



Boraks dekahidrat çözeltilerinin faz değiştiren malzeme olarak ön soğutma işlemi yapılan soğuk depolama sisteminde kullanımı

Berçem Kiran Yıldırım ^{1,*}, Ebru Mançuhan ¹, Sibel Titiz Sargut ¹

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 34854, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 14 Aralık 2023
Kabul 10 Nisan 2024
Online 28 Haziran 2024

Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1405029

Anahtar kelimeler:

Boraks dekahidrat
Enerji tasarrufu
Faz değiştiren malzemeler
Ön soğutma
Soğuk depolama

ÖZET

Ön soğutma işlemi taze sebze ve meyvelerin hasattan kısa süre sonra meydana gelen bozulmalarının önüne geçmek amacıyla yürütölen soğuk depolamanın önemli basamaklarından biridir. Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi ön soğutma işlem koşullarında faz değiştiren malzemesiz (FDM'siz) ve FDM'lerle test edilmiştir. FDM olarak sisteme su ve farklı konsantrasyonlarda hazırlanan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri entegre edilmiştir. Kompresör çalışma süresinin (%) tüm FDM'lerle azaldığı tespit edilmiştir. FDM'siz durumda %21,05 olarak belirlenen bu değerin ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile %12,12 değerine kadar düştüğü belirlenmiştir. Dolayısıyla, toplam enerji tüketiminde maksimum azalma, ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile %41,7 oranında hesaplanmıştır. Elektrik kesintisi esnasında ise, kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süresi FDM'siz duruma göre ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile yaklaşık 4,3 kat uzadığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, ön soğutma işleminde kullanılan soğutma sistemlerinde kullanmak üzere ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi alternatif FDM olarak önerilmektedir.

Utilization of borax decahydrate solutions as a phase change material in a cold storage system for precooling process

ARTICLE INFO

Article History:

Received December 14, 2023
Accepted April 10, 2024
Available online June 28, 2024

Research Article

DOI: 10.30728/boron.1405029

Keywords:

Borax decahydrate
Energy saving
Phase change materials
Pre-cooling
Cold storage

ABSTRACT

The pre-cooling process is one of the important stages of cold storage, conducted to prevent the spoilage of fresh vegetables and fruits shortly after harvesting. In this study, a cooling system operating under the conditions of the precooling process was tested with and without phase change materials (PCMs). Water and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solutions at different concentrations were integrated into the system as PCMs. It was revealed that the compressor running time (%) decreased with all PCMs. This value, determined to be 21.05% without PCM, decreased to a value of 12.12% with 1.0 wt.% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solution. Therefore, the maximum reduction in total energy consumption was calculated to be 41.7% with 1.0 wt.% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solution. Additionally, it was observed that the time to reach the internal cabin air temperature to the ambient temperature was approximately 4.3 times longer with 1.0 wt.% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solution than that of the case without PCM during a power failure period. Consequently, 1.0 wt.% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solution is recommended as an alternative PCM to be used in cooling systems employed in the precooling process.

1. Giriş (Introduction)

Gıda ürünlerinin üretimlerinden son tüketiciye ulaşana kadar ki süreçlerde bozunmadan muhafaza edilmeleri çok önemlidir. Bu sebeple, tedarik zincir yönetimi türlerinden biri de soğuk zincir yönetimidir. Soğuk zincir yönetimi, süt, et, gıda, sebze, mantar, meyve, çiçek vb. gibi bozulabilir ürünlerin belirli bir süre içinde dağıtılmasını ve uygun koşullar altında saklanmasını sağlayan bir sistemdir [1]. Dolayısıyla, soğuk depolama bu tedarik zincirinin önemli bir basamağıdır.

Soğuk depolamanın önemli aşamalarından biri ön soğutma işlemi olarak bilinmektedir. Taze sebze ve meyvelerin kalitesinin korunması, hasat süreci sonrası, hasat koşullarına bağlı olarak barındırdıkları tarla ısısı olarak da bilinen ısının depolanma öncesinde hızlı bir şekilde alınmasına oldukça bağlıdır. Bu süreç ön soğutma işlemi olarak adlandırılmakta ve 0-10 °C sıcaklık aralığında uygulanmaktadır [2]. Literatürde çok farklı ön soğutma uygulamasından bahsedilmiştir [3]. Ön soğutma yöntemleri; soğuk odada ön soğutma, hidro-soğutma, zorlanmış havayla ön soğutma, paket buzlama, vakumla ön soğutma ve kriyojenik soğutma

