

**T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TUZ HİDRAT VE PARAFİNLERİN GÖZENEKLİ
ORTAMLARDA ISI DEPOLAMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**


Alptuğ YATAĞANBABA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

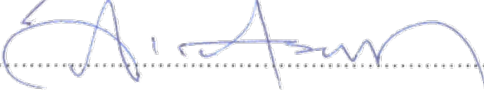
**DANIŞMAN
Doç.Dr. İrfan KURTBAŞ**

**OCAK 2013
ÇORUM**

Alptuğ YATAĞANBABA tarafından hazırlanan “Tuz Hidrat ve Parafinlerin Gözenekli Ortamlarda Isı Depolama Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 21.01.2013 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Ali KILIÇARSLAN.....

Doç.Dr. İrfan KURTBAŞ (Danışman).....

Doç.Dr. Abdurrahman ASAN.....

Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 21.01.2013 tarih ve 2013/1... sayılı kararı ile Alptuğ YATAĞANBABA’ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.


Prof.Dr.Ali KILIÇARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.



Alptuğ YATAĞANBABA

TUZ HİDRAT VE PARAFİNLERİN GÖZENEKLİ ORTAMLARDA ISI DEPOLAMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Alptuğ YATAĞANBABA

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2013

ÖZET

Bazı enerji kaynaklarının doğada kesintili olarak bulunmasından dolayı birçok uygulama için kısa ve uzun periyotlu depolama gereklidir. Çeşitli termal enerji depolama teknikleri arasında gizli ısı depolama, yüksek depolama yoğunluğu ve küçük sıcaklık değişiminden dolayı en iyi yöntemdir. Termal enerjinin depolanmasında, yüksek termal enerji depolama yetenekleri ve izotermal davranışlarından dolayı genellikle faz değiştiren malzemeler (FDM) kullanılmaktadır. Bu çalışmada, açık gözenekli metal köpüklü ve metal köpüksüz bir ortamda ısıtma yüzeyi konumunun ısı depolama periyodu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaca uygun olarak 274 cm^3 hacmine sahip bir dikdörtgen küp pleksiglass malzemedен imal edilmiştir. Bu küpün bir yüzeyi sabit ısı akısı ile ısıtılırken diğer yüzeyler ortama karşı izole edilmiştir. Deneyleerde test bölümü, ısıtma yüzeyi altta, yanda ve üste olacak şekilde konumlandırılmış ve üç farklı sabit ısı akısı uygulanmıştır. Her bir zaman adımında farklı ısı akıları ve ısıtma konumları için erime hızı belirlenmiş ve görüntülenmiştir. FDM olarak $58-60^\circ\text{C}$ de faz değiştiren parafin (n-heptacosane ve $29-30^\circ\text{C}$ de faz değiştiren kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent 14.0 kullanılarak sayısal çalışma gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır. Araştırma sonucunda, ısıtma konumunun ve açık gözenekli metal köpük takviyesinin faz değişiminin ve ısı depolama kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: FDM, gizli ısı depolama, metal köpük, HAD, sayısal model

INVESTIGATION OF HEAT STORAGE BEHAVIOUR OF SALT HYDRATE AND PARAFFIN IN POROUS MEDIA

Alptug YATAGANBABA

HITIT UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2013

ABSTRACT

The short and long term storage are essential for many applications due to the presence of some energy sources intermittently in nature. Latent heat thermal energy storage is the most attractive method between various storage techniques due to the high storage density and small temperature change. Generally in thermal heat storage, thanks to their high thermal energy storage capability and isothermal behaviours, phase change materials are used. In this study, the effect of PCM on the melting fraction with respect to the position of the heating surface and reinforcement of the open porous metal foam was experimentally investigated. For this purpose a rectangular cube was made with pleksiglass that has a volume of 274 cm^3 . One of the surfaces of the cube heated with constant heat flux, other surfaces isolated against the atmosphere. In the experiments, lower, upper and side surfaces of the specimen are heated. Three different constant heat fluxes were applied on heating surface. Paraffin (n-heptacosane) with a phase change point at $58\text{-}60^\circ\text{C}$ and Calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) with a phase change point at $29\text{-}30^\circ\text{C}$ was used as the PCM. A numerical study has been performed and compared the results of experimental study with using Computational Fluid Dynamics (CFD) software, Fluent14.0. In this study, depending on the heating location and surface heat flux it was observed that the effect of natural convection increased significantly on the liquid phase PCM.

Key Words : pcm, latent heat storage, metal foam, numerical model

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans araştırmalarım sürecinde bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, teşvik ve destekleri ile her türlü problemin üstesinden gelmemde bana yardımcı olan, sabırla beni dinleyip olumlu yönlendirmeleriyle yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. İrfan KURTBAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ders ve tez dönemlerinde olumlu yönlendirmeleri ile bana katkılarını esirgemeyen Prof.Dr. Halil AYKUL hocama, değerli araştırma görevlisi, öğretim görevlisi ve uzman arkadaşlarıma teşekkür ederim. Deneysel çalışmaların yapılmasında ve çalışmanın her safhasında yardım ve desteklerini esirgemeyen yüksek lisans öğrencisi Mehmet ŐENER'e yardımlarından dolayı en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca, hayatımın her safhasında maddi-manevi, destek, anlayış, sevgi ve dualarını eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmaya verdikleri destekten dolayı Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (Proje No: MUH03.11.002) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZİLGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR.....	13
2.1. Faz Değiştiren Malzeme.....	13
2.2. Metal Köpük.....	16
3. MATERYAL ve METOT.....	21
3.1. Materyal.....	21
3.1.1. Isıl Enerji Depolama Düzeneği.....	22
3.1.2. Isıl Çift (Termokupl).....	26
3.1.3. Veri Toplayıcı.....	27
3.1.4. Güç Kaynağı.....	27
3.2. Yöntem.....	28
3.2.1. Sayısal Modelleme.....	29
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	34
4.1. Parafin (n-heptacosane) Erime Davranışı.....	35

4.2.	Kalsiyum Klorür Hekzahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Erime Davranışı	50
4.3.	Gözenekli Ortamlarda Parafin'in Erime Davranışı	58
4.4.	Gözenekli Ortamlarda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın Erime Davranışı.....	69
4.5.	Sayısal Modelleme Bulguları	83
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	86
	KAYNAKLAR.....	88
	EKLER.....	93
	ÖZGEÇMİŞ.....	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. CaCl ₂ ve sulu çözeltilerinin termofiziksel özellikleri	23
Çizelge 3.2. n-heptacosane parafinin termofiziksel özellikleri	23
Çizelge 3.3. CaCl ₂ ve sulu çözeltilerinin faz diyagramı.....	24
Çizelge 3.4. Metal köpüklerin geometrik yapısı	26
Çizelge 3.5. Farklı sıklıktaki ağ yapıları için eleman sayılarının dağılımı	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Termal enerji depolama tekniklerinin sınıflandırılması.....	3
Şekil 1.2. Isıtma ve soğutma sürecinde FDM'nin sıcaklık değişimi	4
Şekil 1.3. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması.....	9
Şekil 1.4. Faz değiştiren malzemelerde ısı performansını iyileştirme yöntemleri.....	12
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	21
Şekil 3.2. Isı depolama ünitesi ve ısı çiftlerinin yerleşimi	22
Şekil 3.3. Açık gözenekli metal köpükler (a)10PPI (b)20PPI	25
Şekil 3.4. K tipi (Cr-Al) ısı çifti	27
Şekil 3.5. Digi Sense 12CH veri toplayıcı	27
Şekil 3.6. Sorensen XTR programlanabilir güç kaynağı.....	27
Şekil 4.1. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=3000 \text{ W/m}^2$)	35
Şekil 4.2. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=3000 \text{ W/m}^2$) ..	36
Şekil 4.3. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=3000 \text{ W/m}^2$)	37
Şekil 4.4. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($q=3000 \text{ W/m}^2$).....	39
Şekil 4.5. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=4460 \text{ W/m}^2$)	40
Şekil 4.6. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=4460 \text{ W/m}^2$) ..	41
Şekil 4.7. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=4460 \text{ W/m}^2$)	42
Şekil 4.8. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($q=4460 \text{ W/m}^2$).....	44
Şekil 4.9. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=8355 \text{ W/m}^2$)	45
Şekil 4.10. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=8355 \text{ W/m}^2$) 46	
Şekil 4.11. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=8355 \text{ W/m}^2$) ..	47
Şekil 4.12. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($q=8355 \text{ W/m}^2$).....	49
Şekil 4.13. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=700 \text{ W/m}^2$).....	50
Şekil 4.14. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=700 \text{ W/m}^2$) ..	51
Şekil 4.15. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=700 \text{ W/m}^2$)	52
Şekil 4.16. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=1310 \text{ W/m}^2$)... 53	
Şekil 4.17. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=1310 \text{ W/m}^2$) 54	
Şekil 4.18. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($q=1310 \text{ W/m}^2$) ..	55

Şekil 4.19. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($q=1310W/m^2$).....	57
Şekil 4.20. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=3000W/m^2$)	58
Şekil 4.21. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=3000W/m^2$)	59
Şekil 4.22. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=3000W/m^2$)	60
Şekil 4.23. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=4460W/m^2$)	61
Şekil 4.24. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=4460W/m^2$)	62
Şekil 4.25. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=4460W/m^2$)	63
Şekil 4.26. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=8355W/m^2$)	64
Şekil 4.27. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=8355W/m^2$)	65
Şekil 4.28. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $q=8355W/m^2$)	66
Şekil 4.29. Farklı ısı akılarında alttan ısıtma konumunda $x/L=0.4$ (T3).....	68
Şekil 4.30. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $q=700W/m^2$).....	69
Şekil 4.31. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $q=700W/m^2$).....	70
Şekil 4.32. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $q=700W/m^2$).....	71
Şekil 4.33. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $q=1310W/m^2$).....	72
Şekil 4.34. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $q=1310W/m^2$)	73

Şekil 4.35. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $q=1310\text{W}/\text{m}^2$).....	74
Şekil 4.36. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $q=700\text{W}/\text{m}^2$).....	75
Şekil 4.37. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $q=700\text{W}/\text{m}^2$).....	76
Şekil 4.38. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $q=700\text{W}/\text{m}^2$).....	77
Şekil 4.39. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $q=1310\text{W}/\text{m}^2$).....	78
Şekil 4.40. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $q=1310\text{W}/\text{m}^2$).....	79
Şekil 4.41. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $q=1310\text{W}/\text{m}^2$).....	80
Şekil 4.42. Alttan ısıtma konumunda köpüklü ve köpüksüz durumun kıyaslaması ..	81
Şekil 4.43. Yandan ısıtma konumunda köpüklü ve köpüksüz durumun kıyaslaması.	81
Şekil 4.44. Üstten ısıtma konumunda köpüklü ve köpüksüz durumun kıyaslaması ..	82
Şekil 4.45. 15°C ile 50°C arasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı değişimi.....	83
Şekil 4.46. 15°C ile 60°C arasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı değişimi.....	84
Şekil 4.47. 15°C ile 125°C arasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı değişimi.....	85

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=3000 \text{ W/m}^2$).....	35
Resim 4.2. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=3000 \text{ W/m}^2$)	36
Resim 4.3. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=3000 \text{ W/m}^2$)	37
Resim 4.4. Isıtma konumunun etkisi ($q=3000 \text{ W/m}^2$, 600dk)	38
Resim 4.5. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=4460 \text{ W/m}^2$).....	40
Resim 4.6. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=4460 \text{ W/m}^2$)	41
Resim 4.7. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=4460 \text{ W/m}^2$)	42
Resim 4.8. Isıtma konumunun etkisi ($q=4460 \text{ W/m}^2$, 300dk)	43
Resim 4.9. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=8355 \text{ W/m}^2$).....	45
Resim 4.10. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=8355 \text{ W/m}^2$) ..	46
Resim 4.11. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=8355 \text{ W/m}^2$)	47
Resim 4.12. Isıtma konumunun etkisi ($q=8355 \text{ W/m}^2$, 180dk)	48
Resim 4.13. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=700 \text{ W/m}^2$).....	50
Resim 4.14. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=700 \text{ W/m}^2$)	51
Resim 4.15. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=700 \text{ W/m}^2$)	52
Resim 4.16. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=1310 \text{ W/m}^2$).....	53
Resim 4.17. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=1310 \text{ W/m}^2$) ..	54
Resim 4.18. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($q=1310 \text{ W/m}^2$)	55
Resim 4.19. Isıtma konumunun etkisi ($q=1310 \text{ W/m}^2$, 480dk)	56
Resim 4.20. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=3000 \text{ W/m}^2$)	58
Resim 4.21. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=3000 \text{ W/m}^2$)	59
Resim 4.22. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=3000 \text{ W/m}^2$)	60
Resim 4.23. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=4460 \text{ W/m}^2$)	61

Resim 4.24. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=4460 \text{ W/m}^2$)	62
Resim 4.25. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=4460 \text{ W/m}^2$)	63
Resim 4.26. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=8355 \text{ W/m}^2$)	64
Resim 4.27. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=8355 \text{ W/m}^2$)	65
Resim 4.28. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $q=8355 \text{ W/m}^2$)	66
Resim 4.29. Alttan ısıtma konumunda 180dk sonunda kıyaslama	67
Resim 4.30. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $q=700 \text{ W/m}^2$)	69
Resim 4.31. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $q=700 \text{ W/m}^2$)	70
Resim 4.32. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $q=700 \text{ W/m}^2$)	71
Resim 4.33. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $q=1310 \text{ W/m}^2$)	72
Resim 4.34. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $q=1310 \text{ W/m}^2$)	73
Resim 4.35. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $q=1310 \text{ W/m}^2$)	74
Resim 4.36. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $q=700 \text{ W/m}^2$)	75
Resim 4.37. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $q=700 \text{ W/m}^2$)	76
Resim 4.38. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $q=700 \text{ W/m}^2$)	77
Resim 4.39. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $q=1310 \text{ W/m}^2$)	78

Resim 4.40. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $q=1310 \text{ W/m}^2$)	79
Resim 4.41. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $q=1310 \text{ W/m}^2$)	80
Resim 4.42. $q=1310 \text{ W/m}^2$, 300 dk da alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın	83
Resim 4.43. $q=1310 \text{ W/m}^2$, 600 dk da yandan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın ...	84
Resim 4.44. $q=1310 \text{ W/m}^2$, 300 dk da üstten ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın	85

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
T_e	FDM'nin erime sıcaklığı, [$^{\circ}\text{C}$]
T_i	İlk sıcaklık, [$^{\circ}\text{C}$]
T_o	Başlangıç sıcaklığı, [$^{\circ}\text{C}$]
T_s	Son sıcaklık, [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT	Sıcaklık farkı, [$^{\circ}\text{C}$]
h	Isı transfer katsayısı, [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
k	Isıl iletkenlik, [W/mK]
m	Kütle, [kg]
q	Isı akısı, [W/m^2]
ρ	Yoğunluk, [kg/m^3]
C_p	Sabit basınçtaki özgül ısı, [$\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$]
C_k	Katı halde özgül ısı, [J/kgK]
C_s	Sıvı halde özgül ısı, [J/kgK]

Kısaltmalar	Açıklama
FDM	Faz değiştiren malzeme
GID	Gizli ısı depolama
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

1. GİRİŞ

Son yıllarda fosil yakıtlara alternatif olarak, doğal enerji kaynakları konusunda yapılan araştırmalara bağlı olarak literatürde “sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji” kavramlarına sıkça rastlanmaktadır. Büyüme, kentleşme ve çevresel değişim gibi küresel sorunlar günümüzde toplumsal politikaların yönlendirilmesine, yenilenebilir enerji kaynaklarının dengeli kullanımına ve yenilenebilir olmayan enerji şekillerinin geri dönüşümüne ilgiyi arttırmıştır.

Sürdürülebilirlik, çeşitli enerji kaynaklarını kullanarak, bunların harcanmasında gelecek nesilleri de düşünmek, milyonlarca senede birikmiş olan fosil yakıtları mecbur olmadıkça kullanmamak, çevreyi korumak ve gelecek kuşakları da düşünerek hareket etmek demektir (Kakaç, 2008).

Sürdürülebilirlik, geniş açıdan bakıldığında ancak yenilenebilir olursa mümkün olacaktır. Bu nedenle enerji sistemlerinin sürdürülebilir, enerji kaynaklarının da yenilenebilir olması gereklidir. Çünkü küreselleşme ve artan dünya nüfusu yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanımını teşvik etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişiminde ve daha etkin kullanımında en önemli seçeneklerden bir tanesi enerji depolama tekniklerinin geliştirilmesidir. Enerji depolama, özellikle termal enerji depolama üretim ve talep yönlü enerji verimliliğinde önemli bir rol oynar. Bundan dolayı enerjinin tedarik ve talebi arasındaki uyumsuzluğun üstesinden ancak uygun bir enerji depolama sisteminin kullanılmasıyla gelinebilir (Akgün ve ark., 2006).

Enerji Depolama Teknolojisi

Dünya genelindeki bilim adamları ve mühendisler küresel enerji talebini azaltmak, kaynakların arz güvenliğini ve kararlılığını sağlamak, sınırlı ve zararlı fosil yakıtların yerine koyulabilecek yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını daha etkin kullanmak gibi birçok nedenden dolayı enerji depolama tekniklerini geliştirmeye çalışmaktadırlar (Dutil ve ark., 2010). Enerjinin uygun bir formda depolanması, arz ve talep arasındaki farkı dengelediği gibi düzenli bir enerji akışı sağlayarak enerji şebekelerinin verimliliğini arttırmakta ve güvenliğini sağlamaktadır. Enerji, mekanik, elektrik ve termal olmak üzere üç farklı şekilde depolanabilir.

Mekanik Enerji Depolanması

Mekanik enerji depolama oldukça basit bir yöntemdir. Genellikle kinetik enerji ya da momentum formunda olan mekanik enerji daha sonra kullanılmak üzere birkaç yolla depolanabilir. Mekanik enerjiye önemli bir örnek olarak dönme enerjisini depolayıp istenildiği zaman geri veren volan verilebilir. Volan krank miline bağlı krankın hareketi ile direk dönen ve ateşleme zamanında aldığı gücü diğer zamanlarda motorun dönmesi için harcayarak hareketinin devamlılığını sağlayan büyük bir silindirik dişlidir (Dinçer ve Rosen, 2002).

Elektrik Enerjisi Depolanması

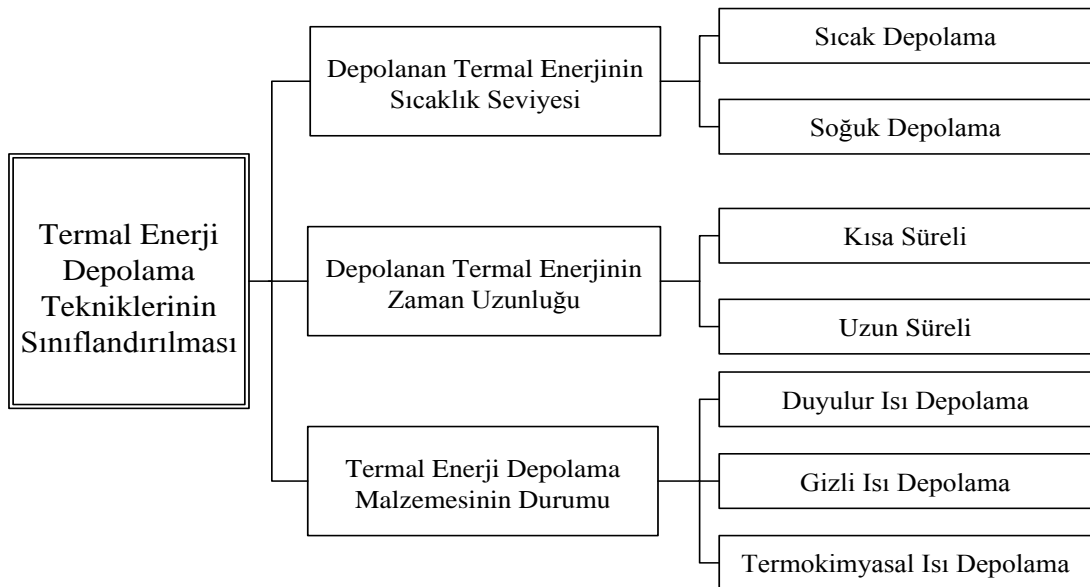
Elektrik enerjisini, elektrik formunda depolamak mümkün değildir. Ancak ihtiyacın az, fiyatın düşük ve enerjinin fazla olduğu saatlerde elektrik kullanılarak hava, su ve kimyasal formda depolanabilmekte ve ihtiyacın olduğu saatlerde en fazla birkaç dakika içerisinde elektriğe dönüştürülerek kullanıma sokulabilmektedir. Yani rüzgâr ve güneş gibi kesintili enerji kaynaklarında arz ve talebi eşleştirmek veya eş zamanlı elde etmek bugünün teknolojisiyle mümkün değildir. Bu nedenle var oldukları anda ihtiyaç olmasa bile elektriğe dönüştürülerek üretilen elektriği başka formlarda

depolamak suretiyle ihtiyacın olduğu anlarda kullanabilme olanağı doğmuş olmaktadır.

Termal Enerji Depolama

Termal enerji depolama sistemleri özellikle düşük sıcaklıklardaki ısıtma ve soğutma uygulamaları için önemli faydalar ve tasarruflar sağlama potansiyeline sahiptirler. Faz değiştiren malzeme (FDM) tabanlı termal enerji depolama teknikleri son on yıl içerisinde araştırmacılar tarafından yaygın olarak incelenmiştir (Sharma ve ark., 2009).

Termal enerji depolama teknikleri kabaca duyulur ısı ve gizli ısı depolama olarak iki grupta sınıflandırılabilir. FDM kullanılarak gizli ısı depolama yönteminde FDM'nin erime ve katılaşma süreçleri boyunca yüksek enerji depolama yeteneği ve izotermal depolama özelliği avantajlarından bazılarıdır. Bundan dolayı birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır. Gizli ısı depolama sisteminde FDM'nin erimesi esnasında termal enerji depolanır, katılaşma esnasında da serbest bırakılır.

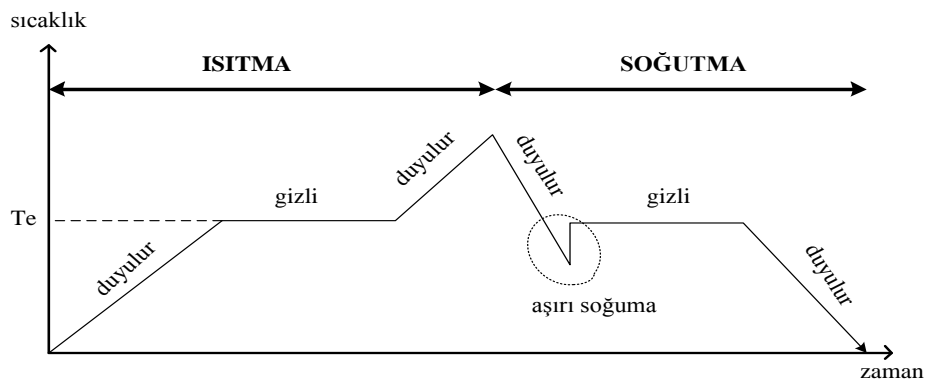


Şekil 1.1. Termal enerji depolama tekniklerinin sınıflandırılması

Termal enerji depolama tekniklerinin sınıflandırılması Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Eğer sınıflandırma kriteri depolanan termal enerjinin sıcaklık seviyesine dayandırılırsa, termal enerji depolama yöntemini ‘sıcak depolama’ ve ‘soğuk depolama’ şeklinde ikiye ayırabiliriz (Hasnain, 1998). Sınıflandırma kriteri depolanan termal enerjinin gerekli depolama periyoduna dayandırılırsa ‘kısa veya uzun süreli’, enerji depolama malzemesinin durumuna dayandırılırsa ‘gizli ısı, duyulur ısı ve termokimyasal ısı depolama’ olarak adlandırılır (Sharma ve ark., 2009).

Termal Enerji Depolama Malzemesinin Durumuna Göre Sınıflandırma

Termal enerji depolama/serbest bırakma teknolojisi, ısı depolama ortamı olarak büyük bir enerji kapasitesine sahip FDM’lerin kullanılması esasına dayanır. Bunun nedeni dar bir sıcaklık aralığı içerisinde faz değişim süreci esnasında sahip oldukları yüksek enerji depolama yoğunluklarıdır (Barba ve Spiga, 2003).



Şekil 1.2. Isıtma ve soğutma sürecinde FDM'nin sıcaklık değişimi

Şekil 1.2’den de görüldüğü gibi sıcaklık arttığında FDM katı fazdan sıvı faza geçer. Reaksiyonun endotermik olmasından dolayı FDM ısıyı depolar. Benzer olarak sıcaklık azaldığında FDM sıvı fazdan katı faza geçer ve depoladığı ısıyı serbest bırakır. Aşırı soğuma, sıvı fazdaki FDM’nin yarı dengeli olduğu donma derecesinin altında soğumasıdır. Yani FDM’nin ısı vererek katılaşması esnasında donma

noktasının altında bir sıcaklığa düşmesidir. Bu sıcaklığa ulaşamadığı durumda malzeme tamamen katılaşmaz ve sadece duyulur ısı depolar (Medrano ve ark., 2009).

Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama tekniği hem katılar hem de sıvılarda olmak üzere geniş bir uygulama ortamına sahiptir. Bu depolama tekniği, katı veya sıvının sıcaklık değişimiyle ilgili bir depolama yöntemidir. Duyulur ısı depolama sistemlerinde şarj ve deşarj süreçleri esnasında malzemenin sıcaklık değişimi ve ısı kapasitesinden faydalanılır (Lane, 1983).

Depolanan enerji aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mC_p dT = mC_p(T_2 - T_1) \quad (1.1)$$

Burada C_p [J/kg °C] depolama malzemesinin özgül ısısı, T_1 ve T_2 [°C] sırasıyla depolama malzemesinin ilk ve son sıcaklıklarını ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitlikten de görülebileceği gibi duyulur ısı depolama tekniğiyle depolanan enerjinin miktarı depolama ortamının kütlesi, özgül ısısı ve depolama ortamının ilk ve son sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır.

Sıvılarda, duyulur ısı depolama amaçlı olarak kullanılacak en iyi seçeneklerden birisi sudur. Çünkü su, ucuz ve güvenilir olmasının yanı sıra yüksek bir özgül ısıya ve yoğunluğa sahiptir. Su, 0 ve 100°C arasındaki çalışma sıcaklıkları için uygun bir ısı enerjisi depolama maddesidir. Eğer yüksek sıcaklıklarda su, depolama maddesi olarak kullanılmak istenirse etilen glikol veya propilen glikol ile karıştırılarak çalışma sıcaklık aralığı arttırılabilir. Katılarda ise kayalar duyulur ısı depolama ortamı olarak kullanılabilirler. Kayalar suya göre daha geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilirler. Bununla birlikte ısıl kapasiteleri sudan daha düşüktür (Sharma ve ark., 2009).

Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama esasına dayalı termal enerji depolama tekniği, malzeme faz değiştirme sürecine girdiğinde enerjinin depolanması/serbest bırakılması esasına dayanır. Gizli ısı depolama yüksek enerji depolama yoğunluğu ve neredeyse sabit sıcaklıkta enerji depolama kapasitelerinden dolayı birçok uygulama için etkin bir yöntemdir. Gizli ısı termal enerji depolama sisteminin ısı kapasitesi (Bkz. Şekil 1.2) aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir (Lane, 1983).

$$Q = \int_{T_1}^{T_e} m C_p dT + m \Delta h_e + \int_{T_e}^{T_2} m C_p dT \quad (1.2)$$

$$Q = m [C_{kp}(T_e - T_1) + \Delta h_e + C_{sp}(T_2 - T_e)] \quad (1.3)$$

Burada C_{kp} , C_{sp} (J/kgK) sırasıyla ısı depolama maddesinin katı ve sıvı fazdaki özgül ısısı, T_e (°C) ısı depolama maddesinin erime sıcaklığı, T_1 ve T_2 (°C) sırasıyla ısı depolama ortamının ilk ve son sıcaklıkları ve Δh_e (J/kg) katı fazdan sıvı faza geçiş için gerekli ısıdır. Eşitlik 1.3'deki birinci ve üçüncü terim FDM'nin duyulur ısısını, ikinci terim ise erime gizli ısısını ifade etmektedir.

Gizli ısı formunda termal enerji depolama tekniği faz değişim sürecine göre katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı-gaz şeklinde sınıflandırılabilir. Katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümleri gazların büyük hacim kaplamaları ve yüksek gizli ısıları nedeniyle tercih edilmezler. Katı-katı faz değişiminde bir kristal yapıdan diğerine dönüşüm esnasında termal enerji depolanır. Bu dönüşüm tipi de düşük gizli ısı nedeniyle pek fazla tercih edilmez. Katı-sıvı faz dönüşümlü gizli ısı depolama yöntemi, sağladığı yüksek enerji depolama yoğunluğu ve neredeyse sabit bir sıcaklıkta enerji depolama kapasiteleri nedeniyle diğer yöntemlere göre daha fazla tercih edilirler (Husnain, 1998; Dinçer ve Marc, 2002). Bu faz değişimi esnasında belirli bir miktar enerjinin depolanabilmesi için daha küçük hacim ve kütlenin gerekli olduğunu gösterir.

Gizli ısı depolama tekniğinin birçok araştırmacı tarafından da belirtilen en önemli dezavantajı, termal enerji depolama ortamı olarak kullanılan FDM'lerin yavaş şarj ve deşarj oranlarına neden olan oldukça düşük ısı iletkenliğe sahip olmalarıdır. Bundan dolayı FDM kullanılan ısı 1 enerji depolama sistemlerinin ısı 1 performanslarının iyileştirilmesi zorunlu hale gelmiştir.

Gizli Isı Termal Enerji Depolama İçin Gereklilikler

Bir gizli ısı enerji depolama sistemi aşağıdaki 3 bileşenden oluşur;

- 1- Belirlenen sıcaklık aralığı için uygun FDM seçimi
- 2- FDM için uygun bir depolama kabı
- 3- Isı kaynağından FDM'ye ısı transferi için gerekli ısı transfer yüzeyi

Gizli ısı enerji depolamada, kullanılacak depolama malzemesinin seçiminde termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik kriterler dikkate alınır (Ogunkoya, 2009).

1. Termodinamik kriterler

- Belirlenen sıcaklık aralığında erime noktası
- Malzemenin enerji depolanması esnasında hızlı şarj ve deşarj sürecine izin verecek yüksek ısı iletkenlik
- Depolama maddesinin daha küçük miktarında daha fazla enerji depolanmasını sağlayan birim kütle başına yüksek erime gizli ısı 1
- Küçük depolama ortamını sağlayacak yüksek yoğunluk

2. Kinetik kriterler

- Katılaşma esnasında aşırı soğuma olmamalı, depolama ortamı termodinamik donma noktasında kristalleşmeli

3. Kimyasal kriterler

- FDM uzun ömürlü bir sistem için hiçbir kimyasal ayrışma göstermemeli
- Depolama maddesi kimyasal olarak kararlı olmalı, zehirleyici ve yanıcı özellik göstermemeli
- Korozif olmamalı

4. Ekonomik kriterler

- Isı depolama maddesi ucuz ve kolay ulaşılabilir olmalı

Termokimyasal Enerji Depolama

Termokimyasal sistemler tamamen geri dönüşümlü kimyasal bir reaksiyon içerisinde moleküler bağların oluşması ve ayrışması sonucu açığa çıkan ısının depolanması ya da serbest bırakılması esasına dayanır. Termokimyasal enerji depolama karmaşık bir yöntem gibi görünse de özünde endotermik olarak ısı alan tepkimenin ekzotermik reaksiyonla bu ısıyı geri vermesidir.

$$Q = a_r m \Delta h_r \quad (1.4)$$

Görüldüğü gibi depolanan ısı, depolama maddesinin miktarına (m), endotermik ısı reaksiyonuna (Δh_r) ve dönüşümün yayılmasına (a_r) bağlıdır (Sharma ve ark., 2009).

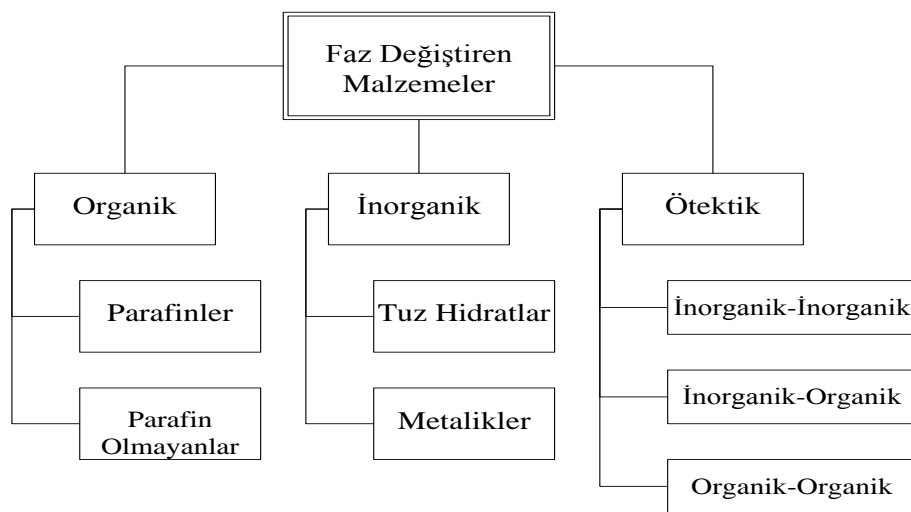
Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)

Isı depolama ortamı olarak FDM kullanımı, sağladığı yüksek ısı depolama yoğunluğu ve dar bir sıcaklık aralığında küçük bir hacim içerisinde gizli ısı formunda büyük miktarda enerjiyi depolayabilme kapasiteleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır (Sharma ve ark., 2009).

FDM'lerin en önemli özelliklerinden birisi, faz değişimi yoluyla (gizli ısı) enerji depolama yeteneklerinin olmasıdır. Bu maddeler genellikle ortam sıcaklığında katıdır. Ortam sıcaklığı yükseldiğinde FDM'nin kimyasal bağları ayrılarak sistem sıcaklığındaki küçük bir değişimle eriyerek enerjiyi depolamaktadır. Ortam sıcaklığının tekrar düşmesi sonucunda FDM tekrar katı faza dönerek, depoladığı enerjiyi serbest bırakmaktadır. Bu çevrim ortam sıcaklığını da istikrara kavuşturur. FDM'ler gizli ısıyı fiziksel ve kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişim olmaksızın binlerce çevrim boyunca muhafaza ederler (Baetensa, 2010).

Konfor şartları için uygun olan 20-30° C aralığında, gizli ısı depolama maddeleri çok etkilidirler. FDM'ler birim hacimde geleneksel depolama maddelerine (su, taş, kaya, vb.) göre 5-14 kat daha fazla ısı depolama yeteneğine sahiptirler. FDM'ler, enerji depolama, elektronik aletlerin pasif soğutulması, binalarda enerji tasarrufu, atık ısı geri dönüşümü, ısı pompası sistemleri, uzay çalışmaları gibi ısıl mühendisliğin değişik alanlarında sahip oldukları yüksek gizli ısı, kimyasal kararlılık, faz değişim sıcaklığına uygunluk ve uygun fiyatları gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak k (Hawes ve ark., 1993).

Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması



Şekil 1.3. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması

Şekil 1.3'de görüldüğü gibi faz değiştiren malzemeler kimyasal yapılarına göre değişik alt başlıklar altında sınıflandırılabilirler; (1) organik bileşikler, (2) inorganik bileşikler, (3) ötektik karışımlar.

Organik Faz Değişim Maddeleri

Genel olarak kimyasal kararlılıktaki organik FDM'ler, aşırı soğumadan zarar görmezler, korozif ve zehirleyici olmayan ve yüksek erime gizli ısısına sahip olan maddelerdir. Organik FDM'ler parafin ve parafin olmayan olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Ticari parafinler hem ucuzdurlar hem de 120 kJ/kg ile 210 kJ/kg arası makul bir ısı enerji depolama yoğunluğuna sahiptirler. Parafinler 20 °C den 70 °C ye kadar geniş bir erime sıcaklık aralığında bulunabilirler. Bunlar kimyasal olarak etkisizdirler, eriyik halde düşük bir buhar basıncına sahiptirler ve faz ayrımına tabi değildirler. Parafin olmayan organikler yağ asitleri, esterler, alkoller ve glikoller gibi geniş bir seçeneğe sahiptirler. Bunlar mükemmel bir erime ve donma özelliğine sahip olmalarına karşın parafinlerden 3 kat daha pahalıdırlar (Hasnain, 1998).

