



## Pil Benzeri Isıl Koşullara Sahip bir Silindirin Faz Değiştiren Malzeme ile Soğutulmasının Deneysel İncelenmesi

Satılmış Tekin<sup>1</sup>, Göker Türkakar<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye

### Makale Tarihi

Gönderim: 09.08.2021

Kabul: 31.10.2021

Yayın: 10.06.2022

### Araştırma Makalesi

**Öz** – Bu çalışmada, lityum iyon pillerin pasif termal yönetim sistemlerinden faz değişim malzemesi (FDM) kullanımı ile soğutulması deneysel olarak incelenmiştir. FDM ısı iletim katsayısının artırılması amacıyla içerisine bakır tel örgü konarak FDM/bakır tel örgü kompoziti oluşturuldu. Isıtıcı etrafına FDM/bakır tel örgü koyulduğu, yalnız FDM koyulduğu ve FDM konulmadığı durumlarda ısıtıcı yüzey sıcaklığının durağan hava ortamında değişimi incelenmiştir. Deneylerde silindirik lityum iyon pillerin 2C (1.30W) ve 3C (2.75W) deşarj durumlarında attığı ısıyı simüle etmek için 26650 pili ile aynı boyutlarda ısıtıcı kullanılmıştır. Deneylerde farklı ergime sıcaklığına sahip iki adet FDM kullanılmıştır. Sürekli rejimde yürütülen deneylerde ısıtıcı etrafına FDM(CrodaTherm37)/bakır tel konulması durumunda FDM katı halde iken FDM+cami ısıl direncini %52 düşürmüştür. FDM sıvı fazda olduğu durumda ise FDM/tel+cami ısıl direncini %30 artırmıştır. Tel kullanımı ısıl performansı katı ve iki fazlı bölgede olumlu etkilerken sıvı fazda olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. FDM/bakır tel kullanılması sayesinde FDM kütlesi ve maliyeti, %15 düşürülmüştür. FDM kullanılmadığında (durağan hava ortamı) 2C/1.30W ve 3C/2.75W deşarj/ısı üretimi durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığı 40°C' ye sırasıyla 755 s ve 400 s'de gelmiştir. 2C deşarj oranı için bu süre CrodaTherm37/Tel örgü kullanılarak FDM kullanılmayan duruma göre %703 artırılabilmiştir. FDM'lerin ergime sıcaklıkları göz önüne alındığında, kısa süreli deşarj 2C/1.30W ısı üretimi durumunda CrodaTherm29, uzun süreli çevrim şeklinde şarj/deşarj 2C/1.30W ısı üretimi durumunda ise CrodaTherm37 FDM kullanımı tercih edilebilir.

**Anahtar Kelimeler** – Ergime, faz değişim malzemesi, fişek ısıtıcı, hibrit elektrikli araç, pillerin pasif soğutulması

## Experimental Investigation of Cooling a Cylinder with Battery-like Thermal Conditions with Phase Change Material

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye

### Article History

Received: 09.08.2021

Accepted: 31.10.2021

Published: 10.06.2022

### Research Article

**Abstract** – In this study, the cooling of lithium-ion batteries using phase change material (PCM), a passive thermal management system, has been experimentally investigated. A composite with copper wire mesh has been formed to increase the thermal conductivity of PCM. Transient variation of heater surface temperature under the stagnant air environment has been examined for the cases bare heater, heater surrounded by the PCM, and enclosed by PCM/copper wire mesh composite. In experiments, a heater with the same dimensions of the 26650 cylindrical lithium-ion battery is used to simulate the heat generation for this battery for the 2C (1.30W) and 3C (2.75W) discharge rates. Two kinds of PCMs having different melting temperatures are employed in the experiments. As a result of the tests carried out for steady-state conditions, by using solid-phase PCM(CrodaTherm37)/copper wire composite, the thermal resistance of PCM/copper+glass is decreased by 52% compared to the heater surrounded by only PCM configuration. If the same experiment is held for liquid phase PCM/copper wire composite, PCM/copper+glass thermal resistance is 30% higher than the only PCM case. While the use of copper wire promotes the thermal performance for the solid and solid-liquid phases, it is observed that it negatively affects it for the liquid phase. The PCM mass and the cost are reduced by 15% thanks to the use of copper wire. In the absence of the PCM (stagnant air environment), heater surface temperature has reached 40°C at 755 s and 400 s for the heat generation of 2C/1.30 W and 3C/2.75 W, respectively. This process has been extended by 703% compared to absence of the PCM using CrodaTherm37/Copper wire mesh for a 2C discharge rate. When considering the melting temperatures of the PCMs, CrodaTherm29 for short term discharge 2C/1.30W, CrodaTherm37 can be preferred for long term cyclic 2C/1.30W charge/discharge conditions.

**Keywords** – Cartridge heater, hybrid electric vehicle, melting, passive cooling of batteries, phase change material

<sup>1</sup> satilmistekin18@gmail.com

<sup>2</sup> turkakar@beun.edu.tr

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

## 1. Giriş

20. yüzyılın sonlarından itibaren artan çevre kirliliği ve enerji ihtiyacı gibi sorunlardan dolayı elektrikli (EA) ve hibrit elektrikli araçların (HEA) kullanımı artmakta ve önümüzdeki on yıl içinde kullanılan araçların yarısından fazlasının elektrikli araç olması beklenmektedir (Tuncay ve Üstün, 2012; Al-Alawi ve Bradley, 2013; Zhang vd., 2015). Elektrikli araçlar içten yanmalı motorlu araçlara göre daha az hareketli parçasının olması nedeniyle daha basit yapıya sahiptir ve enerji verimleri oldukça yüksektir (Gürbüz ve Kulaksız, 2016). Fakat pil fiyatı, şarj süresi, pil ömrü, sızıntı riski, güvenilirliği gibi sorunlar EA ve HEA'ların kullanımını kısıtlanmaktadır. Lityum-iyon pillerin gelişimi ile otomobil sektöründe EA ve HEA'lara olan ilgi giderek artmıştır (Speirs, Contestabile, Houari ve Gross, 2014).

Lityum-iyon piller yüksek enerji ve güç yoğunluğu nedeniyle EA ve HEA araçlar için iyi bir çözüm kaynağı olmuştur. Ancak yüksek akımda şarj ve özellikle deşarj durumlarında çok fazla ısı üretirler (Jeon ve Baek, 2011). Sıcaklık artışı ile pilde performans düşüşü meydana gelir ve sızıntı, patlama, bozulma riskleri ortaya çıkar. Lityum-iyon piller için optimum çalışma aralığının 20°C ile 50°C aralığında olduğu ve pil paketindeki sıcaklık farkının 5°C'yi geçmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Väyrynen ve Salminen, 2012). Pil sıcaklığını belirtilen optimum aralıkta tutmak için iyi bir pil termal yönetim sistemine ihtiyaç vardır.

Pil termal yönetim sistemlerin aktif soğutma sistemleri (fan, pompa vb. bileşenler ile soğutma) ve pasif soğutma sistemleri (FDM kullanımı) olarak iki başlık altında incelenebilir. Aktif soğutma sistemleri pil içerisinde eşit olmayan sıcaklık dağılımlarına neden olur (Sabbah, Kizilel, Selmann ve Al-Hallaj, 2008). Aynı zamanda aktif soğutma sistemleri fan, pompa gibi bileşenlerin kullanılmasından dolayı karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu bileşenler enerji kullanımını ve maliyeti artırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı pasif soğutma sistemlerine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Faz değişim malzemeleri ile sağlanan pasif pil termal yönetim sistemleri, maliyet, çevrim ömrü, bakım masrafları bakımından iyi bir pil termal yönetim sistemini sunmaktadır.

Faz değişim malzemeleri (FDM) küçük bir sıcaklık aralığında faz değiştirir ve faz değişimi sırasında yüksek miktarda gizli ısı depolama kapasitesine sahiptir (Khan ve Ghafoor 2016). Silindirik pil etrafına koyulan FDM pilden kaynaklanan ısıyı depolayarak uzaklaştırır ve faz değişimi sırasında pil sıcaklığının daha kararlı kalmasını sağlar. Aynı zamanda pil içerisindeki sıcaklık dağılımının düzgün olmasını ve soğuk hava koşullarında pil performansının artmasını sağlar (Rao, Wang ve Zhang 2014). FDM'lerin bu avantajlarına karşılık ısı iletim katsayısının düşük olması dezavantajlarındandır. Isı iletim katsayısının düşük olması pilden uzaklaştırılan ısı miktarının düşük olmasına sebep olur ve pil sıcaklığının artmasına neden olur. Literatürdeki çalışmalar ısı iletim katsayısının yeterli miktarda artırılması ile faz değişim malzemelerin pasif pil termal yönetimi konusunda etkili bir yöntem olabileceğini göstermiştir (Qu, Li ve Tao, 2014; Hémerly, Pra, Robin ve Marty, 2014; Wang, Rao, Huo ve Wang, 2016). Ayrıca bazı çalışmalar pasif soğutma ile aktif soğutmaya göre daha homojen sıcaklık dağılımları elde edildiğini ispatlamıştır (Sabbah vd., 2008; Kizilel, Sabbah, Selman ve Al-Hallaj, 2009). Literatürdeki çalışmalar pasif soğutma yönteminin umut vadettiğini göstermektedir.

Literatürdeki ısıl iletkenlik artırma çalışmalarında mevcut çalışmanın (bakır tel örgü) aksine bakır köpük kullanımı yaygındır. Li, Qu, He ve Tao, (2014) bakır köpük gözeneklerine FDM doldurarak lityum-iyon piller için pil termal yönetimi üzerine çalışmalar yaptı. Doğal taşınım, saf parafin ve bakır köpük-parafin kompoziti için sonuçlar elde etti. Deneyler 0.5C, 1C ve 3C deşarj durumları için yapıldı. En düşük pil sıcaklığının ve homojen sıcaklık dağılımının bakır köpük-parafin kompoziti ile elde edildiği sonucuna varıldı. Aynı zamanda gözenek yoğunluğunun artması ile sıcaklığın da arttığı sonucuna ulaştı. Benzer şekilde Rao, Huo, Liu ve Zhang, (2015) normal kapasitesi 10 Ah olan 24 adet LiFePO<sub>4</sub> akü hücrelerinin termal yönetimi için parafin/bakır köpük kullanımını deneysel olarak inceledi. FDM ve bakır köpük kompoziti pil etrafına yerleştirildi. Kompozit malzeme faz değişim sıcaklığı 37°C idi. Deney 3C ve 5C deşarj durumları için yapılmıştır. 5C deşarj oranında yürütülen deneylerde ortam sıcaklığı 29°C iken, pilin maksimum sıcaklığı 41°C ve hücreler arası sıcaklık farkı 3°C olarak bulundu. Aynı deşarj oranında ortam sıcaklığı 33°C iken, pilin maksimum sıcaklığı 42°C ve hücreler arası sıcaklık farkı 4°C olarak bulundu. Bu sistemin EA'ya monte edilmesi ile maksimum sıcaklık 39°C ve hücreler arası sıcaklık farkı 2.85°C olarak buldu. Parafin/bakır köpüğü kompozitinin pil termal yönetimi konusunda verimli bir yöntem olduğu sonucuna varıldı.

