



## TEL ÖRGÜ KATMANLARININ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ÜZERİNDEKİ ISIL PERFORMANSI ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Mustafa Yasin GÖKASLAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Van  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-3859-8485>

### Anahtar kelimeler

### Öz

*Faz değiştiren malzeme,  
Tel örgü, ısı enerjisi  
depolama, ısı iletkenlik  
iyileştirme*

*Enerjiyi depolama, giderek önem kazanmakta olup mevcut enerjinin en uygun kullanımında önemli rol oynar. Enerjinin daha verimli kullanımları arasında ısı enerjisi depolama da yer almaktadır. Isı enerjisi depolamaya etkileyen faktörler bulunmaktadır. Bu faktörlerden bir tanesi gözenekli ortamlar olup, yüksek ısı iletim katsayısı sayesinde faz değiştiren malzemenin (FDM) ısı performanslarını etki etmektedir. Bu çalışmada, farklı katman sayılarında tel örgülerin faz değiştiren malzemenin erime hızına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney odasında tel örgüsüz ve farklı sayıda tel örgüler olması durumunda farklı deney kombinasyonları oluşturulmuştur. Bu oluşturulan deney kombinasyonlarının her biri en az üç farklı sabit ısı akısı sınır şartında incelenmiştir. Zamana bağlı yapılan deneylerde faz değiştiren malzemenin erime süreleri analiz edilmiş ve buna karşılık gelen ısıtıcı plakanın yüzey sıcaklıkları incelenmiştir. Deney odasında tel örgü olmaması durumu ile kıyaslandığında 8 katmanlı tel örgülü durumda faz değiştiren malzemenin erime süresi termokupların konumuna bağlı olarak %2 ile %24 arasında iyileşme söz konusu iken 4 katmanlı tel örgüde bu durum %16'a kadar artış göstermektedir. Gözenekli ortamın yapısı ve ısı iletim katsayısı faz değiştiren malzemenin ısı performansı, sıcaklık dağılımını ve erime süresini etkilemektedir.*

\* my.gokaslan@yyu.edu.tr  
doi : 10.46399/muhendismakina.1328933

---

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE EFFECT OF WIRE MESH LAYERS ON PHASE CHANGE MATERIAL

---

---

### Keywords

*Phase change material, wire mesh, thermal energy storage thermal conductivity enhancement*

### Abstract

*Energy storage is becoming increasingly important and plays an important role in the optimal use of available energy. Thermal energy storage is among the more efficient uses of energy. There are factors that affect thermal energy storage. One of these factors is porous media, which affects the thermal performance of phase change material (PCM) thanks to its high thermal conductivity. In this study, the effect of wire meshes with different number of layers on the melting rate of the phase change material was experimentally investigated. In the case of non-wire mesh and different numbers of wire mesh in the test chamber, different combinations of experiments were created. These experimental combinations were investigated at least three different asymmetric constant heat flux boundary conditions. In time-dependent experiments, the melting times of the phase-change material were analyzed and the corresponding heater plate surface temperatures were investigated. Compared to the absence of wire mesh in the test chamber, the melting time of the phase-change material in the case of 8-layer wire mesh improves between 2% and 24% depending on the position of the thermocouples, while this situation is up to 16% in the case of 4-layer wire mesh. The structure of the porous medium and the thermal conductivity coefficient affect the thermal storage performance, temperature distribution and melting time of the phase change material.*

---

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 18.07.2023

Kabul Tarihi : 27.11.2023

Research Article

Submission Date : 18.07.2023

Accepted Date : 27.11.2023

---

## **Extended Abstract**

### **Introduction**

Energy production and storage have importance role in the economies of countries. The limited use of fossil-based energies, environmental degradation effects and increasing energy demand have led countries to shift their interest in renewable energy sources. However, it is obvious that fossil fuels will continue to be used for a while, since most power generation facilities are powered by non-renewable energy sources. In this regards, energy efficiency should be increased and energy losses should be minimized. In this situation in mind, energy storage is a key consideration and is very promising. Energy storage; it is based on the principle of storing a certain part of the waste energy and using it as reinforcement in cases where the energy source is limited. Energy storage is more challenging than current technology, but it has been studied for many years. There are various types of energy storage methods such as mechanical energy, chemical energy, thermal energy and electrical energy. Heat storage plays a key role in preventing the increasing world temperature, as it is a way of minimizing both the energy cost and the bad effects on the environment in the most effective use of available energy. Heat energy can be stored and can be used for battery technology, space heating, hot water heating, cooling and air conditioning, etc. preferred in applications. Heat storage has gained significant importance reduce emissions and energy is recovered.

### **Objectives**

In the case of placing a material with a high thermal conductivity coefficient in the phase change material, its effect on the melting time was investigated. The effect of different numbers of wire mesh layers, which can be found in abundance and cheap in the market, on the melting time was investigated experimentally. The formed wire mesh layers are formed by stacking 4 or 8 wire mesh cages on top of each other. The effect of the wire mesh in the experimental setup on the thermal performance of the phase change material was investigated. The structure of the wire mesh, number of layers and thermal conductivity were investigated how they affect the thermal performance, temperature distribution and melting time.

### **Methods**

Energy storage is important as energy resources are limited and decreasing in our country and in the world. Thanks to energy storage, unused energy is stored and the energy is ready to be used whenever and wherever desired. In this study, thermal storage, one of the energy storage methods is tackled. Paraffin wax was used as phase change material. Experiments were made in three different combinations which was non-wire mesh, 4-wire layer wire mesh and 8-layer wire mesh. Paraffin wax was placed in the test chamber made of glass with dimensions of 5x5x10 cm and the surroundings of the test chamber were thermally insulated. The heater is below the test chamber. For each combination, three different constant asymmetric heat flux boundary conditions were applied. The heater surface temperature, phase change material temperature and ambient temperature were measured simultaneously over time. The temperature distributions of the phase change material over time were obtained. Also, the mushy regions were determined.

## **Results**

For all three test chambers with and without wire mesh, the thermal power supplied from the DC power supply increases while the melting time decreases. Compared to the non-wire mesh, the wire mesh took the time required to melt approximately the same amount of paraffin wax depending on the thermal power, and an improvement of 1.9-12% in the 4-layer wire mesh and 2.2-24% in the 8-layer wire mesh was achieved. Less heat power will be needed to melt the layered wire mesh. During the melting process, the temperature with wire mesh are lower than the temperature profile of the test chambers without wire mesh. Wire mesh has a remarkable effect on the mesh zone time of the wire mesh media, as it increases the thermal penetration due to the high heat conductivity coefficient of the wire mesh. It has been determined that the heat transfer in the wire-mesh is more homogeneous than in the non-wire domain.

## **Discussion and Conclusions**

Paraffin is mostly used in heat storage applications. However, due to its low thermal conductivity, paraffin has a long thermal energy storage time. In this experimental study, it has been investigated how much this disadvantage of paraffin with low thermal conductivity can be eliminated by placing a material with a high thermal conductivity coefficient inside the test chamber. Wire meshes, which are available in the market and cheap, have had a positive effect on thermal storage. Placing wire mesh inside the test chamber is not have an effect on additional power consumption, and using materials with high heat conductivity coefficient in phase change materials will have a positive effect on the melting time. In addition, a perfect contact is needed to reduce the contact resistance in the layers between the wire meshes. It can be done by welding or brazing process to minimize contact resistance and it is predicted that the melting times of wire-mesh domains will be even shorter.

## 1. Giriş

Enerjinin üretilmesi ve depolanması ülkelerin ekonomilerinde giderek öneme sahip olmaya başlamıştır. Fosil kaynaklı enerjilerin sınırlı olması, çevresel bozulma etkileri ve artan enerji ihtiyacı, ülkelerin dikkatlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına kaymasına neden olmuştur. Ülkeler enerji ihtiyaçlarını bir kısmını yenilenebilir enerji kaynaklarından üretmeye başlasa da enerji ihtiyaçlarının büyük bir kısmını fosil kaynaklı enerjilerden karşılamaktadırlar. Fosil kaynaklı enerjiler bir süre daha ana enerji kaynağı olarak süreceği öngörülmektedir. Fakat fosil kaynaklı enerjilerin, enerji güvenliği ve sürdürülebilirliği konusunda hala problemler söz konusudur. Bu yüzden ülkeler enerji konusunda dışa bağımlılığını azaltma çalışmalarını sürdürmektedir. Tüketilen enerjiyi etkin kullanma açısından, sistemlerin enerji ekserji analizleri yapılmakta, ısı ve mekanik enerjinin birlikte üretildiği kojenerasyon tesislere ve enerji depolanması gibi uygulamalara önem artmaktadır. Enerji depolama hem enerji maliyetini hem de çevreye olan kötü etkilerini en aza indirmenin bir yoludur. Bu sayede artan dünya sıcaklığının önlenmesinde rol oynamaktadır. Enerji depolama yöntemleri olarak mekanik enerji, kimyasal enerji, ısı enerji ve elektriksel enerji çeşitleri olup, bu çalışma kapsamında ısı enerji depolama yöntemi ele alınmıştır. Isıl enerji depolama daha çok ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde uygulamalarda tercih edilmektedir (Kozak ve Kozak, 2012).

