







Faz Değiştiren Malzeme Olarak Ötektik Su-Tuz Çözeltileri ile Soğutma Sistem Performansının Deneysel İncelenmesi

Berçem Kiran-Yıldırım¹ , Gökçe Güner Karaali² , Özgenur Yayla³ , Elif Yıldız⁴ ,
Ebru Mançuhan⁵ , Sibel Titiz-Sargut⁶ 

^{1,2,3,4,5,6}Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Tarihi

Gönderim: 04 Kasım 2023

Kabul: 08 Şubat 2024

Yayın: 25 Haziran 2024

Araştırma Makalesi

Öz – Ev-tipi buzdolapları yaygın kullanılan beyaz eşyalar arasında yer alması ve sürekli çalışmaları sebebiyle yüksek miktarda enerji tüketiminden sorumludurlar. Ev-tipi buzdolabının performansını incelemek için laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi ortalama 4°C sıcaklıkta faz değiştiren malzemesiz (FDM'siz) ve çeşitli FDM'lerle test edilmiştir. FDM olarak ötektik su-tuz çözeltilerinden dipotasyum hidrojenfosfat (K_2HPO_4) ve sodyum tiosülfat ($Na_2S_2O_3$) çözeltileri farklı konsantrasyonlarda sisteme entegre edilmiştir. FDM'siz durumda %18,8 tespit edilen çalışma süresinin FDM olarak, uygun konsantrasyonlarda hazırlanan ötektik su-tuz çözeltileri ile azaldığı ortaya konulmuştur. FDM olarak ağırlıkça (ağ.) %2,0 K_2HPO_4 çözeltisi ile çalışma süresi (%) minimize edilmiştir. Çalışma süresi ağ. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisi ile %11,1 olarak tespit edilmiştir. FDM'siz durumda sistemin 4 saatlik çalışma süresinde belirlenen toplam enerji tüketimi ağ. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisi ile yaklaşık %46 oranında azaltılmıştır. Elektrik kesintisinin simüle edildiği durumda ise FDM'ler sisteme entegre edildiğinde kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına (16°C) yükselme süresinin uzadığı ve maksimum olduğu durumda bu süresinin FDM'siz duruma göre yaklaşık 5 kat uzadığı belirlenmiştir. Tüm değerlendirmeler uygun FDM'nin ev-tipi buzdolaplarına entegrasyonun enerji tüketiminin azaltılmasında önemli rol oynayacağı ortaya konulmuştur. Elektrik kesintisi periyodunda, kabin içindeki ürünlerin uzun süre bozunmadan muhafaza edilmesi FDM'lerin sistemlere entegrasyonunda sağlanacak diğer bir avantaj olacaktır.

Anahtar Kelimeler – Ev-tipi buzdolabı, faz değiştiren malzemeler, soğutma sistem performansı, ötektik su-tuz çözeltileri

Experimental Examination of Cooling System Performance with Eutectic Water-Salt Solutions as Phase Change Materials

^{1,2,3,4,5,6}Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Marmara University, İstanbul, Türkiye

Article History

Received: 04 Nov 2023

Accepted: 08 Feb 2024

Published: 25 Jun 2024

Research Article

Abstract – Household refrigerators are responsible for a huge amount of energy consumption due to their widespread use as household appliances and continuous operation. A laboratory-scale cooling system was operated at an average temperature of 4°C to investigate the performance of a household refrigerator without phase change material (PCM) and with various PCMs. Dipotassium hydrogen phosphate (K_2HPO_4) and sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) solutions were integrated into the system at different concentrations as eutectic water-salt solution PCMs. It was revealed that the running time, determined to be 18.8% without PCM, decreased with the eutectic water-salt solutions prepared at suitable concentrations as PCMs. The running time (%) was minimized with 2.0 wt.% K_2HPO_4 solution. The running time was determined to be 11.1% with 2.0 wt.% K_2HPO_4 solution. The energy consumption was reduced by approximately 46% with 2.0 wt.% K_2HPO_4 solution than that of the case without PCM for a 4-hour operating period of the system. In the case of simulating a power failure, it was also determined that the time for reaching the cabin air temperature to ambient temperature (16°C) was prolonged with

¹bercem.kiran@marmara.edu.tr (Corresponding Author); ²gokcekaraali@gmail.com; ³ozgenuryayla@marun.edu.tr; ⁴elifyildiz21@marun.edu.tr; ⁵emancuhan@marmara.edu.tr; ⁶sibel.sargut@marmara.edu.tr

PCMs, and it was maximized to a value of approximately 5 times longer than that of the case without PCM. All evaluations indicate that the integration of suitable PCM into household refrigeration is of great importance in terms of reducing energy consumption. The integration of PCMs into systems will provide another advantage by ensuring the long-term preservation of products inside the cabinet during a power failure period.

Keywords – Cooling system performance, eutectic water-salt solutions, household refrigerator, phase change materials

1. Giriş

Ev-tipi buzdolaplarının günümüzde neredeyse her evde kullanılmaları ve sürekli çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda önemli miktarda küresel enerjinin tüketiminden sorumlu oldukları bilinmektedir. Dünya çapında yaklaşık 1 milyar ev-tipi buzdolabı olduğu bilinmektedir [1]. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'de konut elektriğinin yaklaşık %14,0'ünün evlerde kullanılan buzdolaplarının tüketimine bağlı olduğu belirtilmiştir [2]. Malezya'da ise konut elektrik tüketiminin yaklaşık %26,0'sından buzdolapları-dondurucuların sorumluluğu olduğu ortaya konulmuştur [3]. Bu sistemlerin her geçen gün kullanımının daha da yaygınlaşması göz önünde bulundurulduğunda enerji tüketimlerinin azaltılması hem enerji kaynaklarının korunması hem de enerji maliyetinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Buzdolaplarının enerji tüketiminin bileşenlerinin verimliliğinden, ortam sıcaklığından, ürün yüklemesinden, kapı açılma sayısından, termostat ayar konumundan ve kompresör kapalı çevrimi sırasında soğutucu akışkan geçişinden etkilendiği belirtilmiştir [4]. Bu parametrelerin sistem enerji verimliliğine etkisini inceleyen farklı çalışmalar literatürde sunulmuştur. Liu vd. [5] yaptığı çalışmada, 10 saatlik çalışma periyodunda dondurucuyu her 40 dakikada bir defa, buzdolabı ünite kapağını ise her 12 dakikada bir defa 90° açıyla en az 5 saniye süre tutmak üzere açmışlardır. Bu durumun sistemde kapı açılmasının olmadığı duruma göre enerji tüketimini %10 arttırdığını ortaya koymuşlardır [5]. Buzdolabı bileşenleri dikkate alındığında ise, Bansal [6] laboratuvar ön testlerine göre değişken hızlı kompresörlerin kullanımının %40'a kadar enerji tasarrufu sağlama potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir. Ancak bu kompresörlerin geleneksel tek hızlı kompresörlere göre pahalı olduğu bilinmektedir.

Faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) faz değişimleri esnasında büyük miktarda ısıyı depolayabilen ve serbest bırakabilen malzemelerdir [7]. Bu malzemelerin soğutma sistemlerine entegre edilmesi de alternatif enerji tasarrufu sağlama yollarından biridir. Literatürde FDM'lerin soğutma sistemlere entegrasyonun sağladığı avantajların incelenmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur [8-10]. Bu çalışmalarda da görüleceği üzere FDM'lerin sistemlere entegre edilmesinde FDM'nin faz değişim sıcaklığı, kalınlığı, konumu ve miktarı gibi çeşitli parametreler göz önünde bulundurulmalıdır [7]. Pirvaram vd. [10] yaptığı çalışmada iki farklı faz değişim sıcaklığına sahip ötektik FDM'nin faz değişim sıcaklıklarının ve FDM miktarının ev-tipi dondurucunun enerji tüketimi ve sıcaklık dalgalanmalarına etkilerini incelemiştir. Toplam 6 rafa sahip ev-tipi buzdolabının üst 3 rafına yüksek faz değişim sıcaklığına sahip FDM yerleştirilirken, alt 3 rafına ise düşük faz değişim sıcaklığına sahip FDM yerleştirilmiştir. FDM'lerin birinin faz değişim sıcaklığı -18°C'de sabit tutulurken diğerinin faz değişim sıcaklığı -10°C'den -20°C'ye düşürülmesinin hem enerji tüketimini hem de sıcaklık dalgalanmasını azalttığı belirlenmiştir. Bu azalmanın hızının da FDM miktarından etkilendiği, belirli bir FDM miktarına kadar artışın olumlu etkilediği belirlenirken daha fazla artışın enerji tüketimini arttırdığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, enerji tüketiminin sisteme entegre edilen FDM'lerin faz değişim sıcaklığına ve miktarına oldukça bağlı olduğu tespit edilmiştir. Optimal değerlerin tespiti için, FDM-1 ve FDM-2 miktarı ve FDM-2'nin faz değişim sıcaklığı parametrelerini dikkate alarak yürüttüğü çalışmanın sonuçlarını merkezi kompozit tasarımına dayanan Yüzey Yanıt Metodu ile değerlendirilmiştir. Faz değişim sıcaklığı -18°C olan FDM'nin miktarının 1,97 kg iken diğer FDM'nin miktarı 1,57 kg iken -20°C faz değişim sıcaklığına sahip olduğu durumda enerji tüketim hızında azalmanın maksimize edildiği tespit edilmiştir [10].

Soğutma sistemlerinin çalışma koşullarına uygun FDM seçiminde belirtildiği gibi uygun faz değişim

sıcaklığına sahip olması en önemli parametrelerden biridir. FDM'ler organik ve inorganik olarak iki sınıfa ayrılabilirdiği gibi bu sınıflarda alt dal olarak bileşikler ve ötektikler olarak sınıflandırılabilirler [11]. Ötektik FDM'ler iki veya daha fazla bileşenden oluştuğu için (organik-organik, inorganik-organik, inorganik-inorganik) [12] faz değişim sıcaklıkları bileşenlerin ağırlıkça konsantrasyonlarının değiştirilmesiyle ayarlanabilme avantajına sahiptirler. Su, FDM olarak yüksek gizli ısıya sahip olması, termofiziksel özelliklerinin bilinmesi ve kararlılığı göz önünde bulundurulduğunda dikkate değer bir malzemedir [13]. Ancak çalışma koşulları göz önünde bulundurulduğunda faz değişim sıcaklığı sebebiyle her sistem için suyun uygun olmadığı bilinmektedir. Bu sebeple suyun faz değişim sıcaklığının ayarlanabilmesi amacıyla su-tuz ötektik karışımları hazırlanmaktadır. Ötektik su-tuz çözeltilerinde tuz konsantrasyonunun ayarlanmasıyla çalışma koşullarına uygun faz değişim sıcaklığına sahip FDM hazırlanabilmektedir. Kiran-Yildirim [9], yaptığı çalışmada ev-tipi buzdolabını simüle eden laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemini FDM'siz ve FDM olarak su ve N_2SO_4 çözeltileri ile test etmiştir. FDM'siz duruma göre FDM olarak suyun entegre edildiği durumda enerji tasarrufunu maksimize eden uygun FDM miktarı 600 mL olarak belirlenmiştir. Ardından belirlenen miktarda farklı konsantrasyonlarda N_2SO_4 çözeltileri (ağ.%1,0-4,0) sisteme entegre edilmiştir. Enerji tasarrufunun sisteme ağ.%1,0 N_2SO_4 çözeltisi entegre edildiğinde maksimize edildiği belirlenmiştir [9].

Bu çalışmamızda soğutma sistemlerinin enerji tüketimlerini incelemek için ev-tipi buzdolabının simüle edildiği laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi FDM'siz ve çeşitli FDM'lerle test edilmiştir. FDM olarak dipotasyum hidrojenfosfat (K_2HPO_4) ve sodyum tiyosülfat ($Na_2S_2O_3$) ötektik su-tuz çözeltileri farklı konsantrasyonları sisteme entegre edilmiştir. Ağırlıkça %36,8 K_2HPO_4 ve ağ.%30,0 $Na_2S_2O_3$ [14] ile hazırlanan ötektik su-tuz çözeltilerinin faz değişim sıcaklıkları ve gizli ısı değerleri sırasıyla $-13,5^\circ C$ (198 kJ/kg) ve $-11,0^\circ C$ (200 kJ/kg) olarak literatürde belirtilmiştir. Çalışmamızda kullanılan çözeltiler FDM olarak seçilirken faz değişim sıcaklıkları göz önünde bulundurulmuştur. FDM olarak ötektik su-tuz çözeltilerinin çalışma koşullarına uygun faz değişim sıcaklıklarının yanı sıra gizli ısı değeri, kinetik özellikleri vb. gibi özelliklerinin bileşik etkisi uygun FDM seçiminde dikkate alınması gerekmektedir. Malzemenin kinetik özellikleri olarak, sıvı fazda aşırı soğumanın önlenmesi için çekirdeklenme hızının ve ısının hızlı geri kazanımı için kristal büyüme hızının yüksek olması önemlidir [15-17].

Soğutma sistemi performansına FDM olarak ötektik su-tuz çözeltilerinin (ağ. %2-10 K_2HPO_4 ve $Na_2S_2O_3$ çözeltileri) etkilerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmanın amacı sistem performansını maksimize eden FDM'nin belirlenmesidir. Ayrıca, elektrik kesintisi esnasında sistem kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süresini maksimize eden en uygun çözeltinin önerilmesidir. Böylece soğutma sistem performansı FDM'siz ve FDM'lerle çalışma ve elektrik kesintisi periyodu için ortaya konulacaktır.