İnorganik Faz Değişim Malzemeleri

İnorganik FDM'ler genellikle daha yüksek bir ısı füzyonuna, iyi ısı iletkenliğe, düşük maliyete sahiptirler. Bunula birlikte düşük buhar basıncına sahip olmaları nedeniyle yanıcı değildirler. Ancak birçoğu metallerle karşı korozif etkiye sahip olmalarının yanı sıra faz bozunmasına ve aşırı soğumaya maruzdurlar. En yaygın inorganik FDM hidrat tuzlarıdır. Hidrat tuzları yüksek depolama yoğunlukları nedeniyle (yaklaşık 240 kJ/kg) ısı enerji depolanmasında tercih edilir ve parafinler ile kıyaslandığında daha ucuzdurlar. Ancak aşırı soğuma ve faz bozunmaları en önemli dezavantajlarıdır (Farid ve ark., 2004).

Ötektik Faz Değişim Malzemeleri

Ötektik karışımlar veya ötektikler, mümkün olduğunca düşük erime noktasına sahip birden fazla maddenin karışımlarıdır. Ancak bunların ısı ve fiziksel özellikleri ile ilgili sınırlı bilgiye ulaşılabilmektedir. Ötektikler içeriklerine göre organik-organik, inorganik-inorganik ve inorganik-organik olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir (Baetensa ve ark., 2010).

Faz Değiştiren Malzemelerin Isıl Performanslarının İyileştirilmesi

Yüksek bir gizli ısı depolama yoğunluğuna ve faz değişimi boyunca neredeyse izotermal bir sürece sahip olmaları, gizli ısı enerji depolama sistemlerini diğer sistemlere göre daha avantajlı bir konuma getirir. Buna karşın FDM'ler birim yük performansını önemli ölçüde etkileyen düşük ısı iletkenliğe sahiptirler. Düşük iletkenliğin etkisi ısı enerji depolama ve serbest bırakma esnasında kayda değer bir sıcaklık düşüşü ile sonuçlanır. Sonuç olarak FDM'lerin erime/katılma oranı gizli ısı enerji depolama maddelerinin büyük ölçekli kullanımı için yeterli düzeyde değildir. Bundan dolayı gizli ısı enerji depolama sistemlerinin ısı performanslarının iyileştirilmesi zorunludur. Gizli ısı depolama yöntemlerinin ısı performanslarının iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda yöntemlerin bir kaçı Şekil 1.4'de görülmektedir (Agyenim ve ark., 2010).



Şekil 1.4. Faz değiştiren malzemelerde ısııl performansını iyileştirme yöntemleri

2. LİTERATÜR

Literatürde organik ve inorganik FDM'lerin ısı enerji depolama uygulamalarında kullanımı üzerine birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar ısı enerji depolama ortamının etkin tasarımı ve kullanılacak depo malzemesinin etkinliğinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu konuda yapılan araştırmaları kapsamlı bir şekilde veren inceleme makaleleri (Zalba ve ark., 2003; Verma ve ark., 2008; Regin ve ark., 2008; Sharma ve ark., 2009, Agyenim ve ark., 2010, Dutil ve ark., 2011) mevcuttur.

2.1. Faz Değiştiren Malzeme

Fellchenfeld ve Sarlg (1985), $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın sera ve konutlarda iklim kontrolü amaçlı kullanımını araştırmışlardır. Kalorimetrik metodu kullanarak değişik karışım oranlarında potasyum klorür (KCl) ve kalsiyum bromür'ün (CaBr_2) kararlılık ve faz değişim sıcaklığı üzerine etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri ısı transfer oranı-zaman, karışım oranı-faz değişim sıcaklığı verilerine dayanarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın sera ve konutlarda iklim kontrolü için kullanımını önermişlerdir.

Benzer olarak Kimura ve Kai (1988), $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın seralarda gizli ısı depolama malzemesi olarak kullanımında bazı nitrat hidratlar [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] ve anhidrat nitratlarla (NH_4NO_3 ve KNO_3) karışımının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yatay ve dikey tüplerde 10 ile 30°C arasında değişen sıcaklıklarda günde 8 çevrim ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda 1000. çevrimden sonra karışımın bozunmaya uğramadığı ve karışımın yaklaşık 20°C 'lik sıcaklık ortalamasına sahip sera uygulamaları için uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Banaszek ve ark. (1999), termal enerji depolama ünitesi olarak Arşimet spiral geometriye sahip dikey bir ısı değiştiricisini kullanarak parafinin (PPW-20) ısıtma/soğutma esnasındaki termal karakteristiğini deneysel ve teorik olarak

incelemiş, depolayıcı geometrisinin sistem performansı üzerine etkisini araştırmışlardır. Hızlı şarj ve deşarj süreçlerinde Arşimet spiral geometrisinin, yüksek ısı transfer hızı istenilen depolama sistemleri için uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Zivkovic ve Fujii (2001), dikdörtgen ve silindirik bir depo içerisinde $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime davranışını deneysel ve teorik olarak çalışmışlardır. Entalpi formülasyonuna dayalı olarak elde edilen hesaplamalı sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu belirtmişlerdir. FDM'nin erime zamanları arasında yapılan karşılaştırma neticesinde dikdörtgen kabın erime hızını silindirik kaba göre neredeyse yarı yarıya düşürdüğünü, bu nedenle de FDM depolanmasında dikdörtgen kabın daha uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Wei ve ark. (2005), mikrokapsüllenmiş FDM'nin depoladığı enerjiyi hızlı şekilde serbest bırakabilmesi için gerçekleştirdikleri deneysel ve sayısal çalışmada dört farklı kapsül şeklinin (küre, silindir, levha ve tüp), dört farklı kapsül çapının (2,3,4 ve 5mm) ve iki farklı kapsül kabuk kalınlığının (0.2 ve 0.4mm) etkisini sonlu hacim yaklaşımını kullanarak incelemişlerdir. Sonuçlar artan akış hızının ve azalan akışkan giriş sıcaklığının sistemin deşarj süresini hızlandırdığını, dört farklı kapsül arasında küresel olanın en iyi deşarj performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bunun yanında artan kapsül çapının deşarj süresinde hafif bir iyileşmeye neden olmasına karşın azalan FDM miktarından dolayı depolanan toplam enerjide azalmaya neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

Regin ve ark. (2006), parafini silindirik kapsüllerde depolayıp güneş enerjili su ısıtma sisteminin kollektörlerine yerleştirerek erime davranışını analiz eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. FDM'nin erimesi için gerekli ısıyı da kapsülleri çevreleyen sıcak sudan elde etmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçları kıyasladıklarında erime sürecini yönlendiren temel etkenlerin Stefan sayısının büyüklüğü, faz değişim sıcaklık aralığı ve kapsül yarıçapı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Akgün ve ark. (2007), giriş sıcaklığı ve ısı transfer akışkanının (su) kütle debisinin boru tipi ısı değiştiricisinin içerisindeki parafinin erime/katılaşma prosesine etkisini incelemek amacıyla bir dizi deney yapmışlardır. Elde edilen veriler suyun giriş sıcaklığındaki artışın erime süresini azalttığını göstermiştir. Buna bağlı olarak daha düşük enerji tüketimi için ısı transfer akışkanının daha düşük kütle debisinde olması gerektiğini önermişlerdir.

Assis ve ark. (2007), değişik çaplara sahip (40,60 ve 80mm) küresel bir geometride parafinin erime davranışını incelemişlerdir. Fluent 6.0 yazılımını kullanarak FDM'nin zamana bağlı prosesini sayısal olarak yapmışlardır. Deneysel sonuçlarla anlamlı bir uyum gösteren sayısal sonuçlarda zamana bağlı faz değişim işleminin sıcaklık farkı ve küre çapı gibi sistemin termal ve geometrik parametrelerine bağlı olduğunu görülmüştür.

Nallusamy ve ark. (2007), güneşi ısı kaynağı olarak kullanan birleşik bir duyulur-gizli ısı enerji depolama sistemini, ortalama sıcaklığı 45°C olan yerel uygulamalar için tasarlamışlardır. FDM olarak küresel kapsüllere doldurulmuş parafin ve ısı transfer akışkanı olarak da su kullanmışlardır. Bu sistemle geleneksel duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerini kıyaslayıp, birleşik depolama sistemlerinin iç ortam ve su ısıtma gibi kesintili uygulamalar için geleneksel duyulur ısı depolama sistemlerine göre daha elverişli olduğu sonucuna varmışlardır.

Benzer bir çalışma Bilen ve ark. (2008) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ısı transfer akışkanı (su) giriş sıcaklığı ve kütle debisine ($\dot{m}=2.51, 3.75$ ve 4.95 kg/dk) ek olarak kanatçık sayısının $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime/ katılaşma işlemine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla yapılan deneylerde FDM, eşeksenli borulara yerleştirilmiş ve iç borulardan pompa yardımıyla su akıtılmıştır. Deneylerde başlangıç kütle debisi ($\dot{m}=2.51$ kg/dk) %49 ve %97 oranında arttırıldığında erime süresinde sırasıyla %5 ve %15 oranında bir azalma olduğu görülmüştür.

Araştırmacılar FDM içerisine yerleştirilen kanatçıkların ise erime/katılaşma hızı üzerinde ktle debisine göre daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Agyenim ve ark. (2009), dairesel ve boyuna kanatlı ısı değiştirici sistemlerinin ısı transfer karakteristiklerinin kıyaslaması için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Eş sıcaklık ve sıcaklık-zaman değişimleri göz önüne alınarak deneysel veriler değerlendirilmiştir. Araştırmalara göre eş eksenli boru sistemlerinde FDM olarak Erythritol'n erime/katılaşma işlemi için boyuna kanat uygulamasının dairesel kanat uygulamasından daha elverişli olduğunu belirlemişlerdir.

Sanusi ve ark. (2011), FDM olarak parafin kullanılan bir deneysel çalışmada iki alüminyum plaka arasında FDM'nin erime/katılaşma davranışı incelemiştir. Kanatçık olarak grafit nanofiber kullanılması, kanatçık geometrisi ve kanatçık en/boy oranı parametrik olarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda en boy oranı 1 olan grafit nanofiber'in depolama kabındaki maksimum sıcaklığı %48, katılaşma zamanını yaklaşık %61 oranında azalttığı grlmştir.

Ismail ve Lino (2011), radyal kanatçık ve türbülatörlerin faz değişimi üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla içerisinden akışkan akan, üzerinde 40, 60, 120 ve 180mm çapına sahip radyal kanatçıklar yerleştirilmiş bakır borular tasarlamışlardır. Bu borular FDM içerisine yatay olarak yerleştirilmiştir. lmleri -10 ile -25°C arasında değişen akışkan sıcaklığında ve 0.013-0.031 kg/s arasında değişen altı farklı ktle debisinde gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonucunda akışkan sıcaklığında ve debisindeki artışın radyal kanatlı tüpler etrafındaki katılaşma süresini azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu, kanatçık çapındaki artışın ve türbülatör kullanımının arayüz hızını arttırıcı yönde etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

2.2. Metal Köpük

Detaylı literatür incelemesinde, FDM'nin ısı iletkenlik performansının geliştirilmesinde kanatçık kullanımı köpük malzeme ve nanopartikül kullanımı gibi

birçok farklı araştırmanın yapıldığı görülebilir. Gözenekli yapıya sahip metal köpük malzemelerin kullanarak ısı transfer hızının iyileştirilmesi bu sayede de depolama veriminin artırılması konusu, son on yılda artan bir ilgiyle araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır.

Alawadhi ve Amon (2003), organik bir FDM ve metal matrizen oluşan bir ısı kontrol ünitesinin etkinliği hakkında deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Kullandıkları metal matrisli model termofiziksel özelliklerin etkinliğini geliştirmiş ve saf FDM ile kıyaslandığında ısı iletkenliğinin iki kat daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Mesalhy ve ark. (2005), düzensiz geometriye sahip bir boşluğa doldurulan FDM'nin yüksek iletkenliğe sahip gözenekli ortamdaki ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Gözenekli ortam içindeki sıvı fazın taşınım hareketini Darcy, Brinkman ve Forchheimer etkilerini dikkate alarak çözdüler. Araştırmaları sonucunda FDM içerisinde gözenekli ortam mevcudiyetinin ısı transfer ve erime oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gördüler. Gözenekliliğin azalmasıyla erime oranının arttığını, ancak aynı zamanda taşınım hareketinin sönümlendiği sonucuna vardılar.

Lafdi ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada farklı fiziksel özelliklere sahip alüminyum köpük ve parafin kullanarak faz değişim işlemi deneysel olarak incelemişlerdir. Alüminyum köpük gözenek boyutu ve gözenekliliği gibi değişik parametrelerin parafinin erimesi ve ısı transferi üzerine etkisini analiz etmişlerdir. Deney sonuçları kıyaslandığında yüksek gözeneklilik ve daha büyük gözenek boyutuna sahip alüminyum köpüklerin kararlı durum sıcaklığına, küçük gözeneklilik ve gözenek boyutuna sahip köpüklere oranla daha hızlı ulaştıkları görülmüştür.

Sertkaya (2008), yapmış olduğu çalışmada açık gözenekli alüminyum köpüğün ısı değiştiricisi olarak kullanımını amaçlayan teorik ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. 10, 20 ve 30 PPI özelliklerine sahip ısı değiştiricilerin ısı

etkenliklerini karşılaştırmak için 500'ün üzerinde deney yapmış, kullandığı istatistik paket programı yardımıyla ısı transfer katsayısı ve sürtünme faktörü için birer ampirik bağıntı geliştirmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, boruların alüminyum köpük malzeme içine sonradan yerleştirilmesinden dolayı tasarlanan ısı değiştiricisi etkenlik katsayısının konvansiyonel ısı değiştiricilere göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Lafdi ve ark. (2008), alüminyum köpüklerin ısı iletkenlik geliştirici olarak kesintili güç profilli elektronik cihazların termal yönetimi için kullanımlarını incelemiştir. Sayısal simülasyon sonuçları bu köpük/FDM kompozitlerin performanslarının köpük gözenekliliğine, gözenek boyutuna, köpüğün ısı iletkenliğine, FDM'nin erime noktasına, FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesine ve FDM'nin sıvı fazının viskozitesine bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Siahpush ve ark. (2008), açık gözenekli bakır köpükler kullanarak bir silindirik katı/sıvı faz değişim ısı enerji depolama sistemi içerisinde ısı transfer performansı üzerine analitik ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. %95 gözenekliliğe sahip bakır köpük malzeme ve FDM olarak da %99 saflığa sahip Eicosane kullanmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma, bakır köpük malzemenin FDM'nin ısı iletkenliğini 0.423 W/mK den 3.06 W/mK değerine yükselttiğini göstermişlerdir.

DongYan ve ark. (2010), açık gözenekli metal köpük içerisine doldurulmuş FDM'nin erime prosesi için bir Lattice Boltzmann modeli geliştirmişlerdir. Bu modeli kullanarak metal köpük içerisindeki erime prosesi için simülasyon çalışması yapmışlardır. Metal köpük gözenekliliğinin ve gözenek boyutunun erime sürecine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda köpük gözenekliliğinin ortalama ısı transferi üzerinde önemli bir rol oynadığını görülmüştür. Düşük gözenekliliğe sahip köpüklerde erime oranının yüksek gözenekliliğe sahip köpüklerle kıyaslandığında daha yüksek olduğu, gözenek boyutunun ise iletim ve taşınım arasındaki iki karşıt etkiden dolayı erime süreci üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Chintakrinda ve ark. (2011), 54°C faz değişim sıcaklığına sahip parafin üzerinde üç farklı ısı iletkenlik geliştirme yönteminin (grafit köpük, alüminyum köpük ve grafit nanofiber) etkisini araştırmışlardır. Alt yüzeyden 1.93W/m² ile 19.3W/m² arasında değişen ısı akısı uyguladıkları deneysel çalışma önceki çalışmalardan farklı olarak bu üç ısı iletkenlik geliştirme yönteminin kapsamlı bir kıyaslamasına imkân tanımaktadır. Etkin termal enerji depolama sistemleri tasarımı için çok değerli bilgiler sağlayan bu çalışmada grafit nanofiber katkısının sistem sıcaklık kontrolü üzerinde köpük takviyesine göre daha az etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Zhou ve Zhao (2011), açık gözenekli bakır köpük ve genişletilmiş grafit içerisine doldurulmuş FDM'nin ısı transfer karakteristiğinin incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ısı depolama ortamı olarak parafin (RT27) ve CaCl₂·6H₂O kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar açık gözenekli bakır köpük takviyesinin ısı transfer oranını parafinde iki kat, CaCl₂·6H₂O da üç kat arttırdığını göstermiştir. Ayrıca %9 oranında genişletilmiş grafit takviyesi parafinin ısı transfer performansını %30 oranında arttırmıştır. Araştırmacılar tarafından metal köpüğün sahip olduğu birbiriyle bağlantılı hücreli yapısı nedeniyle genişletilmiş grafitte göre ısı iletkenliğinde daha iyi bir gelişme sağladığı ifade edilmiştir.

Zhao ve ark. (2011), ısı iletkenliği depolama sistemlerinde yüksek sıcaklıklarda FDM'nin ısı transfer kapasitesini arttırmak için genişletilmiş grafit ve metal köpük malzemenin uygulanabilirliğini incelemiştir. Yapılan deneylerde FDM olarak sodyum nitrat (NaNO₃), gözenekli ortam olarak bakır ve bakır-çelik alaşım köpük malzeme örnekleri kullanılmıştır. 100 ile 350°C arasında değişen yüksek sıcaklık uygulamalarında FDM'nin ısı iletkenliğinin yanı sıra köpük malzeme ve grafitin maruz kaldıkları korozyon etkisini de incelenmiştir. Deneysel sonuçlar metal köpük ve genişletilmiş grafit kullanımının FDM'nin ısı transfer kapasitesi üzerinde önemli bir artırıcı etkiye neden olduğunu, bundan dolayısıyla da şarj ve deşarj sürelerinin azaldığını göstermiştir.

Tian ve Zhao (2011), bakır köpük malzemenin FDM olarak kullanılan parafinin (RT 58) ısı transfer performansı üzerine etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçların iyi bir uyum gösterdiği çalışmada FDM içerisine metal köpük takviyesinin FDM'nin ısı transfer performansını yaklaşık 10 kat arttırdığı sonucuna varılmıştır. Simülasyon çalışması, küçük gözenek boyutuna ve gözenekliliğe sahip metal köpüklerden büyük gözenek boyutu ve gözenekliliğe sahip köpüklere göre daha iyi bir ısı transfer performansı elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

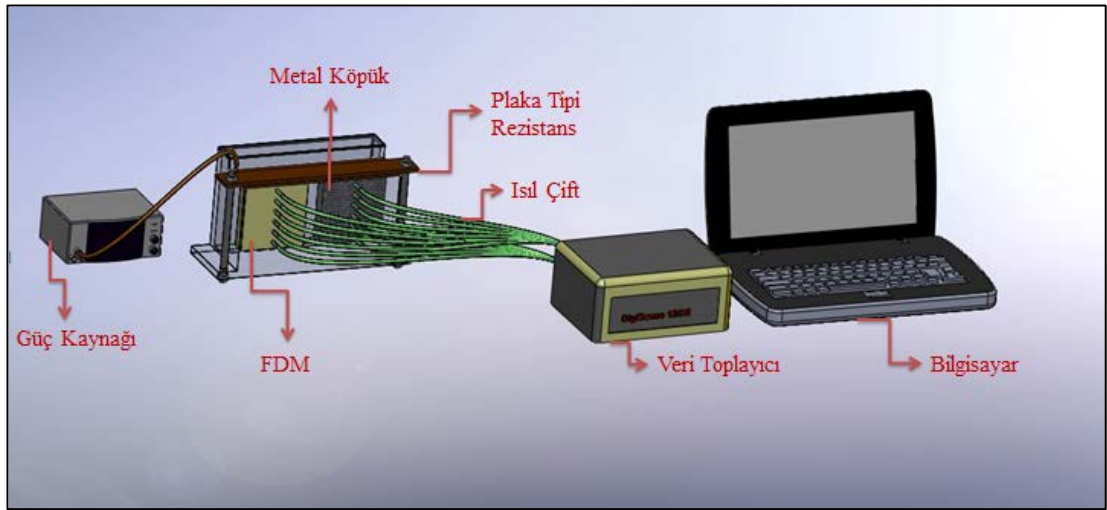
Benzer olarak Li ve ark. (2012), açık gözenekli bakır metal köpük ile takviye edilmiş parafinin ısı transfer prosesini inceleyen deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçların iyi bir uyum gösterdiği çalışmada FDM içerisine metal köpük takviyesinin FDM'nin ısı transfer performansını yaklaşık 10 kat arttırdığı sonucuna varılmıştır. Simülasyon çalışması, küçük gözenek boyutuna ve gözenekliliğe sahip metal köpüklerden büyük gözenek boyutu ve gözenekliliğe sahip köpüklere göre daha iyi bir ısı transfer performansı elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Benzer olarak Li ve ark. (2012), açık gözenekli bakır metal köpük ile takviye edilmiş parafinin ısı transfer prosesini inceleyen deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçların iyi bir uyum gösterdiği çalışmada FDM içerisine metal köpük takviyesinin FDM'nin ısı transfer performansını yaklaşık 10 kat arttırdığı sonucuna varılmıştır. Simülasyon çalışması, küçük gözenek boyutuna ve gözenekliliğe sahip metal köpüklerden büyük gözenek boyutu ve gözenekliliğe sahip köpüklere göre daha iyi bir ısı transfer performansı elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Benzer olarak Li ve ark. (2012), açık gözenekli bakır metal köpük ile takviye edilmiş parafinin ısı transfer prosesini inceleyen deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçların iyi bir uyum gösterdiği çalışmada FDM içerisine metal köpük takviyesinin FDM'nin ısı transfer performansını yaklaşık 10 kat arttırdığı sonucuna varılmıştır. Simülasyon çalışması, küçük gözenek boyutuna ve gözenekliliğe sahip metal köpüklerden büyük gözenek boyutu ve gözenekliliğe sahip köpüklere göre daha iyi bir ısı transfer performansı elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Yukarıda verilen literatürde FDM olarak parafin ve tuz hidratların kullanıldığı gizli ısı depolamalı sistemler üzerine birçok deneysel ve sayısal çalışma mevcuttur. Ayrıca bu sistemlerde gözenekli ortamların FDM'nin ısı depolama performansı üzerine etkisi de incelenmiştir. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, seçilmiş bir parafin ve tuz hidratın ısıtma konumlarına göre ısı depolama yeteneği incelenmiştir. Bununla birlikte farklı ısı akılarının FDM'nin erime hızı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Parafin olarak n-heptacosane ve tuz hidrat olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ seçilmiştir. 3 farklı ısı akısında sadece FDM'li yada gözenekli ortamlar için deneyler yapılmıştır. Gözenekli ortam olarak açık gözenekli alüminyum köpük malzeme kullanılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

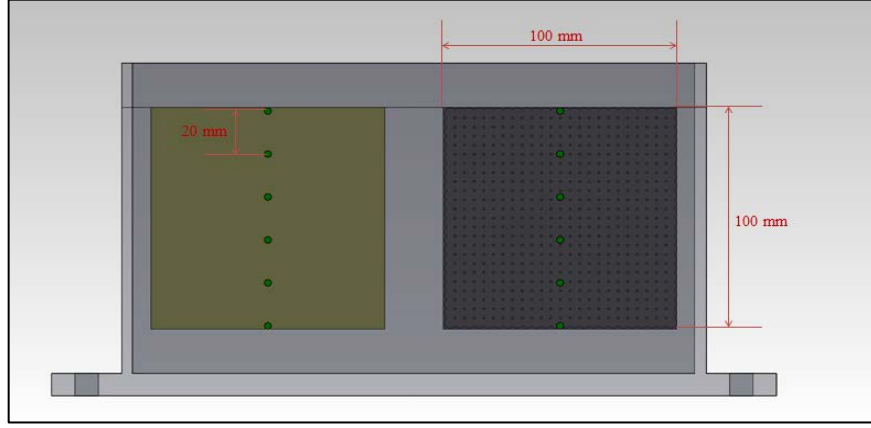
3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.1’de şematik olarak verilmiştir. Sistem üç ana bölümden oluşmaktadır; termal enerji depolama, güç kontrol ve veri toplama ünitesi.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Isıl enerji depolama ünitesi ısıtıcı, depolama bölümü, FDM, ısıl yalıtım ve ısıl çiftlerden oluşmaktadır. Sıcaklıklar bir veri toplama sistemi (Digi-Sense-12 CH) ile kayıt edilmiştir. İlk olarak kalibrasyonu yapılmış 0.2 mm çapındaki K tipi ısıl çiftler, ünite üzerinde belirlenmiş 12 farklı noktada sıcaklık değişimlerini görüntülemek için kullanılmıştır. Isıl enerji depolama ünitesi her biri 100x100x27.4 mm ebatlarındaki iki bölmeden oluşan pleksiglass dan imal edilmiştir. Isıl çiftler FDM doldurulmuş olan bölmelerin en alt kısmından başlanılarak orta kısımlarına 20 mm aralıklarla olmak üzere yerleştirilmişlerdir.



Şekil 3.2. Isı depolama ünitesi ve ısı çiftlerinin yerleşimi

Şekil 3.2’de ısı depolama ünitesi ve ısı çiftlerinin yeri görülmektedir. Yüksek gözenekliliğe sahip metal köpükler yüksek ısı iletkenlikleri ve yüksek yüzey alan yoğunlukları nedeniyle en umut vaat eden ısı transferini artırıcı malzemeler olarak kabul edilirler. Bu çalışmada Almanya’daki m-pore firmasından temin edilen 10PPI ve 20PPI gözenekliliğe sahip (AlSi7Mg) açık gözenekli metal köpükler, FDM’nin ısı transferi üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla kullanılmıştır.

3.1.1. Isıl Enerji Depolama Düzenegi

Isıl enerji depolama ünitesi 100x100x27.4 mm ebatlarında, bir tanesi sadece FDM ile diğeri de açık gözenekli metal köpük içerisine FDM doldurulmasıyla oluşturulmuş pleksiglass dikdörtgen bir boşluktan ve plaka tipi rezistanstan oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde organik FDM olarak n-heptacosane parafin ve inorganik FDM olarak kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Kalsiyum klorür ve sulu çözeltilerinin termofiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de, n-heptacosane parafinin termofiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. CaCl₂ ve sulu çözeltilerinin termofiziksel özellikleri

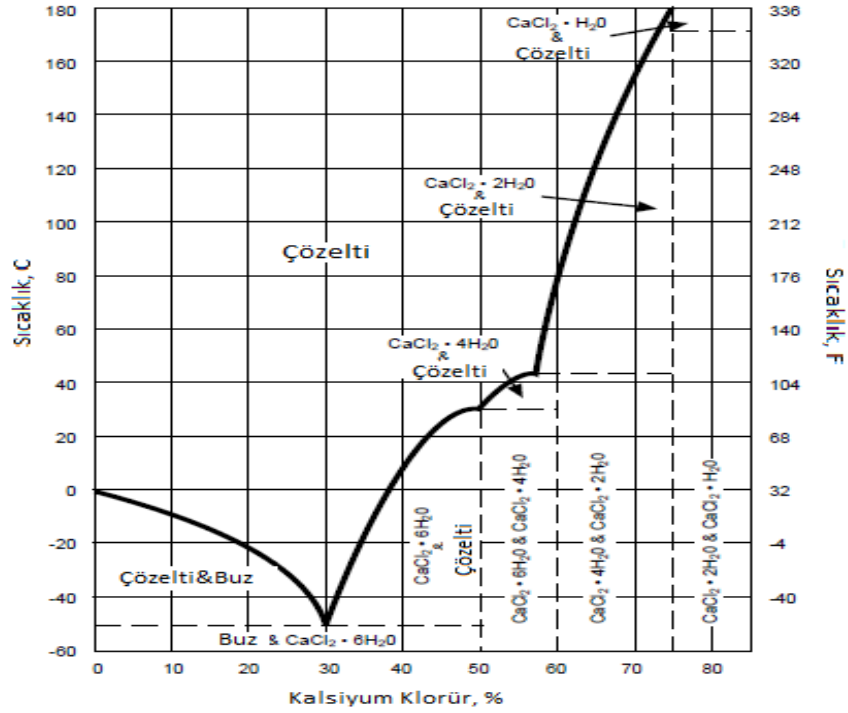
Özellik	CaCl ₂ ·6H ₂ O	CaCl ₂ ·4H ₂ O	CaCl ₂ ·2H ₂ O	CaCl ₂ ·H ₂ O	CaCl ₂
Bileşim(CaCl₂)	50.66	60.63	75.49	86.03	100
Molekül ağırlığı	219.09	183.05	147.02	129	110.99
Erime noktası (T_e,°C)	29.9	45.3	176	187	773
Kaynama noktası (°C)	-	-	174	183	1935
Yoğunluk (25°C, g/cm³)	1.71 (katı)	1.83	1.85	2.24	2.16
	0.56 (sıvı)				
Erime gizli ısı (kj/kg)	135				
Isıl İletkenlik (k,W/mK)	1.09 (katı)				
	0.54 (sıvı)				
Özgül ısı (C_p), kj/kg°C	1.46 (katı)				
	2.13 (sıvı)				

Çizelge 3.2. n-heptacosane parafinin termofiziksel özellikleri

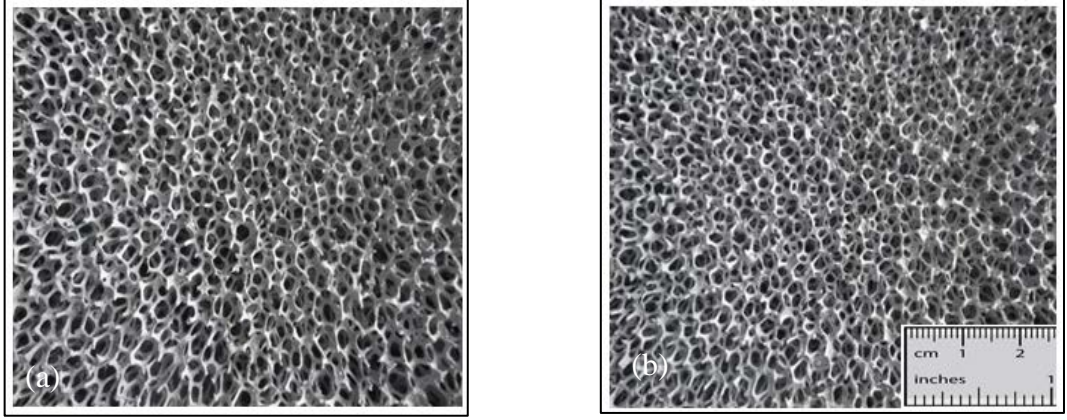
Özellik	
Erime noktası (T_e,°C)	58-60
Gizli ısı (h_f), kj/kg	236
Yoğunluk (kg/m³)	773 (sıvı)

FDM olarak seçilen CaCl₂·6H₂O'in ısıl iletkenliği katı ya da sıvı halde parafin gibi organik bir FDM ile kıyaslandığında dört kat daha fazladır. Kalsiyum klorür suda çok iyi çözünmesine rağmen belirli sıcaklık koşulları altında faz ayrışması meydana gelebilir. Bu sıcaklık koşullarının kalsiyum klorür ve sulu çözeltilerinin üzerindeki etkisi Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. CaCl₂ ve sulu çözeltilerinin faz diyagramı



Faz diyagramı saf kalsiyum klorür için sıcaklık ve içerdikleri farklı su miktarlarına göre katı fazdaki farklı hidrat seviyelerini gösterir. Faz diyagramının nasıl kullanıldığına örnek vermek gerekirse, eğer %25'lik kalsiyum klorür çözeltisi $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ derecenin altında soğutulursa, buz kristalleri oluşmaya başlar ve kalan çözeltinin yoğunluğu artar. Soğuma devam ettikçe, daha fazla buz ayrılır ve çözelti yavaş yavaş kalınlaşır ve katı duruma geçebilir. Ancak katılaşma, kalan çözeltinin % 29.6 oranında yoğunlaştığı $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ dereceye ulaşınca kadar tam anlamıyla gerçekleşmez ve buz ile kalsiyum klorür heksahidrat karışımı olarak kristalleşir. Yoğunlukları % 29.6'dan büyük olan çözeltiler soğutulduğunda, başlangıçtaki katı faz kalsiyum klorür heksahidrattır. Kalsiyum klorür çözeltileri aşırı soğumaya belirgin bir biçimde meyillidir. Örneğin, çözeltinin ısısı kristalleşme olmadan faz çizgesinin derecelere aşağısına düşebilir. Kristaller aşırı soğuk çözeltilerde oluştuğunda, karışımın ısısı faz çizgisinde tanımlanan sınıra geri dönecektir.



Şekil 3.3. Açık gözenekli metal köpükler (a) 10PPI (b) 20PPI

Şekil 3.3 deneylerde FDM'nin ısı iletkenlik ve ısı ı enerji depolama kapasitesi üzerine etkisini incelemek için kullanılan döküm tekniği ile yapılmış açık gözenekli metal köpükleri gösterilmektedir. Açık gözenekli metal köpükler düşük yoğunluk, korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaya başlanılan yeni bir malzeme türüdür. Metal köpük üretimi üzerine 1960'lı yıllarda çalışılmaya başlanmış, bugüne kadar birçok yöntem denenmiş ve halen birçok araştırma merkezinde üretim yöntemleri ve maliyetlerin düşürülmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir. Alüminyum metal köpükler açık gözenekli ve kapalı gözenekli olmak üzere iki şekilde üretilmektedirler. Her iki yapı biçimi de %80-95 boşluk oranına sahiptirler. Eğer gözenekler birbirleri ile bağlantılı bir halde bulunurlarsa, açık hücreli (open cell), hücrelerinin her birinin içerisine gaz hapsedilmiş ve birbirinden sızdırmazlık derecesinde duvarlarla ayrılmış ise kapalı hücreli (closed cell) alüminyum köpükler olarak adlandırılırlar. Köpük metaller hücre yapısının açık veya kapalı oluşuna göre değişik kullanım alanlarına sahiptir. Bu metal köpükler pentagonal veya hegzagonal yüzlere sahip birbirine bağlı hücrelerden oluşur. Hücreler rastgele yönelimli, boyut ve şekil açısından homojen olarak kabul edilebilir. Gözeneklilik ve gözenek yoğunluğu inç başına gözenek sayısı cinsinden (PPI) ifade edilir. Bu çalışmada Almanya'dan m-pore firmasından özel siparişle temin edilen 10PPI ve 20PPI (AlSi7Mg) metal köpükler kullanıldı. Bu malzemenin porozitesi, %90 olarak üretici firma tarafından verilmiştir.

Kullanılan metal köpüklerin geometrik özellikleri Çizelge 3.4’de verilmektedir.

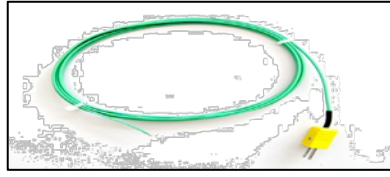
Çizelge 3.4. Metal köpüklerin geometrik yapısı

PPI-inç başına gözenek sayısı	10PPI	20PPI
Malzeme	AlSi7Mg	AlSi7Mg
Gözeneklilik (%)	90	90
Yoğunluk (g/cm³)	0.23	0.24
Gözenek boyutu (d_p, mm)	2.540	1.270

Son zamanlarda metal köpükler içerisinde akış ve ısı transfer analizleri artan bir ilgiyle çalışılmaktadır. Çünkü metal köpükler düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek geçirgenlik gibi ısı transferini iyileştirici avantajlara sahiptirler. Açık gözenekli köpükler ve FDM’nin homojen, izotropik bir yapıya sahip oldukları kabul edilmiştir. Dikdörtgen metal köpükler (AlSi7Mg) %90 gözenekliliğe ve 160 W/mK ısıl iletkenliğe sahiptirler.

3.1.2. Isıl Çift (Termokupl)

Isıl çiftler, ısıl potansiyel farkını elektriksel potansiyel (Voltaaj) ya da mV değerinde elektriksel potansiyelleri ısıl potansiyel olarak algılayabilen sensörlerdir. Isıl çift iki farklı iletken ucun birleştirilmesi ile oluşturulan basit bir sıcaklık ölçü elemanıdır. Birleşme noktası sıcak nokta, diğer açık iki uç ise soğuk nokta (veya referans nokta) olarak tanımlanır. Sıcaklık farkı ile orantılı, soğuk nokta uçlarında mV mertebesinde gerilim üretilir. Isıl çift’in sıcak noktası ve soğuk noktası arasındaki sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim, sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkına oranlıdır. Bu çalışmada FDM ve metal köpük içerisindeki sıcaklık dağılımını gözlemleyebilmek amacıyla ölçüm aralığı -200°C ile 1200°C arasında olan, iyi bir korozyon direncine ve hızlı tepki süresine sahip 0.2 mm çapında K tipi kromel-alümel (Cr-Al) ısıl çiftler kullanılmıştır. K tipi ısıl çiftler, geniş sıcaklık aralıklarında en sık kullanılan ve ucuz malzemelerden yapılan ısıl çiftler arasında en kararlı olan türdür. Şekil 3.4 sıcaklık dağılımını gözlemlemek için kullanılan ısıl çifti gösterir.