Jiang, Huang, Fu, Cao ve Liu, (2016) lityum-iyon pil termal yönetimi için FDM (parafin RT44HC) /genişletilmiş grafit içine koyularak kompozit oluşturdu. Kompozitin ergime noktası 41.6°C ile 44.7°C arasında değişmekteydi. Pil 5C'de deşarj edilen LiFePO<sub>4</sub> silindirik pildi. Pil etrafında FDM/genişletilmiş grafit kompoziti kullanımı yalnızca FDM kullanımı duruma kıyasla pilde oluşan maksimum sıcaklığı 10°C azalttığı sonucuna ulaşıldı. Benzer şekilde Galazutdinova, Ushak, Farid, Al-Hallaj ve Grageda, (2021) FDM/genişletilmiş grafit kompoziti oluşturarak 18650 (2.9 Ah) piller için farklı deşarj oranlarında testler gerçekleştirilmiştir. C/2 ve 1C oranları için kompozit kullanılması gerekmeden yeterli soğutma sağlanırken 2C oranında kompozit kullanılmadığında güvenlik limiti olan 65°C aşılmıştır. 2C deşarj oranında kompozit başarılı bir performans sergilemiştir. Mehrali, Latibari, Mehrali, Metselaar ve Silakhori, (2013) FDM ısı iletim katsayısını artırmak için, grafen oksit tabakaları içerisine vakum yardımıyla parafin emdirilmesi ile parafin/grafen oksit kompoziti oluşturdu. Oluşturulan kompozit ağırlıkça %48.3 parafin içermektedir. FDM kompoziti ergime sıcaklığı 53.5°C idi. Kompozit FDM iletkenliği 0.305 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>'den 0.985 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>'e çıkarılmıştır. Sonuç olarak FDM kompoziti oluşturularak kabul edilebilir ısı iletim katsayısı elde edilmiştir.

Metal köpük kullanımının yanı sıra FDM'ye nanoparçacık katmak ve metal kanat yapısı kullanımı ısı iletkenliği artırmak amacıyla pillerin soğutulmasında kullanıldı. Heyhat, Mousavi ve Siavashi, (2020) bu üç yöntemi de kıyaslayan bir çalışma yürüttü. 18650 lityum iyon pillerini 4.6 W ve 9.2 W ısı üretim değerleri için sayısal yöntem ile analiz etti. Bakır kanat kullanımının 4.6 W ısı üretimi için pil sıcaklığını 2 K, 9.2 W ısı üretimi için ise 4 K düşürdüğü tespit edildi. Bakır köpük kullanımı ise sırasıyla 4 ve 6 K düşürebildi. Aynı miktardaki bakır için köpük kullanımının kanat kullanımından daha etkin olduğu gözlemlendi. Bakır nanoparçacıkların ısı yönetiminde önemli bir etkisini gözlemlenemedi. Sun, Fan ve Zheng, (2021) FDM içerisinde kanat kullanılarak pilin çalışma süresinin yalnız FDM kullanılan düzeneğe göre %54-90 uzatılabildiğini belirtti. FDM-kanat sisteminin pilin çalışma süresini 40°C ortam sıcaklığında yalnız FDM kullanılan sisteme göre %238 artırılabilirdiği rapor edilmiştir.

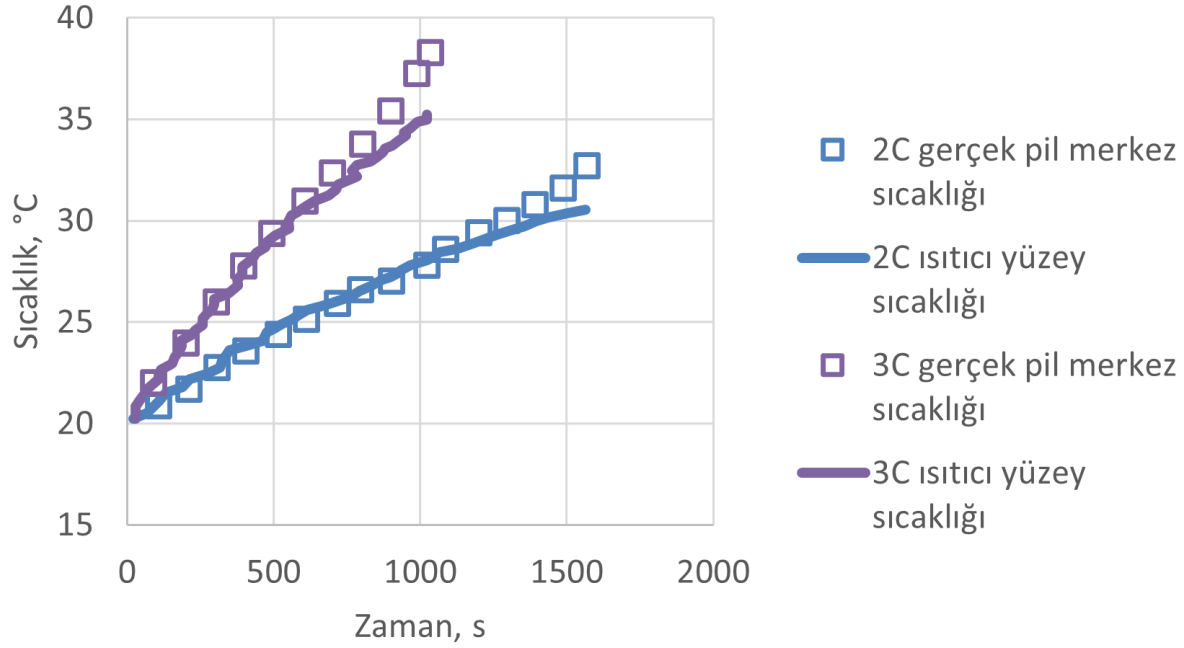
Bu çalışmada, literatürde rastlanmayan yeni bir yöntem olarak, FDM ısı iletim katsayısı bakır tel örgü kullanılarak artırılmıştır. FDM bölgesinde doğal taşınımın etkinliği ve tel örgünün doğal taşınımına etkisi pil sıcaklığından yola çıkılarak tartışıldı. Ayrıca fişek ısıtıcıda 1.30 W ve 2.75 W (lityum iyon pilin 2C ve 3C deşarj değerleri) ısı üretimi durumunda, ısıtıcı etrafında FDM olmadan, yalnız FDM koyulması ve FDM/bakır tel örgü kompoziti koyulması durumlarında fişek ısıtıcı yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişiminin karşılaştırılması yapıldı.

## 2. Deneysel Kurulum

Deneysel çalışmanın amacı, silindirik lityum iyon pillerin etrafına FDM konularak sistemin durağan hava ortamında doğal taşınım yolu ile soğutulmasının incelenmesidir. FDM ısı iletim katsayısının artırılması için FDM/bakır tel örgü kompoziti oluşturularak lityum iyon pillerin pasif soğutulması incelenmiştir. Pillerden deşarj sırasında sabit akım çekebilmek için özel düzenekler piyasada mevcuttur fakat oldukça maliyetlidir. Bu yüzden literatürde bazı çalışmalar hem maliyet hem de güvenlik nedeniyle fişek ısıtıcı kullanmıştır (Hémery vd., 2014; Duan ve Naterer, 2010; Xu vd., 2014). Mevcut çalışmada da bu yöntem tercih edilmiştir. Fişek ısıtıcı etrafına sırası ile yalnız FDM ve FDM/bakır tel örgü kompoziti konularak farklı durumlar için deneyler yapılmıştır. Deneylerde Hémery vd., (2014)'nin yaptığı çalışmada 26650 LiFePO<sub>4</sub>/C lityum iyon pilin (pil çapı 26 mm ve pil yüksekliği 65 mm) 2C ve 3C deşarj durumunda üretilen ısıyı ortalama 1.30W ve 2.75W bulmasına istinaden, bu çalışmada pil boyutlarındaki fişek ısıtıcıdan 1.30W ve 2.75W ısı üretilmesi durumu için deneyler yapılmıştır. Bu sayede, pilin 2C ve 3C deşarj durumları incelenmiştir. Şekil 1'de Hémery vd., (2014)'nin gerçek pil ve ısıtıcı ile yaptığı deneylerde elde ettiği sonuçlar verilmiştir.

Deneyde farklı noktalara yerleştirilen K tipi termal çiftler sayesinde beş saniye aralıklarla okuma alınarak, veri kayıt cihazı ile elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılarak ısıtıcı yüzey sıcaklığının zamanla değişimi incelenmiştir. Deney pil paketi içerisindeki bir adet hücre için yapılmıştır.

Kullanılan ısıtıcı çapı  $D_0=26$  mm, ısıtıcı yüksekliği  $L_0=65$  mm'dir. Tablo 1'de kullanılan ısıtıcı, bakır tel örgü ve deney tüpü termofiziksel özellikleri verilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan deney tüpü çapı  $D_1=34$  mm ve deney tüpü yüksekliği  $L_1=70$  mm'dir.



