



SİLİNDİRİK FDM HAZNESİNDE KANATÇIK KULLANIMININ PERFORMANS ANALİZİ

Performance Analysis of Fin Usage in Cylindrical PCM Annulus

Mehmet Furkan Koparan
Ömer Faruk Yılmaz
Ahmet Cumhur
Berkan Aktan
Oktay İnan
Ersin Alptekin

ÖZET

Bu çalışmada, termal enerji depolama için faz değişim malzemelerinin (FDM) katı-sıvı hal değişimi sırasında yüksek gizli ısı kapasitesi ile enerji depolayabilme potansiyellerinden faydalanılmış ve farklı geometriler içerisinde bu enerjiyi depolamanın en verimli hali aranmıştır. Bu kapsamda ısı enerji depolama ortamı olarak silindirik haznelere seçilmiş ve içerisine kanat-akış yönlendirici parçalar yerleştirilip performansı ANSYS FLUENT yazılımı sayesinde araştırılmıştır. Parametrik ilerlemek amacı ile 3 farklı geometride kanat-akış yönlendirici kullanılıp her bir düzen için uzunluk ve açı değerleri de değiştirilmiştir ve bunun yanı sıra baz senaryo olan kanatçiksiz haznenin ısı depolama performansı da araştırmaya dahil edilmiştir. Zamana bağlı bir çalışma yapılmış ve referans süre olarak 1 saat belirlenmiştir. Silindir dış ortam sıcaklığı 317 K, 321 K ve 323 K olarak değiştirilerek kapsamlı bir inceleme yapıldığında, uygun kanat-akış yönlendirici düzenleri kullanıldığı takdirde düşük sıcaklıklarda bile çok yüksek toplam erime yüzdeleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gizli Isı, Isıl Enerji Depolama, Faz Değişim Malzemesi, Kanatçık.

ABSTRACT

In this study, the potential to store energy with high latent heat capacity during solid-liquid state change of phase change materials (PCM) for thermal energy storage was utilized and the most efficient way of storing this energy in different geometries was sought. In this context, the cylindrical domain was chosen as the geometry and the fin-flow directing parts were placed in it and its performance was investigated via ANSYS-FLUNET software. In order to proceed parametrically, fin-flow directing guides in three different geometries were used and the length and angle values were changed for each arrangement. In addition the heat storage performance of the unfinned cylinder was also included to our research. A transient analysis was conducted and one hour was determined as the reference time. When the cylinder outdoor temperature was changed as 317K, 321K, 323K and a comprehensive examination was made, so high total melting percentages were detected even at low wall temperatures if suitable fin-flow directing arrangements were adopted.

Key Words: Latent Heat, Thermal Energy Storage, Phase Change Material, Fin

1. GİRİŞ

21. yüzyıl dünyasında insanların en temel ihtiyaçlarından birinin enerji olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Enerji, ülke politikalarında hemen hemen başrolü oynamaktadır. Gelinen bu noktada bir ülkenin bağımsızlığı kendi enerjisini üretebilmesi ile eşdeğer görülmektedir [1]. Enerji onlarca yıldır fosil yakıtlardan karşılanırken bu fosil yakıtların, birçok yan etkisinin olduğunun keşfedilmesi çok uzun sürmemiştir. Bu yan etkiler hem yaşadığımız çevreyi hem de dünyamızı direkt olarak etkilemektedir [2]. Bu yan etkilerin en başında karbon emisyonu gelmektedir. Bu etkisinin yanında fosil yakıtların sınırsız olmaması insanlığı yeni ve temiz enerji kaynaklarını aramaya itmiştir. En popüler yenilenebilir enerji kaynakları güneş ve rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr ve güneş enerjisi dış etkenlerden epey etkilenebildiklerinden dolayı günümüzde hala fosil yakıtların yerine tamamen geçememişlerdir. Bu, araştırmacıları enerji depolama sistemlerinin üzerinde çalışmaya ve geliştirmeye itmiştir[3]. Günlük hayatımızda güneş enerjisi, gıda muhafazası, buhar üretimi, ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi gibi çeşitli şekillerde ve alanlarda kullanılmaktadır [4].

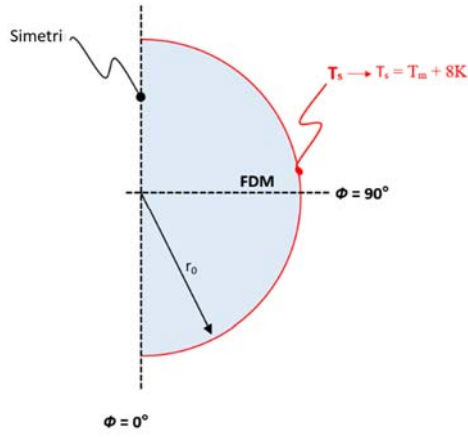
Enerji genel olarak; mekanik enerji, elektriksel enerji ve ısı enerji biçimlerinde depo edilebilmektedir [5]. Isıl enerji depolama, elde edilen enerjinin değişen çevre koşullarından dolayı kaybolmasını engellemek için ortamın soğutulma ve ısıtılma işlemleriyle geçici olarak depolanmasıdır. Isıl enerji depolama sistemleriyle ozon tabakasına zararlı olan kloroflorokarbonlara ihtiyaç duymadan enerji depolanabilmektedir. Isıl enerji depolama sistemleri sayesinde elektrik enerjisine en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda elektrik tüketimine aşırı yüklenme engellenebilmektedir. Isıl enerji depolama sistemlerinde üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar duyulur ısı depolama, termokimyasal ısı depolama ve gizli ısı depolama yöntemleridir. Duyulur ısı depolama, katı ya da sıvı haldeki ortama giren ısının iç enerji olarak depolanması esasına dayanmaktadır [6]. Termokimyasal ısı depolama, ısı enerjinin bağ enerjisi olarak tersinir olacak şekilde depolanması esasına dayanmaktadır ve kimyasal bileşikteki bağları koparmak için gereken ısının neredeyse tamamı sentez reaksiyonu gerçekleştiğinde geri alınabilmektedir [7]. Gizli ısı depolama, bir malzemeyi faz değişimi gerçekleşene kadar ısıtma yöntemi ile sağlanmaktadır. Katı halden sıvı haline veya sıvı halden gaz haline geçen materyal faz değiştirmek için çok miktarda ısıya ihtiyaç duymaktadır ve bu ısı faz değişim ısı olarak adlandırılır, malzemenin bu davranışı gizli ısı depolamanın temel prensibidir [8,9]. Bu aşamada kullanılan malzemeler faz değişim malzemeleridir.

Faz değişim malzemeleri, faz değişimi ile ısı depolama, enerji kullanımı ve enerji tasarrufu iyileştirmenin etkili bir yoludur [10]. Faz değişim malzemeleri enerji depolamak veya belirli bir sıcaklık aralığında değişen sıcaklığı kontrol etmek için kullanılabilir. Sıcaklık yükseldikçe FDM, endotermik bir süreçte ısıyı emer ve fazı katıdan sıvıya değişir. Sıcaklık düştükçe, ekzotermik bir süreçte ısıyı serbest bırakır ve katı fazına geri döner [11]. FDM'ler yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Bunlar; termal enerji depolama tanklarında, binalarda ısıtma, soğutma ve izolasyonda, tekstil endüstrisinde mikro kapsüllenmiş FDM içeren akıllı tekstil ürünlerinde, gıda sektöründe özellikle ambalajlarda, elektronik devre bileşenlerinde mikro kapsüller olarak, sıcaklığa duyarlı cihazların soğutulmasında ve bunlar gibi birçok alanda kullanımları bulunmaktadır [12, 13, 14, 15]. Günümüzde ve yakın gelecekte, ısı iletiminin ve taşınımın faz değişimine etkisi, içi FDM dolu makro ölçekli haznelere ile araştırılmaya ve karşılaştırılmaya devam etmektedir. [16] Çalışmasında ise küresel bir FDM haznesinin içerisine hazne yüzeyine temas halinde olacak metalik pimler eklenmiş ve faz değişimi süresinde ne kadarlık bir azalma olacağına dair matematiksel modeller ve deneysel analizler kullanılarak incelenmiştir. [17] Çalışmasında ise silindirik bir FDM haznesi modellenmiş, tasarımda ısı transferi katsayısının değişimine ve kanat eklenmesine bağlı olarak faz değişim süresinin değişimi incelenmiştir. [18, 19 ve 20] Çalışmalarında ise hazne içerisine konulabilecek kanat yapılarının açıları, yerleşimi, sayısı ve uzunlukları gibi tasarımsal konular ele alınarak faz değişimi sırasında oluşan doğal taşınımın da göz önünde bulundurulması ile faz değişimi süresindeki değişimler ve kanat açısının etkileri araştırılmış, optimizasyon ile en uygun modeller seçilmiştir. [21] Çalışmasında FDM haznesindeki erime dağılımının doğal taşınımın etkisi ile üst bölgede daha hızlı fakat alt bölgede ise daha yavaş olmasından dolayı düzensizlik oluşmaktadır. Bu düzensizliğin etkilerini ortadan kaldırmak için kanatların sağladığı ısı transferi hızındaki artıştan yararlanarak haznenin alt taraflarındaki kanat yoğunluğunun üst taraftan daha fazla olması ve bu sayede tüm hazne genelinde daha düzenli bir faz değişimi dağılımı elde edilmesine yönelik tasarımlar yapılmış, bu tasarımlar doğrultusunda analizler yürütülmüştür. [22] Çalışmasında ise faz değişim malzemesinin değişiminin kanatlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

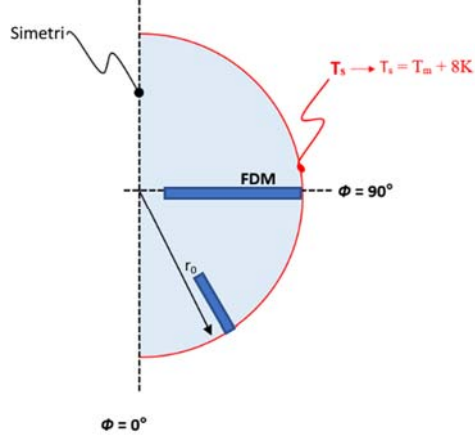
2. MATERYAL ve METOD

2.1 Problemin Tanımı

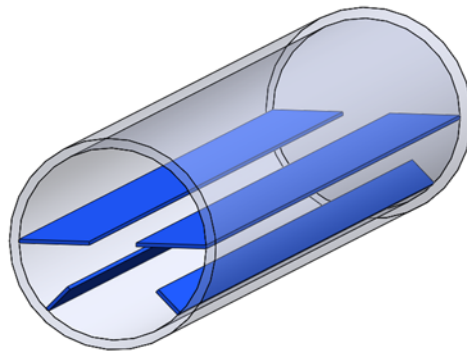
Bu çalışmanın amacı faz değişim malzemesinin (FDM) farklı akış sıcaklıklarının, farklı kanat yapılarının ve farklı kanat açılarının erime hızına etkilerini araştırmaktır. Bunlara ek olarak kanat konfigürasyonlarının değişmesi nedeniyle kaybedilen FDM hacmi hesaplanmış olup, hacim kaybı sebebiyle oluşan potansiyel enerji kaybı da hesaplanmıştır. Üç farklı kanatçık kullanılmış olup bu konfigürasyonlarda farklı kanat uzunlukları ve açıları kullanılmıştır. Ayrıca bu konfigürasyonlara ek olarak kanatçıkların uzunlukları, konumları ve açıları parametrik olarak incelenmiştir. Bunlara ek olarak kendi tasarımı olan akış yönlendirici kanatçık dizaynımızı da bu problemde kullanmış olup doğal taşınımın yönlendirilmesi hedeflenmiştir. Doğal taşınım, herhangi bir dış zorlamanın olmadığı durumda materyalin tamamen kendi kendine soğuması ve ısınmasıdır. Doğal taşınımında sıcaklığı artan madde yoğunluğunun azalması sonucu yerçekimi ivmesine zıt olarak yönelir [23]. Yaptığımız literatür araştırmalarında da görüldüğü üzere silindirin üst yarısında bu yönelme sonucu, daha fazla erimeye sebep olacaktır ancak, sıcak akışkanın yukarıda birikmesi sıcaklık farkını azaltacağından ısı transfer hızını da azaltacaktır. Kendi tasarımı olan akış yönlendirici kanatçık sayesinde doğal taşınımın dolaylı olarak hız vektörlerinin yönlendirilmesi hedeflenmiştir. Böylece silindirik geometrinin içerisinde bir akış sirkülasyonu yaratılarak erimenin düzgün ve kontrollü olması hedeflenmiştir.



Şekil 1. Kanatsız FDM haznesi



Şekil 2. Kanatlı FDM hazne tasarımı



Şekil 3. Kanatlı FDM haznesinin 3 boyutlu görseli

Şekil 1'de bulunan kanatsız FDM haznesi tasarımıdaki erime sürecini hızlandırmak ve iyileştirmek adına Şekil 2'de şematize edilen kanatlı FDM haznesi tasarımı modellenmiştir. Bu tasarım ile daha yüksek ısı transferi hızları elde ederek, aynı zaman aralığında yüksek yüzdesel erime elde etmek amaçlanmıştır.

Çalışmamızda faz değişim malzemesi olarak yaklaşık 313 K sıcaklığında erime noktasında bulunan düşük sıcaklıkta gizli ısı depolamaya elverişli parafin bazlı n-oktadekan, hem ekonomik hem de bulunabilirlik faktörleri de göz önünde bulundurulduğunda uygun görülmüştür. Ayrıca n-oktadekan malzemesi, literatürde çok sayıda araştırması yapılmış, termo-fiziksel özellikleri hakkında fazlaca bilgiye sahip olduğumuz ve çalışmamız için gerekli özellikleri sağlayan elverişli bir malzemedir. Tablo 1'de çalışmamızda kullandığımız parafin bazlı n-oktadekan malzemesinin termofiziksel özellikleri tablo halinde verilmiştir. Tablo 2'de çalışmamızda kullandığımız alüminyumdan yapılmış kanatçık için termofiziksel özellikler tablo halinde verilmiştir.

Tablo 1. n-oktadekan malzemesinin termofiziksel özellikleri

Sıcaklık Değerleri [K]	$T_m = 313.15$ [K].....Sabit katı hal sıcaklığı = 313 [K] $T_{wall} = 321.15$ [K] Sabit sıvı hal sıcaklığı = 315 [K]
Gizli Isı [J/kg]	120271.8
Özgül Isı [J/(kg-K)]	$c_{p, katı} = 2000$ $c_{p, sıvı} = 2074.69$
Termal İletkenlik [W/(m-K)]	$k_{katı} = 2.419$ $k_{sıvı} = 1$
Yoğunluk [kg/(m³)]	$\rho_{katı} = 800$ (T < 314K) $\rho_{sıvı} = 800$ [kg/(m ³)]*(1 - 1.184447E-04 [K ⁻¹]*(T - 314[K]) (T >314K).
Dinamik Viskozite [kg/(m-s)]	0.02222

Tablo 2. Alüminyumdan yapılmış kanatçık için termofiziksel özellikler

Yoğunluk [kg/(m³)]	2719
Özgül Isı [J/(kg-K)]	871
Termal iletkenlik [W/(m-K)]	202.4

2.2 Sınır Koşulları

- Silindirin yüzeyi 317K, 321K ve 323K arasında değiştirilmiştir.
- Sabit yüzey sıcaklığı kabul edilmiştir.
- Y eksenine simetrik sınır koşulu verilmiş olup içeri doğru erime analizi yapılmıştır.
- 2 boyutlu analiz çalışması yapılmıştır.

2.3 Çözüm yöntemi

Bu çalışmada, FDM haznesi içerisindeki yüzdesel erime oranı zamana bağlı olarak ANSYS-FLUENT programında sayısal olarak incelenmiştir. Farklı sıcaklık durumlarının erime oranları üzerine etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla çeşitli değişkenler belirlenmiştir. Seçilen değişkenler; kanatçık ve akış düzenleyicinin (aero-thermal) konumu, boyu, uzunluğu, açısı ve sıcaklık değeridir. Belirlenen sayısal yöntemin doğruluğunu teyit etmek adına literatür araştırılması ile gerekli değerlendirmeler yapılmış olup, çözüm yönteminin uygunluğuna karar verildikten sonra yukarıda belirtilen parametrelerin erime oranlarına ve sürelerine etkileri karşılaştırılmalı olarak elde edilmiştir.

Zamana bağlı çözüm için korunum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir [24].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

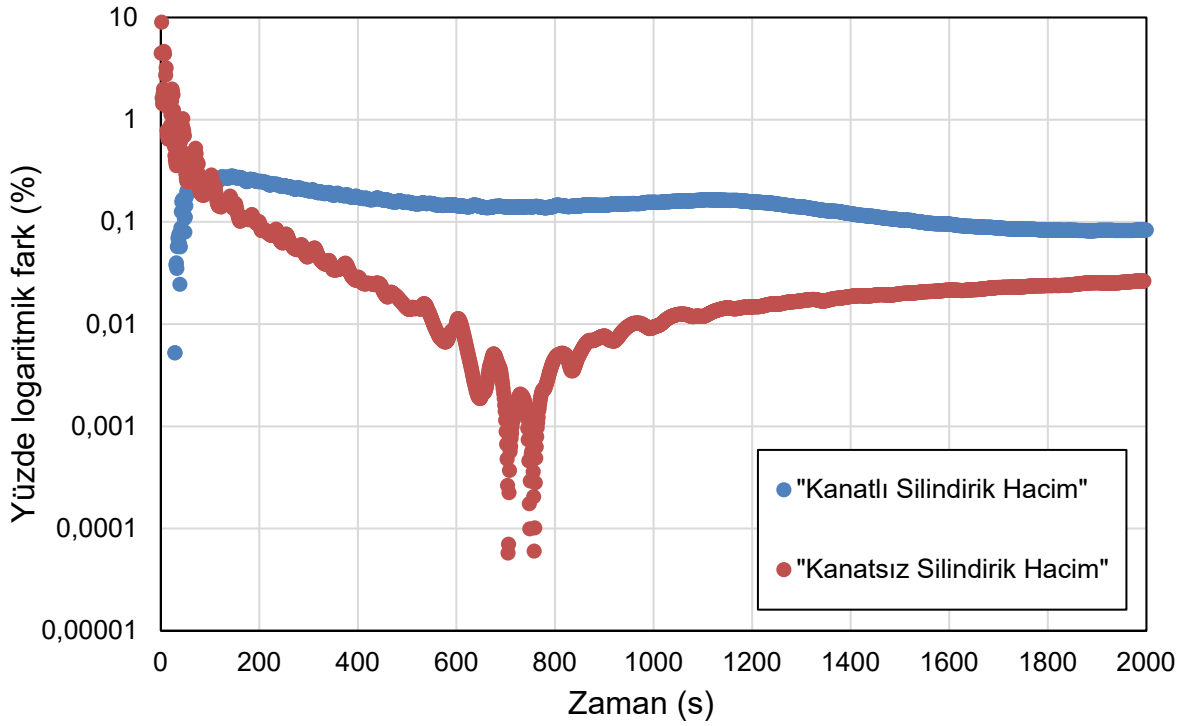
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) \quad (3)$$

Eşitlik (2) ve (3)'teki son terimler türbülans kaynaklı gerilmelere karşılık gelmektedir. Bu terimlerin hesaplanmasında realizable $k-\varepsilon$ modeli uygulanmıştır. Yukarıda tanımlanan korunum denklemleri ANSYS-FLUENT paket programında iteratif olarak çözülmüştür. Analizin yapılacağı hazne alanında dikdörtgen ağ yapıları kullanılmıştır. Kanatçıkların uçlarında ve doğal taşınım kaynaklı sınır tabaka etkilerinin görülmesi beklenen yerlerde kontrol hacimlerinin sıklığı arttırılmış ve bu bölgelerde daha yoğun bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Çözüm bölgesi yaklaşık olarak 48000 kontrol hacmine ayrılmıştır. Analizler zamana bağlı olup zaman adım büyüklüğü 0.005 s ile 0.001 s arasında değiştirilmiştir. Çözüm algoritması olarak "Non-Iterative Time Advancement" (NITA) metodu kullanılmıştır. Ayrıklaştırma yöntemi olarak "Second Order Upwind" kullanılmıştır. Süreklilik, momentum ve türbülans korunum denklemleri için yakınsama kriteri 10^{-4} olarak tanımlanırken, enerji korunum denklemi için yakınsama kriteri 10^{-10} olarak belirlenmiştir. Korunum denklemlerinin detayları ANSYS-FLUENT paket programının dokümanlarında bulunabilir [24].

Nümerik analizlerin doğruluğunu kanıtlayabilmek adına enerji korunumu denkleminde analiz çıktıları doğrulanmıştır. Şekil 4'teki grafikte giren enerji ile depolanan enerji arasındaki yüzdelik fark hesaplanmıştır. Nümerik analizlerdeki "**yakınsama**" nedeniyle ilk zaman adımlarında büyük farklar görülse de zaman adımları ilerledikçe bu fark azalarak 0'a yaklaşmıştır. Buradan da anlaşıldığı üzere yapılan analiz doğrulanmıştır. Yüzdelik farkı hesaplamak için giren ve depolanan enerji hesaplanmıştır. Giren enerjinin hesabı Ansys Fluent paket programından alınan ısı girdisidir (q). Depolanan enerji hesabı ise $q = mc_p \Delta T$ formülünden hesaplanmaktadır. Entalpinin karşılığı olarak $h = c_p \Delta T$ kullanılmıştır. Kütleler için her bir kanatçığın kütlesi ve faz değişim malzemesinin (FDM) kütlesi ayrı ayrı hesaplandıktan sonra enerji hesabı yapılmıştır. Ardından her bir zaman adımı için kütlelerin depoladığı ısı enerjisi hesaplanmış olup, hesaplanan bu değerler bir önceki zaman adımından çıkartılarak toplam depolanan enerji bulunmuştur. Bunlar yapıldıktan sonra ısı enerji girdisi ve depolanan enerji birbirlerinden çıkarılıp ısı girdisine oranlanmıştır. Anlatılanlar aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$\text{Yüzdesel fark (\%)} = \frac{q_{girdi} - mc_p \Delta T}{q_{girdi}} \times 100$$



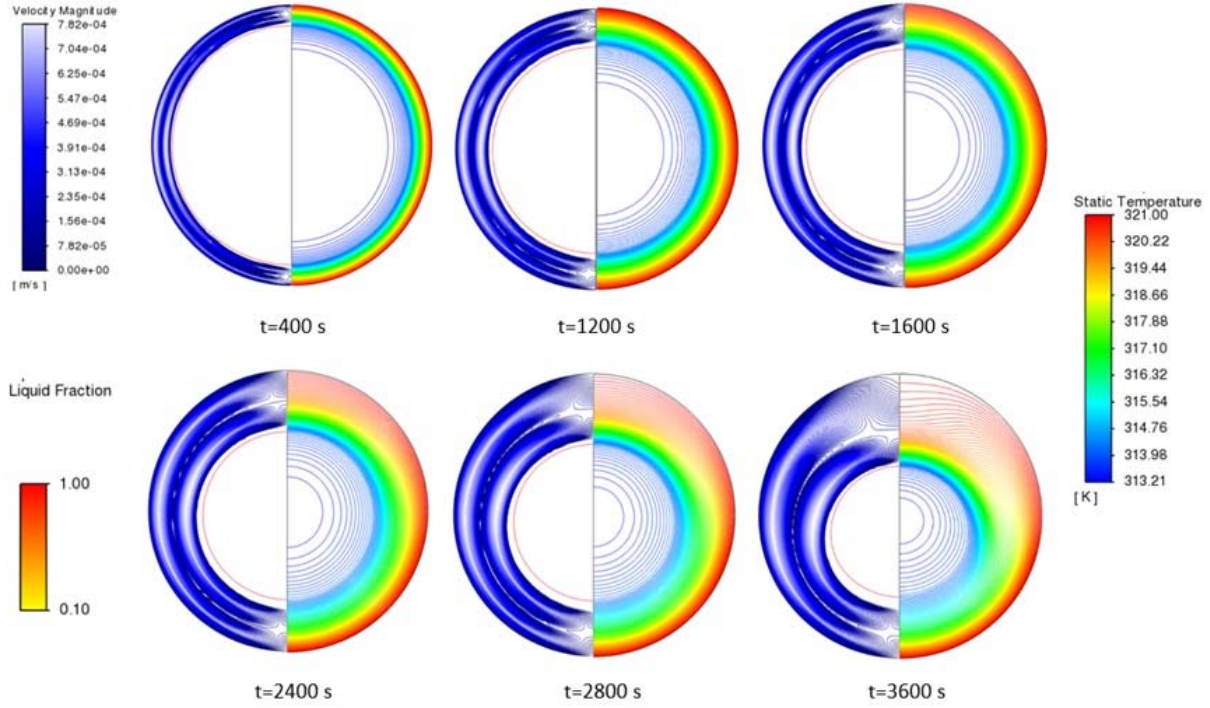
Şekil 4. Zamana bağlı yüzdesel farkın değişimi

3.BULGULAR

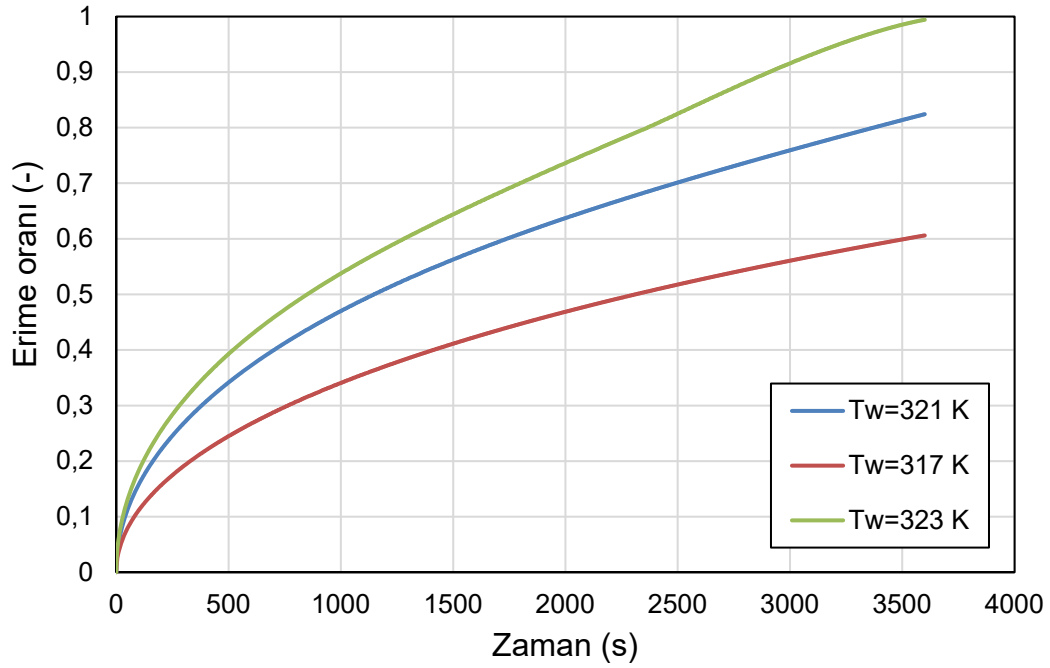
Çalışma kapsamında öncelikle kanat barındırmayan içi boş silindirik tüp içerisindeki FDM'nin erime performansı incelenmiştir. Silindir dış yüzey sıcaklığının 321 K olarak kabul edildiği analiz çıktıları Şekil 5'te gösterildiği gibidir. Doğal taşınım mekanizması sayesinde tüpün üst tarafında çok daha fazla erime gözlemlenmiştir. Mevcut durumda 3600 saniye sonucunda %82 erime elde edilmiştir. Yüzey sıcaklığının erime yüzdesi üzerine etkisini incelemek amacı ile üç farklı sıcaklıkta analiz çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmaların çıktıları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6'da görüldüğü üzere yüzey sıcaklığının artması erime oranını oldukça arttırmıştır. 3600 saniye sonunda yüzey sıcaklıklarının 317 K, 321 K ve 323 K olduğu durumlarda erime oranları sırası ile 0.6 , 0.82 ve 0.99'dur.

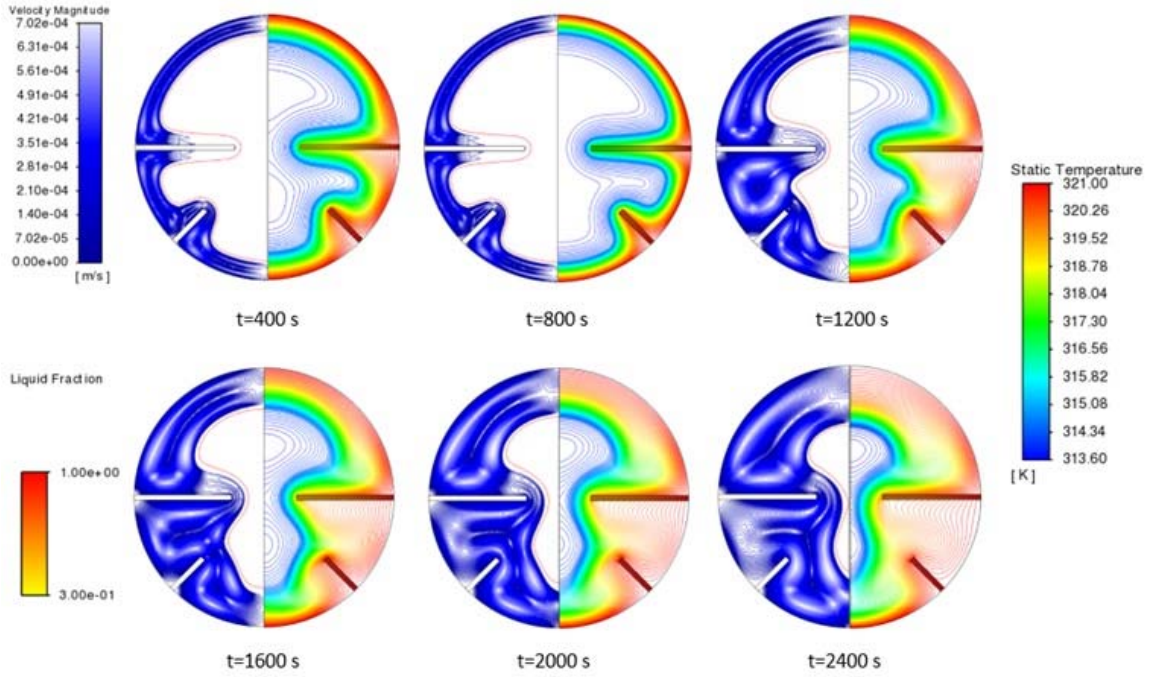
İçi boş silindirik tüp içerisinde bulunan FDM'nin erime yüzdeleri incelendiğinde, düşük yüzey sıcaklıklarında erime yüzdelerini arttırmak adına tüp içerisinde kanatçık kullanımının faydalı olacağı kararına varılmış ve bunun üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Bu doğrultuda tüp içerisinde iki tane farklı boyutta ve farklı açıda konumlandırılmış kanatçık eklenmiştir. Bu tasarım sonucunda yapılan analizin çıktıları Şekil 7'de görselleştirilmiştir.



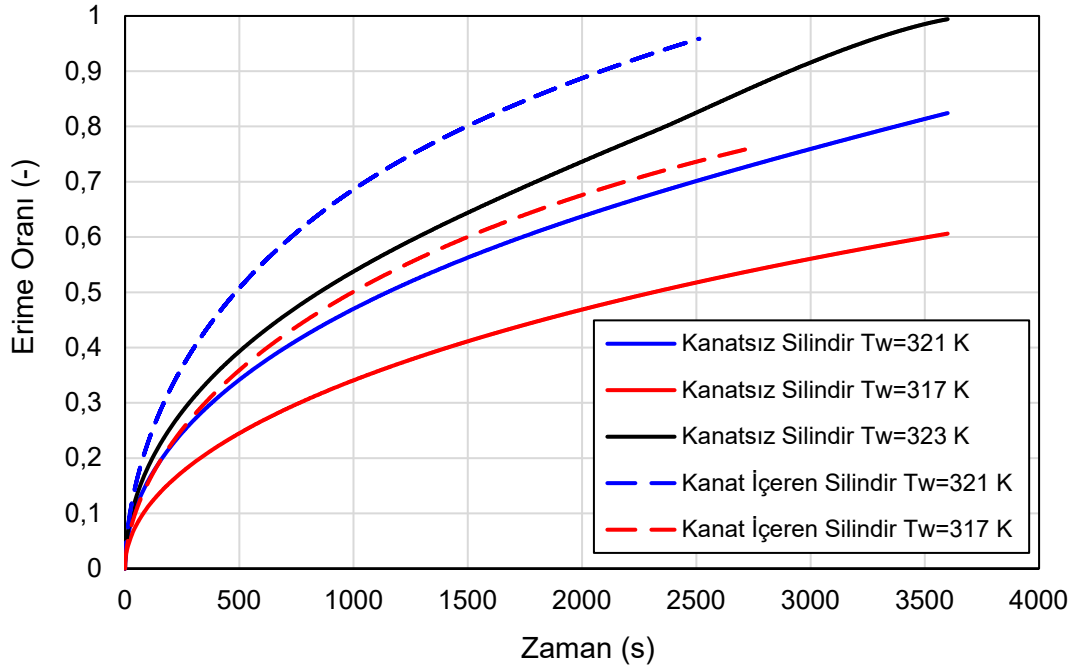
Şekil 5. Kanatsız ısı depolama ortamı için zamana bağlı erime işlemi ($T_w = 321$ K)



Şekil 6. Farklı yüzey sıcaklıklarında gelişen erime oranı



Şekil 7. İki kanatçık içeren tüpün analiz çıktıları ($T_w=321$ K)



Şekil 8. Farklı yüzey sıcaklıkları ve tasarım parametrelerinde gelişen erime oranı

Şekil 7'de görüldüğü üzere kanatçıklar sayesinde tüp içerisinde farklı bölgelerde doğal taşınım sirkülasyonu elde edilmiş ve tüpün alt kısmında erime oranı oldukça artırılmıştır. İki farklı yüzey sıcaklığında yapılan analizlerin çıktıları Şekil 8'deki grafikte görselleştirilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere 2500 saniye sonunda yüzey sıcaklıkları 317 K ve 321 K olan kanatçıklı tüplerdeki erime oranları sırası ile 0.76 ve 0.95' tir. Veriler incelendiğinde kanatçık kullanımının tüp hazne içerisindeki FDM'nin erime oranlarına etkisinin oldukça fazla olduğu görülmüştür.

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada termal ısı depolama amacı ile kullanılan FDM'lerin performansı araştırılmıştır. Çalışma ortamı olarak silindirik tüp seçilmiş olup, literatür araştırmaları sonucunda tüplerin içerisine kanatçık yerleştirilmesi uygun görülmüştür. Tüp hazne içerisine yerleştirilecek kanatçıkların etkisini incelemek adına içi boş ve kanatçık içeren tüplerin performansı farklı sıcaklık parametreleri çerçevesinde Ansys Fluent paket programı aracılığı ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kanatçık kullanılmayan tasarımda doğal taşınımın etkisi ile silindirik halkasal ortamın üst yüzeylerinde erime oldukça fazla iken, alt kısımlarında erimenin çok sağlanmadığı saptanmıştır.
- Kanatçık kullanıldığı takdirde ısı enerjisi depolama haznesi içerisinde birden fazla doğal taşınım sirkülasyonu elde edilmiştir. Bu sayede erime hazne içerisinde daha dengeli bir şekilde gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra kanatçıklar hazne yüzeyine temas ettiği için bulunduğu bölgelerde erimeye oldukça fazla katkı sağlamıştır ve haznenin alt yüzeyinde bulunan FDM'nin erimesini hızlandırmıştır. Veriler incelendiğinde kanatçık içeren tüplerde yüzdesel erime kanat kullanılmayan duruma oranla yaklaşık olarak %40 daha fazladır.
- Yüzey sıcaklıkları arttırıldığı takdirde hazne içerisindeki yüzdesel erime artmaktadır. Yüzey sıcaklığını 4 C° arttırdığımız takdirde yaklaşık olarak erime oranı %30 oranında artmaktadır.
- Değişken yüzey sıcaklıkları dikkate alındığında, silindire kanatçık eklenmenin etkisini inceleyecek olursak 321K yüzey sıcaklığında kanatçığın erime sürecine katkısı %37,1 iken 317K yüzey sıcaklığında bu katkı %40,3'tür. Buradan da görüldüğü ki düşük yüzey sıcaklıklarında kanatçık kullanımı daha faydalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Mona, Y., Chaichana, C., & Thiangchanta, S. (2022). Investigation of the temperature distribution models for phase change material (PCM) in one-dimensional direction. *Energy Reports*, 8, 625-630.
- [2] Dincer, I., & Ezan, M. A. (2018). Heat storage: a unique solution for energy systems. Springer.
- [3] Lakatos, L., Hevessy, G., & Kovács, J. (2011). Advantages and disadvantages of solar energy and wind-power utilization. *World Futures*, 67(6), 395-408.
- [4] Ali, H. M. (2022). Phase change materials based thermal energy storage for solar energy systems in buildings. *Journal of Building Engineering*, 104731.
- [5] Alptekin, E., Özer, M., Top, M., Yavuz, F. E., & Ezan, M. A. (2018). A numerical study on phase change inside a spherical capsule. In *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions* (pp. 613-625). Academic Press.
- [6] Cabeza, L. F. (2012). Thermal energy storage. *Comprehensive renewable energy*, 3, 211-253.
- [7] Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M., & Cognet, P. (2014). A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 591-610.
- [8] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM. *Heat and mass transfer*, 11-55.
- [9] Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 724-737.
- [10] Li, W., Li, S. G., Guan, S., Wang, Y., Zhang, X., & Liu, X. (2017). Numerical study on melt fraction during melting of phase change material inside a sphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(29), 18232-18239.
- [11] Souayfane, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Energy and buildings*, 129, 396-431.
- [12] Zou, L., Luo, Y., Zhang, J., Sheng, X., Chen, Y., & Lin, P. (2023). Phase change material gel particles with suitable size and superior thermophysical properties towards highly efficient

- thermal management of miniature electronic components. *Journal of Energy Storage*, 60, 106590.
- [13] Çam, N. Y., Alptekin, E., Bilir, L., & Ezan, M. A. (2022). Thermal behavior of a solar-assisted latent heat thermal energy storage unit on the heating season under variable weather conditions. *Journal of Energy Storage*, 52, 104934.
- [14] Georgiou, L., Konatzii, P., Morsink-Georgali, P. Z., Klumbyte, E., Christou, P., & Fokaidis, P. A. (2023). Numerical and environmental analysis of post constructive application of PCM coatings for the improvement of the energy performance of building structures. *Construction and Building Materials*, 364, 129984
- [15] Nejman, A., & Cieślak, M. (2017). The impact of the heating/cooling rate on the thermoregulating properties of textile materials modified with PCM microcapsules. *Applied Thermal Engineering*, 127, 212-223.
- [16] Aziz, S., Amin, N. A. M., Majid, M. A., Belusko, M., & Bruno, F. (2018). CFD simulation of a TES tank comprising a PCM encapsulated in sphere with heat transfer enhancement. *Applied Thermal Engineering*, 143, 1085-1092.
- [17] Bouhal, T., Kousksou, T., & Jamil, A. (2018). CFD thermal energy storage enhancement of PCM filling a cylindrical cavity equipped with submerged heating sources. *Journal of Energy Storage*, 18, 360-370.
- [18] Ji, C., Qin, Z., Low, Z., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F. (2018). Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins. *Applied Thermal Engineering*, 129, 269-279.
- [19] Qin, Z., Low, Z. H., Ji, C., & Duan, F. (2022). Efficacy of angled metallic fins for enhancing phase change material melting. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 132, 105921.
- [20] Li, J., Abdulghani, Z. R., Alghamdi, M. N., Sharma, K., Niyas, H., Moria, H., & Arsalanloo, A. (2023). Effect of twisted fins on the melting performance of PCM in a latent heat thermal energy storage system in vertical and horizontal orientations: Energy and exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119489.
- [21] Ao, C., Yan, S., Hu, W., Zhao, L., & Wu, Y. (2022). Heat transfer analysis of a PCM in shell-and-tube thermal energy storage unit with different V-shaped fin structures. *Applied Thermal Engineering*, 216, 119079.
- [22] Peng, B., Qiu, M., Xu, N., Zhou, Y., Sheng, W., Su, F., & Wang, S. (2022). Impacts of the Thermophysical properties of the phase change materials (PCMs) on the melting performance and optimum dimensions of fins. *Computers & Chemical Engineering*, 165, 107929.
- [23] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons
- [24] Fluent, A. N. S. Y. S. (2011). *Ansys fluent theory guide*. Ansys Inc., USA, 15317, 724-746.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Furkan KOPARAN

1998 Ankara doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü 4.sınıf öğrencisidir. Araştırma ve Bitirme Projelerini "Faz Değişim Malzemesi Haznesi Tasarımı ve İmalatı" üzerine yapmaktadır.

Berkan AKTAN

1999 Afyonkarahisar doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü 4.sınıf öğrencisidir. Araştırma ve Bitirme Projelerini "Faz Değişim Malzemesi Haznesi Tasarımı ve İmalatı" üzerine yapmaktadır.

**Ahmet CUMHUR**

1999 Adana doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü 4.sınıf öğrencisidir. Araştırma ve Bitirme Projelerini "Faz Değişim Malzemesi Haznesi Tasarımı ve İmalatı" üzerine yapmaktadır.

Ömer Faruk YILMAZ

1998 Ordu doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü 4.sınıf öğrencisidir. Araştırma ve Bitirme Projelerini "Faz Değişim Malzemesi Haznesi Tasarımı ve İmalatı" üzerine yapmaktadır.

Oktay İNAN

1999 Mardin doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü 4.sınıf öğrencisidir. Araştırma ve Bitirme Projelerini "Faz Değişim Malzemesi Haznesi Tasarımı ve İmalatı" üzerine yapmaktadır.

Ersin ALPTEKİN

1988 Mersin doğumludur. Lisans eğitimini İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2011 senesinde bitirmiştir. 2014 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans 2021 yılında ise Doktora eğitimini tamamlamıştır. Isıl enerji depolama ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği üzerine çalışmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmanın başlangıcından bitimine kadar her aşamada çalışmasını yönlendiren, özverili yardımlarını ve kaynaklarını esirgemeyen **Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN**'a teşekkür eder.