Şekil 3.4. K tipi (Cr-Al) ısıt çift

3.1.3. Veri Toplayıcı

Isıl çiftler tarafından üretilen voltaj sinyalini toplamak ve dijital verilere dönüştürmek için Digi-Sense 12CH markalı veri toplama cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan veri toplayıcı Şekil 3.5 de verilmiştir. Isıl çiftlerden gelen mV genlikli sinyaller kullanılan yazılım aracılığıyla sıcaklık değerleri şeklinde hem bilgisayar ekranında görüntülenmiş hem de 30 sn aralıklarla excel dosyasına kayıt edilmiştir.



Şekil 3.5. Digi Sense 12CH veri toplayıcı

3.1.4. Güç Kaynağı

Şekil 3.6'da deneylerde kullanılan Sorensen XTR serisi 850W çıkış gücüne sahip, yüksek hassasiyetli programlanabilir güç kaynağı görülmektedir.



Şekil 3.6. Sorensen XTR programlanabilir güç kaynağı

3.2. Yöntem

İlk olarak 8 mm kalınlığında şeffaf pleksiglass ile test bölümü imal edilmiştir. Test bölümü Şekil 3.2’de görüldüğü gibi üç bölümden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Birinci bölüm sadece FDM, ikinci bölüm ise açık gözenekli köpük malzeme ve FDM konulacak şekilde imal edilmiştir. Böylece yalnız FDM ve metal köpüklü ortamdaki FDM için eş zamanlı ve aynı şartlarda deney yapılmıştır. Üçüncü bölmede durgun hava bulunmaktadır. Böylece test bölümünün minimum ısı kaybı olacak şekilde tasarlanan yüzeyinden FDM’nin erime süreci gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşamada Bölüm 3.1’de özellikleri verilmiş olan parafin (n-heptacosane) eritilerek pleksiglass dan imal edilmiş olan dikdörtgen bölmelerden bir tanesine doldurulmuş, diğer bölmeye ise gözenekli metal köpük yerleştirilmiştir. 3000W/m^2 , 4460W/m^2 ve 8355W/m^2 olmak üzere 3 farklı sabit ısı akısı plaka tipi rezistans alt, yan ve üst ısıtma konumunda olacak şekilde yerleştirilmiş ve gözenekli ortamın FDM’nin erime hızına olan etkisi gözlemlenmiştir.

İkinci aşamada kalsiyum klorür (CaCl_2) olarak temin edilen FDM yaklaşık %50.66 oranında CaCl_2 -su olacak şekilde eritilerek kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) formuna dönüştürülmüştür. Isıl enerji depolama ünitesinin $100 \times 100 \times 27.4$ mm ebatlarındaki dikdörtgen şeklindeki bölmelerinden bir tanesine daha önceden hazırlanmış olan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, diğer bölmesine ise yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan açık gözenekli köpük malzeme (AlSi7Mg) yerleştirilmiş ve gözenek boşlukları FDM ile doldurulmuştur. FDM’nin erime ve gizli ısı depolama sürecinin gözlemlenebilmesi için plaka tipi rezistans her bir deney esnasında üstte, yanda ve altta olacak şekilde konumlandırılmış, 1310W/m^2 ve 700W/m^2 olmak üzere iki farklı sabit ısı akısı uygulanarak ısıtma konumunun FDM’nin erime hızı ve enerji depolama miktarı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

3.2.1. Sayısal Modelleme

Hareketli sınır olarak da adlandırılan faz değişim problemi, erime ve katılaşma olaylarını içeren zamana bağlı ısı transferi problemidir. Faz değişim problemini matematiksel model olarak ele aldığımızda, yönetim denklemlerinin zamana bağlı ve non-olması sayısal çözümleri zorlaştıran bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Değerleri zamanla değişen katı-sıvı bölgelerdeki sıcaklık dağılımları ve bu bölgeleri birbirinden ayıran arayüz konumu gibi bilinmeyenlerin ortaya çıkarılması için ait oldukları diferansiyel denklemlerin eşzamanlı olarak çözümleri gerekmektedir (İlken, 1991).

Faz değişim problemlerinde karşılaşılan bu zorluklardan dolayı yapılan çalışmalarda analitik veya yarı analitik çözüm, bazı fiziksel koşulların bilindiği ve basitleştirilmiş geometriler için elde edilebilir. Ayrıca modelleme konusunda analitik çözümlerde gerçeğe yaklaşmak daha zor olacağı için kaba çözümler yapılabilmektedir. Ancak sayısal çözümlerde gerçeğe uygun modelleme nispeten daha kolaydır. Bundan dolayı birçok faz değişim probleminin çözümünde sayısal çözümleme tercih edilmiştir.

Bu çalışmada üç boyutlu fiziksel modeli oluşturulan FDM'nin erime prosesi yönetim denklemlerinin çözümünde ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent 14.0 kullanılmıştır. Fluent genel amaçlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, havacılık endüstrisi, turbomakina endüstrisi (fan, kompresör, pompa, türbin, vb.), yiyecek endüstrisi gibi birçok alanda akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Fluent ayrık (Segregated) ve bileşik (Coupled) gibi iki çözüm yöntemi kullanmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak kısmi diferansiyel denklem formunda olan yönetim denklemleri cebirsel denklem takımına dönüştürülür (Patankar, 1980). Fluent bu iki yöntemi kullanırken yönetim denklemlerini sonlu hacim yöntemi ve kontrol hacim tekniği ile sayısal çözüm yapar. Sonlu hacimler yöntemi çözüm bölgesini küçük sonlu hacimlere bölerek (ayrıklaştırma-

discretization) ilgili denklemleri her bir sonlu hacim için ayrı ayrı çözüme ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek genel çözümü bulma esasına dayanır. Denklemlerin çözümü için sayısal yöntemlere ve gelişmiş bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu yöntem sırasıyla;

- çalışılacak bölmenin kontrol hacimlerine bölünerek bir ağ(mesh) oluşturulması
- her bir hacim elemanı üzerinde sırasıyla momentum, süreklilik ve enerji gibi diğer aranılan denklemlerinin çözümü
- elde edilen ayrık denklemlerin lineerleştirilmesi ve denklem takımının çözümü
- yakınsaklığın kontrol edilmesi
- çözümün elde edilmesi

basamaklarını içerir.

Fluent programı, alt yapısında bulunan aşağıdaki denklemleri kullanarak sistemi çözüme ulaştırır.

Korunum Denklemleri

1- Kütleinin Korunumu (Süreklilik) Denklemi

Kütlenin korunumu ilkesi, Δt zaman aralığında toplam sistem kütleindeki değişimin, sistem sınırlarından giren kütle ile sistem sınırlarından çıkan kütleinin farkına eşit olmasını ifade eder. Kütleinin korunumu;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Vektörel gösterimle ifade edilecek olursa yukarıdaki denklem;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (3.2)$$

halinde gösterilecektir. Eşitlik 3.2. kütle korunum eşitliğinin genel şeklidir.

2-Momentum Korunum Denklemi

Momentum denklemleri vektörel denklemler olup Newton'un ikinci yasasına dayanır.

x momentum;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + (\rho \beta) g_x (T - T_{ref}) \right] \quad (3.3)$$

y momentum;

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + (\rho \beta) g_y (T - T_{ref}) \right] \quad (3.4)$$

z momentum;

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + (\rho \beta) g_z (T - T_{ref}) \right] \quad (3.5)$$

Burada p statik basıncı, μ dinamik viskoziteyi, β sıvı fraksiyonu (Boussinesq yaklaşımı), T_{ref} ise referans sıcaklığı ifade etmektedir.

3-Enerji Korunum Denklemi

Enerji kapalı bir sistem sınırından ısı veya iş olarak geçebilir ve enerjinin korunumu ilkesi gereği bir proses esnasında sisteme giren veya çıkan net enerji, sistemin enerji miktarındaki değişime eşittir. Enerjinin korunumu ilkesi;

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada h özgül entalpiyi temsil etmektedir.

Fluent'in kullandığı 'enthalpy-porosity' tekniği katı-sıvı arayüze (mushy zone) gözenekli ortam gibi davranır. Herbir hücre içerisindeki gözeneklilik bu hücre içinde sıvı fraksiyonuna eşitlenir.

$$\text{eğer } T < T_{\text{katılaşma}} \text{ ise } \beta = 0$$

$$\text{eğer } T > T_{\text{sıvılaşma}} \text{ ise } \beta = 1$$

$$\text{eğer } T_{\text{katılaşma}} < T < T_{\text{sıvılaşma}} \text{ ise } \beta = \frac{T - T_{\text{katılaşma}}}{T_{\text{sıvılaşma}} - T_{\text{katılaşma}}}$$

Bu eşitliklerin çözümünde bazı kabuller yapılmıştır.

- FDM homojen ve izotropiktir.
- Erimiş FDM içerisindeki doğal taşınım laminerdir.
- Faz değişimi boyunca FDM'nin hacim değişimi ihmal edilebilir.
- FDM'nin termofiziksel özellikleri sıcaklıktan bağımsız kabul edilmiştir.

Fluent, kütle ve momentum korunum eşitliklerini tüm akışlar için çözmekteyken, ısı transferi içeren akışlar için bu eşitliklere ilaveten enerji korunum eşitliğini de çözer. Bu çalışmada sabit koordinat sisteminde fluent programının altyapısında bulunan kütle, momentum ve enerji korunum eşitlikleri çözülecektir. Eşitliklerin ayrıştırılmasında Implicit, birinci dereceden ayrıklaştırma tekniği kullanılmıştır. Ayrıklaştırılmış eşitliklerin çözüm algoritması olarak SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) çözüm algoritması kullanılmıştır. SIMPLE basınç düzeltme denklemleri kullanılarak hız vektörlerinin açık biçimde (explicit), basınç düzeltme değerlerinin ise kapalı biçimde (implicit) çözüldüğü bir algoritmadır. Fiziksel modelin oluşturulması için ön işlem yazılımı olan Gambit 2.3.16 kullanılmıştır. Gambit yazılımında ilk önce üç boyutlu model geometrisine uygun olan hexagonal ağ yapısı seçimi yapılmıştır. Faz değişim probleminin çözümünde kullanılacak düğüm sayısının belirlenebilmesi için çözümlerin düğüm sayısından bağımsız olup olmadığı araştırılmıştır. Bunun için değişik sayıda düğüm

sahip geometriler oluşturulup, çözümler kıyaslanmıştır. Beş farklı sıklık ölçüsü ve buna karşılık gelen düğüm sayıları için ağ yapıları oluşturulmuştur. Çizelge 3.5’ de farklı sıklıktaki hexagonal tip ağ yapıları için FDM modelindeki eleman sayılarının dağılımı görülmektedir.

Çizelge 3.5. Farklı sıklıktaki ağ yapıları için eleman sayılarının dağılımı

Gambit’te kullanılan sıklık ölçüsü	5	4	3.25	2.5	2
Eleman sayısı	2000	4375	8000	17600	35000
Düğüm sayısı	2646	5408	9261	20172	39015

Modelleme ve ağ yapısı oluşturulduktan sonra elemanlara ayrılan üç boyutlu fiziksel model .msh uzantısı olarak kaydedilerek Fluent 14.0 yazılımına aktarılmıştır. Fluent programına çağrılan (import) meshlenmiş modele ait fiziksel özellikler, sınır koşulları, malzeme özellikleri gibi tüm veriler programa tanımlanmıştır. Çözücü olarak Fluent 14.0 içerisinde bulunan ‘‘Pressure based’’ metodu, daha az depolama ortamı gerektirdiği ve çözüm prosedüründe esnekliğe izin vermesinden dolayı kullanılmıştır. Momentum ve enerji denklemlerinin daha hassas çözümü için ikinci dereceden enterpolasyon yöntemi ‘second order upwind’, basınç düzeltme denklemleri içinde ‘Presto’ şeması kullanılmıştır. Düzeltme katsayısı ‘under relaxation factor’ basınç, yoğunluk, momentum, sıvı fraksiyonu ve enerji için sırasıyla 0.3, 1, 0.7, 0.9 ve 1 seçilmiştir. Yakınsama kriteri olarak hız için 10^{-4} , enerji için 10^{-6} kabul edilmiştir. Simülasyon çalışmasında farklı zaman adımları (1, 0.5, 0.3, 0.1 ve 0.05s) denenerek, çözümün zaman adımından bağımsız olup olmadığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar çözümün zaman adımından bağımsız olduğunu göstermiştir. FDM içerisindeki sıvı kısımda sıcaklık gradyanı altındaki yoğunluk değişiminden kaynaklanan akışkan hareketi için itici güç, doğal taşınımına neden olur. Bu nedenle sayısal çözümlemede Boussinesq yaklaşımı göz önüne alınmıştır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Üç aşamada gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmada Bölüm 3.1’de termofiziksel özellikleri verilen parafin (n-heptacosane) ve $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ’ın farklı ısı akısı, ısıtma konumu ve açık gözenekli metal köpük takviyesi etkisi altında ısı depolama miktarı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Deneysel olarak gerçekleştirilen ilk iki aşamadan sonra FDM’nin erime prosesinin sayısal çözümlemesi için ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent 14.0 kullanılmıştır.

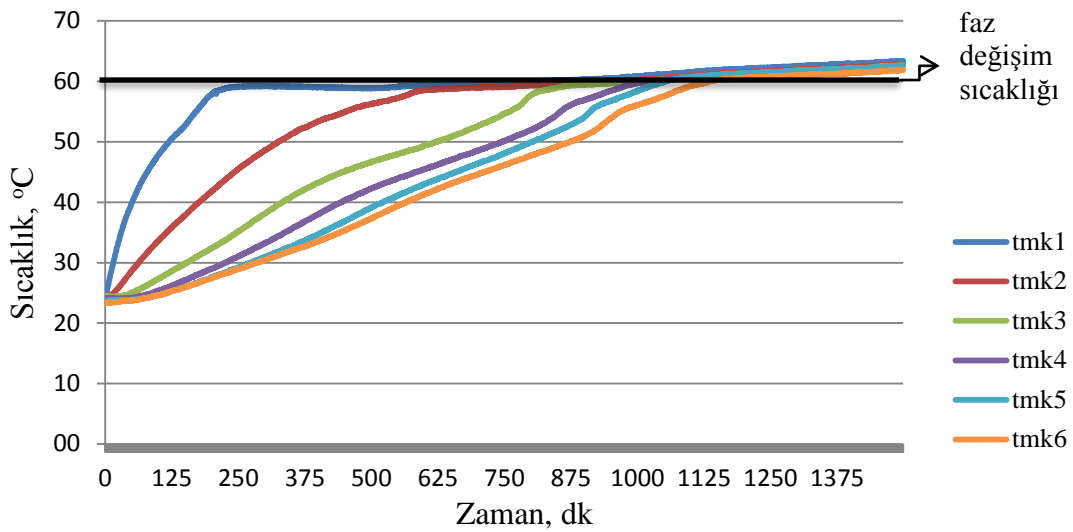
Uygulanan farklı ısı akısı, ısıtma konumu ve açık gözenekli metal köpük takviyesinin FDM’nin faz değiştirme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler sonucu elde edilen bulgular ile sayısal analiz sonuçları iyi bir uyum göstermiş ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur.

Deneysel çalışmanın bulguları sunulurken yalnızca parafin, metal köpüklü ortamda parafin, yalnızca $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve metal köpüklü ortamda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ’ın erime davranışı sıralaması izlenilmiştir.

$\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.2’de verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda parafinin erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Yandan ısıtma konumunda $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ için parafinin tamamının erimelediği, 2400dk sonra yaklaşık %78’inin eridiği görülmektedir. Deneysel bulgular bu zaman adımından sonra erime hızının oldukça yavaşladığını ve neredeyse sıfıra yaklaştığını göstermektedir. Resim 4.1’de görüldüğü gibi 600dk sonra alttan ısıtma konumunda parafinin %55’i erirken yandan ısıtma konumunda aynı zaman adımında yaklaşık %30’u erimektedir. Yandan ısıtma konumunda parafinin yaklaşık %50’si 1200dk erimektedir. Bu durumda düşük ısı akılarında alttan ısıtma konumunda erime hızı yandan ısıtma konumuna göre iki kat daha hızlı olmaktadır.

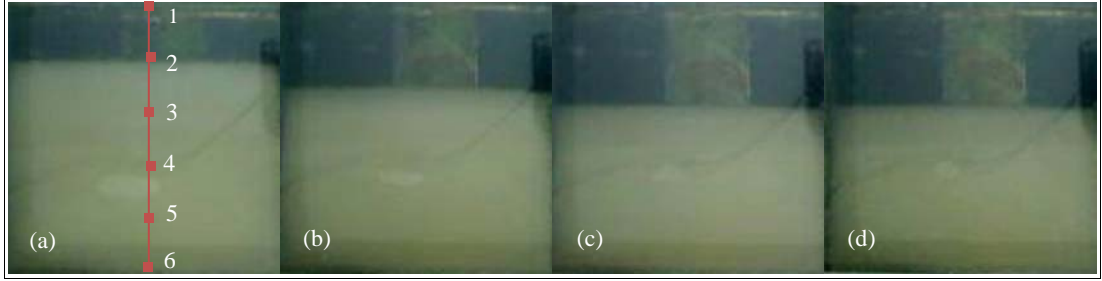


Resim 4.2. Yandan ısıtma konumunda FDM’nin erime oranları ($\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)
(a) 600dk (b) 1200dk (c) 1800dk (d) 2400dk

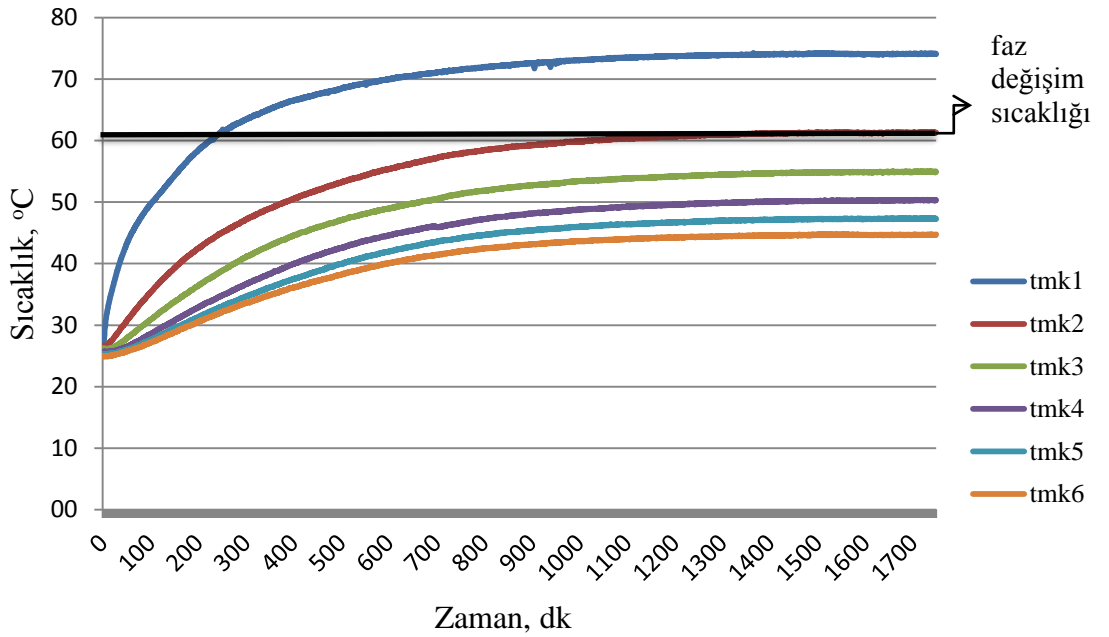


Şekil 4.2. Yandan ısıtma konumunda FDM’nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için parafinin erime oranı Resim 4.3’de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.3’de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda parafinin erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. 600dk sonunda alttan ısıtmada parafinin %55’i, yandan ısıtmada %30’u ve üstten ısıtmada %25’i erimektedir. Zaman adımlarının artmasıyla bu farkta artmakta ve üstten ısıtmada erime hızı neredeyse sıfır olmaktadır. Alttan, yandan ve üstten ısıtma konumları için erime oranlarının karşılaştırması Resim 4.4’de daha detaylı görülmektedir.



Resim 4.3. Üstten ısıtma konumunda FDM’nin erime oranları ($\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)
(a) 480dk (b) 960dk (c) 1440dk (d) 1920dk

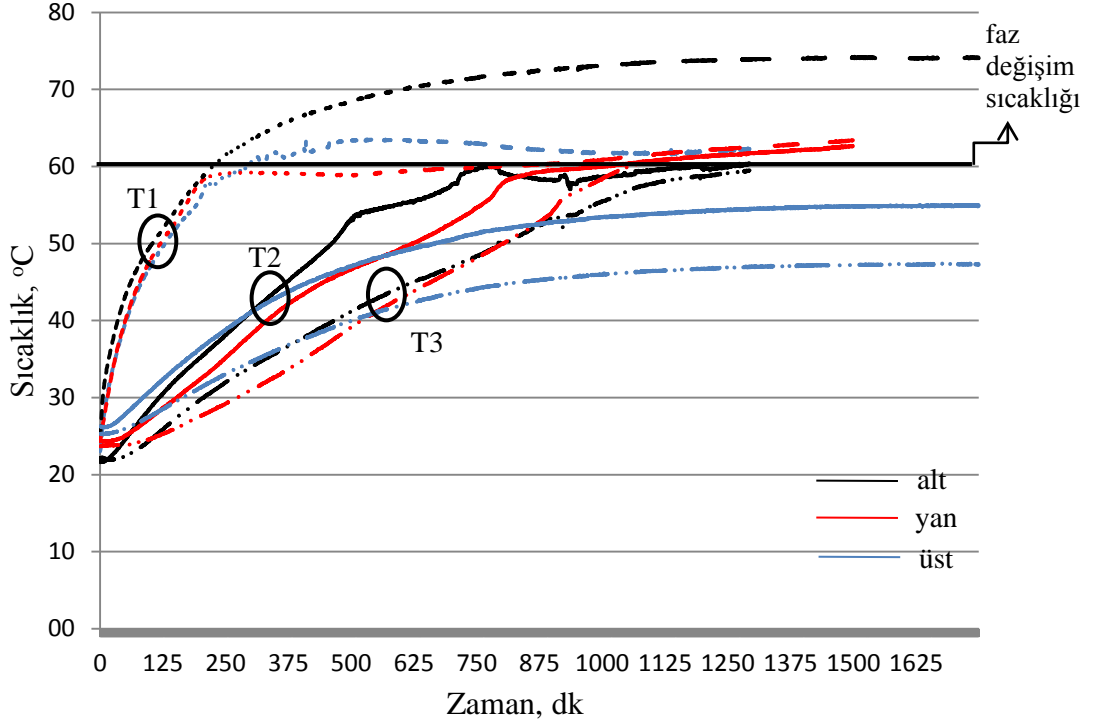


Şekil 4.3. Üstten ısıtma konumunda FDM’nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)



Resim 4.4. Isıtma konumunun etkisi ($\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$, 600dk)

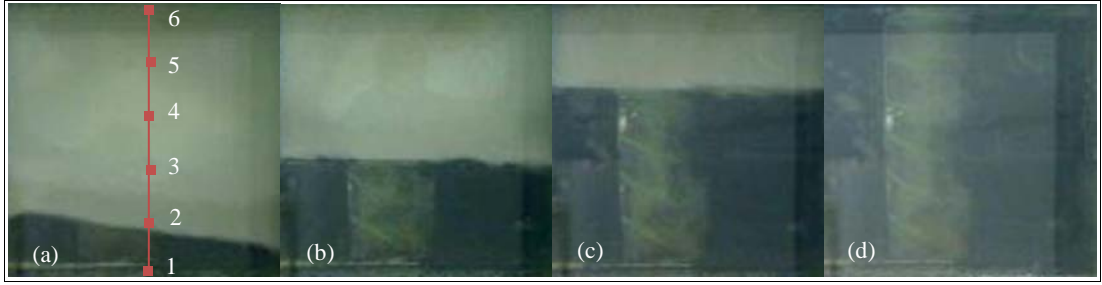
Resim 4.4’de $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında parafinin 600dk sonundaki erime oranları görülmektedir. Görüldüğü üzere farklı ısıtma konumlarında FDM’nin erime oranları da farklı olmaktadır. $100 \times 100 \times 27.4 \text{ mm}$ ’lik dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM’nin $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ ’lik sabit ısı akısında 600dk sonunda alttan ısıtma konumunda yaklaşık %55’i, yandan ısıtma konumunda yaklaşık %30’u, üstten ısıtma konumunda yaklaşık %25’i erimektedir. Gerçekte resimler faz değişiminde, ısıtma konumu ile faz değiştirme hızı arasındaki ilişkinin fiziksel açıklamasını vermektedir. Yapılan deneyler ve gözlemler faz değiştirme hızı üzerinde doğal taşınım yoluyla ısı transferinin önemli oranda etkili olduğunu göstermektedir. Alttan ısıtma durumunda ısıtıcı yüzeyi boyunca faz değişimi gerçekleşmektedir ve sıvı fazdaki parafinde gözle görülür şekilde sirkülasyon oluşmaktadır. Yandan ısıtma durumunda faz değiştirme hacmi Resim 4.4’deki gibi oluşmaktadır. İlk olarak faz değiştirme hızı bütün ısıtıcı yüzeyinde yaklaşık eşit olmaktadır. Kısa bir süre sonra sıvılaştıran FDM yukarı doğru hareketlenmekte ve faz değiştirme hızı üst bölgelerde artarken alt bölgelerde azalmaktadır. Üsten ısıtmada ise alttan ısıtma durumunda görülen faz değiştirme şeklinin simetrisi gözlenmektedir. İlk zaman adımlarında erime hızı alttan ısıtmaya göre daha belirgin olsa da kısa bir süre sonra faz değiştirme hızı logaritmik olarak azalmaktadır. Isı akısı arttırılsa bile erime hacmi bir miktar artmakta ancak belirli bir zaman adımı sonrasında tekrar azalmakta ve erime bölgelerinde sirkülasyon görülmemektedir.



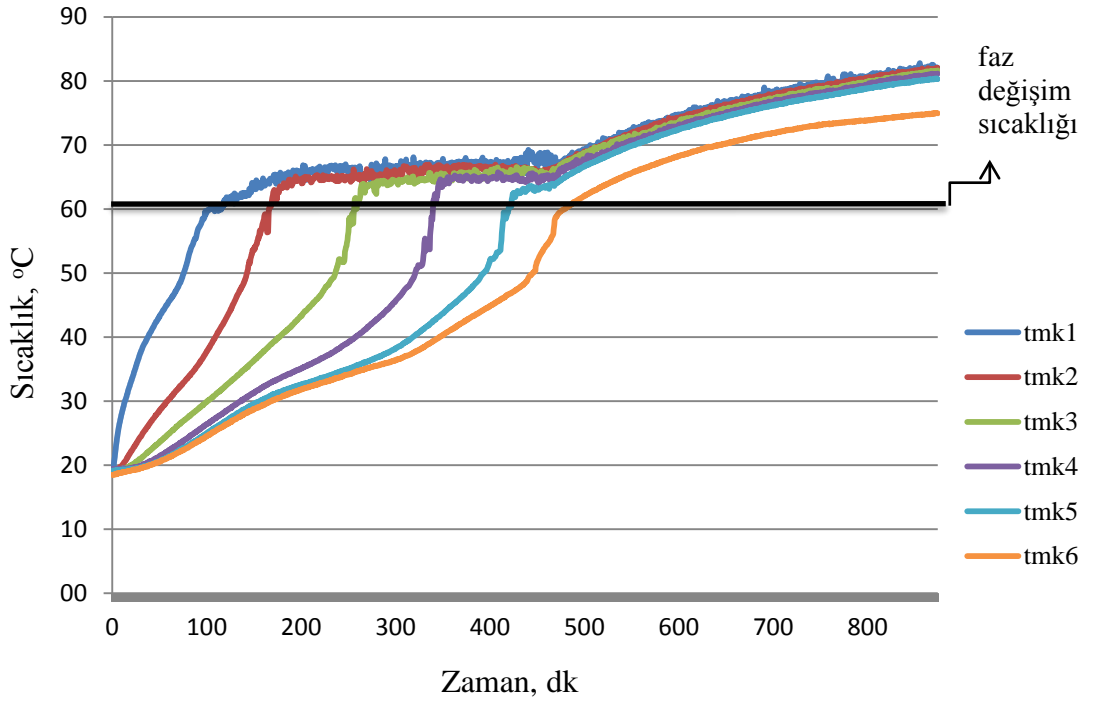
Şekil 4.4. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)

Şekil 4.4'de $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında $x/L=0$ (T1), $x/L=0.4$ (T3) ve $x/L=0.8$ (T5) noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü üzere $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ için bütün zaman adımlarında T1 sıcaklığı üstten ısıtma şartlarında daha yüksektir. Faz değiştirme sıcaklığına yaklaştıkça yandan ve alttan ısıtma şartlarına bağlı olarak sıcaklık artışı hızlanmaktadır. Üsten ısıtma şartlarında, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık değişim hızı azalmaktadır. Dolayısıyla faz değişimi daha geç olmaktadır. Hatta düşük ısı akısında ($\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$) ısı difüzyon çok yavaşlamakta ve çalışma zamanı boyunca (32 saat) faz değişim sıcaklığına ulaşamamaktadır. Ayrıca alttan ve yandan ısıtma konumu için faz değişim aralığı belirgin olarak görülürken, üstten ısıtmada faz değişim aralığı görülmemektedir. Bu durum faz değiştirme hızı ile sıcaklık artışının yok denecek kadar düşük olduğunu göstermektedir.

$\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.5’de verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda parafinin 120dk da %17, 240dk da %44, 360dk da %69’u ve tamamı 540dk da erimektedir.

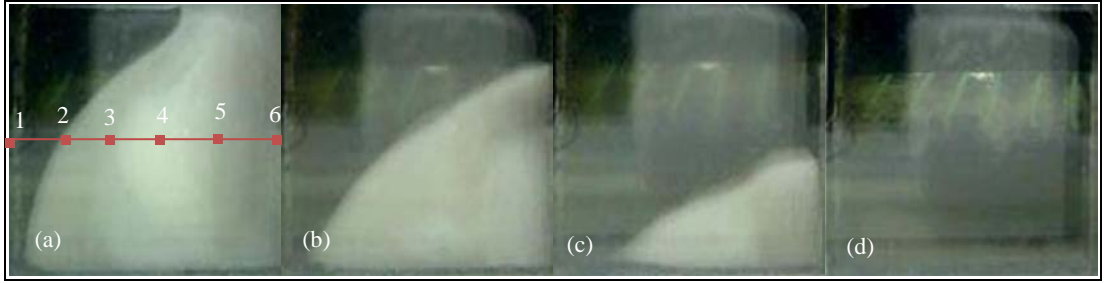


Resim 4.5. Altan ısıtma konumunda FDM’nin erime oranları ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)
(a) 120dk (b) 240dk (c) 360dk (d) 540dk

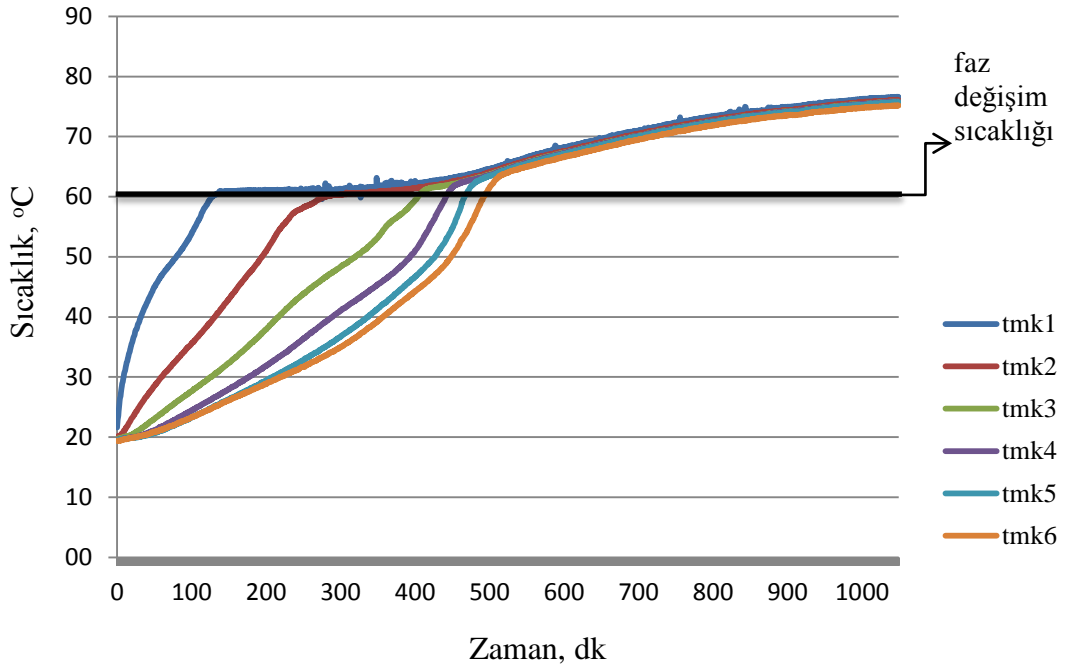


Şekil 4.5. Altan ısıtma konumunda FDM’nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda parafinin erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ için yandan ısıtma konumunda parafinin 180dk sonunda yaklaşık %22.5, 360dk sonunda %55, 540dk sonunda %76'sı erirken tamamı 600dk sonunda erimektedir. Resim 4.5'de görüldüğü gibi 360dk sonra alttan ısıtma konumunda parafinin %69'u erirken yandan ısıtma konumunda aynı zaman adımında yaklaşık %55'i erimektedir.



Resim 4.6. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)
(a) 180dk (b) 360dk (c) 540dk (d) 780dk

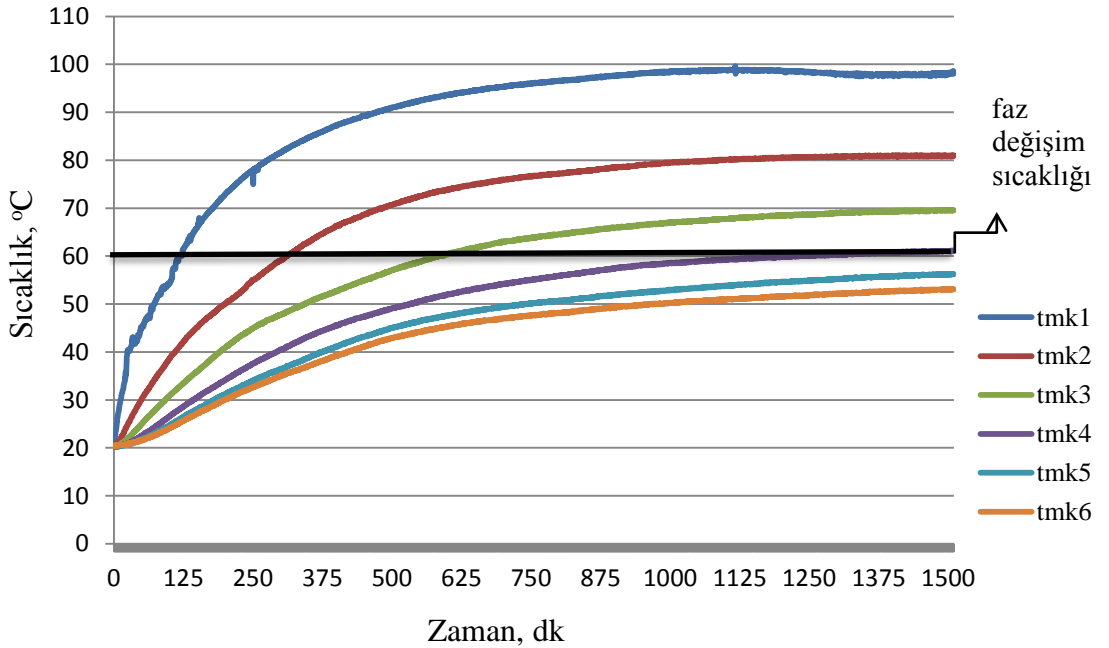


Şekil 4.6. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için parafinin erime oranı Resim 4.7’de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.7’de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda parafinin erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. 600dk sonunda alttan ısıtmada konumunda parafinin tamamı, yandan ısıtmada %84’ü erirken, üstten ısıtmada %46’sı erimektedir. Zaman adımlarının artmasıyla bu farkta artmakta ve üstten ısıtmada erime hızı neredeyse sıfır olmaktadır. Alttan, yandan ve üstten ısıtma konumları için erime oranlarının karşılaştırması Resim 4.8’de daha detaylı görülmektedir.