Şekil 1. 2C ve 3C deşarj durumlarında pil sıcaklıkları (Hémery vd., 2014)

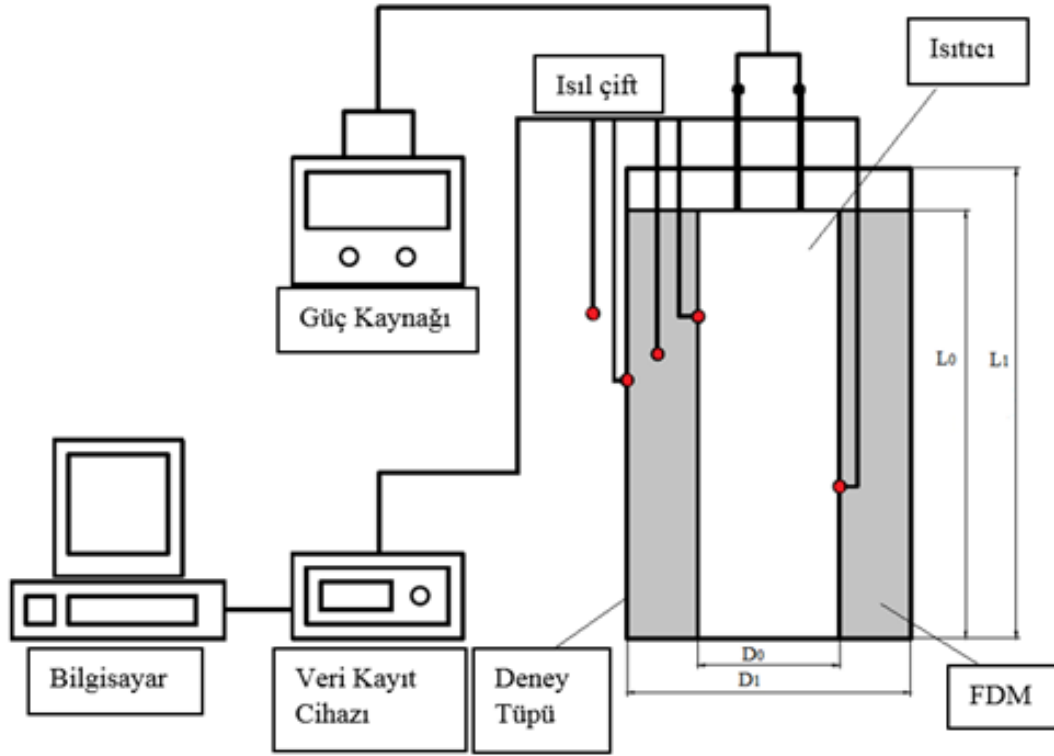
Tablo 1

Malzemelerin termofiziksel özellikleri

Termofiziksel Özellik	Fişek Isıtıcı	Bakır Tel Örgü	Deney Tüpü
$\rho$ , (kg m <sup>-3</sup> )	3436.8	7185.2	2230
$C_p$ , (kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	0.450	-	0.750
$t$ , (mm)	-	-	2
$k$ , (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	-	401	-

Tablo 1'de belirtilen  $\rho$  yoğunluğu, özgül ısı değerini,  $t$  et kalınlığını ve  $k$  ise ısı iletim katsayısını ifade etmektedir. He, Wang ve Ma, (2015) 26650 lityum iyon pillerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modelini oluşturdu ve deneysel veri ile modelini doğruladı. He vd., (2015) HAD modelinde pil yoğunluğunu 2115.3 kg m<sup>-3</sup>, özgül ısı değerini 837.4 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> olarak ele aldı. Pilin zamana bağlı sıcaklık artış veya azalış karakteristiğini belirleyen önemli parametre ( $\rho C_p$ ) mevcut çalışmada  $1.546 \times 10^6$  J m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> iken He vd., (2015)'nin çalışmasında  $1.771 \times 10^6$  J m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>'tür. Mevcut çalışmada bu değer daha düşük olduğundan ısıtıcı ile yapılan deneylerde pil kritik sıcaklığa daha erken gelecektir. Bu durum mevcut çalışmanın güvenli tarafta kalmasını sağlayacaktır. Pil için bir diğer önemli parametre ise ısı iletim katsayısıdır. Isı iletim katsayısı pil içerisindeki radyal yönde sıcaklık gradyanının mertebesini belirler. Literatürde araştırmacılar lityum iyon piller için toplam kütle yaklaşımının uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir (Özdemir, Amini, Ekici ve Köksal 2021; Wang, Tseng, Zhao ve Wei 2014; Türkakar 2021). Mevcut çalışmada ısıtıcılar için yapılan deneylerde toplam kütle yaklaşımının uygulanabilir olduğu anlaşılmıştır. Pili temsil eden fişek ısıtıcı etrafına faz değişim malzemesi konulması ile doğal taşınım ortamında yüzey sıcaklığının zamanla değişiminin incelenmesi amacı ile kurulan deney düzeneği şematik gösterimi Şekil 2'de görülmektedir.

Deney düzeneğinde kullanılan ana cihazlar güç kaynağı, bilgisayar ve veri kayıt cihazıdır. Güç kaynağı (Shenzhen Mastech Dc Power Supply Hy3003-3) ile ısıtıcıda üretilecek istenen ısıya göre ısıtıcıya istenilen güç verilmesi sağlanmaktadır. K tipi ısı çiftler ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$  doğruluk) yardımı ile ısıtıcı yüzey sıcaklığı, FDM sıcaklığı, deney tüpü dış yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığı okunarak değerler veri kayıt cihazı (Hp Benchmarking Data Logger Software 34970a) yardımıyla bilgisayar ortamına kaydedilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2. Deney düzeneği şematik gösterimi

Deney düzeneğinde deney tüpü içerisine fişek ısıtıcı konularak ısıtıcı etrafına Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü gibi yalnız FDM ve FDM/bakır tel örgü kompoziti koyulmuştur. Deney düzeneğinde üst yüzeyden ısı transferini engellemek amacı ile deney düzeneği üst kısmına tahtadan kapak yapılmıştır. Alt yüzeyden ısı transferini engellemek amacı ile deney düzeneği altına köpük konulmuştur. Bu sayede ısıtıcıdan çıkan ısının bir kısmının FDM de depolanması bir kısmının da yan yüzeylerden doğal taşınım ile atılması amaçlanmıştır.

Faz değişim malzemeleri olarak Croda Kimya Tic. Ltd. Şti. firmasının üretmiş olduğu, termofiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiş olan CrodaTherm29 (CT29) ve CrodaTherm37 (CT37) kullanılmıştır. CT29, 26°C - 29°C sıcaklık aralığında ergimekte ve CT37 ise 35-37°C sıcaklık aralığında ergimektedir (Croda Kimya, 2020). FDM ergimesi sırasında yüksek miktarda gizli ısı depolamaktadır.

Tablo 2

Faz değişim malzemesi termofiziksel özellikleri (Croda Kimya, 2020)

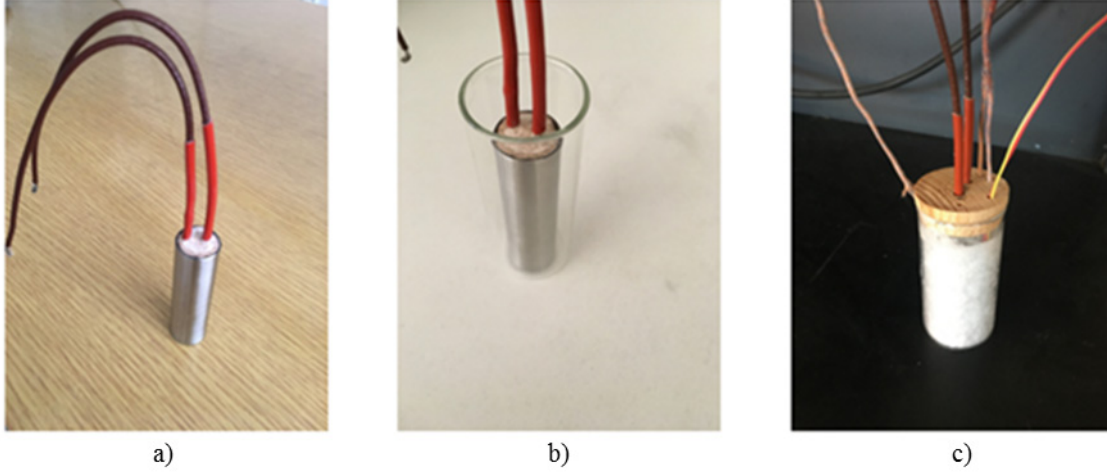
Parametreler	CT29	CT37
$T_{ergime}$ , (°C)	26-29	35-37
$\rho$ , ( $kg\ m^{-3}$ )	917 (katı) - 851 (sıvı)	957 (katı) - 819 (sıvı)
$C_p$ , ( $kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ )	2.3 (katı) -1.4 (sıvı)	2.3 (katı) -1.4 (sıvı)
$L_{gizli}$ ( $kJ\ kg^{-1}$ )	207	202
$k$ , ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ )	0.22 (katı) - 0.15 (sıvı)	0.24 (katı) - 0.17 (sıvı)

Tablo 2'de  $T_{ergime}$  FDM'nin ergime sıcaklık aralığını,  $L_{gizli}$  ise FDM ergime gizli ısını göstermektedir.



## 2.1. Isıtıcı Etrafına Yalnız FDM Konulması ile Kurulan Deney Düzeneği

Fişek ısıtıcı etrafına yalnız FDM konulması ile ısıtıcı yüzey sıcaklığının doğal taşınım ortamında zamanla değişiminin incelenmesi için kurulan deney düzeneği görüntüleri Şekil 3'de görülmektedir.

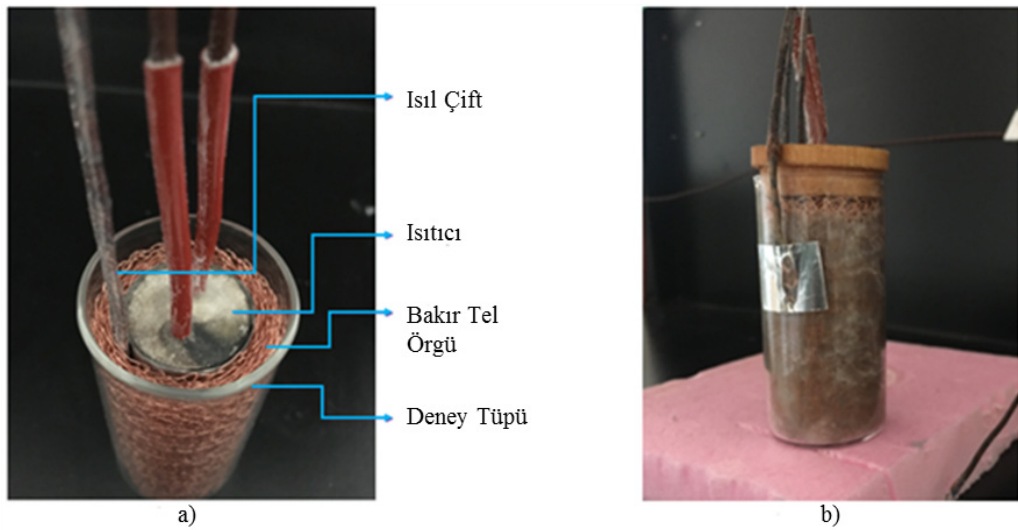


Şekil 3. Deney düzeneği kurulumu görselleri a) fişek ısıtıcı b) fişek ısıtıcının deney tüpüne yerleştirilmiş hali c) Isıtıcı etrafına FDM doldurulmuş deney düzeneği

Şekil 3a'da termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilen fişek ısıtıcı görülmektedir. Şekil 3b'de görüldüğü gibi deney tüpü ortasına yerleştirilen silindirik ısıtıcı etrafına Şekil 3c'de görüldüğü gibi etrafına FDM konularak deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde sıcaklıkları ölçmek için beş tane ısıl çift kullanılmıştır. İki tane ısıl çift ısıtıcı yüzey sıcaklığını ölçmek için ısıtıcı yüzeyine, bir tane ısıl çift FDM sıcaklığını ölçmek için FDM içerisine, bir tane ısıl çift deney tüpü dış yüzeyine bağlanmıştır. Son olarak bir tane de ortam sıcaklığını ölçmek için ortama bırakılmıştır.

