Araştırma Makalesi



BİYOMİMİKRİ YÖNTEMİYLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMASI

Research Article

Şenay BALBAY^{1,2*}

 ¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri, Bilecik, Türkiye
² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Endüstriyel Sürdürülebilirlik ABD, Bilecik, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz							
Faz Değişim Malzemesi,	Çalışmada karbon esaslı malzemeler (KEM)(Grafit(GR) ve Grafit Oksit(GO))							
Biyomimikri,	kullanılarak etkili ısı enerjisi depolaması için uygun maliyetli çok işlevli faz değişim							
Şişe Soğutucu,	malzemelerin (FDM) tasarlanması, geliştirilmesi ve biyomimikri bilimine bağlı							
Ticari Grafit,	olarak kullanılması amaçlanmıştır.							
<i>Grafit Oksit</i> . Çalışmada ilk olarak FDM üretilmiş, daha sonra üretilen FDM'nin ana								
	son olarak biyomimikri bilimine göre prototip soğutucu şişe torbası tasarlanarak							
	suyu soğuk tutma performans çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Grafit ve grafit oksit							
	kullanılarak üretilen FDM'lerin ısı enerji depolama kapasiteleri, fonksiyonel							
yapıları, termal özellikleri incelenmiştir. Aynı zamanda termal döngü s 300-500 döngü) FDM'nin ısı depolama kapasiteleri ve termal-kimyas								
								belirlenmiştir. Grafit kullanılarak üretilen FDM, GO kullanılarak üretilen FDM'den
	daha fazla ısı enerjisi depoladığı gözlenmiştir. Biyomimikri bilimine bağlı olarak							
	tasarlanan prototip soğutucu şişe torbasının piyasada satışı yapılan soğutucu şişe							
	torbalarından hem en az 2 kat daha fazla performansa sahip olduğu hem de ürün							
	başına 38,91TL – 216,44TL daha ucuz maliyetle üretilebileceği sonucuna							
	ulaşılmıştır.							

THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATION WITH BIOMIMICRY METHOD

Keywords	Abstract
Phase Change Material,	The study aims to use biomimicry science to design and develop cost-effective
Biomimicry,	multifunctional phase change materials (PCM) for effective thermal energy storage
Bottle Cooler,	using carbon-based materials (CBM) (Graphite (GR) and Graphite Oxide (GO)).
Commercial Graphite,	PCMs were first produced, then the produced PCMs were analyzed. Finally, a
Graphite Oxide.	prototype cooler bottle bag according to biomimicry science was designed, and
	performance studies were carried out to keep the water cold. The temperature
	differences, functional structures and thermal properties of PCMs produced using
	graphite and graphite oxide were investigated. At the same time, heat storage
	capacities and thermal-chemical properties of PCM after thermal cycling (100-300-
	500 cycles) were determined. It was observed that PCM produced using graphite
	stored more heat energy than PCM produced using GO. The prototype bottle cooler
	bag (BCB) was designed based on biomimicry science and performed 2 times more
	than the cooler bottle bags sold on the market. Also, it was concluded that it can be
	produced at a lower cost of 38,91 – 216,44 TL (Turkish Lira) per product.

Alıntı / Cite

Balbay, Ş., (2025). Biyomimikri Yöntemiyle Termal Enerji Depolama Uygulaması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 440-453.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Balbay / S. Balbay, 0000-0002-0016-7973	Başvuru Tarihi / Submission Date	19.02.2025
	Revizyon Tarihi / Revision Date	24.03.2025
	Kabul Tarihi / Accepted Date	14.04.2025
	Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

^{*} İlgili yazar / Corresponding author: senay.balbay@bilecik.edu.tr, +90-228-214-1627

THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATION WITH BIOMIMICRY METHOD

Şenay BALBAY 1^{+,2}

¹ Bilecik Seyh Edebali University, Vocational School, Environmental Protection Technologies, Bilecik, Türkiye

² Bilecik Seyh Edebali University, Graduate Education Institute, Industrial Sustainability Department, Bilecik, Türkiye

Highlights

- 1. According to biomimicry science, a prototype bottle cooler bag (PBCB) was designed.
- 2. PBCB has both cheaper and higher performance than the BCBs sold in the market.
- 3. Phase change material (PCM) with high heat storage capacity was produced.
- 4. The amount of heat storage increased as the thermal cycle increased.

Graphical Abstract



Figure. Prototype Bottle Cooler Bag

Purpose and Scope

This study aims to be used by biomimicry science, designing and developing cost-effective multifunctional phase change materials (PCMs) for effective heat energy storage using carbon-based materials (CBMs).

Design/methodology/approach

PCMs were first produced, then the produced PCMs were analyzed. Finally, a prototype cooler bottle bag according to biomimicry science was designed, and performance studies were carried out to keep the water cold. The temperature differences, functional structures and thermal properties of PCMs produced using graphite and graphite oxide were investigated. At the same time, temperature differences and thermal-chemical properties of PCMs were determined after the thermal cycle (100-300-500 cycles).

Findings

It was observed that PCMs produced using graphite stored more heat energy than PCMs produced using GO. The prototype bottle cooler bag (BCB) was designed based on biomimicry science and performed twice the cooler bottle bags sold on the market. Also, it was concluded that it can be produced at a lower cost of 38,91 – 216,44 TL (Turkish Lira) per product.

Originality

Very few studies use biomimicry, a new field of science, in thermal energy storage. At the same time, no study has been conducted on using PCM more efficiently by biomimicry. Therefore, the design, development and use of cost-effective multifunctional PCMs for effective thermal energy storage using CBMs (graphite and graphite oxide) has been examined in the study and will contribute to the literature in this respect. As a result, it has been determined that the designed bottle cooler bag is cheaper and at least 2 times more efficient than the products available.

⁺ Corresponding author: senay.balbay@bilecik.edu.tr, +90-228-214-1627

1. Giriş (Introduction)

2025-2030 yılları arasında küresel termal enerji depolama pazarının Yıllık Bileşik Büyüme Oranının (CAGR) %6.25'den daha fazla büyümesi beklenmektedir (Mordor Intelligence, 2025). Yenilenebilir enerji üretiminde büyüyen ihtiyaçlar, malzeme biliminde yaşanan gelişmeler ve devlet teşvikleri gibi faktörler termal enerji depolama pazarına olan talebi artıran önemli faktörlerdendir (Aslfattahia vd. 2020). Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının dönüştürülmesine yönelik teknolojilerin artan gelişimi termal enerjiyi verimli bir şekilde depolama ve yönetme gerekliliğini de artırmaktadır (Ribezzo vd., 2023).

Enerji depolama sistemleri, arz ve talebi dengelemede, dalgalanmaları düzeltmede ve yenilenebilir enerji kaynaklarını şebekeye entegre etmede temel bir rol oynar. Bu bağlamda, faz değişim malzemeleri (FDM'ler), yüksek enerji yoğunlukları ve faz geçişleri sırasında termal enerjiyi depolama ve serbest bırakma yetenekleri nedeniyle Gizli Isı Termal Enerji Depolama (LHTES) için umut verici bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır (Muiruri vd., 2024).

FDM'lerin performansı büyük ölçüde üretimlerinde kullanılan matrise bağlıdır ve gözenekli karbon bazlı malzemeler umut verici matris destekleri olarak ortaya konmuştur (Singh vd., 2022). Grafen, grafen oksit (GO) ve karbon nanotüpler (CNT'ler) gibi FDM üretiminde yaygın kullanılan karbonlu malzemeler, sergiledikleri yüksek termal iletkenlik ve yüksek ısı transferi özelliklerine rağmen olumsuz çevresel ve sağlık etkileri ve yüksek maliyetli olmalarından dolayı uygulama alanlarını kısıtlamaktadır (Muiruri vd., 2024).

Geleneksel FDM'ler sızıntı oluşturması, faz ayrılması ve düşük termal iletkenlikten muzdariptir ve bu da pratikliklerini ve verimliliklerini sınırlamaktadır. Sızıntı oluşumu, çevresel riskler meydana getirdikleri için FDM tabanlı sistemlerin ömrünü tehlikeye düşürmektedir (Odoi-Yorke vd., 2023). Bu zorlukların üstesinden gelmek için FDM'yi takviyelere dahil ederek yapısal bütünlüğü ve termal özellikleri artırırken sızıntıyı en aza indirecek form-stabil FDM'ler (FSFDM'ler) geliştirilmiştir (Yu ve Song, 2023). FSFDM'lerin üretiminde kullanılan karbonlu malzemeler (aktif karbon, karbon siyahı, CNT, grafen, GO, vb.), kılcal kuvvet ve hidrojen bağı etkisiyle FDM'nin sızıdırmalarına engel olduğu gözlenmiştir (Wang vd., 2018). Liu ve arkadaşları, FDM moleküllerinin PEG ile uygulanmasına bağlı olarak hidrojen bağlarını güçlendirdiği ve FDM'nin genel mukavemetinin daha güçlü olmasına yol açtığını belirlemişlerdir (Liu vd., 2024).

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Grafit bazlı faz değişim malzemeleri, sistemin termal iletkenliğini artırarak gizli ısı depolama sistemlerindeki termal iletimi iyileştirmektedir (Kumar vd., 2025). Yüksek sıcaklık sinterlemesi yoluyla genişletilmiş grafit ve zift bazlı yüksek ısı iletkenliğine sahip faz değişimli enerji depolama malzemesi geliştirilmiştir. Geliştirilen malzemenin gizli ısısı 228,5 J/g olarak belirlenmiştir (Dong vd., 2025). Genleştirilmiş grafit basınç altında sıkıstırıldıktan sonra erimis parafin emdirilerek sıkıstırılmıs genlestirilmis grafit (SGG) elde edilmistir. SGG sıkıştırma oranına bağlı olarak kompozitin etkin termal iletkenliğinde saf parafine kıyasla 3 ila 10 kat artış olduğu tespit edilmiştir (Kumar vd., 2025). Parafin (PAR), genleştirilmiş grafit ve düşük erime noktalı metal bazlı alaşımdan oluşan FDM'nin 2,31 W·m⁻¹·K⁻¹ termal iletkenlik göstermiştir (Zhao vd., 2025). Bir olefin blok(OB) kopolimeri, termal esneklik sağlayan eriyik sızıntısını etkili bir şekilde önleyen 1-hekzadekanolü (HD) kapsüllemek için destekleyici malzeme olarak kullanılmış ve FDM içinde birbirine bağlı ısı transfer kanalları oluşturmak için grafit eklenmiştir. %7,5 ağırlık oranında genleşmiş grafit (EG) ve 12:8 HD/OBC kütle oranına şahip FDM, 0,537 W·m⁻¹·K⁻¹ termal iletkenliğe, 152 J·g⁻¹ faz geçiş entalpisine ve 200 termal çevrimden sonra yalnızca %0,846 sızıntı oranına ulaşarak optimum performans göstermiştir (Zhong vd., 2025). Karbonize buğday samanı (CWS) ve EG'in parafin içinde karıştırılarak elde edilen CWS-EG/PAR FSFDM'nin ısıl iletkenliği 2,01 W/m·K'ye kadar çıkmış olup % 615,1 oranında artmıştır (Liu vd., 2025). Yüzey aktif madde Triton X-100 (TX-100) kullanılarak EG termal iletkenlik dolgusunu değiştirmek için kovalent olmayan bir fonksiyonelleştirme yöntemi kullanılmıştır. TX-100'deki hidrofilik gruplar, modifiye edilmiş genişletilmiş grafit(MGG) ve glisin su esaslı FDM arasında hidrojen bağlarının oluşumunu kolaylaştırarak malzemelerin entalpi kaybını engellemiştir. %2 ila %8 ağırlık oranında MGG içeren hazırlanmış FDM'lerin %46,47 ~ %113,35'lik bir artışı temsil eden 0,88 ila 1,28 W/m·K aralığında termal iletkenlik sergilemiştir. Eş zamanlı olarak, erime sıcaklığı -5,35 ila -5,65 °C arasında değişmiş ve 284,6 ila 264,5 J/g'lık yüksek bir erime gizli ısısı meydana gelmiştir. 100 termal cevrimden sonra erime sıcaklığında (% -1,62 \sim % +2,20) ve gizli ısıda (% -2,18 \sim % -4,66) yalnızca küçük dalgalanmalar gözlemlenmiştir (Liu vd., 2024). Ağırlıkça %1, %4, %7 ve %10 Nano-grafit (NG)/parafin kompozit faz değişim malzemeleri hazırlanmıştır. Nano-grafit (NG)/parafin kompozit FDM'sinin oranı %1'den %10'a arttıkça termal iletkenlik de 0.3650 W/mK'den 0.9362 W/mK yükselmiştir. Saf parafinin gizli ısısı 209.33 J/g'dır. Nano-grafit (NG)/parafin kompozit FDM'sinin oranı %1'den %10'a arttıkça gizli ısı 202.6 J/g'den ve 181.81 J/g'a azalmıştır (Magendran vd., 2019). Farklı sıcaklık (20-25-30-35-40 °C) ve farklı kütle oranlarında(% ağ.) (0.1, 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.5) grafit tozu, genleşmiş perlit, MCNT, multi-layer graphene nanoplateletler parafin tozuna karıştırılarak faz değişim malzemelerinin termal enerji depolama verimliliği incelenmiştir. Artan grafit/parafin oranına bağlı olarak sıcaklık arttıkça termal iletkenlik azalmıştır. En yüksek termal iletkenlik değeri 20 °C'de % 2.5 oranında yaklaşık 0.44 W/m.K'dir. FDM'nin 50 ve 100 termal döngü sonrası gizli ısıları sırasıyla 0.81% ve 1.78% oranında azalmıştır (Li vd., 2013).

Araştırmacılar doğadan ilham alarak mevcut şartlarda kullanılan ürünlerden daha fazla verim elde etmek ve enerjiyi daha verimli kullanabilmek amacıyla araştırmalarına devam etmektedirler. Biyomimikri yaklaşımı (doğadan ilham alma) kavramsal olarak yeni çözümler sağlayabilen insan sorunlarını çözmek için doğada bulunan süreçleri taklit eder. Enerji alanında yapılan biyomimikri uygulamaları; kambur balinadan rüzgar gülü tasarımı ve kuzey memeliden FDM üretimidir. Kuzey memelilerde yağ dokusu vücudun termal yalıtkanıdır ve lipitlerin faz değişim özellikleri de ısıyı depolamak ve serbest bırakmak için kullanılır (Wang vd., 2018; Kant vd., 2017).

Buraya kadar edinilen bilgilere göre yeni bir bilim alanı olan biyomimikrinin termal enerji depolama alanında kullanıldığı çalışma yok denecek kadar azdır. Aynı zamanda biyomimikriden faydalanarak FDM'nin daha verimli kullanıldığı herhangi bir çalışmaya da rastlanılmamıştır. Bundan dolayı çalışmada KEM'ler (grafit ve grafit oksit) kullanılarak etkili ısı enerjisi depolaması için uygun maliyetli çok işlevli FDM'lerin tasarlanması, geliştirilmesi ve biyomimikri bilimine bağlı olarak kullanılması incelenmiştir ve bu yönüyle literatüre katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak tasarlanan şişe soğutucu torbasının piyasada mevcut ürünlerden daha ucuz ve en az 2 kat daha fazla verimli olduğu belirlenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Grafit(GR) SKC Karbon firmasından temin edilmiştir. Grafit ~%96 C içermektedir. BET yüzey alanı 1.64 m2/g'dır. Parafin(PAR) Başak Kimya, heksametil amonyum bromür(SUR) Alfa Aesar, 600 molekül ağırlıklı Poli Etilen Glikol (PEG 600), Potasyum Permanganat (KMnO₄), hidrojen Peroksit (H₂O₂), Sodyum Nitrat (NaNO₃) ve Sülfürik Asit (H₂SO₄) kimyasalları Merck firmasından satın alınmıştır. Şişe soğutucu torbası tasarımında kullanılan alüminyum paketler epoşet.com'dan tedarik edilmiştir.

3.2. Metod (Method)

3.2.1. Grafit Oksit Üretimi (Graphite Oxide Production)

Hummers metoduna göre grafit kullanılarak grafit oksit üretilmiştir (Yazıcı vd., 2016). İlk olarak, 5 g toz grafit, 2,5 g sodyum nitrat (NaNO₃), 115 mL %96'lık sülfürik asit (H₂SO₄) beher içinde karıştırıldı ve buz banyosu içerisinde 1 saat süreyle karıştırılmaya devam edilmiştir. Banyo sıcaklığı 5 °C'nin altında tutularak karışıma 15 g potasyum permanganat (KMnO₄) yavaşça eklenmiştir. Homojen karışım sağlandıktan sonra 35-40 °C sıcaklık aralığında 2 saat karıştırılmıştır. İkinci olarak karışıma yavaşça 500 mL deiyonize su eklenerek 1 saat karıştırılmıştır. Sıcaklık <40 °C olacak şekilde karışıma 8,4 mL hidrojen peroksit (%35,7) eklenerek 2 saat daha karıştırılmıştır. Üçüncü olarak üretilen GO filtre edilmiş ve saf su ile pH 7 olana kadar yıkanmıştır.

3.2.2. Faz Değişim Malzemesi Üretimi (Phase Change Material Production)

Sıcaklığı 80 °C'ye ayarlanmış sıcak su banyosunda ilk olarak parafin eritilmiş ve daha sonra PEG 600 eklenmiştir. Homojen karışım elde edildikten sonra sırasıyla sürfaktan ve GR veya GO eklenmiştir. 4 saat boyunca homojen karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Vakum sistemi yardımıyla GR veya GO'in PEG 600 ve PAR'ı absorplaması sağlanmıştır(Şekil 2.1). Üretilen FDM'ler kilitli numune poşetlerine konarak saklanmıştır.



Sekil 1. FDM Üretimi (Phase Change Material Production)

GR veya GO kullanılarak Tablo 2.1'de verilen oranlara göre FDM'ler üretilmiştir. İlk olarak en uygun % GR veya % GO oranları ve daha sonra % PEG600/PAR oranları belirlenmiştir. FDM kodlamalarında GR kullanıldığı durumda X yerine GR veya GO kullanıldığında X yerine GO yapılarak numuneler adlandırılmıştır. Örneğin X-6 örneğinde GR ile hazırlanan FDM'nin kodlaması GR-6 olarak belirtilmiştir. Her bir deney üç defa tekrarlanmıştır ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

Table 1. GR Ve do Ruhamarak nazirianan FDM Receteren (FDM Recipes Frepared Using GR OF dO)									
	X-1	X-2	X-3	X-4	X-5	X-6	X-7	X-8	X-9
PEG 600(%)	45	40	35	60	50	40	30	20	10
PAR(%)	45	40	35	10	20	30	40	50	60
X(%)	5	15	25	25	25	25	25	25	25
SUR(%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tablo 1. GR Ve G) Kullanıl	arak Hazı	rlanan Fl	DM Reçet	eleri (FDI	A Recipes	Prepared	Using GR	0r G0)

X: Grafit veya Grafit oksit

3.2.3. FDM Analizi (PCM Analysis)

Tablo 2.1'de verilen reçetelere göre üretilen FDM'lere ısı depolama kapasitesi(İsıker and Yesilata, 2017) testleri yapılmıştır. En yüksek oranda ısı depolayan FDM'lere (GO-9 ve GR-8) sızdırmazlık (Kee vd., 2017), fonskiyonel grup analizi (FT-IR), termal özellik (DSC-TG), termal döngü(Liu and Chung, 2001) testleri yapılmıştır. Termal döngü testleri 100-300-500 döngü olarak gerceklestirilmistir ve daha sonra bu numunelere tekrar ısı depolama kapasitesi(İsıker and Yesilata, 2017), sızdırmazlık (Kee vd., 2017), fonskiyonel grup analizi (FT-IR) uygulanmıştır. Her bir FDM(GO-9 ve GR-8)'den üç tekrar üretilerek tüm tekrar numunlere aynı test ve analizler uygulanmıştır. Elde edilen sonucların ortalamarı alınmıştır. FT-IR (Perkin Elmer Spectrum 100 model FTIR spektrometre) analizleri 400 – 4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. DSC-TG (Perkin Elmer STA 8000) analizleri azot gazı ortamında ısıtma oranı 1°C/dk, akış oranı 60 ml/dk ve 0-90 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır.

3.2.4. Şişe Soğutucu Torbası Tasarımı (Bottle Cooler Bag Design)

300 ml su şişesini soğuk tutmak amacıyla çan çiçeği ve rüzgar gülü çiçeğinin(Şekil 2.2) görünümleri referans alınarak ŞST tasarlanmıştır. Rüzgar gülünün şekli çan çiçeği içine yerleştirilerek yapılan tasarım görünümü ve hazırlanan prototip Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2. Tasarımda Referans Alınan Rüzgar Gülü Ve Çan Çiçekleri (Sol: Rüzgar Gülü Çiçeği (Galeri.Netfotograf.Com), Sağ: Çan Çiçeği (Steemit.Com) (Windmills And Bellflowers Referenced İn The Design)



Şekil 3. Şişe Soğutucu Torbası Prototipi (Bottle Cooler Bag Prototype)

Deep-frezerda buz tutmuş ve buzdolabında soğutulmuş 300 ml su şişesi içinde bulunan suların sıcaklıklarını koruma performans testleri hazırlanan şişe soğutucu torbasının içine konularak gerçekleştirilmiştir. En az 12 saat boyunca ve her saat şişelerde bulunan buz ve suyun sıcaklıkları ölçülmüştür. Hazırlanan alüminyum kapak ile torba sürekli kapalı tutulmuştur, sadece sıcaklık ölçümleri için açılmıştır.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Isı, iki sistem arasında (veya sistemle çevresi arasında) sıcaklık farkından dolayı gerçekleşen enerji geçişidir (Çengel ve Boles, 2002). Bu enerji geçişi aynı zamanda sistem tarafından depolanan veya salınan enerji miktarını da göstermektedir. Karbon esaslı malzemeler (grafit ve grafit oksit) kullanılarak hazırlanmış FDM'lerin % PAR ve % karbon oranlarına göre ısı enerji depolama miktarları Şekil 3.1'de verilmiştir. Karbon oranı arttıkça her iki KEM için ısı enerji depolama miktarları artmıştır. Ancak grafit kullanılarak hazırlanan FDM'nin parafin oranının % 50 olduğu orana kadar ısı enerji depolama miktarı artmış ve daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. Grafit kullanılarak üretilen FDM'lerin ısı depolama kapasiteleri grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerden daha yüksek olduğundan dolayı grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerde düşük parafin oranları (%10-20-30) çalışılmamıştır.



Şekil 4. Grafit Ve Grafit Oksit Kullanılarak Üretilen FDM'lerin Isı Enerji Depolama Miktarları (Sol:Grafit, Sağ:Grafit Oksit) (PAR:Parafin) (Heat Energy Storage Amounts Of Pcms Produced Using Graphite And Graphite Oxide)

Grafit ve grafit oksit kullanılarak hazırlanmış FDM'lerin FT-IR spektrumları Şekil 3.2'de verilmiştir. FT-IR spektrumları incelendiğinde alifatik yapıda bulunan alkana ait 3000-2800 cm⁻¹ C-H (Ţucureanu vd., 2016), alkine ait ~2100 cm⁻¹ C=C (Ţucureanu vd., 2016), aromatik yapıya ait ~1900 cm⁻¹ C=C (Cetinkaya, 2015), metil yapısında bulunan alkana ait 1500-1300 cm⁻¹ C-H (Ţiryaki, 2013), aromatik ester yapısına ait 1300-1000 cm⁻¹ C-O (Ţucureanu vd., 2016), aromatik yapıya ait 900-700 cm⁻¹ C-H (Ţucureanu vd., 2016) pikleri gözlenmiştir. GR-7 ve GO-9 kodlu FDM numunelerinde sürfaktanın yapısında da bulunan ~900 cm⁻¹ C-H piki gözlenmiştir. Ancak sürfaktanın FDM'de kullanılan diğer organik yapılarla bağ kurmasından dolayı GR-8 kodlu FDM numunesinde bu pik tespit edilmemiştir.



Şekil 5. Grafit Kullanılarak Üretilen FDM'ler, Parafin (PAR) Ve Sürfaktanın (SUR) FT-IR Spektrumları (FT-IR Spectra Of Pcms Produced Using Graphite, Paraffin (PAR) And Surfactant (SUR))



Şekil 6. Grafit Oksit Kullanılarak Üretilen FDM, Parafin (PAR) Ve Sürfaktanın (SUR) FT-IR Spektrumları (FT-IR Spectra Of PCM, Paraffin (PAR) And Surfactant (SUR) Produced Using Graphite Oxide)

Grafit ve grafit oksit kullanılarak hazırlanmış GR-8 ve GO-9 FDM'lerin sızıntı testi sonrası görünümleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Hazırlananan FDM'lerin sızıntı testi sonrası görünümleri incelendiğinde ise üretilen FDM'lerin sızdırdığı görülmüştür.



Şekil 7. Grafit Ve Grafit Oksit Kullanılarak Üretilen FDM'lerin Sızıntı Testi Sonrası Görünümleri (Sol:GR-8, Sağ:GO-9) (Appearance Of Pcms Produced Using Graphite And Graphite Oxide After Leakage Test)

Grafit ve Grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerin DSC analiz spektrumu Şekil 3.5'de verilmiştir. GR-8'in erime hal değişimi 48,87 °C – 58,06 °C arasında 9,19 °C sıcaklık değişimi boyunca depoladığı gizli ısı enerji miktarı 154,5 j/g ölçülmüştür. GO-9'un erime hal değişimi 51,6 °C – 58,5 °C arasında 6.7 °C sıcaklık değişimi boyunca depoladığı gizli ısı enerji miktarı 173,5 j/g ölçülmesine rağmen erime hal değişimi sıcaklık aralığının dar olmasından dolayı depoladığı ısıyı yeteri kadar bünyesinde tutamadığı gözlenmiştir ve Şekil 3.1-3.2-3.3'de verilen bilgiler de bu sonucu desteklemektedir. GR-8'in katı-katı faz geçiş sıcaklığında (0-17 °C arasında) depoladığı gizli ısı enerji miktarı 144,9 j/g ölçülmüştür. GO-9'un katı-katı faz geçiş sıcaklığında (0-14 °C arasında) depoladığı gizli ısı enerji miktarı 24,3 j/g ölçülmüştür. GR-8 ve GO-9 FDM'lerinin toplam gizli ısı enerji miktarları sırasıyla 299,4 j/g ve 197,8 j/g'dır. Araştırmacıların sadece parafin ve grafit kullanarak ürettikleri FDM'de XRD analizine göre parafin ve grafit arasında bağ oluşmadığını belirtmişlerdir. Bu kompozit karışımın gizli ısı enerji değerinin saf parafinin gizli ısı enerji değerinden daha düşük olduğunu göstermişlerdir. %25 grafit katkılı PCM kompozit karışımın toplam gizli ısı enerji değeri 127,82 j/g olarak belirlemişlerdir (Liu vd., 2017). Sonuç olarak PEG 600 ve sürfaktan kullanılarak üretilen GR-8 FDM'de, FDM yapısında oluşan fonksiyonel bağlardan dolayı (Şekil 3.2) araştırmacıların ürettiği kompozit FDM'den yaklaşık 2 kat daha fazla gizli ısı enerjisinin depolanması sağlanmıştır.



Şekil 8. GR-8 Ve GO-9 DSC Analiz Spektrumu (GR-8 And GO-9 DSC Analysis Spectrum)

En yüksek enerji depolama kapasitesinin gözlendiği grafit malzemesi kullanılarak üretilen FDM'nin(GR-8) 100-300-500 termal döngü testleri sonrası enerji depolama miktarları Şekil 3.6'de verilmiştir. 300 termal döngüye kadar FDM'nin depoladığı enerji miktarı artmıştır. Ancak FDM'nin yapısında bulunan rotasyonel geçişler (Şekil 3.7) 500 döngü sayısına ulaşıldığında FDM'nin depoladığı enerji miktarının azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 9. GR-8 FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası Enerji Depolama Miktarları (Energy Storage Amounts Of GR-8 FDM After Thermal Cycling Tests)

GR-8 FDM'nin termal döngü testleri sonrası FT-IR spektrumları Şekil 3.7'de verilmiştir. Termal döngü testleri sonrası FDM'nin FT-IR spektrumları incelendiğinde Şekil 3.2'de verilen FDM'lerinin yapılarına benzer yapılar gözlenmiştir. Rotasyonal geçişlerin titreşimsel geçişlere eklenmesinden dolayı 300 döngü testi sonucunda FDM'nin piklerinin daha kısa olduğu belirlenmiştir. Bu durum FDM'nin daha fazla enerji depolamasına neden olmuştur (Şekil 3.6 ve 3.9).



Şekil 10. GR-8 FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası FT-IR Spektrumları (GR-8-10:100 Döngü, GR-8-30: 300 Döngü, GR-8-500: 500 Döngü) (FT-IR Spectra Of GR-8 FDM After Thermal Cycling Tests)

GR-8 FDM'nin termal döngü testleri sonrası sızıntı testi görünümleri Şekil 3.8'de verilmiştir. Sızdırmazlık testi görünümlerine göre döngü sayısı arttıkça FDM'nin sızdırmazlıkları azalmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 11. Grafit Kullanılarak Üretilen FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası Sızıntı Testi Görünümleri (D-45:GR-8; D-45-10:GR-8-10; D-45-30:GR-8-30; D-45-50:GR-8-50) (Leaching Test Views Of FDM Produced Using Graphite After Thermal Cycling Tests)

GR-8 FDM'nin termal döngü testleri sonrası DSC spektrumları Şekil 3.9b'de verilmiştir. DSC spektrumlarına göre erime hal değişimi sıcaklıkları ve depolanan ısı enerjisi miktarları 100 döngü için 50 °C – 58 °C ve 444.3 j/g, 300 döngü için 51 °C – 58 °C ve 767.3 j/g, 500 döngü için 54 °C – 58 °C ve 326.2 j/g olarak belirlenmiştir, ancak 300 döngüden sonra FDM'nin ısı depolama kapasitesi (Şekil 3.9a) azalmıştır.



Şekil 12. GR-8 FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası DSC Spektrumları (Sol) Ve Entalpi Değerleri (Sağ) (DSC Spectra (Left)And Enthalpy Values (Right) Of GR-8 FDM After Thermal Cycling Tests)

Tasarlanan şişe soğutucu torbası boyutları, SolidWorks 2017 programının dizayn tablosuna aktarılarak prototipin 3D modeli oluşturulmuştur.



Şekil 13. Şişe Soğutucu Torbası Prototipinin 3D Modellenmiş Görünümü (3D Modeled View Of Bottle Cooler Bag Prototype)

Deep-frezerda buz tutmuş ve buzdolabında soğutulmuş suların sıcaklıklarını koruma performans testleri soğutucu şişe torbası prototipi içinde gerçekleştirilmiştir. En az 12 saat boyunca ve her saat şişelerde bulunan buz ve suyun sıcaklıkları ölçülmüştür.

Soğutucu şişe torbasının soğuk tutma performansını belirlemek üzere torbanın içine konulan deep-frezerda buz tutmuş suyun erime sıcaklıkları, erime sırasında oluşan hem buz hemde suyun sıcaklığı ölçülerek belirlenmiştir. Soğutucu şişe torbası teste başlamadan önce 1 saat buzdolabında soğutulmuştur. 10. Saat sonunda eriyen suyun sıcaklığı 2 °C ve 17. saat sonunda ise eriyen suyun sıcaklığı ~ 18 °C olarak belirlenmiştir. Aynı buzun dış ortamda(soğutucu şişe torbasına koymadan) bulunması durumunda ise buzun 8. saatte tamamen suya dönüştüğü gözlenmiştir(Şekil 3.11).

Buzdolabında soğutulmuş suyun soğutucu şişe torbası içinde ve dış ortamda bulunmaları durumunda suların sıcaklıklarında gözlenen değişim performansı incelendiğinde 4. – 5. saatin sonunda suyun sıcaklığı FDM'nin sıcaklığına ulaşmıştır (Şekil 3.12). Soğutucu şişe torbası hem buzdolabında soğutularak hemde soğutulmadan bu çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Soğutucu şişe torbasının buzdolabında soğutulmasının suyu soğuk tutma performansı üzerinde fazla etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 14. Deep-Frezerda Buz Tutmuş Suyun Sıcaklıklarının Değişim Performansı Grafikleri (Sol: ŞST İçinde Bulunan Buz Ve Sağ: Dış Ortamda Bulunan Buz)(Ortam Sıcaklığı: 24 °C) (Performance Graphs Of The Change İn Temperature Of Frozen Water İn Deep Freezers)



Şekil 15. Buzdolabında Soğutulmuş Suyun Sıcaklıklarının Değişim Performansı Grafikleri (Sol:ŞTT İçinde Bulunan Su Ve Sağ: Dış Ortamda Bulunan Su) (Ortam Sıcaklığı: 24 °C) (Performance Graphs Of Changes İn The Temperature Of Chilled Water İn The Refrigerator)

GR-8 FDM kullanılarak hazırlanan şişe soğutucu torbasının hammadde maliyet analizi Tablo 3.1'de verilmiştir. 1 adet ŞST'de 11 adet kilitli Al poşet ve 275 g FDM kullanılmıştır. Üretilen 1 adet SŞT'nin birim hammadde maliyeti 121,80TL/1 adt olarak hesaplanmıştır. Ayrıca işçilik, enerji ve diğer giderler için 44TL/1 adt düşünülmüş ve 1 adet SŞT'nin toplam maliyeti 165,8 TL/1 adt olarak hesaplanmıştır.

Piyasada satılmakta olan PVC malzemeden yapılmış SŞT'lerin fiyatı 204,71 – 382,24 TL/1 adt'dir. Ayrıca bu ürünlerin dezavantajları; i) ikinci veya üçüncü kullanımlarda yırtılmalar ve bozulmalar oluşması, ii) soğuk tutma özelliklerinin oldukça düşük olmasıdır. Bu olumsuzluklar müşteriler tarafından özellikle vurgulanmaktadır.

Üretilen SŞT'nin maliyeti, ticari SŞT'lerden yaklaşık ürün başına 38,91TL – 216,44TL daha ucuz olduğu görülmüştür.

Ürünler	FDM(g)	ŞST(adt)	Birim fiyat(TL/1000g)*	Top. Fiyat(TL)
PEG 600	55		690,48 TL	37,98
Parafin	137,5		82,09 TL	11,29
Grafit	68,75		430,64 TL	29,61
Sürfaktan	13,75		1174,00 TL	16,14
Al paket		11	2,43 TL	26,78
			Toplam maliyet (TL)	121,80 TL/ 1 adt SST

Tablo 2. Şişe Soğutucu Torbası Hammadde Maliyet Analizi (Bottle Cooler Bag Raw Material Cost Analysis)

*Verilen fiyatlara KDV dahildir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışmada KEM'ler (grafit ve grafit oksit) kullanılarak etkili ısı enerjisi depolanması için uygun maliyetli çok işlevli FDM'lerin tasarlanması, geliştirilmesi ve kullanılması amaçlanmıştır. Grafit ve grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerin ısı enerji depolama kapasiteleri, fonksiyonel yapıları, termal özellikleri, termal döngü sonrası (100-300-500 döngü) ısı depolama kapasiteleri ve termal-kimyasal özellikleri incelenmiştir.

Grafit kullanılarak üretilen FDM, GO kullanılarak üretilen FDM'den daha fazla ısı enerjisi depoladığı belirlenmiştir. Ayrıca GO kullanılarak üretilen FDM'nin depoladığı ısıyı bünyesinde tutamadığı gözlenmiştir. FDM üretiminde kullanılan sürfaktan ve diğer malzemeler arasında bağ oluşmasından dolayı GR-8'in daha fazla ısı enerjisi depoladığı tespit edilmiştir. 100-300-500 termal döngü testleri sonrası GR-8'in 300 termal döngüye kadar depoladığı ısı enerjisi artmış ve daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. Döngü sayısı arttıkça GR-8'in sızdırmazlıkları azalmıştır. Aynı zamanda rotasyonal geçişlerin titreşimsel geçişlere eklenmesinden dolayı 300 döngü testi sonucunda GR-8'in FT-IR piklerinin daha kısa olması nedeniyle FDM'nin daha fazla enerji depoladığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak piyasada satışı yapılan soğutucu şişe torbalarının buzdolabında soğutulduktan sonra soğuk tutma sürelerinin genellikle 2 saat olduğu belirtilmektedir. Ancak GR-8 kullanılarak tasarlanan soğutucu şişe torbasının buzdolabından çıkan suyu soğuk tutma süresi en az 4 saat olduğu gözlenmiştir. Ayrıca buzdolabında soğutulmuş soğutucu şişe torbasının buzu soğuk tutma performansı ise en az 4 saattir. Bu sonuçlar geliştirilen prototip soğutucu şişe torbasının piyasada satışı yapılan soğutucu şişe torbalarından hem daha ucuz hemde daha yüksek performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazar deneysel çalışmalarda verdiği destekleri için öğrencisi Cemal Tuğrul Bilgiç'e teşekkür eder. The authors would like to acknowledge author's student Cemal Tugrul Bilgic for their kind help and assistance.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aslfattahia, N., Saidur, R., Arifutzzaman, A., Sadri, R., Bimbo, N., Sabri, M. F. M., Maughan, P. A., Bouscarrat, L., Dawson, R. J., Said, S. M., Goh, B. T., Sidik, N. A. C. 2020. Experimental investigation of energy storage properties and thermal conductivity of a novel organic phase change material/MXene as A new class of nanocomposites, J. of Ener. Stor.27, 101115. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101115
- Çengel, Y., Boles, M., 2002, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Mc Graw Hill, 4. Baskı, Çeviren: Derbentli T.
- Dong, Q., Wu, J., Su, Y., Zhang, H., Wang, J. 2025. Preparation and study of high-thermal conductivity phase-change energystorage materials based on expanded graphite and pitch through high-temperature sintering, Journal of Energy Storage,114, Part A, https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115748.
- http://galeri.netfotograf.com/fotograf.asp?foto_id=398331 (Erişim Tarihi: 19.02.2025)
- https://steemit.com/ay/@arabi01/en-guezel-cicekler-ve-mutlu-bir-son (Erişim Tarihi: 19.02.2025)
- İşıker, Y., Yeşilata, B., 2017, Development of a Novel Method for Determination of Heat Conduction Coefficients of Building Materials, Harran University Journal of Engineering, 01 (2017) p.14-21.
- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., He. Biwole, P. 2017. Heat transfer study of phase change materials with graphene nano particle for thermal energy storage, Solar Energy. 146, 453–463. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.013
- Kee, S.Y., Munusamy, Y., Ong, K.S., Metselaar, H.S.C., Chee, S.Y., Lai, K.C., 2017, Thermal Performance Study of Composite Phase Change Material with Polyacrylicand Conformal Coating, Materials, 10, 873; doi:10.3390/ma10080873
- Kumar, N., Pandey, C., Chakraborty, P.R. 2025. Influence of compression ratio in compressed extended graphite on thermophysical properties of composite phase change material: An experimental investigation, Thermal Science and Engineering Progress, 57, https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103104.
- Li, M. 2013. A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity, Appl. Ener. 106, 25-30. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.031
- Liu, C., Zhang, X., Lv, P., Li, Y., Rao. Z. 2017. Experimental study on the phase change and thermal properties of paraffin/carbon materials based thermal energy storage materials, Phase Trans. 90:7, 717-731. DOI: 10.1080/01411594.2016.1277219
- Liu, P., Tan, Z., Cui, X., Zhang, Z., Fang, H., Li, H., Bian, L., Gu, X. 2025. Comparative study of different typical organic form-stable phase change materials packaged by carbonized wheat straw-expanded graphite binary supporting material, Journal of Energy Storage, 108, https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115088.
- Liu, Y., Li, M., Ma, X., Zhang, Y., Wang, Y., Li, G., Tang, R., Zhang, S., Zhao, H., Zhu, Y. 2024. Surfactant hydrophilic modification of expanded graphite to fabricate water-based composite phase change material with high latent heat for cold energy storage, Chemical Engineering Journal, 498, https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155235.
- Liu, Y., Lv, Z., Zhou, J., Cui, Z., Li, W., Yu, J., Chen, L., Wang, X., Wang, M., Liu, K., Wang, H., Ji, X., Hu, S., Li, J., Loh, X.J., Yang, H., Chen, X., Wang C. 2024. Muscle-inspired formable wood-based phase change materials, Adv. Mater., 36, 2406915, 10.1002/adma.202406915
- Liu, Z., Chung, D.D.L. 2001. Calorimetric evaluation of phase change materials for use as thermal interface materials, Thermochimica Acta. 366, 135-147.
- Magendran, S. S., Khan, F. S. A., Mubarak, N.M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., Abdullah, E.C., Nizamuddin, S., Karri, R. R. 2019. Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review, Nano-Struc. & Nano-Obj. 20, 100399. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399
- Mordor Intelligence, Thermal Energy Storage Market Size & Share Analysis Growth Trends & Forecasts (2025 2030), https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-thermal-energy-storage-market-industry (Erişim Tarihi: 19.02.2025)
- Muiruri, J.K., Bonillo, A.C., Zhang, M., Wang, P., Tomczak, N., Wu, W., Zhang, X., Wang, S., Thitsartarn, W., Ong, P.J., Yeo, J.C.C., Xu, J., Li, Z., Loh, X.J., Zhu, Q. 2024. Sustainable carbonized biomass-stabilized phase change materials for thermal energy storage, Journal of Energy Storage, 103, Part B, 114423, https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114423.
- Odoi-Yorke, F., Opoku, R., Davis, F., Obeng, G.Y. 2023. Optimisation of thermal energy storage systems incorporated with phase change materials for sustainable energy supply: A systematic review, Energy Rep., 10, 2496–2512.
- Ribezzo, A., Bergamasco, L., Morciano, M., Fasano, M., Mongibello, L., Chiavazzo, E. 2023. Experimental analysis of carbon-based Phase Change Materials composites for a fast numerical design of cold energy storage systems, Applied Thermal Engineering, 231, 120907, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120907
- Singh, P., Sharma, R., Khalid, M., Goyal, R., Sarı, A., Tyagi, V. 2022. Evaluation of carbon based-supporting materials for developing form-stable organic phase change materials for thermal energy storage: A review, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 246, 111896.
- Tucureanu V, Matei A, Avram AM., 2016, FTIR spectroscopy for carbon family study. Crit Rev Anal Chem 46(6):502–520. https://doi.org/10.1080/10408347.2016.1157013

- Wang, J., Andriamitantso, R.S., Atinafu, D.G., Gao, H., Dong, W., Wang, G. 2018. A one-step in-situ assembly strategy to construct PEG@MOG-100-Fe shape-stabilized composite phase change material with enhanced storage capacity for thermal energy storage, Chem. Phy. Lett., 695, 99-106. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.12.004
- Wang, J., Andriamitantso, R.S., Atinafu, D.G., Gao, H., Dong, W., Wang, G. 2018. A one-step in-situ assembly strategy to construct PEG@MOG-100-Fe shape-stabilized composite phase change material with enhanced storage capacity for thermal energy storage, Chem. Phy. Lett. 695, 99-106. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.12.004
- Yazıcı, M., Tiyek, İ., Ersoy, M., Alma, S., Dönmez, M.H., Yıldırım, U., Salan, U., Karataş, T., Uruş, Ş., Karteri, İ., Yıldız, K. 2016. Modifiye Hummers Yöntemiyle Grafen Oksit (GO) Sentezi ve Karakterizasyonu, Gazi Univ. J.I of Sci. GU J Sci Part C. 4(2), 41-48.
- Yu, C., Song, Y.S. 2023. Form stable phase change material supported by sensible and thermal controllable thermistor, Composites Communications, 40, 101600.
- Zhao, J., Chen, Y., Chen, M. 2025. Battery thermal management with a modified metal alloy/expanded graphite/paraffin composite phase change material, Journal of Energy Storage, 113, https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115652.
- Zhong, Y., He, X., Wang, W., Xu, Y., Wang, Y., Shuai, Y. 2025. Performance enhancement of graphite-based flexible composite phase change materials and heat dissipation characteristics of electronic devices, Applied Thermal Engineering, 263, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125393.