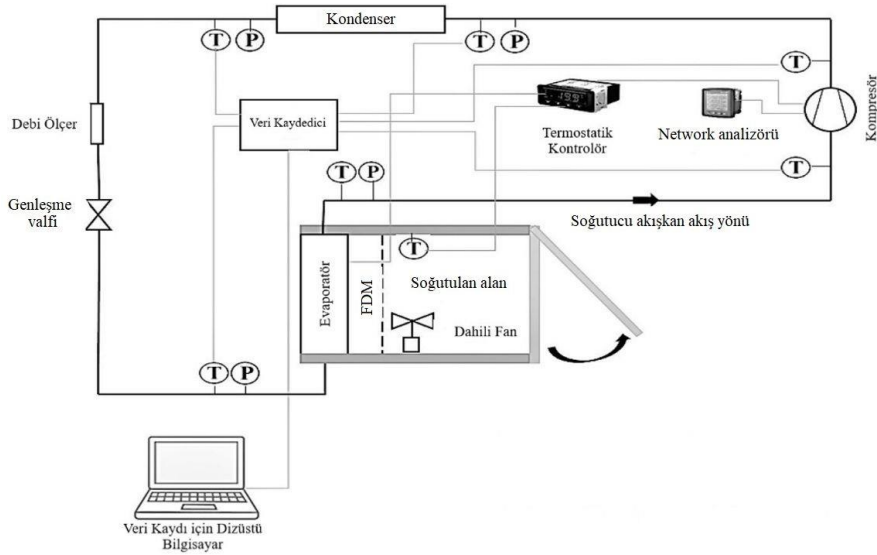
2. Materyal ve Yöntem

Soğutma sistemlerinin enerji tüketimlerini incelemek için Şekil 1'de şematik gösterimi sunulan laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi [18] ev-tipi buzdolabını simüle edecek şekilde ortalama $4^\circ C$ sıcaklık için FDM'siz ve FDM olarak çeşitli ötektik su-tuz çözeltilerinin sisteme entegre edildiği durumlar test edilmiştir.

Soğutma sistemi bir kabin (72 L) ve kabin iç sıcaklığının set edilen değerde çalışmasını sağlamak amacıyla temel bileşenler olarak bir evaporatör, bir kompresör, bir kondenser ve bir genişleme valfinden oluşmaktadır. Kabin iç hava sıcaklığı başta olmak üzere, tüm soğutma sistemi elemanlarının giriş ve çıkış noktalarında sıcaklık değerleri ölçülüp kaydedilmiştir. Güç tüketimi network analizörüyle ± 1 doğrulukta ölçülmüştür.

Sistemde sirküle eden soğutucu akışkanın (R404A) kütleli debisi ortalama 5,5 gram/saniye olarak ölçülmüştür. Test sisteminin kurulu olduğu ortam sıcaklığı klima kullanılarak 18°C’de sabit tutulmuştur.

FDM olarak, farklı konsantrasyonlarda (ağ.%2,0-ağ.%10,0) K₂HPO₄ ve Na₂S₂O₃ çözeltileri kullanılmıştır. Daha önce yapılan, FDM olarak distile suyun soğutma sistemine entegre edildiği bir çalışmada en uygun hacim 600 mL olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla ötektik su-tuz çözeltileri hacimce 600 mL olarak hazırlanmıştır [9]. Alüminyum paketlere aktarılan çözeltiler -18°C’de çalışan bir dondurucuda yatay olarak dondurulmuştur. Hazırlanan donmuş çözelti paketleri soğutulan kabin içinde konumlandırılan evaporator yüzeyine entegre edilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği

Sistemin kararlı rejime erişmesinden sonra veri kaydı alınmaya başlanmıştır. Çalışma periyodu esnasında tespit edilen bir döngüdeki kompresörün açık kalma süresi ($t_{açık}$, dakika) ve kapalı kalma süresi ($t_{kapalı}$, dakika) kullanılarak kompresör çalışma süresi yüzdesel olarak (2.1)’de sunulan denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Çalışma Süresi \%} = \frac{t_{açık}}{t_{açık} + t_{kapalı}} \times 100 \quad (2.1)$$

Sistemin güç tüketim verileri anlık olarak kaydedilmiştir. Çalışma periyodu (4 saat) süresince toplam güç tüketim değerleri ($W(t)$, kJ) (2.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak ise enerji tasarrufu (%) değerleri (2.3) ile hesaplanmıştır.

$$W(t) = \int_{t=0 \text{ saat}}^{t=4 \text{ saat}} \dot{W}(t) dt \quad (2.2)$$

$$\text{Enerji Tasarrufu \%} = \frac{W_{FDM} - W}{W} \times 100 \quad (2.3)$$

FDM’siz ve FDM’li durumlarda toplam enerji tüketimi (kJ) sırasıyla W and W_{FDM} ile gösterilmektedir.

Çalışma periyodunun (4 saat) ardından elektrik kesintisi durumu da sistemde simüle edilmiştir. Elektrik kesintisi esnasında FDM’siz ve FDM’li durumlarda kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığı olan 18°C’ye ulaşma süreleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kompresör çalışma süresini (%) minimize, enerji tasarrufunu maksimize eden ve elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süresini maksimize eden FDM, bu sistemlerde kullanılmak üzere önerilmiştir.

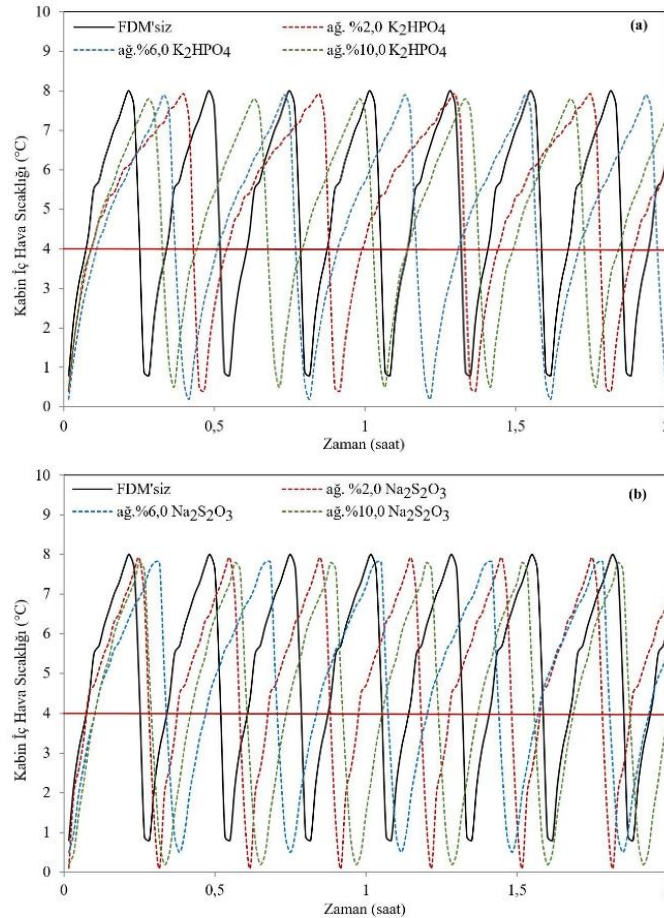
3. Bulgular ve Tartışma

Ev-tipi bir buzdolabının simüle edildiği laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi 8°C diferansiyel değeri (0°C - 8°C) ile ortalama 4°C’de FDM’siz ve ötektik su-tuz çözeltilerinin farklı konsantrasyonlarında hazırlanan FDM’lerle test edilmiştir. FDM olarak, K_2HPO_4 (ağ.%2,0-ağ.%10,0) ve $Na_2S_2O_3$ (ağ.%2,0-ağ.%10,0) çözeltileri kullanılmıştır. Sistemin çalışma periyodunda belirlenen verilerle çalışma süresi (%) ve toplam enerji tüketimi ve enerji tasarrufu (%) değerleri belirlenmiştir. Ardından elektrik kesintisi durumu simüle edilerek kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süreleri tespit edilmiştir.