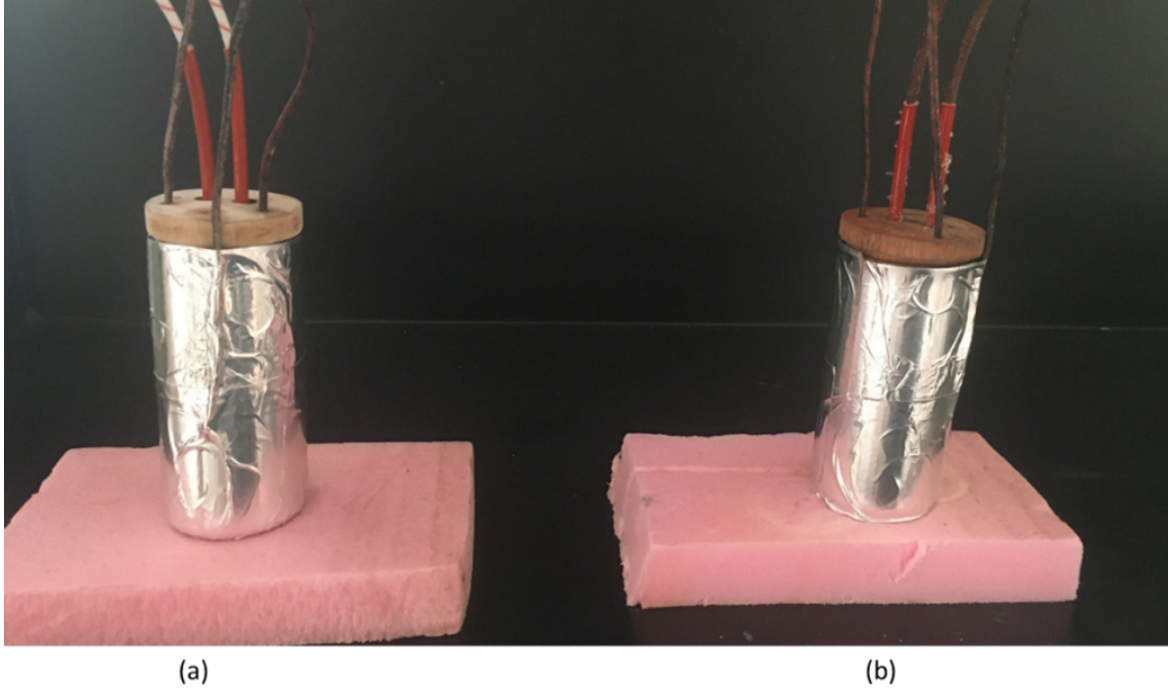
## 2.2. Isıtıcı Etrafına FDM/Bakır Tel Örgü Kompoziti Konulması ile Kurulan Deney Düzeneği

Isıtıcı etrafına FDM ısı iletim katsayısının artırılması amacı ile FDM/bakır tel örgü kompoziti koyulması ile oluşturulan düzenek görselleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği kurulumu görselleri a) fişek ısıtıcı ve bakır tel örgünün yerleştirilmesi b) FDM/Bakır tel örgü kompoziti görseli

Deney düzeneğinde bakır tel örgü kütlesi  $m_{\text{bakır}}=19.148$  g ve FDM kütlesi  $m_{\text{FDM}}=17.623$  g'dır. Bakır tel örgü, bakır-FDM kompozitinin kütlece %52'sini hacimce %11.4'ünü oluşturmaktadır. Bakır tel örgü-FDM kompoziti kullanımı sayesinde sistemde FDM kullanımı %11.4 azaltılmıştır. Az FDM kullanımı sayesinde sistem maliyeti yaklaşık %15 düşmüştür. Isıtıcı yüzey sıcaklığının ölçülmesi için iki adet termal çift ısıtıcı yüzeyine bağlandıktan sonra ısıtıcı etrafına bakır tel örgü sarılmıştır. Şekil 4a'da görüldüğü gibi deney tüpü içerisine yerleştirilen ısıtıcı ve etrafına sarılmış bakır tel örgü erimiş FDM ile doldurularak Şekil 4b'de görüldüğü gibi FDM/bakır tel örgü kompoziti oluşturulmuştur. FDM olarak sırası ile CT29 ve CT37 kullanılarak düzenekler hazırlanmıştır. Bir tane ısı çift deney tüpü dış yüzeyine bağlanmıştır ve bir tane de ortam sıcaklığını ölçmek için ortama bırakılmıştır. Oluşturulan deney düzeneklerinin aynı ortam koşullarında incelemesi için Şekil 5'te görüldüğü gibi deney düzenekleri hazırlanmıştır.



Şekil 5. Deney düzenekleri a) yalnız FDM konularak oluşturulan deney düzeneği b) FDM/Bakır tel örgü kompoziti konularak oluşturulan deney düzeneği

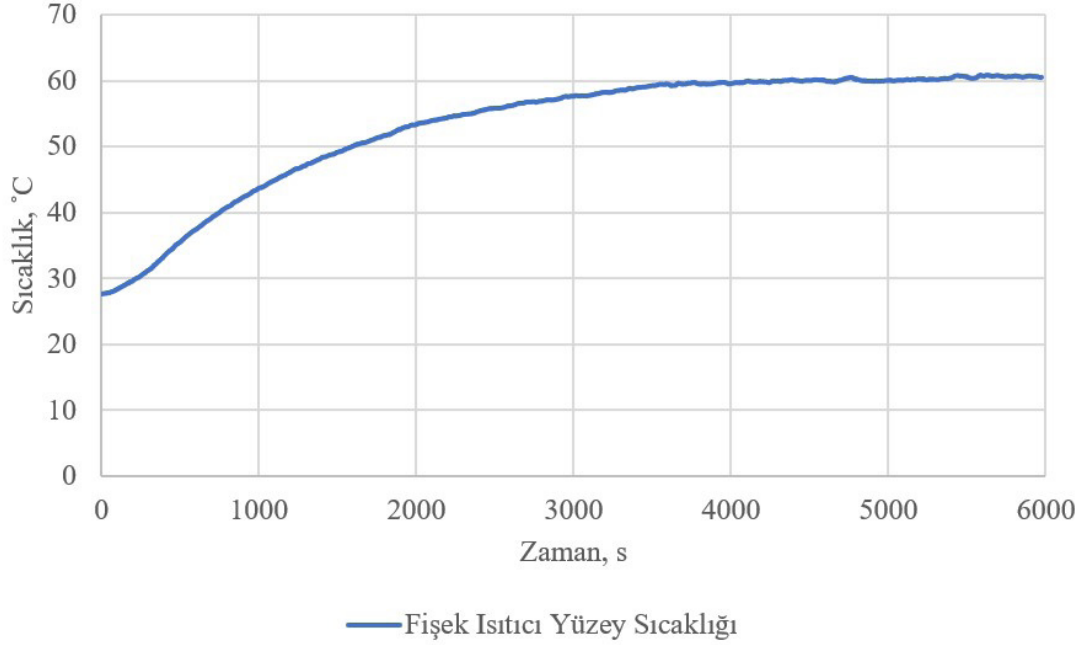
Aynı boyut ve özelliklerde iki adet fişek ısıtıcı ve deney tüpü kullanılarak Şekil 5'te görüldüğü gibi fişek ısıtıcı etrafına yalnız FDM konulması ve FDM/bakır tel örgü kompoziti konulması ile deney düzeneklerinden birer tane oluşturulmuştur. Bu sayede, deneylerin aynı ortam şartlarında yapılarak kıyaslanması sağlanmıştır. Işınım ile ısı transferinin en aza indirilmesi amacı ile deney tüpleri dış yüzeyi alüminyum bant ile kaplanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan deneysel çalışmada lityum iyon pili temsil eden fişek ısıtıcının FDM kullanılmadan, yalnız FDM kullanılması ve FDM/bakır tel örgü kompoziti kullanılması ile yüzey sıcaklığının doğal taşınım ortamında zamana bağlı değişimi için elde edilen veriler bu bölümde sunularak tartışılmıştır. İlk durumda ısıtıcıya verilen gücün fişek ısıtıcıdan durağan hava ortamına geçen ısıya eşit olduğunu göstermek için deney yapıldı ve deneysel sonuçlar teorik hesaplamalar ile karşılaştırıldı. Sonra ısıtıcı etrafına yalnız FDM konularak ısıtıcı yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi incelendi. Daha sonra farklı ergime sıcaklığına sahip FDM'ler ile FDM/bakır tel örgü kompoziti oluşturuldu ve ısıtıcı etrafına konularak deneyler yapıldı. İncelenen bu durumlar birbiriyle kıyaslandı. Son olarak FDM/bakır tel örgü kompozitinin FDM ısı iletim katsayısının artırılmasına katkısı yorumlandı.