(Chibani, Merouani ve Bougriou, 2022) metal hidritte enerji depolanmasının (erime/katılaşma) üzerine yaptığı çalışmada, gözeneklilik oranlarının değişmesi ve farklı iletkenliğe sahip metal hidritlerin kullanılması depoladıkları enerjiyi etkilediğini göstermişlerdir. Tüplerin buldukları pozisyona ve ısı iletkenliklerine bağlı olarak bakır ve alüminyum metal hidritlerde daha hızlı katılaşma meydana gelmiştir. (Duan, 2021a) fotovoltaiik güneş panellerin ürettiği elektrik verimliliğini arttırmak için tasarladığı çalışmada, fotovoltaiik panelleri soğutmak için faz değiştiren malzeme ve gözenek ortam kullanarak yeni bir sistem incelenmiştir. Faz değiştiren malzeme ile metal köpük aynı zamanda bulunduğu durum sadece panelin arkasında faz değiştiren malzeme olması durumuna göre paneli soğutmada daha etkili olduğu ve metal köpüğün erimeyi hızlandırdığını ifade etmiştir. Gözenekliliğin azalmasıyla sistemdeki elektrik veriminin arttığı gösterilmiştir. (Duan, 2021b) aynı yıl yaptığı diğer çalışmada ise yine fotovoltaiik panellerin elektrik verimliliğini arttırmaya yönelik olup, panel açısını ve faz değiştiren malzemeyi değiştirmiştir. Eğim açısı doğal taşınımı azaltarak erimeyi olumsuz etkilemiştir. Çevre dostu ve ucuz olduğu için faz değiştiren malzeme olarak Hindistan cevizi yağı kullanmıştır. Eğim açısı gözeneklilik oranı azaldıkça sistemi olumsuz olarak etkilemiştir. (Li, Qu, Zhang, Zhao ve Tao., 2013) gözenekli ortamda faz değiştiren malzeme ve elyaf keçeyi aynı anda kullanarak ısı geçişi yüzey sıcaklığı ile erime/katılaşmaya etkisini incelemişlerdir. Elyaf keçe ve gözeneklilik oranındaki artış eriyen faz değiştiren malzemenin doğal taşınımı ısı geçişini arttırmıştır. Fakat

oluşturulan bu kompozitin ısı iletkenliğini azaltmıştır. Elyaf keçenin çapı arttıkça yüzey sıcaklığı da arttığı belirlenmiştir. (Mashayekhi, Housfer ve Ashiaee., 2020) aktif ve pasif yöntemleri birleştiren yeni bir ısı yönetim sistemi (hibrit) ile lityum iyon pillerinin ısı tepkisini deneysel incelemişlerdir. Aktif yöntem olarak soğutucu akışkan içeren Al mini kanal, pasif yöntem olarak ise gözenekli bakır metal köpük seçilmiştir. Aktif yöntemde yüksek ısı üretiminde pil sıcaklığını kontrol altına almada etkisiz olduğunu bulmuşlardır. Hibrit sistem aktif ve pasif yöntemlerden daha iyi ve verimli performans gösterdiği kanıtlamışlardır. Nano-akışkan eklenmesiyle ısı iletkenlik artmıştır ve bu da pilin etrafında daha fazla taşınma neden olup pil sıcaklığını azaltarak güvenlik sağlamıştır. (Akyurek ve Yoladi, 2021) mini kanallı ısı değiştiricilerde faz değiştiren malzeme kullanarak erime/katılma analizini yapmışlardır. Mini kanal çapı arttıkça enerji depolama arttığını, Akışkan giriş sıcaklığının erime ve katılma üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, akışkan hızının erime de etkisiz olduğunu, erimenin katılmadan daha hızlı gerçekleştiğini ve eşit şekilde artan mini kanal çapına rağmen yüzey hava arasında ısı geçişinin logaritmik olarak arttığını ifade etmişlerdir.

(Juaifer, Avani ve Poursadegh, 2020) parafin mumu kullanarak plakalı ısı değiştiricisi üzerine hem sayısal hem de deneysel bir çalışma yapmışlardır. Üç farklı akışkan giriş sıcaklığı ve üç farklı debide elde ettikleri sonuçlar analiz edilip kıyaslamışlardır. Akışkan sıcaklığının artmasıyla ısı geçiş miktarının arttığı ve erime süresinin %37 oranlarında azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca akışkan debisinin artmasıyla erime süresini de etkilediği yaklaşık %0.9 oranında düşürdüğü ortaya çıkarmışlardır. (Albaldawi, Shyaa ve Hammendy, 2015) faz değiştiren malzemenin ısı iletkenliğini arttırmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda, parafin mumun içerisine bakır halkalar yerleştirmişlerdir. İki farklı çaptaki halkaların deney odasındaki kapladığı farklı hacimlerde deneylerini gerçekleştirmişlerdir. En yüksek hacim yüzdesinin, halkasız durumla (boş) kıyasla hem faz değiştiren malzeme bölümünde hem de hava bölümünde erime süresinin azaldığını ve ısı geçişini yüksek seviyeye çıkardığını ifade etmişlerdir. Fakat bu deney odasındaki halkaların etkisinin katılma süresi üzerinde daha düşük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. (Mustaffar, Harvey ve Reay, 2015) beş katmanlı telden oluşturdukları ve %90 gözenekliliğe sahip malzemeleri tel kolonlarla birleştirerek test odasını oluşturmuşlardır. Faz değiştiren malzeme olarak tuz hidrat kullanmışlardır. Bu beş katmanlı test odasının erime süresini %14 azalttığını katmanlar arasını lehimle gibi daha temas direnci en aza indirildiğinde bu sürenin daha da azalabileceğini ifade etmişlerdir. (Opolot, Zhao, Keane, Liu, Mancin, Bruno ve Hoo-man, 2023) paslanmaz tel örgü kullanarak ısı geçişini arttırmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Deneysel sonuçlarında, faz değiştiren malzemenin tankına gevşek bir şekilde sarılmış periyodik bir yapı yerleştirmenin ısı geçişini iyileştirdiğini ve katılma sürecini kısalttığını göstermişlerdir. Bu tel örgünün performansın yaklaşık %10 oranında iyileştirdiği ifade etmişlerdir. Akışkan debileri artması ile

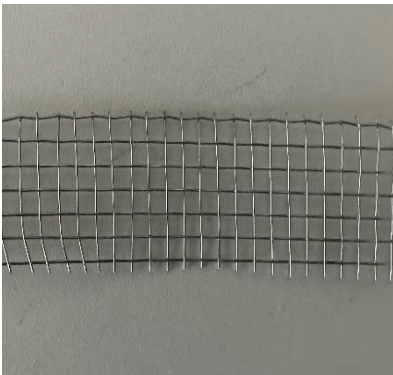
de deşarj sürelerinde kısalma söz konusu olduğunu göstermişlerdir. (Ebadi, Tasnim, Aliabadi ve Mahmud, 2020) yaptıkları çalışmada silindirik şekilde bir gizli ısı enerji depolama sistemi içine iki farklı gözeneklilik değerinde bakır tel örgü eklenmesinin ısı performansına etkisini araştırmışlardır. Bu tel örgünün eritme işlemi sırasında depolanan ısı akışı, Nusselt sayısı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Erime sürelerinde %17 ile %24 arasında iyileşme olduğunu ve Nusselt sayısı korelasyonu sunmuşlardır.

Bu çalışmada, piyasada bol miktarda ve uygun fiyata bulunabilen farklı sayıda tel örgü katmanlarının erime süresine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Oluşturulan tel örgü katmanlar yatay olarak 4 ve 8 adet tel örgü kafesin üst üste konulmasından oluşmaktadır. Deneyler üç farklı kombinasyonda yapılmış olup deney odasının tel örgüsüz (boş), 4 tel örgü katmanlı ve 8 katmanlı tel örgü katmanlı olması durumunda yapılmıştır. Her deney kombinasyonu için en az üç farklı sabit ısı akışı sınır şartlarında ve asimetric ısıtma (sadece alttan) olması durumunda faz değiştiren malzemelerin erime süreleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney odasının boş ve farklı katmanlarda bulunan tel örgülerin faz değiştiren malzemenin ısı performansına etkisi incelenmiştir. Tel örgü katmanlarının sayısı sıcaklık dağılımını ve erime süresini nasıl etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca her bir deney kombinasyonu için lapa bölgeleri ve erime süreleri de belirlenmiştir.