*Corresponding author: bercem.kiran@marmara.edu.tr

olmak üzere altı başlık altında sınıflandırılabilirdiği belirtilmiştir [4]. Bu yöntemlerden en bilinen ve yaygın olarak kullanılan uygulamalardan biri, soğuk hava deposunda veya ön soğutma odasında ürünlerin soğutulmasıdır [4]. Ön soğutmanın, ürün kalitesinin uzun süre korunması açısından avantaj sağladığı açıktır, ancak bu amaçla kullanılan sistemlerin tükettikleri enerjinin azaltılmasının da önemli olduğu bilinmektedir. Bu işlem yürütülürken tüketilen enerji miktarını azaltmanın alternatif yollarından biri, soğutma sistemlerinin termal enerji depolamasının en önemli örneklerinden biri olan faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) ile çalıştırılmalarıdır. Tüm termofiziksel özelliklerinin bilinmesi, yüksek gizli ısı ve kararlılığı sebebiyle su, FDM olarak tercih edilirken [5,6], literatürde farklı ötektik tuz-su çözeltileri de önerilmektedir [7]. Bir ev tipi buzdolabı performansı FDM'siz ve FDM olarak su (H_2O) ve bir ötektik çözeltinin sisteme entegre edildiği durumlarda deneysel olarak incelenmiştir. Ötektik çözelti olarak, faz değişim sıcaklığı $-5^{\circ}C$ olan bir sodyum klorür ($NaCl$) çözeltisi (%90 H_2O +%10 $NaCl$) hazırlanmıştır. Sonuçlar FDM entegrasyonunun performans katsayısını (coefficient of performance, COP) önemli ölçüde arttırdığını ortaya koyarken ötektik çözeltinin suya göre daha etkin olduğu da belirtilmiştir [8]. Ev tipi bir buzdolabının FDM olarak su ve iki farklı faz değişim sıcaklığına ($-2^{\circ}C$ ve $-6^{\circ}C$) sahip ötektik çözeltilerle teorik olarak modellendiği bir çalışmada, deneysel olarak da bir prototip buzdolabı test edilmiştir. Hem simülasyon hem de denklem sonuçları ile kompartman sıcaklığını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için faz değişim sıcaklığı $0^{\circ}C$ 'nin altında olan bir ötektik FDM kullanılması gerektiği ortaya konulmuştur [9]. Dolayısıyla, bir soğutma sistemine FDM entegrasyonunda göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametrelerden biri FDM'nin faz değişim sıcaklığıdır. Ötektik su-tuz çözeltilerinin FDM olarak tercih edilmelerinin en önemli sebeplerinden biri de faz değişim sıcaklıklarının hazırlanan çözelti konsantrasyonuna bağlı olarak ayarlanabilmesidir. Ancak, FDM'nin faz değişim sıcaklığı yanı sıra, miktarı, konumu ve kalınlığı vb. gibi çeşitli parametrelerin de dikkate alınması gerekmektedir [10]. Literatürde, çeşitli FDM'lerin özelliklerinin sunulduğu ve FDM'lerin soğutma sistemlerinde kullanımının irdelendiği farklı çalışmaların derlemeleri sunulmuştur [11,12]. Örneğin, Joybari vd. (2015) tarafından sunulan çalışmada, literatürde sunulan çalışmalar göz önünde bulundurularak FDM özelliklerinin yanı sıra, ortam sıcaklığı, kabinin açılıp-kapanma sıklığı vb. gibi dikkate alınan diğer parametrelerde listelenmiştir [12]. Tüm parametreler göz önünde bulundurularak, belirli koşullarda çalışan soğutma sistemlerinin enerji tüketimini minimize edilebildiği uygun FDM'lerin önerilmesi, enerji kaynaklarının korunması ve enerji maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemlidir. FDM'lerin soğutma sistemlerinde kullanımının sağladığı avantajların sunulduğu kapsamlı çalışmalar literatürde mevcuttur [13,14]. Rocha vd. (2023) 2007-2023 yılları arasında küçük ölçekli soğutma sistemlerinde FDM'lerin kullanımının deneysel olarak

incelendiği çalışmalarda kullanılan FDM'ler ve FDM konumlarına bağlı olarak elde edilen önemli sonuçların bir listesini sunmuştur. FDM'lerin sistemlere entegre edildiği durumlarda sağlanan enerji tasarrufları değerlendirildiğinde minimum %4,4 [15] ile maksimum %18,6 [16] arasında değiştiği görülmektedir [14]. Sonuç olarak, soğutma sistemlerine FDM entegrasyonun enerji tasarrufu sağlayacağı açıktır.

Soğutma sistemlerinde FDM kullanımının sağlayacağı enerji tasarrufu göz önünde bulundurularak, bu çalışmada ön soğutma işlemi koşullarında çalıştırılan bir soğutma sistemi FDM'siz ve FDM'li durumlarda test edilmiştir. FDM olarak, su ve Türkiye'de yaygın olarak bulunan bor minerallerinden biri olan tinkalin (boraks dekahidrat, $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) farklı konsantrasyonlarda hazırlanan çözeltileri kullanılmıştır. Literatürde çeşitli çalışmalarda FDM'ler, aşırı soğuma problemlerine çözüm olması için sodyum tetraborat dekahidrat (boraks dekahidrat) [17,18] gibi nükleasyon ajanlarıyla, faz ayrımının önüne geçilmesi amacıyla ise karboksimetil selüloz (CMC) gibi jelleştirici ajanlarla modifiye edilmiştir [19,20]. Ancak FDM olarak boraks dekahidrat çözeltilerinin soğutma sistemlerine entegre edildiği bir çalışma literatürde sunulmamıştır. Belirtildiği gibi Ülkemizde yaygın olarak bulunması dolayısıyla kolay erişilebilir olması ve ucuz olması göz önünde bulundurularak çalışmamızda ilk olarak boraks dekahidrat çözeltileri FDM olarak bir soğutma sistemine entegre edilmiştir. FDM entegrasyonun çalışma periyodunda kompresör çalışma süresine (%) ve toplam enerji tüketimine etkileri incelenmiştir. İlaveten elektrik kesintisi durumu simüle edilmiş ve kabin iç hava sıcaklığının FDM'siz ve FDM'li durumlarda ortam sıcaklığına ulaşma süreleri kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir. Tüm değerlendirmeler sonucu, ön soğutma amacıyla kullanılan bir soğutma odasının enerji tüketimini minimize eden ve elektrik kesintisi esnasında soğutma odasında ürünlerin uzun süre bozunmadan korunmasını sağlayacak olan uygun FDM belirlenmiştir.

2. Malzemeler ve Yöntemler (*Materials and Methods*)

2.1. Malzemeler (*Materials*)

Ön soğutma işleminin simüle edildiği laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemine entegre edilmek üzere FDM olarak distile su ve Eti Maden Bandırma bor ve asit fabrikalarında üretilen boraks dekahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) rafine bor ürününden farklı konsantrasyonlarda (ağ. %1,0-ağ. %3,0) hazırlanan çözeltiler kullanılmıştır.

2.2. Yöntemler (*Methods*)

Laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi [21], ön soğutma işlemini simüle etmek üzere $0-10^{\circ}C$ sıcaklık aralığında FDM'siz ve FDM'li olarak test edilmiştir. Sisteme FDM olarak, su ve $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ çözeltileri entegre edilmiştir. Boraks dekahidratın ajan olarak eklendiği çalışmalarda ağırlıkça düşük yüzdelerde FDM'lere

ilave edildiği görülmektedir [17,18,20]. Çalışmamızda da boraks dekahidratın çözünürlük verileri de [22,23] dikkate alınarak düşük konsantrasyonlarda (ağ. %1,0-ağ. %3,0) çözeltiler hazırlanmıştır. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltilerinin pH değerinde konsantrasyon artışıyla belirgin bir değişim olmadığı, ağ. %1,0 ve %2,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltilerinin pH değerleri 9,2 iken ağ. %4,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi pH değeri 9,3 olarak ölçüldüğü literatürde belirtilmiştir [23]. FDM çözelti miktarı, literatürde uygun miktar olarak belirlenen 600 mL hacminde [7] hazırlanmıştır. Çözeltiler alüminyum kaplara yerleştirilmiş ve şarj etmek üzere dondurucuda (-18°C) yatay olarak dondurulmuştur.

Soğutma sistem komponentleri kabin içine yerleştirilmiş bir evaporatör, bir kompresör, bir kondenser, bir genişleme valfidir. Şarj edilen FDM paketleri evaporatör yüzeyine entegre edilmiştir. Soğutucu akışkan olarak R404A sistemde sirküle edilmiştir. Sistemin bulunduğu ortam klimatize edilerek 20°C 'de kararlı rejim şartları sağlanmıştır. Soğutucu akışkanın sistem komponentlerine giriş-çıkış sıcaklıkları, anlık güç tüketim verileri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Her bir deney en az üç defa tekrar edilmiş ve ortalama değerler dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Deneysel çalışma sonunda elde edilen verilerden kompresör çalışma süresi (%) (Eş. 1), toplam güç tüketimi (Eş. 2) ve enerji tasarrufu (%) (Eş. 3) değerleri hesaplanmıştır. Eş. 1'de, $t_{\text{açık}}$ kompresörün açık kalma süresi (dakika), $t_{\text{kapalı}}$ kapalı kalma süresini (dakika) göstermektedir. $W(t)$ çalışma periyodu boyunca (4 saat) toplam güç enerji tüketim değeri (kJ), $W(t)$ ise anlık güç tüketim değeridir (kW). $W_{\text{FDM'siz}}$ durumda, W_{FDM} ise FDM'li durumda toplam enerji tüketim değerleridir. Soğutma sistemi, çalışma periyodunun ardından, elektrik kesintisinin simüle edildiği durum için de FDM'siz ve FDM'li olarak test edilmiştir. Her iki durumda da elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının, ortam sıcaklığına ulaşma süreleri tespit edilmiştir.

$$\text{Çalışma Süresi}(\%) = \frac{t_{\text{açık}}}{t_{\text{açık}} + t_{\text{kapalı}}} \times 100 \quad (1)$$

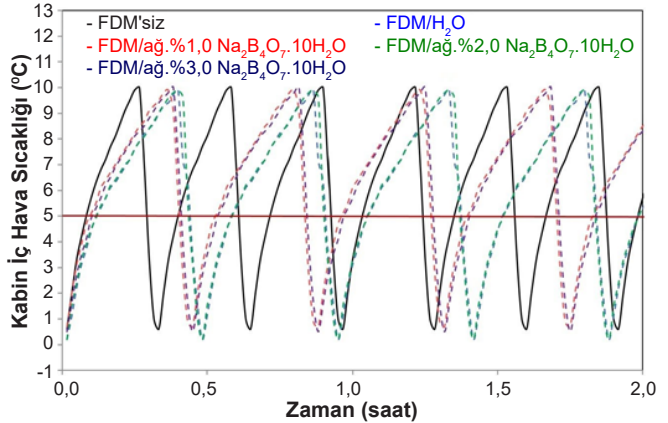
$$W(t) = \int_{t=0}^{t=4 \text{ saat}} W(t) dt \quad (2)$$

$$\text{Eneji Tasarrufu}(\%) = \frac{W_{\text{FDM'siz}} - W}{W} \times 100 \quad (3)$$

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi, ön soğutma amaçlı kullanılan bir soğutma sistemini simüle etmek üzere $0-10^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında FDM'siz ve FDM olarak, su ve ağ. %1,0-ağ. %3,0 konsantrasyonlarında hazırlanan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile test edilmiştir. Kabin iç hava sıcaklığının 2 saatlik çalışma periyodu için FDM'siz ve FDM'lerin sisteme entegre edildiği durumlarda zamanla değişimi Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1'de sunulan 2 saatlik çalışma periyodunda, FDM'siz durumda 6,3 olan döngü sayısının tüm

FDM'lerle azaltıldığı görülmektedir. Döngü sayısı, su, ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, ağ. %2,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ve ağ. %3,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile sırasıyla, 4,4, 3,6, 4,3 ve 4,6 olarak belirlenmiştir. Minimum döngü sayısının ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile elde edildiği görülmektedir. Döngü sayısında ki azalmanın kompresör açık ya da kapalı kalma süresinin uzaması ile ilişkili olabileceği bilinmektedir. Sistem toplam enerji tüketimi ise kompresör kapalı kalma süresinin uzaması ile sağlanacaktır.



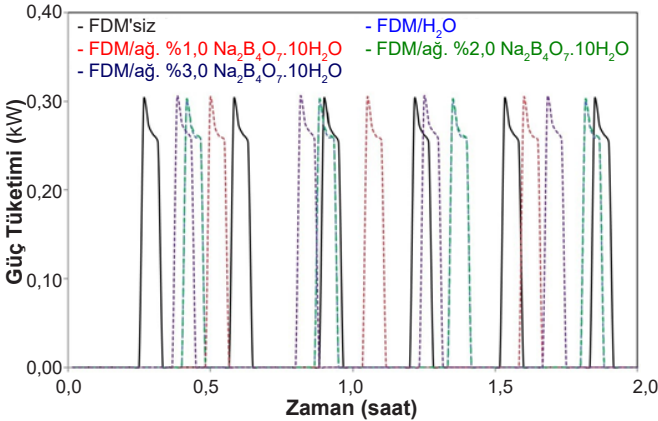
Şekil 1. Kabin iç hava sıcaklığının FDM'siz ve FDM olarak su ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile değişimi (2 saat)
(Variation of cabin air temperature without PCM and with water and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solutions as PCM (2 hours)).

FDM'lerin entegre edildiği durumlarda belirlenen döngü sayılarında ki kompresör kapalı kalma süreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 1 incelendiğinde FDM'siz ve FDM'li durumlarda kompresör açık kalma süresinin değişmediği, ancak FDM'siz durumda tespit edilen kapalı kalma süresinin FDM'li durumlarda arttığı görülmektedir. Kompresör açık ve kapalı kalma süreleri, Eş. 1 kullanılarak, çalışma süresi (%) değerlerinin hesaplanması için kullanılmıştır. FDM'siz durumda %21,05 olarak hesaplanan çalışma süresinin, tüm FDM'lerle azaldığı görülmektedir. Kapalı kalma süresinde ki uzama FDM'lerle kompresör çalışma süresi (%) değerlerinin azalmasını sağlanmaktadır. Çalışma süresi değeri su, ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, ağ. %2,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ve ağ. %3,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile sırasıyla, 14,81, 12,12, 14,29, 15,38 olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresi değeri ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile minimum değerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Tablo 1. FDM'siz ve FDM'li durumlarda kompresör çalışma süresi (%) değerleri (The running time (%) values.in the cases of with and without PCM).

FDM	Konsan-trasyon (ağ. %)	$t_{\text{açık}}$ (dk)	$t_{\text{kapalı}}$ (dk)	Döngü Süresi (dk)	Çalışma Süresi (%)
-	-	4	15	19	21,05
Su	-	4	23	27	14,81
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Çözeltisi	1,0	4	29	33	12,12
	2,0	4	24	28	14,29
	3,0	4	22	26	15,38

Soğutma sisteminde anlık olarak kompresör güç tüketim değerleri de kaydedilmiş ve değerler FDM'siz ve FDM'li durumlar için Şekil 2'de sunulmuştur.

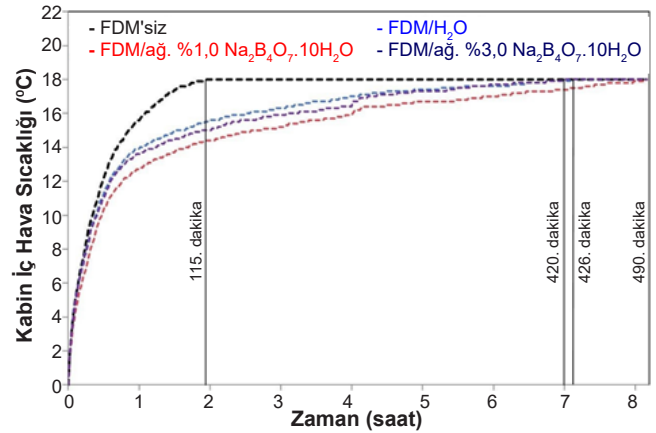


Şekil 2. Kompresör güç tüketiminin FDM'siz ve FDM olarak su ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltilerinin entegre edildiği durumlarda değişimi (2 saat) (Variation of compressor power consumption without PCM and with water and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solutions as PCM (2 hours)).

Kompresör anlık güç tüketim değeri incelendiğinde, FDM'siz durumda güç tüketim değerleri 0,301 kW ve 0,253 kW arasında değişirken, FDM olarak suyun kullanıldığı durumda 0,298 kW ve 0,258 kW arasında değiştiği tespit edilmiştir. FDM olarak ağ. %1,0, ağ. %2,0 ve ağ. %3,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri kullanıldığında maksimum ve minimum güç tüketim değerleri ise sırasıyla, 0,302 kW-0,256 kW, 0,300 kW-0,257 kW, 0,303 kW-0,256 kW olarak tespit edilmiştir. Anlık güç tüketim değerlerinden Eş. 2 kullanılarak, çalışma periyodu için toplam güç tüketim değerleri hesaplanmıştır. FDM'siz durumda 13,07 kJ olarak hesaplanan toplam enerji tüketim değerinin tüm FDM'lerle azaldığı belirlenmiştir. Bu değer, FDM olarak, su ve ağ. %1,0, ağ. %2,0, ağ. %3,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile sırasıyla, 8,99 kJ, 7,62 kJ, 8,74 kJ ve 9,89 kJ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerden Eş. 3 kullanılarak, FDM'lerle enerji tüketiminde ki düşüş (%) hesaplanmıştır. FDM olarak, su ve ağ. %1,0, ağ. %2,0, ağ. %3,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile enerji tasarrufu sırasıyla, %31,2, %41,7, %33,1, %24,3 olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresinin minimize edildiği durumda, ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile, beklenildiği gibi enerji tasarrufunun maksimize edildiği belirlenmiştir.

Soğutma sisteminde, çalışma periyodunun ardından elektrik kesintisi durumu simüle edilmiştir. Elektrik kesintisi esnasında, FDM'siz ve FDM'li durumlarda kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süreleri tespit edilmiş ve Şekil 3'de sunulmuştur. Şekil 3 incelendiğinde, kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığı 20 °C'ye ulaşma süresi FDM'siz durumda 115 dakika iken, bu süre tüm FDM'lerle uzamıştır. FDM olarak, su, ağ. %1,0 ve ağ. %3,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süresi sırasıyla 426 dakika, 490 dakika ve 420

dakika olarak tespit edilmiştir. Bu sürenin ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile maksimize edildiği ve FDM'siz durumda belirlenen sürenin 4,3 katına çıktığı belirlenmiştir.



Şekil 3. Elektrik kesintisi periyodunda FDM'siz ve FDM olarak su ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltilerinin entegre edildiği durumlarda kabin iç hava sıcaklığının zamanla değişimi (Cabinet air temperature versus time in the cases of without PCM and with water and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solutions as PCMs during the power failure period).

Çalışma süresi (%), toplam enerji tüketimi ve enerji tasarrufu (%) değerleri ve elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süreleri, FDM'siz ve FDM'li durumlar için kıyaslamalı olarak, Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'de sunulan tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, FDM olarak ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi sisteme entegre edildiğinde çalışma süresinin (%) ve toplam enerji tüketiminin minimize edildiği, dolayısıyla enerji tasarrufu maksimize edildiği görülmektedir. Buna ek olarak, elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süresinin FDM'siz duruma göre ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile maksimize edildiği belirlenmiştir. Dolayısıyla, ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi sisteme entegre edildiğinde kabin içinde ki ürünler daha uzun süre bozunmadan korunabilecektir. Ön soğutma işlemi yürütülen bir soğutma sistemine FDM olarak, bor minerallerinden borik asitin iki farklı konsantrasyonunda (ağ. %2,0 ve ağ. %4,0) hazırlanan çözeltilerin test edildiği çalışmada da FDM'siz duruma kıyasla toplam enerji tüketiminin FDM'lerle azaltıldığı tespit edilmiştir. Kompresör çalışma süresi ağ. %2,0 borik asit çözeltisi sisteme entegre edildiğinde minimize (%13,79) edilirken, sağladığı enerji tasarrufunun (%33,8) maksimum değere ulaştığı belirlenmiştir. Elektrik kesintisinin simüle edildiği durumda ise kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına (20 °C) ulaşma süresinin 429 dakika olduğu tespit edilmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde ağ. %2,0 borik asit çözeltisinin uygun bir FDM olduğu ortaya konulmuştur [24]. Önerilen ağ. %2,0 borik asit çözeltisi ile belirlenen kompresör çalışma süresi, çalışmamızda kullanılan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileriyle elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında ağ. %1,0 ve ağ. %2,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltileri ile sırasıyla %12,12 ile %14,29 olarak

tespit edilen değerlerin arasındadır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, kompresör çalışma süresinin ağı. %1,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltisi ile minimize edildiği görülmektedir. Böylelikle, bu FDM'nin sistemde kullanımının kompresör ömrünün arttırılmasına olanak sağlanacağı ortaya konulmuştur. FDM seçiminde faz değişim sıcaklığı ve gizli ısı değeri vb. gibi önemli özelliklerinin yanı sıra malzemenin çekirdeklenme hızı ve büyüme hızı yani kinetik özelliklerinin de dikkate alınması gerektiği bilinmektedir [25-27]. Tüm bu özelliklerin bileşik etkisi uygun FDM seçimini belirlemektedir. Elde edilen tüm sonuçlar ağı. %1,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltisi ile kompresör çalışma süresi minimize edilerek enerji tasarrufunun maksimize edildiğini ortaya koymuştur, dolayısıyla alternatif bir FDM olarak önerilmektedir. Elde edilen tüm deneysel sonuçlar incelendiğinde, ön soğutma prosesinde sisteme FDM olarak ağı. %1,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltisinin entegrasyonu ile maksimum enerji tasarruf sağlanmasının yanı sıra elektrik kesintisi esnasında ürünlerin kalitesinin daha uzun süreli korunabileceği ortaya konulmuştur.

Tablo 2. Çalışma süresi (%), toplam enerji tüketimi ve enerji tasarrufu (%) değerlerinin FDM'siz ve FDM olarak Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltilerinin entegre edildiği durumlarda değişimleri (Variations of the running time (%), total energy consumption and energy saving values in the cases of without PCM and with Na₂B₄O₇.10H₂O solutions as PCMs).

FDM	FDM'siz	H ₂ O/FDM	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O/FDM		
			%1,0	%2,0	%3,0
Çalışma Süresi (%)	21,05	14,81	12,12	14,29	15,38
Toplam Enerji Tüketimi (kJ/4 saat)	13,07	8,99	7,62	8,74	9,89
Enerji Tasarrufu (%)	-	- 31,2	- 41,7	- 33,1	- 24,3
Elektrik Kesintisi Esnasında Kabin İç Hava Sıcaklığının Ortam Sıcaklığına Ulaşma Süresi (dk)	115	426	490	-	420s

4. Sonuçlar (Conclusions)

Laboratuvar ölçekli bir soğutma sisteminin ön soğutma amaçlı kullanılan bir soğutma sistemini simüle etmek üzere 0-10 °C sıcaklık aralığında FDM'siz ve FDM olarak, su ve ağı. %1,0-ağı. %3,0 konsantrasyonlarında hazırlanan Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltileri ile test edilmiştir. FDM'siz durumda çalışma süresi %21,05 olarak belirlenirken, tüm FDM'lerle bu değerin azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma süresi, FDM olarak, su ve ağı. %1,0 Na₂B₄O₇.10H₂O, ağı. %2,0 Na₂B₄O₇.10H₂O, ağı. %3,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltileri sisteme entegre edildiğinde sırasıyla, 14,81, 12,12, 14,29, 15,38 olarak bulunmuştur.

Çalışma süresi değerinin ağı. %1,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltisi ile minimize edildiği tespit edilmiştir. Toplam güç tüketiminin tüm FDM'lerle, FDM'siz durumda belirlenen (13,07 kJ) değerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. FDM olarak, su ve ağı. %1,0, ağı. %2,0, ağı. %3,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltileri ile toplam güç tüketiminin sırasıyla, 8,99 kJ, 7,62 kJ, 8,74 kJ ve 9,89 kJ değerlerine düştüğü ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, FDM'lerle sağlanan enerji tasarrufu değerleri ise sırasıyla, %31,2, %41,7, %33,1, %24,3 olarak hesaplanmıştır. Elektrik kesintisinin simüle edildiği durumda, FDM'siz durumda 115 dakika olan kabin iç hava sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşma süresinin FDM'lerle önemli ölçüde uzadığı belirlenmiştir. Bu süre, FDM olarak, su, ağı. %1,0 ve ağı. %3,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltileri sisteme entegre edildiği durumlarda sırasıyla, 426 dakika, 490 dakika ve 420 dakika olarak tespit edilmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde, ön soğutma işleminin yürütüldüğü soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere alternatif bir FDM olarak ağı. %1,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltisi önerilmektedir. Bu çözeltinin belirtilen koşullarda çalışan sistemlere entegre edilmesinin önemli ölçüde enerji tasarrufu (%41,7) sağlayacağı ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, elektrik kesintisi esnasında kabin iç hava sıcaklığının ani yükselişinin ağı. %1,0 Na₂B₄O₇.10H₂O çözeltisi ile engellenebileceği, dolayısıyla kabin içinde bulunan ürünlerin uzun süre bozunmadan korunmasına olanak sağlanabileceği ortaya konulmuştur.

Yazar Katkısı Beyanı (Author Contribution Statement)

Berçem Kıran Yıldırım: Deneysel çalışmanın planlanması ve tasarlanması, kaynak sağlama, deneylerin yürütülmesi, elde edilen verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, makalenin yazılması,

Ebru Mançuhan: Kaynak sağlama, deneysel verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, makale metninin incelenmesi ve düzenlenmesi,

Sibel Titiz Sargut: Kaynak sağlama, deneysel verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, makale metninin incelenmesi ve düzenlenmesi

konularında katkıda bulunmuşlardır.

Teşekkürler (Acknowledgements)

Eti Maden Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları İşletme Müdürlüğü'ne boraks dekahidrat rafine bor numune temini için teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

- [1] Shabani, A., Saen, R. F., & Torabipour, S. M. R. (2012). A new benchmarking approach in Cold Chain. *Applied Mathematical Modelling*, 36(1), 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.05.051>.
- [2] Altun, Ö., Aslantaş K., & Sökmen, E. (2020). Design of a Cold Storage Depot Using R744 as Refrigerant with Two Evaporators in Eskisehir. *Soğutma Dünyası*, 23(88), 50-57. <https://drive.google.com/file/d/14L8goNN2k9vGXdr>

5v0G41PareShHwV84/view.

- [3]. Thakur, B. (2016). Advancement in harvesting, pre-cooling and grading of fruits. *Innovare Journal of Agricultural Science*, 4(2), 13-23. ISSN 2321-6832. <https://journals.innovareacademics.in/index.php/ijags/article/view/6802/4961>.
- [4]. Brosnan, T., & Sun, D. W. (2001). Precooling techniques and applications for horticultural products-a review. *International Journal of Refrigeration*, 24(2), 154-170. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(00\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00017-7).
- [5]. Azzouz, K., Leducq, D., & Gobin, D. (2009). Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: An experimental investigation. *International Journal of Refrigeration*, 32(7), 1634-1644. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.03.012>.
- [6]. Yusufoglu, Y., Apaydin, T., Yilmaz, S., & Paksoy, H. O. (2015). Improving performance of household refrigerators by incorporating phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 57, 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.04.020>.
- [7]. Kiran-Yildirim, B. (2022). 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), 5852-5867. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2089300>.
- [8]. Khan, M. I. H. & Afroz H. M. M. (2013). Effect of Phase Change Material on Performance of a Household Refrigerator. *Asian Journal of Applied Sciences*, 6, 56-67. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2013.56.67>
- [9]. Marques, A. C., Davies, G. F., Evans, J. A., Maidment, G. G., & Wood, I. D. (2013). Theoretical modelling and experimental investigation of a thermal energy storage refrigerator. *Energy*, 55, 457-465. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.091>.
- [10]. Khan, M. I. H. (2016). Conventional refrigeration systems using phase change material: a review. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 24(03), 1630007. <https://doi.org/10.1142/S201013251630007X>.
- [11]. Oró, E., De Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, 513-533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>.
- [12]. Joybari, M. M., Haghghat, F., Moffat, J., & Sra, P. (2015). Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems: The state-of-the-art review. *Energy Buildings*, 106, 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.016>.
- [13]. Le, T. L., Duong, X. Q., Nguyen, D. T., Nguyen, P. Q. P., Rajamohan, S., Vo, A. V., & Le, H. S. (2023). Application of phase change materials in improving the performance of refrigeration systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103097. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103097>.
- [14]. Rocha, T. T. M., Teggat, M., Trevizoli, P. V., & de Oliveira, R. N. (2023). Potential of latent thermal energy storage for performance improvement in small-scale refrigeration units: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113746. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113746>.
- [15]. Sekhar, S. J., Raj, M. A. F., Raveendran, P. S., & Murugan, P. C. (2022). Cladding phase change materials in freezing and chilling zones of household refrigerator to improve thermal performance and environmental benefits. *Journal of Energy Storage*, 55, 105476. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105476>.
- [16]. Yilmaz, D., Mancuhan, E., & Yilmaz, B. (2020). Experimental investigation of PCM location in a commercial display cabinet cooled by a transcritical CO2 system. *International Journal of Refrigeration*, 120, 396-405. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.09.006>.
- [17]. Kalidasan, B., Pandey, A. K., Rahman, S., Khir, H., & Zaed, M. A. (2024). Experimental investigation on nucleating agent for low temperature binary eutectic salt hydrate phase change material. *E3S Web of Conferences*, 488, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448801004>.
- [18]. Hou, P., Mao, J., Chen, F., Li, Y., & Dong, X. (2018). Preparation and thermal performance enhancement of low temperature eutectic composite phase change materials based on Na2SO4·10H2O. *Materials*, 11(11), 2230. <https://doi.org/10.3390/ma11112230>.
- [19]. Zhao, L., Xing, Y., Liu, X., & Luo, Y. (2018). Thermal performance of sodium acetate trihydrate based composite phase change material for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 143, 172-181. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.094>.
- [20]. Liang, Q., Zhang, H., Li, Y., Zhang, X., & Pan, D. (2024). Multifunctional response of biomass carbon/sodium sulfate decahydrate composite phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 83, 110621. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110621>.
- [21]. Kiran-Yildirim, B., T. Noya, E. Mancuhan, & S. Titiz-Sargut. (2021). Investigation of Energy Consumption for a PCM Integrated Laboratory Scale Cooling System: An Experimental Study. *23rd Congress on Thermal Science and Technology with International Participation (ULIBTK 2021), Türkiye*. 1, 1002-1008. <https://drive.google.com/drive/folders/1dmF8np0Qu3qAe3Nctv0xLElqJyi-jlRD>.
- [22]. Lide, D. R. (2009). *CRC handbook of chemistry and physics* (90th Edition). CRC press. ISBN 9781420090840.
- [23]. Smith, R. A., & McBroom, R. B. (2000). Boron oxides, boric acid, and borates. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0215181519130920.a01>.
- [24]. Kiran Yıldırım, B., Düzgün, E., Kül, B., Gök, S., Mançuhan, E., Sargut, S., & Ersoy, A. (2023). Ön Soğutma İşlemi Yapılan Bir Soğuk Depolama Sisteminde Enerji Tüketiminin Faz Değişim Malzemesi Kullanılarak İncelenmesi [Examination of Energy Consumption in a Cold Storage System used for the precooling process with Phase Change Material], 15. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-15) [15. National Chemical Engineering Congress (UKMK-15)], Türkiye, 782-785. https://drive.google.com/file/d/1NtbxLs0CqKo9Z4nJNk-mbrP_HVx43/view.

- [25]. Lane, G. A. (1983). *Solar Heat Storage* (Volume I: Latent Heat Material). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351076753>.
- [26]. Garg, H. P., Mullick, S. C., & Bhargava, A. K. (1985). *Solar Thermal Energy Storage*. Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5301-7>.
- [27]. Tek, Y. (2009). *Synthesis, characterization and physicochemical properties of urea and thiourea-fatty acid condensation compounds* (Thesis No. 244875). [Master's thesis, Gaziosmanpaşa University]. Council of Higher Education.