### 3.1. Isıtıcı Yüzeyinde Enerjinin Korunumunun Doğrulanması

Bu deney, doğal taşınım ortamında FDM kullanılmadan ısıtıcıya verilen gücün fişek ısıtıcıdan doğal taşınım ile atılan ısıya eşit olduğu doğrulanmak amacı ile yapılmıştır. Isıtıcı yüzey sıcaklığının doğal taşınım ortamında sürekli rejime gelene kadar zamanla değişimi grafiği çizilerek incelenmiştir. Şekil 6'da ısıtıcıdan 1.30 W ısı üretilmesi durumunda doğal taşınım ortamında yüzey sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 6. FDM olmadığı durumda ısıtıcı yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Doğal taşınım ortamında ısıtıcıdan 1.30 W ısı üretilmesi durumunda Şekil 6'te görüldüğü üzere yaklaşık 4000. saniyede sistem sürekli rejime girmiştir. Bu saniyeden sonra sisteme verilen güç ile doğal taşınım yolu ile ortama atılan ısının eşit olmasından dolayı ısıtıcı yüzey sıcaklığı sabit kalmıştır. Fişek ısıtıcıdan doğal taşınım ile ortama atılan ısı *Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine (2007)* kaynağından uygun korelasyonlar kullanılarak hesaplanarak fişek ısıtıcıya verilen güç ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada ısıtıcı yüzeyi alüminyum bant ile kaplandığından ışınım etkisi ihmal edilmiştir. Rayleigh sayısı,

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.1)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Burada  $g$  yerçekimi ivmesi ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ ),  $\beta$  hacimsel ısı genleşme katsayısı ( $1/317.4 \text{ K}^{-1}$ ),  $T_s$  yüzey sıcaklığı ( $333.95 \text{ K}$ ),  $T_\infty$  ortam sıcaklığı ( $300.8 \text{ K}$ ),  $L$  geometriye ait karakteristik uzunluk ( $L=0.065 \text{ m}$ ),  $\nu$  kinematik viskozite ( $17.39 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ),  $\alpha$  ısı yayılım katsayısıdır ( $24.45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ).  $Ra_L=661770 \leq 10^9$  olması nedeni ile doğal hava akışı laminardır. Nusselt sayısı,

$$\overline{Nu} = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} = 15.32 \quad (3.2)$$



korelasyonu ile hesaplanmıştır. Burada Pr Prandtl sayısını, h doğal taşınım katsayısını, k ısı iletim katsayısını göstermektedir. Hesaplamalarda termofiziksel özellikler  $T_{\text{film}} = (T_s + T_\infty)/2$  sıcaklığında alınmıştır. Popiel (2008) silindirik yüzeylerde bu korelasyonların kullanılabilmesi için Denklem 3.3'teki koşulun sağlanması gerektiğini belirtmiştir.

$$\frac{D_0}{L} > \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \quad (3.3)$$

Koşul sağlanmadığı için Denklem 3.4 ile silindirik ısıtıcının düz plaka oranının hesaplanması gerektiğini belirtmiştir.

$$\frac{\overline{Nu}_L}{\overline{Nu}_{L-FP}} = 1 + 0.300 \left[ 32^{0.5} Gr_L^{-0.25} \frac{L}{D_0} \right]^{0.909} \quad (3.4)$$

Burada  $Gr_L$  Grashof sayısını ( $D_0$  ısıtıcı çapını göstermektedir. Burada  $L$  olarak hesaplanır. Taşınım katsayısı,

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} = \frac{17.56 \times 0.027}{0.065} = 7.4 \frac{W}{m^2 K} \quad (3.5)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Sistemden doğal taşınım ile uzaklaştırılan ısı,

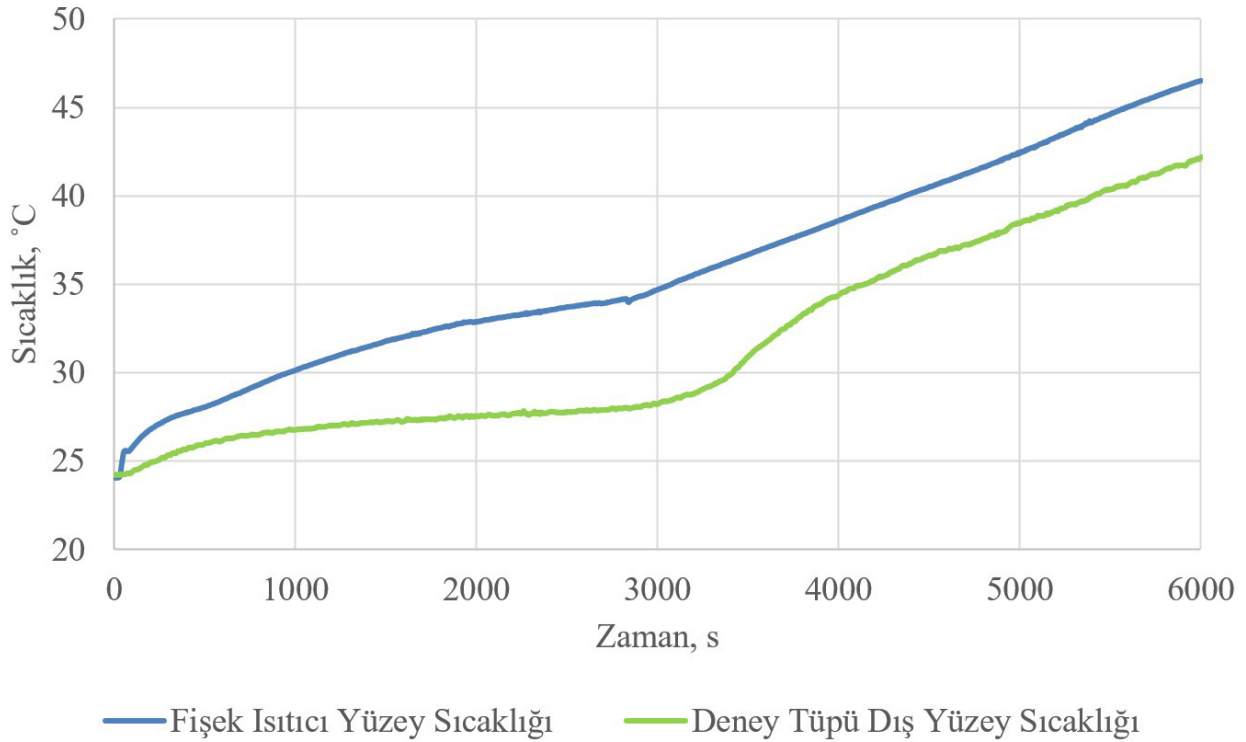
$$Q = \bar{h} A (T_s - T_\infty) = 1.3026 W \quad (3.6)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Burada A (0.005309 ) ısıtıcı ısı transfer yüzey alanıdır.

Hesaplamalarda ısıtıcı alt ve üst yüzey alanları çok küçük olduğu için buralardan gerçekleşen ısı transferi ihmal edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda ısıtıcıdan 1.30W ısı üretimi değeri için doğal taşınım ile atılan ısının sisteme verilen güç arasındaki farkın %1'den az olduğu hesaplandı.

### 3.2. Isıtıcı Etrafına Yalnız FDM Konulması Durumunda Isıtıcı Yüzey Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi

Şekil 2'de görüldüğü gibi oluşturulan deney düzeneğinde silindirik ısıtıcı etrafına yalnız FDM (CT29) konulması ve ısıtıcıda 1.30W ısı üretilmesi durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığının ve deney tüpü dış yüzey sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Isıtıcı ve deney tüpü dış yüzey sıcaklığının değişimi (CT29)

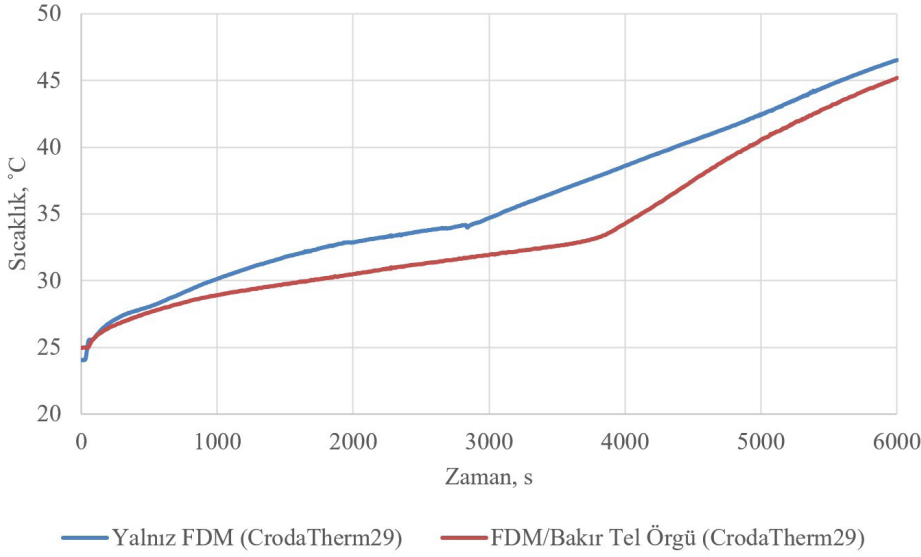
FDM ergime sıcaklığına geldikten sonra ısıtıcıdan çıkan ısı FDM’de gizli ısı olarak depolanmıştır. Bu sayede, ısıtıcı yüzey sıcaklığı daha yavaş artış göstermiştir. FDM sıcaklığı ve deney tüpü dış yüzey sıcaklığı da FDM ergimesi sırasında yavaş bir şekilde artmıştır. Isıtıcıda 1.30W ısı üretilmesi durumunda yaklaşık 3000. saniyede ergime tamamlanmıştır ve FDM ergime bölgesinde FDM ısı depolama özelliğinden dolayı üretilen ısı FDM’de depolanmış ve ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile deney tüpü dış yüzey sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı artmıştır. 3000. saniyeden sonra FDM’nin faz değişimi tamamlanmış ve bu süreden sonra gizli ısı depolayamamasından dolayı deney tüpü dış yüzey sıcaklığı hızlı bir şekilde artarak ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile arasındaki sıcaklık farkı azalmıştır. FDM ergimesi tamamlandıktan sonra ısıtıcı yüzey sıcaklığı ve deney tüpü dış yüzey sıcaklığındaki artış daha hızlı olmuştur. Bunun nedeni FDM sıvı fazında iken duyulur ısı ile enerji depolamasıdır. Aynı zamanda FDM ısı iletim katsayısının düşük olmasından dolayı FDM ergimesi sırasında ısı FDM içerisinde hızlı iletilmemesinden dolayı ısıtıcı yüzey sıcaklığı yeterince stabil kalmamıştır.

### 3.3. Isıtıcı Etrafına FDM/Bakır Tel Örgü Kompoziti Konulması Durumunda Isıtıcı Yüzey Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişiminin İncelenmesi

Bu kısım doğrudan ısıtıcı yüzey sıcaklığının ve ısıtıcı ile FDM’nin konduğu kabın yüzey sıcaklıkları farkının incelenmesi şeklinde iki alt başlık halinde incelenmiştir.

#### 3.3.1. Isıtıcı Yüzey Sıcaklığı İncelemesi

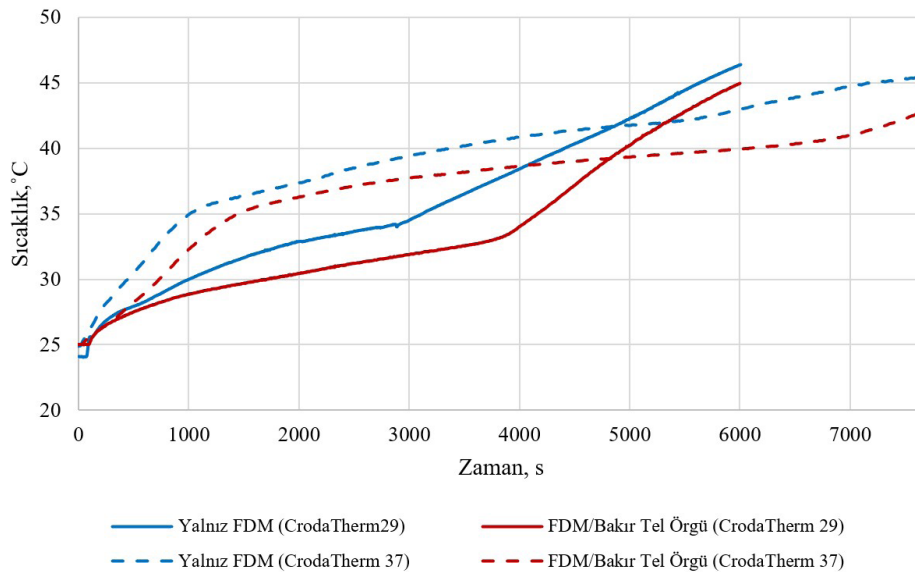
Doğal taşınım ortamında yalnız FDM ve FDM ısı iletim katsayısı bakır tel örgü ile artırılmış FDM/bakır tel örgü kompoziti silindirik ısıtıcı etrafına konulması ve ısıtıcıdan 1.30W ısı üretilmesi durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Isıtıcı yüzey sıcaklığının değişimi,  $Q=1.3$  W

Şekil 8’de görüldüğü gibi ısıtıcı yüzey sıcaklığı her iki durumda da FDM ergime bölgesine kadar hızlı bir şekilde artmıştır. FDM ısı iletim katsayısında iyileştirme yapıp yapılamadığını anlamak için ergime bölgesinde sıcaklığın zaman ile değişimini incelemek gerekir. Lazrak, Fourmigué ve Robin, (2018) lityum iyon pillerin FDM ile pasif soğutulması konusunda sayısal bir çalışma gerçekleştirmiş. Bu çalışmada, ısı iletim katsayısı yüksek olan FDM için pil yüzey sıcaklığının zamana göre artışı ( $dT_{pil}/dt$ ) daha küçük olmuştur. Şekil 8’de FDM/bakır tel örgü kompozitinin kullanımının FDM katı durumda iken ısı iletim katsayısının iyileştirilmesine katkı sağladığı görülmüştür. Ergime bölgesinde, pil sıcaklıkları arasındaki farkı 3820. saniyede en yüksek değerine ulaşarak  $4.6^{\circ}\text{C}$ ’ye çıkmıştır. Ancak, FDM tamamen sıvı faza geçtikten sonra bakır tel örgü kullanılan ve kullanılmayan durumlarda sıcaklık farkı azalmıştır. Bunun nedeni, bakır tel örgü kullanımının deney tüpü içerisindeki akışkan hareketini engellediği ve dolayısıyla doğal taşınım ısı transferi etkisinin azalmasıdır. Diğer bir nedeni, tel örgü nedeni ile daha az (yaklaşık %11.4 oranında) FDM kullanılmıştır. Böylece FDM/bakır tel örgü kompozitinin duyulur ısı depo etme kapasitesi azalmıştır (FDM’nin sıvı fazda özgül ısı değeri bakırinkinin 3.5 katıdır).

Fişek ısıtıcı etrafına farklı ergime sıcaklıklarına sahip (CT29 ve CT37) yalnız FDM ve FDM/bakır tel örgü kompoziti konulması durumlarında ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 9’de görülmektedir. Bu durumda ısıtıcıda  $1.30\text{W}$  ısı üretilmiştir.

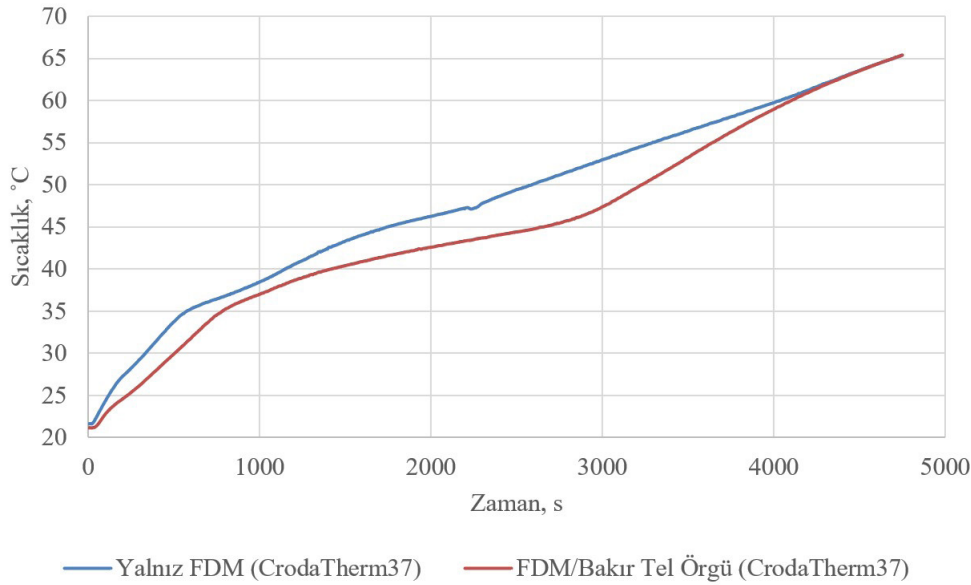


Şekil 9. Isıtıcı yüzey sıcaklığının değişimi,  $Q=1.3$  W

CT29'un düşük ergime sıcaklığı sayesinde ısıtıcı yüzey sıcaklığı CT37'ye kıyasla daha düşük tutulmuştur. Ancak iki faz bölgesinde deney tüpü dış yüzey sıcaklığı da daha düşük seviyede seyrettiğinden (ergime sıcaklığı daha düşük) dış ortama transfer edilen ısı düşük seviyede olacaktır. FDM olarak CT37'nin kullanıldığı durumda, ergime bölgesinde ısıtıcı sıcaklığı CT29 kullanılan sisteme göre yüksek olsa da yüksek ergime sıcaklığı sayesinde çevreye geçen ısı daha fazladır. Bu nedenle CT37 için ergime daha uzun sürede gerçekleşerek pil güvenli sıcaklık aralığında daha uzun süre tutulabilmiştir.

CT29'un kullanıldığı düzeneklerde, ergime bitimi sonrası ısıtıcı yüzey sıcaklığı hızlı bir artış göstererek 4820. saniyeden sonra hem yalnız FDM hem de kompozit düzenek için CT37 kullanılan sistemleri geçmiştir. CT37'nin ergime sıcaklığının CT29'tan yüksek olmasından dolayı duyulur ısı kapasitesi de yüksektir. Bu nedenle ergime daha geç başlamaktadır. Ayrıca her iki durumda da FDM ısı iletim katsayısının bakır tel ile artırılması ısıtıcıdan uzaklaştırılan ısının fazla olmasını (ısıtıcıda depolanan ısının daha az olmasını) sağlamıştır. Bu nedenle bakır tel örgü kullanımı her iki FDM ile oluşturulan sistem için de ısıtıcı yüzey sıcaklığını düşürmüştür. FDM/bakır tel örgü kompozitinin CT29 ile oluşturulması durumunda ergime yaklaşık 3900. saniyede tamamlanmıştır. CT37 ile oluşturulması durumunda ergime yaklaşık 7000. saniyede tamamlanmıştır. CT37/bakır tel örgü kompoziti CT29/ bakır tel örgü kompozitine kıyasla ısıtıcı yüzey sıcaklığını 6000. saniyede 5°C sıcaklık daha düşük tutulabilmiştir.

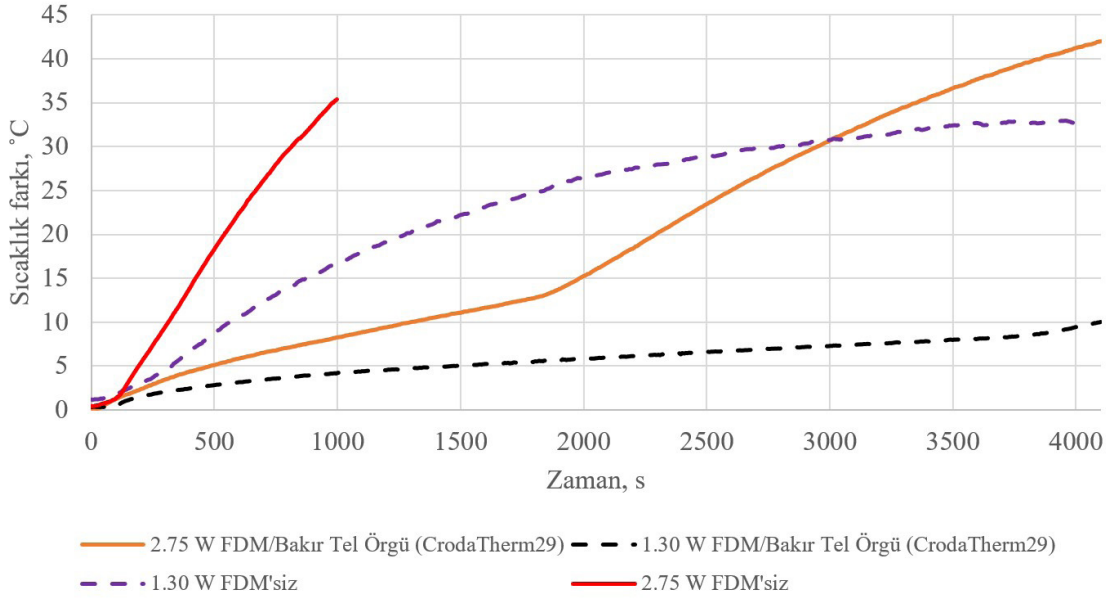
Isıtıcıdan 2.75W ısı üretimi durumunda ısıtıcı etrafına yalnız FDM (CT37) ve FDM/bakır tel örgü kompoziti (CT37) oluşturulması durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi eş zamanlı deneyler sonucu Şekil 10'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 10. Isıtıcı yüzey sıcaklığının değişimi, Q=2.75 W

Isıtıcıda 2.75 W ısı üretimi durumunda FDM ergime sıcaklığına, 1.30 W durumuna kıyasla daha hızlı ulaşmıştır. Yalnız FDM kullanılması durumunda katı ve ergime bölgesinde ısıtıcı yüzey sıcaklığı FDM/bakır tel örgü kompoziti kullanılmasına kıyasla daha yüksek olmuştur. 1.30 W ısı üretilmesi durumunda (Şekil 8) belirtildiği üzere FDM ergimesi tamamlandıktan sonra bakır tel örgünün deney tüpü içerisindeki sıvı halde olan FDM hareketini engellemesinden dolayı taşınım katsayısını düşürmüştür. Bu nedenle FDM tamamen sıvı faza eridikten sonra FDM/bakır tel kompoziti ısıtıcı yüzey sıcaklığı yalnız FDM koyulduğu duruma kıyasla daha hızlı artış göstermiştir. Yaklaşık 4300. saniyede her iki durumdaki ısıtıcı yüzey sıcaklıkları eşitlenmiştir. Bakır tel örgü kullanılması sayesinde ergime bölgesinde ısıtıcı yüzey sıcaklığının zamana göre artışı yalnız FDM kullanılması durumuna kıyasla daha yavaş olmasını sağlamıştır. Ayrıca bakır tel örgü katı durumda FDM ısı iletim katsayısını artırmasından dolayı doğal taşınım ile ortama atılan ısı artmıştır ve FDM ergimesi daha geç başlamıştır. Ayrıca ısı iletim katsayısının artırıldığı durumda FDM ergime süresi daha uzun olmuştur. FDM/Tel kullanımı sistemin 50°C sıcaklığa ulaşması için geçen zamanı yaklaşık %27 artırmıştır. Aynı zamanda deşarj sırasında pil sıcaklığının daha düşük seviyede kalmasını sağlamıştır.

Isıtıcı etrafına FDM (CT29)/bakır tel örgü konulması ve FDM konulmaması (doğal taşınım) durumunda 2C ve 3C deşarjı için lityum iyon pilin yüzey sıcaklığının zamanla nasıl arttığını göstermek amacı ile ısıtıcıdan 1.30W ve 2.75W ısı üretilmesi için gerekli güç verilmiştir. Şekil 11’de ısıtıcı yüzey sıcaklığından ortam sıcaklığının çıkartılması ile ısıtıcı sıcaklığının zamanla artışı görülmektedir.



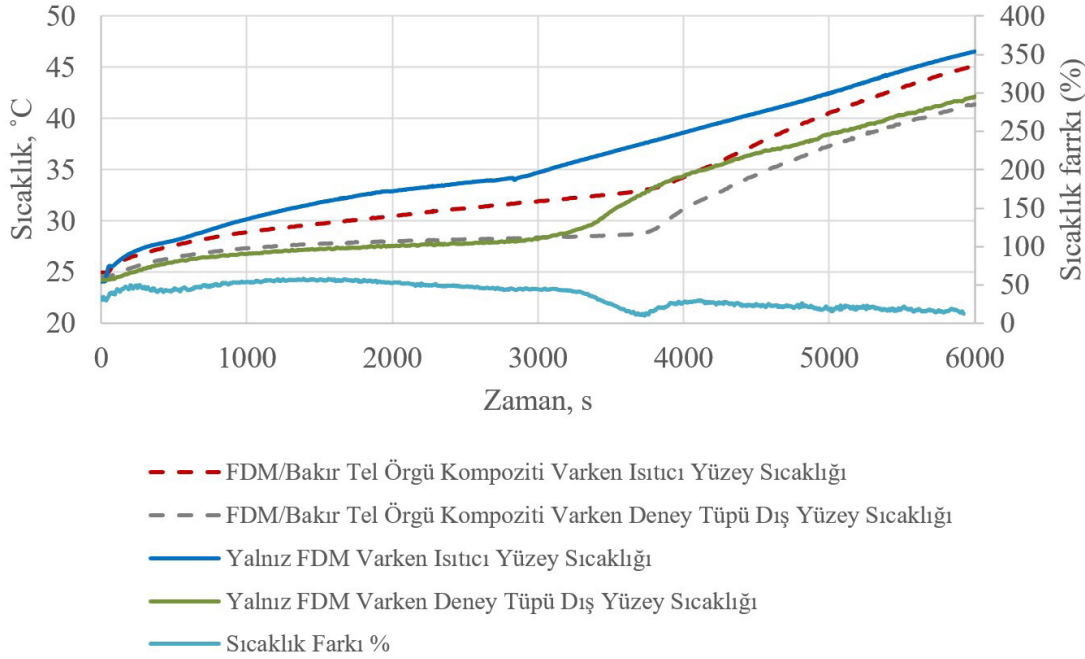
Şekil 11. Isıtıcı yüzey sıcaklığının değişimi

Şekil 11’de doğrudan ısıtıcı sıcaklığı yerine sıcaklık farkı kullanılmasının nedeni yapılan deneylerde ortam sıcaklıklarının birbirinden az da olsa farklı ( $24.5^{\circ}\text{C} \leq T_{\infty} \leq 26.4^{\circ}\text{C}$ ) olmasıdır. Böylece bu etki büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Şekil 11’de görüldüğü üzere ısıtıcıda 1.30 W ve 2.75 W ısı üretimi için yapılan deneylerde ısıtıcı etrafına FDM/bakır tel örgü kompoziti konulması ve ısıtıcının çıplak bir şekilde durağan hava ortamına bırakıldığı iki durum arasında ısıtıcı yüzey sıcaklığı arasında önemli ölçüde fark vardır. Isıtıcıda 1.30 W ısı üretimi durumunda doğal taşınım ortamında 4000. saniye sonunda FDM kullanılmadığı durumda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı  $32.73^{\circ}\text{C}$  iken FDM/bakır tel örgü kompoziti kullanılması durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı  $9.4^{\circ}\text{C}$ ’dir. Isıtıcıda 1.30 W ısı üretimi durumunda 4000. saniye sonunda FDM kullanılmadığı zaman FDM/bakır tel örgü kompozitinin kullanıldığı durum kıyaslandığında sıcaklık farkı  $23.33^{\circ}\text{C}$  olmuştur. Isıtıcıda 2.75 W ısı üretimi için; doğal taşınım ortamında 1000. saniye sonunda FDM kullanılmadığı durumda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı  $35.39^{\circ}\text{C}$  iken FDM/bakır tel örgü kullanılması durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı  $8.27^{\circ}\text{C}$ ’dir. Bu sayede 1000. saniyede bakır tel örgü kullanımı ile ısıtıcı yüzey sıcaklığı  $27.12^{\circ}\text{C}$  daha düşük tutulabilmiştir. Isıtıcıdan uzaklaştırılan ısının FDM faz değişimi sırasında gizli ısı olarak depolanması sayesinde ısıtıcı yüzey sıcaklığı düşürülmüştür. Kompozit sistem kullanımı sonucu pil/ısıtıcı’nın yaklaşık olarak  $50^{\circ}\text{C}$ ’ye ulaşma zamanı; 2.75 W ısı üretimi durumunda 700s’den 2600s’ye kadar uzatılmıştır. 1.30W’lık ısı üretimi durumunda ise kompozit kullanımı sonucu ısıtıcı/pil sıcaklığı tehlikeli bölgenin çok uzağındadır. Yalnızca doğal taşınım (FDM’siz) ile soğutma yapıldığında pil yalnızca 1840 s  $50^{\circ}\text{C}$  sıcaklığın altında kalabilmektedir.

### 3.3.2. Isıtıcı Yüzey Sıcaklığı ile Deney Tüpü Dış Yüzey Sıcaklığı Arasındaki Sıcaklık Farkına Etkisi

Isıtıcı etrafına yalnız FDM ve FDM/bakır tel örgü kompoziti koyulması durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile deney tüpü dış yüzey sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 12’de gösterilmiştir. Bu grafikte verilen sonuçlar FDM olarak CT29 kullanılmasına ait sonuçlardır.





Şekil 12. Isıtıcı ve deney tüpü dış yüzey sıcaklığının değişimi, Q=1.3 W (CT29)

Şekil 12'de ikinci eksen yüzde sıcaklık düşüşü olarak tanımlanmıştır. Burada sıcaklık düşüşü ifadesi FDM/Bakır tel örgü kullanılması durumundaki sıcaklık farkının (ısıtıcı - deney tüpü dış yüzey) yalnız FDM konulmasına durumundaki sıcaklık farkına (ısıtıcı - deney tüpü dış yüzey) kıyasla % değişimi olarak gösterilmiş halidir. Her ne kadar zamana bağlı ısı sistemlerinde ısı direnç kavramı kullanılsa da deney tüpü ve ısıtıcı arasındaki sıcaklık farkı FDM+cam için ısı iletim direnci hakkında fikir verecektir. Sürekli rejimdeki ısı sistemlerinde ısı direnç [Denklem 3.7](#)'deki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_{\text{ısıtıcı}} - T_{\text{cam,dış}}}{Q} \quad (3.7)$$

Burada  $\Delta T$  ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile deney tüpü dış yüzey sıcaklığı arasındaki farkı, Q faz değişim malzemesinden radyal yönde geçen ısıyı göstermektedir.

Şekil 12'de görüldüğü üzere FDM/bakır tel örgü konulması durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile deney tüpü dış yüzey sıcaklığı arasındaki fark, yalnız FDM konulması durumuna kıyasla daha az olmuştur. Sonuçları Şekil 12'de sunulan deneyden bağımsız olarak; sürekli rejimde, FDM'nin katı fazda olduğu durumda bakır tel örgü kullanımının FDM/tel+cam ısı direncini %52 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kompozit için yüzey ile cam arasındaki sıcaklık farkı diğer duruma göre hep daha azdır. Tamamen sıvı faza geçildikten sonra bu fark giderek azalmıştır. Bunun nedeni ise içerisinde bakır tel olmayan sistemde FDM bölgesinde doğal taşınım etkili olmuştur. Kompozit sistemde ise bakır tel örgü sıvı fazdaki FDM'nin hareketini engellemekte ve doğal taşınım ile ısı transferini olumsuz etkilemektedir. Yine Şekil 12'de sunulan deneyden bağımsız olarak; sürekli rejimde, FDM'nin sıvı fazda olduğu durumda bakır tel örgü kullanımının FDM/tel+cam ısı direncini %30.3 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bakır tel örgü kullanımı sıvı fazda sistemin ısı performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Yalnız FDM koyulduğu durumda ergime bittiği anda (2900 s) ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile deney tüpü dış yüzey sıcaklığı arasındaki maksimum sıcaklık farkı 6.7°C olurken, FDM/bakır tel örgü konulması durumunda ergime bittiği anda (3900 s) maksimum sıcaklık farkı 4°C olmuştur. Sıcaklık farkının azalması iletim direncinin azaldığını/ısının daha iyi iletildiğini göstermiştir. Isıtıcının farklı düzeneklerle durağan hava ortamında (doğal taşınım) soğutulurken kritik sıcaklığa erişme süreleri [Tablo 3](#)'te özetlenmiştir.