3.1. Kompresör Çalışma Süresi (%) Değerlerine FDM Entegrasyonunun Etkisinin İncelenmesi

FDM’siz ve FDM olarak sırasıyla K_2HPO_4 (ağ.%2,0-ağ.%10,0) ve $Na_2S_2O_3$ (ağ.%2,0-ağ.%10,0) çözeltilerinin kullanıldığı durumlarda kabin iç hava sıcaklığının zamanla değişimi ilk 2 saatlik çalışma periyodu için Şekil 2’de sunulmuştur.

FDM’siz durumda toplam döngü sayısının 7,5 olduğu görülmektedir. Döngü sayısı ağ. %2,0 K_2HPO_4 , ağ. %6,0 K_2HPO_4 ve ağ. %10,0 K_2HPO_4 çözeltileri sisteme entegre edildiğinde sırasıyla 4,4, 5,0 ve 5,7 değerlerine azalırken, ağ. %2,0 $Na_2S_2O_3$, ağ. %6,0 $Na_2S_2O_3$ ve ağ. %10,0 $Na_2S_2O_3$ çözeltileri ile sırasıyla 6,7, 5,5 ve 6,3 değerlerine azaldığı tespit edilmiştir. FDM’siz durumdaki toplam döngü sayısının sisteme entegre edilen tüm FDM’lerle azaldığı görülmektedir. Döngü sayının ağ. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisi ile minimize edildiği belirlenmiştir.



Şekil 2. FDM’siz ve FDM olarak (a) K_2HPO_4 , (b) $Na_2S_2O_3$ çözeltileriyle kabin iç hava sıcaklığının zamanla değişimi (2 saat)

Şekil 2’de tespit edilen döngü sayısında ki azalma kompresörün kapalı kalma süresine ($t_{kapalı}$) bağlı olması kompresör çalışma süresinin (%) azalmasını sağlayacağı için enerji tasarrufu açısından önem taşımaktadır. Bu değerlendirmenin yapılabilmesi için kompresör açık ve kapalı kalma süreleri kullanılarak (2.1)’de sunulan denklem ile çalışma süresi (%) değerleri hesaplanmalıdır. Çalışma süresi (%) değerleri FDM’siz ve FDM’li durumlar için hesaplanmış ve Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. FDM’siz ve FDM’li durumlarda kompresör çalışma süresi (%) değerleri

FDM	Konsantrasyon (ağ. %)	Açık Kalma Süresi, $t_{açık}$, (dakika)	Kapalı Kalma Süresi, $t_{kapalı}$, (dakika)	Bir Döngü Süresi (dakika)	Çalışma Süresi (%)
-	0	3	13	16	18,8
K₂HPO₄ Çözültisi	2,0	3	24	27	11,1
	6,0	4	20	24	16,7
	10,0	4	17	21	19,0
Na₂S₂O₃ Çözültisi	2,0	3	15	18	16,7
	6,0	4	18	22	18,2
	10,0	4	15	19	21,1

Tablo 1 incelendiğinde, FDM’li durumlarda döngü sayısında tespit edilen azalmanın FDM’lerin sisteme entegre edildiğinde bir döngü süresinin uzaması ile ilişkili olduğu görülmektedir. Kapalı kalma süresinin literatürdeki çalışmalarda da tespit edildiği gibi tüm FDM’lerle uzadığı tespit edilmiştir. Ev-tipi buzdolabı performansını incelemek için literatürde evaporatör yüzeyine FDM entegre edilen iki tip buzdolabı ile deneysel bir çalışma yürütülmüştür. İki tip buzdolabında da FDM’siz duruma göre FDM entegrasyonu ile kompresör kapalı kalma süresinin önemli oranda uzadığı belirlenmiştir. Örneğin, suyun FDM olarak kullanıldığı buzdolabı 1 için, FDM’siz durumda 105 dakika olarak belirlenen kompresör kapalı kalma süresinin 215 dakikaya çıktığı belirlenmiştir [19]. Literatürde sunulan başka bir çalışmada ise, dikey bir içecek soğutucusunun soğutma performansı evaporatör yüzeyine FDM entegre edildiği durumda nümerik olarak incelenmiştir. FDM’siz durumda belirlenen kompresör açık ve kapalı kalma sürelerinin FDM’li durumlarda uzadığı ortaya konulmuştur. Ayrıca FDM kalınlığındaki artışın bu sürelerin uzamasını da arttırdığı tespit edilmiştir [20].

FDM olarak ağ. %2,0 K₂HPO₄ ve ağ. %2,0 Na₂S₂O₃ çözültileri sisteme entegre edildiğinde FDM’siz durumda belirlenen kompresör açık kalma süresi (3 dakika) sabit kalırken kapalı kalma süresinin uzaması ile elde edildiği görülürken, diğer tüm FDM’lerle hem açık hem de kapalı kalma sürelerinin uzaması ile elde edildiği görülmektedir. Hem kapalı kalma hem de açık kalma sürelerinin uzaması döngü sayısını azaltmasına karşın, açık kalma süresinde uzamanın çalışma süresini (%) arttıracığı bilinmektedir. Örneğin, ağ. %10,0 K₂HPO₄ çözültisi sisteme entegre edildiğinde de kompresör kapalı kalma süresinin uzadığı (17 dakika) görülmektedir. Ancak bu çözelti ile kompresör açık kalma süresinde de 1 dakikalık uzama olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, döngü sayısındaki azalma beklenen bir durumdur. Ancak, kompresör açık kalma süresindeki uzama dikkate alındığında, sadece döngü sayısında tespit edilen azalma ile sistemde enerji tasarrufu sağlanabileceği söylenememektedir. Kompresör çalışma süresi FDM’siz durumda %18,8 olarak belirlenirken, bu çözelti ile artmış ve %19,0 olarak belirlenmiştir.