Resim 4.7. Üstten ısıtma konumunda FDM’nin erime oranları ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)
(a) 300dk (b) 600dk (c) 900dk (d) 1200dk

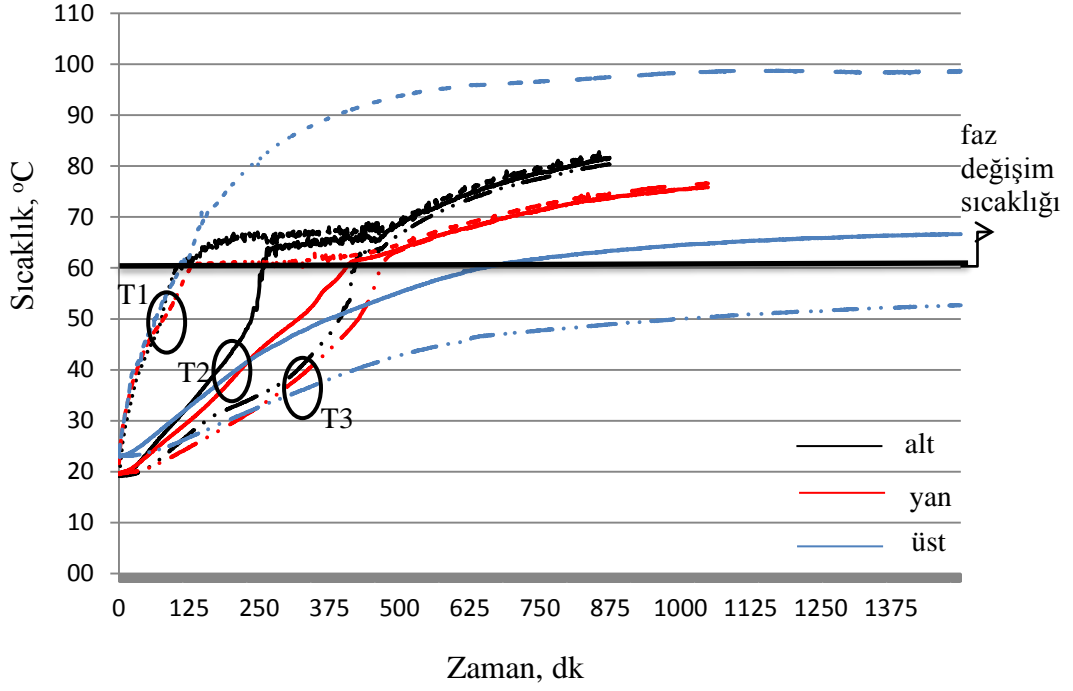


Şekil 4.7. Üstten ısıtma konumunda FDM’nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)



Resim 4.8. Isıtma konumunun etkisi ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$, 300dk)

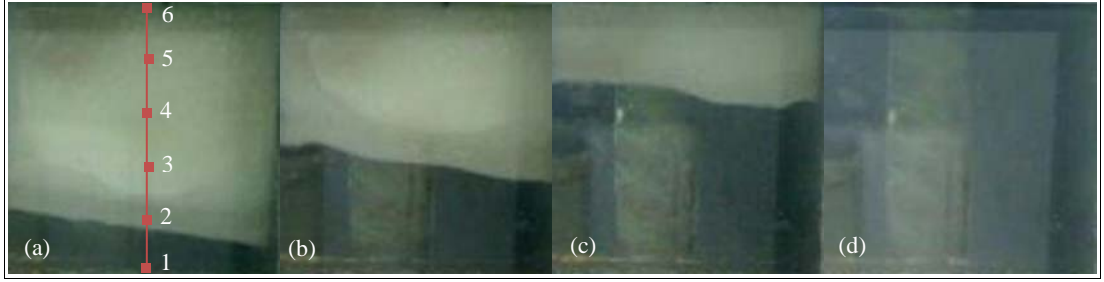
Resim 4.8’de $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında parafinin 300 dk sonundaki erime oranları görülmektedir. Görüldüğü üzere farklı ısıtma konumlarında FDM’nin erime oranları da farklı olmaktadır. $100 \times 100 \times 27.4 \text{ mm}$ ’lik dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM’nin $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ ’lik sabit ısı akısında 300dk sonunda alttan ısıtma konumunda yaklaşık %59.5’i, yandan ısıtma konumunda yaklaşık %38’i, üstten ısıtma konumunda yaklaşık %25’i erimektedir. Gerçekte resimler faz değişiminde, ısıtma konumu ile faz değiştirme hızı arasındaki ilişkinin fiziksel açıklamasını vermektedir. Yapılan deneyler ve gözlemler faz değiştirme hızı üzerinde doğal taşınım yoluyla ısı transferinin önemli oranda etkili olduğunu göstermektedir. Alttan ısıtma durumunda ısıtıcı yüzeyi boyunca faz değişimi gerçekleşmektedir ve sıvı fazdaki parafinde gözle görülür şekilde sirkülasyon oluşmaktadır. Yandan ısıtma durumunda faz değiştirme hacmi Resim 4.8’deki gibi oluşmaktadır. İlk olarak faz değiştirme hızı bütün ısıtıcı yüzeyinde yaklaşık eşit olmaktadır. Kısa bir süre sonra sıvılaştıran FDM yukarı doğru hareketlenmekte ve faz değiştirme hızı üst bölgelerde artarken alt bölgelerde azalmaktadır. Üstten ısıtmada ise alttan ısıtma durumunda görülen faz değiştirme şeklinin simetrisi gözlenmektedir. İlk zaman adımlarında erime hızı alttan ısıtmaya göre daha belirgin olsa da kısa bir süre sonra faz değiştirme hızı logaritmik olarak azalmaktadır. Isı akısı arttırılsa bile erime hacmi bir miktar artmakta ancak belirli bir zaman adımı sonrasında tekrar azalmakta ve erime bölgelerinde sirkülasyon görülmemektedir.



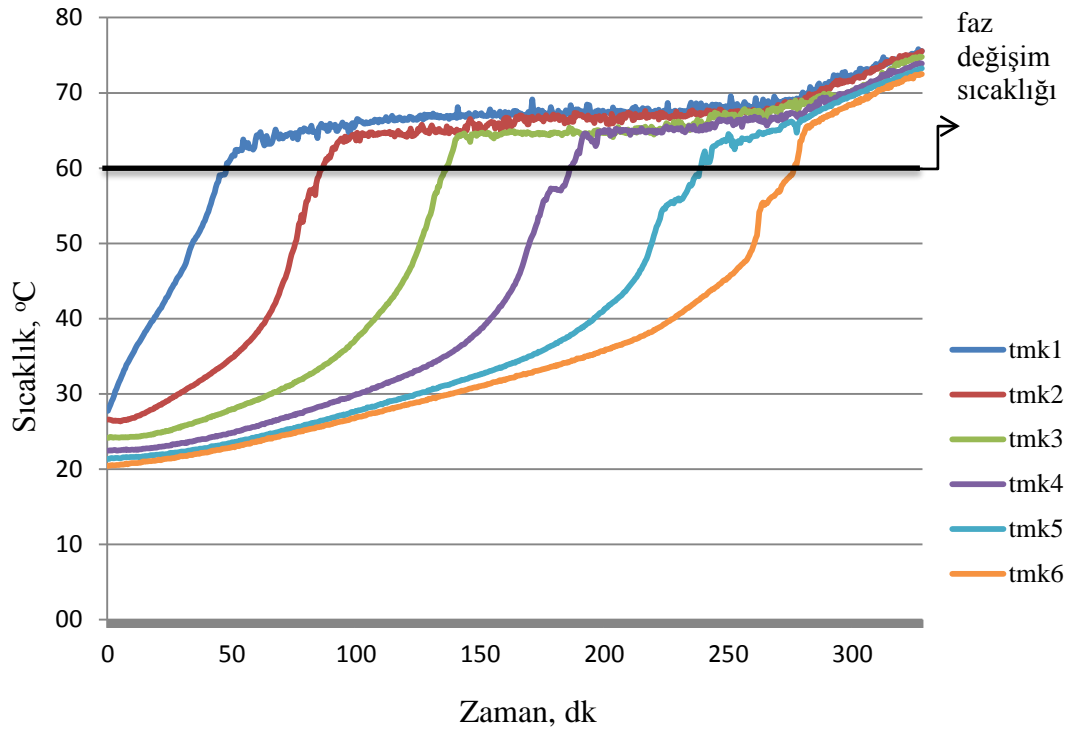
Şekil 4.8. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)

Şekil 4.8'de $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında $x/L=0$ (T1), $x/L=0.4$ (T3) ve $x/L=0.8$ (T5) noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü üzere $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ için bütün zaman adımlarında T1 sıcaklığı üstten ısıtma şartlarında daha yüksektir. Faz değiştirme sıcaklığına yaklaştıkça yandan ve alttan ısıtma şartlarına bağlı olarak sıcaklık artışı hızlanmaktadır. Üstten ısıtma şartlarında, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık değişim hızı azalmaktadır. Dolayısıyla faz değişimi daha geç olmaktadır. Ayrıca alttan ve yandan ısıtma konumu için faz değişim aralığı belirgin olarak görülürken, üstten ısıtmada faz değişim aralığı görülmemektedir. Bu durum faz değiştirme hızı ile sıcaklık artışının yok denecek kadar düşük olduğunu göstermektedir.

$\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.9'da verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda parafinin tamamı 300dk da erimektedir. 600dk da %17, 120dk da %39 ve 180dk da %65'i erimektedir.

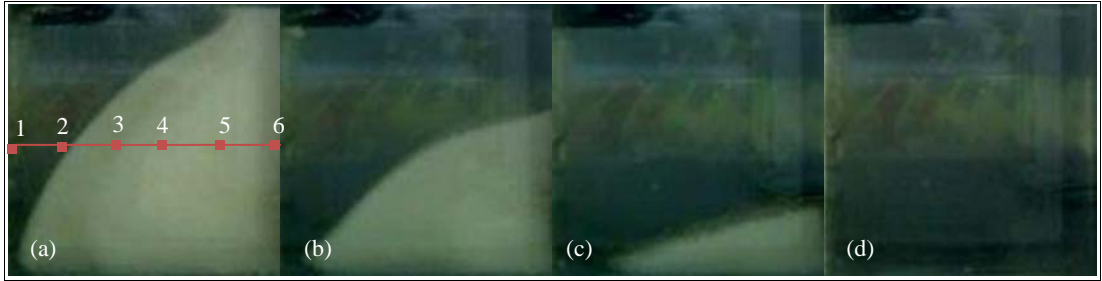


Resim 4.9. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)
(a) 60dk (b) 120dk (c) 180dk (d) 300dk

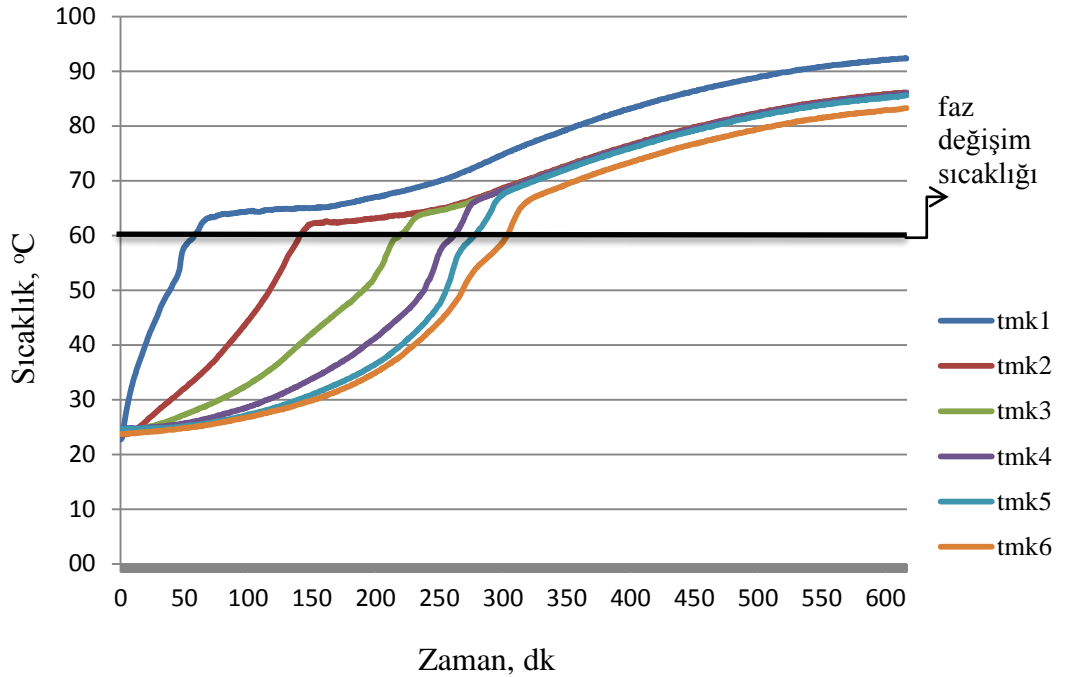


Şekil 4.9. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.10'da verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda parafinin erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir. Yandan ısıtma konumunda $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ için parafinin tamamının 540dk sonunda erirken 120dk sonunda %31, 240dk sonunda %57 ve 360dk sonunda yaklaşık %77'si erimektedir. Resim 4.9'da görüldüğü gibi alttan ısıtma konumunda 300dk sonra parafinin tamamı erirken yandan ısıtma konumunda aynı zaman adımında yaklaşık %70'i erimektedir.

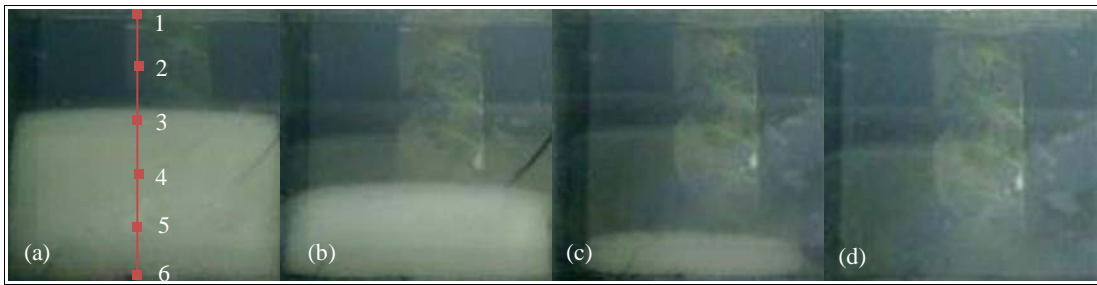


Resim 4.10. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)
(a) 120dk (b) 240dk (c) 360dk (d) 540dk

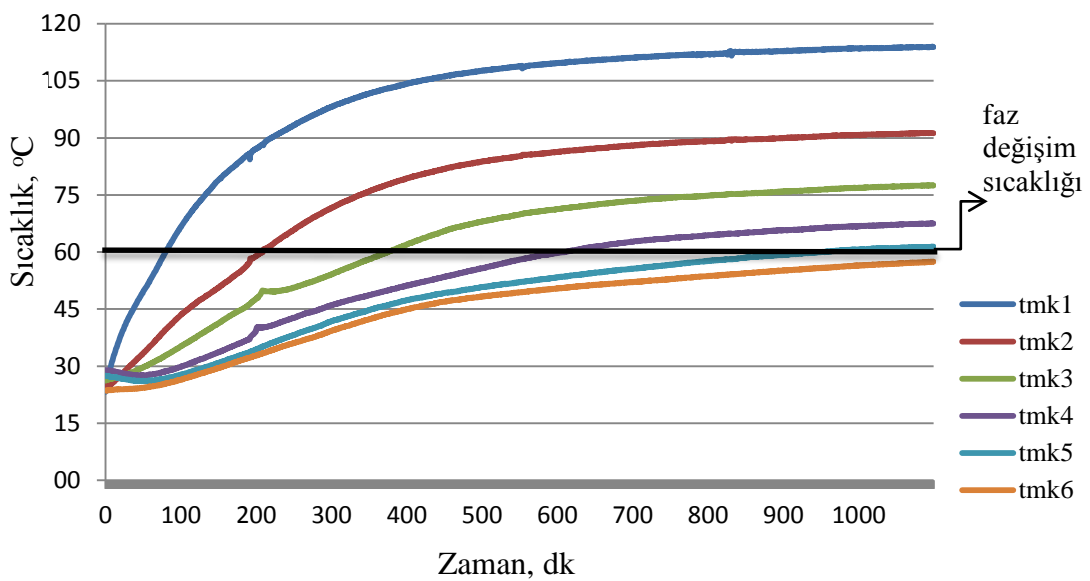


Şekil 4.10. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için parafinin erime oranı Resim 4.11'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.11'de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda parafinin erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. 300dk sonunda alttan ısıtma konumunda parafinin tamamı erirken, yandan ısıtmada parafinin %70'i, üstten ısıtmada ise %38'i erimektedir. Zaman adımlarının artmasıyla bu farkta artmakta ve üstten ısıtmada erime hızı git gide yavaşlamaktadır. $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında parafinin tamamı 1140dk sonunda erimektedir. Alttan, yandan ve üstten ısıtma konumları için erime oranlarının karşılaştırması Resim 4.12'de daha detaylı görülmektedir.



Resim 4.11. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)
(a) 300dk (b) 600dk (c) 900dk (d) 1140dk

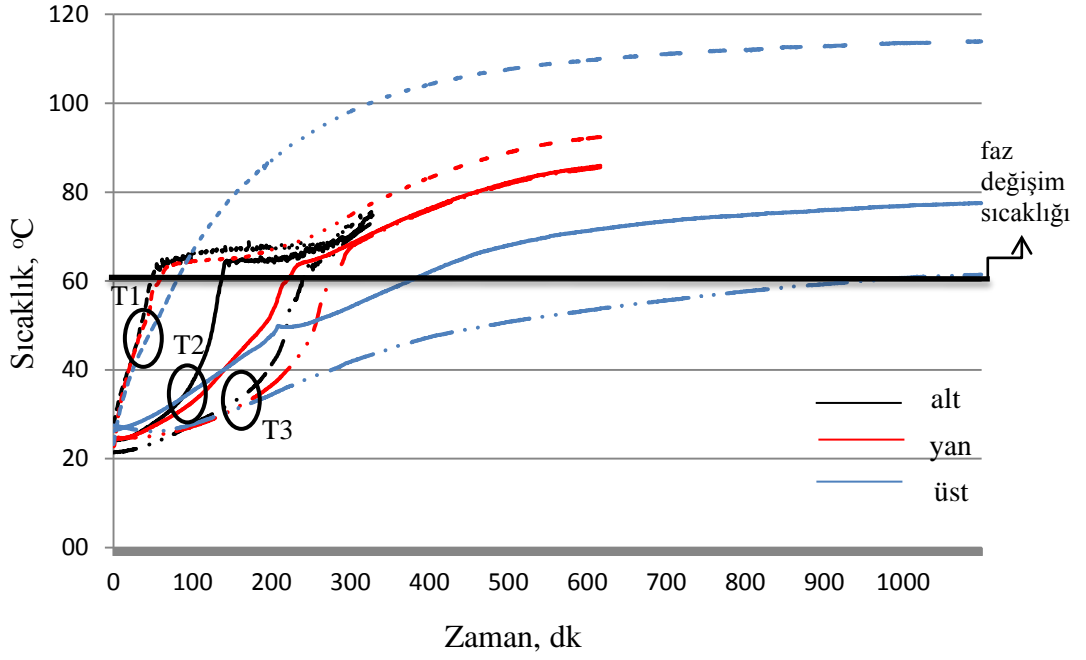


Şekil 4.11. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)



Resim 4.12. Isıtma konumunun etkisi ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$, 180dk)

Resim 4.12’de $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında parafin’in 180 dk sonundaki erime oranları görülmektedir. Görüldüğü üzere farklı ısıtma konumlarında FDM’nin erime oranları da farklı olmaktadır. $100 \times 100 \times 27.4 \text{ mm}$ ’lik dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM’nin $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ ’lik sabit ısı akısında 180dk sonunda alttan ısıtma konumunda yaklaşık %65’i, yandan ısıtma konumunda yaklaşık %50’si, üstten ısıtma konumunda yaklaşık %25’i erimektedir. Gerçekte resimler faz değişiminde, ısıtma konumu ile faz değiştirme hızı arasındaki ilişkinin fiziksel açıklamasını vermektedir. Yapılan deneyler ve gözlemler faz değiştirme hızı üzerinde doğal taşınım yoluyla ısı transferinin önemli oranda etkili olduğunu göstermektedir. Alttan ısıtma durumunda ısıtıcı yüzeyi boyunca faz değişimi gerçekleşmektedir ve sıvı fazdaki parafinde gözle görülür şekilde sirkülasyon oluşmaktadır. Yandan ısıtma durumunda faz değiştirme hacmi Resim 4.12’deki gibi oluşmaktadır. İlk olarak faz değiştirme hızı bütün ısıtıcı yüzeyinde yaklaşık eşit olmaktadır. Kısa bir süre sonra sıvılaştıran FDM yukarı doğru hareketlenmekte ve faz değiştirme hızı üst bölgelerde artarken alt bölgelerde azalmaktadır. Üstten ısıtmada ise alttan ısıtma durumunda görülen faz değiştirme şeklinin simetrisi gözlenmektedir. İlk zaman adımlarında erime hızı alttan ısıtmaya göre daha belirgin olsa da kısa bir süre sonra faz değiştirme hızı logaritmik olarak azalmaktadır. Isı akısı arttırılsa bile erime hacmi bir miktar artmakta ancak belirli bir zaman adımıdan sonra tekrar azalmakta ve erime bölgelerinde sirkülasyon görülmemektedir.

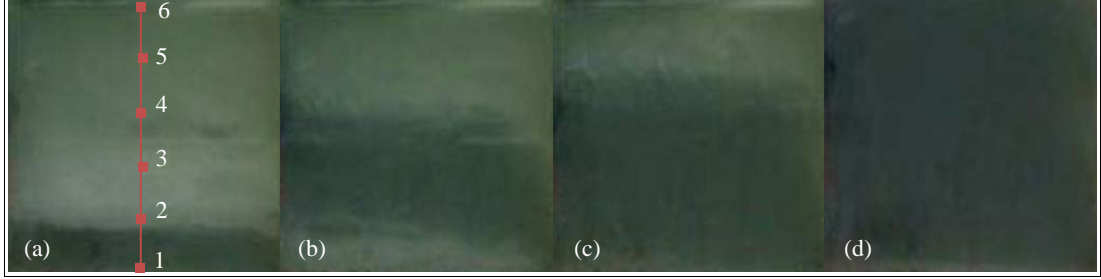


Şekil 4.12. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)

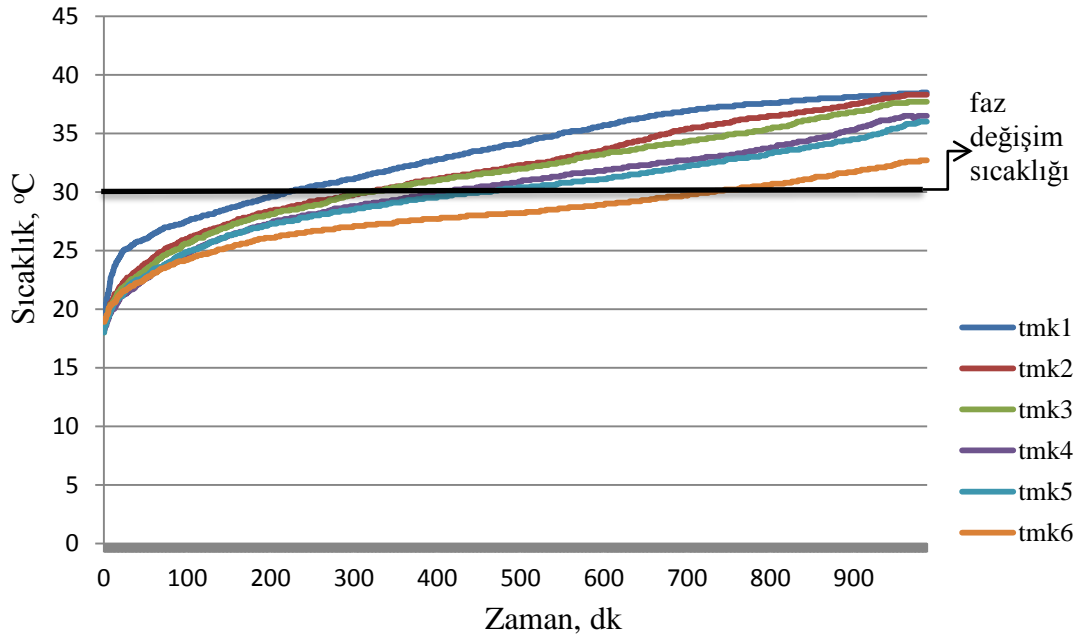
Şekil 4.12'de $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında $x/L=0$ (T1), $x/L=0.4$ (T3) ve $x/L=0.8$ (T5) noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü üzere $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ için bütün zaman adımlarında T1 sıcaklığı üstten ısıtma şartlarında daha yüksektir. Faz değiştirme sıcaklığına yaklaştıkça yandan ve alttan ısıtma şartlarına bağlı olarak sıcaklık artışı hızlanmaktadır. Üstten ısıtma şartlarında, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık değişim hızı azalmaktadır. Dolayısıyla faz değişimi daha geç olmaktadır. Ayrıca alttan ve yandan ısıtma konumu için faz değişim aralığı belirgin olarak görülürken, üstten ısıtmada faz değişim aralığı görülmemektedir. Bu durum faz değiştirme hızı ile sıcaklık artışının yok denecek kadar düşük olduğunu göstermektedir.

4.2. Kalsiyum Klorür Hekzahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Erime Davranışı

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.13'de verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.13'de verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamı 1080dk da erimektedir. 300dk da %21.5, 600dk da %55'i ve 900dk da %85'i erimektedir. Isı akısı miktarı belirlenirken FDM'nin faz değiştirme sıcaklığına çok yakın değerlerden başlanarak ısı akısı değeri değiştirilmiştir. Düşük ısı akılarında faz değişim bölgesi belirgin olarak görülmemektedir.

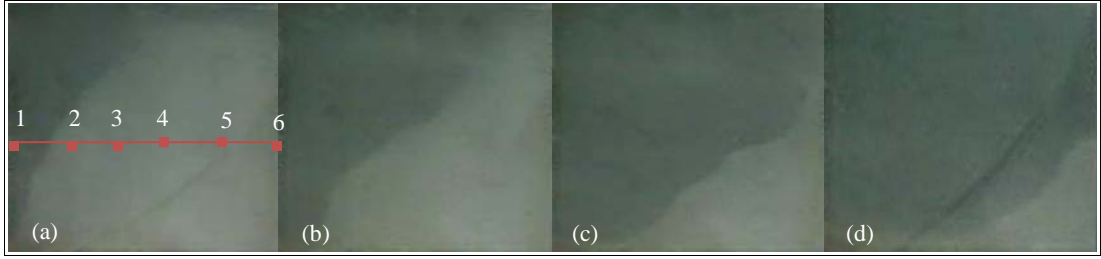


Resim 4.13. Altan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)
(a) 300dk (b) 600dk (c) 900dk (d) 1080dk

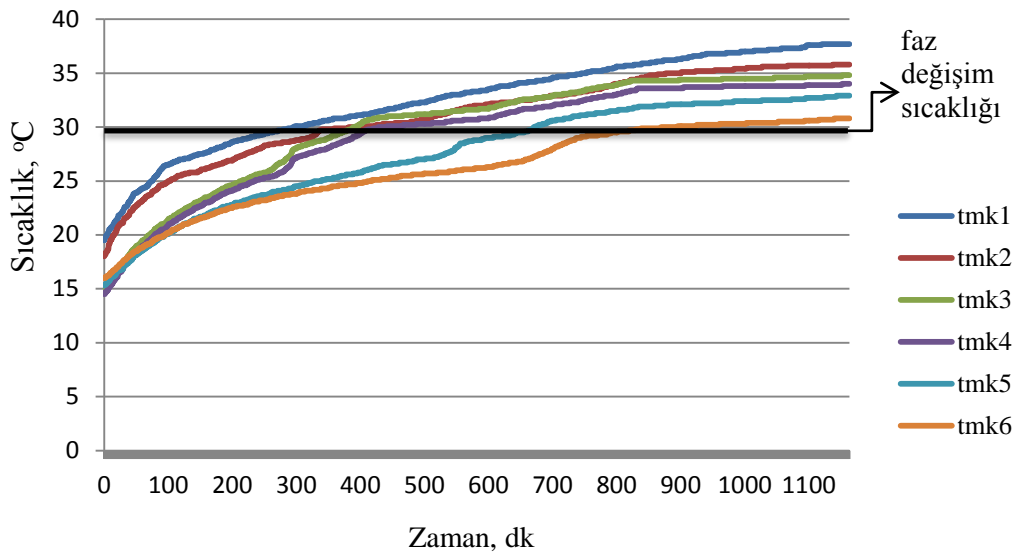


Şekil 4.13. Altan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.14'de verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.14'de verilmiştir. Yandan ısıtma konumunda $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ için $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamının erimelediği, 1460dk sonra yaklaşık %87'sinin eridiği görülmektedir. Deneysel bulgular bu zaman adımından sonra ısı transfer hızının oldukça yavaşladığını ve neredeyse sıfıra yaklaştığını göstermektedir. Resim 4.13'de görüldüğü gibi 600dk sonra alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın %55'i erirken yandan ısıtma konumunda aynı zaman adımında yaklaşık %42.5'i erimektedir. Yandan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın yaklaşık %50'si 720 dk erimektedir.

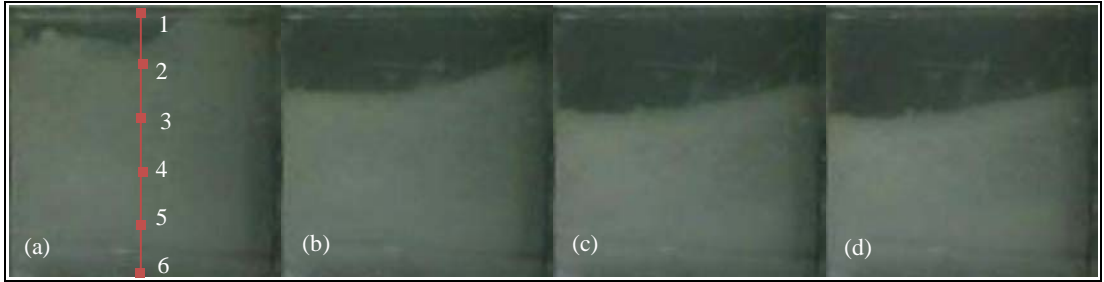


Resim 4.14. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)
(a) 360dk (b) 720dk (c) 1080dk (d) 1460dk

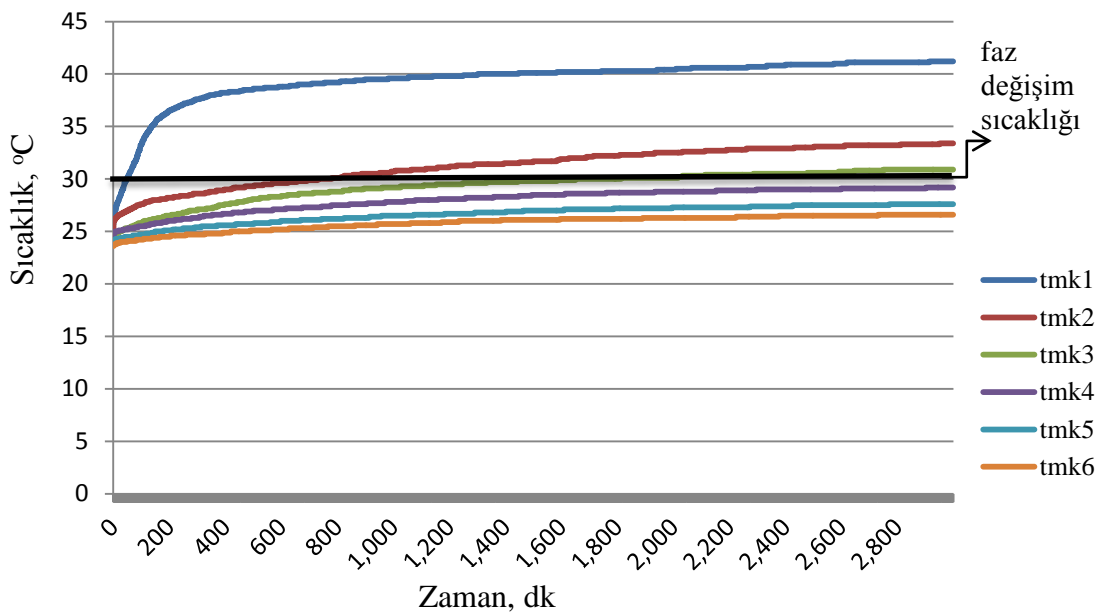


Şekil 4.14. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı Resim 4.15'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.15'de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. 600dk sonunda alttan ısıtmada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın %55'i, yandan ısıtmada %42'si ve üstten ısıtmada %28'i erimektedir. Zaman adımlarının artmasıyla bu farkta artmakta ve üstten ısıtmada ısı transfer hızı neredeyse sıfır olmaktadır. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı 240dk da %6.5, 480dk da %22.5, 720dk da %25'i erirken 1260. dk dan sonra erime oranı maksimum %40 olmaktadır.

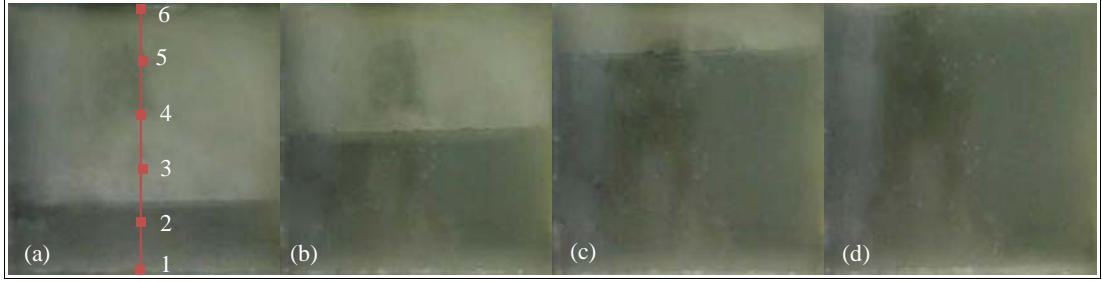


Resim 4.15. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)
(a) 240dk (b) 480dk (c) 720dk (d) 1260dk

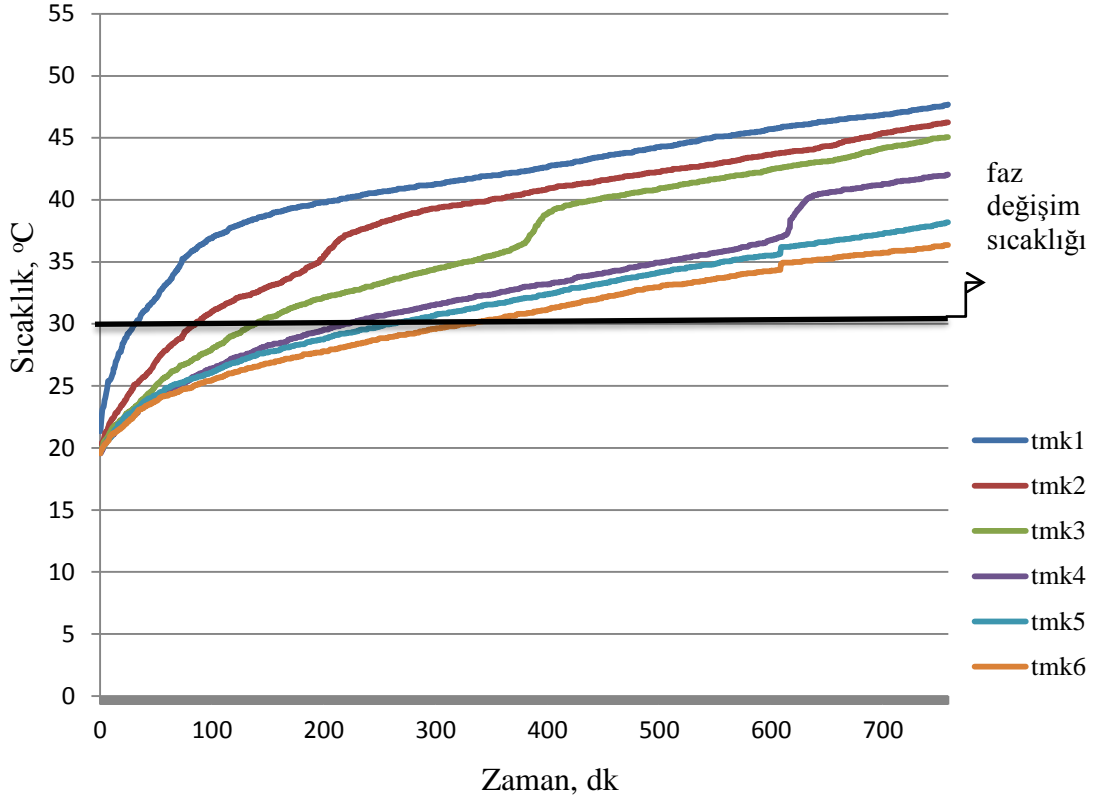


Şekil 4.15. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.16'da verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamı 720dk da erimektedir. 180dk da %25, 360dk da %48 ve 540dk da %78'i erimektedir.