Tablo 3

Pil/ısıtıcı'nın kritik sıcaklığa erişme süreleri

	40°C				45°C				50°C	
	2C / 1.30W		3C / 2.75W		2C / 1.30W		3C / 2.75W		2C/ 1.30W	3C / 2.75W
	Süre, s	% artış	Süre, s	% artış	Süre, s	% artış	Süre, s	% artış	Süre, s	% artış
<b>FDM'siz</b>	755		400		1115		515		1590	635
<b>CT29</b>	4355	477	1600	300	5575	400	2015	290	2475	290
<b>CT37</b>	3355	344	1150	187	7155	541	1745	238	2590	308
<b>CT29/ Tel Örgü</b>	4915	551	2030	407	5960	435	2330	352	2640	316
<b>CT37/ Tel Örgü</b>	6065	703	1425	256			2665	417	3235	409

Tablo 3'te görüldüğü üzere, bakır tel örgü kullanımı sayesinde pilin kritik sıcaklıklara ulaştığı sürenin arttırılması her iki FDM için de başarılıdır. Ergime noktası 37°C civarı olan FDM için daha başarılı sonuçlar elde edilmesinin nedeni, diğer CT29'a kıyasla belirtilen sıcaklıklara erişinceye kadar katı fazda daha uzun süre kalmasıdır.

#### 4. Sonuçlar

Sürekli rejim koşullarında ve FDM katı halde iken yürütülen deneyler sonucu; FDM/bakır tel örgü kompoziti sayesinde yalnız FDM kullanılması durumuna kıyasla FDM/tel+cam ısı direncini %52 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Sürekli rejimde, FDM'nin sıvı fazda olduğu durumda bakır tel örgü kullanımının FDM/tel+cam ısı direncini %30.3 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Isıl dirençteki bu artış FDM hareketinin tel örgü nedeniyle kısıtlanmış olmasındandır. Bu yüzden doğal taşınım ile ısı transferi negatif yönde etkilenmektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu FDM/tel kompoziti katı ve katı+sıvı bölgelerinde avantaj sağladığı fakat FDM tamamen ergidikten sonra bu avantajı kaybettiği gözlemlendi. Ayrıca FDM-bakır tel örgü kompoziti sayesinde düzenekte kullanılan FDM'nin azalması ile maliyet yaklaşık %15 azalmıştır. 2.75 W ısı üretimi durumunda ise 1000. saniye sonunda FDM(CT29)/bakır tel örgü kompoziti konulması durumunda FDM kullanılmadığı duruma kıyasla sıcaklık 27.12°C düşük olmuştur. Bu sonuç ile FDM/tel örgünün 3C gibi deşarj oranlarında kullanımının kaçınılmaz olduğunu anlıyoruz. 2C ve 3C deşarj oranları için piller doğal taşınım ortamında (FDM kullanılmaksızın 40°C'nin altında sırasıyla 755 s ve 400 s kalabilmektedir. 2C deşarj oranı için bu süre CT37/Tel örgü kullanılarak %703 artırılabilmiştir. FDM/Bakır tel örgü kompozitinin CT29 ile oluşturulması durumunda (1.3 W ısı üretimi) ısıtıcı yüzey sıcaklığı CT37 ile oluşturulmasına kıyasla ergime sırasında ısıtıcı yüzey sıcaklığı daha düşük sıcaklıkta tutulabilmiştir. Ergimenin tamamlanması ile ısıtıcı yüzey sıcaklığı hızlı bir şekilde artış göstermiş ve 4820. saniyede CT37 kullanıldığı durumu geçmiştir. Bu nedenle, kısa süreli deşarj durumunda 29°C'de ergiyen FDM kullanımı, uzun süreli çevrim şeklinde şarj/deşarj (2C şarj esnasında 1.3 W ısı üretimi gerçekleşir, [Türkakar 2021](#)) durumunda 37°C'de ergiyen FDM kullanımı tercih edilebilir.

#### Teşekkür

Bu çalışmada kullanılmak üzere faz değişim malzemesi temini konusunda yardımcı olan Croda Kimya Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkür ederiz.

#### Yazar Katkıları

Satılmış Tekin: Veri toplamış, temel grafikleri hazırlamış ve çalışmanın ilk taslağını yazmıştır.

Göker Türkakar: Çalışmayı organize etmiş, deneylerin yürütülmesinde zaman zaman katkıda bulunmuş ve taslağın son haline getirilmesini sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

## Kaynaklar

- Al-Alawi, B. M., ve Bradley, T. H. (2013). Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.048>
- Bergman, T. L., Lavigne, A. S., Incropera, F. P., ve Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Aerospace Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022>
- Croda Kimya Tic. Ltd. Sti, Phase change material data sheet, retrieved from [https://www.crodatherm.com/en-gb/products-and-applications/product-finder/product/981/Crodatherm\\_1\\_29](https://www.crodatherm.com/en-gb/products-and-applications/product-finder/product/981/Crodatherm_1_29).
- Duan, X., ve Naterer, G. F. (2010). Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(23–24), 5176–5182. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.044>
- Galazutdinova, Y., Ushak, S., Farid, M., Al-Hallaj, S., & Grágeda, M. (2021). Development of the inorganic composite phase change materials for passive thermal management of Li-ion batteries: Application. *Journal of Power Sources*, 491(January). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229624>
- Gürbüz, Y., ve Kulaksız, A. A. (2016). Elektrikli Araçlar ile Klasik İçten Yanmalı Motorlu Araçların Çeşitli Yönlerden Karşılaştırılması Comparison of Conventional Internal-Combustion Engine Vehicle and Electric Vehicles in Various Aspects. *Dergipark*, 6(2016), 117–125. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/225549>
- He, F., Wang, H., ve Ma, L. (2015). Experimental demonstration of active thermal control of a battery module consisting of multiple Li-ion cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 630–639. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.069>
- Heyhat, M. M., Mousavi, S., ve Siavashi, M. (2020). Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle. *Journal of Energy Storage*, 28(December 2019), 101235. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101235>
- Hémery, C. V., Pra, F., Robin, J. F., ve Marty, P. (2014). Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material. *Journal of Power Sources*, 270, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.147>
- Heyhat, M. M., Mousavi, S., & Siavashi, M. (2020). Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle. *Journal of Energy Storage*, 28(December 2019), 101235. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101235>
- Jeon, D. H., ve Baek, S. M. (2011). Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 2973–2981. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.013>
- Jiang, G., Huang, J., Fu, Y., Cao, M., ve Liu, M. (2016). Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-ion battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1119–1125. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.197>
- Khan, Z., Khan, Z., ve Ghafoor, A. (2016). A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. *Energy Conversion and Management*, 115, 132–158. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.04>
- Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R., ve Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 194(2), 1105–1112. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.074>
- Lazrak, A., Fourmigué, J. F., ve Robin, J. F. (2018). An innovative practical battery thermal management system based on phase change materials: Numerical and experimental investigations. *Applied Thermal Engineering*, 128, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.172>
- Li, W. Q., Qu, Z. G., He, Y. L., ve Tao, Y. B. (2014). Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials. *Journal of Power Sources*, 255, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.006>

- Mehrali, M., Latibari, S. T., Mehrali, M., Metselaar, H. S. C., ve Silakhori, M. (2013). Shape-stabilized phase change materials with high thermal conductivity based on paraffin/graphene oxide composite. *Energy Conversion and Management*, 67, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.023>
- Popiel, C. O. (2008). Free convection heat transfer from vertical slender cylinders: A review. *Heat Transfer Engineering*, 29(6), 521–536. <https://doi.org/10.1080/01457630801891557>
- Qu, Z. G., Li, W. Q., ve Tao, W. Q. (2014). Numerical model of the passive thermal management system for high-power lithium ion battery by using porous metal foam saturated with phase change material. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(8), 3904–3913. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.136>
- Rao, Z., Huo, Y., Liu, X., ve Zhang, G. (2015). Experimental investigation of battery thermal management system for electric vehicle based on paraffin/copper foam. *Journal of the Energy Institute*, 88(3), 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.09.006>
- Rao, Z. H., Wang, S. F., ve Zhang, Y. L. (2014). Thermal management with phase change material for a power battery under cold temperatures. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 36(20), 2287–2295. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.576411>
- Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J. R., ve Al-Hallaj, S. (2008). Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution. *Journal of Power Sources*, 182(2), 630–638. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082>
- Speirs, J., Contestabile, M., Houari, Y., ve Gross, R. (2014). The future of lithium availability for electric vehicle batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.018>
- Sun, Z., Fan, R., ve Zheng, N. (2021). Thermal management of a simulated battery with the compound use of phase change material and fins: Experimental and numerical investigations. *International Journal of Thermal Sciences*, 165(February 2020), 106945. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106945>
- Tuncay N., ve Üstün Ö. (2021). Elektrikli araçlarda geçmişten geleceğe bakış, *MÜSİAD Otomotiv Sektör Kurulu Raporu, İstanbul*. Erişim adresi: [https://www.musiad.org.tr/uploads/yayinlar/arastirma-raporlari/pdf/otomotiv\\_sektor\\_raporu\\_2012.pdf](https://www.musiad.org.tr/uploads/yayinlar/arastirma-raporlari/pdf/otomotiv_sektor_raporu_2012.pdf)
- Türkakar G., (2021). Thermal analysis and parametric investigation of PCM-air cooled lithium-ion battery pack. *JOURNAL OF HEAT TRANSFER-TRANSACTIONS OF ASME*. <https://doi.org/10.1115/1.4052154>
- Özdemir, T., Amini, A., Ekici, Ö., ve Köksal, M. (2021). Experimental Assessment of the Lumped Lithium Ion Battery Model at Different Operating Conditions. *Heat Transfer Engineering*, 0(0), 1–16. <https://doi.org/10.1080/01457632.2021.1874666>
- Väyrynen, A., ve Salminen, J. (2012). Lithium ion battery production. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 46, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2011.09.005>
- Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., ve Wei, Z. (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied Energy*, 134, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>
- Wang, Q., Rao, Z., Huo, Y., ve Wang, S. (2016). Thermal performance of phase change material/oscillating heat pipe-based battery thermal management system. *International Journal of Thermal Sciences*, 102, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.11.005>
- Xu, T., Ling, Z., Zhang, Z., Gao, X., Fang, X., Chen, J., & Wang, S. (2014). Experimental and numerical investigation of the application of phase change materials in a simulative power batteries thermal management system. *Applied Energy*, 121, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.075>
- Zhang, T., Gao, C., Gao, Q., Wang, G., Liu, M. H., Guo, Y., ... Yan, Y. Y. (2015). Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC. *Applied Thermal Engineering*, 88, 398–409. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.001>