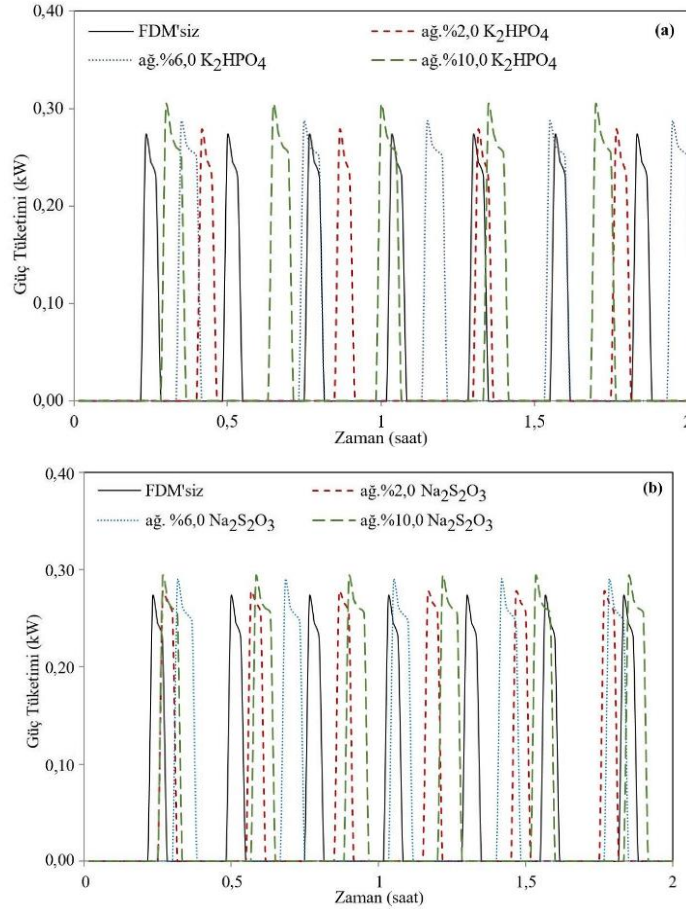
Çalışma süresi yüzdesinin uygun konsantrasyonda hazırlanan ötektik su-tuz çözültilerinin FDM olarak kullanımıyla önemli oranda azaldığı tespit edilmiştir. FDM olarak ağ. %2,0 K₂HPO₄, ağ. %6,0 K₂HPO₄ ve ağ. %10,0 K₂HPO₄ çözültilerinin sisteme entegre edilmesi durumunda sırasıyla %11,1, %16,7 ve %19,0 olarak belirlenirken, ağ. %2,0 Na₂S₂O₃, ağ. %6,0 Na₂S₂O₃ ve ağ. %10,0 Na₂S₂O₃ çözültileri ile sırasıyla %16,7, %18,2 ve %21,1 olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle, sisteme entegre edilen su-tuz çözültilerinin uygun

konsantrasyonda hazırlanmasının önemi elde edilen verilerle ortaya konulmuştur. Çalışma süresi (%) değerinin ağı. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisinin sisteme entegre edildiğinde minimize edildiği belirlenmiştir. Çalışma süresi FDM'siz duruma göre ağı. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisi ile yaklaşık %41,0 azaldığı ortaya konulmuştur. Khan ve Afroz [21] ev-tipi bir buzdolabının performansını farklı termal yüklerde FDM'siz ve FDM'lerle deneysel olarak incelemiştir. FDM olarak iki farklı faz değişim sıcaklığına sahip ($-5^{\circ}C$ ve $-10^{\circ}C$) ötektik çözeltiler kullanılmıştır. FDM'lerle bir döngüdeki ortalama kompresör çalışma süresinin FDM'siz duruma göre %5-30 azaldığı belirlenmiştir [21]. Literatürde sunulan başka bir çalışmada, ev-tipi bir buzdolabının performansı evaporatör yüzeyine FDM olarak etilen glikol entegre edildiği durumda test edilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada da kompresör çalışma süresinin önemli oranda azaltıldığı belirlenmiştir. FDM'siz geleneksel buzdolabı ile kıyaslandığında bu oranın yüke bağlı olarak %17-20 aralığında değiştiği ortaya konulmuştur [22].

Kompresör çalışma süresinde belirlenen azalmanın sistemde enerji tasarrufu sağlayacağı bilinmektedir. (2.3)'teki enerji tasarrufu değerlerinin hesaplanabilmesi için (2.2)'de yer alan denklem kullanılarak FDM'siz ve FDM'li durumlarda toplam enerji tüketimi değerleri belirlenmelidir.

3.2. Enerji Tasarrufu (%) Değerlerine FDM Entegrasyonun Etkisinin İncelenmesi

FDM'siz ve farklı konsantrasyonlarda hazırlanan K_2HPO_4 ve $Na_2S_2O_3$ çözeltilerinin FDM olarak sisteme entegre edildiği durumlarda anlık kompresör güç tüketim verileri 2 saatlik çalışma periyodu için Şekil 3-(a) ve Şekil 3-(b)'de sunulmuştur.



Şekil 3. FDM'siz ve FDM olarak (a) K_2HPO_4 , (b) $Na_2S_2O_3$ çözeltileriyle kompresör güç tüketiminin zamanla değişimi (2 saat)

Şekil 3-(a) ve Şekil 3-(b) incelendiğinde, FDM'siz durumda güç tüketim değerleri 0,271 kW ile 0,229 kW arasında değişmektedir. Çeşitli FDM entegrasyonunun bu değerleri arttırdığı görülmektedir. FDM olarak ağ. %2,0 K_2HPO_4 , ağ. %6,0 K_2HPO_4 ve ağ. %10,0 K_2HPO_4 çözeltilerinin sisteme entegre edildiğinde maksimum ve minimum güç tüketim değerlerinin sırasıyla 0,276 kW-0,230 kW, 0,285 kW-0,250 kW ve 0,302 kW-0,253 kW aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu değerlerinin ağ. %2,0 $Na_2S_2O_3$, ağ. %6,0 $Na_2S_2O_3$ ve ağ. %10,0 $Na_2S_2O_3$ çözeltileri için 0,277 kW-0,255 kW, 0,288 kW-0,246 kW ve 0,292 kW-0,255 kW aralığında değiştiği gözlenmiştir. FDM'lerle anlık güç tüketim minimum ve maksimum değerlerinin ağ. %10,0 K_2HPO_4 ve ağ. %10,0 $Na_2S_2O_3$ çözeltileri ile maksimize edildiği görülmektedir. Sisteme ağ. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisi sisteme entegre edildiğinde bu değerlerin minimize edildiği ve FDM'siz durumda belirlenen değerlere yakın olduğu görülmektedir.

Kompresör anlık güç tüketim değerleri ile (2.2) kullanılarak toplam güç tüketim değerleri FDM'siz ve FDM'li durumlarda hesaplanmıştır. Çalışma periyodu boyunca (4 saat) FDM'siz durumda toplam güç tüketim değeri 11,18 kJ iken ağ. %2,0 K_2HPO_4 , ağ. %6,0 K_2HPO_4 ve ağ. %10,0 K_2HPO_4 çözeltileri ile ise sırasıyla 6,03 kJ, 10,54 kJ ve 11,99 kJ olarak bulunmuştur. Bu değer ağ. %2,0 $Na_2S_2O_3$, ağ. %6,0 $Na_2S_2O_3$ ve ağ. %10,0 $Na_2S_2O_3$ çözeltileri için ise sırasıyla, 10,37 kJ, 11,05 kJ ve 12,91 kJ olarak hesaplanmıştır. Toplam güç tüketim değerleri değerlendirildiğinde, çalışma süresinin (%) azaltıldığı durumlarda beklenildiği gibi sistemin toplam enerji tüketimi de azalmıştır. Dolayısıyla, çalışma süresinin minimize edildiği durum olan ağ. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisinin sisteme entegre edilmesi durumunda toplam enerji tüketimi de 6,03 kJ değerine düşürülerek minimize edilmiştir. Çalışma süresi (%) değerinin FDM'siz durumdan fazla olduğu tespit edilen ağ. %10,0 K_2HPO_4 ve ağ. %10,0 $Na_2S_2O_3$ çözeltileri ile sistemde toplam güç tüketimi değerinin de önemli miktarda arttığı tespit edilmiştir.

FDM karışımını oluşturan bileşenlerin toplam enerji tüketimine etkisinin incelendiği farklı çalışmalar literatürde de sunulmuştur. Kiran-Yildirim [9] yaptığı çalışmada farklı konsantrasyonda (ağ.%1,0-ağ.%4,0) Na_2SO_4 çözeltilerinin enerji tasarrufuna etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, ağ.%1,0 Na_2SO_4 çözeltisi sisteme entegre edildiğinde maksimum enerji tasarrufu elde edilirken artan konsantrasyonlarda avantaj sağlanmadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, Kiran-Yildirim [9] tarafından yapılan çalışmada sistem enerji verimine uygun FDM seçiminin önemi ortaya konulmuştur.

Toplam enerji tüketim değerleri (2.3) dikkate alınarak enerji tasarrufu (%) hesaplamaları için kullanılmıştır. FDM'lerle hesaplanan enerji tasarrufu değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

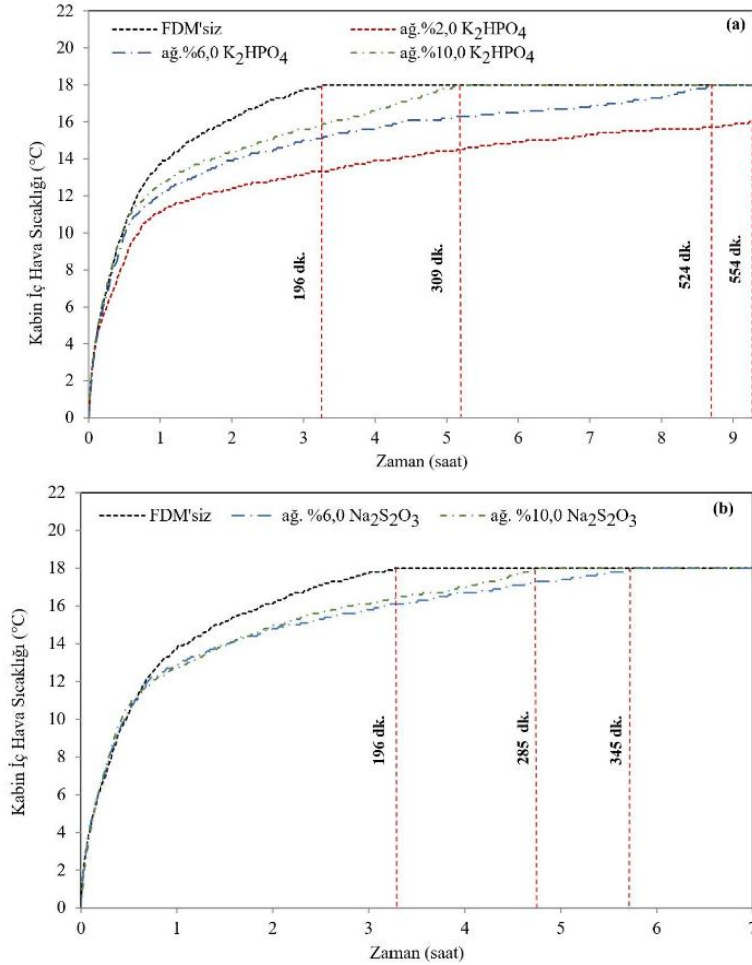
Tablo 2. FDM'siz ve farklı FDM'lerle toplam enerji tüketimi ve enerji tasarrufu (%) değerleri

	FDM'siz	%2,0 K_2HPO_4 /FDM	%6,0 K_2HPO_4 /FDM	%10,0 K_2HPO_4 /FDM	%2,0 $Na_2S_2O_3$ /FDM	%6,0 $Na_2S_2O_3$ /FDM	%10,0 $Na_2S_2O_3$ /FDM
4 saat boyunca kompresör enerji tüketimi, (kJ)	11,18	6,03	10,54	11,99	10,37	11,05	12,91
4 saat boyunca toplam kompresör açık kalma süresi, (saat)	0,75	0,44	0,67	0,76	0,67	0,73	0,84
4 saat boyunca toplam kompresör kapalı kalma süresi, (saat)	3,25	3,56	3,33	3,24	3,33	3,27	3,16
Çalışma süresi (%)	18,8	11,1	16,7	19,0	16,7	18,2	21,1
Enerji Tasarrufu (%)	-	-46,0	-5,7	7,3	-7,2	-1,1	15,5

Tablo 2’den de görüldüğü üzere, FDM olarak ağ. %2,0 K_2HPO_4 , ağ. %6,0 K_2HPO_4 , ağ. %2,0 $Na_2S_2O_3$ ve ağ. %6,0 $Na_2S_2O_3$ çözeltileri ile sırasıyla %46,0, %5,7, %7,2 ve %1,1 enerji tasarrufu sağlandığı belirlenirken, ağ. %10,0 K_2HPO_4 ve ağ. %10,0 $Na_2S_2O_3$ çözeltilerinin toplam enerji tüketimini arttırdığı belirlenmiştir. Bu çalışmada belirlenen enerji tasarruf değerleri karşılaştırıldığında seçilen tuzlarla hazırlanan ötektik su-tuz çözeltilerinden FDM olarak en uygun çözeltilerin ağ. %2,0 K_2HPO_4 çözeltisi olduğu belirlenmiştir.

3.3. Elektrik Kesintisi Periyoduna FDM Entegrasyonun Etkisi

Elektrik kesintisi durumu FDM’siz ve çeşitli FDM’lerle çalışma periyodunun ardından simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar FDM’siz durumla kıyaslamalı olarak Şekil 4-(a) ve Şekil 4-(b)’de sunulmuştur.



Şekil 4. Elektrik kesintisi periyodunda FDM’siz ve FDM’li (a) K_2HPO_4 ve (b) $Na_2S_2O_3$ çözeltili durumlarda kabin iç hava sıcaklığının zamanla değişimi

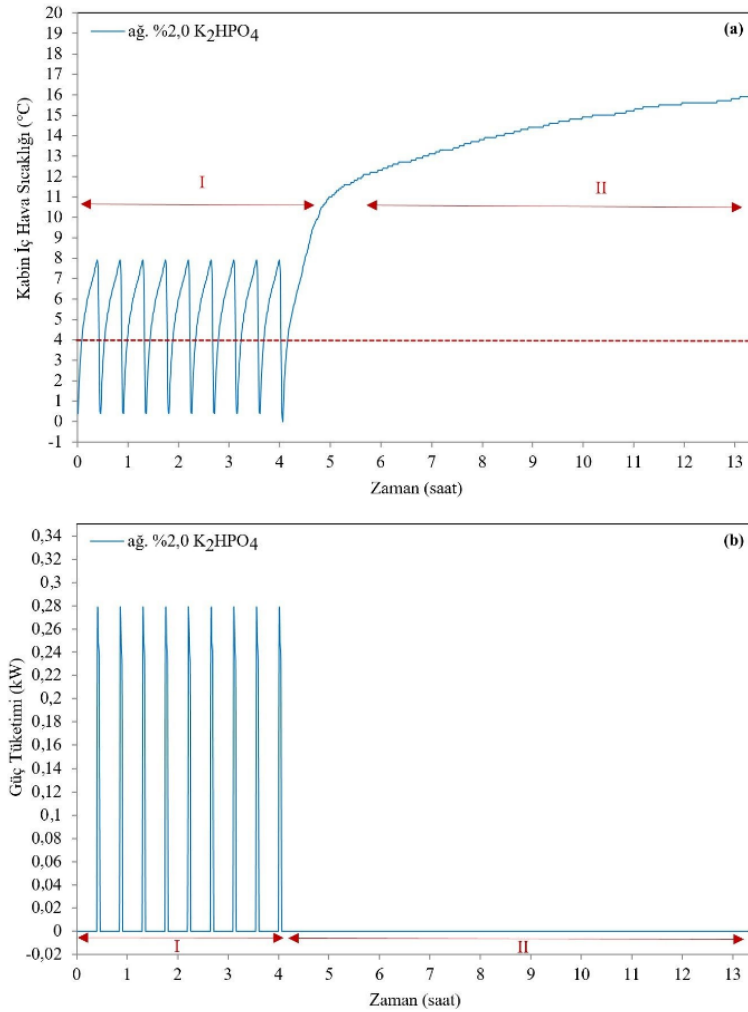
Şekil 4-(a) ve Şekil 4-(b) incelendiğinde, literatür çalışmaları ile benzer eğilimde sonuçlar elde edildiği, soğutma sistemine entegre edilen tüm FDM’lerin elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına (18°C) ulaşma süresini uzattığı görülmektedir. Literatürde elektrik kesintisi esnasında geleneksel buzdolabının kabin sıcaklığının 10°C altında 4 saat tutulabilirken FDM olarak etilen glikol kullanımı ile bu sürenin 16 saate çıktığı belirtilmiştir [22]. Ev-tipi buzdolabının FDM’siz ve FDM’lerle farklı termal yükler için performansının incelendiği deneysel başka bir çalışma ise, FDM olarak su ve bir ötektik karışım (faz değişim sıcaklığı: -3°C) kullanılmıştır. Elektrik kesintisi esnasında FDM’siz durumda 1-3 saat kesintisiz sistem çalışabiliyorken FDM ile bu sürenin 5-9 saate çıktığı öne sürülmüştür [13]. Khan vd. [23] yaptıkları çalışmada ise, ev-tipi bir buzdolabı kapağının açılması durumunda ve elektrik kesintisi esnasında FDM entegrasyonunun sıcaklık dalgalanmasına etkisini incelemiştirler. Sıcaklık dalgalanmasının FDM ile 3-5°C azaldığı ortaya

konulmuştur. Ayrıca elektrik kesintisi esnasında FDM'nin yaklaşık 2 saat kabin iç sıcaklığının düşük değerlerde tutulmasına olanak sağladığı belirtilmiştir [23].

Çalışmamız sonucunda da FDM'siz durumda kabin iç sıcaklığının ortam sıcaklığına (18°C) ulaşma süresi 196 dakika olarak belirlenmişken, sırasıyla sisteme ağ. %6,0 K₂HPO₄, ağ. %10,0 K₂HPO₄ ve ağ. %6,0 Na₂S₂O₃ ve ağ. %10,0 Na₂S₂O₃ çözeltileri entegre edildiğinde 524 dakika, 309 dakika, 345 dakika ve 285 dakika olduğu tespit edilmiştir. Sisteme ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözeltisi entegre edildiğinde ise kabin iç hava sıcaklığının 16°C'ye ulaşma süresinin 554 dakika olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla bu sürenin ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözeltisi ile maksimize edildiği görülmektedir.

3.4. Çalışma ve Elektrik Kesintisi Periyoduna FDM Entegrasyonunun Etkisi

Her iki ötektik su-tuz çözeltilerinin farklı konsantrasyonları sisteme entegre edilmesi sonucu elde edilen kabin iç hava sıcaklığı değişimi ve toplam enerji tüketimleri değerlendirildiğinde ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözeltilerinin FDM'ler arasında alternatif FDM olarak önerilebileceği görülmektedir. Bu FDM için kabin iç hava sıcaklığının ve enerji tüketiminin çalışma ve elektrik kesintisi periyotlarında zamanla değişimleri sırasıyla Şekil 5-a ve Şekil 5-b'de sunulmuştur.



Şekil 5. FDM olarak ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözeltisi sisteme entegre edildiğinde (a) kabin iç hava sıcaklığının ve (b) kompresör güç tüketiminin çalışma ve elektrik kesintisi periyodunda zamanla değişimi

Şekil 5-a incelendiğinde, sisteme FDM olarak ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözeltisi entegre edildiği durumda, 4 saatlik çalışma periyodunda toplam döngü sayısının 8,9 olduğu görülmektedir. Döngü sayısının FDM'siz duruma

göre önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Her bir döngü incelendiğinde kapalı kalma süresinin uzun olduğu görülmektedir. Kompresör kapalı kalma süresinin 24 dakikaya uzaması sonucu, çalışma süresi %11,1 olarak belirlenmiştir. Bu durumda kompresörün çalışma sıklığının azaldığı ve dolayısıyla bu FDM entegrasyonu kompresörün yaşam ömrünün uzamasına katkı sağlanabileceği söylenebilmektedir.

Çalışma periyodunun ardından elektrik kesintisi periyodunda kabin iç hava sıcaklığının ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözültisi entegre edildiği durumda, 16°C'ye yaklaşık 9,2 saat sonunda ulaşılabilirdiği görülmüştür. FDM'siz durumda 16°C'ye yaklaşık 1,9 saatte ulaştığı dikkate alındığında, bu sürenin yaklaşık 5 katında çıktığı belirlenmiştir. Bu FDM ile elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının ani yükselişinin önüne geçilebileceği için kabin içinde ürünlerin uzun süre bozunmadan korunabileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca Şekil 4-b incelendiğinde, güç tüketim verilerinin maksimum ve minimum değerlerinin sırasıyla 0,276 kW-0,230 kW arasında değiştiği görülmektedir. Toplam güç tüketiminin de FDM'siz duruma göre önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir ve enerji tasarrufunun %46,0 olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, ev-tipi buzdolabının simüle edildiği laboratuvar ölçekli soğutma sistemimize FDM olarak ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözültisinin entegre edilmesi durumunda önemli oranda enerji tasarrufu sağlandığı da tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Soğutma sistemlerinin enerji tüketimlerini incelemek için ev-tipi buzdolabının simüle edildiği laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi FDM'siz ve FDM'lerle test edilmiştir. FDM olarak farklı konsantrasyonlarda hazırlanan K₂HPO₄ ve Na₂S₂O₃ çözültileri kullanılmıştır. Sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- FDM'siz durumda %18,8 belirlenen çalışma süresi değeri, FDM'lerden ağ. %2,0 K₂HPO₄ ve ağ. %2,0 Na₂S₂O₃ çözültileri sisteme entegre edildiğinde sırasıyla %11,1 ve %16,7 değerlerine düşmüştür. Bu değeri minimize eden, dolayısıyla kompresör ömrünün korunmasına katkı sağlayacağı gibi sistemde enerji tasarrufunu maksimize edecek olan en uygun FDM'nin ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözültisi olduğu ortaya konulmuştur.
- Soğutma sisteminin çalışma periyodu boyunca toplam enerji tüketim değeri, FDM'siz durumda 11,18 kJ olarak belirlenirken, FDM olarak ağ. %2,0 K₂HPO₄ ve ağ. %2,0 Na₂S₂O₃ çözültileriyle sırasıyla 6,03 kJ ve 10,37 kJ değerlerine düşmüştür. Toplam enerji tüketiminin ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözültisi ile minimize edildiği, dolayısıyla enerji tasarrufunun maksimize edildiği belirlenmiştir. Enerji tasarrufu sisteme ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözültisi entegre edildiğinde %46,0 olarak tespit edilmiştir.
- Elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına (18°C) ulaşma süresi FDM'siz durumda 197 dakika (3,3 saat) iken, tüm FDM'lerle bu sürenin uzadığı belirlenmiştir. Bu sürenin ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözültisi ile maksimize edildiği, kabin iç hava sıcaklığının 16°C'ye ulaşma süresinin 554 dakika (9,2 saat) olduğu belirlenmiştir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, ev-tipi buzdolabının simüle edildiği laboratuvar ölçekli bir soğutma sisteminde en iyi performansın FDM olarak ağ. %2,0 K₂HPO₄ çözültisi ile elde edildiği ortaya konulmuştur. Günümüzde FDM'lerle ilgili pek çok araştırma ve geliştirme çalışması halen devam etmekte olup geliştirilen teknolojiler ticari ölçekte uygulanabilir durumdadır. Bu çalışmada önerilen FDM'de ev-tipi buzdolabı üreticileri tarafından yenilikçi tasarımlarla sisteme entegre edilebilir.

Yazar Katkıları

Birinci yazar deneysel çalışmanın planlanmasını ve tasarlanmasını, deneylerin yürütülmesini, elde edilen verilerin analiz edilmesini ve yorumlanmasını ve makalenin yazılmasını sağlamıştır. İkinci Üçüncü ve

Dördüncü Yazar deneysel çalışmaların yürütülmesini, verilerin toplanmasını ve sunulmasını sağlamıştır. Beşinci ve Altıncı Yazar deneysel verilerin analiz edilmesini ve yorumlanmasını sağlamıştır. Tüm yazarlar makalenin son halini okuyup onaylamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar hiçbir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 1919B012203087 Proje Numarasıyla TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] D. Coulomb, *Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment*, Trends in Food Science & Technology 19 (8) (2008) 413–417.
- [2] Energy Information Administration (EIA), Residential Energy Consumption Survey (2001), <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2001/index.php?view=consumption>, Accessed 4 Nov 2023.
- [3] T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, R. Saidur, I. A. Choudhury, A. R. NoorLeha, *Projected electricity savings from implementing minimum energy efficiency standard for household refrigerators in Malaysia*, Energy 28 (7) (2003) 751–754.
- [4] A. C. Marques, G. F. Davies, G. G. Maidment, J. A. Evans, I. D. Wood, *Novel design and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage*, Applied Thermal Engineering 63 (2) (2014) 511–519.
- [5] D. Y. Liu, W. R. Chang, J. Y. Lin, *Performance comparison with effect of door opening on variable and fixed frequency refrigerators/freezers*, Applied Thermal Engineering 24 (14-15) (2004) 2281–2292.
- [6] P. K. Bansal, *Developing new test procedures for domestic refrigerators: harmonisation issues and future R&D needs—a review*, International Journal of Refrigeration 26 (7) (2003) 735–748.
- [7] M. I. H. Khan, *Conventional refrigeration systems using phase change material: a review*, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 24 (03) (2016) 1630007 16 pages.
- [8] L. Abdolmaleki, S. M. Sadrameli, A. Pirvaram, *Application of environmental friendly and eutectic phase change materials for the efficiency enhancement of household freezers*, Renewable Energy 145 (2020) 233–241.
- [9] B. Kiran Yildirim, *Performance evaluation of a laboratory-scale cooling system as a household refrigerator with phase change materials*, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 44 (3) (2022) 5852–5867.
- [10] A. Pirvaram, S. M. Sadrameli, L. Abdolmaleki, *Optimization of energy consumption and temperature fluctuations for a household freezer using non-toxic and non-flammable eutectic phase change materials with a cascade arrangement*, International Journal of Energy Research 45 (2) (2021) 1775–1788.
- [11] E. Oró, A. De Gracia, A. Castell, M. M. Farid, L. F. Cabeza, *Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications*, Applied Energy 99 (2012) 513–533.

- [12] W. Su, J. Darkwa, G. Kokogiannakis, *Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 48 (2015) 373–391.
- [13] K. Azzouz, D. Leducq, D. Gobin, *Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: An experimental investigation*, International Journal of Refrigeration 32 (7) (2009) 1634–1644.
- [14] G. Li, Y. Hwang, R. Radermacher, H. H. Chun, *Review of cold storage materials for subzero applications*, Energy 51 (2013) 1–17.
- [15] G. A. Lane, *Solar heat storage: Volume I: Latent heat material*, Boca Raton, CRC Press, 1983.
- [16] H. P. Garg, S. C. Mullick, A. K. Bhargava, *Solar thermal energy storage*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1985.
- [17] Y. Tek, *Synthesis, characterization and physicochemical properties of urea and thiourea-fatty acid condensation compounds*, Master’s Thesis Tokat Gaziosmanpaşa University (2009) Tokat.
- [18] B. Kiran Yildirim, T. Noya, E. Mancuhan, S. Titiz Sargut, *Investigation of energy consumption for a PCM integrated laboratory scale cooling system: An experimental study*, in: N. Yücel, R. Yumrutaş, M. S. Söylemez, M. Kanoğlu, Â. Atmaca, H. Yağlı (Eds.), 23rd Congress on Thermal Science and Technology with International Participation, 2021, Gaziantep, pp. 1002–1008.
- [19] Y. Yusufoglu, T. Apaydin, S. Yilmaz, H. O. Paksoy, *Improving performance of household refrigerators by incorporating phase change materials*, International Journal of Refrigeration 57 (2015) 173–185.
- [20] M. A. Ezan, E. O. Doganay, F. E. Yavuz, I. H. Tavman, *A numerical study on the usage of phase change material (PCM) to prolong compressor off period in a beverage cooler*, Energy Conversion And Management 142 (2017) 95–106.
- [21] M. I. H. Khan, H. M. Afroz, *Effect of phase change material on compressor on-off cycling of a household refrigerator*, Science and Technology for the Built Environment 21 (4) (2015) 462–468.
- [22] D. S. Niyaj, S. N. Sapali, *Performance evaluation of a domestic refrigerator with a thermal storage arrangement using propane as a refrigerant*, Energy Procedia 109 (2017) 34–39.
- [23] I. H. Khan, H. M. Afroz, M. A. Karim, *Effect of PCM on temperature fluctuation during the door opening of a household refrigerator*, International Journal of Green Energy 14 (4) (2017) 379–384.