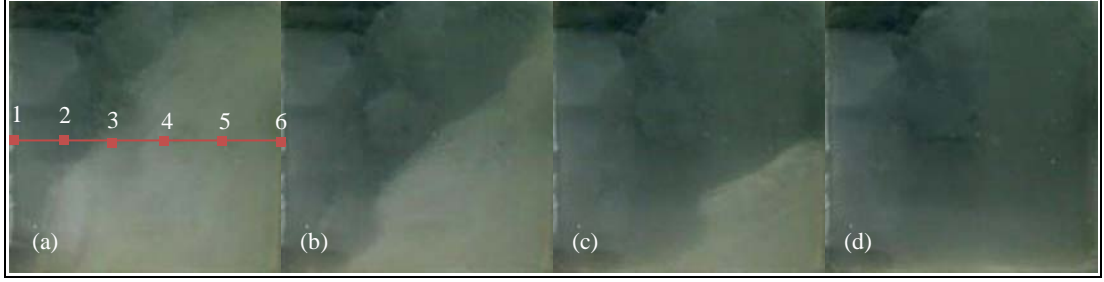


Resim 4.16. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 180dk (b) 360dk (c) 540dk (d) 720dk

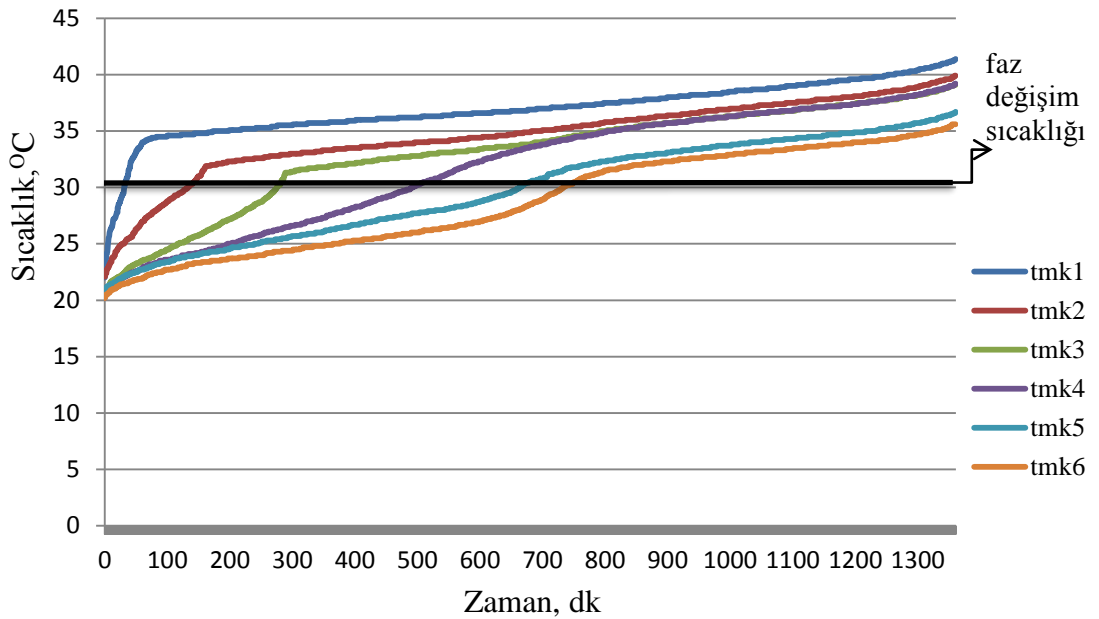


Şekil 4.16. Alttan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.17'de verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir. Yandan ısıtma konumunda $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ için $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamının 840dk da eridiği görülmektedir. Resim 4.16'da görüldüğü gibi 360dk sonra alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın %48'i erirken yandan ısıtma konumunda aynı zaman adımıyla yaklaşık %40'ı erimektedir. Yandan ısıtma konumunda 240dk sonunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın yaklaşık %22, 420dk sonunda %48, 660dk sonunda %75'i erimektedir.

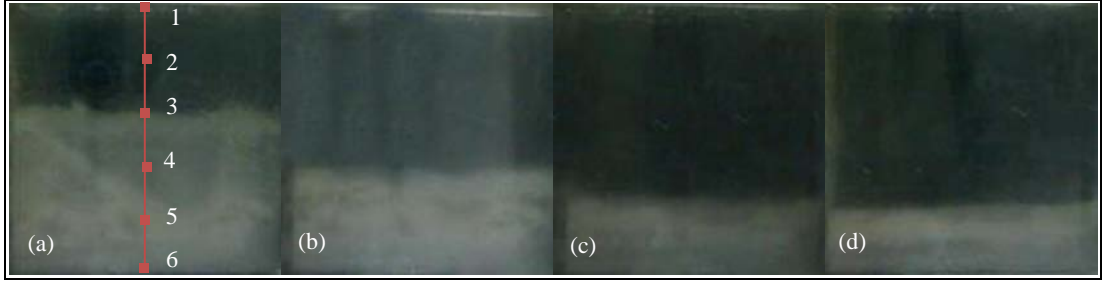


Resim 4.17. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 240dk (b) 420dk (c) 660dk (d) 840dk

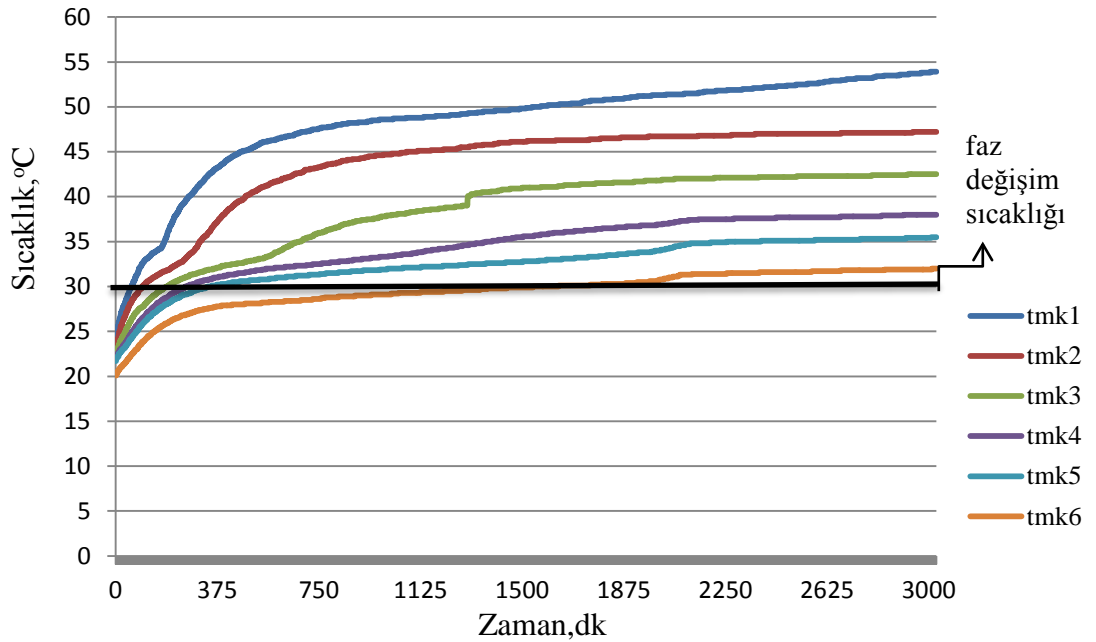


Şekil 4.17. Yandan ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı Resim 4.18'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.18'de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. 600dk sonunda alttan ısıtmada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın %83'ü, yandan ısıtmada %70'i ve üstten ısıtmada %60'ı erimektedir. Zaman adımlarının artmasıyla bu farkta artmakta ve üstten ısıtmada ısı transfer hızı neredeyse sıfır olmaktadır. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın 1020. dk dan sonra erime oranı maksimum %75 olmaktadır.



Resim 4.18. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin erime oranları ($\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 300dk (b) 600dk (c) 900dk (d) 1020dk



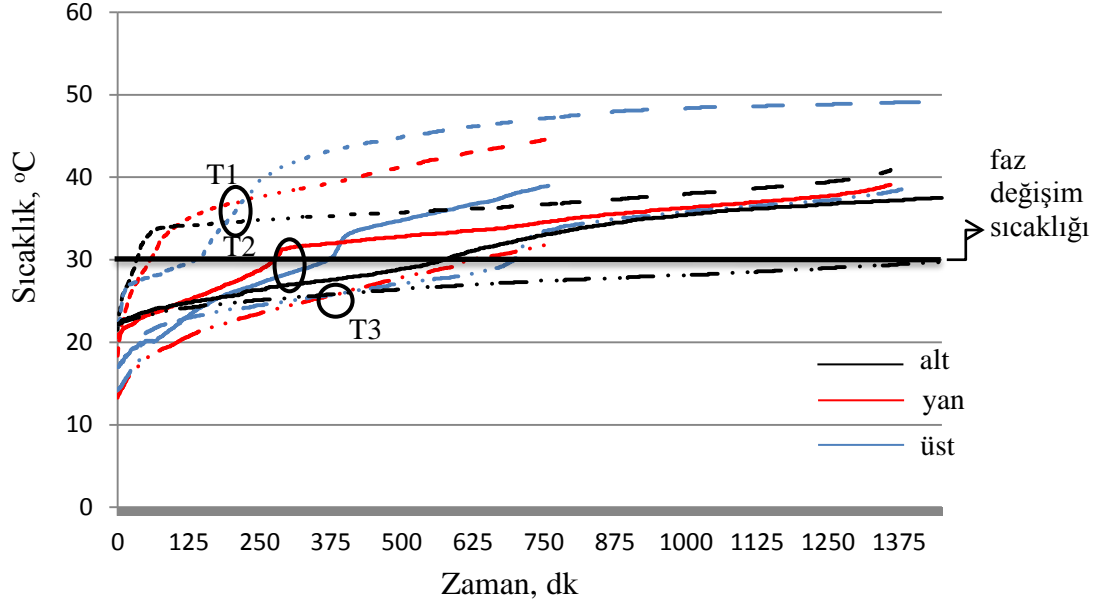
Şekil 4.18. Üstten ısıtma konumunda FDM'nin sıcaklık dağılımı ($\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)

Alttan, yandan ve üstten ısıtma konumları için erime oranlarının karşılaştırması Resim 4.19’da daha detaylı görülmektedir.



Resim 4.19. Isıtma konumunun etkisi ($\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$, 480dk)

Resim 4.19’da $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ’ın 480 dk sonundaki erime oranları görülmektedir. Görüldüğü üzere farklı ısıtma konumlarında FDM’nin erime oranları da farklı olmaktadır. FDM’nin $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$ ’lik sabit ısı akısında 480dk sonunda alttan ısıtma konumunda yaklaşık %63.5’i, yandan ısıtma konumunda yaklaşık %55’i, üstten ısıtma konumunda yaklaşık %50’si erimektedir. Gerçekte resimler faz değişiminde, ısıtma konumu ile faz değiştirme hızı arasındaki ilişkinin fiziksel açıklamasını vermektedir. Yapılan deneyler ve gözlemler faz değiştirme hızı üzerinde doğal taşınım yoluyla ısı transferinin önemli oranda etkili olduğunu göstermektedir. Alttan ısıtma durumunda ısıtıcı yüzeyi boyunca faz değişimi gerçekleşmektedir ve sıvı fazdaki parafinde gözle görülür şekilde sirkülasyon oluşmaktadır. Yandan ısıtma durumunda faz değiştirme hacmi Resim 4.19’daki gibi oluşmaktadır. İlk olarak faz değiştirme hızı bütün ısıtıcı yüzeyinde yaklaşık eşit olmaktadır. Kısa bir süre sonra sıvılaştıran FDM yukarı doğru hareketlenmekte ve faz değiştirme hızı üst bölgelerde artarken alt bölgelerde azalmaktadır. Üstten ısıtmada ise alttan ısıtma durumunda görülen faz değiştirme şeklinin simetrisi gözlenmektedir. İlk zaman adımlarında erime hızı alttan ısıtmaya göre daha belirgin olsa da kısa bir süre sonra faz değiştirme hızı logaritmik olarak azalmaktadır. Isı akısı arttırılsa bile erime hacmi bir miktar artmakta ancak belirli bir zaman adımından sonra tekrar azalmakta ve erime bölgelerinde sirkülasyon görülmemektedir.

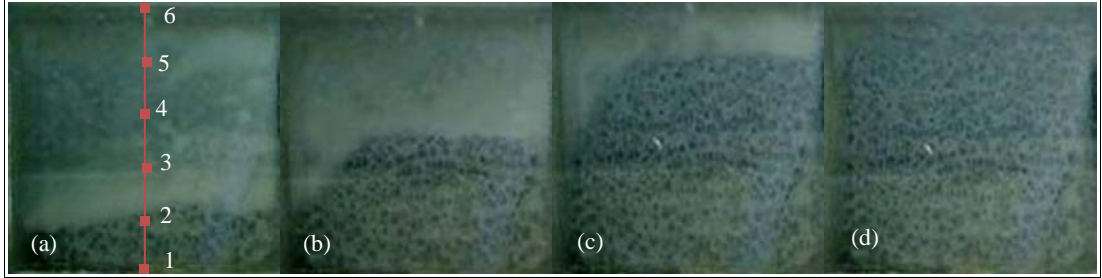


Şekil 4.19. Isıtma konumunun sıcaklık dağılımına etkisi ($\dot{q}=1310\text{W/m}^2$)

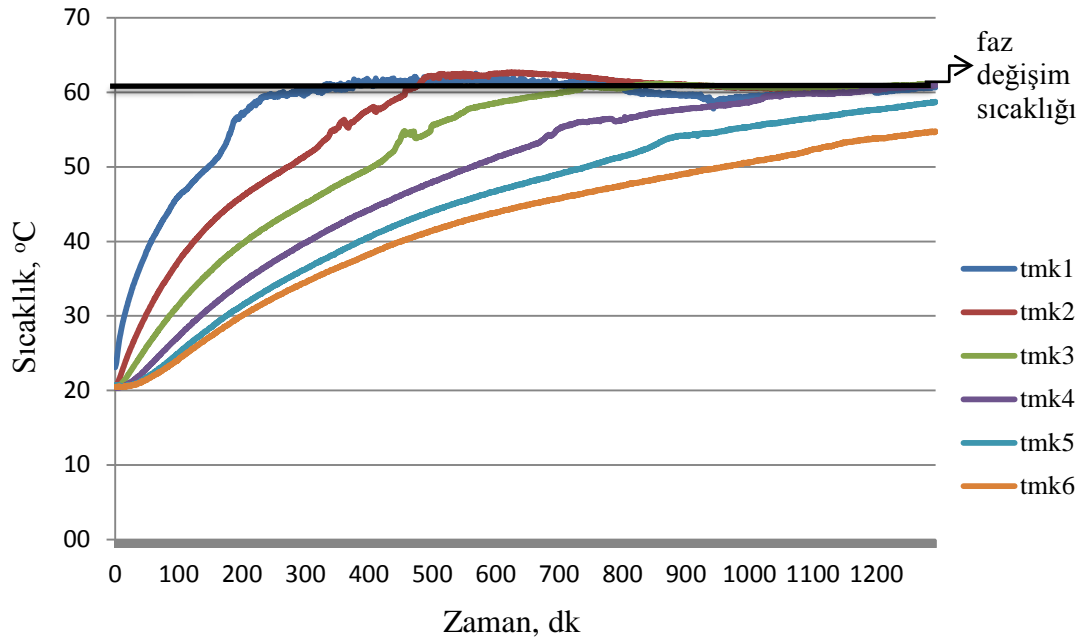
Şekil 4.19'da $\dot{q}=1310\text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan, yandan ve üstten ısıtma konumlarında $x/L=0$ (T1), $x/L=0.4$ (T3) ve $x/L=0.8$ (T5) noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü üzere $\dot{q}=1310\text{ W/m}^2$ için bütün zaman adımlarında T1 sıcaklığı üstten ısıtma şartlarında daha yüksektir. Faz değiştirme sıcaklığına yaklaştıkça yandan ve alttan ısıtma şartlarına bağlı olarak sıcaklık artışı hızlanmaktadır. Üsten ısıtma şartlarında, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık değişim hızı azalmaktadır. Dolayısıyla faz değişimi daha geç olmaktadır. Ayrıca alttan ve yandan ısıtma konumu için faz değişim aralığı belirgin olarak görülürken, üstten ısıtmada faz değişim aralığı görülmemektedir. Bu durum faz değiştirme hızı ile sıcaklık artışının yok denecek kadar düşük olduğunu göstermektedir.

4.3. Gözenekli Ortamlarda Parafin'in Erime Davranışı

$\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.20'de verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.20'de verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin tamamı 1200dk da erirken, 300dk da %13, 600dk da %48 ve 900dk da %74'ü erimektedir.

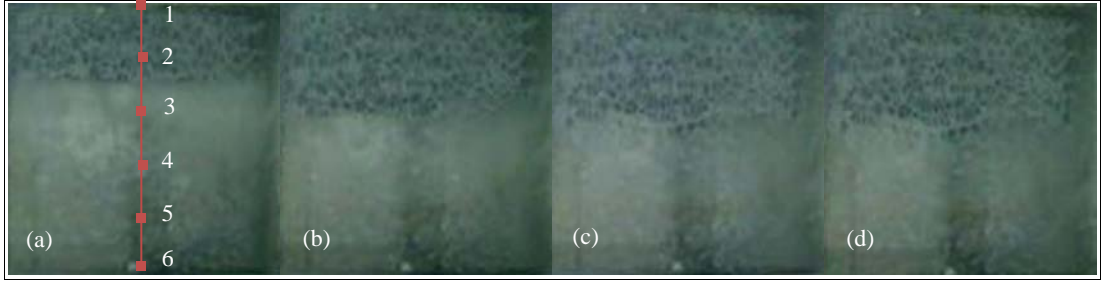


Resim 4.20. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)
(a) 300dk (b) 600dk (c) 900dk (d) 1200dk

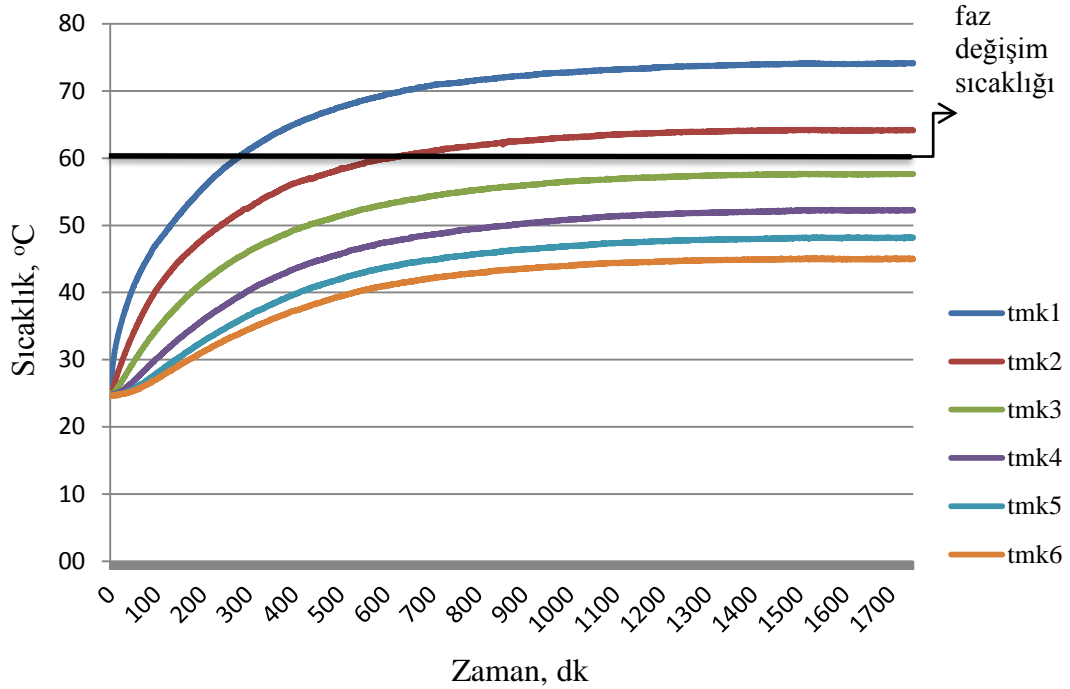


Şekil 4.20. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için metal köpük takviyeli parafinin erime oranı Resim 4.22'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.22'de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda parafinin erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. 480dk sonunda alttan ısıtmada parafinin %39'u, yandan ısıtmada %26'sı ve üstten ısıtmada %22'si erimektedir. Zaman adımlarının artmasıyla bu fark artmakta ve üstten ısıtmada erime hızı neredeyse sıfır olmaktadır.

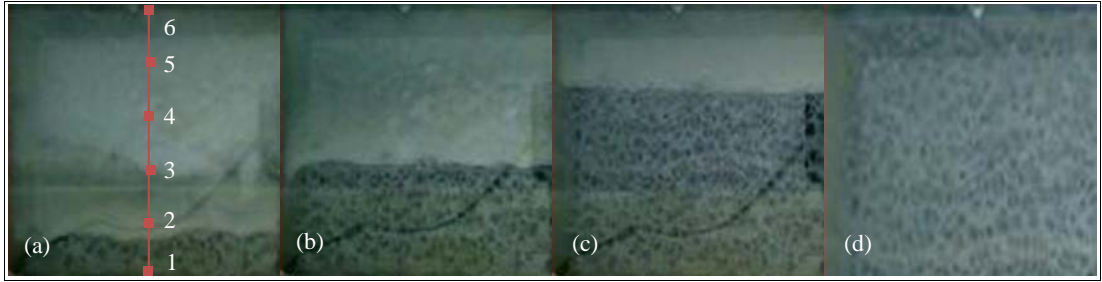


Resim 4.22. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)
(a) 480dk (b) 960dk (c) 1440dk (d) 1920dk

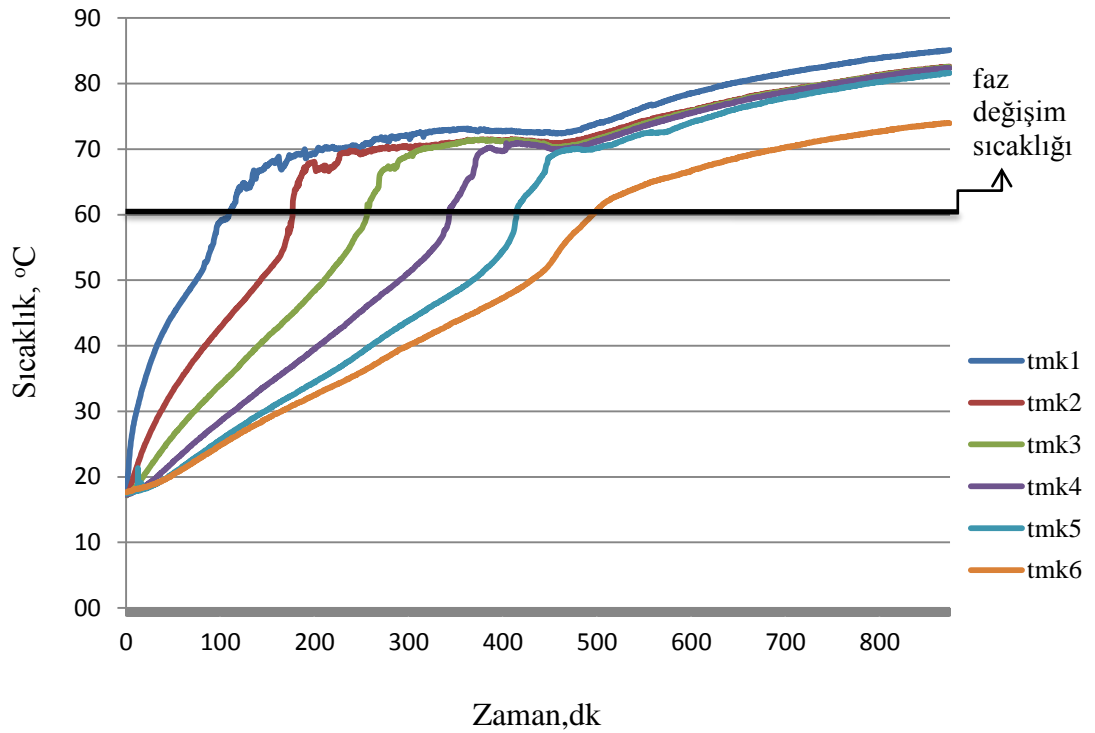


Şekil 4.22. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.23'de verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.23'de verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin tamamı 480dk da erirken, 120dk da %18, 240dk da %44 ve 360dk da %68'i erimektedir.

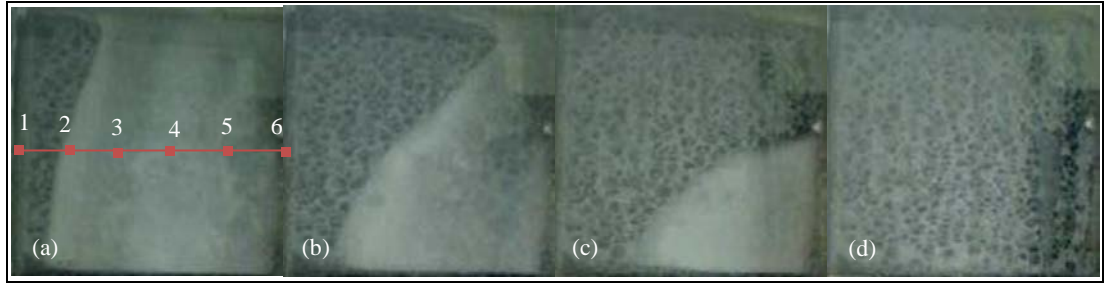


Resim 4.23. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)
(a) 120dk (b) 240dk (c) 360dk (d) 480dk

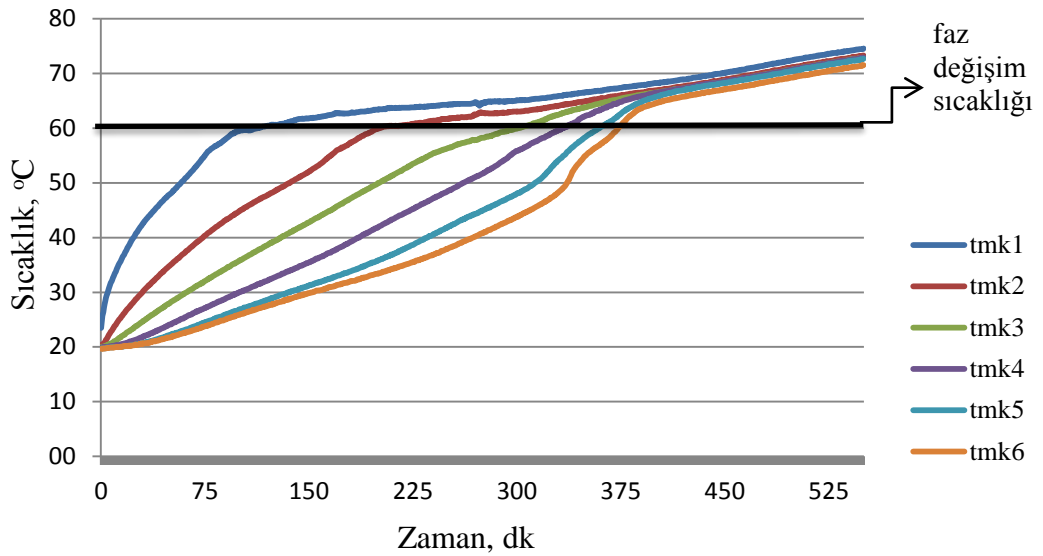


Şekil 4.23. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.24’de verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında ve yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin erime hızı alttan ısıtma ile yaklaşık olarak aynıdır. Çünkü her iki ısıtma konumunda da metal köpük varlığından dolayı doğal taşınım etkisi söz konusu değildir. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.24’de verilmiştir. Resim 4.23’de görüldüğü gibi 360dk sonra alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin %68’i erirken yandan ısıtma konumunda da aynı zaman adımıyla yaklaşık %70’i erimektedir. $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ ısı akısında metal köpük takviyeli parafinin 120dk da %17, 240dk da %45, 360dk da %70’i erirken tamamının erimesi 540dk da gerçekleşmektedir.

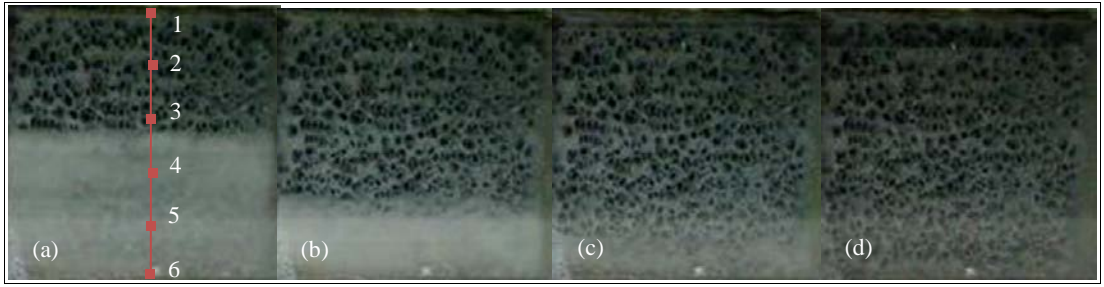


Resim 4.24. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)
(a) 120dk (b) 240dk (c) 360dk (d) 540dk

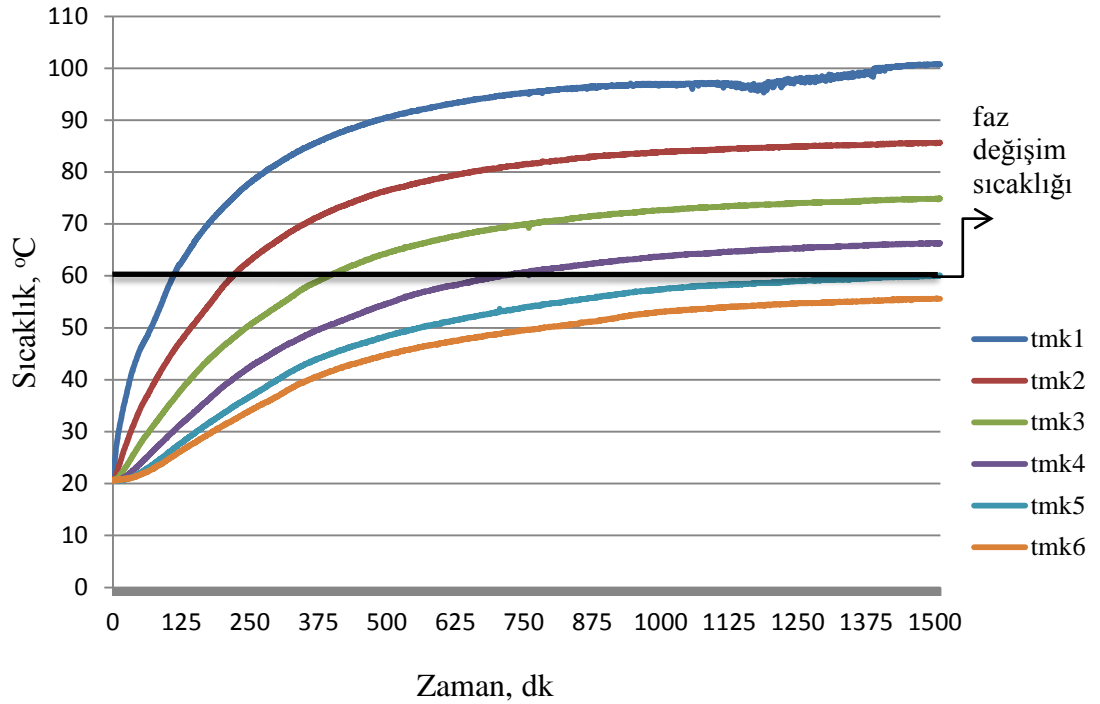


Şekil 4.24. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için metal köpük takviyeli parafinin erime oranı Resim 4.25'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.25'de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda parafinin erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra oldukça yavaşladığı görülmektedir. 300dk sonunda alttan ısıtmada metal köpük takviyeli parafinin %57'si, yandan ısıtmada %56,5'i ve üstten ısıtmada %40'ı erimektedir.

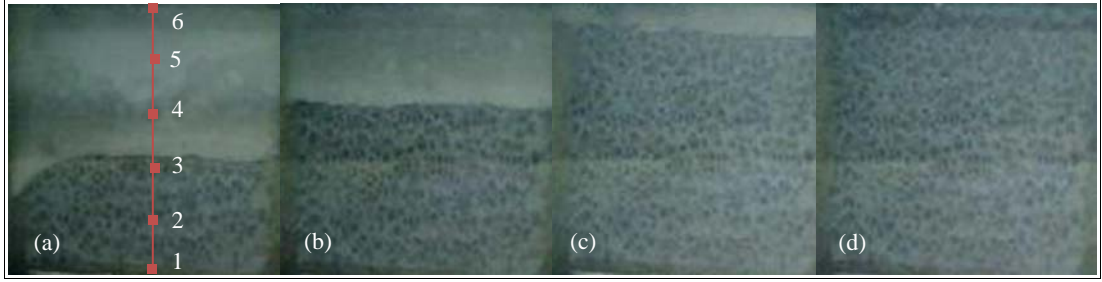


Resim 4.25. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)
(a) 360dk (b) 720dk (c) 1080dk (d) 1440dk

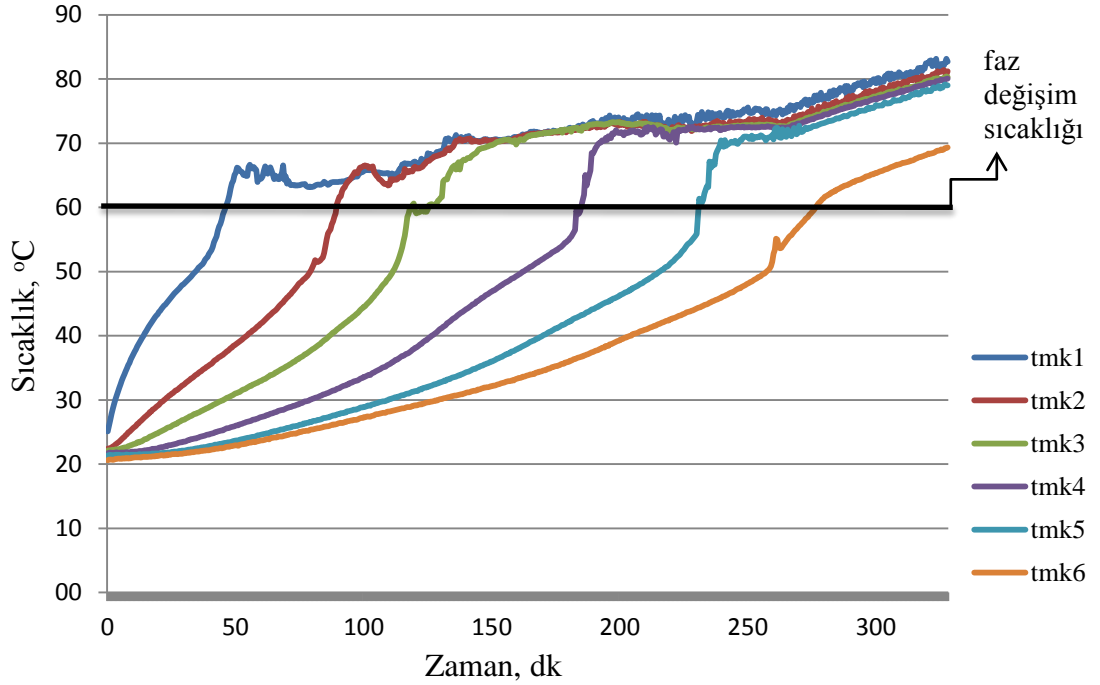


Şekil 4.25. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.26'da verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.26'da verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin tamamı 300dk da erirken, 120dk da %43, 180dk da %65 ve 240dk da %90'ı erimektedir.

