



Comparison of Discharge Performance of Thermal Protection Systems Based on Phase Change Materials with Different Thermal Improvements

Ahmet Can Çapar^{1,a}, Adnan Öztürk^{2,b}, Aydın DEMİR^{3,c}, Ümit Nazlı Temel^{4,d,*}

¹TEIAS 11. Transmission Facility and Operation Directorate, Sivas, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Turkey

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Turkey

⁴Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Turkey

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 07/08/2024

Accepted: 24/09/2024

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

This study focuses on removing heat transferred to the PCM during passive thermal protection of transient heat-releasing electronic systems to prepare it for the next thermal protection. In other words, the cooling performances (discharge) of the PCM, which has stored heat for a certain period of time (charge), were compared in terms of different improvement techniques applied on the PCM. For this purpose Fin/PCM thermal protection systems were obtained by adding different numbers of aluminium fins into the PCM. Similarly, Nanoparticle/PCM thermal protection systems have been obtained by incorporating carbon-based nanoparticles with high thermal conductivity at rates of 1% and 3% by mass into PCM. The cooling performances of the obtained Fin/PCM and Nanoparticle/PCM thermal protection systems were evaluated in terms of maximum surface temperature and maximum surface temperature difference criteria. The results are given in comparison with the performance of PCM thermal protection. Compared to PCM, the best cooling performance of 10.5% was obtained from the PCM thermal protection with six fins added. In the Nanoparticle/Fin/PCM hybrid thermal protection, it is determined that the components do not create any synergistic effect for the cooling performance and the main contribution is provided by the fins.

Keywords: PCM, Cooling performance, Fin, Nanoparticles, Hybrid Thermal Protection

Farklı Termal İyileştirmeler Uygulanmış Faz Değiştiren Malzeme Esaslı Termal Koruma Sistemlerinin Deşarj Performanslarının Karşılaştırılması

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 07/08/2024

Kabul: 24/09/2024

ÖZ

Bu çalışma geçici ısı yayan elektronik sistemlerin pasif termal koruması sırasında FDM bünyesine aktarılan ısının uzaklaştırılması ve bir sonraki termal korumaya hazırlanması işlemlerine odaklanmıştır. Başka bir ifadeyle belirli bir süre ısı depolanmış (şarj) olan FDM'nin soğuma performansları (deşarj), FDM üzerinde uygulanan farklı iyileştirme teknikleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu amaçla FDM içerisine farklı sayıda alüminyum kanat eklenmesi ile Kanat/FDM termal koruma sistemleri elde edilmiştir. Benzer biçimde FDM içerisine kütlece %1 ve %3 oranlarında yüksek ısı iletkenliğe sahip karbon tabanlı nanoparçacık eklenmesiyle Nanoparçacık/FDM termal koruma sistemleri oluşturulmuştur. Elde edilen Kanat/FDM ve Nanoparçacık/FDM termal koruma sistemlerinin soğuma performansları maksimum yüzey sıcaklığı ve maksimum yüzey sıcaklık farkı kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, RT-44 termal korumasının performansı ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. FDM ile karşılaştırıldığında en iyi soğuma performansı %10.5 ile altı kanat eklenmiş FDM termal korumasından elde edilmiştir. Nanoparçacık/Kanat/FDM hibrit termal korumasında bileşenlerin soğuma performansı için herhangi bir sinerjik etki oluşturmadıkları ve asıl katkının kanatlar tarafından sağlandığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: FDM, Soğuma performansı, Kanat, Nanoparçacık, Hibrit termal koruma

^a a.c.capar@gmail.com

^b 0000-0002-5916-6334

^c aozturk@cumhuriyet.edu.tr

^d 0000-0001-6371-0577

^c aydindemir@cumhuriyet.edu.tr

^d 0000-0002-8514-2301

^d untemel@cumhuriyet.edu.tr

^d 0000-0001-5053-5124

How to Cite: Çapar AC, Öztürk A, Temel ÜN (2024) Comparison of Discharge Performance of Thermal Protection Systems Based on Phase Change Materials with Different Thermal Improvements, Journal of Science and Technology, 3(2): 44-54.

Giriş

Faz değişken malzemeler (FDM) yüksek gizli ısılara sahip olmaları nedeniyle termal enerji depolama konusunda yaygın kullanım potansiyeli olan malzemelerdir (Sarier & Onder, 2012). FDM'ler bir kaynaktan sağlanan ısıyı duyulur, çoğunlukla da gizli ısı olarak depolayarak daha yüksek enerji seviyeli faza geçiş yapan malzemelerdir. Ters yönde gerçekleşen hal değişimi ile depolanan termal enerjinin geri bırakılmasıyla FDM'ler düşük enerji seviyeli ilk haline geri dönmektedirler. Bu özelliği ile FDM'ler arzı ve talebi arasında zaman farklılığı bulunan güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir kaynaklardan enerji dönüşümü proseslerinde aracılık görevi üstlenebilirler. Bununla birlikte FDM'ler güneş panellerinde (Riahi ve ark., 2019) ve bina bileşenlerinde (Wang ve ark., 2018) enerji depolama, elektronik cihazlarda, organ (Mondieig ve ark., 2003) ve gıda naklinde termal koruma, soğutucularda performans iyileştirme (Cheng ve ark., 2011), fabrikalarda atık ısı geri kazanımı (Du ve ark., 2021; Kaizawa ve ark., 2008) amaçlı olarak çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler.

Katıdan-sıvıya FDM'ler düşük hacim değişimleri nedeniyle sıvıdan-gaza FDM'lere kıyasla uygulama açısından daha avantajlıdır. Katıdan-sıvıya FDM'ler; organik, inorganik ve ötektik olmak üzere farklı biçimde sınıflandırılmaktadırlar. İnorganik FDM'ler uygulama yerine aşındırıcı etkide bulunması, ötektik FDM'lerin de üretim zorluğu ve ekonomik olmaması gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte organik FDM'ler; yüksek gizli ısı, düşük buhar basıncı, kimyasal ve termal kararlılık gibi bazı avantajlara sahip olmaları ve kolay ve ekonomik olarak elde edilebilir olmaları nedeniyle en çok tercih edilenlerdir (Sharma ve ark., 2009; Yuan ve ark., 2016).

FDM'lerin önemli uygulamalarından birisi geçici olarak çalışan elektronik cihazların ısınma problemlerinin üstesinden gelmek için pasif termal koruma amaçlı kullanımınıdır. Esasen bu yöntem pompa, fan gibi hareketli mekanik bileşenler içermemesi ve bakım gerektirmemesi gibi avantajlarından dolayı tercih edilebilecek bir yöntemdir. Bu tip bir termal korumanın etkin olabilmesi için elektronik cihazlarda açığa çıkan ısı enerjinin hızlı bir biçimde FDM bünyesine aktarılması gereklidir. Başka bir ifadeyle kullanılan FDM'nin hızlı biçimde termal tepki vermesi gerekmektedir. Bu sonuç ise FDM ısı iletim özelliğinin yüksek olmasını gerektirmektedir. Tam tersine uygulamada kullanılacak katıdan-sıvıya organik FDM'lerin ısı iletenlikleri (0.2-0.5 W/mK) oldukça düşüktür. Organik FDM'lerin ısı iletenliklerinin düşük olması onların uygulamada verimli bir biçimde kullanılmasının önündeki en önemli engeldir. Özellikle FDM'lerin ısı açığa çıkaran cihazların pasif termal koruma amaçlı kullanımı göz önüne alındığında ısı iletenliğin düşük olması nedeniyle kaynaktan açığa çıkan ısı FDM bünyesine etkin bir biçimde iletilmemektedir. Bu durum termal olarak korunumu istenen cihaz üzerinde sıcaklık artışı olarak etkisini göstermektedir. Bu nedenle elektronik cihazların pasif termal korunmasında FDM'lerin kullanılabilmesi için ısı transfer hızını arttırıcı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde ısı transfer hızını arttırmak için yapılan çalışmaların genel olarak iki kategoriye ayrıldığı görülmektedir. İlk yaklaşım, yüksek termal iletkenliğe sahip nanoparçacıkların FDM matrisine dahil edilmesiyle elde edilen daha yüksek termal iletkenliğe sahip bir FDM/nanoparçacık kompozitinin oluşturulmasıdır. Metal/Metal-okisit nanoparçacık katkılanarak FDM'lerin ısı iletkenliklerinin belirli yüzdelik mertebelerinde arttırılabileceği gösterilmiştir. Karabulut (2023), çapraz akış-engelleyici jet akışlı kanallarda küp ve dairesel oyuk modelleri için ısı transferi ve akış karakteristiklerini sayısal olarak incelediği çalışmada temel akışkana kıyasla CuO nanoparçacık katkılanmış akışkanın ortalama Nu sayısının küp ve dairesel oyuk modellerinde sırasıyla %32.55 ve %26.11 arttırıldığını bildirmiştir.

