı uygulanarak DSC'den elde edilen erime sıcaklığı ve gizli ısı değerleri	17
Tablo 3. 1 DSC özellikleri (Sıcaklık)	29



KISALTMALAR DİZİNİ

FDM	: Faz değişken malzemeler
DSC	: Diferansiyel tarama kalorimetresi
DTA	: Diferansiyel termal analiz
CNF	: Carbon nanofiber(karbon nanofiber)
GnP	: Graphene nanoplatelet(Grafen nanoyaprak)
MWCNT	: Multi-walled carbon nanotubes (çoklu duvar karbon nanotüp)
SWCNT	: Single-walled carbon nanotubes (tekli duvar karbon nanotüp)
ET	: Elektrikli Taşıtlar
HET	: Hibrit Elektrikli Taşıtlar

SİMGELER DİZİNİ

D	:Ortalama çap
L	:Uzunluk
H	:Kalınlık
P	:Safılık
A	:Yüzey alan
ρ	:Yoğunluk
k	:Isıl iletkenlik (W/mK)
OD	:Outside diameter (Dış çap)
ID	:Inside diameter (İç çap)
ENS	:Erime noktası sıcaklığı
KNS	:Katılma noktası sıcaklığı
EGI	:Erime gizli ısı
KGI	:Katılma gizli ısı
T_{mo}	:Erime başlangıç sıcaklığı
T_{mp}	:Erime pik sıcaklığı
T_{me}	:Erime sonlanma sıcaklığı
H_e	:Erime gizli ısı
T_{so}	:Katılma başlangıç sıcaklığı
T_{sp}	:Katılma pik sıcaklığı
T_{se}	:Katılma sonlanma sıcaklığı
H_s	:Katılma gizli ısı

1.GİRİŞ

Devamlı artan ve hayal gücümüzün sınırlarını zorlayan müşteri istekleri nedeniyle ulaşımdan iletişime, sağlıktan savunmaya her alanda hızlı bir teknolojik tüketim yaşanmaktadır. Günümüzde hemen hemen her bireyin hızlı, verimli ve kolay iletişim için taşınabilir elektronik aletlerden (bilgisayarlar, cep telefonları, kameralar, fotoğraf makinaları, MP3 çalarlar, CD çalarlar, DVD oynatıcılar, radyolar, televizyonlar) en az birisine sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca gün geçtikçe evde kullandığımız elektrikli aletlerin çoğu kablosuz olarak kullanılabilir hale gelmektedir. Taşınabilir elektronik cihazların, geliştirilen fonksiyonlarını uzun süreli ve etkin olarak idame ettirebilmeleri için temel şart yüksek enerji yoğunluğuna sahip, güvenli, uzun ömürlü, bakımı kolay, kısa sürede şarj edilebilen ve çevreye zarar vermeyen bir enerji kaynağına sahip olmalarıdır. Tekrar şarj edilebilen/ikincil piller günümüzde taşınabilir elektronik ve elektrikli cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pil teknolojisinin gelişiminin tarihçesini kısaca özetleyecek olursak; 1970'li yıllarda lityum metalinin enerji uygulamalarında birtakım avantajları olduğunun belirlenmesinin ardından Exxon şirketi tarafından ilk kez TiS_2 yapısında katot üretilerek (lityum metali anot olarak kullanılarak) lityum pili geliştirilmiştir. 1980'li yıllarda, katmanlı yapıdaki sülfürlü katot malzemelerinin tekrar kullanımının kararlı olmadığı belirlenmiş olup, bunların yerine metal oksitlerin katot olarak kullanılması düşünülmüştür. 1991 yılına gelindiğinde ise Sony ilk ticari Lityum iyon pilini üretmiştir. $LiCoO_2$ 'in katot, karbonun anot olarak kullanıldığı bu hücrelerde 3,6 V üstünde gerilim elde edilmiş olup, geliştirilen pilin uzun süreli tekrar kullanıma uygun olduğu da tespit edilmiştir. Daha sonraki yıllarda pil teknolojisinde rekabetin hızlanmasıyla yapılan çalışmalar; pil çevrim ömrü (şarj/deşarj çevrimi), özgül enerji, hacimsel enerji yoğunluğu, güvenlik ve yüksek sıcaklıklarda kararlılık gibi bir takım özelliklerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Lityum iyon piller; gümüş-çinko, nikel-çinko, nikel-hidrojen gibi ikincil pillerle karşılaştırıldıklarında birtakım avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Lityum iyon pillerin avantajları; kapalı hücre olup bakım gerektirmemesi, uzun ömürlü olması, geniş çalışma sıcaklık aralığına sahip olması, çabuk şarj olabilme kabiliyeti, yüksekdeşarj kapasitesi, yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğuna sahip olması gibi sıralanabilir. Bununla birlikte pahalı olması, yüksek sıcaklıklarda bozulması, aşırı şarj durumunda kapasite

kaybına uğraması, patlama riski ve koruyucu devre gerektirmesi onun dezavantajları olarak sıralanabilir.

Petrol ürünlerinin gelecekte tükenecek olması ve tüketilmesi sonucunda oluşan çevre kirliliği ulaşım sektöründe yeni nesil taşıtların kullanılmasını ön plana çıkarmaktadır. Elektrikli taşıtlar (ET) ve Hibrit elektrikli taşıtlar (HET) yüksek verime ve sıfır emisyonu sahip taşıtlar olup geleneksel transport taşıtlarının yerini alma konusunda en uygun adaylardır. Elektrikli taşıtların performansları doğrudan doğruya batarya performansı ile ilişkilidir. Yüksek enerji yoğunluğuna ve çalışma voltajına sahip Lityum-iyon piller elektrikli ve hibrit elektrikli taşıtlar için en uygun güç kaynağı olarak kullanılmaktadırlar[1]. Lityum-iyon piller, yüksek özgül güçleri, yüksek özgül enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, yüksek deşarj hızı gibi avantajlarından dolayı ET ve HET'ler için uygun güç kaynakları olduğu düşünülmektedir [2][3]. Elektrikli taşıtlar için gerekli yüksek güç gereksinimini sağlamak için Lityum-iyon piller seri ve paralel bağlanarak batarya paketleri oluşturulmaktadır. Lityum-iyon bataryaların kullanım açısından en önemli dezavantajı, gerek omik gerekse de kimyasal reaksiyon sonucu pil hücreleri üzerinde açığa çıkan ısı enerjisinin paket içerisinde önemli derecede sıcaklık artışına neden olmasıdır[4][5]. Bununla birlikte çalışma sıcaklığı, batarya performansını ve ömrünü doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Lityum-iyon batarya paketlerinin yüksek sıcaklıkta çalışmaya maruz kalması ve pil hücreleri arasındaki meydana gelen sıcaklık farkı; performansının düşmesi, kapasite kaybı ve şarj/deşarj çevrim ömrünün azalması gibi birtakım olumsuzluklara neden olmaktadır. Dahası yüksek çalışma sıcaklığı katı elektrolit ara yüzeyinin zamanla büyümesine ve iç direncin artmasına neden olarak bu olumsuz etkileri daha da hızlandırmaktadır. Buna ek olarak aşırı ısınma sonucunda batarya hücrelerinin yangın ve patlama riski önemli bir güvenlik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ramadass ve ark. [6] farklı sıcaklıklarda çalışan Sony 18650 (1.8Ah) Lityum-iyon pillerin kapasite kayıplarını çok sayıda şarj/deşarj çevrimi gerçekleştirerek ayrıntılı bir biçimde elde etmişlerdir. Ramadass ve ark. 800 şarj/deşarj çevrimi sonunda 25°C ve 45°C sıcaklıklarında çalışan Lityum-iyon hücrelerin kapasitelerinin başlangıçtaki kapasitesine göre sırasıyla %31 ve %36 civarında azaldığını belirlemişlerdir. Buna karşın 50°C sıcaklıkta çalışan Lityum-iyon pillerin 600 şarj/deşarj çevrimi sonunda kapasitelerinin %60'ını, 55°C'de çalışan Lityum-iyon pillerin ise 500 şarj/deşarj çevrimi

sonunda kapasitelerinin %70'ini kaybettiklerini belirlemişlerdir. Kapasite kaybının, patlama riskinin önlenmesi ve daha etkin kullanım açısından Lityum-iyon bataryalar için optimum çalışma sıcaklığının 20°C-50°C arasında, batarya paketi boyunca pil hücreleri arasındaki sıcaklık farkının ise 5°C'nin altında olması gerektiği literatürde birçok çalışma tarafından önerilmektedir[1][7][8]. Bu nedenle yüksek güç sağlayan Lityum-iyon batarya paketlerinin optimum sıcaklık aralığında çalıştırılması ve batarya hücreleri boyunca sıcaklık farkının minimuma indirilmesi için etkin termal koruma sistemleriyle donatılması gerekmektedir. İdeal bir batarya paketinin bunlara ilave olarak kompakt, hafif ve ekonomik olması tercih edilmektir.

Batarya paketlerinin termal olarak korunması amacıyla geçmişten günümüze farklı teknikler uygulanmıştır. Batarya termal korunması için akla gelen ilk yöntem geleneksel hava ve sıvı soğutma sistemlerine dayalı aktif sistemler olmuştur[9]–[11]. Bu tip aktif sistemlerde soğutucu akışkanın batarya paketi boyunca yukarı akım bölgesinden aşağı akım bölgesine doğru hareketi sırasında ısınması önemli bir sorun olarak görülmektedir. Aktif termal korumada soğutma, batarya paketinin yukarı akım bölgesinde etkin bir biçimde gerçekleşirken aşağı akım bölgesinde etkinliğini kaybetmektedir. Bu durum batarya paketi boyunca termal dengesizliğin artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte bu tip termal koruma sistemlerinin; sistem karmaşasına sahip olması, ek güç gerektirmesi (fan veya pompa) ve pahalı olması diğer dezavantajları olarak sıralanabilir[12]–[15].

Son yıllarda, aktif termal yönetim yöntemlerine alternatif olarak, faz değişken malzeme (FDM) kullanımına dayanan pasif termal koruma sistemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem, lityum-iyon bataryanın çalışması sırasında açığa çıkardığı ısının FDM tarafından duyulur ve gizli ısı olarak depolanması, batarya çalışmadığı sırada ise bünyesinde tuttuğu ısıyı tekrar geri salma esasına dayanmaktadır. FDM'ler düşük sıcaklık değişimi göstererek katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçiş yapabilen enerji depolama malzemelerdir. Yüksek gizli ısıları yüzünden FDM'ler hafif ağırlıklarına karşılık yüksek miktarda enerji depolama kabiliyetine sahiptirler. FDM'ler gerekli istenilen çalışma sıcaklığına göre faz değişimi gerçekleştirecek biçimde üretilmektedir. FDM'ler; organik (parafinler), inorganik (hidrat tuzlar) ve ötektik olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır.

Parafin tipi organik FDM'ler; yüksek enerji depolama kapasiteleri, toksik olmamaları, aşındırıcı etki içermemeleri, kararlı olmaları ve düşük maliyetleri dolayısıyla en umut

verici enerji depolama malzemeleri olarak değer bulmaktadırlar. Al-Hallaj ve ark. [16] literatürde ilk kez organik FDM'lerin Lityum-iyon pillerin pasif termal koruması için kullanılabilceğini öne sürmüştür. Fakat çok geçmeden organik FDM'lerin düşük ısı iletkenliklerinin, onun termal koruma amaçlı kullanımında önündeki en önemli dezavantaj olduğu anlaşıldı. Çünkü düşük ısı iletkenlik katsayısı organik FDM'lerin enerji depolama ve geri salıverme hızlarını önemli derecede yavaşlatmaktadır.

Khateeb ve ark., [17] saf organik FDM'nin, Lityum-iyon pil paketlerindeki uniform sıcaklık dağılımı açısından etkisiz olduğunu bu nedenle termal kaçak ve patlamaya neden olabileceğini bildirmişlerdir. Bahiraei ve ark., [18] Lityum-iyon pillerin termal yönetiminde FDM ile pil arasındaki temas sıcaklığının kontrol edilmesinin önemli olduğunu belirlemişlerdir. Buna ilave olarak batarya paketinin içine sızan ısı miktarının ve batarya temas sıcaklığının kullanılan FDM'nin ısı iletkenliğinin bir fonksiyonu olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle organik FDM'lerin Lityum-iyon batarya paketlerinin pasif termal korumasında kullanılabilmesi için öncelikle ısı iletkenliklerinin arttırılması gerekmektedir.

Organik FDM'lerin ısı iletkenliklerini arttırmak için literatürde birtakım yöntemler kullanılmıştır. FDM'lerin, Lityum-iyon pillerin termal yönetiminde daha etkin bir biçimde kullanılması için ısı iletkenliklerinin arttırılması için kullanılan ilk yöntem FDM içerisine metal kanat/kanatçık eklemektir. Zhao ve ark.[19] silindir biçimindeki pil hücrelerinden oluşan bir batarya paketinde FDM içerisine dik olarak yerleştirilen metal boruların termal koruma performansı üzerinde etkilerini belirlemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Metal boru destekli FDM'nin, batarya paketinin 50°C'nin altında kalma süresini önemli ölçüde uzattığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte batarya paketi boyunca sıcaklık farkının %4.7 daha azaltılabileceğini göstermişlerdir. Wang ve ark., [20] silindir biçimindeki bir pilin termal korumasını FDM/kanatçık sistemi kullanarak incelemiş ve elde ettiği sonuçları diğer termal koruma sistemleriyle karşılaştırmışlardır. FDM/kanatçık sisteminin uzun çalışma süresi biçiminde termal performans avantajı sağladığını bildirmişlerdir. FDM içerisine metal kanat/kanatçık yerleştirilmesi termal koruma performansını iyileştirmesine rağmen sistem ağırlık ve hacminde önemli derecede arttırmaktadır. Metal kanatçıklar ayrıca katılaşma işlemi sırasında sıvı PCM'nin yeniden kristalleşme sorunlarına neden olmaktadır.

FDM'lerin lityum-iyon batarya paketlerinde daha verimli kullanılabilmesi için ısı

iletkenliğin artırılması için önerilen diğer bir yöntem metalik (veya karbon) köpük/FDM kompozitlerinin uygulanmasıdır. Bu yöntemde kullanılan kompozit malzemeler, metalik köpük gözeneklerine FDM emdirilmesi suretiyle elde edilmektedir. Bu durumda elde edilen metal köpük/FDM kompozitlerinde metalik kısım ısı iletkenliği artırırken, gözeneklere emdirilen FDM'ler enerji depolama işlevini üstlenmektedir. Literatürde Lityum-iyon pillerin pasif termal koruması için alüminyum köpük/FDM kompozitinin kullanıldığı çalışmalarda, doğal taşınımına kıyasla maksimum sıcaklığın %50 oranında düşürülebileceği gösterilmiştir[21][22]. Benzer sonuçla bakır/FDM kompozitleri için de elde edilmiştir[23][24]. Son yıllarda genişletilmiş grafit/PCM kompozitler, düşük ağırlık, korozyona karşı yüksek direnç ve kullanım kolaylığı nedeniyle batarya termal yönetimi için yaygın olarak kullanılmaktadır[25][26][27]. Özellikle Genişletilmiş grafit (EG) matrisinin oluşturduğu güçlü kılcal kuvvetlerin, sıvı PCM'in sızıntı problemi oluşturmasına engel olması önemli bir avantaj olarak görülmektedir. Mills ve ark.[26], parafin emdirilmiş EG matrisini bir batarya paketinin pasif termal korumasını deneysel ve sayısal olarak inceleyerek böyle bir sistemin avantajlarını vurgulamışlardır. Jiang ve ark.[27], EG/Parafin kompozitlerinin, pil hücrelerinin maksimum sıcaklık artışını önemli ölçüde kısıtladığını ve pil paketi boyunca maksimum sıcaklık farkını 1-2°C civarında tutmayı başardıklarını göstermişlerdir. Metalik veya karbon köpük/FDM kompozitleri, batarya paketlerinin pasif termal korumasında etkin kullanım sağlasa da birtakım önemli dezavantajlara sahiptir. En önemli dezavantaj köpük gözeneklerinin boyutlarının küçük olması nedeniyle kullanılacak FDM miktarının önemli miktarda azalmasıdır. Bu durum kompozit enerji depolama kapasitesini doğrudan düşürmektedir. Enerji depolama kapasitesinin düşmesi ise pasif termal koruma sırasında etkin kullanım süresinin önemli derecede düşmesine sebep olmaktadır. Bir diğer dezavantaj ise Köpük/FDM kompozitinin hazırlanmasının zorluğudur. Özellikle sıvı hale getirilen FDM'nin köpük gözeneklerine emdirilmesi konusunda birtakım zorluklar bulunmaktadır.

Son yıllarda, nanoteknoloji alanında meydana gelen gelişmeler, boyutu 100nm'den daha küçük farklı şekil ve boyutlarda nanoparçacıkların sentezlenmesi konusuna öncülük etmiştir[28]. Bu yöntem, metal/metal oksit veya karbon bazlı nanoparçacıkların belirli bir kütle oranında organik FDM'ye katılmasıyla yeni bir nanoparçacık/FDM kompoziti oluşturulması esasına dayanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda metal/metaloksit nanoparçacıklarla katılan FDM'lerin ısı iletkenliklerinde %26'ya varan iyileştirmeler sağlanabileceği gösterilmiştir[29][30]. Ancak termal iletkenlikte elde

edilen bu derece iyileştirmeler uygulamada kullanım açısından yeterli görülmemektedir. Karbon tabanlı nanoparçacıklar düşük yoğunluk ve yüksek ısı iletkenlikleri yüzünden FDM'lerin termal olarak iyileştirmek açısından en önemli adaylar olarak görülmektedir. Karbon tabanlı nanoparçacıklar tüp (çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNTs) ve tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNTs)), iplik (karbon nanofiber (CNF)) ve levha (Grafen nanoyaprak (GNP)) biçiminde sentezlenebilmektedirler.

MWCNTs ve/veya SWCNTs katkılanarak organik FDM'lerin ısı iletkenliklerinin artırılmasına yönelik çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan çıkarılan temel sonuç kütlece %5 MWCNTs veya SWCNTs katkılanan FDM kompozitlerinin ısı iletkenliklerinde %24-%30 aralığında iyileştirmeler sağlanabileceğidir[31][32][33]. Öte yandan MWCNTs nanoparçacıkların FDM içerisine katkılanmadan önce birtakım fiziksel veya kimyasal ön işlemlere tabi tutulmasının ısı iletkenlikte %50'ye varan iyileştirmelere neden olabileceği de tespit edilmiştir[34]. Wang ve ark.[35] yaptıkları çalışmada, erime sıcaklığı 62.5-64°C aralığında değişen bir organik FDM palmitik asidin kütlece % 0.2-1 oranlarında MWCNTs ile katkılanması sonucu üretilen kompozitlerin ısı iletkenliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Wang ve ark.[35], MWCNTs nanoparçacıkların yüzey alanını ve kararlılıklarını arttırmak için FDM içerisine katkılamadan önce asit ve alkali ile kimyasal ön işleme ve mekanik olarak (bilyalı öğütme) ile fiziksel ön işleme tabi tutmuşlardır. T= 25 °C için hiç işleme tabi tutulmamış FDM ile asit, alkali ve bilyeli öğütme ile işleme tutulmuş MWCNTs/FDM kompozitlerin kütlece %1'lik oranları için ısı iletkenlik iyileştirmelerinin katkılanmamış FDM'ye göre sırası ile %29.6, %37.1, %51.6 ve %31.1 olarak değiştiğini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak kimyasal olarak alkali ile ön işleme tabi tutulan MWCNTs nanoparçacıkların %51.6 ile en fazla ısı iletkenlik iyileştirmesine neden olduğunu belirlemişlerdir. Buna neden olarak ta ön işlemlerle MWCNTs yüzey alanına OH, CH gibi bazı fonksiyonel bağlanmasıyla yüzey alanının artmasını göstermişlerdir.

CNF katkılanarak organik FDM'lerin ısı iletkenliklerinin artırılmasına yönelik çalışmalarda da ısı iletkenlikte sağlanan iyileşmelerin MWCNTs katkılanma durumuna yakın olduğu belirlenmiştir. Fan ve ark., [36] 59°C erime sıcaklığına sahip parafin içerisine kütlece %10 CNF katkıladıkları çalışmalarında ısı iletkenlikte %15 iyileşme elde etmişlerdir. Buna karşılık Yu ve ark. [37] erime sıcaklığı 58-60°C aralığında olan parafin içerisine daha düşük kütle oranında (%4) CNF katkılayarak elde ettikleri CNF/Parafin kompozitinin ısı iletkenliğinin %20 artırılabilceğini göstermişlerdir.

Benzer biçimde Cui ve ark.[38] 60°C erime sıcaklığına sahip parafine ekledikleri kütlece %10 CNF sayesinde ısı iletkenlikte %44 iyileşme elde etmişlerdir. Aynı nanoparçacık için elde edilen farklı sonuçların kompozit hazırlama tekniğindeki farklılık ve kullanılan nanoparçacık boyutu ile ilişkili olabileceği düşünülmüştür.

Buna ilave olarak aynı yığın iletkenliğe sahip karbon tabanlı nanoparçacıkların şekil yapısının da ısı iletkenlik iyileştirmesi üzerine önemli etkileri olabileceği düşünülmüş ve çalışmalar buna odaklanmıştır. Yapılan çalışmalarda nanoparçacık şekil yapısının (tüp, plaka, iplik vb.) FDM termal özelliklerini iyileştirmede önemli etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Özellikle GNP katkılanan organik FDM'lerin ısı iletkenliklerinde önemli iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir. Bu farklılığın GNP nanoparçacıklarının iki boyutlu düzlemsel bir yapıya ve dolayısıyla daha yüksek yüzey alanına sahip olmasıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. GNP nanoparçacıklarının yüksek yüzey alanına sahip olması nanoparçacık/FDM arayüzeyindeki ısı direnci azaltmakta ve bu sayede daha etkin ısı geçişine neden olmaktadır[36]. Chen ve ark., [39] erime sıcaklığı 53.5°C olan FDM içerisine GNP katkılayarak ısı özellikleri deneysel olarak incelemişlerdir. FDM içerisine kütlece %10 GNP katkılanması durumunda ısı iletkenlikte 4 kata varan bir iyileşme, enerji depolama kapasitesinde ise %16 civarında azalış olduğunu belirlemişlerdir. Chen ve ark. [39] GNP katkılanan kompozitin ısı iletkenliğinde gerçekleşen bu olağanüstü artışı farklı bir mekanizma ile açıklamışlardır: İletim ile ısı transferi fonon transferi ile gerçekleşmekte olup, nano malzemenin kafes (lattice) büyüklüğü ve titreşiminin frekansı ile ilişkilidir. Fononlar bir nanoparçacıktan diğerine yüzey boyunca transfer olmaktadır. FDM'lerin düşük ısı iletkenlikleri hem titreşim frekanslarının düşük olmasına hemde fonon transferinin engellenmesine neden olmaktadır. Bu durumda düşük katkılama miktarlarında GNP ile PCM arasındaki farklı titreşim frekansı nedeniyle GNP/PCM arayüzeyinde iletim ile ısı aktarımına karşı oluşan direnç ısı iletkenliği düşürmektedir. Buna karşın kompozit içerisinde yüksek titreşim frekansına sahip GNP miktarının artırılması fonon saçılımının artmasına dolayısıyla ısı iletkenliğinin artırılmasına neden olmaktadır. Fan ve ark, [36] 59°C erime sıcaklığına sahip parafin içerisine kütlece %10 GNP katkıladıkları çalışmalarında ısı iletkenlikte 4 kat iyileşme elde etmişlerdir. Yu ve ark. [37] erime sıcaklığı 58-60°C aralığında olan parafin içerisine kütlece %4 GNP ekleyerek katkılanmamış FDMY'ye kıyasla 2 kat iyileşme sağlamışlardır. Yavari ve ark., [40] ise %4 GNP katkılayarak organik bir FDM'nin ısı iletkenliğini 2.5 kat arttırmayı başarmışlardır. Özetle GNP nanoparçacıklarının; MWCNTs, SWCNTs CNF gibi diğer karbon tabanlı

nanoparçacıklara göre organik FDM'lerin düşük ısı iletkenliklerini iyileştirmek açısından daha başarılı oldukları açık bir biçimde ifade edilebilir.

Literatürde GNP/FDM kompozitleri ile gerçekleştirilen çalışmalar genellikle elde edilen kompozitin ısı özelliklerinin belirlenmesine yöneliktir. Bununla birlikte GNP/FDM kompozitlerinin endüstriyel bir alanda uygulanmasına yönelik çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu nedenle bu tez kapsamında içerisine GNP katılanmış organik bir FDM kompozitinin simülatif olarak oluşturulan bir pil paketinin pasif termal korumasında uygulanmasına yöneltilmiştir. Çalışmada öncelikle %0 ve %7 kütle bölüntülerinde GNP ile katılanan FDM kompozitlerinin termal özellikleri iki aşamalı olarak karakterize edilmiştir. Termal karakterizasyonun ilk aşamasında elde edilen tüm kompozitler ve FDM için ısı iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada tüm kompozitlerin ve FDM'nin erime/katılma sıcaklıkları ve erime/katılma gizli ısıları gibi DSC özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra en iyi termal özelliklere sahip GNP/FDM kompoziti, simülatif bir pil paketinin pasif termal korunumu için soğutma ortamı olarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar katılanmamış FDM ve doğal taşınım korumalarına sahip simülatif batarya paketi ile karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. GNP\FDM Kompozitinin Hazırlanması

Erime sıcaklığı 41⁰C-44⁰C aralığında olan parafin wax organik FDM (RT-44), ticari olarak tedarik edilmiş (Rubitherm Tech., Almanya) olup herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Erime sıcaklığının bu aralıkta seçilmesinin nedeni lityum-iyon batarya paketlerinin pasif termal koruması için bu sıcaklık aralığının en işe yarar olmasıdır. Bu sıcaklık aralığının normal ortam koşullarının üzerinde olması ve 41-44⁰C aralığında faz değişimini gerçekleşmesi suretiyle büyük miktarda enerjinin FDM tarafından emilmesi lityum-iyon pillerin optimum sıcaklıklarda çalışma süresini normal olarak uzatmaktadır.

RT-44'ün ısı iletkenliğini arttırmak için katkı maddesi olarak kullanılan GNP ticari olarak Skyspring Nanomaterials Inc (USA)'ten tedarik edilmiş ve herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. GNP nanoparçacıkların fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2. 1: Nanoparçacıkların fiziksel özellikleri

Nano dolgu malzemesi	Şekil	Kalınlık (nm)	Yüzey Alanı (m ² /g)	Safılık (%)
GNP	Levha	6-8	120-150	99.5

Katkılanan kütlece nanoparçacık fraksiyonunun GNP/FDM kompozitinin ısı iletkenliğini doğrudan etkilediği çok iyi bilinen bir gerçektir. Bu nedenle kompozitin ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi işleminde katkılanacak GNP miktarının belirlenmesi önemli bir adımdır. RT-44 içerisine katkılanacak GNP kütle fraksiyonunu Eşitlik 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{x}{100} = \frac{m_{GNP}}{m_{GNP} + m_{RT-44}} \quad (2.1)$$

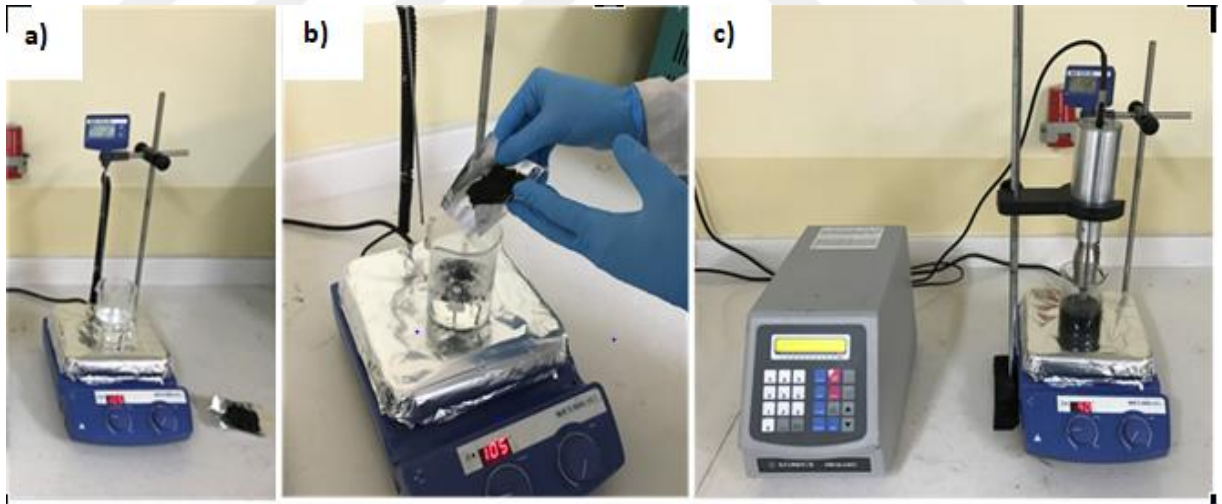
burada;

x : GNP kütle fraksiyonu (%),

m_{GNP} : GNP miktarı (g),

m_{RT-44} : RT-44 miktarı (g),

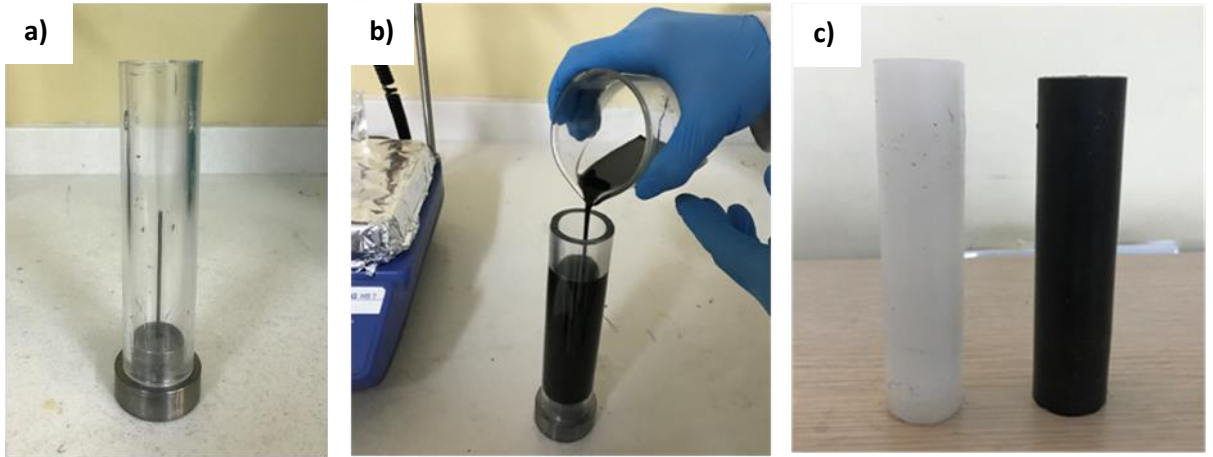
GNP/RT-44 kompozitleri iki adımdan oluşan bir eritme-karıştırma prosedürü uygulanarak hazırlanmıştır. Birinci adımda öncelikle RT-44 bir ısıtıcı plaka üzerinde sıvı hale gelinceye kadar ısıtılmıştır (Şekil 1a). Sıvı haldeki RT-44 içerisine Eşitlik 2.1 kullanılarak istenilen miktarlarda GNP eklenerek %3, %5 ve %7 kütle oranlarında GNP/RT-44 karışımları elde edilmiştir (Şekil 1b). İkinci adımda GNP nanoparçacıkların sıvı RT-44 içerisinde düzgün olarak dağılmasını sağlamak amacıyla 750 W gücünde ultrasonik bir karıştırıcı (Sonics & Materials INC, USA) kullanılarak 30 dakikalık bir karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1c). Karıştırma işlemi sırasında karışımın katılaşmaması için karıştırma işlemi süresince karışım bir ısıtıcı plaka üzerinde RT-44'ün erime sıcaklığının üzerinde tutulmuştur.



Şekil 2. 1 GNP/RT-44 kompozitlerinin hazırlanması

2.2. GNP\FDM Kompozitlerinin Isıl İletkenliklerinin Ölçümü

Kütlece %3-7 oranlarında GNP ile katılan organik RT-44 kompozitlerin ve RT-44'ün ısı iletkenlik değeri KD2 Pro cihazı (Decagon Devices Inc, USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenliklerinin ölçülebilmesi öncelikle ölçüm numunelerinin hazırlanması gerekmektedir. KD2 Pro cihazı ile ölçüm yapmaya imkan sağlayacak numunelerinin hazırlanabilmesi için Şekil 2.2'de gösterilen kalıp kullanılmıştır. Bir önceki bölümde hazırlanan homojen eriyik kompozitler (veya RT-44) özel olarak tasarlanmış numune kalıbına dökülerek oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır. KD2 Pro cihazında ölçüm yapmak için numunelerin belirli bir standarda göre hazırlanması gerekmektedir. Numune kalıbı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi 30 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde akrilik bir silindir ve silindir merkezine yerleştirilmiş yaklaşık 2mm çapında ve 100mm yüksekliğinde bir çubuktan oluşmaktadır. Oda sıcaklığında soğuyan numuneler daha sonra kalıptan çıkarılmakta ve merkezindeki delik bir matkap ucu kullanılarak 2.4 mm'ye genişletilmektedir. Bu sayede numuneler merkezinde 2.4 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda bir delik bulunacak biçimde ısı iletkenlik ölçmeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2. 2 Numune kalıbı, numunelerin dökümü ve elde edilen numuneler

KD2-Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı katı numunelerin ısı iletkenliklerini TR-1 sensörü ile ölçebilen bir cihazdır. Sıvı numuneler için ise cihaza ait KS-1 sensörü kullanılmaktadır. KD2 Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı kullanılan sensör tipine bağlı

olarak hem sıvı hemde katı haldeki malzemelerin ısı iletkenliklerini 0.2-4 W/mK aralığında ölçmek için kullanılmaktadır.

KD2 Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı, akışkan ve/veya katı haldeki malzemelerin ısı iletkenliklerinin ölçülmesi için kısa süreli sıcak tel yöntemine dayalı bir teknik kullanmaktadır. Bu yöntemde göre KD2 Pro cihazı bir mikrokontrol birimi ve 100 mm uzunluğunda 2.4 mm çapında bir sensör iğnesinden oluşmaktadır. Yüksek L/D oranı uç etkilerinin elimine edilmesini sağlamaktadır. Sensör iğnesi hem ısıtıcı olarak hem de sıcaklık sensörü olarak çalışmakta olup bir zaman periyodunda ısıtıcı boyunca akım geçirilmesi sırasındaki sıcaklık değişimini belirlemektedir. Ölçülen sıcaklıkların zaman periyodu için analiz edilmesi sonucunda ısı iletkenlik katsayısı belirlenmektedir. Fourier yasasına göre testi gerçekleştirilecek akışkanın ve/veya katı malzemenin ısı iletkenliği yüksek ise, ısı verilen telde meydana gelecek sıcaklık değişimi düşük olacaktır. Buna karşın test akışkanının ve/veya katı malzemenin ısı iletkenliği düşük ise telde ölçülen sıcaklık değişimi yüksek olacaktır. Bu durumda akışkan'ın ısı iletkenliği ile telin sıcaklık değişimi arasındaki matematiksel ilişki, L/D oranı çok yüksek olan tel için silindirik koordinat düzleminde yazılacak enerji eşitliği ile aşağıda gibi yazılabilir;

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2) aşağıda, eşitlik (2.3) ve (2.4)'de tanımlanan sınır koşulları kullanılarak çözümlenir ise eşitlik (2.5)'de verilen sıcaklığın zamana göre değişim ifadesi elde edilir. Eşitlik (2.5) içerisindeki yüksek dereceden terimler ihmal edilir ve ısı iletkenlik ifadesi (k) yalnız bırakılır ise eşitlik (2.6)'da ısı iletkenliğinin analitik ifadesi elde edilir. (Merckx vd., 2012).

$$T(t=0) = T_0 \quad (2.3)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\infty} = 0 \text{ ve } \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = \frac{q}{2\pi k} \quad (2.4)$$

$$T(r,t) = T_0 + \frac{q}{4\pi k_{nf}} \left\{ -\gamma + \ln \left(\frac{4\alpha_{nf} t}{r^2} \right) + \left[\frac{\left(\frac{r^2}{4\alpha_{nf} t} \right)}{1.1} - \frac{\left(\frac{r^2}{4\alpha_{nf} t} \right)^2}{2.2} + \dots \right] \right\} \quad (2.5)$$

$$\gamma = 0.5772 \text{ Euler's sabiti}$$

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(t_1/t_2)}{T_1 - T_2} \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6) içerisinde tanımlanan her bir terim sırası ile;

k: testi yapılacak akışkanın ve/veya katı malzemenin ısı iletkenlik katsayısını,

q: tele verilen ısı yükünü,

t₁ ve T₁: t₁ anında ölçülen sıcaklık değerini,

t₂ ve T₂: t₂ anında ölçülen sıcaklık değerini göstermektedir.

Bu yaklaşım birçok avantaja sahiptir. Birincisi temas direnci etkilerinin esas olarak bu erken zamanlı verilerde görünür olmasıdır. Bu nedenle sadece zaman verileri analiz edilerek numunenin termal iletkenliği daha iyi ölçülmüş olur. Diğer bir avantajı kesin sonuç veren lineer en küçük kareler yöntemiyle çözülebilir olmasıdır.



Şekil 2. 3 KD2 Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı

Hazırlanan numunelerin KD2 Pro cihazında ısı iletkenliklerinin ölçümüne başlamadan önce tedarikçi firma tarafından verilmiş olan ve ısı iletkenlik değeri bilinen bir test numunesi içim ölçüm yapılarak KD2 Pro cihazı doğrulanmıştır. Bütün numuneler için ölçümler farklı ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Böylelikle hem sıcaklığın ısı iletkenlik üzerindeki etkisi hem de katı faz ve sıvı faz durumunda ısı iletkenliğin

değişimi belirlenmeye çalışılmıştır. Katı faz ölçümleri 0°C, 10°C, 20°C ve 30°C ortam sıcaklıklarında, sıvı faz ölçümleri ise 50°C, 60°C ve 70°C ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. 4 Isıl iletkenlik ölçümlerinin yapıldığı iklimlendirme kabini

Ortam koşullandırması bir iklimlendirme (JEIO TECH, Güney Kore) kabini aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bütün numuneler için ölçümler Şekil 2.4 de gösterilen iklimlendirme cihazı (kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenliği ölçülecek numuneler kabin içerisine yerleştirilerek öncelikle ortam ile termal dengeye gelinceye kadar beklenilmiştir. Her bir numune için en az beş ölçüm gerçekleştirilmiş olup % 0.5 standart sapmaya sahip ortalama değerler sonuç olarak verilmiştir. Ölçümlerin doğruluğu 0.2-4W/mK aralığı için $\pm 10\%$ 'dur.

2.3 RT-44 ve GNP-RT-44 Kompozitlerinin Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Özelliklerinin Belirlenmesi

Isıl iletkenliği düşük organik FDM'ler içerisine yüksek ısı iletkenliğe sahip nanoparçacıklar katkılanarak ısı iletkenliği iyileştirilmiş nanoparçacık/FDM kompozitleri elde edilebilmektedir. Ancak böyle durumlarda diğer termal özelliklerin bu durumdan nasıl etkilendiğinin de araştırılması gerekmektedir. FDM'lerin

uygulamada kullanılmak istenmesinin en önemli nedeni onun yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olmasıdır. Benzer şekilde erime/katılaşma sıcaklıkları da FDM'lerin çeşitli uygulamalarda kullanılması için önemli parametrelerden birisidir. Örneğin lityum-iyon piller için 40°C-44°C aralığında erime sıcaklığına sahip FDM'lerin uygun olduğundan yukarıda bahsedilmiştir. Bu durumda ısıl iletkenliği arttırmak için FDM içerisine nanoparçacık eklenmesinin enerji depolama kapasitesi, erime/katılaşma sıcaklıkları üzerindeki etkilerini incelemek oldukça önemli bir konudur. Bu tip termal özellikler Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçümleri ile gerçekleştirilmektedir.

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) sıvı ve/veya katı haldeki numunelerin ısıl kapasite değerlerinin sıcaklık ile değişiminin belirlenmesi için kullanılan bir termal analiz metodudur. DSC ile test numunesinin; erime/katılaşma sıcaklıkları, erime/katılaşma gizli ısıları ölçülebilmektedir. Bu çalışmada, GNP ile katılan RT-44 organik FDM'nin (veya RT-44'ün) erime/katılaşma sıcaklıkları ve erime/katılaşma gizli ısıları Şekil 2.5'de gösterilen Shimadzu (DSC, Shimadzu Corporation, Japan) marka diferansiyel taramalı kalorimetre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



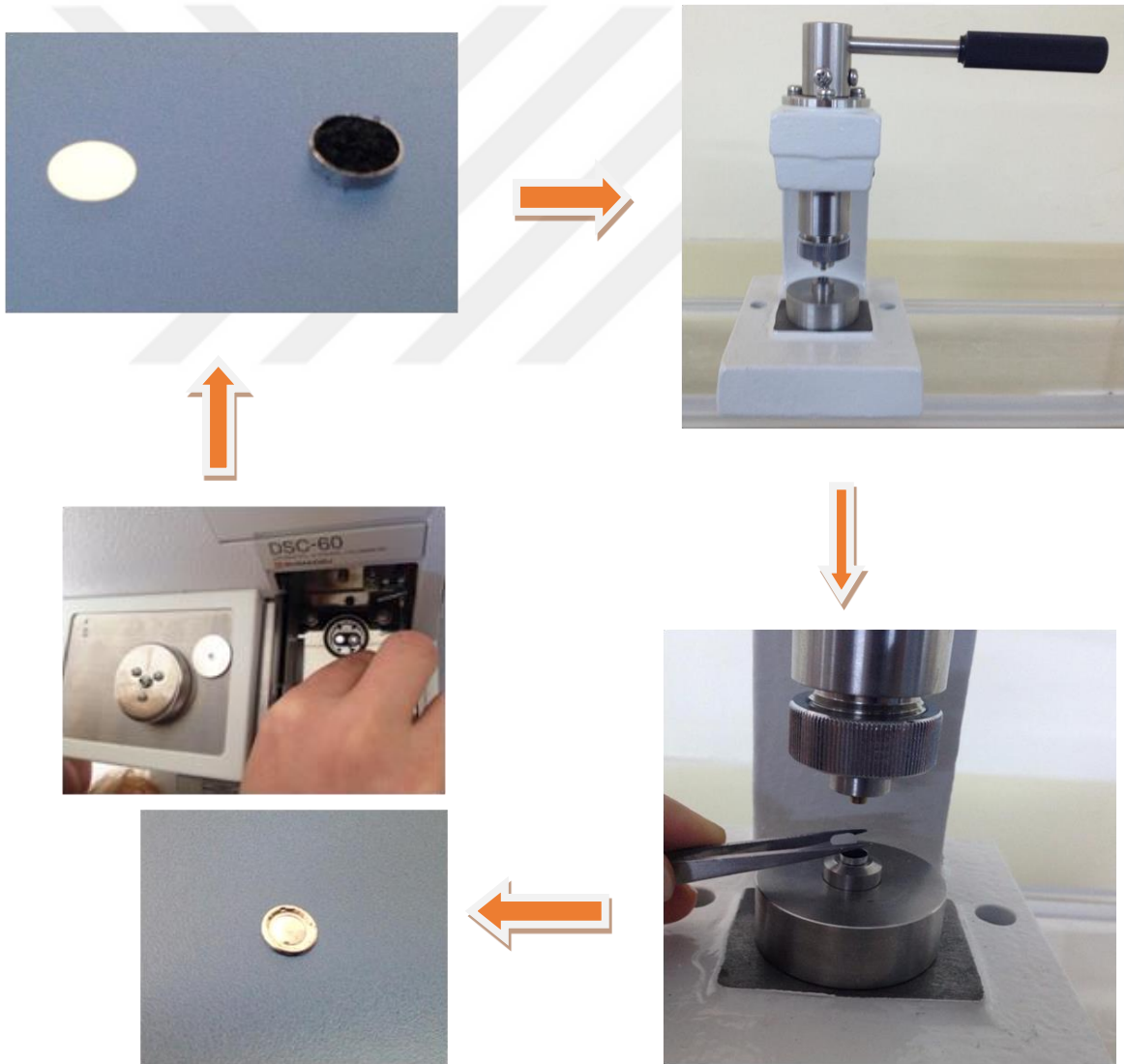
Şekil 2. 5 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

DSC özelliklerinin belirlenmesi için öncelikle RT-44 ve GNP/R-44 kompozitlerini içeren numunelerin DSC cihazına uygun olarak hazırlanması gerekmektedir. Bunun için istenilen miktarda GNP/RT-44 kompozitinin bir kap içine hapsedilmesi gerekmektedir. DSC numunesi hazırlanma aşamaları aşağıda özetlenmiştir:

i) öncelikle RT-44 veya GNP/RT-44 kompozitlerinden alınan parçacıklar toz haline getirilmiştir,

ii) toz haline getirilen RT-44 veya GNP/RT-44 kompozitleri 0.01 mg hassasiyete sahip bir elektronik terazi (Shimadzu Corporation, Japan) ile 5 mg olarak tartılıp DSC cihazına ait özel bir alüminyum kap içerisine konulmuştur,

iii) Son olarak alüminyum kap, kapağı ile kapatılarak özel bir press makinesi ile sıkıştırılmak suretiyle numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numune, Şekil 6'da gösterilen DSC'deki bölüme yerleştirilerek uygun sıcaklık programı girilerek analiz gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2. 6 DSC numunelerinin hazırlanma aşamaları ve DSC cihazına yerleştirilmesi

RT-44 ve GNP katkılanan RT-44 kompozitlerinin DSC özelliklerinin ölçülmesine başlanmadan önce Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazının doğruluğunun test edilmesi gerekmektedir. Ölçümlere başlamadan önce DSC cihazının kalibrasyonu erime başlangıç sıcaklığı ve erime gizli ısısı bilinen yüksek saflığa sahip standart indium numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DSC ölçümleri 2 °C/dk ısıtma/soğutma hızında ve 20 °C-180 °C aralığında yapılmıştır. DSC cihazının kalorimetrik hassasiyet ve sıcaklık doğruluğu sırasıyla $\pm 1\%$ ve $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 'dir. Literatürde, herhangi bir malzemenin DTK'den elde edilen erime başlangıç sıcaklığı, o malzemenin erime sıcaklığı olarak kabul edilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada, DTK analizi yapılan malzemelerin erime başlangıç sıcaklığı "erime sıcaklığı" olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. 2 DSC kalibrasyon standart değerleri

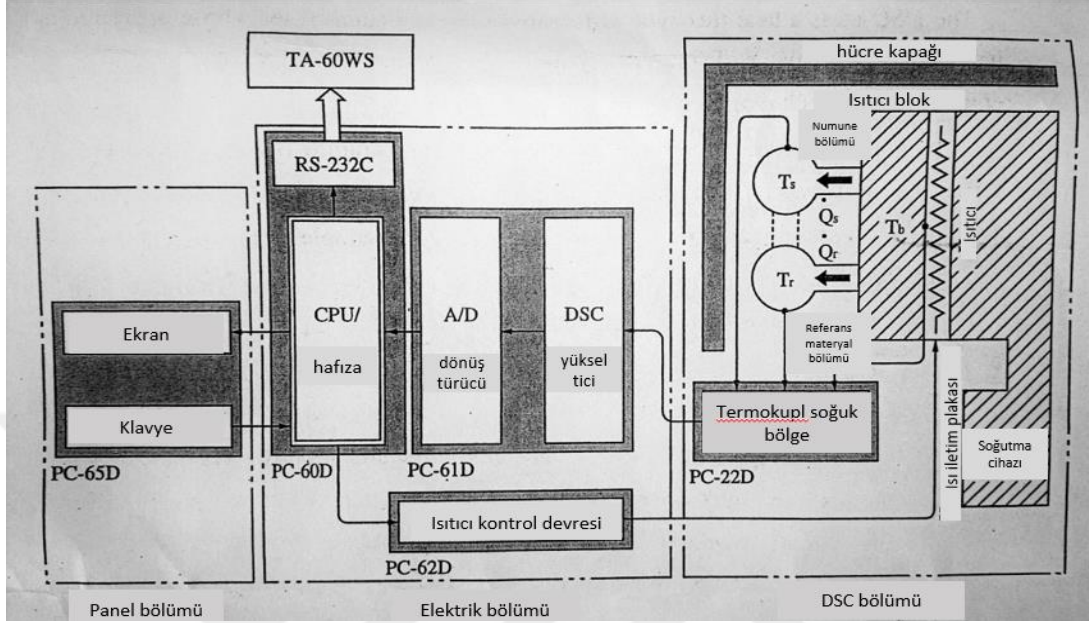
Standart	Teb (°C)	Gizli ısı (H) (J/g)
Indium	156,60	28.45

Tablo 2. 3 Saf Indium metali için 2 °C/dk ısıtma hızı uygulanarak DSC'den elde edilen erime sıcaklığı ve gizli ısı değerleri

Isıtma hızı (°C/dk)	Teb (°C)	Tep (°C)	Gizli ısı (H) (J/g)
2	156,405	156,49	28,09

Karşılaştırma sonuçları $< \pm 1$ hassasiyetinde ise sonuçların doğru olduğu aksi takdirde cihazın kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan DSC cihazının kalibrasyonu gerçekleştirilmiş olmakla birlikte termal analizi yapılan kompozitlerin DSC analizinden elde edilen sonuçlarının doğru olduğunu söylemek mümkündür. Buna ek olarak, her ölçümden sonra DSC kalibrasyonu, saf indium metali kullanılarak tekrar gerçekleştirilmiştir. Literatürde saf indiumun erime sıcaklığı 156,60°C, gizli ısısı 28,45 J/g iken ölçülen saf indiumun erime sıcaklığı 156,405°C, gizli ısısı 28,09 J/g'dır.

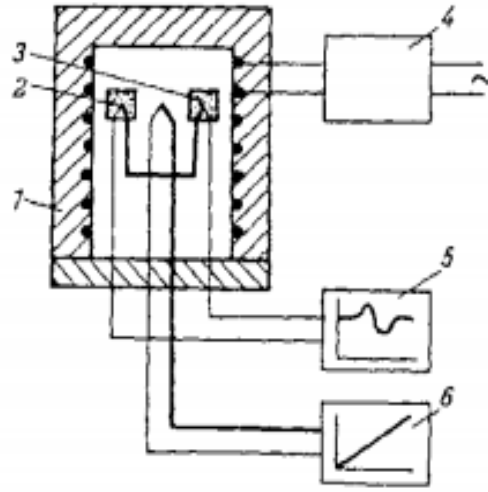
DSC-60 ısı akışı tipi bir diferansiyel tarama kalorimetresi olup çalışma prensibi diferansiyel termal analiz (DTA) ile aynıdır. DSC-60'ın yapısı şematik olarak şekil 2.7'de gösterilmiştir:



Şekil 2. 7 DSC-60 cihazının şematik yapısı

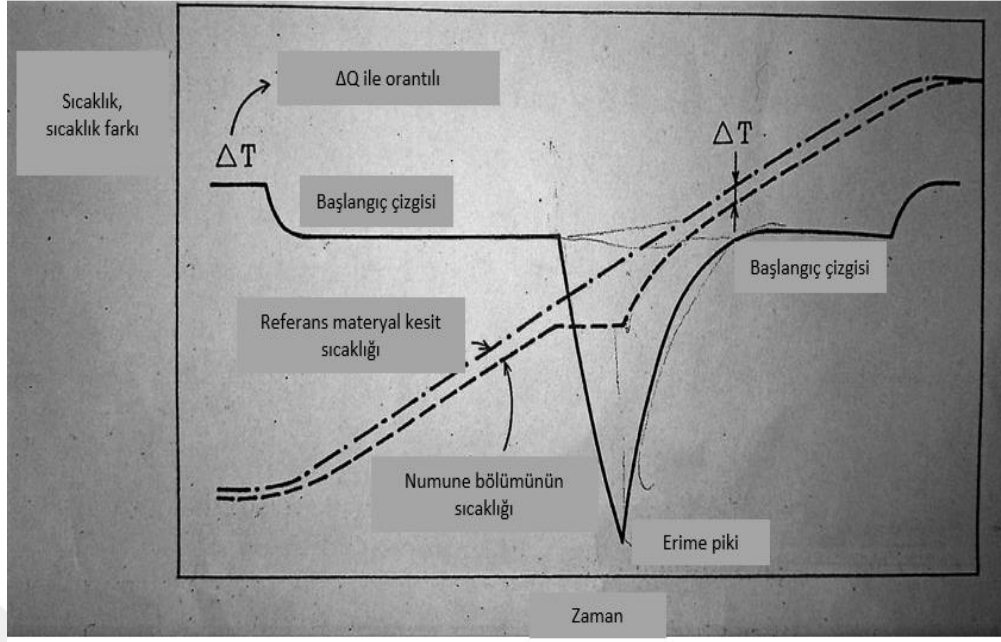
Isıtıcıya güç sağlanması durumunda ısıtıcı blok sıcaklığı (T_b) kontrollü biçimde belirlenen programa göre yükselir veya düşer. Buna paralel olarak bir ısı rezistansı aracılığıyla ısıtılan ısıtıcı bloktan birim zamanda numune bölümüne ve referans numune bölümüne transfer edilen sırasıyla Q_r ve Q_s ısıları sayesinde numune sıcaklığı (T_s) ve referans numune sıcaklığı (T_r) programa uygun biçimde artar veya azalır. Bu esnada numune bölümünün sıcaklığı ve numune bölümün sıcaklığının referans numunenin sıcaklığından olan sapması $\Delta T = T_s - T_r$ biçiminde belirlenir. Genellikle referans olarak seçilen malzeme, üzerinde çalışılan bir sıcaklık aralığında termal olarak inerttir. Ayrıca numunede termal olarak inert olduğu zaman geçici sıcaklık artışı veya düşüşünden sonra ısı kapasiteleri arasındaki fark yüzünden numune sıcaklığı uygun bir sıcaklık değerinde stabil hale gelir. ΔT sinyallerinin zamana göre veya numune sıcaklığına (T_s) göre çizdirilmesiyle elde edilen eğriler temel çizgisi olarak adlandırılır. Şekil 2.8'de, DTK'nin şematik gösterimi daha yakından gösterilmektedir. İncelenen madde ve inert bir referans madde bir fırın içerisinde eş zamanlı olarak, aynı şartlar altında ısıtılmaktadır. Fırın içindeki sıcaklık artışı doğrusal olarak gerçekleşmektedir. Numune

ve referansın her ikisi de termokupllara bağlıdır. Sıcaklıkların farklarına eşit olan gerilimler arasındaki fark ölçülür.



Şekil 2. 8 DSC'nin şematik gösterimi: **1.** fırın,**2.** örnek madde, **3.** inert referans,**4.** Isıtıcının kontrol birimi, **5.** sıcaklık farkı göstergesi, **6.** sıcaklık göstergesi[4]

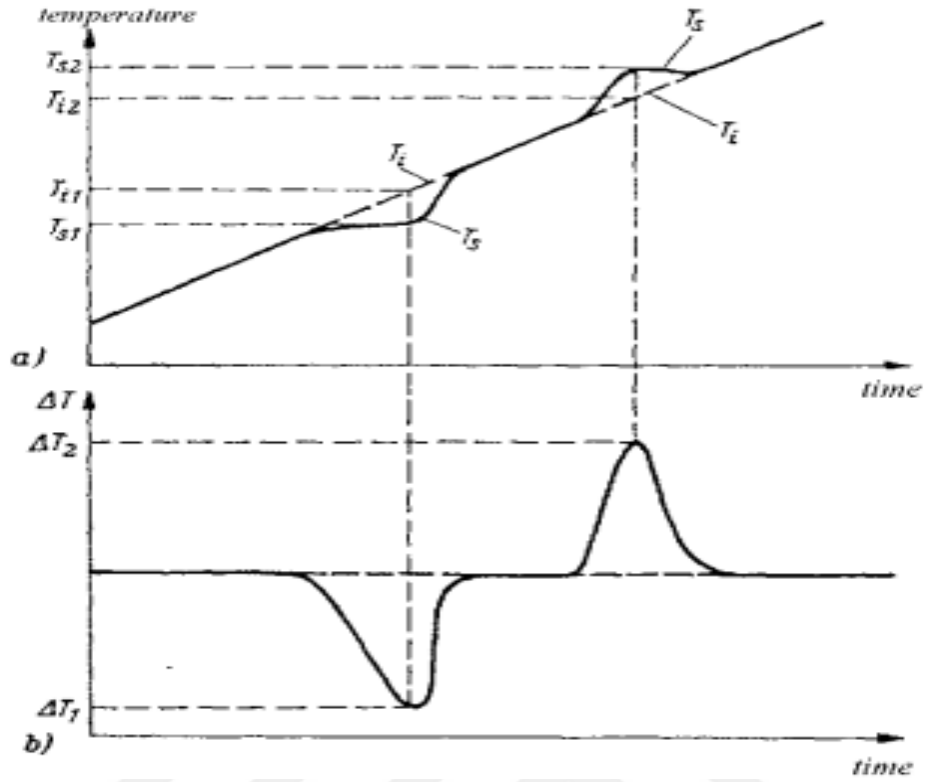
Erime sırasında numune sıcaklığı sabit kalırken referans malzeme sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Bunun sonucunda ΔT , erime başlangıcından önce elde edilen değerlerden sapmaya başlar. Erime sonlandığında numune sıcaklığı (T_s), referans numune sıcaklığına (T_r) kıyasla ısıtıcı bloktan oldukça farklıdır. Bu durumda ısıtıcı bloktan numune bölümüne büyük miktarda ısı akışı gerçekleşmekte ve hızlı bir biçimde denge konumuna ulaşılmaktadır. Başka bir deyişle ΔT tekrar temel çizgiye dönmektedir.



Şekil 2. 9 Tipik bir DSC eğrisi

Tipik bir DSC eğrisi; şekil 2.9’da gösterildiği gibi ΔT sinyallerinin zamana göre veya numune sıcaklığına göre çizdirilmesiyle elde edilen denge durumundaki temel çizgi, erime sırasındaki pik eğrisi ve erime sonrasında pik eğrisini takip eden temel çizginin birleştirilmesinden oluşmaktadır. Teorik olarak pik eğrisi altında kalan alan erime için gerekli ısıyı (erime gizli ısısı x numune miktarı) vermektedir. DSC-60, ΔT ’nin belirlenmesi için Chromel-Constantan, T_b ve T_s belirlenmesi için Chromel-Alumelthermocouple (ısıl çift) kullanmaktadır.

Şekil 2.10’da gösterildiği gibi, tüketilen veya salınan ısı olmadığından kontrol ünitesinde termovoltaj göstermez. Çünkü referans ve numunenin sıcaklığı aynıdır ($T_s=T_i$) ve dolayısıyla $\Delta T=0$ ’dır. Numune içindeki bir endotermik reaksiyon olduğunda, numune sıcaklığı referans sıcaklığına göre daha yavaş artar ($T_{s1}<T_{i1}$) ve $\Delta T_1=T_{s1}-T_{i1}$ negatifse, sıcaklık farkına göre termovoltajı gösterir. Bu durumda elde edilen DSC eğrisine endoterm adı verilmektedir. Numunede ekzotermik bir reaksiyon olması durumunda, numune sıcaklığı referans sıcaklığından daha hızlı bir şekilde artar. ($T_{s2}>T_{i2}$) $\Delta T_1=T_{s2}-T_{i2}$ pozitifse, sıcaklık farkına göre uygun bir termovoltaj göstermektedir. DSC eğrisi, T_s ve T_i eğrisinin çıkarılmasıyla elde edilebilir (şekil 2.10b). Bu durumda elde edilen DSC eğrisi ise ekzoterm eğrisi olarak adlandırılmaktadır.

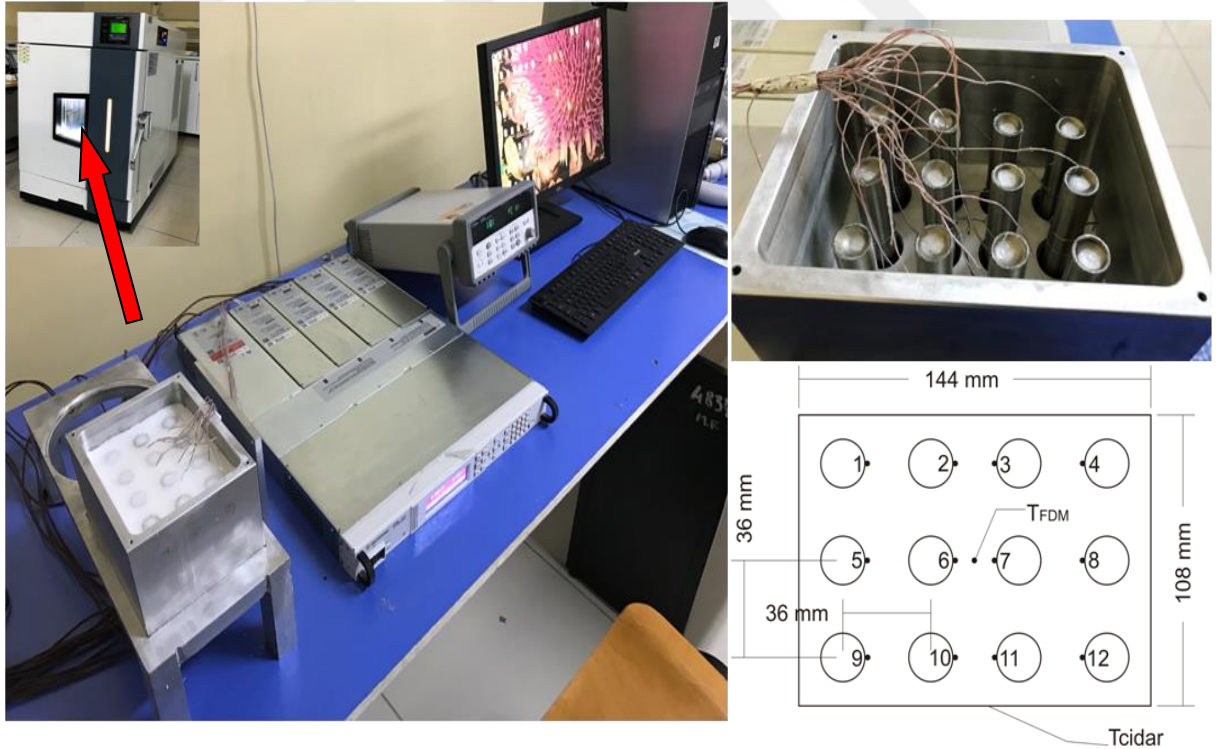


Şekil 2. 10 DSC eğrileri: a) T_s : numunenin sıcaklık-zaman eğrisi, T_i : referansın sıcaklık zaman eğrisi, b) sıcaklık farkı zamanlı eğrisi [4]

Bu çalışmada, gerek RT-44 gerekse de kütlece %3, %5 ve %7 GNP katkılanan GNP/RT-44 kompozitlerinin DSC özellikleri 30°C başlangıç sıcaklığından 60°C son sıcaklığına 2°C/dk ısıtma hızı kullanılarak ölçülmüştür. Her bir numune için ölçümler en az üç defa gerçekleştirilmiş olup %1 standart sapmaya sahip ortalama değerler sonuç olarak verilmiştir. Elde edilen DSC eğrilerinin cihaza ait özel bir yazılım programı ile analiz edilmesi sonucunda DSC özellikleri belirlenmektedir. Endoterm eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda; erime başlangıç (T_{eb}), erime sonlanma (T_{es}) ve erime tepe (T_{ep}) sıcaklıkları elde edilmektedir. Endoterm eğrisinin altında kalan alan ise erime gizli ısısını (H_e) vermektedir. Benzer biçimde ekzoterm eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda; katılma başlangıç (T_{kb}), katılma sonlanma (T_{ks}) ve katılma tepe (T_{kp}) sıcaklıkları elde edilmektedir. Ekzoterm eğrisinin altında kalan alan ise erime gizli ısısını (H_k) vermektedir.

2.4 Simülasyon Batarya Paketi Deneysel Düzenegi

Şekil 2.11, bu çalışmada kullanılan simülasyon batarya paketi için kurulmuş olan deney düzenegini göstermektedir. Deneysel düzenek; bir batarya paketi, DC güç kaynağı, ısı çiftleri, veri toplama birimi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Güvenlik ve kolaylık açısından pil paketinde gerçek Lityum-iyon piller yerine elektrikli ısıtıcılar kullanılarak simülasyon bir pil paketi oluşturulmuştur. Bu sayede lityum iyon pillerin çalışması sırasında açığa çıkardığı ısı elektrikli ısıtıcılar tarafından sağlanmıştır. Pil hücreleri yerine kullanılan elektrikli ısıtıcıların boyutları silindirik biçimindeki 18650 Lityum-iyon pillerle (18mm çapında 65mm yüksekliğinde) aynı seçilmiştir. Simüle edilmiş pil paketinde, ısıtıcılar arasındaki etkileşimleri incelemek için, on iki ısıtıcı 4S3P (dört seri 3 paralel) biçiminde bir alüminyum kap içerisine Şekil 2.11’de gösterildiği gibi dikey olarak vidalanmıştır. Çalışma sırasında sıvı RT-44’ün sızdırma problemini engellemek için yüksek sıcaklığa (>400°C) sıvı conta alüminyum kap ve ısıtıcının vidalanma bölgelerine uygulanmıştır.



Şekil 2. 11 Simülasyon pil paketi için deneysel düzenek

Batarya paketine ait geometrik veriler Şekil 2.11’de ayrıca şematik olarak verilmiştir. Komşu ısıtıcılar arasındaki mesafe 36 mm olarak ayarlanmıştır. Javani ve ark., [41]

FDM kalınlığının (3,6, 9 ve 12 mm) olmasının etkilerini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Javani ve ark., FDM kalınlığının 9mm'den fazla olması durumunda termal koruma üzerinde çok fazla bir avantaj sağlamadığını belirlemişlerdir. 9 mm FDM kalınlığının optimum olduğunu ancak 3mm'nin üzerindeki FDM kalınlıklarının da kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Bahsedilen nedenden dolayı bu çalışmada, iki bitişik ısıtıcının merkezi arasındaki mesafe 36 mm olarak ayarlandı, böylece ısıtıcı başına RT-44 (veya GNP / RT-44) kalınlığı yaklaşık 9 mm olarak sabitlenmiştir. Çalışmada pasif termal koruma ortamı olarak en yüksek ısı iletkenliğe sahip 7% GNP/RT-44 kompoziti kullanılmıştır. Termal performans karşılaştırması açısından batarya paketi boş (doğal taşınım) ve sadece RT-44 kullanılarak ta çalıştırılmıştır. Eriyik hale getirilen RT-44 veya %7 GNP/RT-44 kompozitleri, sıvı halde alüminyum kap içerisine dökülmüş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak, elektrikli ısıtıcıları saracak biçimde pasif termal korumalı pil paketleri oluşturulmuştur.

Elektrikli ısıtıcıların termal cevapları veya başka bir deyişle sıcaklık ölçümleri $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ hassasiyete sahip J tipi ısı çiftleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl çiftler Şekil 2.11'de gösterildiği gibi her bir ısıtıcı yüzeyine ve RT-44 (veya GNP/RT-44) soğutma ortamı içerisine ısıtıcı yarı yüksekliğinde olacak biçimde bağlanmış ve isimlendirilmiştir. Isıl çiftler tarafından ölçülen sıcaklık verileri bir veri toplayıcı (Agilent 34970A) ile 30 saniye aralıklarla toplanarak bilgisayara kaydedilmiştir.

Gerçek Lityum-iyon pillerin çalışmaları sırasında açığa çıkardığı ısı ve sıcaklık artışı, simülatif pil paketinde elektrikli ısıtıcıların bir DC güç kaynağı (AgilentN6700B) ile çalıştırılmasıyla sağlanmıştır. Uygulamada lityum-iyon pillerin yaydıkları ısılar; şarj durumuna, çalışma hızına ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada şarj durumundan kaynaklı değişim göz ardı edilerek elektrikli ısıtıcılar sabit ısı akışı yayacak biçimde çalıştırılmışlardır. Lityum-iyon pillerin nominal veya agresif çalıştırılmasına bağlı olarak yaydıkları ısıları simüle etmek için her bir elektrikli ısıtıcı 1.30W, 2.75W ve 3.90W olmak üzere üç farklı ısı gücünde çalıştırılmıştır. Bahsedilen güç girişlerinin; silindirik biçimindeki lityum-iyon piller için 1C (nominal) ve 4C (nominal hızın 4 katı) hızlarında çalıştırılmalarına denk geldikleri söylenebilir. Bununla birlikte çalışma ortam sıcaklığı 20°C sabit olarak seçilmiştir. Bu amaçla deneyler simülatif batarya paketinin iklimlendirme kabini içerisine 20°C sabit ortam sıcaklığında çalıştırılması durumlarında gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

3.1 Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçları

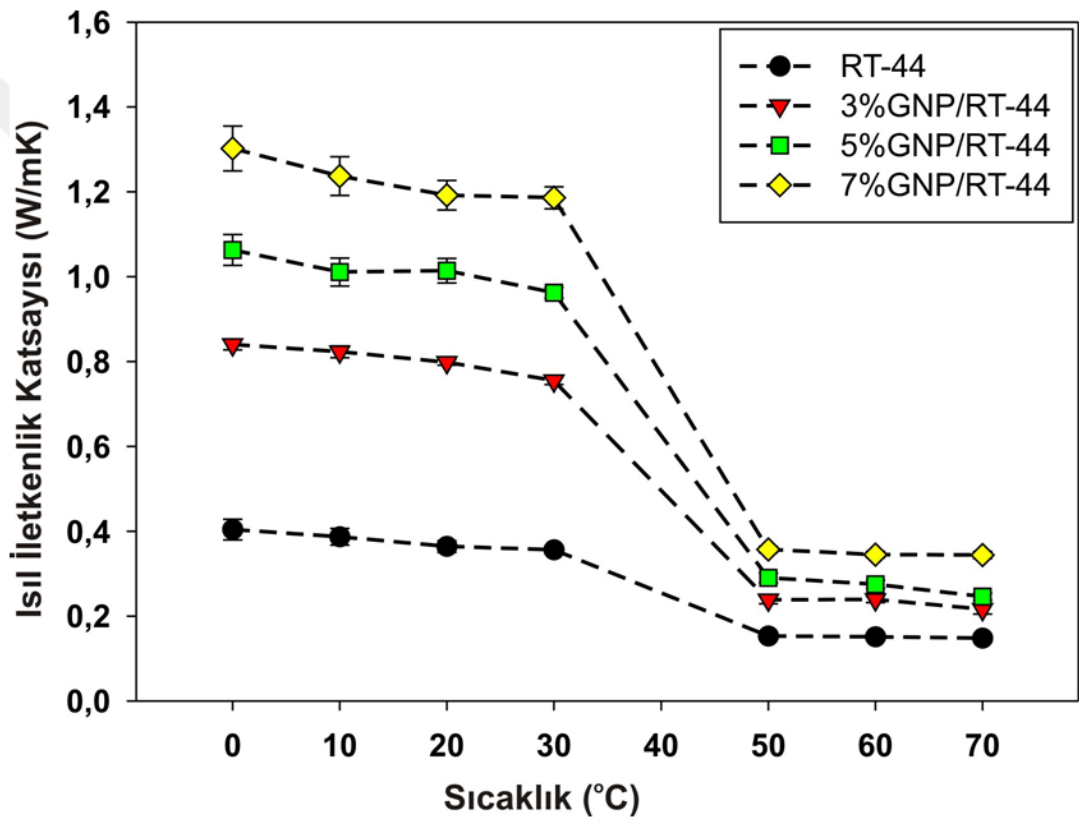
Bu bölümde GNP nanoparçacıklarla %3, %5 ve %7 kütle oranlarında katılanan GNP/RT-44 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçümleri sıcaklığa bağı olarak ölçülmüş, elde edilen sonuçlar RT-44 ısı iletkenlik verileriyle karşılaştırılmıştır. GNP katılanmamış RT-44 organik faz değışken malzemesinin katı haldeki ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla hafif azalma eğiliminde oldukları görülmüştür. Katı hal ısı iletkenlik değerleri 0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30°C sıcaklıklarda sırasıyla 0.404 W/mK, 0.387 W/mK, 0.364 W/mK ve 0.356 W/mK olarak ölçülmüştür. Buna karşılık sıvı hale denk gelen 50°C, 60°C ve 70°C ortam sıcaklıklarında ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0.153W/mK, 0.151W/mK ve 0.148W/mK olarak ölçülmüştür. Bu durumda yalnız RT-44 için katı faz ve sıvı faz ortalama ısı iletkenliklerinin sırasıyla 0.378W/mK ve 0.151W/mK olduğu söylenebilir.

Şekil 3'e ilk bakışta katılanan GNP kütle oranı ile orantılı olarak ısı iletkenliklerin hem katı fazda hem de sıvı fazda arttığı söylenebilir. Bilindiği üzere iletim yoluyla ısı aktarımı, nanomalzeme kafesinin boyutuna ve titreşimin sıklığına bağı olan fonon transferi ile sağlanmaktadır. Buna ilave olarak FDM'lerin termal iletkenlikleri hem düşük titreşim frekansı hem de fonon aktarımının engellenmesi nedeniyle düşüktür[39]. Buna karşılık, FDM'lere yüksek titreşim frekansına sahip olan nanoparçacıkların katılanması, fonon dağılımının artmasına ve dolayısıyla ısı iletiminin artmasına neden olur. Sonuç olarak, termal iletkenlikteki bu önemli gelişmenin fonon dağılımı için uygun nanoparçacık aę yapısının oluşturulması ile ilgili olduğu söylenebilir.

Şekil 3.1, elde edilen tüm GNP/RT-44 kompozitleri için katı haldeki ısı iletkenliğin (<40°C) sıvı hale (>50°C) kıyasla daha güçlü bir biçimde GNP kütle oranının fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle GNP nanoparçacık katılanması durumunda katı numunelerin ısı iletkenlik artışının sıvı halden daha yüksek olduğu söylenebilir. Katılaşma sırasında FDM üzerinde nanoparçacıkların tutunmasıyla mikron boyuttan milimetreye meydana gelen kristal yapıların büyümesi nanoparçacık üzerindeki stresi atırmaktadır. Bu durum nanoparçacık ve nanoparçacık/FDM arayüzündeki etkin temas alanını artırmakta dolayısıyla katı kompozitlerde etkin termal iletkenlik artışına neden olmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklığın artmaya başlamasıyla

nanoparçacıklardaki gerilmelerin azalmaya başlaması etkili temas alanını dolayısıyla da ısı iletkenlik katsayısını azaltır[18]. Bu durum katı haldeki ısı iletkenliğin sıcaklıkla birlikte azalmasıyla uyuşmaktadır.

Katı halden sıvı hale dönüşüm sırasında (çamur hali) ısı iletkenlik ölçümü gerçekleştirilmemiştir. Katı halden tamamen sıvı hale dönüşükten sonra kompozit ısı iletkenliklerinde keskin bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum daha düzenli katı halden düzensiz sıvı hale geçilmesinin bir sonucudur. Bununla birlikte sıvı halde genel olarak ısı iletkenliğin sıcaklığa bağlı olarak sabit kaldığı söylenebilir.



Şekil 3. 1 Isı iletkenliklerin GNP kütle oranına ve sıcaklığa bağlı değişimleri

Katkılanan GNP kütle oranına göre ısı iletkenlikte elde edilen yüzdellik iyileştirmeler aşağıda verilen eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

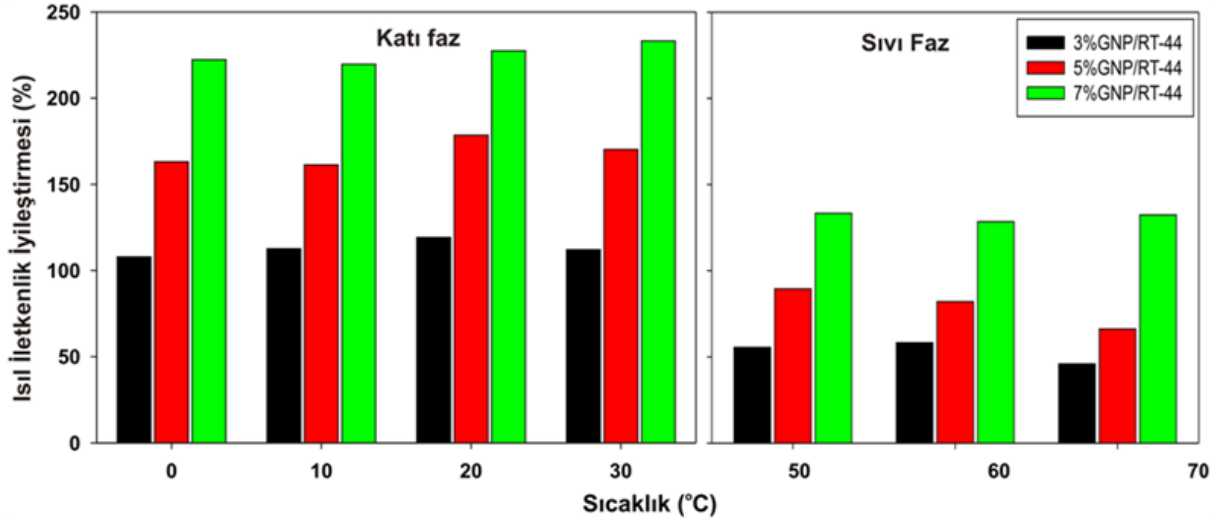
$$k_{iyileşme}(\%) = \frac{k_{komp} - k_{RT-44}}{k_{RT-44}} \quad (3.1)$$

burada;

k_{komp}	:GNP/RT-44 kompozit ısı iletkenliği (W/mK),
k_{RT-44}	:RT-44 kompozit ısı iletkenliği (W/mK),
$K_{iyileşme}$:Isıl iletkenlik yüzdeler iyileşmesi (%)

Yukarıdaki eşitliğe göre ısı iletkenlikte elde edilen yüzdeler iyileştirmelerin GNP kütle oranına ve sıcaklığa göre değişimleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.2’den görüleceği üzere ısı iletkenlik iyileştirmelerinin sıcaklıkla çok fazla değişmediği belirlenmiştir. Katı hal için kütlece %3 GNP katkılanan GNP/RT-44 kompoziti için ısı iletkenlikte sağlanan ortalama yüzdeler iyileşme %113.0 civarındadır. Kütlece %5 GNP/RT-44 kompoziti için katı fazda ısı iletkenlikte elde edilen ortalama iyileşme ise %168.3 civarındadır. Çalışmada kullanılan en yüksek kütle oranı olan %7GNP ile katkılanan RT-44 kompozitinin katı hali için ısı iletkenlikte sağlanan ortalama yüzdeler iyileşme ise %225.6 civarındadır. Bu çalışmada ısı iletkenlik dolgu maddesi olarak katkılanan GNP için üst sınır kütlece %7 olarak sınırlandırılmıştır. Esasen GNP kütle oranı arttıkça kompozitin viskozitesi de ciddi biçimde atmaktadır. Bu durum kompozit hazırlama sırasında GNP nanoparçacıkların RT-44 içerisine homojen olarak dağılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çalışmada ısı iletkenliği iyileştirmek için en yüksek GNP kütle oranı olarak %7 kullanılmıştır.

Benzer biçimde hazırlanan GNP/RT-44 kompozitleri için sıvı fazdaki ısı iletkenlik iyileştirmeleri aşağıdaki gibi açıklanabilir. Kütlece %3 GNP katkılanan GNP/RT-44 sıvı kompozitinin ısı iletkenliğinde elde edilen ortalama iyileşme %53.3 iken %5 GNP/RT-44 kompoziti için bu değer %79.3 civarındadır. Buna karşın kütlece %7 GNP katkılanan sıvı GNP/RT-44 kompoziti için ısı iletkenlikte sağlanan ortalama iyileşme %131.4 olarak belirlenmiştir.

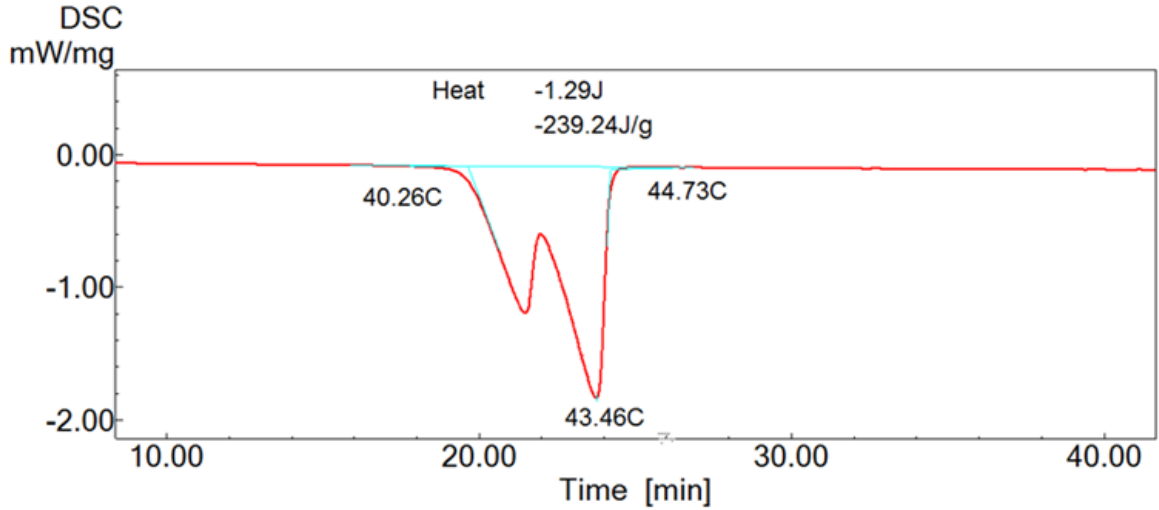


Şekil 3. 2 Isıl iletkenlikte sağlanan iyileşmeler

Organik FDM'lerin uygulamada daha etkin kullanılabilmesi için katı hal ısı iletkenliklerinin en azından 1 W/mK'in üzerine çıkarılması gerekmektedir. Bu çalışmada kütlece %7 GNP katkılı kompozitin katı hal ısı iletkenliği için bu durumun başarıldığı söylenebilir.

3.2 DSC Ölçüm Sonuçları

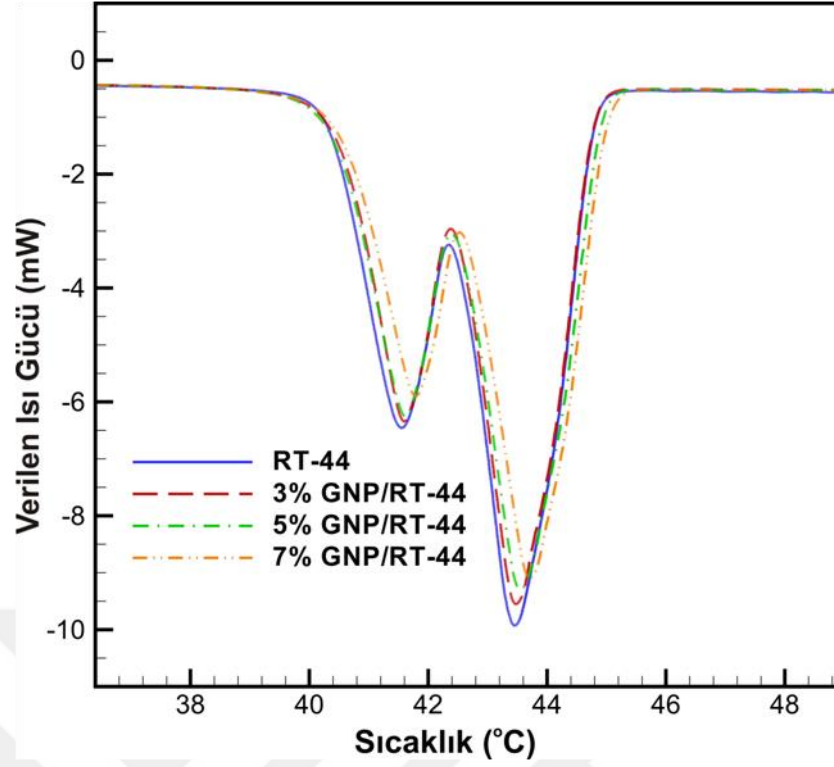
GNP nanoparçacık eklentisinin ısı iletkenlikte istenilen iyileşmeleri sağlamasına rağmen diğer ısı özellikler üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi için DSC özellikleri ölçülmüştür. Şekil 3.3'in incelenmesinden DSC eğrisinin faz değişim bölgesine kadar ana çizgi üzerinde sabit olarak ilerlediği, faz değişiminin başlamasıyla ana çizgiden ayrılarak bir tepe oluşturduğu görülmektedir. Erime (ısı verme) işlemi sırasında oluşan bu eğriye endoterm tepesi adı verilmektedir. RT-44 için ısıtma işlemi (erime) sırasında bu eğri için yapılan analiz Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3 RT-44'ün DSC analizi

Endoterm eğrisinin ana çizgiden ayrılmaya başladığı yer erime başlangıç sıcaklığı (T_{eb}), tekrar birleştiği yer erime sonlanma sıcaklığı (T_{es}), tepe noktası erime tepe sıcaklığı (T_{ep}) ile ilişkilidir. Ana çizgiden sapan kısım ile ana çizgi arasındaki alan ise erime gizli ısısını (He) vermektedir. DSC analizi sonucunda RT-44'ün katıdan sıvıya geçmeye başladığı sıcaklığın (T_{eb}) 40.26°C, erimenin sonlandığı sıcaklığın (T_{es}) 44.73°C olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde erime için en fazla ısının alındığı ana tekabül eden erime tepe sıcaklığının (T_{ep}) ise 43.46°C olduğu belirlenmiştir. RT-44'ün katıdan sıvıya geçmesi için gerekli enerji olan gizli ısısı ise 239.24J/g olarak ölçülmüştür.

RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerinin erime faz değişimine ait DSC eğrileri Şekil 3.5'te bir arada verilmiştir. Şekil 3.5'in incelenmesinden RT-44 ve tüm diğer GNP katkılı kompozitler için DSC eğrilerinin benzer bir değişim gösterdiği söylenebilir. DSC eğrileri için söylenebilecek tek fark katılanan GNP kütle oranının artmasına bağlı olarak DSC eğrisinin altında kalan alanın küçülmüş olmasıdır. Bahsi geçen alanın gizli ısı ile ilişkili olduğu düşünülecek olursa, bu aşamada GNP katkısının gizli ısıyı bir miktar düşüreceği net olarak ifade edilebilir.



Şekil 3. 4 RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerine ait DSC eğrileri

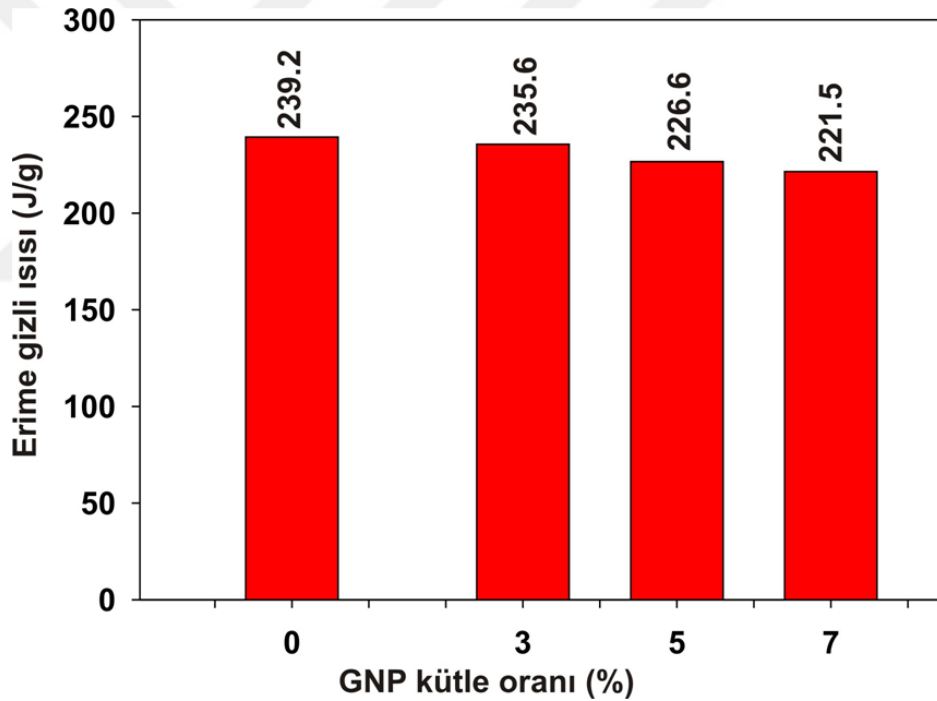
RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitleri için endoterm eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda elde edilen nicelik veriler aşağıda verilmiştir. Tablo 3.1’de; T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitleri için verilmiştir. Tablo 3.1’den katkılanan GNP kütle oranının kompozitin karakteristik sıcaklıkları üzerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı görülmektedir.

Tablo 3. 1 DSC özellikleri (Sıcaklık)

Kompozite	$T_{eb}(^{\circ}C)$	$T_{ep}(^{\circ}C)$	$T_{es}(^{\circ}C)$
RT-44	40.26	43.46	44.73
%3 GNP/RT-44	40.11	43.55	44.81
%5 GNP/RT-44	40.34	43.48	44.63
%7 GNP/RT-44	40.40	43.71	44.90

RT-44 içerisine GNP eklentisinin kompozit enerji depolama kapasitesini (erime gizli ısısını) bir miktar azalttığından yukarıda bahsedilmiştir. RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerinin erime gizli ısıları için hesaplanan niceliksel veriler Şekil 3.5’te

karşılaştırılmıştır. RT-44'ün erime gizli ısısı 239.2J/g iken %3, %5 ve %7GNP katkılanan RT-44 kompozitlerinin erime gizli ısılarının sırasıyla 235.6 J/g, 226.6 J/g ve 221.5 J/g olduğu belirlenmiştir. Bu durumda %3 ve %5 GNP katkılanan RT-44 kompozitlerinin erime gizli ısılarının sırasıyla %1.51 ve %5.27 azaldığı söylenebilir. %7GNP/RT-44 kompoziti için erime gizli ısısındaki azalma RT-44'e kıyasla %7.5 civarındadır. GNP kütlesi katkılanması nedeniyle erime gizli ısısında görülen azalmanın nedenleri; i) GNP nanoparçacıkların enerji depolama yeteneklerinin düşük olması, ii) Kompozitlerin faz değişim sıcaklık aralığının (40-45°C) GNP nanoparçacık faz değişim aralığının çok altında olması, iii) Aynı miktarda RT-44 ve GNP/RT-44 kompoziti göz önüne alındığında GNP/RT-44 kompozitinin daha az FDM içermesi olarak sıralanabilir.

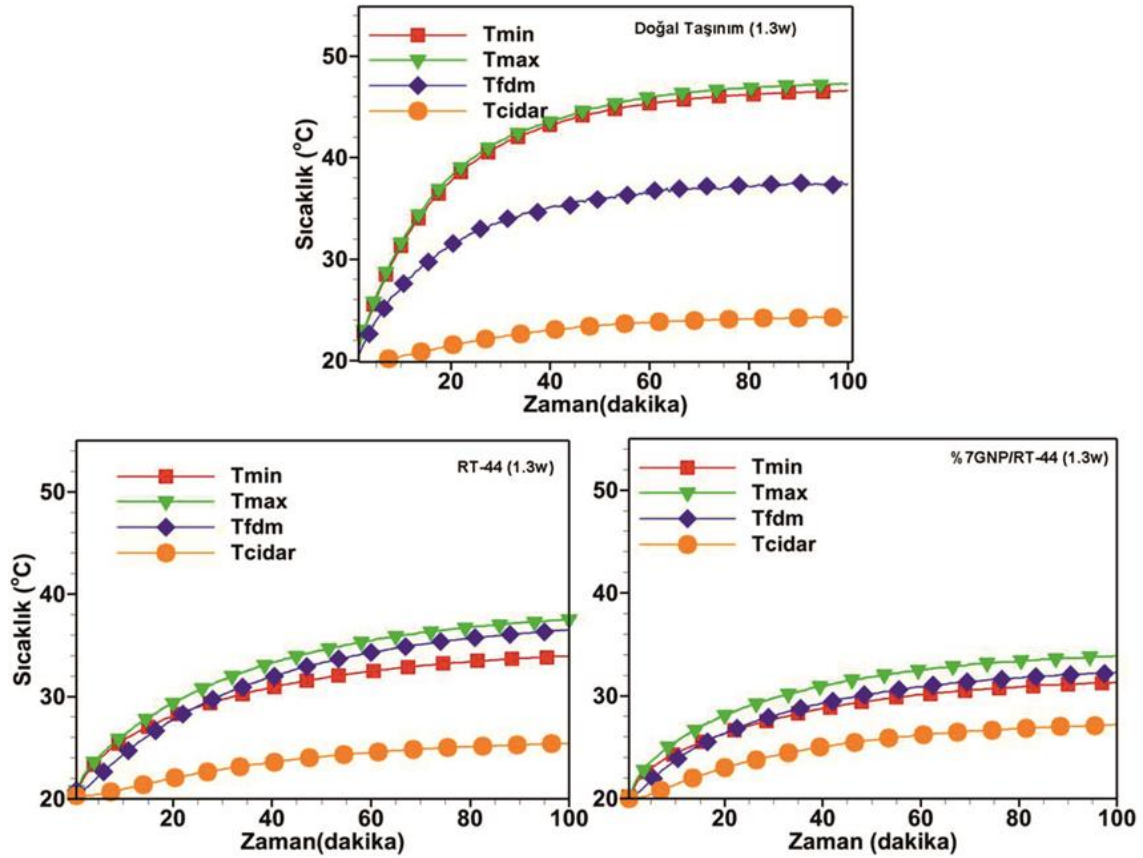


Şekil 3. 5 GNP kütle oranının erime gizli ısısı üzerindeki etkisi

Sonuç olarak ısı iletkenliği düşük RT-44 içerisine %7 GNP katkılanarak ısı iletkenliğinin 3 katın üzerinde artırılabilceği buna karşın enerji depolama kapasitesinin %7.5 azaldığı tespit edilmiştir. Enerji depolama kapasitesindeki azalmanın ısı iletkenlikteki artış ile tolere edilebileceği düşünülmektedir. Bu haliyle mevcut enerji depolama kapasitesinin (>200J/g) de uygulamada kullanım açısından yeterli olduğu söylenebilir.

3.3 Simülatif Batarya Paketinin Isıl Performans Testleri

Bu bölümde, farklı deşarj hızlarında çalıştırılan simülatif bir batarya paketinin pasif termal koruması sırasında en yüksek ısıl iletkenliğe sahip %7 GNP/RT-44 kompozitinin ısıl cevapları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar sadece RT-44 ve doğal taşınım durumlarındaki pasif termal koruma verileriyle karşılaştırılmıştır. Batarya paketinin deşarjı sırasında paket içerisindeki maksimum sıcaklık en önemli tasarım parametresi olup, bu sıcaklığın mümkün olduğunca 50°C'nin altında olması istenilen durumdur. Simülatif batarya paketi için maksimum sıcaklığa sahip hücre, düşük ısı yayılım yeteneği nedeniyle paket orta bölgesinde (ör: T_{max}=ısılçift #6) meydana gelmektedir. Bunun tam tersi olarak minimum sıcaklığa sahip hücrelerin ise çevre ile olan ısı kaybı nedeniyle pil paketinin dış bölgesine yerleşmiş hücrelerde (ör: T_{min}=ısılçift #9) olduğu söylenebilir. RT-44 (veya %7 GNP/RT-44) içerisindeki sıcaklık değişimi belirlemek için Şekil 2.11'de gösterildiği üzere 6 ve 7 numaralı hücreler arasına yerleştirilen ısıl çiftten (T_{FDM}) alınan veriler kullanılmıştır. Benzer şekilde batarya paketinin iç cidar yüzeyine yerleştirilen ısıl çift aracılığıyla (T_{cidar}) cidarın ısıl cevapları belirlenmiştir.



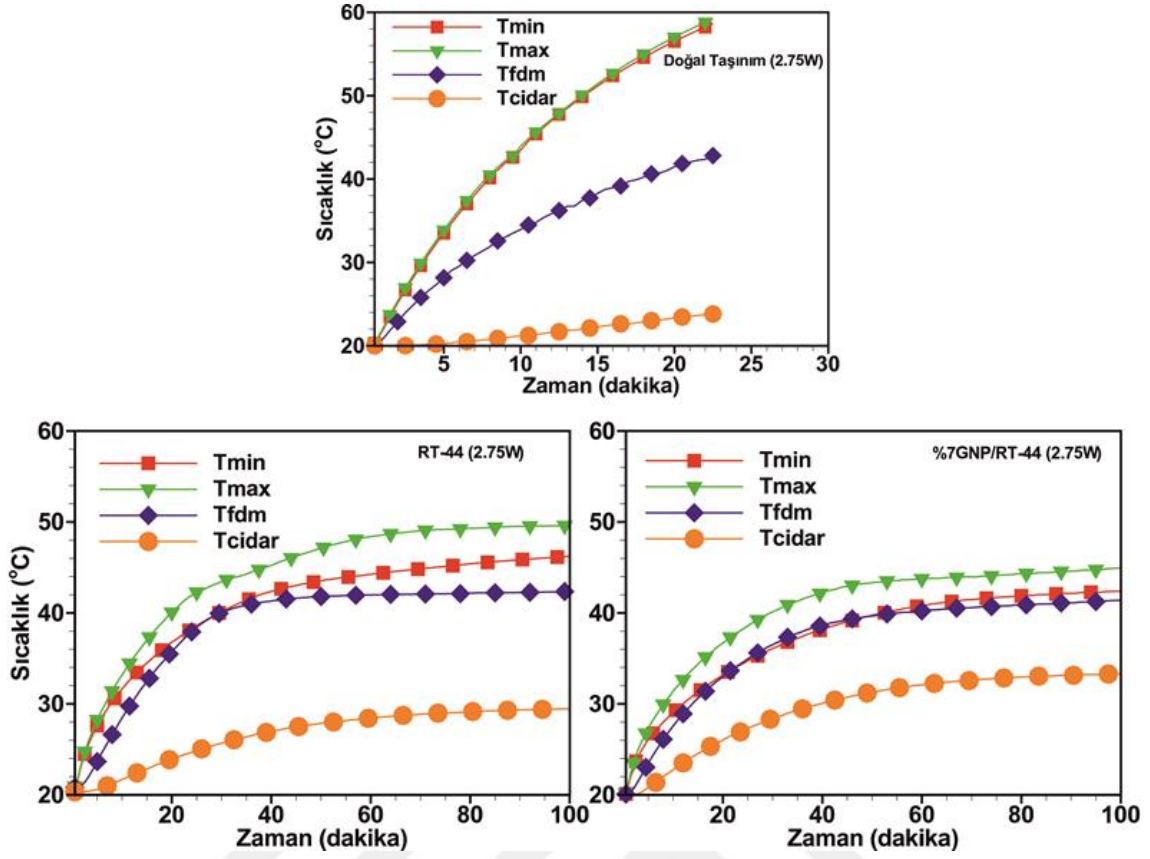
Şekil 3. 6 Simülatif batarya paketinin 1.3W deşarj hızındaki termal cevapları

Batarya paketinin 1.3W deşarj hızında 100 dakika boyunca çalıştırılması durumunda yukarıda bahsedilen noktalardaki sıcaklıkların değişimleri Şekil 3.6’da verilmiştir. 1.3W deşarj hızında çalıştırılan batarya paketinin doğal taşınımıyla pasif termal koruma sırasında batarya hücrelerinin sıcaklıklarının batarya paketi ve çevre arasındaki termal denge sağlanıncaya kadar hızlı bir biçimde arttığı söylenebilir. Buna neden olarak havanın doğal taşınım ısı transfer katsayısının düşük olması nedeniyle hücreler üzerinde oluşan ısının yeterince hızlı bir biçimde uzaklaştırılmaması gösterilebilir. Aynı nedenle cidar üzerindeki sıcaklığın da yavaş bir artış sergilediği söylenebilir. Bu durum paket içerisindeki maksimum sıcaklık noktası (T_{max}) ve minimum sıcaklık (T_{cidar}) noktası arasındaki sıcaklık farkının geniş bir aralıkta oluşmasına neden olmuştur. Esasen yukarıda da bahsedildiği gibi batarya hücre sıcaklıklarının mümkün olduğunca 50°C’nin altında kalması istenilen durumdur. Bu açıdan bakıldığında en kritik hücre maksimum sıcaklığa sahip hücredir (T_{max}). 1.3W deşarj hızında çalışan batarya paketi için maksimum sıcaklığın deşarj işlemi sonunda 47.27°C’ye ulaştığı ve batarya paketinin çalışması için güvenli sınırın (50°C) altında kaldığı söylenebilir. Benzer biçimde maksimum sıcaklık hücresi üzerinden ölçülen sıcaklık değişiminin ortalaması 42.23°C olarak belirlenmiştir.

Batarya paketinin RT-44 ve %7 GNP/RT-44 kullanımına dayalı pasif termal koruma durumundaki ısıl cevapları incelendiğinde maksimum sıcaklıktaki artışın kısmen yavaşladığı söylenebilir. RT-44 için faz değişiminin 41°C civarında başlayacağı göz önüne alındığında faz değişiminin henüz başlamadığı dolayısıyla bu yavaşlamanın nedeni olarak batarya hücreleri üzerinde açığa çıkan ısının RT-44 (veya %7 GNP/RT-44) tarafından duyulur ısı olarak depolanması gösterilebilir. Bu durumda, batarya hücreleri üzerindeki sıcaklık esasen; açığa çıkan ısının hücre yakın çevresinde duyulur olarak depolanması ve sonrasında ısının etkin bir biçimde hücre uzak bölgesine aktarılmasına bağlıdır. RT-44 pasif termal koruma durumunda deşarj işlemi sonucunda maksimum sıcaklık 37.57°C iken %7 GNP/RT-44 kullanımına dayalı pasif termal korumada maksimum sıcaklık 33.89°C olarak ölçülmüştür. Bu durumda %7 GNP/RT-44 pasif termal korumasında RT-44’e göre iyileştirilmiş ısıl iletkenlik dolayısıyla, batarya hücresi yakınında depolanan ısıl enerjinin kompozit içerisine transfer edilmesi suretiyle sıcaklık artışının daha iyi kısıtlandığı söylenebilir. Açığa çıkan ısının batarya hücrelerinden daha iyi uzaklaştırılmasının bir sonucu da cidar üzerindeki sıcaklığın

diğer iki duruma göre daha hızlı artmasıdır. Bu durum batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık noktası (T_{max}) ve minimum sıcaklık (T_{cider}) noktası arasındaki sıcaklık farkının azalmasını da sağlamıştır. %7 GNP/RT-44 kullanımına dayalı pasif termal koruma sırasında maksimum sıcaklık hücresi üzerindeki ortalama sıcaklık 30.73°C , RT-44 kullanımında 33.15°C ve doğal taşınım durumunda ise daha önce de belirtildiği üzere 42.23°C 'dir. Bu durumda %7GNP/RT-44 kompozitinin 1.3W deşarj hızında 20°C çevre koşullarında çalışan bir batarya paketinde sağladığı performans iyileştirmesinin RT-44 ve doğal taşınımına göre sırasıyla %7.30 ve %27.23 olduğu söylenebilir.

Deşarj hızının 2.75W olması durumunda elde edilen termal cevap eğrileri Şekil 3.7'de verilmiştir. 2.75W deşarj hızında doğal taşınımına maruz bırakılan batarya paketinde maksimum sıcaklık hücresinin 23 dakika gibi kısa bir süre sonunda 60°C 'ye ulaştığı tespit edilmiştir. 60°C sıcaklık limiti Lityum-iyon piller için üst sınırdır. Bu sıcaklığın üzerinde Lityum-iyon pillerin patlama riski söz konusudur. Bu anlamda yüksek deşarj hızlarında doğal taşınımın korumanın mümkün olmadığı söylenebilir.

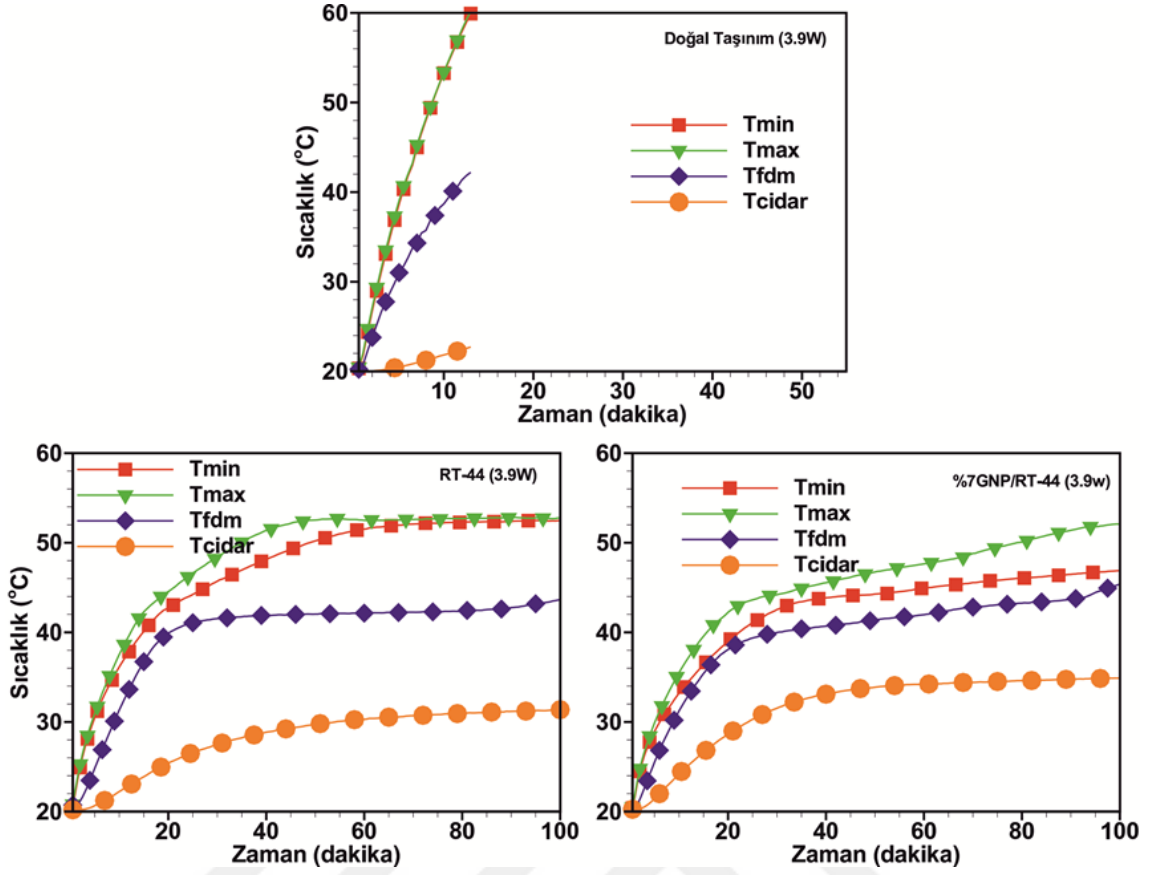


Şekil 3. 7 Simülatif batarya paketinin 2.75W deşarj hızındaki termal cevapları

2.75W deşarj hızında çalıştırılan RT-44 korumalı batarya paketi için doğal taşınımli korumaya göre başlangıçta duyulur enerji depolama bölgesinde sıcaklığın yavaş artış sergilediği sıcaklık grafiğinin eğiminin daha düşük olmasından anlaşılmaktadır. Bununla birlikte sıcaklığın faz değişiminin başlamasıyla belirgin bir biçimde azaldığı söylenebilir. Bu durum batarya hücresinde açığa çıkan ısıl enerjinin artık RT-44 tarafından gizli enerji olarak depolanmasıyla ilişkilidir. RT-44 kullanımına dayalı pasif termal korumda maksimum sıcaklığın deşarj işlemi sonunda 49.58°C olduğu tespit edilmiştir. Bu haliyle RT-44 pasif termal korumanın deşarj işlemi sonunda optimum sıcaklık sınırına dayandığı ancak yine de güvenli koruma sağladığı söylenebilir. Bununla birlikte %7 GNP/RT-44 pasif termal korumalı batarya paketinde batarya hücresinden alınan ısının bir kısmı faz değişimi için kullanılırken diğer kısmı ise ısıl iletkenliğin artırılmış olması nedeniyle kompozit içerisine dağılarak duyulur olarak depolanmaktadır. Bu durumda batarya hücrelerinden açığa çıkan ısıl enerji kompozit malzeme bütününe daha iyi yayılır ve batarya hücrelerinin sıcaklık artışının daha etkin

bir biçimde yavaşlatılmasına neden olur. Öyle ki 7% GNP/RT-44 pasif termal koruma durumunda maksimum batarya hücre sıcaklığı deşarj işlemi sonunda 44.97°C olarak ölçülmüştür. %7 GNP/RT-44 kullanımına dayalı pasif termal koruma sırasında maksimum sıcaklık hücresi üzerindeki ortalama sıcaklık 40.57°C, RT-44 kullanımında 44.34°C'dir. Bu durumda %7 GNP katkıları ile ısı iletkenliği artırılmış RT-44 kompozitinin 20°C çevre sıcaklığında 2.75W deşarj hızı için performans iyileştirmesi RT-44'e göre %8.5'tir.

Deşarj hızının 3.90W'a çıkarılması durumunda RT-44 veya %7 GNP/RT-44 tarafından duyulur olarak depolanan kısım önemli ölçüde kısalmaktadır (Şekil 3.8). Başka bir ifadeyle 3.90W deşarj hızında faz değişimi kısa bir süre içerisinde başlamaktadır. 2.75W deşarj hızına benzer olarak 41°C'den itibaren hücreler tarafından açığa çıkarılan ısı enerjinin gizli ısı olarak depolanması nedeniyle sıcaklık artışı yavaşlamaktadır. Faz değişiminin başlamasıyla ve batarya hücreleri etrafında sıvı oluşumunun başlamasıyla ısı transferinin iletim/taşınım yoluyla gerçekleşeceği söylenebilir. Bununla birlikte batarya hücreleri etrafındaki sıvı oranı belirli bir genişliğe gelinceye kadar bahsedilen karışık ısı transfer mekanizması iletim baskın biçimde gerçekleşmektedir. Bu durumda yavaşlama daha yüksek ısı iletkenliğe sahip %7GNP/RT-44 kompozitinde daha yavaş biçimde oluşmaktadır. Buna neden olarak yukarıda da bahsedildiği üzere batarya hücreleri tarafından açığa çıkarılan ısı enerjinin bir kısmının hücre yakın çevresindeki kompozit tarafından gizli ısı olarak depolanırken diğer kısmının yüksek ısı iletkenlikten dolayı iç taraflara aktararak duyulur olarak depolanmasıdır. Özetle ısı enerjinin RT-44'e nazaran kompozit bütününe daha iyi yayılmasıdır. RT-44 pasif termal korumasında batarya hücreleri etrafındaki sıvı RT-44 oranının belirli bir genişliğe ulaşmasının ardından taşınım akımlarının oluşmaya başlamaktadır[20]. Bu taşınım akımları batarya hücrelerinden yayılan ısıyı tamamen etkin bir biçimde dengelemekte ve neredeyse batarya paketi içerisindeki tüm RT-44 erinceye kadar maksimum hücre sıcaklığının sabit kalmasını sağlamaktadır. Bu esnada RT-44'ün sabit sıcaklıkta ısı kuyusu gibi davrandığı söylenebilir. Batarya hücreleri için maksimum sıcaklık değişiminin 52.7°C'de sabit sıcaklık platosu oluşturduğu Şekil 3.8'den görülmektedir. T_{FDM} ve T_{min} sıcaklık değişimleri içinde sıvı oranının oluşumuna bağlı olarak benzer davranışlar ortaya çıkmaktadır.



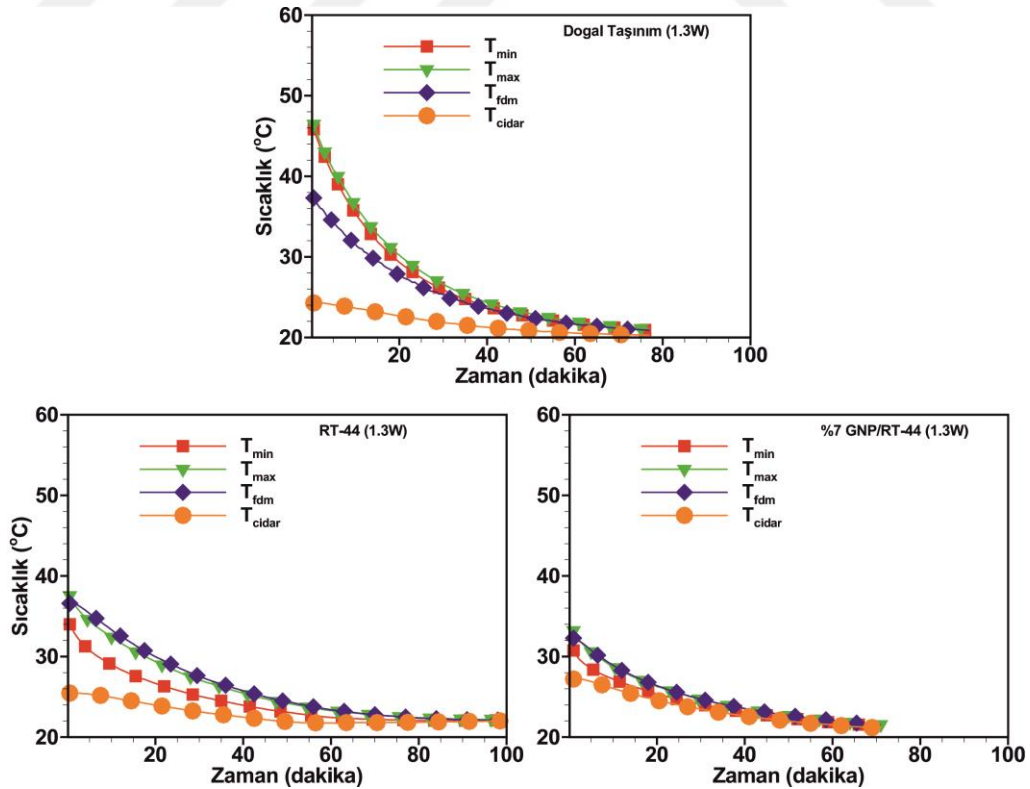
Şekil 3. 8 Simülatif batarya paketinin 3.90 deşarj hızındaki termal cevapları

Öte yandan RT-44'te görülen sabit sıcaklık platosunun %7GNP/RT-44 kompozitiyle pasif termal korumada oluşmadığı Şekil 3.8'den açık bir şekilde görülmektedir. %7GNP/RT-44 kompoziti ile pasif termal koruma durumunda sıcaklık değişimlerinin sabit kalmak yerine önceki termal eğilimlerini devam ettirerek düşük bir oranda artmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. %7 GNP/RT-44 kompozitinde sabit sıcaklık platosunun kaybolmasının nedeni, viskozite artışına bağlı olarak taşınım akımlarının önlenmesi olarak açıklanabilir. Farid ve ark. [41] gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında FDM içerisine katılanan nanoparçacık kütle oranının kompozit sıvı viskozitesini önemli ölçüde arttırdığını bildirmişlerdir. Sabit sıcaklık platolarının 50°C 'nin üzerinde olmasına rağmen, batarya paketlerinde maksimum sıcaklığı sınırlandırma açısından kontrol avantajı olarak görülebilirler.

3.90W deşarj hızında çalıştırılan batarya paketi nin %7 GNP/RT-44 kullanımına dayalı pasif termal koruma sırasında maksimum sıcaklık hücresi üzerindeki ortalama sıcaklık 45.25°C iken RT-44 kullanımında 48.54°C 'dir. Bu durumda %7 GNP katılarak ısı

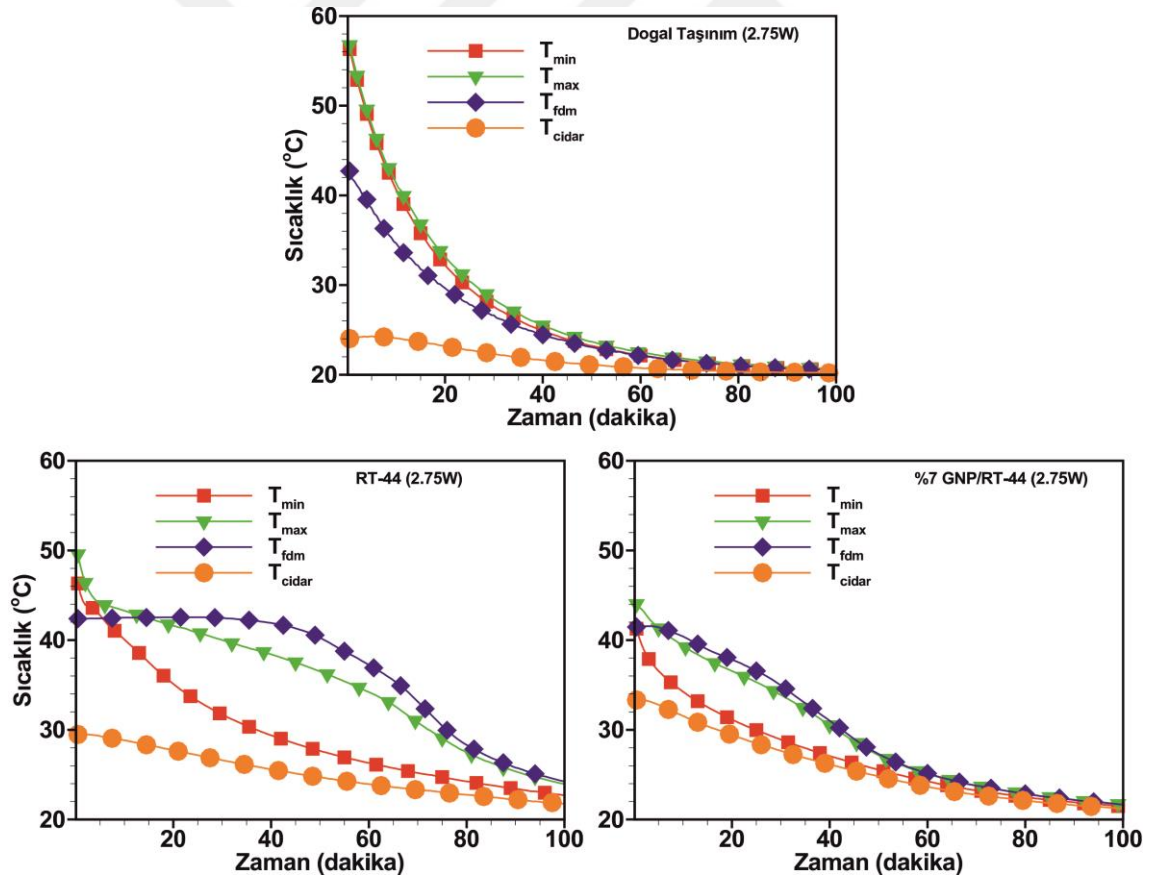
iletkenliği artırılmış RT-44 kompozitinin için performans iyileştirmesinin RT-44'e göre %6.8 olduğu söylenebilir. Batarya termal koruması için optimum üst sınır olan 50°C açısından değerlendirme yapılacak olursa her üç koruma yönteminde de maksimum hücre sıcaklığın 50°C'yi aştığı söylenebilir. 50°C'ye ulaşma süresinin (etkin koruma süresi) doğal taşınımına maruz bırakılan batarya paketinde 8.7 dakika, RT-44 pasif termal koruma durumunda 34.8 dakika ve %7 GNP/RT-44 pasif termal koruma durumunda ise 79 dakika olduğu belirlenmiştir. Etkin termal koruma süreleri açısından yapılan performans değerlendirmesine göre %7GNP/RT-44 pasif termal korumasının batarya paketinin maksimum hücre sıcaklığının etkin koruma süresini RT-44'e göre 2.3 kat doğal taşınımına göre ise 9.1 kat arttırdığı söylenebilir.

Pasif termal korumalı batarya paketlerinin soğuma performansları bir sonraki kullanıma hazır hale gelme açısından önemlidir. Şekil 3.9, 1.30W deşarj hızında 100 dakika çalıştırılan batarya paketinin soğuma işlemi sırasındaki termal cevaplarını vermektedir. Deşarj işlemi sonunda ulaşılan maksimum hücre sıcaklıklarının büyükten küçüğe sıralaması doğal taşınım, RT-44 ve %7 GNP/RT-44 biçimindedir. Buna rağmen üç farklı durum için de 60 dakikalık soğutma işlemi sonunda batarya paketi içerisindeki sıcaklıkların eşitlenmeye başladığı ve çevre ortam sıcaklığına yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 3. 9 Batarya paketinin soğuma performansları (1.3W)

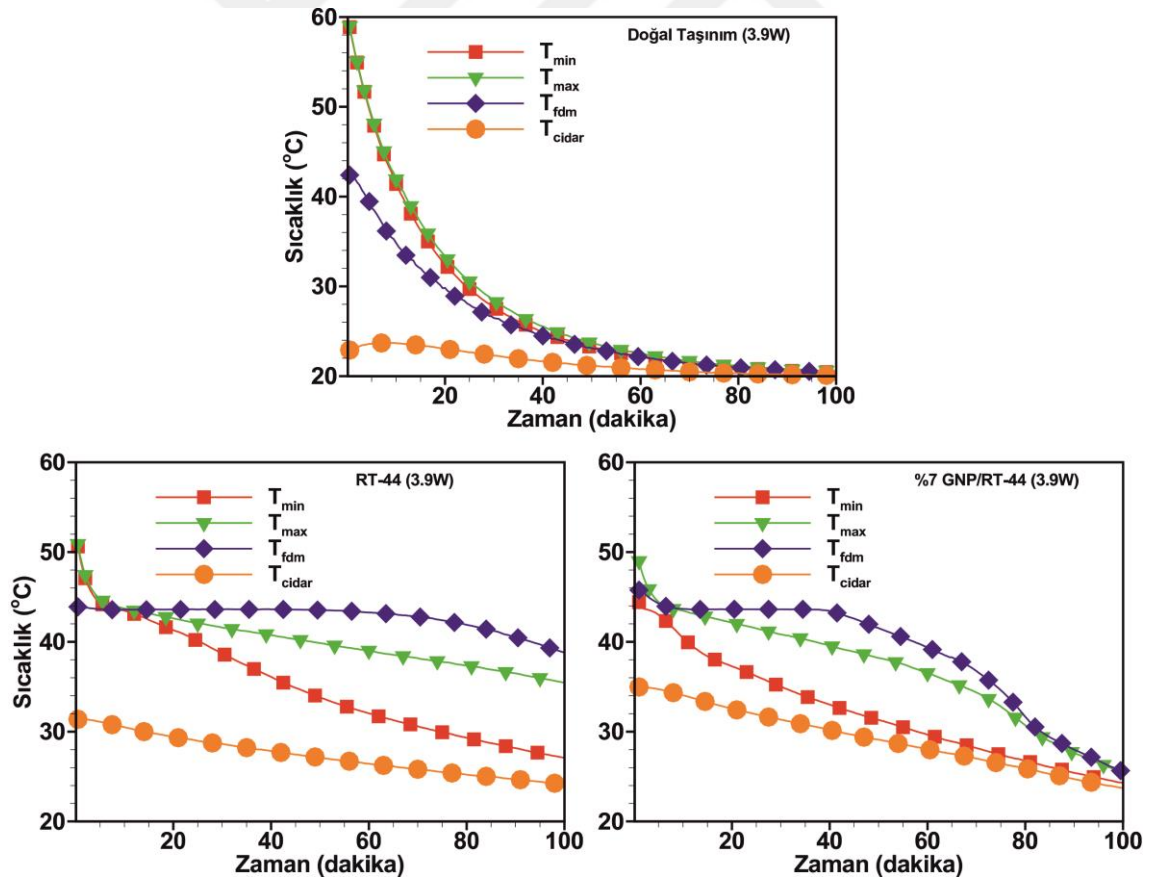
Şekil 3.10, 2.75W deşarj hızında 100 dakika çalıştırdıktan sonraki soğuma işlemi sırasındaki termal cevaplarını göstermektedir. Doğal taşınım durumunda batarya paketi içerisindeki sıcaklık 1.30W deşarj hızında olduğu gibi 60 dakikalık sürede ortam sıcaklığına yaklaştığı görülmektedir. Buna karşın RT-44 pasif termal korumasında soğumanın belirgin bir biçimde yavaş seyrettiği tespit edilmiştir. Özellikle maksimum sıcaklık bölgesinde (batarya paketi ortası) faz değişiminin başlamış olması soğuma hızının yavaşlamasının birincil nedenidir. Bununla birlikte minimum sıcaklık bölgesinin ve cidar bölgesinin halen katı fazda olması bu noktadaki soğuma hızının göreceli olarak daha hızlı gerçekleşmesini sağlamaktadır. Başka bir deyişle batarya paketi boyunca farklı noktalardan ölçülen sıcaklıklar arasındaki fark artmaktadır. Batarya paketi içerisindeki sıcaklıkların 100 dakikadan itibaren eşitlenmeye başladığı söylenebilir.



Şekil 3. 10 Batarya paketinin soğuma performansları (2.75W)

%7 GNP/RT-44 kompoziti kullanımına dayanan pasif termal koruma sırasında soğuma işleminin RT-44'e kıyasla hızlı bir biçimde gerçekleştiği açık biçimde görülmektedir. Buna neden olarak i) %7 GNP/RT-44 kullanılması durumunda kompozitin RT-44'e kıyasla daha az oranda faz değişimine uğraması ve bu sayede faz değişim süresindeki yavaşlamanın daha kısa sürmesi, ii) %7 GNP/RT-44 kompozitinin daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması nedeniyle batarya paketi içerisindeki soğutmanın daha etkin bir biçimde gerçekleşmesi gösterilebilir. %7 GNP/RT-44 kullanımda farklı nokta sıcaklıklarının 60. dakikadan itibaren eşitlenmeye başladığı görülmektedir.

Şekil 3.11, 3.90W deşarj hızında 100 dakika çalıştırdıktan sonraki soğuma işlemi sırasındaki termal cevaplarını göstermektedir. 3.90W deşarj hızında RT-44'ün büyük oranda faz değişimine uğraması onun soğuması sırasında sıvıdan katıya geçiş süresinin uzamasına neden olmaktadır. RT-44 pasif termal korumasına sahip bataryanın 3.90W deşarj işlemini takiben soğumasının 100 dakikalık kısmında faz değişim etkisinin ve bu nedenle soğumanın yavaş bir biçimde seyrettiği görülmektedir.



Şekil 3. 11 Batarya paketinin soğuma performansları (3.90W)

Benzer bir durum %7 GNP/RT-44 pasif termal korumasına sahip kompozit için de geçerlidir. %7 GNP/RT-44 kompozitinin daha az faz değişimine uğraması ve artan ısı iletkenliği dolayısıyla soğuma işlemini daha hızlı gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu durum 70. dakikadan itibaren farklı nokta sıcaklıklarının birbirine yaklaştığından anlaşılmaktadır.

Lityum-iyon pil paketleri için paket boyunca uniform sıcaklık dağılımı; daha yüksek kapasite kullanımı, daha düşük kapasite kaybı ve batarya sisteminin güvenilirliği gibi nedenlerden dolayı gerekli bir durumdur. Özellikle deşarj işlemi sırasında batarya hücreleri arasındaki maksimum sıcaklık farkının 5°C'nin altında tutulması istenilen bir tasarım parametresidir. Simülatif batarya paketi için maksimum sıcaklık hücresinin batarya paketi ortasında (örneğin 6 numaralı) olduğundan yukarıda bahsedilmiştir. Aynı batarya paketi için minimum sıcaklığa sahip hücre ise batarya paketi ve çevresi arasındaki ısı etkileşiminden dolayı batarya paketinin dış bölgesinde (örneğin 9 numaralı) oluşmaktadır. Bu durumda batarya paketi içerisinde hücreler arasındaki sıcaklık farkı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

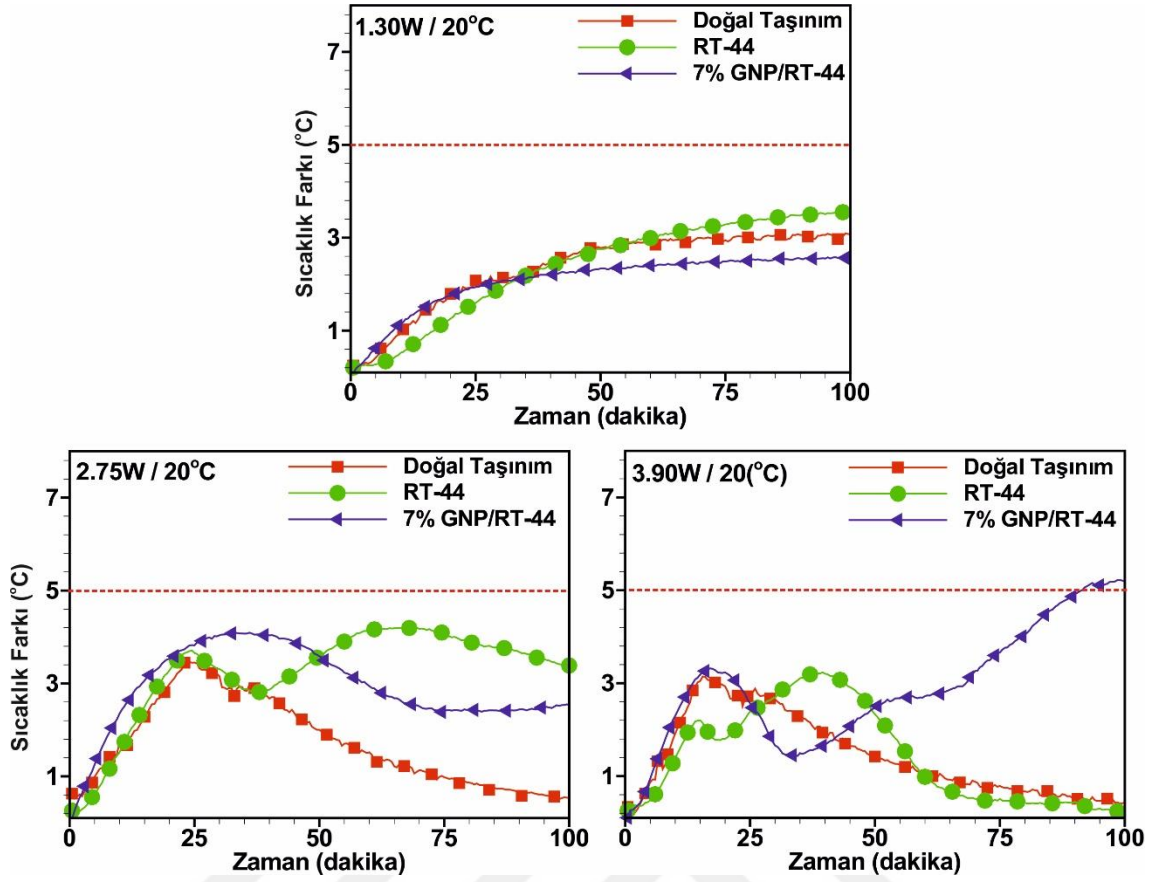
$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (3.2)$$

burada;

ΔT : Batarya hücreleri arasındaki maksimum sıcaklık farkı (°C),

T_{\max} : Maksimum sıcaklığa sahip batarya hücresi (6 numaralı) (°C),

T_{\min} : Minimum sıcaklığa sahip batarya hücresi (9 numaralı) (°C),



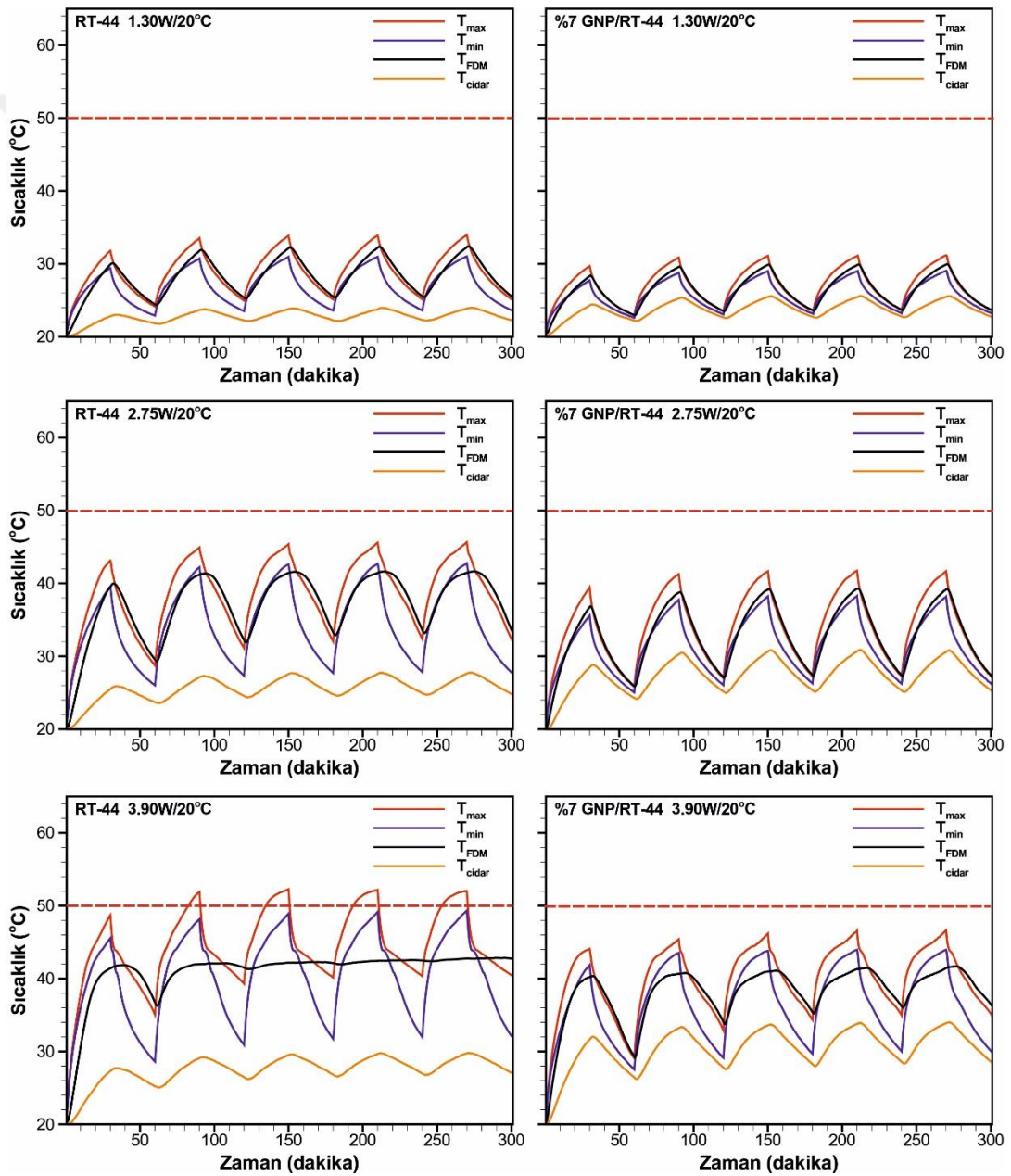
Şekil 3. 12 Batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık farkı

Faz değişiminin görülmediği 1.30W deşarj hızında üç farklı termal koruma yönteminin de hücreler arası maksimum sıcaklık farkını 5°C 'nin altında tuttuğu söylenebilir. Bununla birlikte 35. dakikadan itibaren %7 GNP/RT-44 kompoziti sıcaklık farkını daha düşük tutmayı başarmaktadır. 2.75W deşarj hızında başlangıçta üç farklı koruma yöntemi için de sıcaklık farkı benzer bir davranış göstererek hızlı bir biçimde artmaktadır. 24.dakikadan itibaren doğal taşınım korumasında sıcaklık farkının düşmesi maksimum sıcaklığın 60°C 'ye ulaşması nedeniyle deşarj işleminin sonlandırılmasıdır. Benzer durum 3.90W deşarj hızında 16. dakikada gerçekleşmiştir. Esasen 2.75W ve 3.90W deşarj hızlarında RT-44 (veya %7 GNP/RT-44) faz değişimine uğramaktadır. Faz değişiminin başlaması maksimum sıcaklık farkını azaltmaktadır. Bunun nedeni faz değişiminin öncelikle batarya paketi orta bölgesinde başlamasıyla T_{\max} 'ın artış hızının yavaşlaması buna karşılık batarya dış bölgesinde henüz faz değişiminin başlamamış olması nedeniyle T_{\min} 'in olağan artış hızıyla artmaya devam etmesidir. Faz değişimine bağlı sıcaklık farkındaki azalma biraz gecikmeli olarak %7GNP/RT-44 kompozitinde de görülmektedir. Bununla birlikte bu azalışın %7GNP/RT-44 kompozitinde daha belirgin

olduğu görülmektedir. Buna neden olarak T_{max} sıcaklığındaki artışın faz değişim esnasında daha etkin bir biçimde yavaşlatılması gösterilebilir. Batarya orta bölgesindeki hücreler etrafında faz değişiminin sonlanmasıyla (sıvı RT-44 veya %7GNP/RT-444 oluşumu) T_{max} sıcaklığı yeniden artışa geçmektedir. Bu durum maksimum sıcaklık farkının da yeniden artmaya başlamasına neden olmaktadır. Bahsedilen artış, RT-44 termal korumasında T_{max} 'ın sabit sıcaklık platosu oluşturmasına kadar devam etmektedir. Bu zaman diliminde T_{max} 'ın doğal taşınım hareketleri sonucunda sabit kalması ve aynı anda T_{min} 'in sıcaklık artışına devam etmesi maksimum sıcaklık farkının hızlı bir biçimde azalmasına neden olmaktadır. Buna karşılık %7 GNP/RT-44 kompozitinde doğal taşınım hareketlerinin baskılanması sonucu T_{max} 'ın sabit sıcaklık platosu oluşturmaması dahası artışa devam etmesi, maksimum sıcaklık farkının sürekli artışına neden olmaktadır. Öyle ki 3.90W deşarj hızındaki batarya paketi için 100 dakikalık deşarj işleminin sonuna doğru 5°C limit değerinin hafifçe üzerine çıktığı görülmektedir. Buna rağmen hem RT-44'ün hem de %7 GNP/RT-44'ün batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık farkını 5°C'in altında tutma konusunda başarılı oldukları söylenebilir

Sürekli olarak devam eden deşarj/soğutma çevrimleri batarya paketlerinde tehlikeli olabilecek yüksek sıcaklık artışlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle önceki deşarj/soğutma çevriminin sonrakiler üzerinde etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Geçici olarak deşarj/soğutma biçiminde çalıştırılan simülatif batarya paketinin deşarj işlemi sırasındaki sıcaklık artışının bir sonraki deşarj işlemine etkisini incelemek için 5 deşarj/soğutma çevrimi gerçekleştirilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için simülatif batarya paketinin 30 dakika boyunca çalıştırıldığı ve daha sonra aynı süre boyunca durdurulduğu bir senaryo, her döngü için kabul edilmiştir. Şekil 3.10, 20°C ortam sıcaklığında 1.30W, 2.75W ve 3.90W deşarj hızlarında çalıştırılan batarya paketleri içerisindeki farklı noktaların (T_{max} , T_{min} , T_{PCM} ve T_{cidar}) deşarj/soğutma çevrimleri boyunca değişimini RT-44 ve %7 GNP/RT-44 termal koruma için vermektedir. 1.30W ve 2.75W deşarj hızları için hem RT-44 hem de %7 GNP/RT-44 termal korumasının gerekli termal korumayı sağladığı söylenebilir. Çünkü her iki durumda da maksimum sıcaklık hücresinin sıcaklığı optimum limit olan 50°C'nin altında kalmaktadır. Özellikle 1.30W deşarj hızında gerek RT-44 gerekse de %7GNP/RT-44'ün aynı zamanda faz değişim sıcaklığının da (41°C-44°C) altında kaldığı görülmektedir. Bu durumda ısıl iletkenliği arttırılmış %7GNP/RT-44'ün deşarj sırasında daha yavaş, soğutma sırasında

da daha hızlı sıcaklık değişimi sergilediği görülmektedir. Bu durum T_{max} sıcaklık değişiminin genliğinin küçülmesinden anlaşılmaktadır. 5 deşarj/soğutma çevrimi sırasında ulaşılan maksimum sıcaklık (5. Deşarj sonunda) RT-44 koruması için $33.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken %7 GNP/RT-44 termal korumasında $31.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte batarya paketi içerisindeki tüm sıcaklık değişimlerinin RT-44'e kıyasla birbirine daha fazla yaklaştığı görülmektedir. 2.75W deşarj hızında RT-44 termal korumasında sıcaklık değişimlerinin %7 GNP/RT-44'e kıyasla küçüldüğü görülmüştür. Buna neden olarak RT-44'ün deşarj işleminin sonuna doğru faz değişimine uğrarken %7 GNP/RT-44'ün uğramaması gösterilebilir.

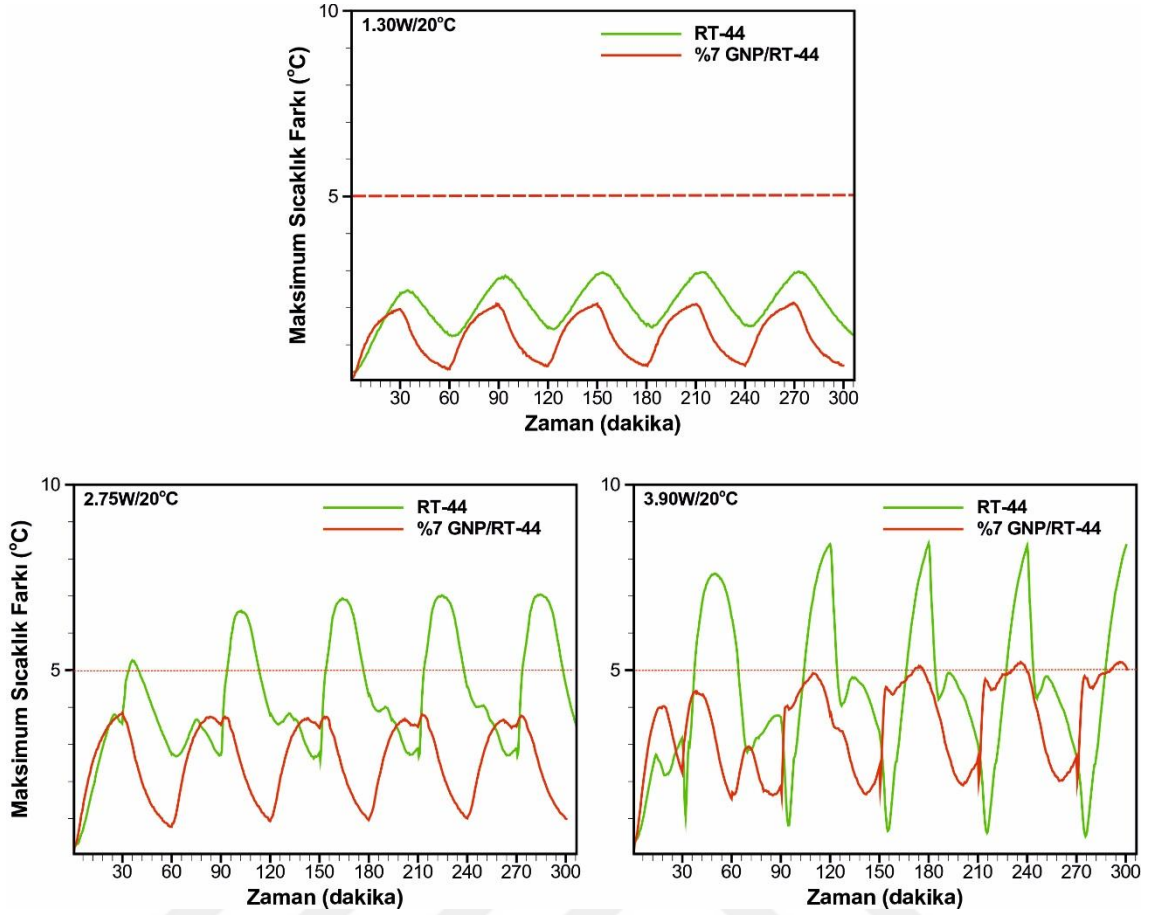


Şekil 3. 13 Deşarj/soğutma çevrimleri

Çünkü faz değişiminin başlamış olması hem deşarj hem de soğutma sırasında sıcaklık değişimini önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Ama yine de T_{max} sıcaklığının kısıtlanması açısından %7 GNP/RT-44'ün başarılı olduğu söylenebilir. Öyle ki 5 deşarj/soğutma çevrimi sırasında ulaşılan maksimum sıcaklık (5. Deşarj sonunda) RT-44 koruması için 45.66 °C iken %7 GNP/RT-44 termal korumasında 41.68 °C olarak belirlenmiştir. 3.90W deşarj hızında RT-44 termal korumasının maksimum sıcaklık kısıtlaması açısından başarısız olduğu 50°C limit değerini aşılmasından anlaşılmaktadır. Batarya paketinin RT-44 termal koruma sırasında maksimum sıcaklığın (T_{max}) deşarj/soğutma çevrimleri sonucunda 52.03°C'ye ulaştığı belirlenmiştir. Bununla birlikte %7 GNP/RT-44 termal korumasının 5 deşarj/soğutma çevrimi boyunca maksimum sıcaklığı 50°C'nin altında tutmayı başardığı görülmektedir. Batarya paketinin %7GNP/RT-44 termal koruma sırasında maksimum sıcaklığın (T_{max}) deşarj/soğutma çevrimleri sonucunda 46.61°C'ye ulaştığı belirlenmiştir. 3.90W deşarj hızında %7 GNP/RT-44'ün de faz değişimine uğramaya başlamasıyla batarya paketi içerisindeki her bir noktanın değişim genliğinin küçüldüğü görülmektedir. Buna ilave olarak cidar sıcaklığının daha hızlı tepki vermesi bunun sonucunda batarya paketi boyunca maksimum sıcaklık farkının RT-44'e kıyasla belirgin bir biçimde azaldığı söylenebilir.

Sürekli olarak devam eden deşarj/soğutma çevrimleri sırasında batarya paketinin maksimum ve minimum sıcaklığa sahip hücreleri arasındaki sıcaklık farkının değişimleri Şekil 3.11'de verilmiştir. Termal koruma malzemesinin (RT-44 veya %7 GNP/RT-44) faz değişimine uğramadığı durumlarda batarya paketi maksimum sıcaklık farkının deşarj işlemi sırasında arttığı soğutma işlemi sırasında ise azaldığı görülmektedir. Örneğin 1.30W deşarj hızı için hem RT-44 hem de %7 GNP/RT-44 beş deşarj/soğutma çevrimi boyunca katı fazda kalmaktadır. Yukarıda bahsedildiği üzere 1.30W deşarj hızında çalıştırılan batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık farkı deşarj işlemi sırasında artmakta, soğutma işlemi sırasında ise azalmaktadır. Kritik sıcaklık farkı açısından (5°C) değerlendirildiğinde her iki termal korumanın da düzgün sıcaklık dağılımı kriterini sağladığı görülmektedir. Buna ilave olarak RT-44 için maksimum sıcaklık farkı 2.96°C iken %7 GNP/RT-44 için bu sıcaklık farkı 2.12°C olarak ölçülmüştür. 1.30W deşarj hızının aksine 2.75W ve 3.90W deşarj hızlarında maksimum sıcaklık farkı değişiminin farklı bir eğilim sergilediği görülmektedir. Buna neden olarak batarya iç bölgesi (maksimum sıcaklık bölgesi) ve dış bölgesi (minimum sıcaklık bölgesi) arasında faz değişiminin farklı zamanlarda gerçekleşmesi gösterilebilir.

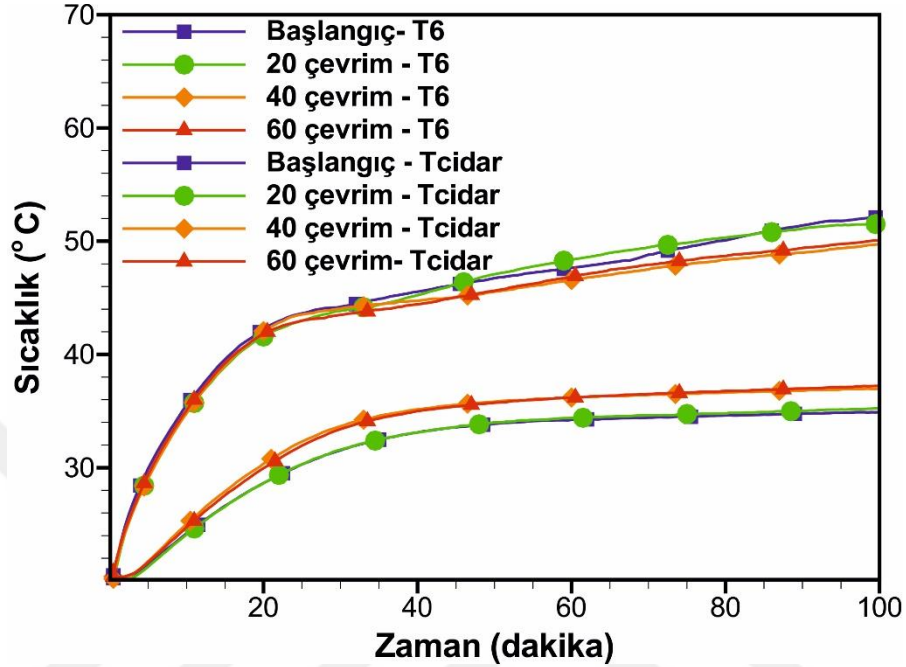
Örneğin deşarj işlemi sırasında batarya iç bölgesinde faz değişiminin başlamasına karşın batarya dış bölgesi katı halde kalmaya devam etmektedir. Bu durumda deşarj işleminin sonlanmasıyla başlayan soğuma işlemi sırasında iç ve dış bölgedeki sıcaklıkların değişim hızları farklı olmaktadır. Batarya iç bölgesinin iki-fazlı karakteristiğe sahip olması T_{max} 'ın azalma hızını önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Buna karşılık dış bölgenin tek fazlı karakteristikte olması ve çevreyle olan ısı etkileşimi yüzünden minimum sıcaklık hücrelerinin hızlı biçimde soğuduğu söylenebilir. İki bölge arasındaki bahsedilen farklılık batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklık farkının soğuma işleminin başlangıcında önemli derecede artmasına neden olmaktadır. RT-44 termal koruması durumunda batarya hücreleri arasındaki maksimum sıcaklık farkının 2.75W ve 3.90W deşarj hızlarında sırasıyla 7.03°C ve 8.40°C olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık %7 GNP/RT-44 termal korumasında maksimum sıcaklık farkının kritik değerin altında veya civarında olduğu görülmektedir. %7 GNP/RT-44 termal korumasında maksimum sıcaklık farkının 2.75W ve 3.90W deşarj hızlarında sırasıyla 3.76°C ve 5.19°C olduğu ve RT-44'e göre batarya paketi içerisindeki sıcaklık farkının düzgün dağılımı açısından daha etkin bir koruma sağladığı söylenebilir.



Şekil 3. 14 Deşarj/soğutma çevrimleri boyunca maksimum sıcaklık farkı

Yukarıdaki sonuçlardan %7 GNP/RT-44 kompozitinin gerek maksimum sıcaklığı sınırlandırma gerekse de maksimum sıcaklık farkının azaltılması konusunda RT-44'e göre iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte %7 GNP/RT-44'ün aynı termal performansı kompozitin erime/katılaşma çevrimlerinden sonra da gösterip gösteremeyeceği merak edilebilir. Çünkü erime/katılaşma çevrimleri sonucunda RT-44'ün içerisine homojen olarak dağıtılmış olan GNP nanoparçacıklarının bir araya gelme veya çökme gibi davranışlar göstermesi onun ısı iletkenlik özelliğini önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle %7 GNP/RT-44 kompozitinin uygulamada güvenilir olarak kullanılabilmesi onun termal kararlılığına bağlıdır. Daha başka bir ifadeyle %7 GNP/RT-44 kompozitinin iyileştirilmiş termal özelliklerinin devam eden deşarj/soğutma çevrimleri süresince bozulmaması gerekmektedir. Termal kararlılık testleri başlangıç, 20, 40 ve 60 deşarj/soğutma çevrimleri boyunca batarya paketi içerisindeki termal cevaplar ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Batarya paketinin 3.90W deşarj hızında çalıştırılması durumu için T_{max} ve T_{cidar} sıcaklıklarının zamana göre değişimleri Şekil 3.12'de verilmiştir. Şekil 3.12 incelendiğinde sıcaklık değişimlerinin

deşarj/soğutma çevrimlerinden hafifçe etkilendiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum sıcaklık değişiminin hafifçe aşağı doğru kaydığı ve duvar sıcaklık değişiminin de hafifçe yukarı kaydığı açıktır.



Şekil 3. 15 Termal kararlılık testleri

Başka bir deyişle zamana bağlı T_{max} değerleri azalırken T_{cidar} değerleri artmaktadır. Bu sonuç devam edendeşarj/soğutma çevrimleri sırasında ısı iletkenliğinin daha da iyileştirildiğinin bir göstergesidir. Bu sayede hücre üzerinde açığa çıkan ısı enerjisinin daha etkin biçimde cidara doğru uzaklaştırılmasıyla T_{max} daha düşük, T_{cidar} ise daha yüksek olarak değişimine devam etmiştir. Bu durumda malzemenin termal özelliklerinin bozulmadığı aksine daha da geliştirildiği söylenebilir. Özetle, malzemenin uzun dönem kullanımı sırasında erime ve katılaşmasına bağlı olarak GNP nanoparçacıklarının RT-44 içerisindeki homojen dağılımlarının bozulmadığı aksine ısı transferi açısından daha etkin bir iletim ağının meydana geldiği söylenebilir.

4. SONUÇLAR

Bu tez; erime sıcaklığı 41-45°C aralığında bulunan organik bir faz değişken malzemenin (RT-44) düşük ısı iletkenliğinin GNP nanoparçacık katkılanarak iyileştirilmesini ve simülatif olarak tasarlanmış bir lityum-iyon batarya paketinin pasif termal korumasında kullanılabilirliğinin araştırılmasına yönlendirilmiştir. Tez kapsamında öncelikle RT-44 içerisine %3, %5 ve %7 GNP katkılanarak elde edilen GNP/RT-44 kompozitlerinin termal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Termal karakterizasyon olarak GNP nanoparçacık katkısının ısı iletkenlik üzerindeki iyileştirmeleri ve DSC özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen termal karakterizasyon sonucunda en iyi ısı iletkenlik ve DSC özelliklerine sahip %7 GNP/RT-44 kompozitinin simülatif batarya paketinin termal korumasındaki performansları maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkı kriterleri açısından belirlenerek sadece RT-44 ve doğal taşınım korumalarıyla karşılaştırılmıştır. Benzer karşılaştırmalar dinamik deşarj/saoğutma çevrimleri içinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- GNP katkılanmamış yalın RT-44 organik faz değişken malzemesinin katı haldeki ortalama ısı iletkenliğinin 0.378 W/mK, sıvı haldeki ortalama ısı iletkenliğinin ise 0.151 W/mK olduğu belirlenmiştir.
- RT-44 katı içerisine katkılanan GNP nanoparçacık kütlesiyle orantılı biçimde hem katı hem de sıvı ısı iletkenlikleri artmaktadır. Buna ilave olarak katı haldeki ısı iletkenlik artışının sıvı hale nazaran daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Isı iletkenlik değerleri tüm kompozitler ve RT-44 için katı halden tamamen sıvı hale geçtiklerinde keskin bir biçimde azalmaktadırlar.
- %3, %5 ve %7 GNP katkılanan kompozitlerin katı fazı için ısı iletkenlikte sağlanan ortalama iyileşmeler sırasıyla, %113.0, %168.3 ve %225.6 civarındadır. Buna karşılık %3, %5 ve %7 GNP katkılanan kompozitlerin sıvı fazdaki ısı iletkenliklerinde elde edilen iyileştirmeler sırasıyla, %53.3, %79.3 ve %131.4 olarak belirlenmiştir.

- GNP nanoparçacık katkılanmasıyla sıvı kompozitin viskozitesinin artması GNP katkısı için üst limiti %7 olarak sınırlandırmıştır. Daha yüksek GNP oranlarının artan viskozite nedeniyle sıvı RT-44 içerisinde karıştırılması pek mümkün görünmemektedir.
- Katkılanmamış RT-44 faz değişken malzemesinin erime başlangıç (T_{eb}) sıcaklığının 40.26°C , erime sonlanma sıcaklığının (T_{es}) 44.73°C ve erime tepe sıcaklığının (T_{ep}) 43.26°C olduğu belirlenmiştir.
- Kütlece %3, %5 ve %7 GNP katkılanmasının GNP/RT-44 kompozitinin erime başlangıç (T_{eb}), erime tepe (T_{ep}) ve erime sonlanma (T_{es}) sıcaklıkları üzerinde herhangi bir etkide bulunmadığı görülmüştür.
- Katkılanmamış RT-44 faz değişken malzemesinin erime gizli ısısı (H_e) 239.24 J/g olarak ölçülmüştür.
- Kütlece %3, %5 ve %7 GNP katkılanmasının GNP/RT-44 kompozitinin erime gizli sınırlarını (H_e) sırasıyla %1.51, %5.27 ve %7.5 azalttığı belirlenmiştir.
- 1.3W deşarj hızında çalıştırılan bir batarya paketinin %7 GNP/RT-44 kompoziti ile pasif termal korumasının, RT-44 ve doğal taşınımına göre batarya paketi içerisindeki maksimum sıcaklığın kısıtlanması performansı açısından sırasıyla %7.30 ve %27.23 performans iyileştirmesi sağladığı belirlenmiştir.
- 2.75W deşarj hızında çalıştırılan bir batarya paketi için taşınım ile termal korumanın mümkün olmadığı belirlenmiştir. 7 GNP/RT-44 kompoziti ile pasif termal korumasının, RT-44'e kıyasla maksimum sıcaklık açısından termal performans iyileştirmesi %8.5 olarak belirlenmiştir.
- 3.90W deşarj hızında çalıştırılan bir batarya paketi için taşınım ile termal koruma işe yaramamaktadır. Maksimum sıcaklık kriteri açısından RT-44 pasif termal koruma süresinin 34.8 dakika, %7GNP/RT-44'ün ise 79 dakika olduğu belirlenmiştir. RT-44'te oluşan sabit sıcaklık platosunun %7 GNP/RT-44'te

oluşmaması nedeniyle performans iyileştirmesinin biraz düşerek %6.8 olduğu belirlenmiştir.

- Batarya içerisindeki üniform sıcaklığın sağlanması açısından yapılan değerlendirmede 1.30W, 2.75W ve 3.90W deşarj hızında çalıştırılan batarya paketleri için RT-44 ve %7 GNP/RT-44 pasif termal korumalarının başarılı olduğu görülmüştür.
- 1.30W ve 2.75W deşarj hızlarında çalıştırılan batarya paketi için %7GNP/RT-44'ün batarya içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığı belirlenmiştir. 3.90W deşarj hızında çalıştırılan batarya paketi için deşarj işleminin ilk yarısında %7 GNP/RT-44, ikinci yarısında ise RT-44 daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır.
- Batarya paketinin beş deşarj/soğutma çevrimi boyunca ulaştığı maksimum sıcaklıklar RT-44 pasif termal korumasında 1.30W, 2.75W ve 3.90W deşarj hızları için sırasıyla 33.97°C, 45.66 °C, 52.03°C'dir. Aynı sıcaklıklar %7GNP/RT-44 pasif termal korumasında 31.18 °C, 41.68 °C ve 46.61°C olarak ölçülmüştür.
- Batarya paketinin beş deşarj/soğutma çevrimi sırasında ulaştığı maksimum sıcaklık farkları RT-44 pasif termal korumasında 1.30W, 2.75W ve 3.90W deşarj hızları için sırasıyla 2.96°C, 7.03°C ve 8.40°C olarak ölçülmüştür. Maksimum sıcaklık farkları %7 GNP/RT-44 pasif termal korumasında aynı deşarj hızları için sırasıyla 2.12°C, 3.76°C ve 5.19°C olarak belirlenmiştir.
- Termal kararlılık testleri %7 GNP/RT-44 kompozitinin 0, 20, 40 ve 60 deşarj/soğutma çevrimi sırasında bozulmadığını, GNP nanoparçacıkların herhangi bir topaklaşma ve çökmeye uğramadıklarını ve RT-44 içerisindeki düzgün dağılımlarını koruduklarını göstermiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] **Z. Rao and S. Wang**, (2011) “A review of power battery thermal energy management,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4554–4571.
- [2] **A. Jarrett and I. Y. Kim**,(2011) “Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 23, pp. 10359–10368.
- [3] **C. Lin, S. Xu, G. Chang, and J. Liu**, (2015)“Experiment and simulation of a LiFePO₄ battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets,” *J. Power Sources*, vol. 275, pp. 742–749.
- [4] **C. V. Hémerly, F. Pra, J. F. Robin, and P. Marty**,(2014)“Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material,” *J. Power Sources*, vol. 270, pp. 349–358.
- [5] **Z. G. Qu, W. Q. Li, and W. Q. Tao**,(2014)“Numerical model of the passive thermal management system for high-power lithium ion battery by using porous metal foam saturated with phase change material,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 8, pp. 3904–3913.
- [6] **P. Ramadass, B. Haran, R. White, and B. N. Popov**, (2003) “Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures,” *J. Power Sources*, vol. 112, no. 2, pp. 614–620.
- [7] **J. Yan, K. Li, H. Chen, Q. Wang, and J. Sun**, (2016)“Experimental study on the application of phase change material in the dynamic cycling of battery pack system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 128, pp. 12–19.
- [8] **T. Xu et al.**, (2014)“Experimental and numerical investigation of the application of phase change materials in a simulative power batteries thermal management system,” *Appl. Energy*, vol. 121, pp. 104–113.
- [9] **S. Park and D. Jung**, (2013)“Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle,” *J. Power Sources*, vol. 227, pp. 191–198.
- [10] **R. Mahamud and C. Park**, (2011)“Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 13, pp. 5685–5696.
- [11] **H. Fathabadi**, (2014)“A novel design including cooling media for Lithium-ion batteries pack used in hybrid and electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 245, pp. 495–500.
- [12] **Z. Wang, Z. Zhang, L. Jia, and L. Yang**, (2015) “Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 78, pp. 428–436.
- [13] **R. Sabbah, R. Kizilel, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj**, (2008)“Active (air-

- cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution,” *J. Power Sources*, vol. 182, no. 2, pp. 630–638.
- [14] **Z. Ling, F. Wang, X. Fang, X. Gao, and Z. Zhang**, (2015)“A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling,” *Appl. Energy*, vol. 148, pp. 403–409.
- [15] **L. Fan, J. M. Khodadadi, and A. A. Pesaran**, (2013)“A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 238, pp. 301–312.
- [16] **S. Al Hallaj and J. R. Selmán**, (2000)“A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material,” *J. Electrochem. Soc.*.
- [17] **S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selmán, and S. Al-Hallaj**, (2004)“Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter,” *J. Power Sources*.
- [18] **F. Bahiraei, A. Fartaj, and G. A. Nazri**, (2017)“Experimental and numerical investigation on the performance of carbon-based nanoenhanced phase change materials for thermal management applications,” *Energy Convers. Manag.*.
- [19] **J. Zhao, P. Lv, and Z. Rao**, (2017)“Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*.
- [20] **Z. Wang, H. Zhang, and X. Xia**, (2017) “Experimental investigation on the thermal behavior of cylindrical battery with composite paraffin and fin structure,” *Int. J. Heat Mass Transf.*.
- [21] **R. Kizilel, A. Lateef, R. Sabbah, M. M. Farid, J. R. Selmán, and S. Al-Hallaj**, (2008)“Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature,” *J. Power Sources*.
- [22] **S. A. Khateeb, S. Amiruddin, M. Farid, J. R. Selmán, and S. Al-Hallaj**, (2005) “Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: Experimental validation,” *J. Power Sources*.
- [23] **Z. Rao, Y. Huo, X. Liu, and G. Zhang**, (2015)“Experimental investigation of battery thermal management system for electric vehicle based on paraffin/copper foam,” *J. Energy Inst.*, vol. 88, no. 3, pp. 241–246.
- [24] **W. Q. Li, Z. G. Qu, Y. L. He, and Y. B. Tao**, (2014)“Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials,” *J. Power Sources*.
- [25] **R. Zhao, J. Gu, and J. Liu**, (2017)“Optimization of a phase change material based internal cooling system for cylindrical Li-ion battery pack and a hybrid cooling design,” *Energy*.
- [26] **A. Mills and S. Al-Hallaj**, (2005)“Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs,” *J. Power Sources*.
- [27] **G. Jiang, J. Huang, M. Liu, and M. Cao**, (2017)“Experiment and simulation of

thermal management for a tube-shell Li-ion battery pack with composite phase change material,” *Appl. Therm. Eng.*.

- [28] **V. Kumaresan, R. Velraj, and S. K. Das**, (2012) “The effect of carbon nanotubes in enhancing the thermal transport properties of PCM during solidification,” *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*.
- [29] **J. F. Wang, H. Q. Xie, Y. Li, and Z. Xin**, (2010) “PW based phase change nanocomposites containing gamma-Al₂O₃,” *J. Therm. Anal. Calorim.*
- [30] **C. J. Ho and J. Y. Gao**, (2009) “Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*
- [31] **J. L. Zeng et al.**, (2009) “Effects of MWNTs on phase change enthalpy and thermal conductivity of a solid-liquid organic PCM,” in *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
- [32] **J. L. Zeng et al.**, (2008) “Thermal conductivity enhancement of MWNTs on the PANI/tetradecanol form-stable PCM,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 91, no. 2, pp. 443–446.
- [33] **X. Tong, D. Q. Peng, S. Y. Wu, C. D. Nie, Z. Q. Wang, and S. G. Gong**, (2015) “The effects of various carbon nanofillers on the thermal properties of paraffin for energy storage applications,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 124, no. 1, pp. 181–188.
- [34] **J. Wang, H. Xie, and Z. Xin**, (2009) “Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes,” *Thermochim. Acta*.
- [35] **J. Wang, H. Xie, Z. Xin, and Y. Li**, (2010) “Increasing the thermal conductivity of palmitic acid by the addition of carbon nanotubes,” *Carbon N. Y.*
- [36] **L. W. Fan et al.**, (2013) “Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of paraffin-based nanocomposite phase change materials,” *Appl. Energy*.
- [37] **Z. T. Yu et al.**, (2013) “Increased thermal conductivity of liquid paraffin-based suspensions in the presence of carbon nano-additives of various sizes and shapes,” *Carbon N. Y.*
- [38] **Y. Cui, C. Liu, S. Hu, and X. Yu**, (2011) “The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*.
- [39] **Y. J. Chen, D. D. Nguyen, M. Y. Shen, M. C. Yip, and N. H. Tai**, (2013) “Thermal characterizations of the graphite nanosheets reinforced paraffin phase-change composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*
- [40] **F. Yavari et al.**, (2011) “Enhanced thermal conductivity in a nanostructured phase change composite due to low concentration graphene additives,” *J. Phys. Chem. C*.
- [41] **N. Javani, I. Dincer, G. F. Naterer, and B. S. Yilbas**, (2014) “Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles,” *Int. J. Heat Mass Transf.*

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı Serkan COŞKUN
Doğum Yeri ve Tarihi Sivas, 08.09.1990
Medeni Hali Bekar
Yabancı Dil İngilizce
İletişim Adresi Cumhuriyet Üniversitesi Enerji Bilimleri ve Teknolojileri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
58140 Sivas
E-posta Adresi serkancoskn0@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise Özel Sultan Murat Lisesi, 2008
Lisans Erciyes Üniversitesi, 2014
Yüksek Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, 2019

İş Tecrübesi

Sivas İl Özel İdaresi , Makine Mühendisi, 2015