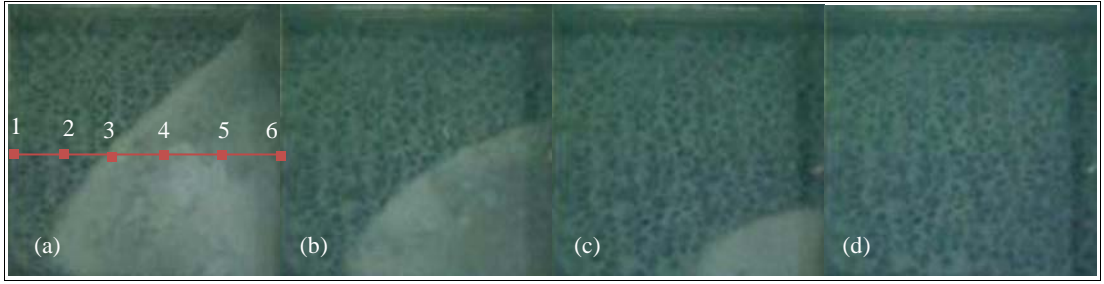


Resim 4.26. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$) (a) 120dk (b) 180dk (c) 240dk (d) 300dk

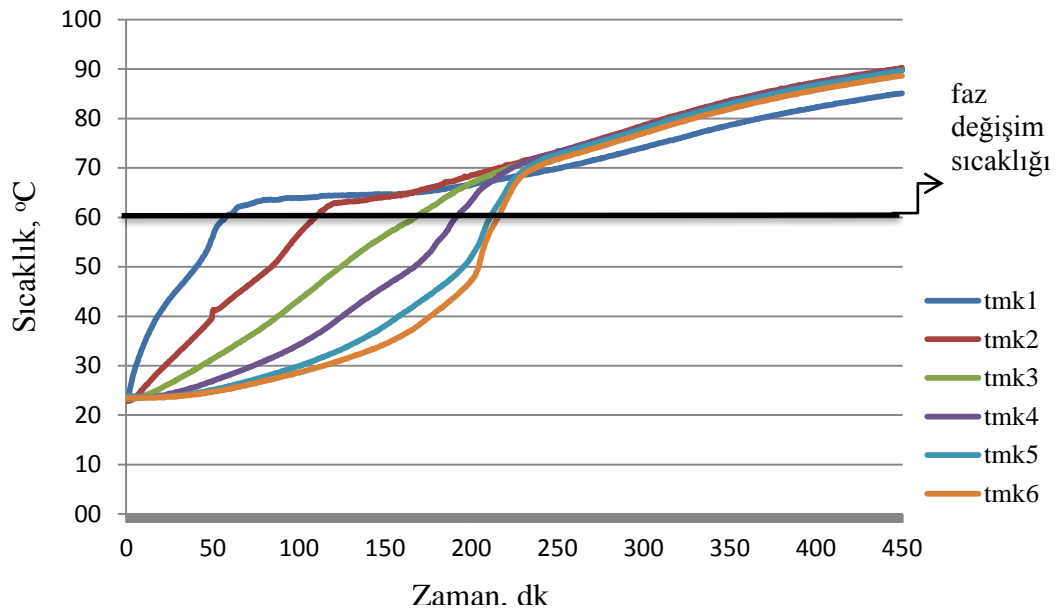


Şekil 4.26. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.27’de verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında ve yandan ısıtma konumunda metal takviyeli parafinin erime hızı alttan ısıtma ile yaklaşık olarak aynıdır. Çünkü her iki ısıtma konumunda da metal köpük varlığından dolayı doğal taşınım etkisi söz konusu değildir. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.27’de verilmiştir. Resim 4.26’da görüldüğü gibi 240dk sonra alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin %90’ı erirken, yandan ısıtma konumunda da aynı zaman adımında yaklaşık %88’i erimektedir. $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli parafinin tamamı 300dk da erimektedir.

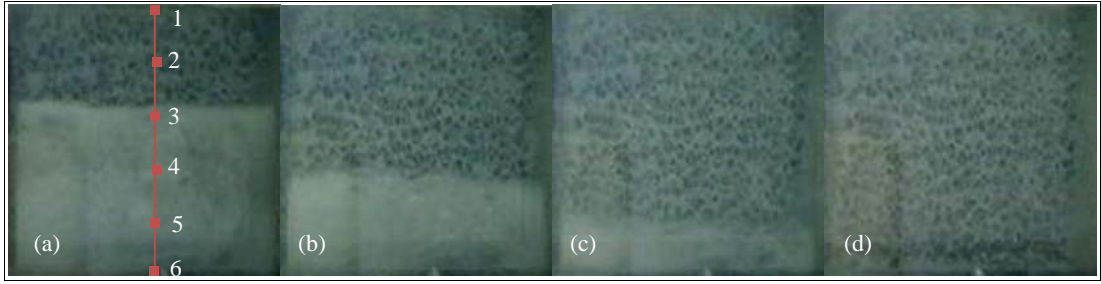


Resim 4.27. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)
(a) 120dk (b) 180dk (c) 240dk (d) 300dk

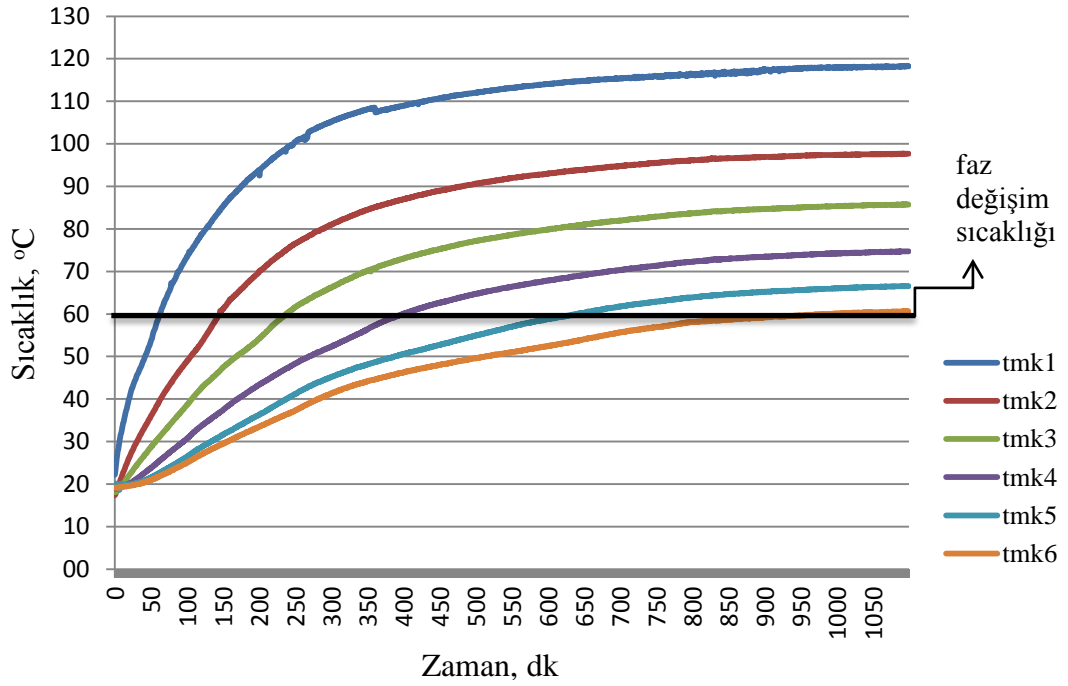


Şekil 4.27. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)

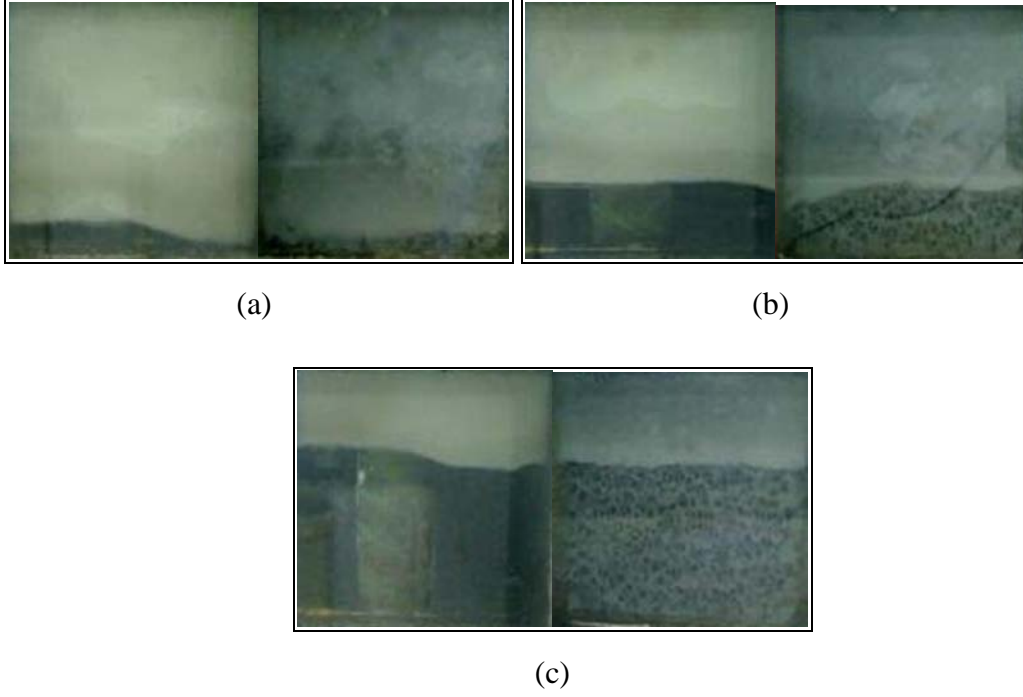
$\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için metal köpük takviyeli parafinin erime oranı Resim 4.28'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.28'de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda parafinin erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra oldukça yavaşladığı görülmektedir. 180dk sonunda alttan ısıtmada metal köpük takviyeli parafinin %65'i, yandan ısıtmada %66'sı ve üstten ısıtmada %39'u erimektedir.



Resim 4.28. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+köpük, $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)
(a) 180dk (b) 360dk (c) 540dk (d) 720dk

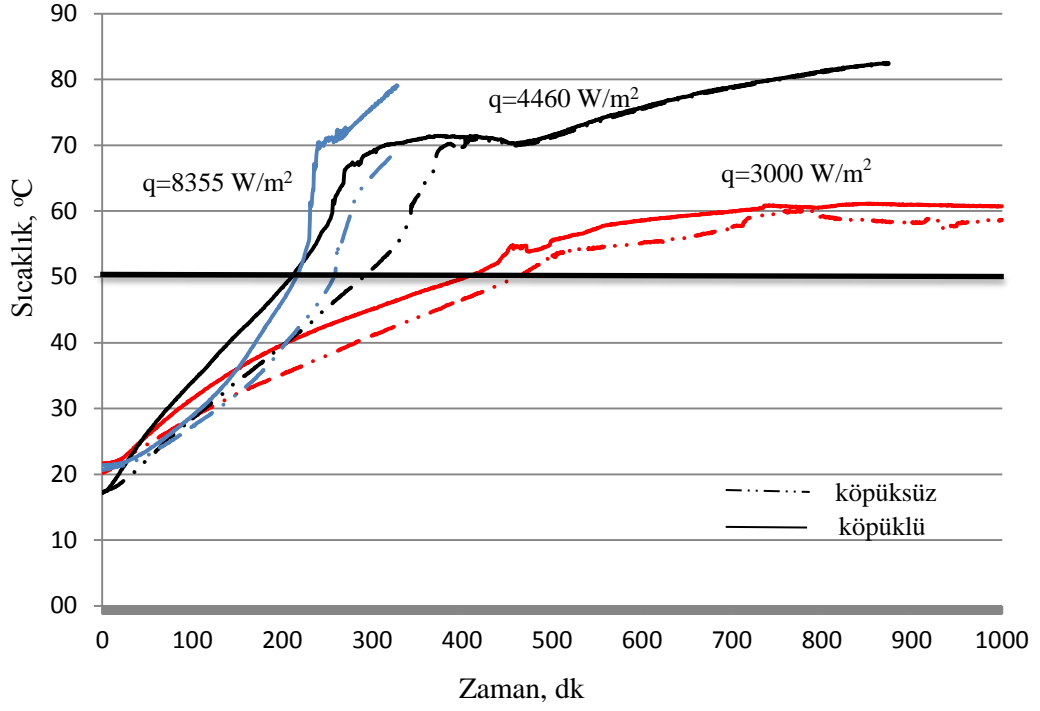


Şekil 4.28. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+köpük, $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$)



Resim 4.29. Alttan ısıtma konumunda 180dk sonunda kıyaslama
 (a) $\dot{q}=3000 \text{ W/m}^2$ (b) $\dot{q}=4460 \text{ W/m}^2$ (c) $\dot{q}=8355 \text{ W/m}^2$

Resim 4.29'dan üç farklı sabit ısı akısında alttan ısıtma konumunda 180dk sonunda erime oranlarını kıyaslırsak köpüksüz ve köpüklü duruma FDM'nin erime hızlarının yaklaşık aynı olduğu görülebilir. FDM içerisindeki faz değişim sürecini iki faktör domine eder; iletim ve doğal taşınım. İletim ağırlıklı rejimlerde sıcaklık dağılımı ısı kaynağından itibaren tabakalaşma eğilimindeyken, taşınım ağırlıklı rejimlerde termal enerji depolama için daha avantajlı olan üniform bir sıcaklık dağılımı söz konusudur. Saf FDM'de katı-sıvı faz değişimi esnasında gizli ısı depolanması doğal taşınım ağırlıklı gerçekleşir. Deneysel çalışmalar, alttan ısıtma durumunda ısıtıcı yüzeyi boyunca faz değişimi gerçekleştiğini ve sıvı fazdaki saf parafinde gözle görülür şekilde doğal taşınım sirkülasyonu oluştuğunu göstermiştir. Ancak FDM'ye yapılan metal köpük takviyesi doğal taşınımdan kaynaklanan ısı transferini gözenekli yapısı nedeniyle ortadan kaldırır. Bundan dolayı özellikle alttan ısıtma konumunda köpük takviyesi yapılan FDM'nin ısı iletim hızı artmakta iken erime oranında köpüksüz duruma göre fazla bir artış olmamaktadır.

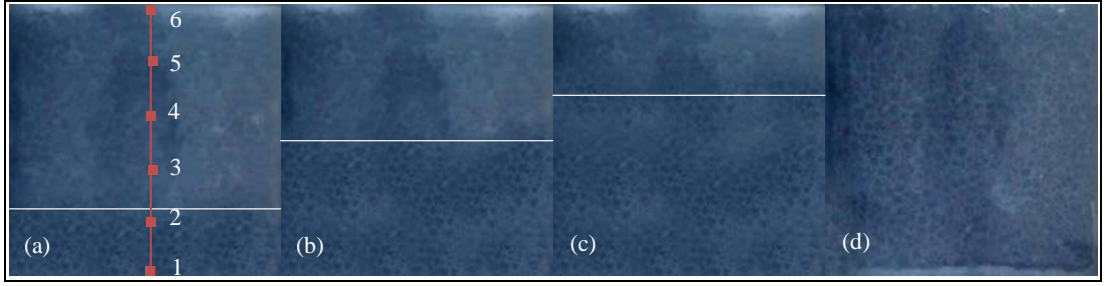


Şekil 4.29. Farklı ısı akılarında alttan ısıtma konumunda $x/L=0.4$ (T3) noktasındaki sıcaklık dağılımı

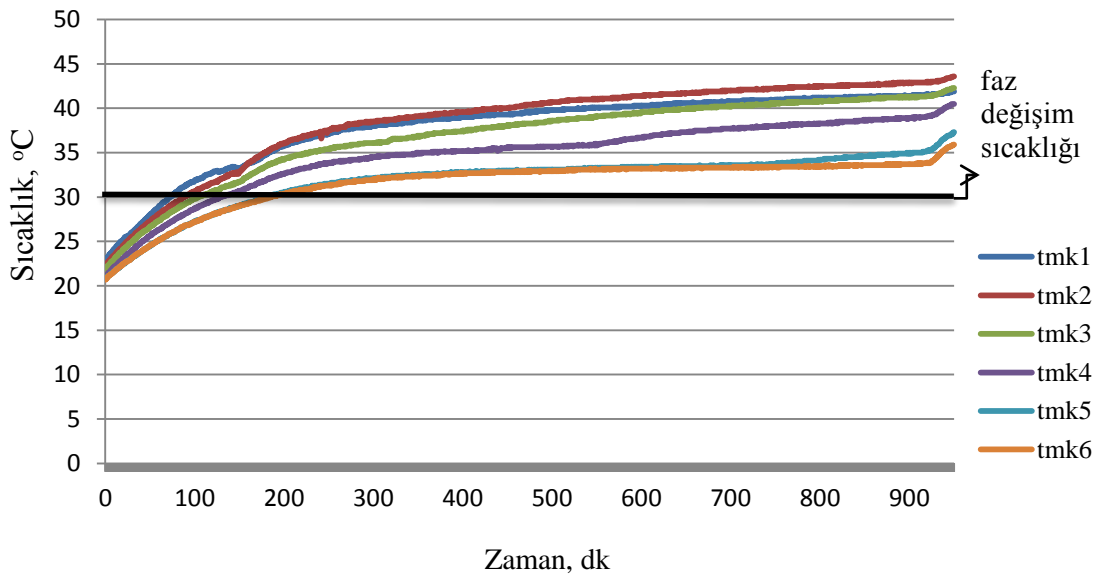
Resim 4.29 ve Şekil 4.29'dan üç farklı sabit ısı akısında, alttan ısıtma konumunda ve $x/L=0.4$ (T3) noktasındaki erime oranı ve sıcaklık dağılımı incelendiğinde köpük takviyeli FDM içerisinde ısı iletiminin köpüksüz duruma göre daha hızlı olduğu görülmüştür. Saf FDM'nin alttan ısıtma konumundaki erime davranışında doğal taşınım etkin bir parametredir. Ancak FDM içerisine takviye edilmiş metal köpük malzemeler gözenekli yapıları nedeniyle sıvı FDM içerisindeki doğal taşınıma engel olmaktadır. Bundan dolayı ısı iletimi köpük takviyeli FDM içerisinde daha hızlı olmaktadır. Erime oranları yaklaşık olarak eşit kalmaktadır.

4.4. Gözenekli Ortamlarda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın Erime Davranışı

Almanya'daki m-pore firmasından temin edilen ve fiziksel özellikleri Bölüm 3.1 de verilen 10PPI ve 20PPI alüminyum açık gözenekli metal köpükler FDM'nin ısı iletkenliğini iyileştirmek amaçlı kullanılmıştır. $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.30'de verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.30'da verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda 10PPI alüminyum köpük takviyeli parafinin tamamı 960dk da erirken, 240dk da %20, 480dk da %50 ve 720dk da %73'ü erimektedir.

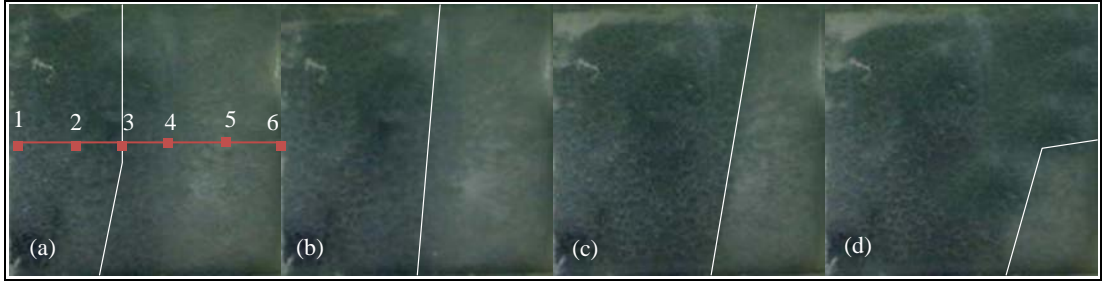


Resim 4.30. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $\dot{q}=700\text{W/m}^2$)
(a) 240dk (b) 480dk (c) 720dk (d) 960dk

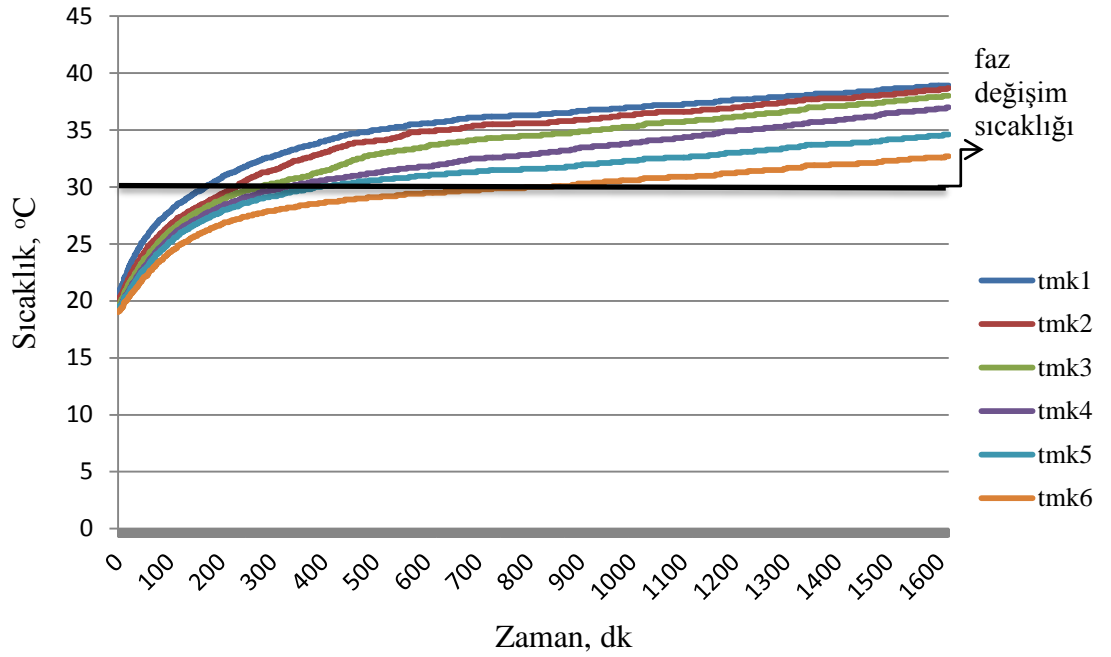


Şekil 4.30. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $\dot{q}=700\text{W/m}^2$)

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda 10PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.31'de verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.31'de verilmiştir. Resim 4.30'da görüldüğü gibi 960dk sonra alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamı erirken yandan ısıtma konumunda da aynı zaman adımında yaklaşık %75'i erimektedir.

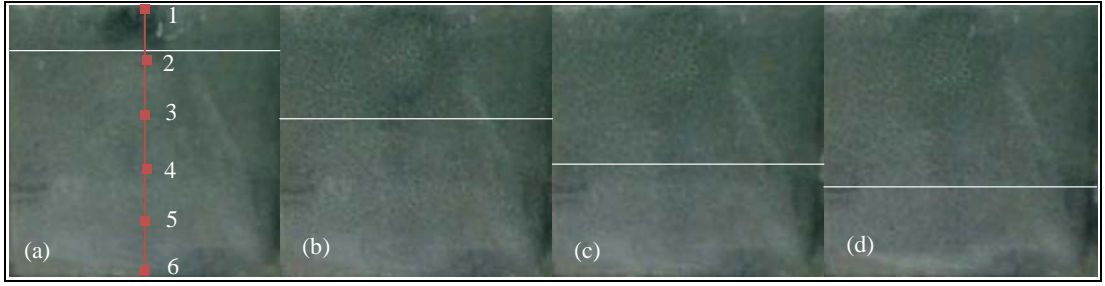


Resim 4.31. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $\dot{q}=700\text{W/m}^2$)
(a) 300dk (b) 600dk (c) 900dk (d) 1620dk

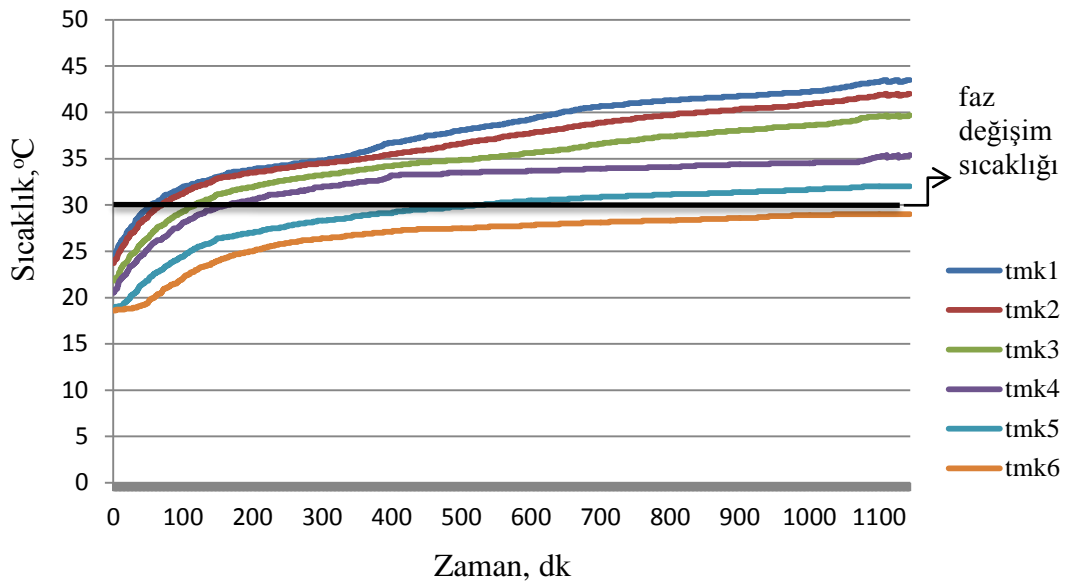


Şekil 4.31. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $\dot{q}=700\text{W/m}^2$)

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için 10PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı Resim 4.32'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.32'de görülmektedir. Deneysel bulgularda üstten ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızının alttan ve yandan ısıtma konumuna göre oldukça düşük olduğu, uygulanan ısı akısına göre belirli zaman adımlarından sonra oldukça yavaşladığı görülmektedir. 480dk sonunda alttan ısıtmada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın %50'si, yandan ısıtmada %47'si ve üstten ısıtmada %42'si erimektedir. 10PPI alüminyum köpük takviyeli dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM'nin 240dk sonunda yaklaşık %17,5'i, 480dk sonunda %42'si, 720dk sonunda %58'i erirken bundan sonraki süreçte ısı transfer hızı giderek azalmakta erime oranı 1140dk sonunda maksimum %66 olmaktadır.

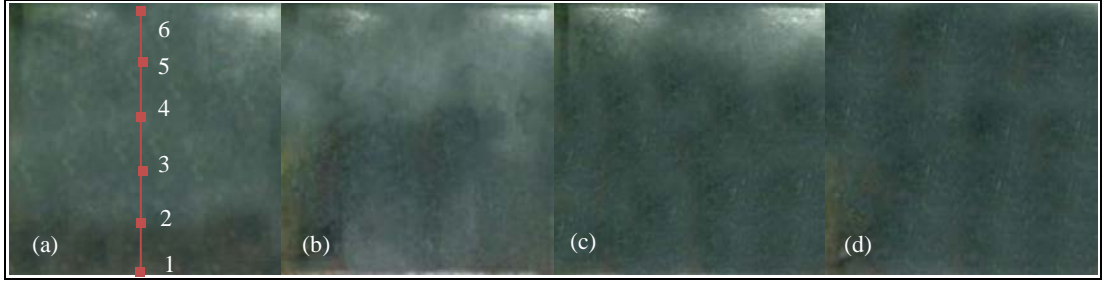


Resim 4.32. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)
(a) 240dk (b) 480dk (c) 720dk (d) 1140dk

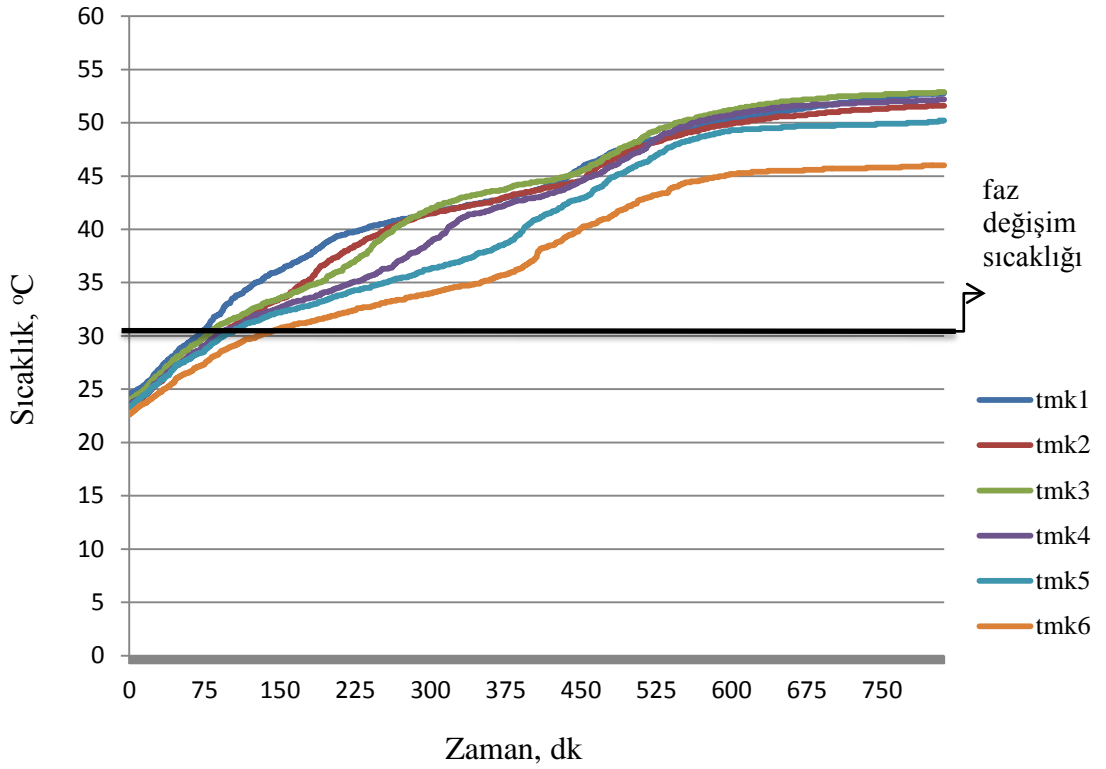


Şekil 4.32. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda 10PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.33'de verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.33'de verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda 10PPI alüminyum köpük takviyeli parafinin tamamı 540dk da erirken, 180dk da %27, 300dk da %56 ve 420dk da %80'i erimektedir.

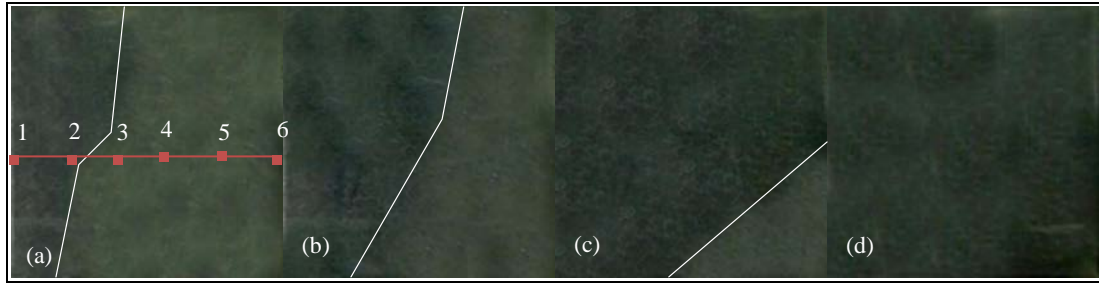


Resim 4.33. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+10PPI, $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$) (a) 180dk (b) 300dk (c) 420dk (d) 540dk

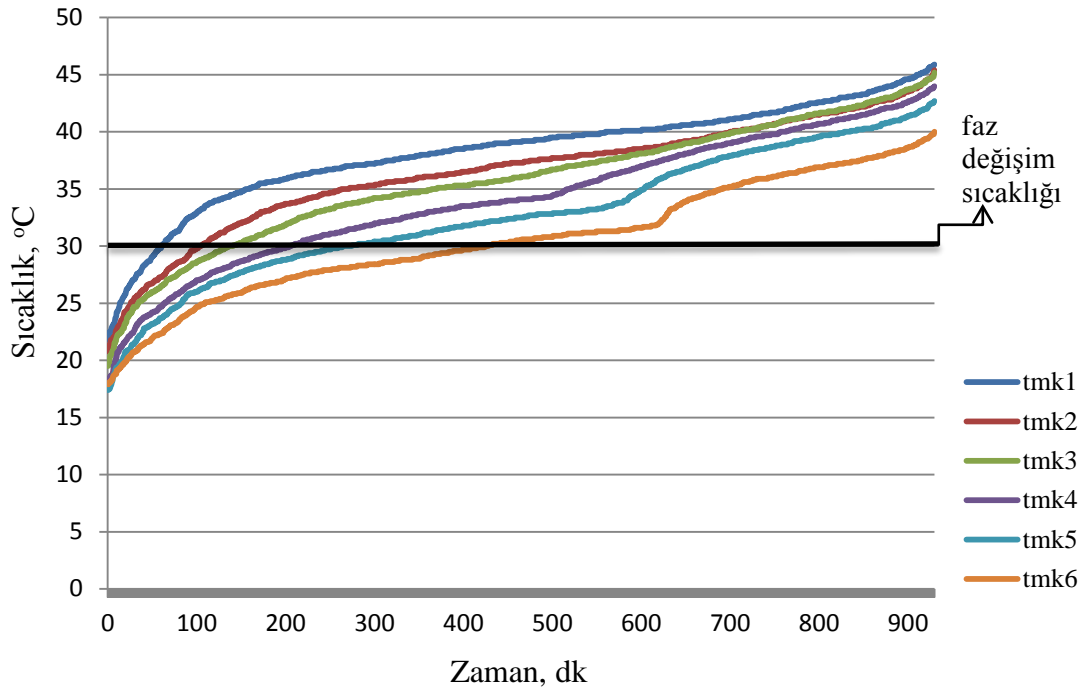


Şekil 4.33. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda 10PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.34'de verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.34'de verilmiştir. Resim 4.30'da görüldüğü gibi 540dk sonra alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamı erirken yandan ısıtma konumunda da 780dk sonunda erimektedir.

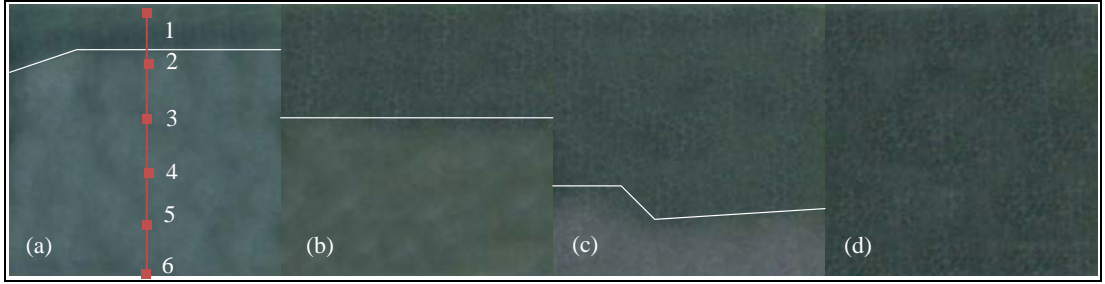


Resim 4.34. Yandan ısıtma konumunda erime oranları(FDM+10PPI, $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 240dk (b) 420dk (c) 600dk (d) 780dk

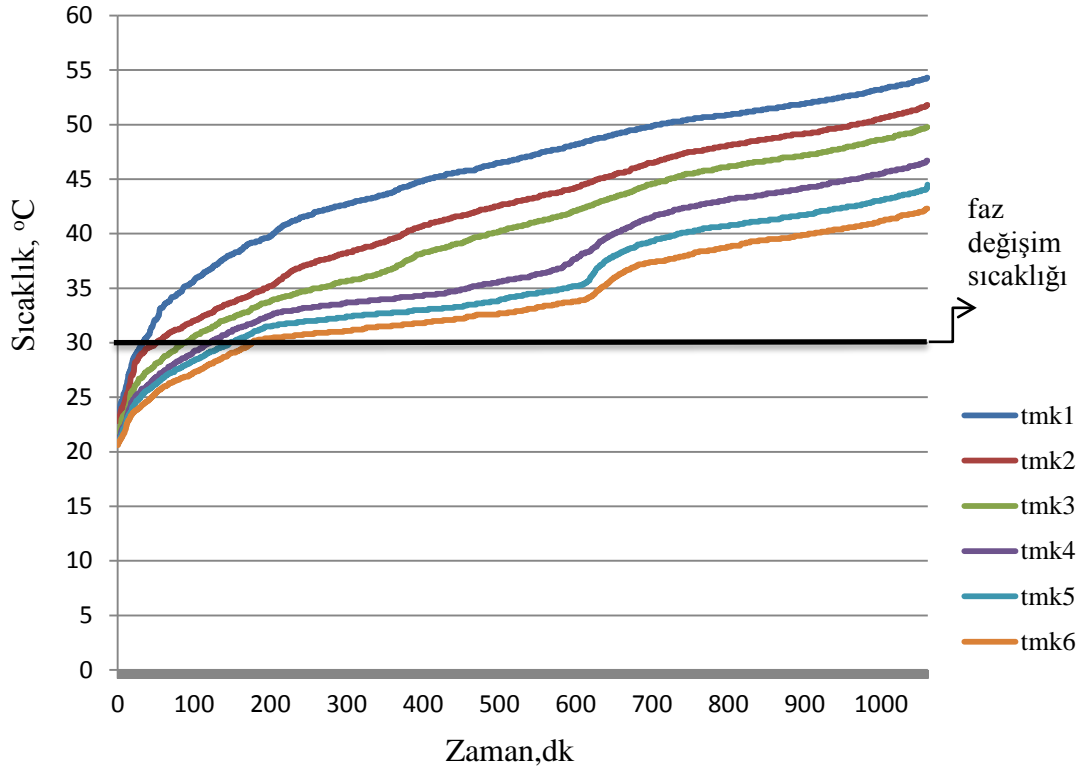


Şekil 4.34. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için 10PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı Resim 4.35'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.35'de görülmektedir. Deneysel bulgularda 10PPI alüminyum köpük takviyeli dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM'nin 180dk sonunda yaklaşık %16,25'i, 360dk sonunda %48,5'i, 540dk sonunda %80'i erirken tamamının 660dk da eridiği görülmektedir.