Farklı tip metal-okisit nanoparçacıklarla yapılan çalışmada kütlece %5 Al₂O₃, %5 CuO, %5 Fe₃O₄ ve %5 SiC nanoparçacık katkılanmasının FDM ısı iletkenliğinde sırasıyla %29.1, %52.2, %9.2 ve %17.9 iyileştirme sağladığı belirlenmiştir (Chinnasamy & Cho, 2022). Buna karşın karbon tabanlı nanoparçacık katkılı FDM ısı iletkenliklerinde birkaç kata varan artışlar olduğu rapor edilmiştir (Temel ve ark., 2018). Karabulut ve ark. (2020), Karabulut ve ark. (2018) saf su içerisine hacimce %0.02 katkılanan grafen-oksitin ısı transfer katsayısını %48 civarında arttırdığını belirlemişlerdir. Buna ilave olarak kullanılan karbon tabanlı nanoparçacık şeklinin de ısı iletkenlik iyileştirme performansı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Fan ve ark. (2013) plaka şeklindeki nanoparçacıkların tüp ve iplik şeklindeki nanoparçacıklara göre daha iyi iyileştirmeler sağladığını belirlemişlerdir. Temel ve ark. (2018) %5 çok duvarlı nanotüp katkısının FDM ısı iletkenliğini %40 civarında arttırdığını buna karşılık aynı oranda grafen nano plaka katkısının %155 civarında iyileşme sağladığını belirlemişlerdir. Bu yöntemin en önemli dezavantajları nanoparçacık maliyeti ve nanoparçacık katkısı sonrasında sıvı FDM viskozitesindeki artışın ısı transferine olumsuz etkileridir.

İkinci yöntem, yüksek ısı iletkenliğe sahip (bakır, alüminyum vb.) metal kanatçık ve pim gibi bileşenlerin FDM içerisine eklenerek ısı transfer köprülerinin oluşturulmasıdır. Bu yöntemin kolay uygulanabilir olması ve ekonomik olması ise önemli avantajlarıdır. Bu çalışmalarda genellikle kanat sayısı, kanat kalınlığı, kanat uzunluğu ve ısıtma yönünün termal performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buyruk & Karabulut (2020) kanatçık tipinin ve yüksekliğinin ısı transferi üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu bildirmişlerdir. Özellikle kanat sayısı ve kanat uzunluğunun arttırılmasının termal enerji depolama performansı üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Hosseinzadeh ve ark., 2011). Başka bir çalışmada (Acir & Emin Canlı, 2018) üstten ısıtılan bir termal enerji depolama biriminde kanat sayısı ve kanat kalınlığının FDM erime performansına etkilerini incelemiş olup artan kanat sayısının erime performansına pozitif, artan kanat kalınlığının ise negatif etkide bulunduğu tespit edilmiştir. Bazı çalışmalar ise kanat malzemesinin termal enerji depolama etkinliği üzerindeki etkilerini belirlemeye odaklanmışlardır. Örneğin Tian ve ark. (2020) gerçekleştirmiş oldukları sayısal çalışmada bir enerji depolama birimi

içerisinde kanatçık olarak kullanılan alüminyum, bakır ve çelik gibi malzemelerin erime performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nusselt sayısı, erime süresi, toplam depolanan enerji, kütle başına depolanan enerji ve depolanan enerji başına maliyet kriterleri açısından en uygun malzemenin alüminyum olduğunu belirlemişlerdir. Huang ve ark. (2011) bir enerji depolama birimi içerisindeki kanatçık sayısının artırılmasının sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte kanatçık kullanımının ağırlık artışına neden olması ve yerleşim pozisyonuna göre doğal taşınım akımlarına engel olması önemli dezavantajları olarak söylenebilir. Son olarak Kursun ve ark. (2024) ve Kurşun & Balta, (2023) FDM depolanan birim şeklinin de erime performansı üzerinde önemli iyileştirmelere neden olduğu nu bildirmişlerdir.

Düşük ısı iletkenliğe sahip FDM'ler üzerinde farklı teknikler uygulanarak sağlanan ısı transfer iyileştirmesinin geçici çalışan elektronik cihazların pasif termal korumalarında farklı derecelerde performans iyileştirmeler sağladığı görülmektedir. Bu çalışmaların tamamının elektronik cihazdan açığa çıkan ısının FDM bünyesine aktarılmasına (şarj) başka bir ifadeyle elektronik cihazdan ısının uzaklaştırılmasına yönelik çalışmalar olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte geçici çalışan elektronik cihazların çalışmadığı zaman periyodunda FDM bünyesine depolanan ısının tekrar geri saliverilmesi de (deşarj) büyük önem arz etmektedir. Başka bir ifadeyle ısı depolanmış FDM'nin bir sonraki şarj için hızlı bir biçimde hazır hale (deşarj edilmesi) gelmesi gerekmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde ısı depolanmış FDM'nindeşarjına yönelik yeterli çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu nedenle çalışmada farklı iyileştirme tekniklerine sahip FDM esaslı bir termal koruma yönteminin geçici çalışan bir elektronik cihaz senaryosundakideşarj performanslarının karşılaştırmasını amaçlanmaktadır. Bu senaryoyu gerçekleştirmek için düşey silindirik biçimdeki bir direnç termal koruma malzemesi olarak bir FDM ile çevrelenerek Direnç/FDM sistemi oluşturulmuştur. Belirli bir süre şarj edilen FDM esaslı termal koruma sistemlerinin

deşarj performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada iyileştirilmiş FDM olarak 3,4 ve 6 kanatlı/FDM ve %1, %3 GNP katkılanmış FDM kompozitleri test edilmiştir. Çalışmada ayrıca Nanoparçacık/Kanat/FDM hibrit termal korumasının soğuma performansı ve kullanılabilirliği de araştırılmıştır.

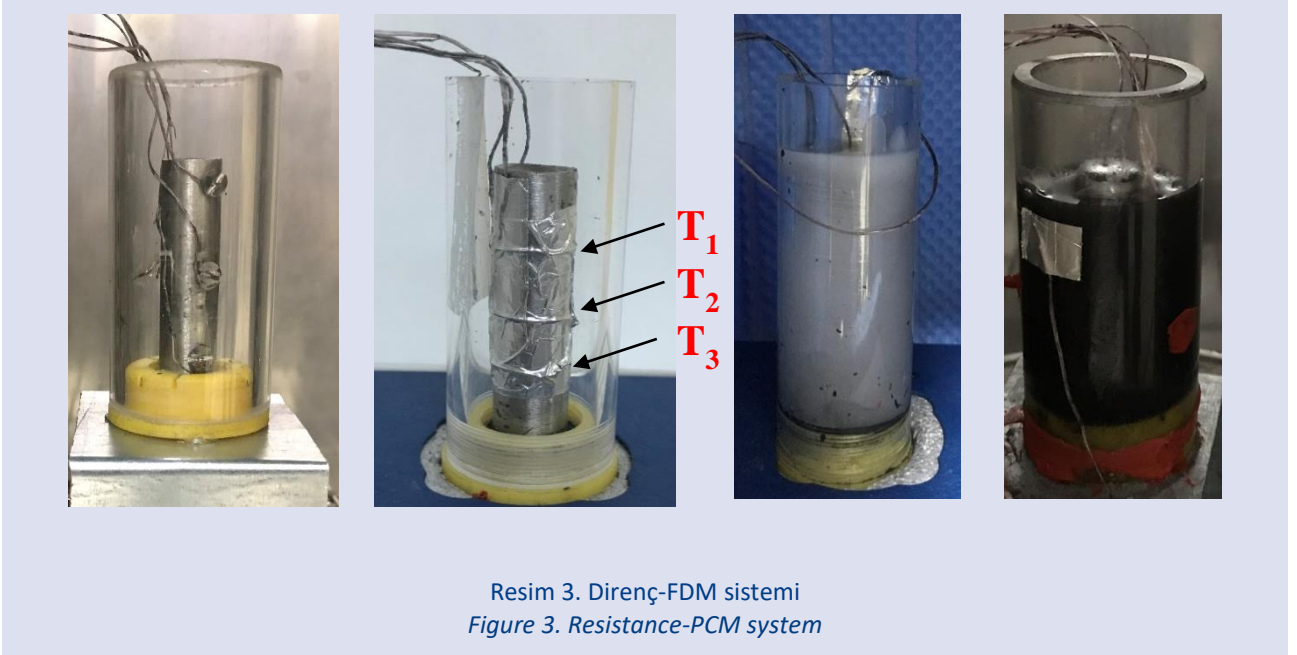
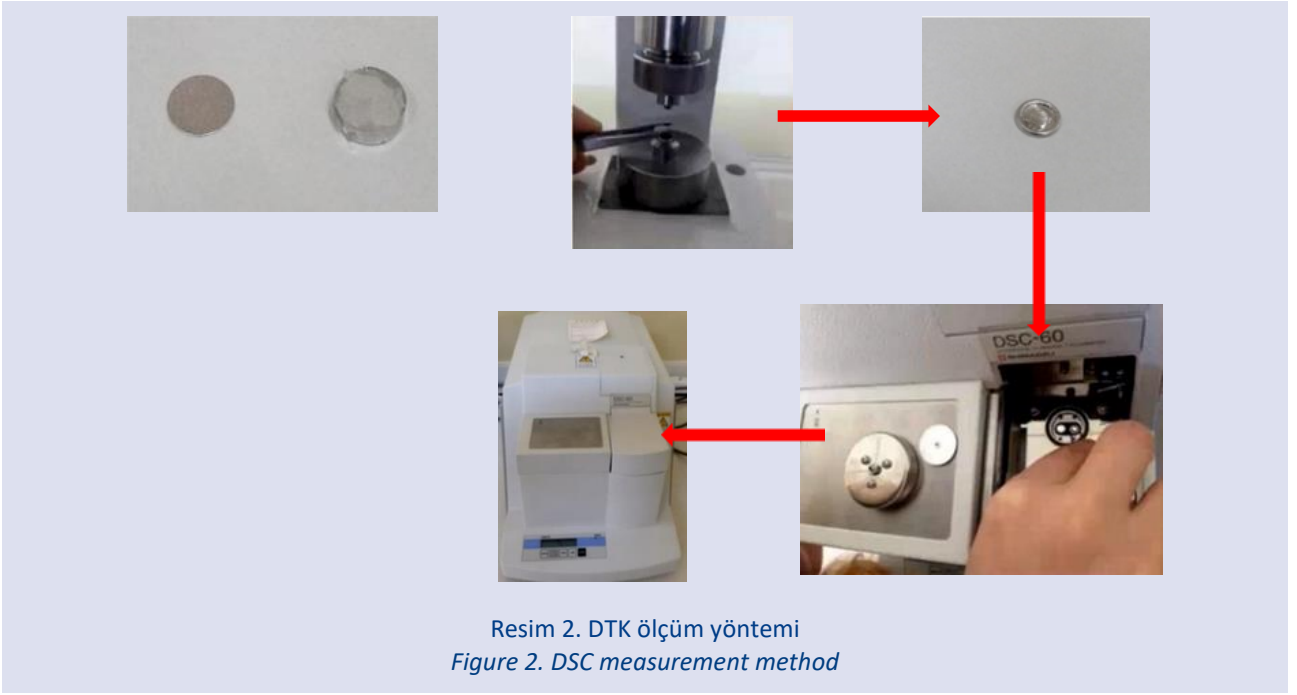
Materyal Metod

Çalışmada termal enerji depolama malzemesi olarak Rubitherm (Almanya) şirketinden ticari olarak temin edilen RT-44 organik faz değişim malzemesi kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak kullanılan Grafen nano parçacıklar (GNP) 150 m²/g yüzey alanına ve 6-8 nm kalınlığa sahip olup Skyspring Nanomaterials (USA) şirketinden temin edilmiştir.

Çalışmada öncelikle pasif termal koruma ortamı olarak kullanılacak olan RT-44, %1 GNP/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 malzemelerinin ısı iletkenlikleri ölçülmüştür. Isıl iletkenlik ölçümleri KD2 Pro (Decagon Devices, USA) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri Resim 1'de gösterilen adımlar takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Öncelikle bir ısıtıcı plaka üzerinde RT-44 sıvı hale gelinceye kadar bekletilmektedir. GNP/RT-44 kompozitleri için RT-44 içerisine kütlece %1 ve %3 oranlarında GNP eklenmiştir. RT-44 içerisine eklenen GNP nanoparçacıkların homojen olarak dağılımlarını sağlamak için 30 dakika süresince 750 W gücündeki ultrasonik karıştırıcıda (SONICS@Materials INC, USA) karıştırma işlemi uygulanmıştır (RT-44 numunesi için bu adım atlanmıştır). Elde edilen sıvı karışımlar ortasında 2.4 mm çapında dikey mil bulunan 30 mm çapında ve 120 mm den daha uzun akrilik bir boru içerisine dökülerek KD2 Pro cihazına uygun numune üretimi gerçekleştirilmiştir. KD2 Pro cihazının sensör girişine uygun olarak hazırlanan numunelerin ısı iletkenlik ölçümleri bir iklimlendirme kabini (Jeitech, South Korea) içerisinde RT-44 faz değişim sıcaklık aralığındaki farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. KD2 Pro'nun doğruluğu 0,1-0,2 Wm/K aralığı için $\pm 0,02$ W/mK olup, her bir numune için en az beş ölçüm alınmış ve %0,5 standart sapma ile ortalama değerler kaydedilmiştir.



Resim 1. Isıl iletkenlik ölçüm yöntemi
Figure 1. Thermal conductivity measurement method



RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerinin Diferansiyel taramalı kalorimetrik (DTK) özellikleri DSC60 (Shimadzu Corporation, Japan) kullanılarak ve Resim 2’de gösterilen adımlar uygulanarak gerçekleştirilmiştir. DTK ölçümleri yapılacak malzemeler 0.01 hassasiyete sahip elektronik tartı ile yaklaşık olarak 0.5 mg civarında tartılmıştır. Kütleli tespit edilen malzemeler cihaza ait özel bir alüminyum kap içerisine konularak kapağı ile örtülmüştür. İçerisinde malzeme bulunan kap ve kapağı bir pres aracılığıyla sıkıştırılarak kütleye duyarlı DTK numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen DTK numuneleri cihaz ölçüm haznesine yerleştirilmiştir. RT-44’ün beklenen erime sıcaklığına uygun olarak tarama sıcaklık aralığı 20 °C-60 °C, tırmanma hızı ise 2 °C/dakika olarak ayarlanmıştır. DTK cihazının doğruluğu 0.1 °C olup her bir numune için en az

üç ölçüm gerçekleştirilmiş ve %1 standart sapma ile ortalama değerler kaydedilmiştir.