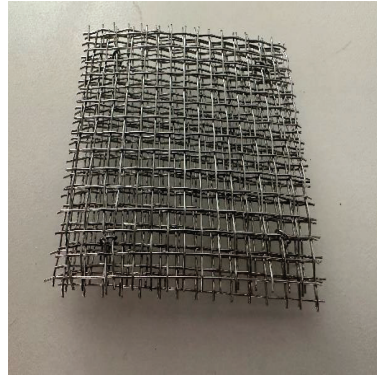
## 2. Deney Düzeneięi

### 2.1 Test Örneği (Tel örgü)

Tel örgü olarak paslanmaz çelik (AISI 304) tel örgü kullanılmıştır. Süzgeç şeklinde olan bu tel örgünün tel çapı 0.65 mm'dir. Tel örgünün 1 cm<sup>2</sup>'de delik adedi 9.61 adettir. Deneysel çalışmada, deney odasında kullanılan tel örgülerin görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 1. Test Örneęinde Kullanılan Tel Örgüler a) 1 Katmanlı, b) 4 Katmanlı

Katmanlı tel örgüler yatay olarak üst üste konulmak üzere 4 ve 8 katmandan oluşmaktadır. Her bir tel örgü katmanının boyutları 50x50 mm'dir. Oluşturulan bu tel örgü katmanların gözenekliliğini Denklem (1)'de gösterildiği gibi hesaplamak mümkündür.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_k}{V_t} \quad (1)$$

Burada  $\varepsilon$ , gözenekliliği,  $V_k$  katı hacmi ve  $V_t$  ise toplam hacmi ifade etmektedir. 5x5 cm boyutlarında 4 katmanlı tel örgü numuneleri üretilmiş, 8 katmanlı elde etmek için 2 tane 4 katmanlı tel örgü üst üste konulmuştur. Bu tel örgü katmanlarının gözeneklilik değerini belirlemek için 10 tane yapılmış 4 katmanlı tel örgüleri kapalı kapta bulunan suya atılmış ve suyun yer değiştirdiği hacim katı hacme eşit kabul edilmiştir. 4 katmanlı tel örgülerin gözenekliliği yaklaşık %94 olarak hesaplanmıştır.

## 2.2 Faz Değiştiren Malzeme (FDM)

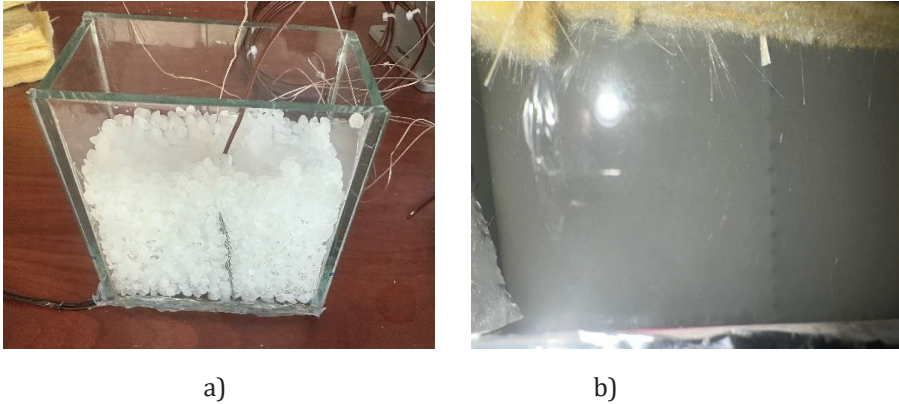
Faz değiştiren malzemeler, belirli bir sıcaklıkta katı ve sıvı halde olan ısıl enerji depolayabilen malzemelerdir. FDM katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya doğru hal değiştirdiklerinde ısı emilir veya salınır. FDM genel olarak inorganik ve organik olarak ayrılabilir. Yaygın olarak kullanılan FDM, parafinler (organik), tuz hidratları (inorganik) ve yağ asitleri (organik) örnek verilebilir (Kahwaji ve White, 2021). Deneysel çalışmada düşük maliyet, kolay tedarik ve ısıtıcının çalışma sıcaklıklarına karşılık gelen erime sıcaklıkları gibi başlıca sebeplerden faz değiştiren malzeme olarak Parafin mumu kullanılmıştır. Parafin mumunun, termodinamik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Erime sıcaklığı 56 ile 58 °C arasında değişmektedir. Ayrıca katı hal ve sıvı halde olmasına bağlı olarak bazı termodinamik özellikleride değişkenlik göstermektedir.

Tablo 1. Parafin mum malzemesinin özellikleri (Gasia, Miro, Gracia, Barreneche ve Cabeza, 2016)

Özellikler	Değerler
Erime noktası (°C)	53-59
Gizli ısı (kJ/kg)	160
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	880 (15°C, katı hal) 770 (80°C, sıvı hal)
Özgül ısı k(J/kgK)	2000
Isı İletim katsayısı (W/mK)	0.2 (katı ve sıvı hal)
Hacimsel genişleme (%)	12.5
En yüksek çalışma sıcaklığı (°C)	80



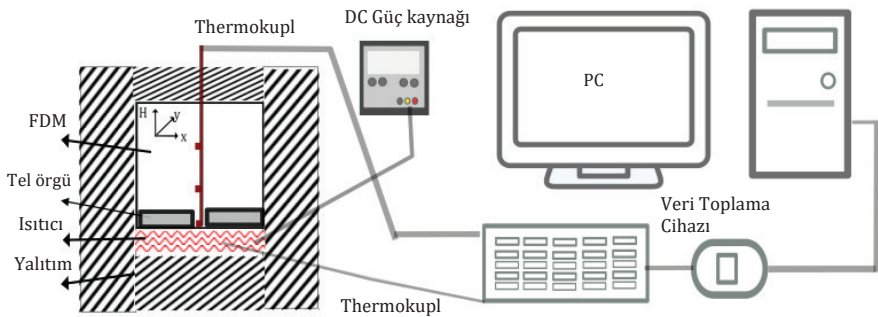
Parafin mumu boncuk şeklinde katı olarak temin edilmiştir. Deneylerden önce öğütme makinesi kullanarak parafin mumu toz haline getirilmiştir. Daha sonra deneylere hazır olması ve tüm deneylerde aynı şartlar sağlanabilmesi için parafin mumu eritilmiş ve tekrar katı hale gelmesi sağlanmıştır. Bu işlemlere ait görseller sırasıyla Şekil 2 a) ve b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Faz Değiştiren Malzeme; a) Boncuk Şekli, b) Eritilerek Deneye Hazırlanmış Hali

### 2.3 Deney Düzenegi

Deney düzeneginin şematik çizimi Şekil 3'te verilmiştir. Bu deney tesisatı faz değiştiren malzeme içerisinde tel örgü bulunması halinde erime süresinin etkisini araştırmak için tasarlanmıştır. FDM olarak Parafin mumu kullanılmıştır.



Şekil 3. Deney düzenegi

Deney düzenegi iki bölümden oluşmaktadır. Şekil 3'te gösterilen şematik çizimde sol taraf deney (test) odası sağ taraf ise kontrol ünitesidir. Deney odası bölümünde test örneği (FDM ve tel örgü katmanları), ısıtıcı, akışkan ve yüzey termokupl-

ları ve yalıtımdan oluşurken, kontrol ünitesi DC güç kaynağı, veri toplama cihazı ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Deney odası 5x5x10 cm ölçülerindedir. Deney odasının en altında 150 W gücünde film (esnek) ısıtıcı bulunmaktadır. Isıtıcı boyutları 5x10 cm olup deney odasına silikon aracılığıyla sabitlenmiş ve sızdırmazlığı sağlanmıştır. Deney odasının yan duvarları 1 cm kalınlığında camdan yapılmıştır. Isıtıcı, DC güç kaynağına (Marxlow, PS-305D, Çin) bağlıdır. Farklı ısı akıları uygulanarak deney boyunca sabit bir ısı akısı elde edilmesi amaçlanmıştır. 2090, 2464 ve 3185 W/m<sup>2</sup> olmak üzere her bir deney kombinasyonuna uygulanmıştır. Deney odasının alt kısmı, yan duvarları ve üst yüzeyleri taş yünü ile kaplanmıştır. Böylece deney odasına uygulanan ısı akısının çevreye kaybının önlenmesi ve deney odasına doğru geçmesi amaçlanmıştır.

Deney düzeneğinde K tipi (Omega, TT-K-30-SLE, USA) termokupl teli kullanılmıştır. Deney başlangıcından itibaren her 60 saniye bir sıcaklık verisi alınmıştır. Yüzey ve faz değiştiren malzemelerinde sıcaklığını ölçmek için kullanılan termokupulların konumları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Termokupl Konumları

Yüzey Sıcaklığı	Konum (X/Y) [mm]	Faz Değiştiren Malzeme sıcaklığı	Yükseklik (H) [mm]
T <sub>s1</sub>	0/25	T <sub>fdm1</sub>	0
T <sub>s2</sub>	20/25	T <sub>fdm2</sub>	20
T <sub>s3</sub>	40/25	T <sub>fdm3</sub>	40
T <sub>s4</sub>	60/25		
T <sub>s5</sub>	80/25		
T <sub>s6</sub>	100/25		

Yüzey sıcaklıkları ısıtıcı plakanın tam ortasından soldan sağa doğru yatay olarak 0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm ve 100 mm olmak üzere altı farklı noktadan ölçülmüştür. Faz değiştiren malzemedan ise en alt (0 mm), 20 mm ve 40 mm yükseklikten olmak üzere üç farklı konumdan faz değiştiren malzemenin sıcaklığı ölçülmüştür.

Deneyler yaklaşık oda sıcaklığında başlatılmış ve deney odasındaki parafinin tam erimesine kadar devam edilmiştir. Deney odası alttan ısıtılmış (asimetrik ısı akısı) yan yüzeyleri ve üst yüzeyi ısı olarak yalıtılmıştır. Deney odasının boş (tel-siz), 4 ve 8 katmanlı tel örgülerden oluşması durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ve parafin erime süresi deneysel olarak incelenmiştir.

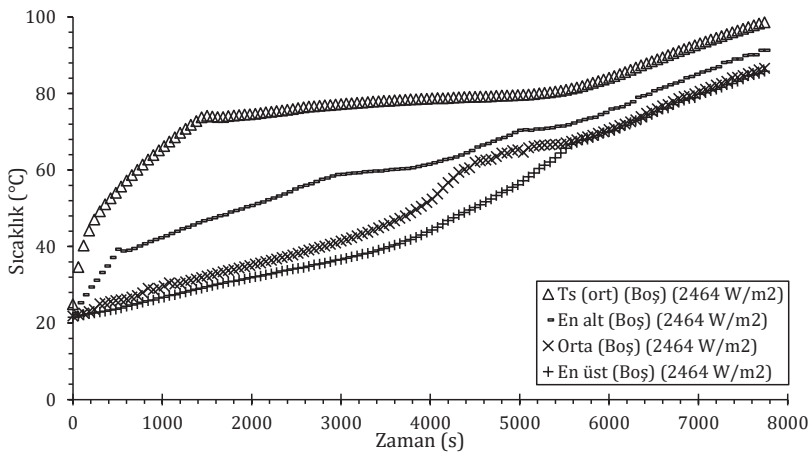
Deneysel çalışmalarda belirsizlik analizi, ölçüm cihazlarının belirsizliği dikkate

alınmalıdır. Bu ölçülen değerlerin kullanıldığı denklemlerden kaynaklanan belirsizlikler de vardır. Bu belirsizliklerin sonuçlara eklenmesi, sunulacak denklemin güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Termokupl belirsizliği 1.1 °C'dir. DC güç kaynağının belirsizliği ise okunan voltaj değerinin %0.01 okunan amper değerinin ise %0.02'sidir.

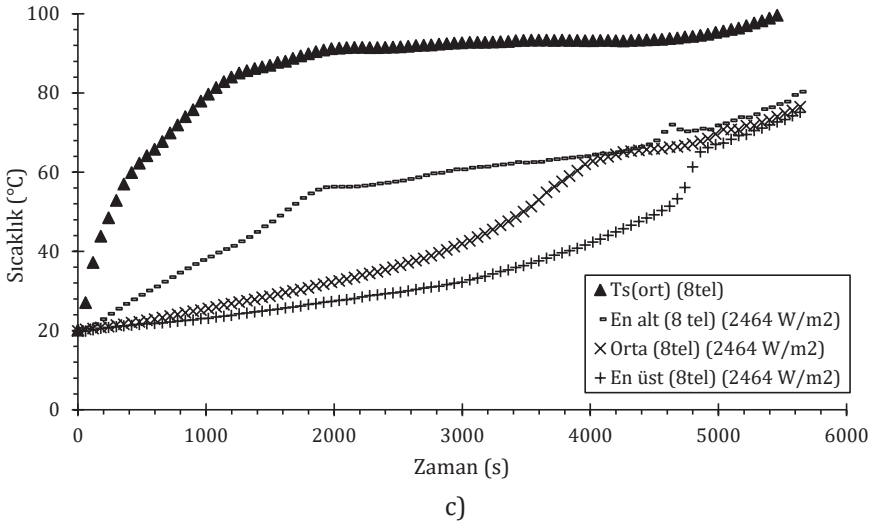
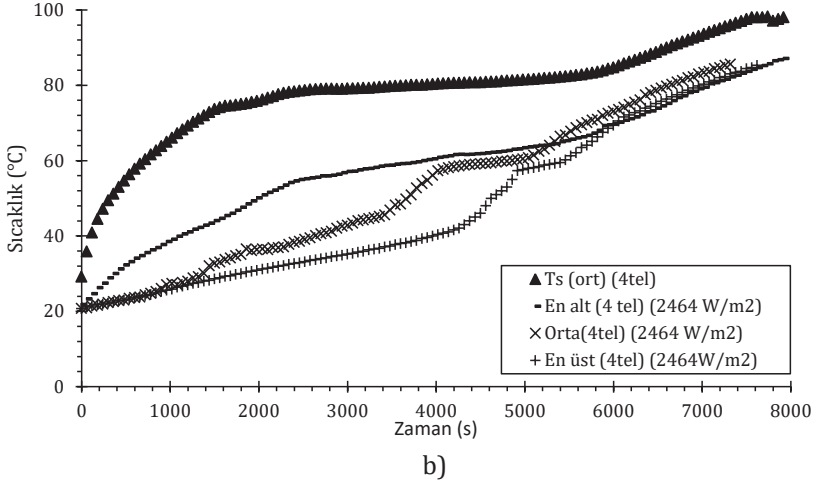
### 3. Deneysel Sonuçları

Deneysel olarak faz değiştiren malzemesi olarak parafin mumu kullanılmış olup teknik bilgileri Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel odasının içerisine 175 g. ağırlığında yarım küre şeklinde olan parafin mumu öğütücünden geçirilerek toz halde yerleştirilmiştir. Parafin mumu ısıtılarak sıvı forma gelmesi sağlanmış ve daha sonra soğumaya bırakarak tekrar katı hale gelmesi beklenmiştir. Böylece her deneyde aynı başlangıç koşulu sağlanmıştır. Deneyler, deneysel odasının altından sabit ısı akısı uygulanarak ve deneysel odasının yan yüzeyleri ısı olarak yalıtılarak yapılmıştır. Asimetrik sınır koşulunun uygulandığı bu çalışmada parafin mumun erime süresinin farklı katmanda bulunan tel örgülerle değişimi incelenmiştir.

Deneysel odasının içerisinde bulunan parafin mumun 3 farklı yükseklikten sıcaklığı, 6 farklı noktadan yüzey sıcaklığı ve 1 adet ortam sıcaklığı olmak üzere 10 farklı konumdan sıcaklıklar ölçülmüştür. Deneyler ortam sıcaklığında başlatılmış ve deneysel odasında bulunan parafin mumun tamamı eriyene kadar devam edilmiştir. Deneysel tesisatının ve parafin mumun yapısı zarar görmemesi için FDM'nin sıcaklığının 80 °C'ye geçmemesine dikkat edilmiştir. Ayrıca parafin mumun en yüksek operasyon sıcaklığına çıkılmamasına özen gösterilmiştir. Böylece faz değiştiren malzemesinin yapısında bozulmalardan kaçınılmıştır.



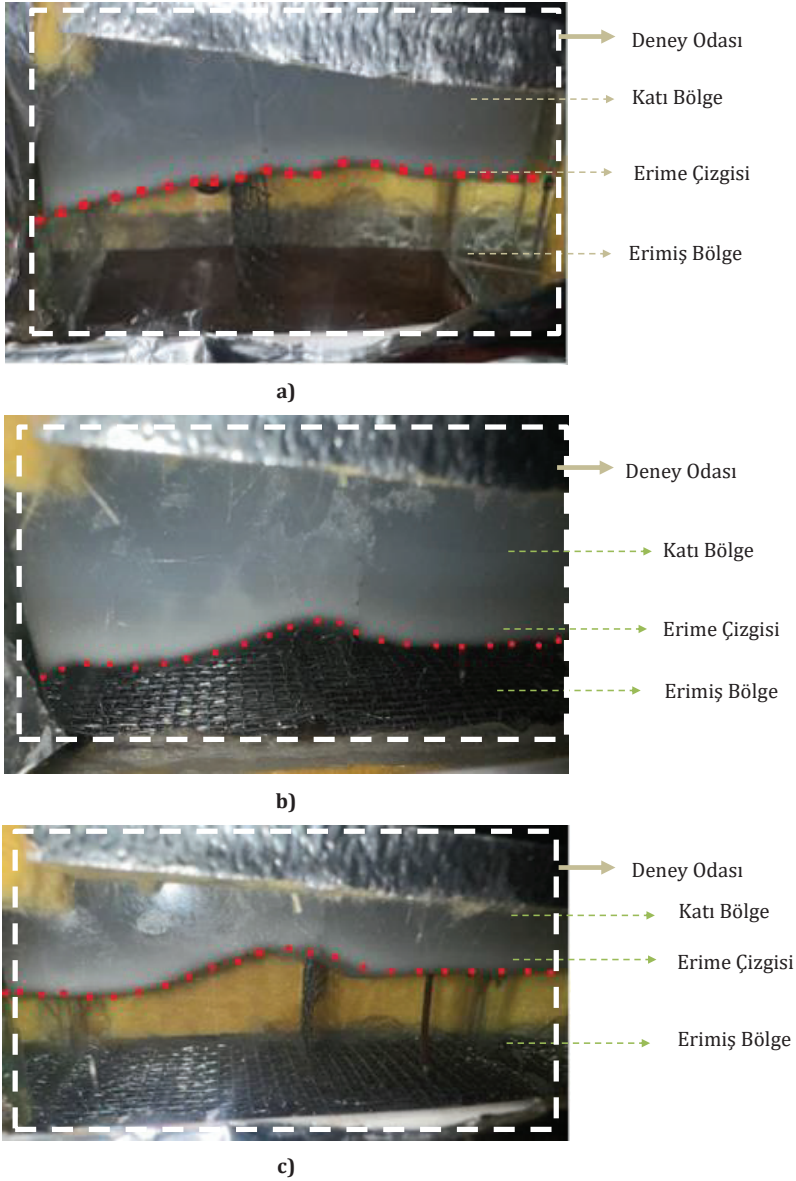
a)



Şekil 4. Faz Değiştiren Malzeme Erime Sıcaklığının Süre ile İlişkisi a) Tel Örgüsüz b) 4 Katmanlı Tel Örgülü c) 8 Katmanlı Tel Örgülü

Şekil 4'te, ısıtıcının üst kısmının boş (Şekil 4a), 4 katmanlı (Şekil 4b) 8 katmanlı (Şekil 4c) olduğu durumlar için yapılan deneylerde parafin ve yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir. Her üç deney kombinasyonunda hemen hemen aynı grafik eğilimi yakalansa da erime için geçen süreler farklıdır. Erime-nin başlaması için aktarılan gerekli enerji miktarı yüzey sıcaklığına bakıldığında 1400 saniyelerde başladığı görülmektedir. Parafin içinden ölçülen sıcaklıklarda

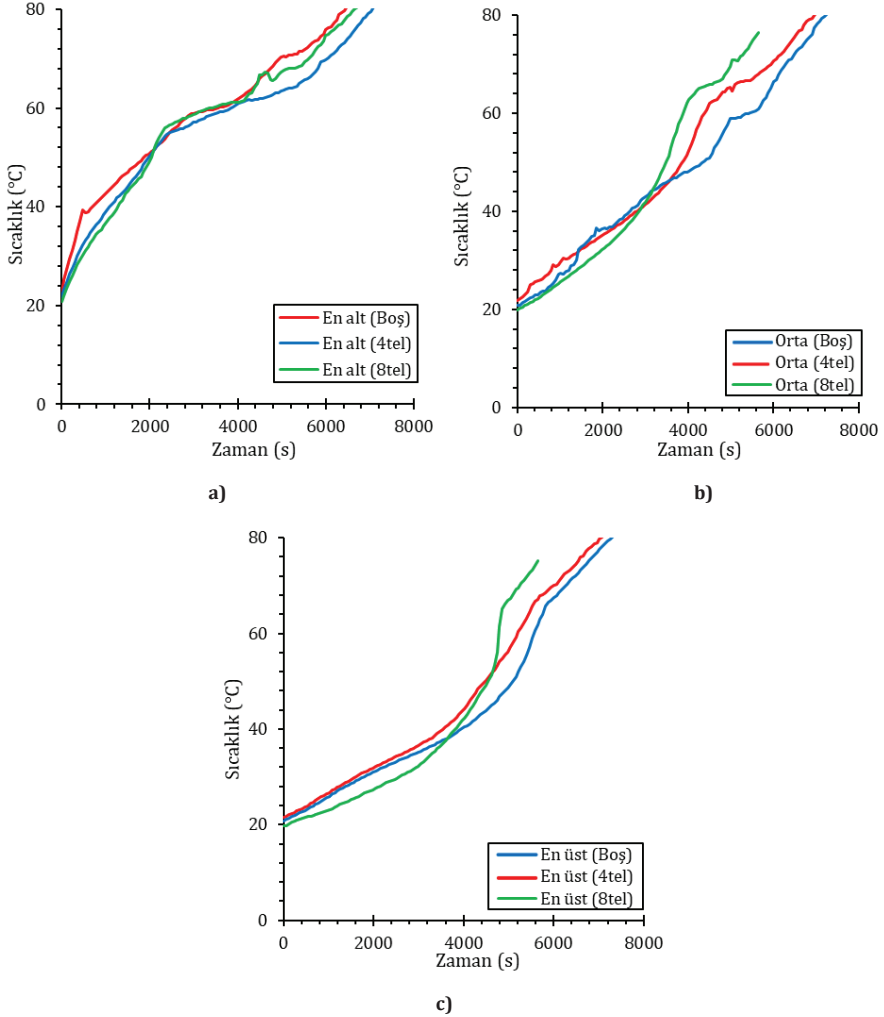
ise alttan ısıtma olduğu için erime alt noktalardan başlamış ve üst noktalara doğru ilerlemiştir. Isıtıcının üzerinin boş olma durumunda parafin ilk 3000. saniyede erimeye başlamış, ortasının erimesi 4500. saniye, tamamen erimesi ise 5640. saniyede gerçekleşmiştir. Isıtıcının üzerinde 4 katmanlı tel olma durumunda ise



Şekil 5. Farklı Deney Kombinasyonlarında ve Sürelerinde Deney Odalarının Görüntüsü a) Telsiz, b) 4 Katmanlı Tel Örgü, c) 8 Katmanlı Tel Örgü

parafin 2520. saniye erimeye başlamış orta noktası 4800. saniye ve parafinin tamamen erimesi ise 5400. saniye de gerçekleşmiştir. Isıtıcın üzerinde 8 katmanlı tel olması durumunda parafin 1920. saniye de orta noktası 3960. saniye de ve tamamen erimesi ise 4860. saniye de gerçekleşmiştir. Isıtıcıya tel örgü katmanlarının eklenmesi, iletimle olan ısı geçişini arttırmakta ve parafinin erime süresini kısaltmaktadır.

Şekil 5'te deney odasının tel örgüsü ve tel örgülü olması durumunda erime görüntüleri verilmiştir. Erime ısıtıcının bulunduğu alt noktalardan başlamış hemen



Şekil 6. 3185 W/m<sup>2</sup> Isıtıcı Gücünde Katmanlı Tel Örgü İle Boş Deney Odalarının Erime Sürelerinin Karşılaştırılması a) Tel Örgüsüz, b) 4 Katmanlı Tel Örgü, c) 8 Katmanlı Tel Örgü

hemen düzgün ve homojen olarak üst yüzeye doğru ilerlemiştir. Parafinin ısı iletim katsayısının düşük olmasından dolayı içerisine yerleştirilen paslanmaz çelik tellerin ısı iletim katsayılarının yüksek olması sebebiyle üst yüzeylere doğru erime daha hızlı gerçekleşmiştir. Sıcaklık artış eğimleri, deney odasının üstünden doğal taşınım etkisi nedeniyle beklendiği gibi, en üst noktadan en alt noktaya doğru azalmaktadır. Burada orta ve en üst noktadaki sıcaklıklar birbirine yakın profil seyrettiği görülmektedir.

Şekil 6'da aynı ısı akılarında parafinin erime süresinin deney odasının tel örgülü ve tel örgüsüz olması durumundaki karşılaştırılma verilmiştir. Şekil 6'da verilen grafikte 8 katmanlı tel örgünün erime süreni kısalttığı ve katman sayısı azaldıkça erime süresi arttığı görülmektedir. Parafinin en alt sıcaklığı için 4 katmanlı telde %12, 8 katmanlı tel örgü de ise %24 erime süresinde kısalma söz konusudur.

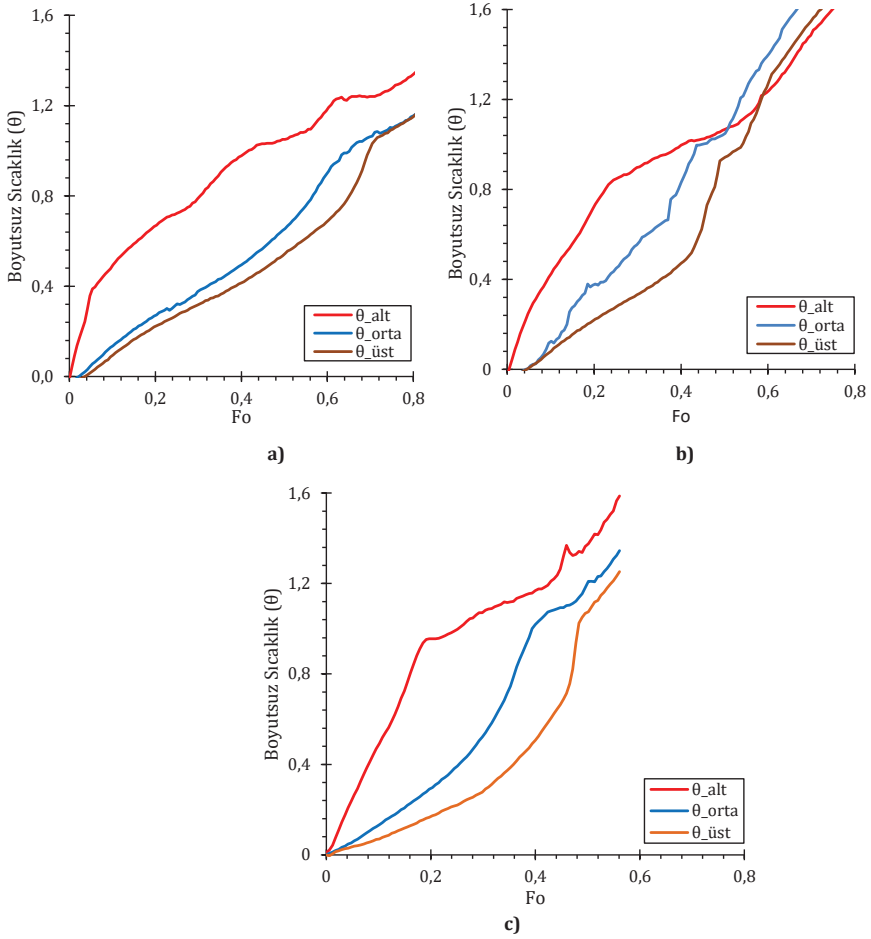
Aynı durum orta noktadan ölçülen parafin sıcaklığı için ise 4 katmanlı da %3.2 iken, 8 katmanlı tel örgü de %5.4 iyileşme söz konusudur. Parafinin en üstünden ölçülen sıcaklık başka bir deyişle parafinin tamamen erimesi durumunda 4 katmanlı tel örgü de %3.2, 8 katmanlı tel örgü de %5 iyileşme söz konusudur. Faz değiştiren malzemesinin içerisine tel örgü yerleştirmek ilave elektrik tüketimine, ısı kaybına vb. olumsuz durumlara sebep olmamaktadır. Dolayısıyla faz değiştiren malzemenin içerisine gözenekli ortam yerleştirmek ilave güç gerektirmeksizin parafinin daha hızlı erimesi sağlanmıştır. Erimenin etkisi boyutsuz parametreler kullanılarak da belirlenebilir. Bu kapsamda ilk olarak boyutsuz sıcaklık parametresini Denklem 2'de verildiği gibi hesaplamak mümkündür (Ray, Rakshit, Ravi Kumar ve Gurgenci, 2021).

$$\theta = \frac{T(t) - T_i}{T_m - T_i} \quad (2)$$

Burada,  $T$  (°C) herhangi bir zamandaki sıcaklık,  $T_i$  (°C) deneye başlangıç sıcaklığı,  $T_m$  (°C) parafinin erime sıcaklığını ifade etmektedir. Fourier sayısı ise Denklem (3)'te gösterildiği gibi hesaplanabilir (Ostrogorsky ve Glicksman, 2015; Ghasemi, Hoseinzadeh ve Memon, 2022).

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_s^2} \quad (3)$$

Burada,  $\alpha$  ( $m^2/s$ ) ısı yayılma katsayısı,  $t$ (s) zamanı ve  $L_s$  (m) ise karakteristik uzunluğu ifade etmektedir. Karakteristik uzunluk, hacmin ( $m^3$ ) alana ( $m^2$ ) bölünmesiyle elde edilir.



Şekil 7. 2464 W/m<sup>2</sup> Isıtıcı Gücünde Boyutsuz Sıcaklığının Fourier Sayısıyla İlişkisi a) Tel Örgüsüz, b) 4 Katmanlı Tel Örgü, c) 8 Katmanlı Tel Örgü

Şekil 7’de katmanlı tel örgülü ve örgüsüz test odalarında erime sürelerinin boyutsuz sıcaklık ve Fourier sayısı arasındaki ilişkisi verilmiştir. Deney odaları karşılaştırıldığında, ısıtıcı yakın faz değiştiren malzemesinin alt kısmında bulunan termokuplda ölçülen sıcaklıktan erime daha erken sürede olurken ısıtıcıdan uzakta olan üst kısımdan termokupldan ölçülen sıcaklığa göre erimesi süresinin daha geç olduğu görülmektedir. Denklem (2)’de verilen boyutsuz sıcaklık denkleminde faz değiştiren malzeme erime sıcaklığına ulaştığında boyutsuz sıcaklık bire eşit olacaktır. Dolayısıyla  $\theta=1$  değerinden sonra o bölge faz değiştiren malzeme tamamen sıvı haldedir. Şekil 7’de katı halden sıvı hale geçiş ( $\theta=1$ ) belirgin bir şekilde görülmektedir. Isıtıcı çalıştırılıp, ısı geçişi başladığında, katı fazdaki



belirli bir faz değiştiren malzeme kütlesi, enerji kaynağına daha yakın olan daha yüksek enerjiye sahip bitişik faz değiştiren malzemesi kütlesinden ısı alır.

Tablo 3. Farklı Deney Odalarında Bulunan Faz Değiştiren Malzemenin Erime Süreleri

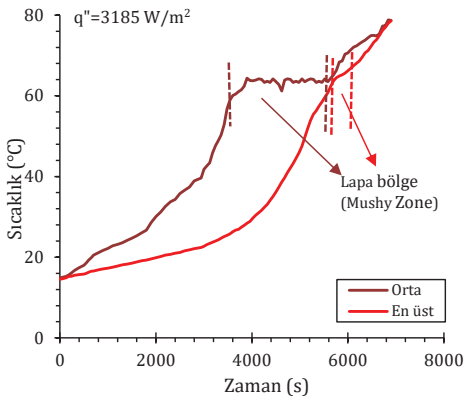
	2090 W/m <sup>2</sup>				2464 W/m <sup>2</sup>			3185 W/m <sup>2</sup>	
	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst
4 katmanlı tel örgü (%)	-1,4	1,9	1,5	12,0	3,2	2,8		11,2	6,8
8 katmanlı tel örgü (%)	18,9	8,5	2,2	24,0	5,4	5,0		18,5	9,1

Tablo 3'te deney odasında tel örgüsüz ve farklı katman sayısındaki tel örgülerin içerisinde bulunan parafin mumun erime süreleri verilmiştir. 3185 W/m<sup>2</sup> ısı akısında tel örgüsüz deney çalışmasında deney odasının en alt kısmında bulunan termokupldan bağlantı sorunu nedeniyle sıcaklık verisi alınamamıştır. Tablo 3'te görüldüğü üzere deney odasında tel örgü bulunması ve bu tel örgülerin katman sayısı arttıkça erime süresi azalmaktadır. Beklenildiği gibi ısı akısının artmasıyla da parafinini her bir noktasından erime süresi de azalmaktadır.

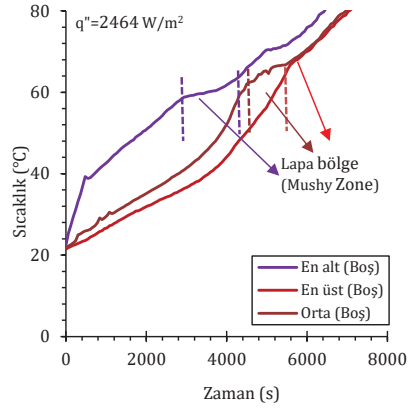
Tablo 4. Tel Örgü Katmanlarının Farklı Isıtıcı Güçlerine Göre Erime Süresindeki İyileşmeler

	2090 W/m <sup>2</sup>				2464 W/m <sup>2</sup>			3185 W/m <sup>2</sup>	
	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst
4 katmanlı tel örgü (%)	-1,4	1,9	1,5	12,0	3,2	2,8		11,2	6,8
8 katmanlı tel örgü (%)	18,9	8,5	2,2	24,0	5,4	5,0		18,5	9,1

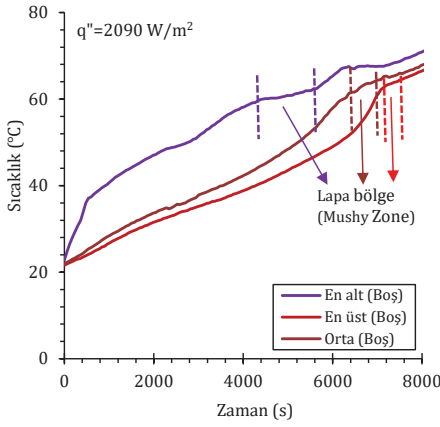
Tablo 4'te 4 ve 8 katmanlı tel örgülü test odalarında bulunan parafin mumun, tel örgüsüz halde bulunan parafin mum ile erime sürelerindeki iyileşmelerin kıyaslanması verilmiştir. Parafin mumun erime süresinde katman sayısı arttıkça erime süresinde iyileşmeler görülmektedir. Burada erime süresindeki iyileşme % 24'e kadar olduğu görülmektedir.



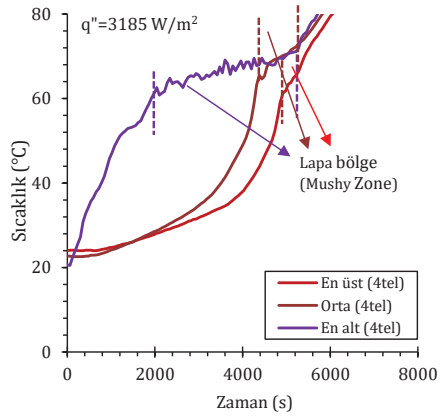
a)



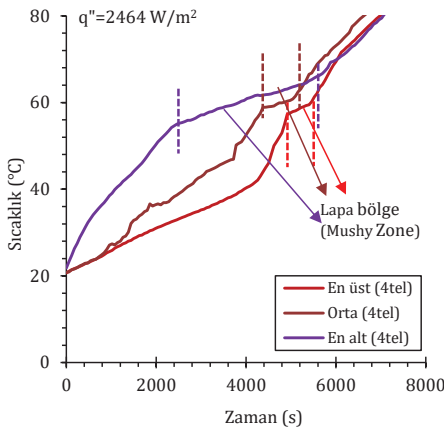
b)



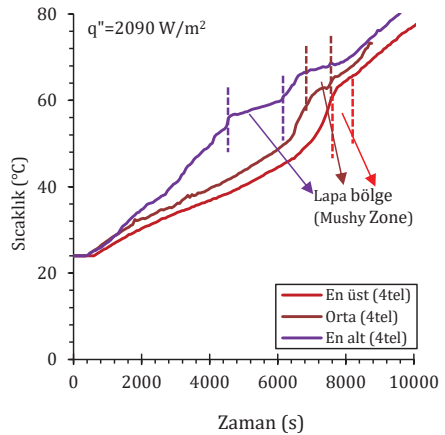
c)



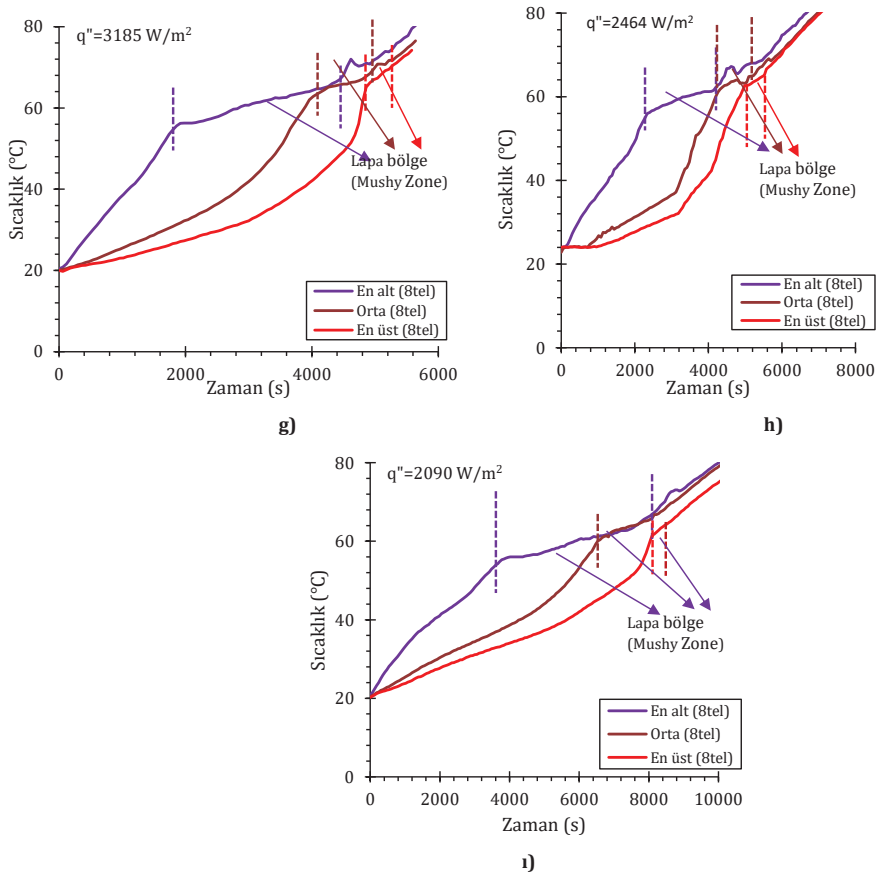
d)



e)



f)



Şekil 8. Farklı ısıtıcı güçlerinde Lapa Bölgelerin Belirlenmesi

Denklem 4'te faz değiştiren malzeme içerisinde sıvı oranını veren ifadeler sunulmuştur. Bu sıvı oranları FDM'nin sıcaklığına bağlı olarak:

$$f_{FDM} = \begin{cases} 0 & T_{FDM} \leq T_{katı} \\ \frac{T_{FDM} - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}} & T_{katı} \leq T_{FDM} \leq T_{sıvı} \\ 1 & T_{FDM} \geq T_{sıvı} \end{cases} \quad (4)$$

hal değişimleri belirlenebilir.  $f_{FDM}$  sıvı oranını,  $T_{katı}$ ,  $T_{sıvı}$  ve  $T_{FDM}$  sırasıyla faz değiştiren katı hal sıcaklığı, sıvı hal sıcaklığı ve o zamandaki FDM'nin sıcaklığını ifade etmektedir (Baki Sezgin, Gökaslan ve Uçkan, 2023).

Şekil 8'de farklı ısıtıcı güçlerinde a), b), c) tel örgüsüz, d), e), f) 4 katmanlı tel

örgü, g), h), ı) 8 katmanlı tel örgü test odalarının lapa bölge sınırları gösterilmiştir. Her bir deney odasının alt kısmındaki ısıtıcıya yakın bölgedeki faz değiştiren malzeme ilk erimeye başlar. Daha sonra ısı geçişi yukarıya doğru olmakta orta ve üst kısımdaki faz değiştiren malzeme erimeye başlar. Erime, deney odasında bulunan tel örgü katman seviyesine kadar, tel örgü sayesinde eşit dağılı olarak gerçekleşmektedir. Burada paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının faz değiştiren malzemesininkine göre yüksek olmasının etkisi söz konusudur. En yüksek ısı akısında, her bir deney odasında alt kısımda bulun FDM için lapa bölgeleri aralıkları diğer ısı akılarına göre daha geniştir. Katmanlı tel örgülü deney odasında yapılan deneylerde lapa bölgeleri aralıkları boş (tel olmayan) deney odasının lapa bölgesi aralıklarına göre daha belirgindir. Deney odasının en üst kısımda bulunan termokupplardan ölçülen verilere göre FDM'nin lapa bölgeleri çok kısa aralıktadır. Deney odası alttan ısıtıldığı için üst tarafta bulunan FDM'nin sıcaklığı sürekli artmakta ve alt kısımdan üst kısma doğru katı formdan sıvı forma dönüşecektir.

#### 4. Tartışma

Isı depolama (gizli ısı) uygulamalarında tercih edilen faz değiştiren malzeme olarak daha çok parafin malzemesi kullanılmaktadır. Parafin malzemesinin düşük ısı iletim katsayısı sebebiyle dezavantaja sahip olsa da ısı enerji depolama süresi açısından avantajlıdır. Bu deneysel çalışmada deney odasının içerisine ısı iletim katsayısı yüksek malzeme yerleştirilerek düşük ısı iletim katsayılı parafinin erime süresindeki değişim araştırılmıştır.

Deney esnasında, parafin mumu faz değiştiren malzemenin en yüksek çalışma sıcaklığına (bozulma sıcaklığına) dikkat edilmiş ve deney odasında bulunan parafinin bütün deney kombinasyonlarında tamamen erimesi sağlanmıştır. Deneyler, deney odasına alttan sabit ısı akısı sınır şartı uygulanarak yapıldığı için deney odasının alt kısmında bulunan parafin mumunun erimesi daha erken, deney odasının üst kısmına doğru ilerledikçe parafin mumun erimesi biraz daha uzun süre almıştır. Bu bakımdan deney odasının alt kısmında kalan parafin mum malzemesinin üst noktalar tamamen eriyinceye kadar sıcaklığı deney sırasında kontrol edilmiş ve en yüksek çalışma sıcaklığına aşmaması dikkat edilmiştir. Isıtıcı plakanın üzerinde tel örgülü ya da tel örgüsüz olması durumundaki test odalarında yapılan bütün deneylerde mümkün mertebe aynı sabit ısı akılarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Üç farklı durumda (tel örgüsüz, 4 katmanlı ve 8 katmanlı tel örgü) ve üç farklı ısı akılarında deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre, tel örgüde katman sayısı arttıkça erime süresi azalmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre erime süresinde ısıtıcı gücünün etkisi çok önemlidir. Katmanlı tel örgülü deney sonuçları, tel örgüsüz deneylerden elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında en alt kısımda FDM'nin erime süresinde %24'e kadar iyileşme söz konusudur. Erime

süresi, en üst ve orta kısımda FDM biraz daha düşük olsa da tel örgüsüz deney sonuçlarıyla kıyaslandığında %1.5 ile 11.2 arasında iyileşme söz konusudur. Tel örgü malzemesinin ısı iletim katsayısı parafin mumuna göre oldukça yüksektir. Böylece ısıyı önemli ölçüde ve homojen olarak yukarıya taşımaktadır.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara dayanarak, tel örgü olan ve olmayan her üç deney odası için ısı gücü (DC güç kaynağından sağlanan) artmasıyla FDM erime (gizli ısı depolama) süresi azaltılmaktadır. Tel örgüler, ısı güce bağlı olarak yaklaşıklık olarak aynı miktarda parafin mumun erimesi için gereken süreyi boş deney odası ile kıyaslandığında 4 katmanlı ter örgüde %1.9-12, 8 katmanlı tel örgü de ise %2.2-24 arasında iyileşme elde edilmiştir. FDM'nin erime işlemi sırasında tel örgülü deney odalarında sıcaklık profilleri, tel örgüsüz deney odası sıcaklık profili arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Deney odalarındaki tel örgülerin paslanmaz çelik malzemeden yapılmış olup ısı iletim katsayısı FDM'e göre yüksektir. Tel örgünün ısı iletim katsayısının yüksek olmasından kaynaklı ısı geçişinin artırması nedeniyle, tel örgülü ortamların lapa bölge süresi üzerinde bir etkiye sahiptir. Yapılan deneylerdeki gözlemlerden sonucunda içerisinde tel örgü bulunan faz değiştiren malzemelerde erime dağılımı tel örgüsüz ortama göre daha homojen olduğu belirlenmiştir. Deney odasının içerisine tel örgü yerleştirmek ilave bir güç harcamaya etkisi olmayacağından erime sürelerindeki iyileşmeye de bakıldığında faz değiştiren malzemelerde ısı iletim katsayısı yüksek malzeme kullanmak erime süresine pozitif etki sağlamıştır.

Ayrıca katmanlı tel örgüler oluşturulurken tel kafesler üst üste konulmuş ve ince tel yardımıyla sıkıştırılmıştır. Bu durum tel örgülerin arasında temas direncine sebep olmaktadır. Temas direncini en aza indirmek için kaynak veya lehimleme işlemi ile yapılabilir. Böylece tel örgüler katmanları arasında her bir noktasından daha iyi temas edecektir. Temas direncini en az hale getirerek faz değiştiren malzemesinin erime sürelerinin daha da azalacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynakça

Akyurek, E. F. ve Yoladi, M. (2021) "An experimental investigation on melting and solidification behavior of phase change material in cylindrical latent heat storage units with minichannel", *Journal of Energy Storage*, 41, 102938. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102938>

- Albaldawi, R. A. H., Shyaa, A. K. ve Hammendy, B. M. H. (2015) "Experimental Study on the Effect of Insertion of Copper Lessing Rings in Phase Change Material (PCM) on the Performance of Thermal Energy Storage Unit", *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 60-72. Erişim adresi <https://alkej.uobaghdad.edu.iq/index.php/alkej/article/view/265/260>, Son Erişim Tarihi: 10.03.2024.
- Baki Sezgin, E., Gökaslan, M. Y. ve Uçkan, İ. (2023) "Numerical Analysis of The Multilayer Structures Melting with Different Hole Network with Phase Change Material", *Energy Environment and Storage*, 3(3), 88-95. <https://doi.org/10.52924/ZBHA5406>
- Chibani, A., Merouani, S. ve Bougriou, C. (2022) "The performance of hydrogen desorption from a metal hydride with heat supply by a phase change material incorporated in porous media (metal foam): Heat and mass transfer assessment", *Journal of Energy Storage*, 51, 104449. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104449>
- Duan, J. (2021a) "A novel heat sink for cooling concentrator photovoltaic system using PCM-porous system", *Applied Thermal Engineering*, 186, 116522. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116522>
- Duan, J. (2021b) "The PCM-porous system used to cool the inclined PV panel", *Renewable Energy*, 180, 1315-1332. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.097>
- Ebadi, S., Tasnim, S. H., Aliabadi, A. A. ve Mahmud, S. (2020) "An experimental investigation of the charging process of thermal energy storage system filled with PCM and metal wire mesh", *Applied Thermal Engineering*, 174, 115266. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115266>
- Gasia, J., Miró, L., de Gracia, A., Barreneche, C. ve Cabeza, L. (2016) "Experimental Evaluation of a Paraffin as Phase Change Material for Thermal Energy Storage in Laboratory Equipment and in a Shell-and-Tube Heat Exchanger", *Applied Sciences*, 6(4), 112. <https://doi.org/10.3390/app6040112>.
- Ghasemi, M. H., Hoseinzadeh, S. ve Memon, S. (2022) "A dual-phase-lag (DPL) transient non-Fourier heat transfer analysis of functional graded cylindrical material under axial heat flux", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 131, 105858. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmass-transfer.2021.105858>
- Juaifer, H. J. A., Ayani, M. B. ve Poursadegh, M. (2020) "Melting process of paraffin wax inside plate heat exchanger: experimental and numerical study", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(3), 905-916. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09275-w>

- Kahwaji, S. ve White, M. A. (2021) "Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Influence of Molecular Structure on Properties", *Molecules*, 26(21), 6635. <https://doi.org/10.3390/molecules26216635>
- Kozak, M. ve Kozak, Ş. (2012) *Enerji Depolama Yöntemleri, SDU International Technologic Science*, 24(2), 17-29. Erişim adresi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/utbd/issue/25984/273706>, Son Erişim Tarihi: 10.03.2024.
- Li, W. Q., Qu, Z. G., Zhang, B. L., Zhao, K. ve Tao, W. Q. (2013) "Thermal behavior of porous stainless-steel fiber felt saturated with phase change material", *Energy*, 55, 846-852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.064>
- Mashayekhi, M., Houshfar, E. ve Ashjaee, M. (2020) "Development of hybrid cooling method with PCM and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries", *Applied Thermal Engineering*, 178, 115543. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115543>
- Mustaffar, A., Harvey, A. ve Reay, D. (2015) "Melting of phase change material assisted by expanded metal mesh", *Applied Thermal Engineering*, 90, 1052-1060. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.057>
- Opolot, M., Zhao, C., Keane, P. F., Liu, M., Mancin, S., Bruno, F. ve Hooman, K. (2023) "Discharge performance of a high temperature phase change material with low-cost wire mesh", *Applied Thermal Engineering*, 223, 120050. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120050>
- Ostrogorsky, A. G. ve Glicksman, M. E. (2015) "Segregation and Component Distribution", *Handbook of Crystal Growth*, 995-1047. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63303-3.00025-0>
- Ray, A. K., Rakshit, D., Ravi Kumar, K. ve Gurgenci, H. (2021) "Silicon as high-temperature phase change medium for latent heat storage: A thermo-hydraulic study", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101249>