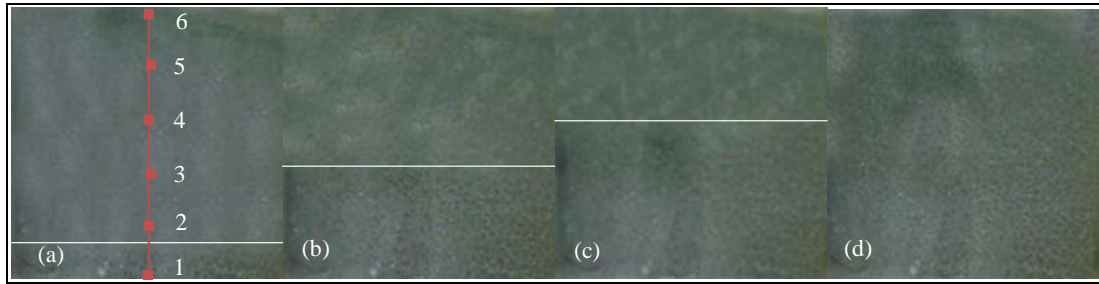


Resim 4.35. Üstten ısıtma konumunda erime oranları(FDM+10PPI, $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 180dk (b) 360dk (c) 540dk (d) 660dk

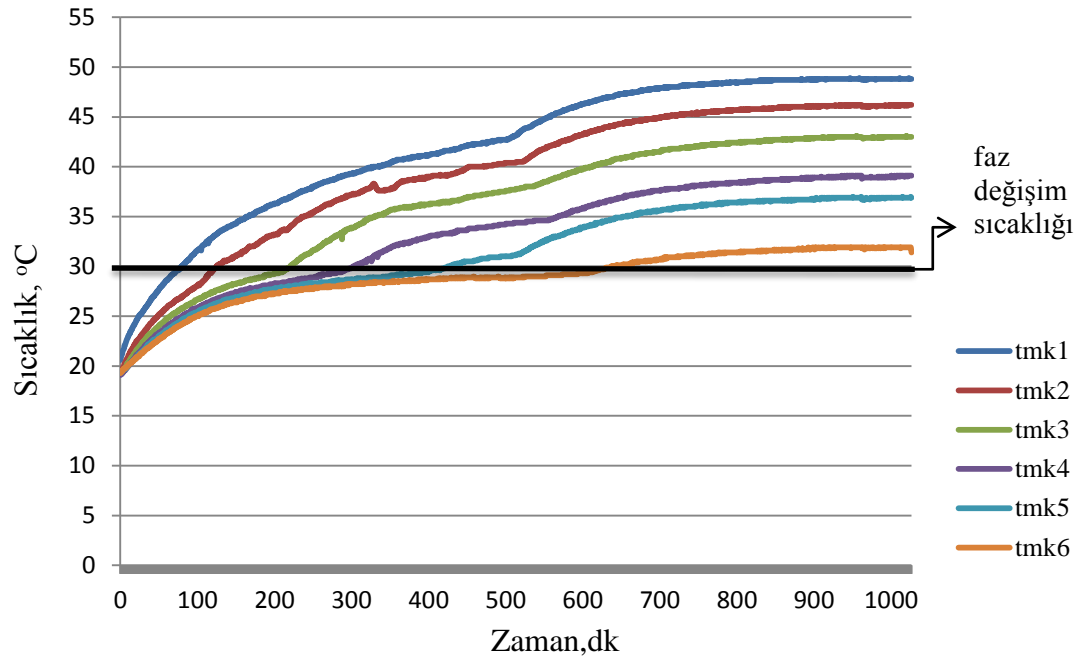


Şekil 4.35. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+10PPI, $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$)

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda 20PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.36'da verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.36'da verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda 20PPI alüminyum köpük takviyeli parafinin tamamı 1020dk da erirken, 240dk da %12, 480dk da %40 ve 720dk da %62'si erimektedir.

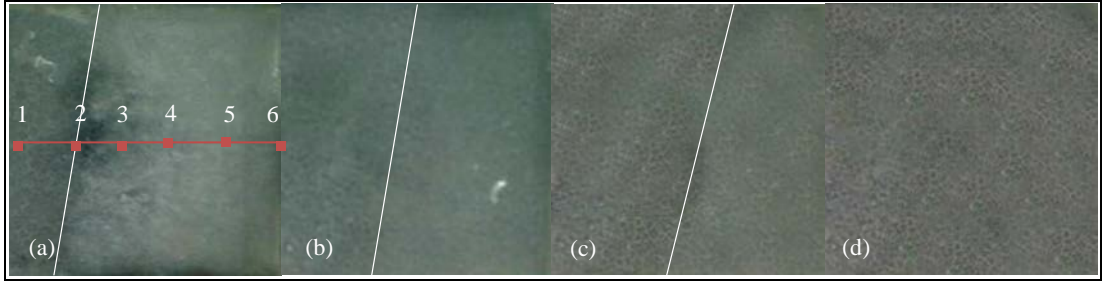


Resim 4.36. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)
(a) 240dk (b) 480dk (c) 720dk (d) 1020dk

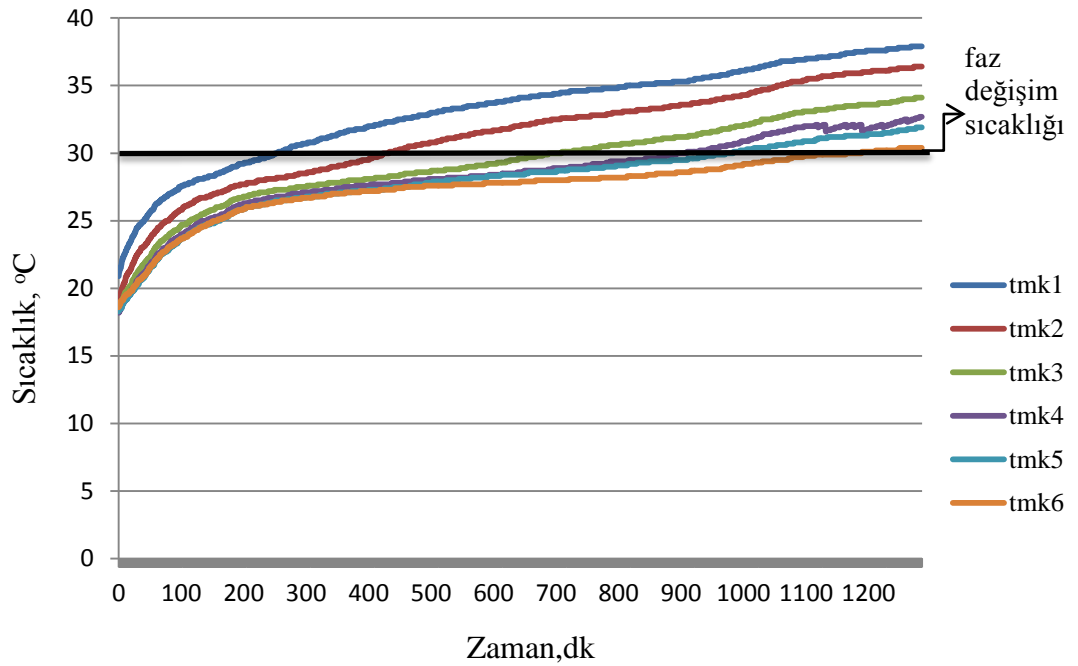


Şekil 4.36. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda 20PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.37'de verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.37'de verilmiştir. Resim 4.36'da görüldüğü gibi 1020dk sonra alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamı erirken yandan ısıtma konumunda da 1320dk sonunda erimektedir.

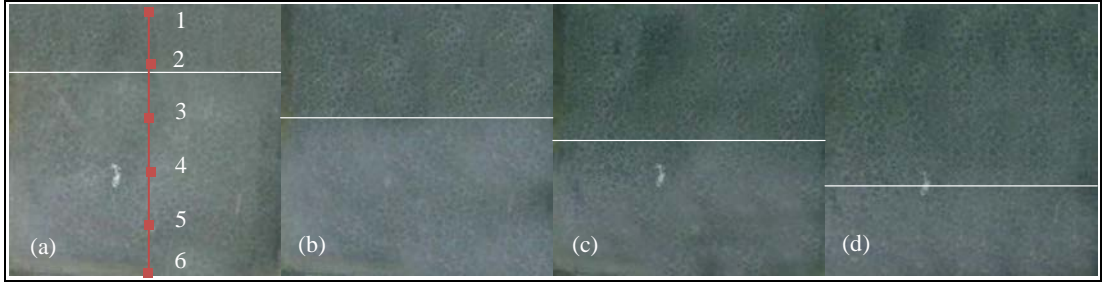


Resim 4.37. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)
(a) 300dk (b) 600dk (c) 900dk (d) 1320dk

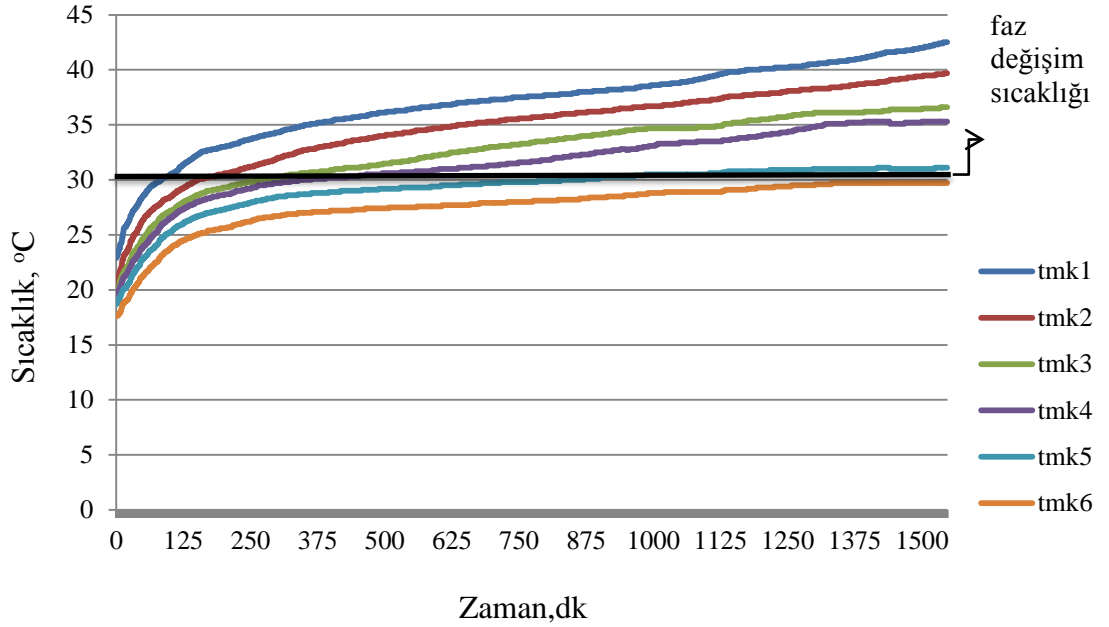


Şekil 4.37. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$)

$\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için 20PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı Resim 4.38'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.38'de görülmektedir. Deneysel bulgularda 20PPI alüminyum köpük takviyeli dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM'nin 240dk sonunda yaklaşık %20.5'i, 480dk sonunda %45'i, 720dk sonunda %60'ı erirken bundan sonraki süreçte ısı transfer hızı giderek azalmakta erime oranı 1260dk sonunda maksimum %75 olmaktadır.

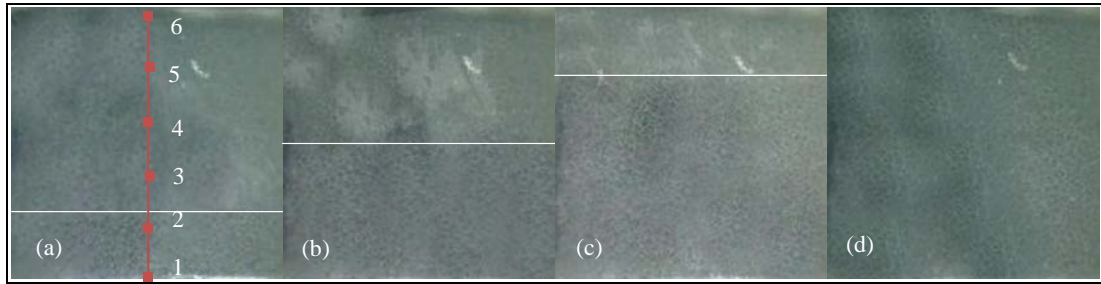


Resim 4.38. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $\dot{q}=700 \text{ W/m}^2$) (a) 240dk (b) 480dk (c) 720dk (d) 1260dk

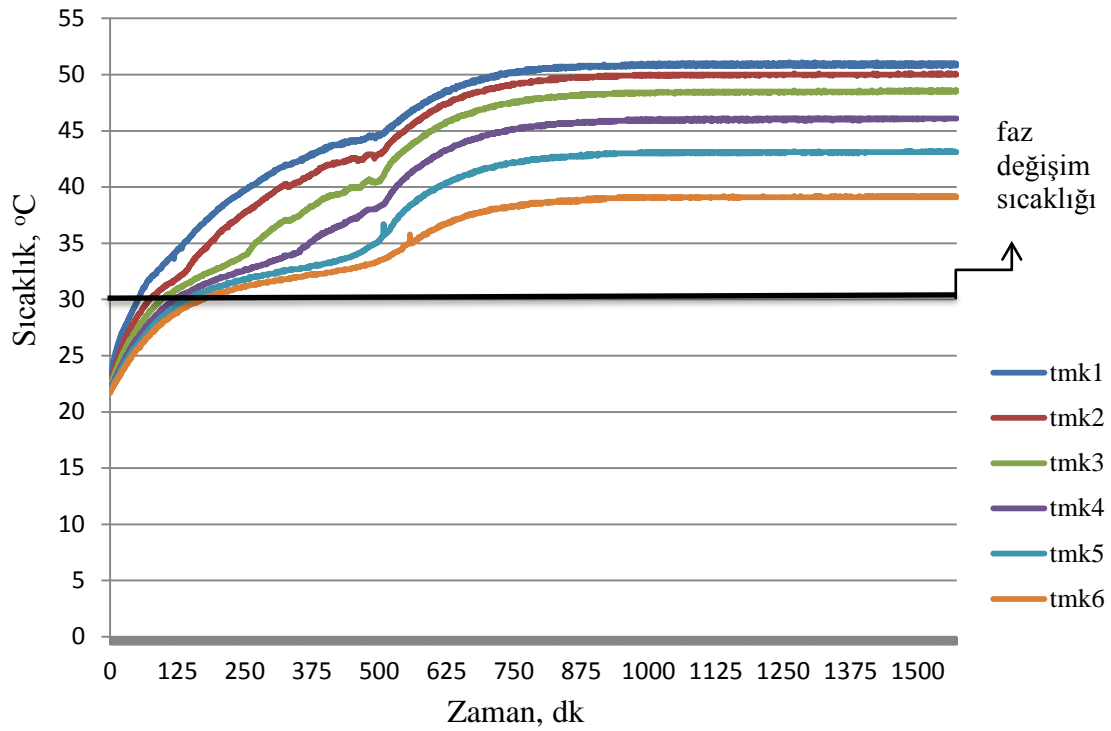


Şekil 4.38. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $\dot{q}=700\text{W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda 20PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.39'da verilmiştir. Aynı şartlar için farklı noktalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.39'da verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı için alttan ısıtma konumunda 20PPI alüminyum köpük takviyeli parafinin tamamı 540dk da erirken, 180dk da %25, 300dk da %53 ve 420dk da %75'i erimektedir.

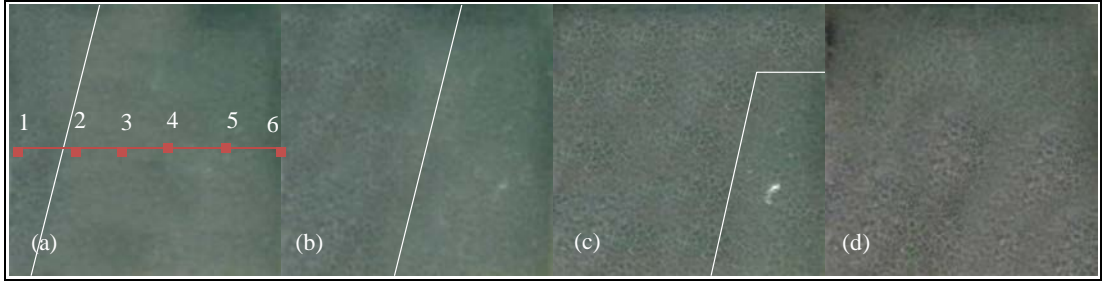


Resim 4.39. Alttan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 180dk (b) 300dk (c) 420dk (d) 540dk

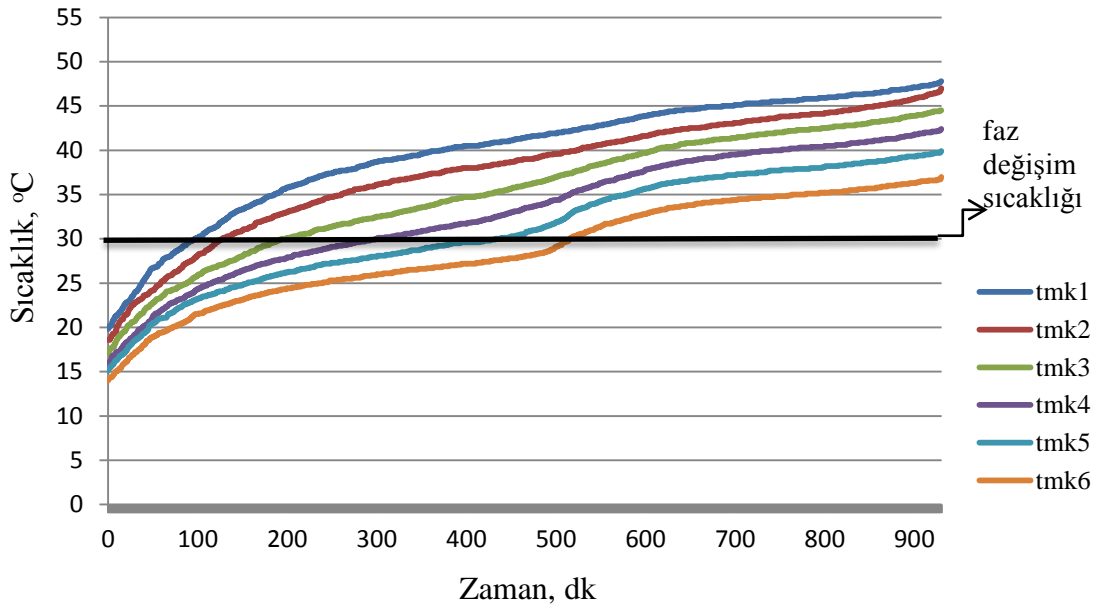


Şekil 4.39. Alttan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$)

$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda 20PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı farklı zaman adımları için Resim 4.40'da verilmiştir. Görüldüğü gibi yandan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime hızı alttan ısıtmaya göre daha yavaştır. Yandan ısıtma konumu için sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.40'da verilmiştir. Resim 4.39'da görüldüğü gibi 540dk sonra alttan ısıtma konumunda metal köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamı erirken yandan ısıtma konumunda da 780dk sonunda erimekte. Köpük takviyeli dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM'nin 180dk sonunda yaklaşık %12,5'i, 360dk sonunda %42'si, 540dk sonunda %72,5'i erimekte.

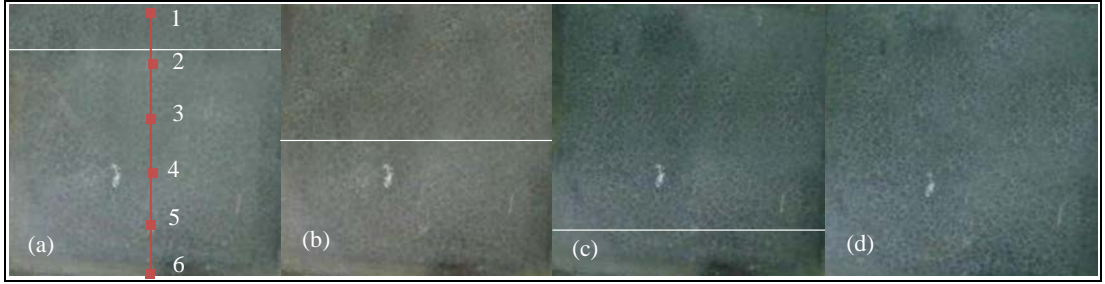


Resim 4.40. Yandan ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 180dk (b) 360dk (c) 540dk (d) 780dk

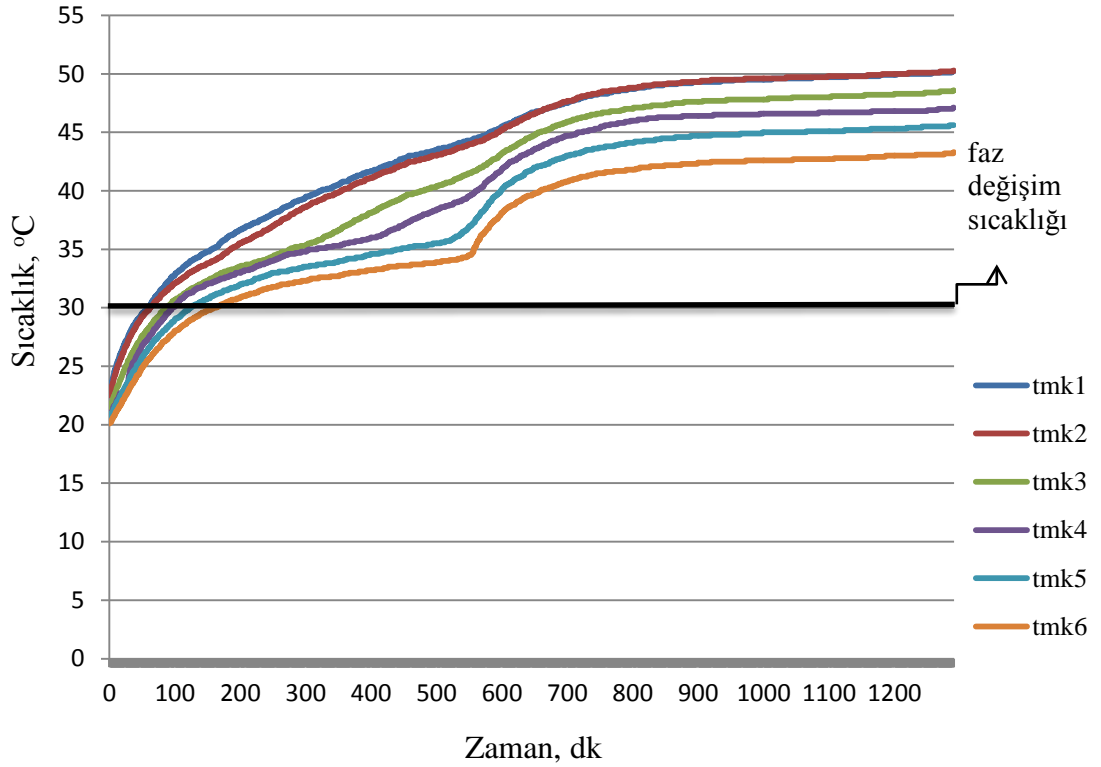


Şekil 4.40. Yandan ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)

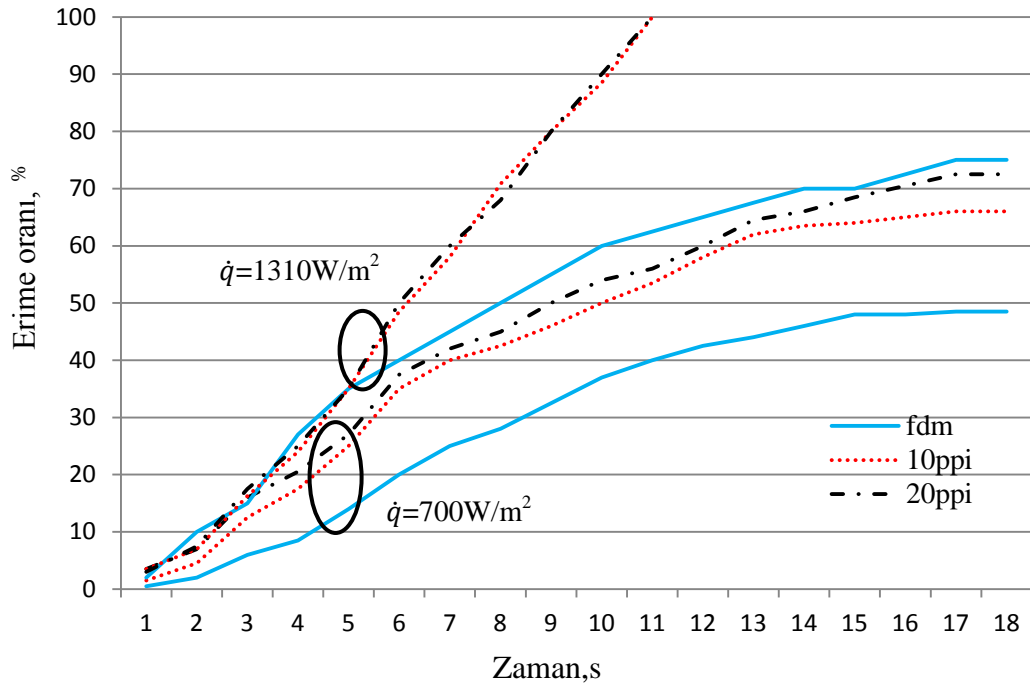
$\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumu için 20PPI alüminyum köpük takviyeli $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı Resim 4.41'de, sıcaklık değişimi ise Şekil 4.41'de görülmektedir. Deneysel bulgularda 20PPI alüminyum köpük takviyeli dikdörtgen boşluğa doldurulan FDM'nin 180dk sonunda yaklaşık %17,5'i, 360dk sonunda %50'si, 540dk sonunda %80'i erirken tamamının 660dk da eridiği görülmektedir.



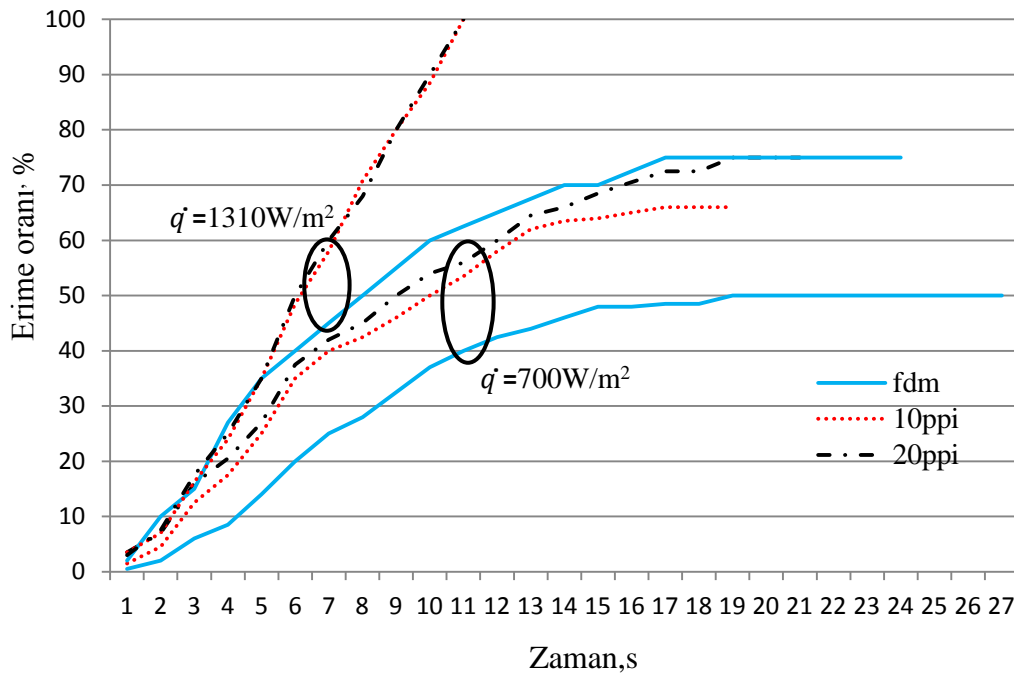
Resim 4.41. Üstten ısıtma konumunda erime oranları (FDM+20PPI, $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$)
(a) 180dk (b) 360dk (c) 540dk (d) 660dk



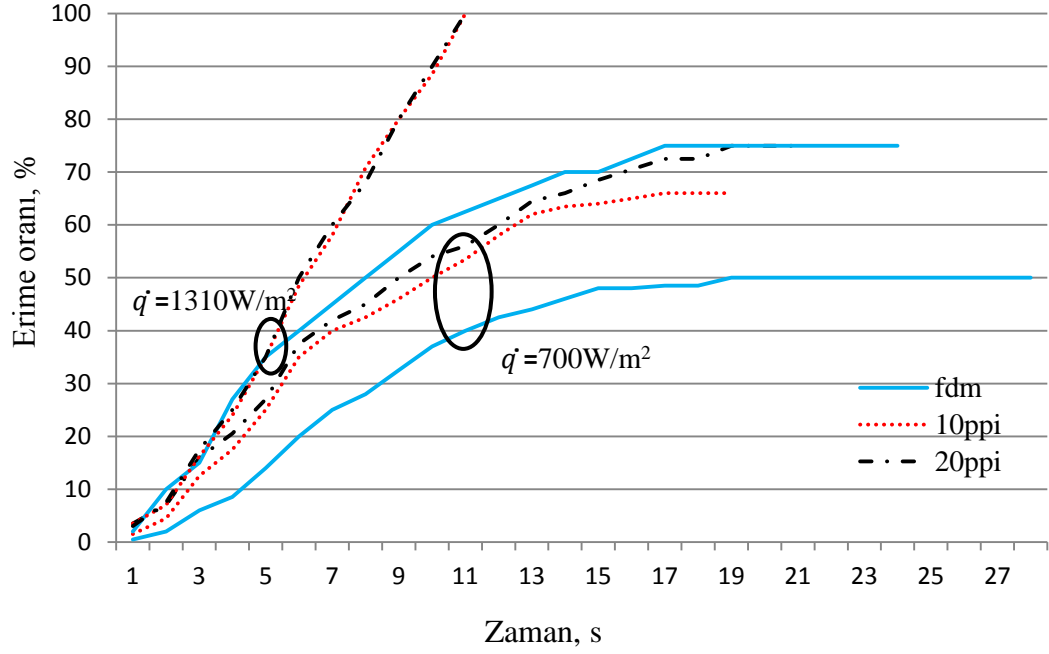
Şekil 4.41. Üstten ısıtma konumunda sıcaklık dağılımı (FDM+20PPI, $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$)



Şekil 4.42. Alttan ısıtma konumunda köpüklü ve köpüksüz durumun kıyaslaması



Şekil 4.43. Yandan ısıtma konumunda köpüklü ve köpüksüz durumun kıyaslaması

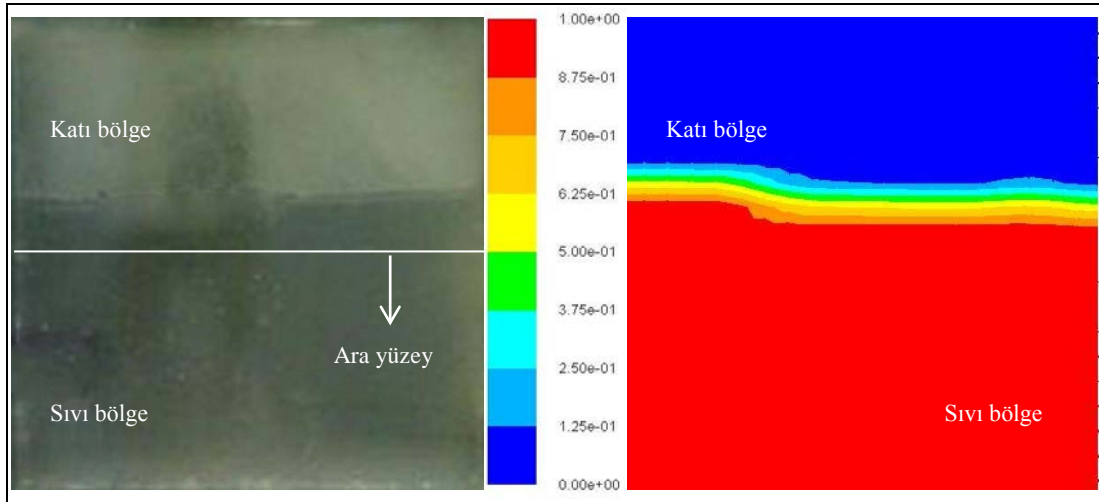


Şekil 4.44. Üstten ısıtma konumunda köpüklü ve köpüksüz durumun kıyaslaması

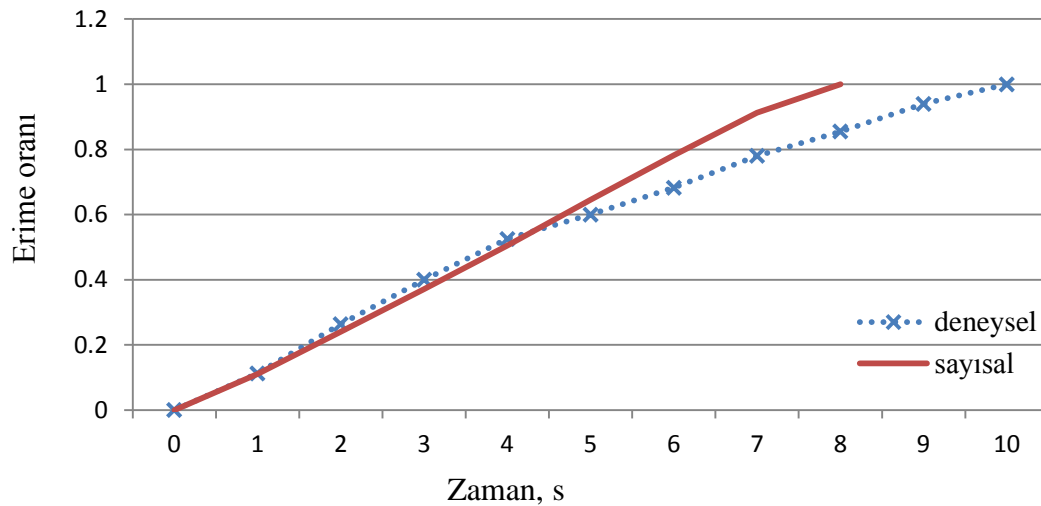
$\dot{q}=700\text{W/m}^2$ ve $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$ sabit ısı akısında, üç farklı ısıtma konumunda saf $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın 10PPI ve 20PPI açık gözenekli alüminyum köpük takviyeli durumda erime oranlarının kıyaslaması Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de verilmiştir. FDM kullanılan ısı depolama sistemlerinde en önemli problem kullanılan FDM'lerin düşük ısı iletkenliğe sahip olmalarıdır. Düşük ısı iletkenlik, ısı depolama esnasında ısı yükleme ve geri kazanma zamanını arttırmakta ve ısı depolama verimini düşürmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için bu çalışmada 10PPI ve 20PPI açık gözenekli alüminyum köpük malzemeler kullanılmıştır. Deneysel bulgular ışığında iki farklı ısı akısı ve her bir ısıtma konumunda açık gözenekli alüminyum köpük takviyesinin $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın ısı transfer hızını ve erime oranını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

4.5. Sayısal Modelleme Bulguları

Üçüncü aşamada FDM olarak kullanılan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$ sabit ısı akısındaki deneysel ve sayısal çözümler sonuçları karşılaştırılmıştır.