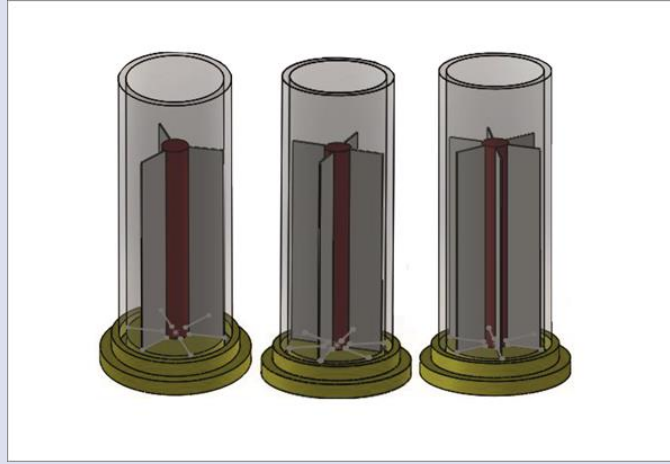
Geçici olarak çalışan elektronik cihaz; 18 mm çapında, 65 mm yüksekliğinde silindir biçimindeki bir direnç ile temsil edilmiştir. FDM esaslı termal koruma sağlayabilmek açısından bahsedilen direnç daha büyük çapta ve 100 mm yüksekliğindeki bir akrilik borunun eksenine alt taraftan vidalanarak monte edilmiştir (Resim 3). Direnç boyunca üç farklı noktadan sıcaklık ölçümü gerçekleştirmek için T_1 , T_2 ve T_3 olarak isimlendirilen ısı çiftleri yüzeye temas ettirilmiştir. Resim 3’te gösterildiği gibi direnci çevreleyen akrilik boru içerisine sıvı hale getirilen FDM dökülüp oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılarak direnç-FDM sistemi oluşturulmuştur.

FDM esaslı termal koruma sisteminin ısı transfer hızının iyileştirilmesi için farklı sayıda kanat eklemesi yapılmıştır. Daha önce yapılan bir çalışmada (Ping ve ark., 2018) termal koruma sistemleri için optimum kanat kalınlığının 1 mm olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada FDM'nin termal koruma performansını iyileştirmek için 1 mm kalınlığında ısı iletkenliği yüksek alüminyum kanatlar kullanılmıştır. Rezistans yüksekliğine sahip alüminyum kanatlar bir ucu rezistansa sıkıca temas ettirilmiş diğer ucu ise radyal yönde akrilik boru duvarına kadar uzatılmıştır. Farklı kanat düzenlemeleri; kanatlar arasındaki açılar 120°, 90° ve 60° olacak biçimde sırasıyla 3, 4 ve 6 kanatlı olarak gerçekleştirilmiştir. Eriyik haldeki FDM'nin direnç üzerine farklı sayıda kanat eklenmiş akrilik boruya dökülüp oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmasıyla Kanat/FDM termal koruma sistemleri oluşturulmuştur.

Çalışmada termal iyileştirme olarak kullanılan diğer yöntem FDM ısı iletkenliğinin nanoparçacık katkısı ile

geliştirilmesidir. Bu amaçla yüksek ısı iletkenliğe ve düşük yoğunluğa sahip plaka tipi GNP, katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen yöntemle hazırlanan %1 GNP/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 kompozitleri eriyik halde Resim 3'te gösterilen akrilik boruya dökülüp oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmak suretiyle GNP/FDM termal koruma sistemi oluşturulmuştur.

Çalışmada ayrıca hibrit sistem termal koruma sistemi de test edilmiştir. Bu amaçla termal koruma performansı açısından en uygun görülen kanat düzenlemesi ve nanoparçacık kütle bölüntüsü kullanılarak hibrit termal koruma sistemi oluşturulmuştur. Bir önceki aşamada elde edilen eriyik haldeki uygun GNP/FDM kompozitlerinin Resim 4'te gösterilen uygun kanat düzenlemesi içerisine dökülmesi ve oda sıcaklığında katılaştırılması suretiyle Kanat/GNP/FDM hibrit termal koruma sistemi oluşturulmuştur.



Resim 4. Farklı Kanat düzenlemeleri
Figure 4. Different fin arrangements



Resim 5. Deneysel düzenek
Figure 5. Experimental setup

Farklı biçimde termal iyileştirmiş FDM'lerin deşarj performans karşılaştırmaları Resim 5'te gösterilen deneysel düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek; DC güç kaynağı, veri toplama cihazı, bilgisayar, iklimlendirme kabini ve direnç-FDM sisteminden oluşmaktadır. Farklı termal iyileştirme uygulanan direnç-FDM bileşenleri bir iklimlendirme kabini içerisine yerleştirilerek termal cevap ölçümleri aynı ortam koşullarında (20 °C) gerçekleştirilmiştir. Farklı iyileştirme teknikleri uygulanan FDM termal koruma sistemleri öncelikle 3600 saniye boyunca eşit koşullarda 6 W ısıtma gücünde şarj işlemine maruz tutulmuştur. Enerji depolayarak katıdan-sıvıya faz değişimine uğrayan farklı iyileştirmeli FDM sistemlerinin soğuma (deşarj) performansları, Resim 3'te gösterilen J tipi ısı çiftleri ile sıcaklığın zamana göre değişimleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. J tipi ısı çiftleri ile elde edilen sıcaklık verileri 30 saniye aralıklarla bir veri toplama cihazı ile alınarak bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir termal koruma yöntemi için elde edilen sıcaklıkların zamana göre değişim davranışları karşılaştırılmıştır. Performans değerlendirmeleri maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkı gibi kriterler göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Geçici çalışan elektronik bileşenler açısından bakıldığında cihazın çalışmadığı süre içerisinde FDM'nin hızlı bir biçimde soğuması istenilen performans kriteri olarak değerlendirmelere esas teşkil etmiştir. Bununla birlikte cihaz yüzey boyunca sıcaklık farkının düşük olması da istenilen bir başka tasarım kriteri olarak göz önüne alınmıştır. Deneysel ölçüm yapılan ekipmanlarının hassasiyetleri ve sapma oranları Tablo 1'de verilmiştir.

Sürecin fiziksel mekanizması ile ilgili temel denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

$$H = h + \Delta H \quad (2)$$

$$h = \int c_p dT \quad (3)$$

$$\Delta H = \beta H_k \quad (4)$$

burada; H toplam entalpi olup duyulur entalpi (h) ve katılma entalpisinin (ΔH) toplamı olarak elde edilmektedir. H_k katılma gizli ısısıdır ve β sıvı oranı olup aşağıdaki biçimde belirlenmektedir.

$$\beta = 0 \quad \text{eğer } (T < 32^\circ\text{C})$$

$$\beta = 1 \quad \text{eğer } (T > 41^\circ\text{C})$$

$$\beta = \frac{T - 32}{41 - 32} \quad \text{eğer } (32^\circ\text{C} < T < 41^\circ\text{C})$$

Bulgular ve Değerlendirmeler

Termal iletkenlik katsayılarının sıcaklığa bağlı değerleri hem katı faz hem de sıvı faz için Resim 6'da verilmiştir. RT-44 organik faz değişken malzemesinin 10 °C'deki termal iletkenlik değeri 0.387 W/mK olarak ölçülmüştür. Katı halde 20 °C ve 30 °C sıcaklıklarında ise termal iletkenlik değerleri sırasıyla 0.364 W/mK ve 0.356 W/mK olarak belirlenmiştir. Bu durumda sıcaklık artışı ile moleküler düzensizliğin artmasına bağlı olarak termal iletkenliğin hafifçe azaldığı söylenebilir. 40 °C sıcaklıkta RT-44'ün çamurumsu halde olması ve stabil bir form oluşturmamasından dolayı ölçüm yapılamamıştır. Sıvı faza geçiş ile birlikte kafes yapılarının bozulması gibi moleküler düzendeki değişim ısı iletkenlikte keskin bir düşüşe neden olmaktadır. Sıvı halde 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklıklarında ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0.153 W/mK, 0.151 W/mK ve 0.148 W/mK olarak belirlenmiştir.

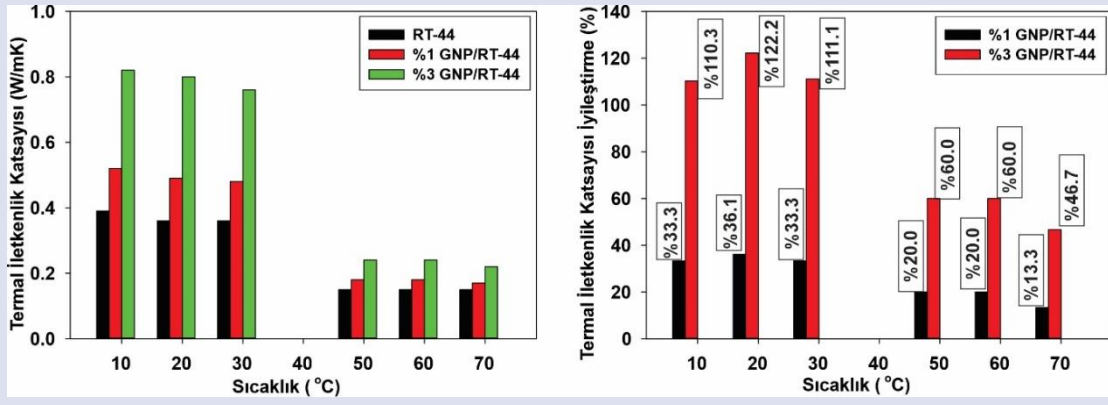
Termal iletkenlik, kafes boyutundan ve kristallerin titreşim frekansından etkilenen fonon saçılması ile gerçekleşmektedir. FDM'nin titreşim frekansının düşük olması düşük ısı iletkenliğe, GNP'nin titreşim frekansının yüksek olması ise yüksek ısı iletkenliğe neden olmaktadır. Fonon saçılması GNP düzlemine dik olmaktan ziyade GNP düzlemi boyunca gerçekleşmektedir (Chen ve ark., 2013). Bu nedenle düşük ısı iletkenliğe sahip FDM içerisinde, GNP düzlemlerinin birleşiminden oluşacak ağ yapılarının oluşturulmasının ısı iletkenlikte iyileştirmeye neden olacağı söylenebilir. Bu ağ yapılarının oluşumu FDM içerisine katılan GNP oranı ile doğru orantılıdır. Örneğin 20 °C sıcaklıkta katı faz için %1 ve %3 GNP katılan FDM'lerin ısı iletkenliklerinde sırasıyla %36.1 ve %122,2 oranlarında iyileştirmeler elde edilmiştir. Benzer şekilde 50 °C sıcaklıkta sıvı faz için %1 ve %3 GNP katılan FDM'lerin ısı iletkenliklerinde ise %20.0 ve %60.0 oranlarında iyileştirmeler elde edilmiştir. Katı ve sıvı faz için diğer sıcaklıklarda da benzer oranlarda iyileştirmeler elde edilmiş ve Resim 6'da verilmiştir.

RT-44, %1 GNP/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 kompozitlerinin DTK ölçümleri sonucunda elde edilen ekzoterm eğrileri Resim 7'de verilmiştir. Ekzoterm eğrilerinin analizi sonucunda RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerinin soğuma işlemine ait katılma başlangıç (T_{kb}), katılma sonlanma (T_{ks}) ve katılma gizli ısısı (H_k) elde edilmiştir. Bu eğrilerin temel çizgiden ayrılma, birleşme noktaları sırasıyla katılma başlangıç (T_{kb}), katılma sonlanma (T_{ks}) sıcaklıklarını vermektedir. Ekzoterm eğrisi ile temel çizgi arasında kalan alan ise erime gizli ısısının (H_k) bir ölçüsüdür. Ekzoterm eğrilerinin analizi sonucunda elde edilen katılma sıcaklıkları ve katılma gizli ısılara ait değerler Tablo 2'de verilmiştir.

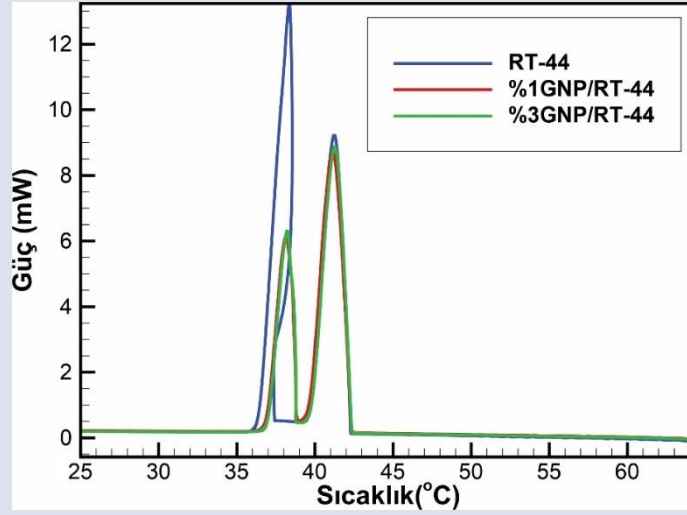
Tablo 1. Deneysel ölçüm ekipmanlarının hassasiyet ve sapma oranları

Table 1. Precision and deviation rates of experimental measurement equipment

Ölçüm Ekipmanı	Hassasiyet	Sapma oranı (%)
DTK	±0,1	%1
KD2 Pro	±0,02	% 0.5
Hassas Terazi	±0,01	% 0.5
Isıl Çiftler	±1.2	%0.75



Resim 6. Termal iletkenlik katsayıları ve iyileştirme Yüzdeleri
Figure 6. Thermal Conductivity Coefficients and Improvement Percentages



Resim 7. RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerinin ekzoterm eğrileri
Figure 7. Exotherm Curves of RT-44 and GNP/RT-44 Composites

Tablo 2. Katılma sıcaklıkları ve gizli ısıları
Table 2. Solidification temperatures and latent heats

Malzeme	T _{kb} (°C)	T _{ks} (°C)	H _k (J/g)
RT-44	42.3	36.6	237.3
%1 GNP/RT-44	42.4	37.1	235.2
%3 GNP/RT-44	42.4	37.1	225.3

RT-44 ve GNP/RT-44 kompozitlerinin katılmasını iki pik oluşturarak tamamladıkları görülmektedir. RT-44 için katılma başlangıç sıcaklığı 42.3 °C ve katılma sonlanma sıcaklığı ise 36.6 °C olarak ölçülmüştür. Tablo 2 incelenecek olursa RT-44 içerisine GNP eklentisinin T_{kb} ve T_{ks} sıcaklıklarında önemli değişimlere neden olmadığı görülmektedir. Buna karşılık RT-44 için katılma gizli ısı 237.3 J/g iken %1 GNP/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 kompozitleri için katılma gizli ısıları sırasıyla 235.2 J/g ve 225.3 J/g olarak ölçülmüştür. Başka bir ifadeyle %1 GNP/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 kompozitlerinin enerji depolama kapasitelerinin RT-44'e kıyasla sırasıyla %0.9 ve %5 azaldığı söylenebilir. Esasen enerji depolama kabiliyeti yüksek bir malzeme ile düşük bir malzemenin

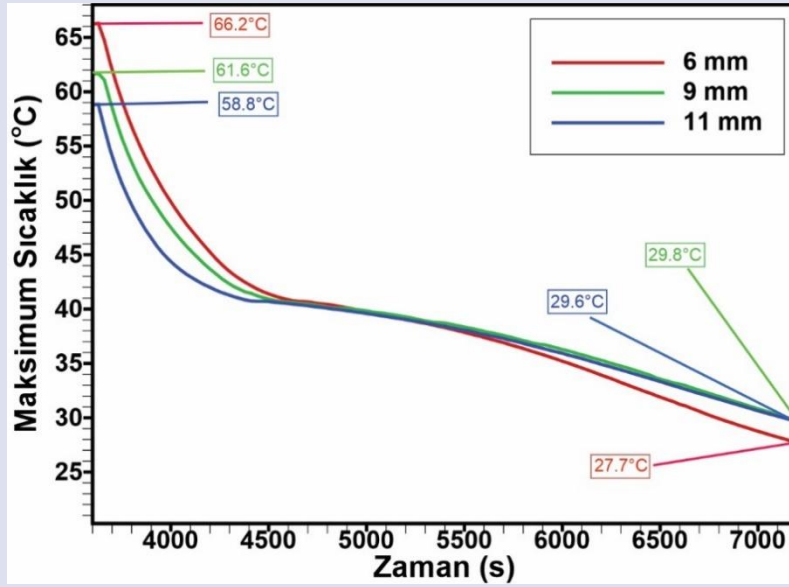
karışımından dolayı bu beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte GNP katkısı ile ısıl iletkenlikte elde edilen hatırı sayılır iyileşme karşısında katılma gizli ısısındaki bahsedilen kayıpların ihmal edilebilir düzeyde olduğu açıktır.

Bir sonraki aşamada direnç RT-44 kalınlığının termal koruma üzerindeki etkisini belirlemek için performans testleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı çapta akrilik boru kullanılarak direnç etrafındaki RT-44 kalınlığı 6 mm, 9 mm ve 11 mm olarak ayarlanmıştır. Resim 8'de direnç üzerindeki maksimum sıcaklığın zamana göre değişimi 6, 9 ve 11 mm RT-44 kalınlığı için gösterilmiştir. En çabuk soğuma işleminin 6 mm RT-44 kalınlığına sahip direnç/FDM sisteminde olduğu belirlenmiştir. Başka bir

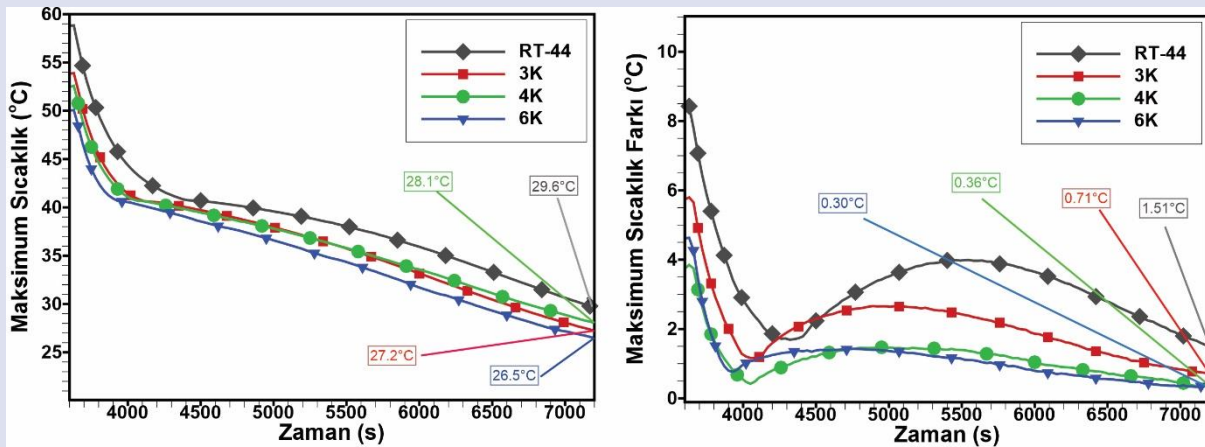
ifadeyle RT-44 kalınlığı arttıkça soğuma performansı kötüleşmektedir. Öyle ki 6, 9 ve 11 mm kalınlığa sahip direnç/FDM sistemleri için 3600 saniye ısıtmanın ardından 3600 saniye bekleme sonundaki maksimum sıcaklıklar sırasıyla 27.7 °C, 29.8 °C ve 29.6 °C olarak ölçülmüştür. Bu durum esasen beklenen bir sonuçtur. RT-44 kalınlığı arttıkça daha iç bölgelere aktarılan ısının düşük ısıl iletkenlik nedeniyle soğuma(deşarj) süresi de uzamaktadır. Bununla birlikte FDM kalınlığının artmasının ısıtma sonucundaki termal korumaya olumlu etkisinin olduğu görülmektedir. Örneğin 3600 saniyelik ısıtma sonucunda 6, 9 ve 11 mm kalınlığa sahip direnç/FDM sistemleri için maksimum sıcaklıklar sırasıyla 66.2 °C, 61.6 °C ve 58.8 °C olarak ölçülmüştür. FDM esaslı pasif termal koruma sistemlerinin esasen geçici olarak ısı açığa çıkaran sistemlerin termal korumalarında kullanımı asıl amaç olduğundan RT-44 kalınlığının 11 mm alınmasının uygun olacağı söylenebilir. Bununla birlikte 11 mm FDM

kalınlığına sahip direnç/FDM sistemi kullanıldığında 3600 saniyelik soğuma (deşarj) süresinin sonucundaki maksimum sıcaklığın (29.6 °C) kanatçık ve/veya nanoparçacık eklentisi gibi çeşitli tekniklerle daha aşağı çekilmesi soğuma (deşarj) performansının iyileştirilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu amaçla RT-44 içerisine Resim 4'te gösterildiği gibi 3 kanatlı (3K), 4 kanatlı (4K) ve 6 kanatlı (6K) yapılar eklenmiştir. 3600 saniyelik ısıtma ve ardından 3600 saniyelik soğuma süresi sonunda 3K, 4K ve 6K/RT-44 sistemleri için direnç üzerindeki maksimum sıcaklıklar sırasıyla 27.2 °C, 28.1 °C ve 26.5 °C olarak ölçülmüştür (Resim 9). Direnç/RT-44 sistemi için aynı koşullarda maksimum yüzey sıcaklığının 29.6 °C'dir. Bu durumda 3K/RT-44, 4K/RT-44 ve 6K/RT-44 termal korumalarının soğuma performanslarının RT-44'e kıyasla sırasıyla %8.1, %5.1 ve %10.5 iyileştiği söylenebilir.



Resim 8. RT-44 kalınlığının soğuma performansı ve Kanat/RT-44 termal koruma sistemi için soğuma eğrileri
Figure 8. Cooling performance of RT-44 thickness and cooling curves for the Fin/RT-44 thermal protection system



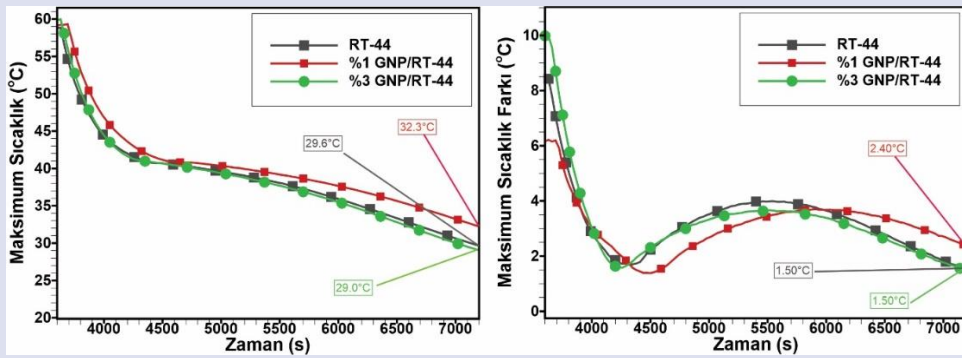
Resim 9. RT-44 ve Kanat/RT-44 termal koruma sistemi için soğuma eğrileri
Figure 9. Cooling curves for RT-44 and Fin/RT-44 thermal protection system.

Direnç yüzeyi boyunca maksimum sıcaklık farkının değerinin sadece RT-44 kullanılması durumunda ısıtma/soğuma çevrimi sonunda 1.51 °C olduğu görülmektedir. Bununla birlikte yüzey boyunca maksimum sıcaklık farklarının 3K/RT-44, 4K/RT-44 ve 6K/RT-44 kullanılması durumunda 1 °C'nin altına indiği belirlenmiştir. Bu durumda farklı sayıda kanat eklemeli termal koruma sistemlerinin soğuma açısından termal koruma yapılacak olan elektronik cihazın yaşlanması engelleyecek biçimde performans sergilediği söylenebilir.

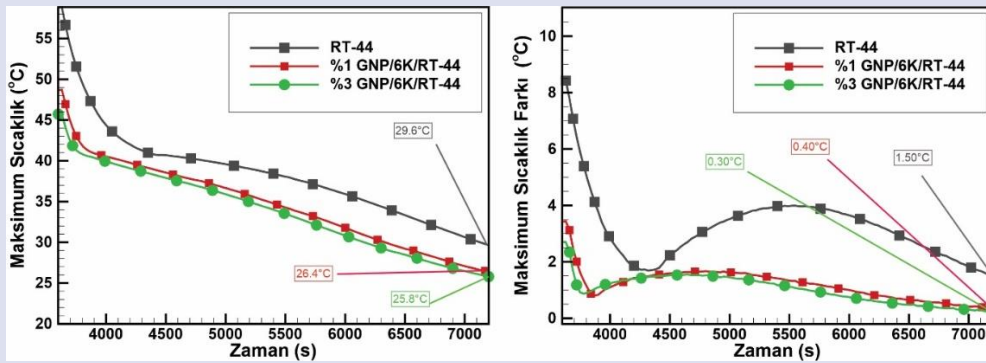
%1 GNP/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 kompozitlerinin soğuma performansları maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkı açısından karşılaştırılmıştır (Resim 10). RT-44 içerisine GNP eklemenin soğuma performansı üzerinde belirgin bir iyileştirme sağladığından bahsedilemez. Tam tersine %1 GNP/RT-44 kompoziti kullanılması ısıtma/soğutma çevrimi sonunda maksimum yüzey sıcaklığı 32.3 °C olup RT-44 kullanımına kıyasla soğuma performansı %9.1 kötüleşmektedir. Buna karşılık %3 GNP/RT-44 kullanılması durumunda ısıtma/soğutma çevrimi sonunda maksimum yüzey sıcaklığı 29.0 °C olup RT-44 kullanımına kıyasla soğuma performansı sadece %2.0 iyileşmektedir. Buna neden olarak GNP eklentisiyle ısı transferine sebep olan sıcaklık farkının azalmasıyla yetersiz kalması gösterilebilir. Benzer bir değerlendirme maksimum sıcaklık farkı açısından da yapılabilir.

Isıtma/soğuma çevrimi sonucunda RT-44 kullanılması durumunda maksimum sıcaklık farkı 1.5 °C iken %1 GNP/RT-44 için bahsi geçen değer 2.4 °C, %3 GNP/RT-44 için ise RT-44 ile aynı değerdir. Bu durum GNP eklentisinin maksimum sıcaklık farkı açısından da soğuma performansı üzerinde olumlu bir etki sağlamadığının göstergesidir.

RT-44 içerisine kanat/GNP eklenerek elde edilen Kanat/GNP/RT-44 termal koruma sisteminin soğuma performansı ayrıca incelenmiştir. Böylelikle iyileştirme etkenleri olan kanat ve nanoparçacık kullanımlarının sinerjik etki yaratabilme potansiyeli araştırılmıştır. Kanat sayısı olarak mevcut kanat düzenlemeleri arasında en iyi soğuma performansını gösteren 6 kanatlı düzenleme, nanoparçacık eklentisi olarak ta %1 ve %3 GNP eklenmesi durumları seçilmiştir. Elde edilen %1 GNP/6K/RT-44 ve %3 GNP/6K/RT-44 hibrit termal koruma sistemlerinin soğuma performansları RT-44 performansı ile karşılaştırmalı olarak Resim 11'de verilmiştir. Isıtma/soğuma çevrimi sonunda %1 GNP/6K/RT-44 ve %3 GNP/6K/RT-44 hibrit termal koruma için direnç üzerindeki maksimum sıcaklıklar sırasıyla 26.4 °C ve 25.8 °C olarak ölçülmüştür. Isıtma/soğuma çevrimi sonunda RT-44 koruması için direnç üzerindeki maksimum sıcaklık ise 29.6 °C'dir. Bu durumda RT-44 termal koruması ile karşılaştırıldığında %1 GNP/6K/RT-44 ve %3 GNP/6K/RT-44 hibrit koruma sistemlerinin soğuma performanslarında sırasıyla %10.8 ve %12.8 iyileştirme sağladığı belirlenmiştir.



Resim 10. RT-44 ve GNP/RT-44 termal koruma sistemi için soğuma eğrileri
Figure 10. Cooling curves for RT-44 and GNP/RT-44 thermal protection system



Resim 11. RT-44 ve GNP/6K/RT-44 termal koruma sistemi için soğuma eğrileri
Figure 11. Cooling curves for RT-44 and GNP/6F/RT-44 thermal protection system

Tablo 3. Karşılaştırmalı performans verileri
Table 3. Comparative performance data

Koruma Yöntemi	Maksimum Sıcaklık İyileştirmesi (%)	Maksimum Sıcaklık Farkı (°C)
RT-44	-	1.5
3K/RT-44	8.1	<1.0
4K/RT-44	5.1	<1.0
6K/RT-44	10.5	<1.0
%1 GNP/RT-44	-9.1	2.4
%3 GNP/RT-44	2.0	1.5
%1 GNP/6K/RT-44	10.8	0.4
%3 GNP/6K/RT-44	12.8	0.3

Bununla birlikte termal koruma sistemi olarak 6K/RT-44 sisteminin kullanılması durumunda soğuma performansındaki iyileşmenin %10.5 olduğu göz önüne alındığında aşağıdaki yargılara varılabilir; i) %1 GNP/6K/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 termal korumaları ile RT-44'e kıyasla soğuma performansları sırasıyla %10.8 ve %12.8 iyileştirilmektedir, ii) GNP ve 6 kanat etkileri RT-44 içerisinde herhangi bir sinerjik etki oluşturmamaktadırlar. Başka bir ifadeyle her bir iyileştirme bileşeni kendi mevcut potansiyeli oranında iyileştirmeye katkıda bulunmaktadır, iii) GNP/6K/RT-44 termal koruma sisteminin soğuma performansı üzerindeki asıl katkı kanatçıklar tarafından sağlanmaktadır.

Maksimum sıcaklık farkı açısından yapılan karşılaştırma da yukarıda bahsedilen bulguları desteklemektedir. RT termal korumasında soğuma işlemi sonunda maksimum sıcaklık farkı 1.5 °C iken %1 GNP/6K/RT-44 ve %3 GNP/6K/RT-44 kullanılması durumunda maksimum sıcaklık farkları sırasıyla 0.40 °C ve 0.30 °C olarak ölçülmüştür. 6K/RT-44 termal korumasında soğuma işlemi sonunda maksimum sıcaklık farkının 0.3 °C olduğu göz önüne alındığında yine performans iyileştirme için asıl katkının kanatlar tarafından sağlandığı sonucuna varılabilir.

Maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkı kriterlerine göre tüm koruma yöntemlerinin sadece FDM kullanımına kıyasla performans iyileştirme verileri Tablo 3'de özetlenmiştir.

Sonuçlar

Isı açığa çıkaran bir elektronik cihazın FDM esaslı termal korunumları sırasında ısı depolanan FDM'nin soğuma performansları; sadece FDM, Kanat/FDM, GNP/FDM ve GNP/Kanat/FDM kompozitleri açısından karşılaştırılmış elde edilen sonuçlara aşağıda verilmiştir.

1. 6W ısıtma gücünde 3600 saniye ısı depolama (şarj) ardından 3600 saniye soğuma sonucunda RT-44 termal koruması için maksimum sıcaklık 29.6 °C, maksimum sıcaklık farkı 1.50 °C olarak belirlenmiştir.
2. 3, 4 ve 6 kanatlı RT-44 düzenlemeleri arasında en iyi soğuma performansına sahip olan 6K/RT-44'tür. 6K/RT-44 termal koruma sistemi ile soğuma performansı RT-44'e kıyasla %10.5 iyileştirilmiştir.
3. %1 GNP/RT-44 için ısı iletkenlikte katı fazda %36'ya sıvı fazda %20'ye varan iyileştirmeler elde edilmiştir. Benzer biçimde %3 GNP/RT-44 için ısı iletkenlikte katı fazda %122'ye sıvı fazda %60'a varan iyileştirmeler elde edilmiştir.

4. RT-44 içerisine GNP eklentisinin katılma sıcaklıklarını değiştirmedeği katılma gizli ısıyı ise ihmal edilebilir seviyede azalttığı belirlenmiştir(%3 GNP/RT-44 için %5 azalış).
5. GNP/RT-44 kompoziti için ısı iletkenlikte elde edilen iyileştirmelerin soğuma performansına etkisi zayıftır. %3 GNP/RT-44 kompoziti ile soğuma performansı RT-44'e kıyasla %2.0 iyileştirilebilmektedir.
6. RT-44 ile karşılaştırıldığında %1 GNP/6K/RT-44 ve %3 GNP/RT-44 hibrit termal korumaları ile soğuma performansları sırasıyla %10.8 ve %12.8 iyileştirilmiştir.
7. Kanat/GNP/RT-44 hibrit termal korumasında bir sinerjik etki oluşmamaktadır ve soğuma performansına asıl katkının kanatlar tarafından sağlanmaktadır.

Ağırlık artışının göz ardı edilebileceği kullanım alanları için FDM miktarının azalmasına bağlı olarak kanat sayısının optimize edilmesinin gerek ısıtma gerekse de soğuma performansına olumlu etkisi olacağı açıktır. Gelecek çalışmalara bu yönde devam edilebilmesi uygun görülmektedir.

Kaynaklar

- Acir, A., & Emin Canlı, M. (2018). Investigation of fin application effects on melting time in a latent thermal energy storage system with phase change material (PCM). *Applied Thermal Engineering*, 144(September), 1071–1080. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.013>
- Buyruk, E., & Karabulut, K. (2020). Research of Heat Transfer Augmentation in Plate Fin Heat Exchangers Having Different Fin Types. *Journal of Engineering Thermophysics*, 29(2), 316–330. <https://doi.org/10.1134/S1810232820020137>
- Chen, Y. J., Nguyen, D. D., Shen, M. Y., Yip, M. C., & Tai, N. H. (2013). Thermal characterizations of the graphite nanosheets reinforced paraffin phase-change composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.08.010>
- Cheng, W. L., Mei, B. J., Liu, Y. N., Huang, Y. H., & Yuan, X. D. (2011). A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation. *Energy*, 36(10), 5797–5804. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.050>
- Chinnasamy, V., & Cho, H. (2022). Thermophysical investigation of metallic nanocomposite phase change materials for indoor thermal management. *International Journal of*

- Energy Research*, 46(6), 7626–7641. <https://doi.org/10.1002/er.7664>
- Du, K., Calautit, J., Eames, P., & Wu, Y. (2021). A state-of-the-art review of the application of phase change materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering low-temperature industrial waste heat (IWH) for distributed heat supply. *Renewable Energy*, 168, 1040–1057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057>
- Fan, L. W., Fang, X., Wang, X., Zeng, Y., Xiao, Y. Q., Yu, Z. T., Xu, X., Hu, Y. C., & Cen, K. F. (2013). Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of paraffin-based nanocomposite phase change materials. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.043>
- Hosseinizadeh, S. F., Tan, F. L., & Moosania, S. M. (2011). Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 31(17–18), 3827–3838. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.031>
- Huang, M. J., Eames, P. C., Norton, B., & Hewitt, N. J. (2011). Solar Energy Materials & Solar Cells Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7), 1598–1603. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.008>
- Kaizawa, A., Maruoka, N., Kawai, A., Kamano, H., Jozuka, T., Senda, T., & Akiyama, T. (2008). Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 44(7), 763–769. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0311-2>
- Karabulut, K. (2023). HEAT TRANSFER INCREMENT STUDY TAKING INTO CONSIDERATION FIN LENGTHS FOR CuO-WATER NANOFLUID IN CROSS FLOW-IMPINGING JET FLOW CHANNELS. *Thermal Science*, 27(6), 4345–4360. <https://doi.org/10.2298/TSCI221203035K>
- Karabulut, K., Buyruk, E., & Kilinc, F. (2018). *Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması*. 59(690), 45–67.
- Karabulut, K., Buyruk, E., & Kilinc, F. (2020). Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(5), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02319-0>
- Kurs, B. (2024). *Exploring the impact of inner and middle channel geometries on the melting rate of PCM-metal foam composition in a triplex tube heat exchanger*. 51(April). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102621>
- Kurşun, B., & Balta, M. (2023). Evaluation of the different inner and outer channel geometry combinations for optimum melting and solidification performance in double pipe energy storage with phase change material: A numerical study. *Journal of Energy Storage*, 65(January). <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107250>
- Mondieig, D., Rajabalee, F., Laprie, A., Oonk, H. A. J., Calvet, T., & Cuevas-Diarte, M. A. (2003). Protection of temperature sensitive biomedical products using molecular alloys as phase change material. *Transfusion and Apheresis Science*, 28(2), 143–148. [https://doi.org/10.1016/S1473-0502\(03\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S1473-0502(03)00016-8)
- Ping, P., Peng, R., Kong, D., Chen, G., & Wen, J. (2018). Investigation on thermal management performance of PCM-fin structure for Li-ion battery module in high-temperature environment. *Energy Conversion and Management*, 176(August), 131–146. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.025>
- Riahi, S., Jovet, Y., Saman, W. Y., Belusko, M., & Bruno, F. (2019). Sensible and latent heat energy storage systems for concentrated solar power plants, exergy efficiency comparison. *Solar Energy*, 180(August 2018), 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.072>
- Sarier, N., & Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: An overview. *Thermochimica Acta*, 540, 7–60. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.013>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Temel, Ü. N., & İ. B. Y. Ç. İ. F. T. Ç. (2018). *DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES OF A82 ORGANIC PHASE CHANGE MATERIAL EMBEDDED WITH DIFFERENT TYPE NANOPARTICLES LIST OF SEYMBOLS*. 75–85.
- Tian, L. L., Liu, X., Chen, S., & Shen, Z. G. (2020). Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure. *Applied Thermal Engineering*, 167(April 2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114764>
- Wang, S. M., Matiašovský, P., Mihálka, P., & Lai, C. M. (2018). Experimental investigation of the daily thermal performance of a mPCM honeycomb wallboard. *Energy and Buildings*, 159, 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.080>
- Yuan, Y., Li, T., Zhang, N., Cao, X., & Yang, X. (2016). Investigation on thermal properties of capric–palmitic–stearic acid/activated carbon composite phase change materials for high-temperature cooling application. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5173-0>

Semboller ve Kısaltmalar

Semboller		Kısaltmalar	
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme	k	: Katılma
PCM	: Phase Change Material	kb	: Katılma başlangıç
GNP	: Grafen Nano Parçacık	ks	: Katılma sonlanma
DTK	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre		
H	: Toplam entalpi (J/g)		
h	: Duyulur entalpi (J/g)		
ΔH	: Katılma entalpisi (J/g)		
H _k	: Katılma gizli ısı (J/g)		
β	: Sıvı oranı		
T	: Sıcaklık (°C)		
t	: Zaman (s)		