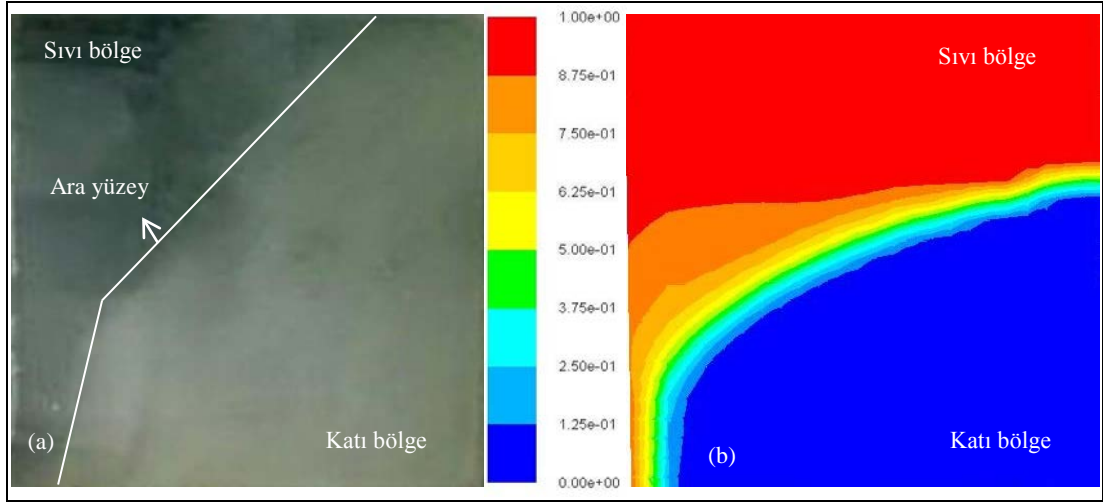
Resim 4.42. $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$, 300 dk da alttan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime davranışı (a) deneysel çalışma (b) sayısal çalışma



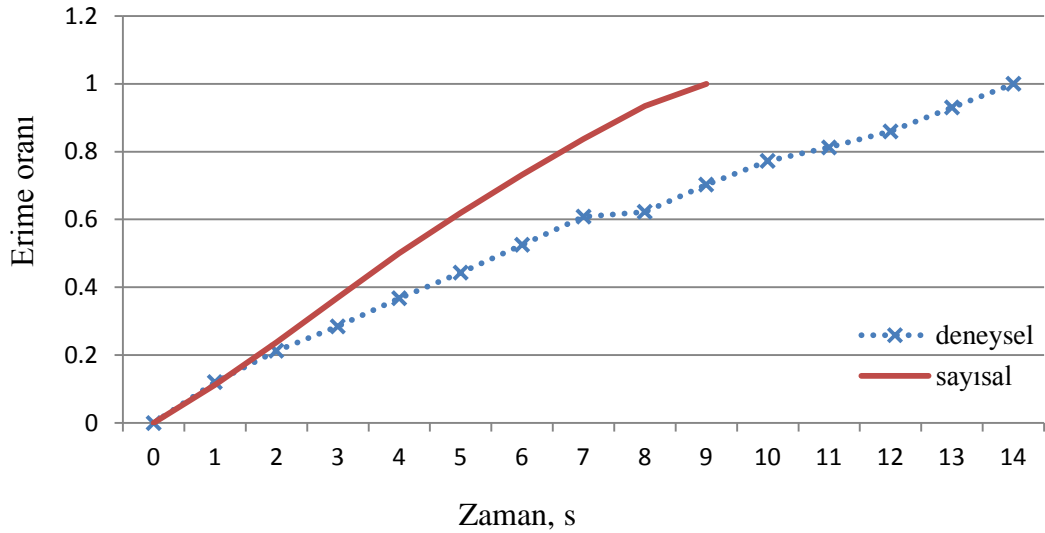
Şekil 4.45. 15°C ile 50°C arasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı değişimi

Resim 4.42 ve Şekil 4.45'den deneysel ve sayısal analiz sonuçları kıyaslandığında $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$ lik sabit ısı akısı ve alttan ısıtma konumunda, aradan geçen 300dk sonrasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranları arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Resim 4.43 ve Şekil 4.46'dan deneysel ve sayısal analiz sonuçları kıyaslandığında $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ lik sabit ısı akısı ve yandan ısıtma konumunda, aradan geçen 600dk sonrasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime karakteristiklerinin uyum gösterdiği ancak deney düzeneğinde meydana gelen ısı kayıplarından dolayı deneysel çalışmada daha az bir erime oranının olduğu görülmüştür.

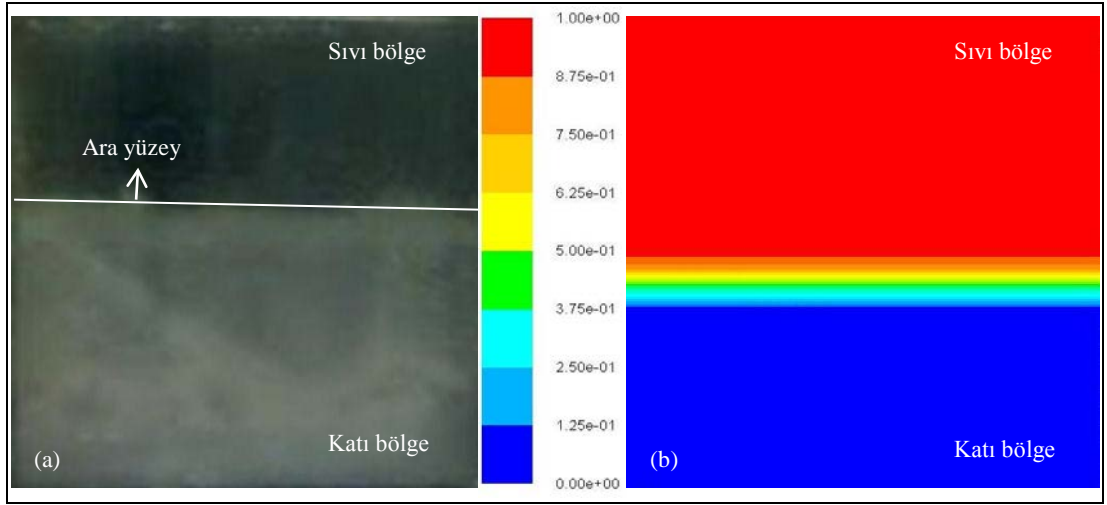


Resim 4.43. $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$, 600 dk da yandan ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime davranışı (a) deneysel çalışma (b) sayısal çalışma

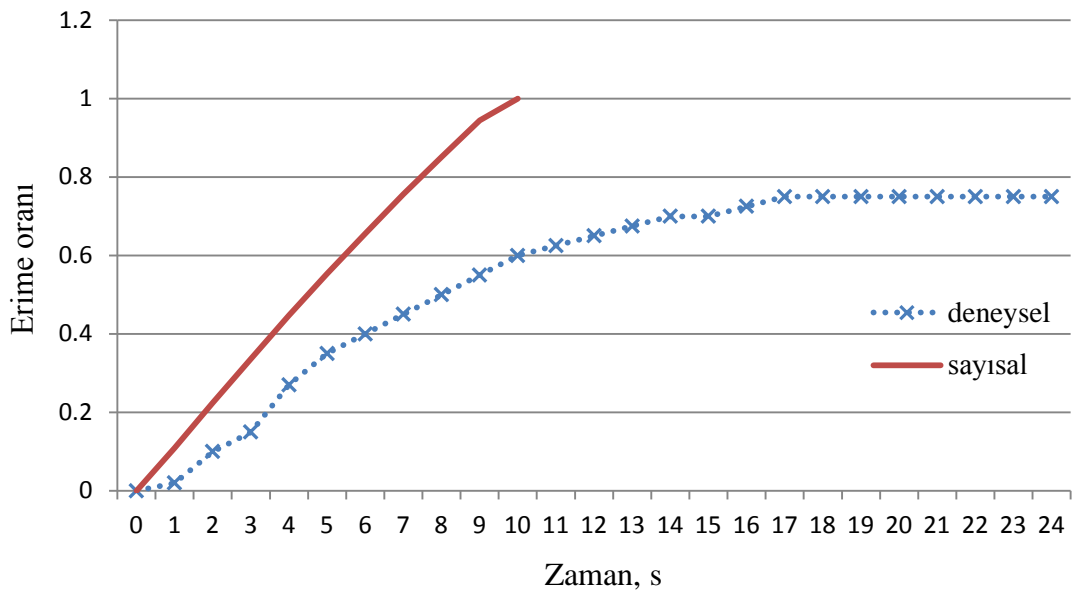


Şekil 4.46. 15°C ile 60°C arasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı değişimi

Resim 4.44 ve Şekil 4.47'den deneysel ve sayısal analiz sonuçları kıyaslandığında $\dot{q}=1310 \text{ W/m}^2$ lik sabit ısı akısı ve üstten ısıtma konumunda, yaklaşık 300dk ya kadarlık geçen sürede $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranları arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Bundan sonraki süreçte deney düzeneğinde yeterli yalıtım koşullarının sağlanamamasından kaynaklanan ısı kayıplarından dolayı ısı transfer hızı deneysel çalışmada gitgide azalmakta ve erime oranı maksimum %75 olmaktadır.



Resim 4.44. $\dot{q}=1310\text{W/m}^2$, 300 dk da üstten ısıtma konumunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime davranışı (a) deneysel çalışma (b) sayısal çalışma



Şekil 4.47. 15°C ile 125°C arasında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı değişimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ısıtma konumunun ve ısı akısının FDM olarak kullanılan parafin (n-heptacosane) ve kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)'ın erime davranışına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. FDM kullanan ısı enerji depolama sistemlerinde en önemli problem, kullanılan FDM'lerin düşük ısı iletkenliğidir. Düşük ısı iletkenlik, ısı depolama esnasında ısı yükleme ve geri kazanma zamanını arttırmakta ve ısı depolama verimini düşürmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için ortama ısı iletkenliği arttıracak materyaller eklenmektedir. Bu çalışmada da FDM'nin ısı iletkenliği artırmak ve bu sayede daha etkin bir şekilde ısı enerjisi depolamak için gözenekli ortamların etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler ve ölçümler sonucu elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Parafinlerin, uzun süreli kullanıma uygunlukları, korozyona neden olmamaları, aşırı soğuma etkilerinin ihmal edilebilir olması, düşük yoğunluğa sahip olmaları, kimyasal kararlılık gibi üstün yönleri sebebiyle enerji depolama malzemesi olarak kullanımları uygundur.
- 2- Seçilecek olan FDM'nin erime noktasının depolanacak enerji kaynağının sıcaklığına uygunluğu çok önemlidir.
- 3- Isı akısı arttıkça faz değiştirme hızı artmaktadır.
- 4- Isıtma konumunun faz değiştirme hızı ve erime hacmi üzerinde önemli bir etkisi vardır.
- 5- Alttan ısıtma durumunda faz değiştirme hızı en yüksek, üstten ısıtma durumunda ise en yavaş olmaktadır.
- 6- Faz değişimi başladıktan sonra ısıtma konumuna ve uygulanan ısı akısına göre doğal taşınım ile ısı transferinin etkisi değişmektedir.
- 7- Alttan ısıtmada doğal taşınımın etkisi artmakta ve iletim yoluyla ısı transferini geçerek faz değişimini hızlandırmaktadır.
- 8- Yandan ısıtmada doğal taşınımın etkisi önemli olmasına karşın faz değişim hızı üst bölgelerde hızlı alt bölgelerde yavaş olmaktadır.
- 9- Üstten ısıtma durumunda iletimle ısı transferi etkindir. Belirli bir süre sonra iletim yoluyla ısı transferi de azalmakta ve faz değiştirme yavaşlamaktadır.

10- 10PPI ve 20PPI olmak üzere iki farklı gözenek yoğunluğuna sahip açık gözenekli alüminyum köpükler sabit gözenekliliğe sahip olduklarından FDM içerisinde neredeyse aynı erime zamanlarına sahiptirler. Buradan da gözenek yoğunluğunun, gözenekliliğe oranla daha az etkili bir parametre olduğu sonucuna varılabilir.

11- Gözenek yoğunluğu arttıkça, iç yüzey alanı ve etkin ısı iletkenlik artıyor, ancak geçirgenlik azaldığı için doğal taşınımına olan dirençte artıyor.

Çalışmanın devamı için yapılacak öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Üsten ısıtma durumunda kanatçık uygulaması ile faz değişim hızı artırılabilir.
- 2- Yandan ısıtma durumunda optimum hacim sağlanması istenirse kanatçık uygulamasının taban alt kısımlarda uygulanması tercih edilebilir.
- 3- İnorganik FDM'lerin kullanılan ısı transferini geliştirici materyaller üzerindeki korozyon etkisi incelenebilir.
- 4- Kullanılan FDM'lerin erime prosesinin yanında katılaşma süreçleri ve gözenekli ortamların katılaşma hızına etkisi incelenebilir.
- 5- FDM'lerin yerleştirildikleri kapların malzemesi ve şekilleri değiştirilerek daha etkin sistemler tasarlanabilir.
- 6- FDM'lerin çok sayıda tekrarlanan erime/katılaşma süreçlerine maruz bırakılmaları durumunda meydana gelebilecek olası değişimler incelenebilir.
- 7- Depolama ortamlarında FDM'lerin erime ve katılaşma davranışları, gözenekli ortamların ısı transfer karakteristiğine etkisi daha yaygın şekilde sayısal olarak çalışılmalıdır. Bu gibi sayısal çalışmalarda HAD yazılımlarından (Fluent vb.) yararlanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abhat, A., 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy*, 30 (4-B), 313-331.
- Agyenim, F., Eames, P., Smyth, M., 2009. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy*, 83, 1509-1520.
- Akgün, M., Aydın, O., Kaygusuz, K., 2007. Experimental study on melting /solidification characteristics of a paraffin as PCM. *Energy Conversion and Management*, 48, 669-678.
- Alawadhi, E.M., Amon, C.H., 2003. PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, 26, 116–125.
- Anonim, 2010. Vizyon 2050 Projesi. Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD), New Delhi, India.
- Assis, E., Katsman, L., Ziskind, G., Letan, R., 2007. Numerical and experimental study of melting in spherical shell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 1790-1804.
- Baetensa, R., Jelle, P., Gustavsen, A., 2010. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42,1361–1368.
- Banaszek, J., Domanski, R., Rebow, M., El-Sagier, F., 1999. Experimental study of solid-liquid phase change in a spiral thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 19, 1253-1277.
- Barba, A., Spiga, M., 2003. Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks. *Solar Energy*, 74 (2), 141-148.
- Bilen, K., Takgil, F., Kaygusuz, K., 2008. Thermal energy storage behaviour of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ during melting and solidification. *Energy Sources*, 30, 775-787.
- Chintakrinda, K., Weinstein, R.D., Fleischer, A.S., 2011. A direct comparison of three different material enhancement methods on the transient thermal response of paraffin phase change material exposed to high heat fluxes. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1639-1647.

- Demirbaş, M.F., 2006. Thermal energy storage and phase changing materials: an overview, *Energy Resources. Part B: Economics, Planning and Policy*, 1 (1), 85–95.
- Dinçer, İ., Rosen, M., 2002a. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- Dinçer, İ., Marc, A.R., 2002b. *Thermal Energy Storage*. Wiley, New York, USA.
- DongYan, G., ZhenQian, C., MingHeng, S., ZhiShen, W., 2010. Study on the melting process of phase change materials in metal foams using lattice Boltzmann method. *Science China*, 53(11), 3079-3087.
- Dutil, Y., Rousse, D.R., Salah, N.B., Lassue, S., Zalewski, L., 2010. A review on phase change materials: mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011),112-130.
- Ehid, R., Fleischer, A.S., 2012. Development and characterization of paraffin-based shape stabilized energy storage materials. *Energy Conversion and Management*, 53, 84–91.
- Ellinger, E.A., Beckermann, C., 1991. On the effect of porous layers on melting heat transfer in an enclosure. *Experimental Thermal Fluid Science*, 4, 619– 629.
- Fellchenfeld, H., Sarlg, S., 1985. The melting point adjustment of calcium chloride hexahydrate by addition of potassium chloride or calcium bromide hexahydrate. *Solar Energy*, 34, 199-201.
- Hale D.V., Hoover M.J., O'Neill, M.J., 1971. *Phase Change Materials Hand Book*, Report no. HREC-5183-2LMSC-HREC D225138. NASA, Marshal Space Flight Center, Alabama.
- Hasnain, S.M., 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: Heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127-1138.
- Hawes, D.W., Feldman, D., Banu, D., 1993. Latent heat storage in building materials. *Buildings Volume*, 77-86.
- Hoogendoorn, C.J., Bart, G.C.J., 1992. Performance and modeling of latent heat stores. *Solar Energy*, 48, 53–58.

- Ismail, K.A.R., Lino, F.A.M., 2011. Fins and turbulence promoters for heat transfer enhancement in latent heat storage system. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 1010-1018.
- İlken, Z., 1991. Silindir çevresinde katılaşma problemlerinin farklı sınır koşulları için çözümü. *TIBTD Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 14(3), 10-14.
- Jegadheeswaran, S., Pohekar, S.D., 2009. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2225–2244.
- Jegadheeswaran, S., Pohekar, S.D., 2010. Exergy analysis particle dispersed latent heat thermal storage system for solar water heaters. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2, 023105.
- Kakaç, S., 2008. TÜBA Şeref Üyesi Prof. Dr. Sadık Kakaç'ın Sürdürülebilir Enerji Raporu Hakkında Görüşleri, <http://www.tuba.gov.tr/tr/haberler/bilim-dunyasindan-gorusler/420-TUBA-Seref-Uyesi-Prof-Dr-Sadik-Kakacin-Surdurulebilir-Enerji-Raporu-Hakkinda-Goruslerini-Aktardi-31-Kasim-2008-304.html> (31.11.2008).
- Kimura, H., Kai, J., 1988. Mixtures of calcium chloride hexahydrate with some salt hydrates or anhydrous salts as latent heat storage materials. *Energy Conversion Management*, 28, 197-200.
- Lafdi, K., Mesalhy, O., Shaikh, S., 2007. Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials. *Journal of Applied Physics*, 102, 083549.
- Lafdi, K., Mesalhy, O., Elgafy, A., 2008. Merits of employing foam encapsulated phase change materials for pulsed power electronics cooling applications. *Asme J*, 130 (2) ,0210041-0210048.
- Lane, G.A., 1983. *Solar Heat Storage Latent Heat Materials*, vol. I. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc.
- Li, W.Q., Qu, Z.G., He, Y.L., Tao, W.Q., 2012a. Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin. *Applied Thermal Engineering*, 37, 1-9.
- Medrano, M., Yılmaz, M.O., Nogues, M., Martorell, I., Roca, J., Cabeza L.F., 2009. Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy*, 86 (10), 47-55.

- Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A., Bowman, K., 2005. Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. *Energy Conversion and Management*, 46, 847-867.
- Mettawee, E.S., Assassa, G.M.R., 2007. Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system. *Solar Energy*, 81, 839–845.
- Nallusamy, N., Sampath, S., Velraj, R., 2007. Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying solar heat sources. *Renewable Energy*, 32, 1206-1227.
- Nayak, K.C., Saha, S.K., Srinivasan, K., Dutta, P., 2006. A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 1833-1844.
- Ogunkoya, D.O., 2009. *Thermal Energy Storage: Analysis and Application*. Master's thesis, North Carolina State University, Department of Mechanical Engineering, Raleigh, North Carolina.
- Patankar, S.V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company.
- Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S., 2006. Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations. *Renewable Energy*, 31, 2025-2041.
- Rudd, A.F., 1993. Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings. *ASHRAE Transactions: Research*, 99(2) ,339–346.
- Sertkaya, A.A., 2008. *Alüminyum Köpüğün Isı Değişiricisi Olarak Tasarımı ve Isı Transferi Modeli*. Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.
- Siahpush, A., O'Brien, J., Crepeau, J., 2008. Phase change heat transfer enhancement using copper porous foam. *Heat Transfer*, 130 (082301), 1–11.
- Tian, Y., Zhao, C.Y., 2011. A numerical investigation of heat transfer in phase change materials embedded in porous metals. *Energy*, 36, 5539-5546.

- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change materials. *Heat Transfer Analysis and Applications. Applied Thermal Engineering*, 23, 251-283.
- Zhang, Y., Hu, X., Wang, X., 2003. Theoretical analysis of convective heat transfer enhancement of microencapsulated phase change material slurries. *Heat and Mass Transfer*, 40, 59–66.
- Zhao, C.Y., Wu, Z.G., 2010. Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, 636-643.
- Zhou, D., Zhao, C.Y., 2011. Experimental investigations on heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous materials. *Applied Thermal Engineering*, 31, 970-977.
- Zivkovic, B., Fujii, I., 2001. An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers. *Solar Energy*, 70, 51-61.
- Wei, J., Kawaguchi, Y., Hirano, S., Takeuchi, H., 2005. Study on a pcm heat storage system for rapid heat supply. *Applied Thermal Engineering*, 25, 2903-2920.
- Anonim, 2012. Metal foam, http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam - (14.05.2012).

EKLER

EK-1. Parafinin erime oranı ve ısı kapasitesi

q=3000 W/m² alttan ısıtma				
	parafin,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	0.25	68.36	1.00	68.62
2 saat	0.52	70.65	1.25	71.43
3 saat	6.94	72.56	5.00	73.77
4 saat	11.45	74.31	9.75	75.58
5 saat	20.13	75.83	13.10	76.84
6 saat	23.50	77.21	22.95	78.19
7 saat	30.98	78.15	31.00	79.13
8 saat	39.60	79.39	35.50	80.24
9 saat	45.52	80.20	41.05	81.01
10 saat	53.75	80.73	48.50	81.59
11 saat	60.97	81.29	50.26	81.98
12 saat	67.77	81.90	58.51	82.43
13 saat	72.42	82.25	63.33	82.68
14 saat	77.56	82.35	70.39	82.83
15 saat	81.17	82.79	73.88	83.07
16 saat	87.25	83.02	80.26	83.13
17 saat	95.00	83.45	84.27	83.36
18 saat	100.00	83.77	88.02	83.59
19 saat			92.45	83.74
20 saat			100.00	84.16

EK-1. (Devam) Parafinin erime oranı ve ısı kapasitesi

q=3000 W/m² yandan ısıtma				
	parafin,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	0.41	68.73	2.06	69.65
2 saat	0.58	70.45	3.00	72.40
3 saat	4.00	72.09	5.00	74.82
4 saat	9.75	73.48	8.95	76.51
5 saat	11.23	74.65	20.50	78.09
6 saat	15.75	75.73	24.00	79.47
7 saat	19.25	76.72	28.50	80.57
8 saat	26.25	77.63	37.00	81.48
9 saat	28.50	78.49	40.00	82.23
10 saat	31.50	79.29	47.00	83.07
11 saat	32.87	79.97	51.25	84.12
12 saat	37.50	80.66	55.50	85.09
13 saat	39.50	81.43	60.00	85.72
14 saat	41.00	82.23	62.25	86.03
15 saat	43.00	82.96	66.50	86.35
16 saat	43.50	83.71	67.50	86.64
17 saat	46.37	84.23	74.25	86.91
18 saat	49.00	84.69	80.50	87.15
19 saat	50.50	84.98	82.50	87.34
20 saat	51.00	85.15	86.00	87.47
21 saat	51.25	85.26	87.75	87.59
22 saat	51.50	85.39	92.00	87.69
23 saat	53.00	85.54	92.50	87.81
24 saat	55.00	85.63	93.00	87.87
25 saat	56.25	85.76	95.50	87.95
26 saat	57.50		100.00	
27 saat	58.00		100.00	
30 saat	60.52		100.00	
35 saat	64.12		100.00	
40 saat	78.00		100.00	

EK-1. (Devam) Parafinin erime oranı ve ısı kapasitesi

q=3000 W/m² _üstten ısıtma				
	parafin,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	0.50	69.96	0.50	70.27
2 saat	2.85	71.80	3.90	72.60
3 saat	7.50	73.43	10.00	74.42
4 saat	8.00	74.81	15.00	75.91
5 saat	15.00	75.96	18.50	77.15
6 saat	17.80	76.88	21.25	78.18
7 saat	20.00	77.74	27.50	79.05
8 saat	22.50	78.43	30.00	79.68
9 saat	25.00	79.07	30.25	80.28
10 saat	25.00	79.60	32.50	80.75
11 saat	26.00	80.08	33.40	81.13
12 saat	29.00	80.46	37.50	81.44
13 saat	30.00	80.82	37.60	81.69
14 saat	30.00	81.05	37.80	81.88
15 saat	31.00	81.29	38.00	82.11
16 saat	31.00	81.42	39.50	82.25
17 saat	32.00	81.64	40.00	82.40
18 saat	34.00	81.74	43.20	82.52
19 saat	36.00	81.90	44.62	82.66
20 saat	38.50	81.95	45.00	82.70
23 saat	38.50	82.13	45.00	82.88
26 saat	39.00	82.23	45.00	82.94
29 saat	39.00	82.25	45.00	82.95

EK-1. (Devam) Parafinin erime oranı ve ısı kapasitesi

q=4460 W/m²_ alttan ısıtma				
	parafin,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	4.68	68.47	6.25	69.36
2 saat	17.00	72.75	18.00	73.90
3 saat	31.50	76.64	29.00	77.84
4 saat	44.00	78.61	44.00	80.61
5 saat	59.50	80.86	57.00	83.34
6 saat	69.00	83.62	68.75	85.60
7 saat	85.00	85.35	87.50	83.52
8 saat	100.00	87.28	100.00	88.86

q=4460 W/m²_yandan ısıtma				
	parafin,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	2.25	68.39	5.00	70.31
2 saat	10.00	71.36	17.00	74.16
3 saat	22.50	73.71	31.25	77.23
4 saat	30.25	76.23	45.00	79.96
5 saat	38.00	78.12	56.50	82.46
6 saat	55.00	80.07	70.00	85.84
7 saat	65.00	83.31	86.00	88.08
8 saat	70.00	85.47	96.00	89.36
9 saat	76.00	87.12	100.00	90.69
10 saat	84.00	88.11		
11 saat	90.00	88.99		
12 saat	96.00	89.78		
13 saat	100.00	90.47		

EK-1. (Devam) Parafinin erime oranı ve ısı kapasitesi

q=4460 W/m² üstten ısıtma				
	parafin, %	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	2.50	69.67	5.50	70.47
2 saat	10.00	72.67	15.00	74.39
3 saat	15.00	75.40	25.00	77.62
4 saat	20.00	77.66	35.00	80.22
5 saat	25.00	79.52	40.00	82.44
6 saat	30.00	81.14	45.00	84.04
7 saat	35.00	82.42	52.50	85.26
8 saat	40.00	83.53	55.00	86.25
9 saat	43.00	84.44	57.50	87.03
10 saat	46.00	85.11	62.50	87.62
11 saat	50.00	85.71	65.00	88.11
12 saat	52.50	86.10	70.00	88.55
13 saat	55.00	86.38	72.50	88.88
14 saat	57.50	86.67	75.00	89.17
15 saat	58.00	86.97	77.50	89.43
16 saat	60.00	87.22	80.00	89.69
17 saat	62.50	87.41	82.50	89.85
18 saat	65.00	87.62	85.00	90.02
19 saat	65.00	87.73	87.50	90.11
20 saat	65.00	87.86	90.00	90.25
21 saat	65.00	87.95	92.50	90.36
22 saat	65.00	88.06	95.00	90.49
23 saat	65.00	88.12	97.50	90.58
24 saat	65.00	88.22	100.00	90.72

EK-1. (Devam) Parafinin erime oranı ve ısı kapasitesi

q=8355 W/m² alttan ısıtma				
	parafin, %	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	17.50	71.73	20.61	72.53
2 saat	39.53	76.81	43.50	78.84
3 saat	65.37	81.66	65.00	83.61
4 saat	90.74	85.37	90.00	88.44
5 saat	100.00	89.63	100.00	92.13

q=8355 W/m² yandan ısıtma				
	parafin, %	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	14.75	71.24	23.75	72.64
2 saat	31.00	74.49	46.80	77.71
3 saat	50.30	77.94	66.96	82.50
4 saat	57.23	82.46	88.62	90.04
5 saat	70.25	88.31	100.00	93.07
6 saat	77.31	91.38		
7 saat	91.07	93.55		
8 saat	98.00	95.28		
9 saat	100.00	100.65		

q=8355 W/m² üstten ısıtma				
	parafin, %	ısı kapasitesi (kj/kg)	parafin+köpük, %	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	9.75	71.11	14.00	71.13
2 saat	17.50	74.91	25.00	76.56
3 saat	25.00	78.27	39.50	80.90
4 saat	32.00	81.36	45.00	84.44
5 saat	38.50	83.74	55.00	87.08
6 saat	44.00	85.76	61.50	89.02
7 saat	50.00	87.39	70.00	90.33
8 saat	55.00	88.63	75.00	91.48
9 saat	60.00	89.56	80.00	92.43
10 saat	65.00	90.32	87.00	93.23
11 saat	70.00	90.97	95.00	93.95
12 saat	72.50	91.94	100.00	94.57
13 saat	75.00	91.90	100.00	95.09
14 saat	80.00	92.29	100.00	95.46
15 saat	84.00	92.62	100.00	95.77
16 saat	87.50	92.96	100.00	96.01
17 saat	92.50	93.22	100.00	96.16
18 saat	96.00	93.45	100.00	96.29
19 saat	100.00	93.67	100.00	96.50

EK-2. CaCl₂·6H₂O'nun erime oranı ve ısı kapasitesi

700W/m ² alttan ısıtma						
	fdm,%	ISI kapasitesi (kj/kg)	fdm+10ppi,%	ISI kapasitesi (kj/kg)	fdm+20ppi,%	ISI kapasitesi (kj/kg)
1 saat	1.50	66.28	4.00	68.10	4.00	66.23
2 saat	4.50	68.26	7.50	71.33	7.50	69.33
3 saat	10.00	69.64	13.00	73.70	10.00	71.10
4 saat	15.00	70.56	20.00	75.43	12.00	72.66
5 saat	21.50	71.36	28.00	76.40	15.00	74.07
6 saat	29.00	72.07	37.00	77.02	25.00	75.29
7 saat	37.50	72.74	42.00	77.43	35.00	76.02
8 saat	43.00	73.30	50.00	77.85	40.00	76.82
9 saat	48.50	73.88	55.00	78.19	45.00	77.85
10saat	55.00	74.54	58.00	78.63	52.50	79.27
11saat	61.25	75.27	66.00	78.97	57.00	80.40
12saat	68.50	75.88	73.50	79.22	62.50	81.09
13saat	74.50	76.48	80.00	79.49	70.00	81.54
14saat	79.50	77.11	88.50	79.72	78.00	81.86
15saat	85.00	77.79	94.00	80.02	86.00	82.01
16saat	90.00	78.60	100.00	81.53	92.00	82.16
17saat	96.50	79.05			100.00	82.17
18saat	100.00	79.35				

700W/m ² üstten ısıtma						
	fdm, %	ISI kapasitesi (kj/kg)	fdm+10ppi, %	ISI kapasitesi (kj/kg)	fdm+20ppi, %	ISI kapasitesi (kj/kg)
1 saat	0.50	67.44	1.50	67.22	3.50	66.44
2 saat	1.50	68.38	4.50	69.88	7.00	68.86
3 saat	4.00	68.93	12.50	71.28	16.00	70.11
4 saat	6.50	69.25	17.50	72.11	20.50	70.82
5 saat	10.00	69.51	25.00	72.74	27.00	71.48
6 saat	15.00	69.74	35.00	73.36	37.50	71.93
7 saat	18.50	69.96	40.00	74.07	42.00	72.26
8 saat	22.50	70.12	42.50	74.47	45.00	72.59
9 saat	25.00	70.29	46.00	74.90	50.00	72.87
10 saat	28.00	70.42	50.00	75.33	54.00	73.16
11 saat	32.00	70.54	53.50	75.74	56.00	73.45
12 saat	34.00	70.65	58.00	76.17	60.00	73.70
13 saat	35.00	70.77	62.00	76.47	64.50	73.95
14 saat	37.50	70.87	63.50	76.72	66.00	74.20
15 saat	37.50	71.00	64.00	76.97	68.50	74.47
16 saat	38.00	71.10	65.00	77.17	70.50	74.71
17 saat	38.00	71.17	66.00	77.43	72.50	75.01
18 saat	38.50	71.28	66.00	77.85	72.50	75.16
19 saat	38.50	71.32	66.00	78.08	75.00	75.54
20 saat	38.50	71.42			75.00	75.79
21 saat	40.00	71.52				

EK-2. (Devam) CaCl₂·6H₂O'nun erime oranı ve ısı kapasitesi

700 W/m ² yandan ısıtma						
	fdm,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	fdm+10ppi,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	fdm+20ppi,%	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	0.50	61.85	3.00	65.30	2.00	64.65
2 saat	3.00	64.27	5.50	67.90	4.00	66.64
3 saat	7.50	65.77	10.00	69.43	7.50	67.89
4 saat	10.00	67.02	19.00	70.64	16.00	68.63
5 saat	16.20	68.33	27.50	71.45	23.50	69.13
6 saat	20.00	69.25	37.50	72.11	30.00	69.58
7 saat	24.50	70.14	42.50	72.71	35.00	69.99
8 saat	27.00	70.60	47.00	73.24	38.50	70.42
9 saat	32.50	71.20	50.00	73.59	43.00	70.72
10 saat	42.53	71.80	54.00	73.94	48.00	71.02
11 saat	48.00	72.48	60.00	74.20	52.00	71.45
12 saat	50.00	73.27	62.50	74.52	56.00	71.71
13 saat	55.33	73.90	65.00	74.63	60.00	72.00
14 saat	58.50	74.58	70.00	74.80	65.00	72.26
15 saat	59.00	74.80	75.00	75.08	68.00	72.59
16 saat	63.00	74.97	77.50	75.21	73.00	72.97
17 saat	64.50	75.16	80.00	75.53	76.50	73.55
18 saat	70.00	75.29	82.50	75.74	78.00	74.08
19 saat	72.00	75.49	84.00	75.94	80.00	74.34
20 saat	75.00	75.71	85.00	76.21	82.00	74.63
21 saat	78.50		85.00	76.44	84.00	75.00
22 saat	81.00		85.00	76.69	85.00	75.12
23 saat	83.00		86.00	76.97	85.00	75.22
24 saat	86.00		88.00	77.12		
27 saat	86.00		90.00	77.40		
28 saat	86.00		90.00	77.63		
29 saat	86.00		90.00	77.85		

EK-2. (Devam) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı ve ısı kapasitesi

1310W/m² alttan ısıtma						
	fdm,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	fdm+10ppi,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	fdm+20ppi,%	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	7.00	68.04	10.50	69.35	9.00	69.22
2 saat	15.00	71.09	19.50	73.10	17.50	71.95
3 saat	25.00	72.88	27.00	75.40	25.00	73.96
4 saat	32.50	74.56	41.00	77.89	38.00	75.42
5 saat	40.00	75.70	56.00	80.14	53.00	76.84
6 saat	48.00	76.67	68.50	81.78	65.00	77.94
7 saat	55.00	78.12	80.00	83.82	75.00	79.08
8 saat	63.50	79.13	92.00	86.55	87.50	80.11
9 saat	78.00	80.01	100.00	89.09	100.00	81.23
10 saat	83.00	80.90				
11 saat	90.00	82.36				
12 saat	100.00	83.21				

1310W/m² yandan ısıtma						
	fdm,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	fdm+10ppi,%	ısı kapasitesi (kj/kg)	fdm+20ppi,%	ısı kapasitesi (kj/kg)
1 saat	5.00	66.57	4.00	66.95	3.50	64.28
2 saat	8.00	67.83	8.00	70.18	7.00	67.71
3 saat	14.50	68.89	16.00	71.95	12.50	70.15
4 saat	22.00	69.68	24.00	73.26	20.00	71.82
5 saat	30.00	70.63	37.50	74.09	34.50	73.06
6 saat	40.00	71.14	45.00	74.89	42.00	74.12
7 saat	48.50	71.66	57.00	75.60	50.00	75.02
8 saat	55.00	72.17	65.00	76.28	60.00	76.22
9 saat	64.00	72.68	76.00	76.98	72.50	78.15
10 saat	70.00	73.26	85.00	77.85	80.00	79.73
11 saat	75.00	73.93	90.00	79.25	85.50	80.78
12 saat	82.00	74.71	95.00	80.31	92.00	81.50
13 saat	90.00	75.43	100.00	81.32	100.00	82.03
14 saat	95.00	75.96				
15 saat	100.00	76.36				

EK-2. (Devam) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime oranı ve ısı kapasitesi

1310W/m² üstten ısıtma						
	fdm,%	ISI kapasitesi (kj/kg)	fdm+10ppi,%	ISI kapasitesi (kj/kg)	fdm+20ppi,%	ISI kapasitesi (kj/kg)
1 saat	2.00	67.35	3.50	70.00	3.00	69.19
2 saat	10.00	69.60	7.00	72.48	7.50	72.50
3 saat	15.00	71.06	16.25	74.56	17.50	74.26
4 saat	27.00	72.47	24.00	75.98	25.00	75.60
5 saat	35.00	73.56	35.00	76.79	35.00	76.83
6 saat	40.00	74.54	48.50	77.57	50.00	77.90
7 saat	45.00	75.34	58.00	78.57	60.00	78.96
8 saat	50.00	75.87	70.83	79.46	68.00	79.96
9 saat	55.00	76.35	80.00	80.31	80.00	80.99
10 saat	60.00	76.76	88.50	81.33	90.00	83.45
11 saat	62.50	77.14	100.00	83.37	100.00	85.23
12 saat	65.00	77.52				
13 saat	67.50	77.90				
14 saat	70.00	78.20				
15 saat	70.00	78.40				
16 saat	72.50	78.62				
17 saat	75.00	78.82				
18 saat	75.00	78.98				
19 saat	75.00	79.15				
20 saat	75.00	79.26				

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, Adı : YATAĞANBABA, Alptuğ
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 23.07.1986 – Aydın
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (364) 227 45 33 / 1241
e-mail : alptugyataganbaba@hitit.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Selçuk Üniversitesi/Makine Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	Denizli Anadolu Lisesi	2004

İş Deneyi

Yıl	Yer	Görev
2010-	Hitit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar