



**KAPSÜLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN
MALZEMELER İÇEREN SULU KARIŞIMIN
FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMDE İŞ YAPAN
AKIŞKAN OLARAK PERFORMANSININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Muhammet Kaan YEŞİLYURT

Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2023

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KAPSÜLLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER İÇEREN SULU
KARIŞIMIN FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMDE İŞ YAPAN
AKIŞKAN OLARAK PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

(Experimental Investigation of the Performance of an Encapsulated Phase Change
Material Slurry as the Working Fluid in a Photovoltaic Thermal System)

DOKTORA TEZİ

Muhammet Kaan YEŞİLYURT

Danışman: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

Erzurum

Temmuz, 2023

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

KAPSÜLLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER İÇEREN SULU KARIŞIMIN
FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMDE İŞ YAPAN AKIŞKAN OLARAK
PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI danışmanlığında, Muhammet Kaan YEŞİLYURT tarafından hazırlanan bu çalışma, 12/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Termodinamik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ömer ÖZYURT <i>Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Faraz AFŞAR <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun/.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI danışmanlığında sunulan “Kapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzemeler İçeren Sulu Karışımın Fotovoltaik Termal Sistemde İş Yapan Akışkan Olarak Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Metot	3	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar ve Öneriler	1	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Muhammet Kaan YEŞİLYURT	Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI
12.7.2023	12.7.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

Not: Bu form, Tezin son şekline uygun olarak bilgisayar ortamında doldurulmalı, çıktısı imzalanıp Tezin sonuna eklenmelidir.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında ilgisi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya, sentez ve karakterizasyon çalışmalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Hayrunnisa NADAROĞLU'ya ve vakit ayırarak çalışmalarım ile ilgili soru ve sorunlarım ile ilgilenen Doç. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU'ya, deneysel çalışmalarım da hep yanımda olan ve desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet Numan ÖZAKIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, hayatımın her aşamasında desteği ve sevgisiyle her zaman yanımda olan, akademik çalışmalarım da beni sürekli destekleyerek teşvik eden sevgili eşime, çalışmalarımın yoğunluğu içerisinde yeterince zaman ayıramadığım halde sevgi ve desteklerini derinden hisettiğim çocuklarım Kıray Ege ve Umay Bige'ye teşekkür ederim.

Muhammet Kaan YEŞİLYURT

Temmuz 2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KAPSÜLLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER İÇEREN SULU KARIŞIMIN FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMDE İŞ YAPAN AKIŞKAN OLARAK PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammet Kaan YEŞİLYURT

Danışman: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

Amaç: Bu çalışmada, bir faz değişim malzemesinin (FDM) kapsüllenecek taşıyıcı akışkanı su olan ısı transfer akışkanı (ITA) elde edilmesi ve fotovoltaik (PV) hücrelerinin ITA olarak su kullanıldığı klasik PV-Termal (PVT) sulu sistemin ve farklı oranlarda kapsüllü FDM (kFDM) içeren çözeltiler (kFDM-S) kullanıldığı PVT/kFDM-S sistemin elektriksel ve termal verimlerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Erime sıcaklığı nominal hücre çalışma sıcaklığı aralığında olan laurik asit (LA) in-situ polimerizasyon yöntemi kullanılarak melamin formaldehit (MF) kabuk malzemesi ile kapsüllülmüştür. Sentezlenen kapsüller %1, %1,5 ve %2 oranında suyla karıştırılarak kFDM-S ITA'lar elde edilmiştir. 800 ve 1000W/m² ışınlı PV modülünün performansı ölçülmüş, ardından 0,04m/s ve 0,08m/s giriş hızlarında PVT/Su ve PVT/kFDM-S için aynı ışınlı değerlerinde elektriksel ve termal performans karşılaştırılmıştır.

Bulgular: En yüksek elektriksel verim, en yüksek termal verim artışı ve en özdeş yüzey sıcaklığı 0,04m/s 800W/m² %2 kFDM-S ile; en düşük ortalama yüzey sıcaklığı 0,08m/s 800W/m² %2 kFDM-S ile; en yüksek marjinal elektriksel verim ve marjinal termal verim 0,04m/s 800W/m² %1 kFDM-S ile; en yüksek elektriksel verim artışı 0,04m/s 1000W/m² %2 kFDM-S ile; en yüksek termal verim ve en yüksek genel verim 0,08m/s 1000W/m² %2 kFDM-S ile elde edilmiştir.

Sonuç: MF/LA kapsüller başarıyla sentezlenmiştir. kFDM-S en düşük ortalama yüzey sıcaklığı, en özdeş sıcaklık dağılımı ve en yüksek elektriksel ve termal verim sağlamıştır. kFDM'lerin ITA'nın termal özelliklerini iyileştirdiği ve kFDM-S'lerin gelişmiş bir ITA olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. kFDM-S'nin düşük debilerde daha avantajlı olduğu aynı debi değerlerinde ise, termal verim bakımından yüksek ışınlı, elektriksel verim bakımından düşük ışınlı daha etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Fotovoltaik termal sistem, kapsülleme, kapsüllü faz değıştiren malzeme

Temmuz 2023, 231 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

Experimental Investigation of the Performance of an Encapsulated Phase Change Material Slurry as the Working Fluid in a Photovoltaic Thermal System

Muhammet Kaan YEŞİLYURT

Supervisor: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

Purpose: It was aimed in this study to obtain heat transfer fluid (HTF) with water as the carrier fluid by encapsulating a phase change material (PCM), and to experimentally investigate the electrical and thermal efficiency of the classical PV-Thermal (PVT) aqueous system in which photovoltaic (PV) cells use water as HTF and the PVT/ePCM-S system in which solutions containing encapsulated PCM (ePCM) in different ratios (ePCM-S) are used.

Method: The lauric acid (LA) melting temperature within the nominal cell operating temperature range was encapsulated with melamine formaldehyde (MF) shell material using in-situ polymerization method. ePCM-S HTFs were obtained by mixing the obtained capsules with water by volume concentrations of 1%, 1.5% and 2%. The performance of the PV module was measured at 800 and 1000W/m² irradiance, then electrical and thermal performance were compared for PVT/Water and PVT/ePCM-S at 0.04m/s and 0.08m/s input speeds at the same irradiance values.

Findings: The highest electrical efficiency, the highest thermal efficiency increase and the most identical surface temperature 0.04m/s 800W/m² with 2% ePCM-S; lowest average surface temperature 0.08m/s 800W/m² with 2% ePCM-S; highest marginal electrical efficiency and marginal thermal efficiency 0.04m/s 800W/m² with 1% ePCM-S; highest electrical efficiency increase 0.04m/s 1000W/m² with 2% ePCM-S; The highest thermal efficiency and the highest overall efficiency were obtained with 0.08m/s 1000W/m² 2% ePCM-S.

Results: MF/LA capsules were successfully synthesized. ePCM-S provided the lowest average surface temperature, the most uniform temperature distribution, and the highest electrical and thermal efficiency. It has been shown that ePCMs improve the thermal properties of HTF and ePCM-S can be used as an enhanced HTF. It has been observed that ePCM-S is more advantageous at low flow rates, and at the same flow rates, it is more effective in high radiation in terms of thermal efficiency and in low radiation in terms of electrical efficiency.

Keywords: Solar energy, photovoltaic thermal system, encapsulation, encapsulated phase change material

July 2023, 231 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xxi
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Önemi	7
Amaç ve Kapsam	8
KURAMSAL TEMELLER.....	9
Faz Değişim Malzemeleri (FDM).....	9
FDM kavramı ve genel özellikler	9
Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması	11
Organik faz değişim malzemeleri	13
İnorganik faz değişim malzemeleri.....	14
Ötektik faz değişim malzemeleri	14
FDM’lerin Akışkanlarla Kullanımı	15
FDM ve FDM Çözeltilerinin Sorunları	17
Aşırı soğuma	18
Kararlılık.....	18
Fiziksel kararlılık	18
Yapısal Kararlılık.....	21
Termal Kararlılık	22
Kapsülleme ve Faz Değişim Malzemelerin Kapsüllenmesi	23
Kabuk ve çekirdek malzemelerinin seçimi	26
Kapsülleme yöntemleri	30
Kapsüllenmiş FDM’lerin kullanım alanları	33
Kapsüllenmiş FDM Çözeltileri	34

kFDM sulu çözeltilerin termal performansı.....	37
kFDM-S'lerin hidrodinamik performansı.....	39
Fotovoltaik Termal Sistemler	40
Fotovoltaik termal sistemlerin gelişimi	40
Fotovoltaik termal sistemlerin çalışma prensipleri	42
Konu ile İlgili Çalışmalar	47
kFDM-S esaslı PVT sistemler	61
MATERYAL ve YÖNTEM	65
Kapsül Tasarımı ve Üretimi.....	65
Kabuk, çekirdek ve kapsülleme proses malzemeleri	65
Kapsülleme yöntemi	66
Yerinde polimerizasyon yöntemi için sentez prosedürü.....	67
Kapsül Özellikleri ve Karakterizasyonu	70
SEM analizi.....	70
FTIR analizi	71
XRD analizi	71
DSC analizi	71
TG analizi	72
Kapsülleme oranı	73
Kapsülleme verimi	73
Yoğunluk	74
Kapsül çapı	75
Özgül Isı kapasitesi	75
Termal iletkenlik.....	78
Çözelti Karakterizasyonu ve Hidrodinamik Özelliklerin Tayini	79
Yoğunluk	79
Özgül ısı kapasitesi	80
Termal iletkenlik.....	81
Viskozite ve konsantrasyon tayini	83
Basınç düşümü ve pompalama gücü.....	88
PVT/kFDM-S İçin Matematiksel Model	92
Enerji ve ekserji analizi.....	95
Deney Sistemi	97

Sistemin tanımı ve çalışma prensibi	99
Sistemin bileşenleri.....	100
Güneş simülatörü	100
Varyak.....	101
Hız kontrol cihazları	102
PV paneli.....	102
Isı alıcısı.....	103
Pompa	104
Isı değıştiricileri	105
kFDM-S	105
Test ve ölçüm elemanları	105
Veri kaydedici.....	105
Termal çiftler	106
Piranometre	107
Fark basınç sensörü.....	108
Debimetre.....	109
Güç analizörü	110
Deneysel Tasarım ve Yöntem.....	111
Ölçümler ve Belirsizlik Analizi	113
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	115
kFDM Üretimi	115
kFDM Karakterizasyonu.....	117
SEM ve TEM analiz sonuçları.....	117
EDX, FTIR ve XRD analizleri	121
TG analiz sonuçları.....	123
kFDM yoğunluk ölçüm ve hesaplamaları.....	124
DSC analiz sonuçları ve kapsüleme oranı hesaplamaları	125
Özgöl ısı kapasitesi sonuçları	126
Termal iletkenlik hesaplamaları.....	126
Genel sonuçlar	127
kFDM-S Karakterizasyonu	127
kFDM-S yoğunluğu	127
Özgöl ısı kapasitesi	129

Termal iletkenlik.....	130
Viskozite	133
kFDM-S esaslı PVT Sistemin Deneysel Analizi	134
Performans karşılaştırması.....	160
Elektriksel verimlerin karşılaştırması	161
Termal verimlerin karşılaştırması.....	165
Akışkan çıkış ve ortalama yüzey sıcaklıkları	168
Verimlilik karşılaştırması	175
Basınç düşümleri.....	180
Belirsizlik Analizi Sonuçları.....	182
SONUÇ ve ÖNERİLER	185
Sonuçlar	185
Öneriler	187
KAYNAKLAR.....	189
ÖZGEÇMİŞ.....	208

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan [m^2]
d	Çap [m]
f	Sürtünme Katsayısı
g	Yer Çekim İvmesi [m/s^2]
h	Isı Taşınım Katsayısı [W/m^2K]
H_l	Sıvı Faz Entalpisi [J/kg]
L	Test Borusu Uzunluğu [m]
$\dot{m}$	Kütleli Debi [kg/s]
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç [bar]
ΔP	Basınç Düşümü [bar]
$\dot{Q}$	Isı Akısı [kW/m^2]
Q	Termal Güç [kW]
R	Yarıçap [m]
Re	Reynolds Sayısı
t	Zaman [s]
ΔT	Sıcaklık Farkı [$^{\circ}C$, K]
T	Sıcaklık [$^{\circ}C$, K]
T_s	Cidar Sıcaklığı [$^{\circ}C$, K]
T_f	Akışkan Sıcaklığı [$^{\circ}C$, K]
u	Hız [m/s]
V	Hacim [m^3]
$\dot{V}$	Hacimsel Debi [m^3/s]
Z	İki Termokupul Arasında ki Uzaklık [m]
α	Isı Kayıp Katsayısı
μ	Dinamik Viskozite [kg/ms]
ν	Kinematik Viskozite [m^2/s]
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
İndisler	
ç	Çıkış
e	Erime
d	Donma
f	Sürtünme
g	Giriş
s	Katı
l	Sıvı
sis	Sistem

Kısaltmalar

ITA	Isı Transfer Akışkanı
TA	Taşıyıcı Akışkan
LA	Laurik Asit
MF	Melamin Formaldehit
PV	Photovoltaic
FV	Fotovoltaik
PVT	Photovoltaic Thermal
FVT	Fotovoltaik Termal
FDM	Faz Değişim Malzemesi
kFDM	Kapsüllenmiş Faz Değişim Malzemesi
kFDM-S	Kapsüllenmiş Faz Değişim Malzemesi Çözeltilisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Termal enerji depolama sistemleri (Sarbu & Sebarchievici, 2018; Atul Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009)	4
Şekil 2. ΔT sıcaklık farkında duyulur ve gizli ısı depolama sistemleri arasında depolanan ısı miktarının karşılaştırması (Agyekum, PraveenKumar, Alwan, Velkin, & Adebayo, 2021; Browne, Lawlor, Kelly, Norton, & Cormack, 2015; Browne, Norton, & McCormack, 2015; Reyna, 2018; Yeşilyurt & Çomaklı, 2023).....	10
Şekil 3. Faz değıştiren malzemelerin sınıflandırılması (Bruno, Belusko, Liu, & Tay, 2015; Fong, 2020; Karellas, Roumpedakis, Tzouganatos, & Braimakis, 2018; R. K. Sharma et al., 2015; W. Su et al., 2015; Yeşilyurt, Nadaroğlu, & Çomaklı, 2019).....	12
Şekil 4. Erime sıcaklıkları ve entalpilerine göre faz değışim malzemeleri (Biçer, 2009; Bruno et al., 2015; Konuklu, 2008; Yeşilyurt et al., 2019; A. H. Zondag, Smidt, Veldhuis, & Boer, 2016).....	12
Şekil 5. FDM'lerin akışkanlarla karıştırılması (Serale, 2018; Zhou et al., 2012)	15
Şekil 6. Farklı tip FDM-Sıvı karışımları (Delgado, Lázaro, Mazo, & Zalba, 2012; Qiu, Li, Wang, Zhao, & Zhao, 2019; Serale, 2018; Yeşilyurt & Çomaklı, 2023).....	16
Şekil 7. Emülsiyonlarda karşılaşılması muhtemel kararsızlıklar (Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016; Kuroiwa, Kobayashi, Chuah, Nakajima, & Ichikawa, 2015; Qiu et al., 2017; Tadros, 2004)	19
Şekil 8. Tek bir sürfaktan kullanılması ve farklı sürfaktan karışımları kullanılması durumunda başlangıç durumu (a) ve 1 gün sonra (b) karışımında meydana gelen ayrışma (Al-Shannaq, Farid, Al-Muhtaseb, & Kurdi, 2015; Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016).....	21
Şekil 9. Isı alışverişı sırasında kapsül içinde FDM malzemenin faz değışimi (Ghasemi et al., 2022; Qiu et al., 2017)	25
Şekil 10. Kapsüllenmiş malzemelerin morfolojileri (Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016).....	26
Şekil 11. Çekirdek ve kabuk yapılarına göre kapsül çeşitleri; tek çekirdekli, çok çekirdekli, matriks ve çok katmanlı kabuklu (Alva et al., 2017; Jamekhorshid et al., 2014; C. Liu, Rao, Zhao, Huo, & Li, 2015)	26
Şekil 12. Kapsülleme yöntemlerinin sınıflandırılması (Chandel & Agarwal, 2017b)	31

Şekil 13. Oktadekan çekirdekli, melamin kabuklu kapsülün in-situ polimerizasyon yöntemi ile elde edilişi (Alva et al., 2017; L. Chen et al., 2014; Qiu et al., 2019).....	32
Şekil 14. Kapsüllenmiş FDM malzemelerden oluşan toz (Qiu, Ma, Zhao, Li, & Ali, 2016) ..	34
Şekil 15. ITA olarak kullanılmak üzere hazırlanmış kFDM-S (Qiu et al., 2016).....	36
Şekil 16. (a) Silikon bir PV panel gücü ve geriliminin hücre sıcaklığı ile değişimi (Browne, Norton, & McCormack, 2015, p. 763).....	43
Şekil 17. PV veriminin hücre sıcaklığı ile değişimi (Bakır, 2012)	44
Şekil 18. PV ile kaplamalı ve kaplamasız PVT için elektriksel ekserji (Bakır, 2012).....	44
Şekil 19. Termal ekserji bakımından kaplamalı PVT, kaplamasız düz levha kolektör (FPC) sistemlerinin karşılaştırılması (Bakır, 2012)	45
Şekil 20. PVT sistemlerin sınıflandırılması (Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan, 2016) .	45
Şekil 21. Tipik bir PVT havalı sistem (SolarWall, 2019)	46
Şekil 22. Tipik bir PVT sulu sistem (Öner et al., 2016).....	46
Şekil 23. kFDM-S'nin suya kıyasla cidar sıcaklık gradyanı üzerindeki etkisi (Young, Benner, Santamaria, & Asme).....	50
Şekil 24. FDM kullanılarak PV ve PVT sistemlerinin termal kararlılığı üzerine yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı (Browne, Norton, & McCormack, 2015, p. 765).....	51
Şekil 25. FDM, kFDM ve kFDM-S kullanımı üzerine yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı (Ghasemi et al., 2022)	51
Şekil 26. Bir PVT Hibrit sistemin genel yapısı (S. A. Ali, 2017).	52
Şekil 27. FDM sulu karışımları kullanan PVT sistemi ve çevrimler (Qiu et al., 2016).....	52
Şekil 28. kFDM-S'nin farklı kapsül konsantrasyonları için sıcaklığa karşı termal iletkenliği (Corcione, 2011; Doruk, 2017; Erdoğan, 2017).	55
Şekil 29. Kapsüllenmiş FDM malzemeler içeren sulu karışımlar ile saf suyun çekilen ısı miktarına göre gerekli pompa gücü (Delgado, Lázaro, Mazo, Marín, & Zalba, 2012; Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016).....	61
Şekil 30. Oda sıcaklığında saf su ve kapsüllenmiş FDM için ortalama debilere karşılık gelen basınç düşümleri (Yasushi Yamagishi et al., 1999)	62
Şekil 31. Kapsüllenmiş FDM içeren suyun termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi (Erdoğan, 2017).....	63
Şekil 32. Kapsüllenmiş FDM içeren sulu karışımlar kullanılan PVT sistemlerde normal sulu sistemlere kıyasla (a) termal verim (b) elektriksel verim (c) pompalama gücü (d)	

net verim (Lingkun Liu et al., 2017).....	63
Şekil 33. Yerinde polimerizasyon yoluyla mikrokapsülleme işleminin genel şeması (Koehler).....	68
Şekil 34. In-situ polimerizasyon yöntemi ile kapsülleme (Alva et al., 2017; L. Chen et al., 2014; Karthikeyan & Ramachandran, 2014; Qiu et al., 2019)	68
Şekil 35. Mikrokapsülleme süreci ve karıştırma hızının kapsül boyutuna etkisi (A. H. Zondag et al., 2016)	69
Şekil 36. FDM'nin faz değişim entalpisinin kapsülün özgül ısı kapasitesi üzerine dağıtılmasına yönelik yaklaşımlar; dikdörtgen (Chai, Shaukat, Rabia, Wang, & Wang, Hua Sheng, 2018) ve üçgen veya sinüs (Ma & Zhang, 2013) formları	77
Şekil 37. kFDM'in özgül ısı kapasitesinin sıcaklık ile değişimi (FDM'in katı ve sıvı haldeki C _p değerleri eşit kabul edilerek) (Kuravi, 2009)	78
Şekil 38. kFDM'lerin ısı kapasitesi ve termal iletkenliğinin faz değişim aralığında değişimi (Dai, Wang, & Zhang, 2008)	79
Şekil 39. Bazı kFDM'lerin C _p değerlerinin karşılaştırılması (Feng et al., 2021; Languri et al., 2013; Y. Zhang et al., 2011)	81
Şekil 40. Hacimsel Konsantrasyonun Fonksiyonu Olarak Cam Küreler İçeren Süspansiyonların Bağlı Viskozitesi [Ostwald viskozimetre ölçümleri, kılcal çap 0.23 cm (○) ; kılcal çap 0.38 cm (●), couette viskozimetre ölçümleri (□), Teorik eğri Denklem (38)'un $k = 2.5$, $q = 1.16$ için (Vand, 1945).....	86
Şekil 41. Bağlı viskozitenin kapsül konsantrasyonu ile değişimi (X. Wang et al., 2007)	87
Şekil 42. Sürtünme katsayısının, akışın laminar veya türbülanslı bölgede olmasına göre değişimi ve ilgili korelasyonlar (10mm çapında boru) (Y. Yamagishi et al., 1996; P. Zhang et al., 2010)	89
Şekil 43. Sürtünme katsayısının, akışın laminar veya türbülanslı bölgede olmasına göre değişimi ve ilgili korelasyonlar (4mm çapında boru için) (P. Zhang & Ma, 2012)	89
Şekil 44. Sürtünme katsayısının, akışın laminar veya türbülanslı bölgede olmasına göre değişimi ve ilgili korelasyonlar (10.1mm çapında boru için)	90
Şekil 45. Farklı kFDM konsantrasyonlarında çekilen ısı miktarının pompalama gücüne oranının düzeltilmiş Re sayısına karşı değişimi (P. Zhang et al., 2010)	91
Şekil 46. Çekilen ısı ile ihtiyaç duyulan pompalama gücünün kFDM konsantrasyonuna göre değişimi (A. H. Zondag et al., 2016)	92

Şekil 47. Farklı ışınlam değerlerinde sürtünme katsayısının ve farklı kFDM oranlarında basınç düşümünün Re ile değişimi (Y. Wang, Chen, & Ling, 2016)	92
Şekil 48. Deney sistemini ifade eden tipik bir kontrol hacmi.	93
Şekil 49. Deney sistemi	98
Şekil 50. Deney sisteminin şematik gösterimi	99
Şekil 51. Deney sisteminde güneş simülatörü olarak kullanılan halojen projektörler	101
Şekil 52. Deney sisteminde kullanılan Varsan varyak	102
Şekil 54. Deney sisteminde yer alan DC-AC akım dönüştürücü invertörler	102
Şekil 53. Deney sisteminde kullanılan güneş paneli	103
Şekil 55. Deney sisteminde kullanılan alüminyum ısı alıcı plakaya ait görsel ve modeller ..	104
Şekil 56. Deney sisteminde yer alan santrifüj tip sirkülasyon pompaları	104
Şekil 57. Deney sisteminde yer alan kFDM-S devresi ısı eşanjörü (a) ve ikincil devre ısı eşanjörü (su-hava) (b)	105
Şekil 58. Veri kayıt cihazı	106
Şekil 59. Termal çiftlerin ısı alıcı plakası üzerindeki yerleşimi.....	107
Şekil 60. Isı sensörü olarak kullanılan T-tipi termal çiftler (Yeşilyurt, 2015)	107
Şekil 61. Işınlam şiddetini ölçmekte kullanılan piranometre.....	108
Şekil 62. Fark Basınç Sensörü.....	109
Şekil 63. Sıvı debimetresi.....	109
Şekil 64. Solar Modül Analizörü ve PV I-V eğri ölçüm cihazı	110
Şekil 65. PV paneli üzerinde ışınlam ölçümü yapılan noktalar	113
Şekil 67. Çözelti içerisinde çöktürülmüş olan kapsüller ve ayrılmış çözelti	115
Şekil 66. Pre-polimer hazırlanması (sol) ve damlatma hunisi ile kabuk malzemesinin karıştırıcı üzerinde ortama eklenmesi	116
Şekil 68. Yerinde polimerizasyon yöntemi ile üretilen MF/LA kFDM	116
Şekil 69. İlk sentezde elde edilen mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemesine ait SEM görüntüsü @5.00 kV ve 1,52K yakınlaştırma seviyesi	117
Şekil 70. İlk sentezde elde edilen mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemesine ait SEM görüntüsü @3.00 kV ve 3,57K yakınlaştırma seviyesi	117
Şekil 71. Kapsüllerin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüleri (Delgado, Lázaro, Mazo, & Zalba, 2012).....	118
Şekil 72. Kabuk deformasyonlarının termal çevrimler sonrasındaki değişimi (Hawladar, Uddin, & Zhu, 2002; Smith, 2009; C. Y. Zhao & Zhang, 2011)	119

Şekil 73. Müteakip sentez çalışmalarında elde edilen kapsüllerden alınan SEM görüntüleri	120
Şekil 74. Kapsüllenmiş polianiline ait SEM görüntüsü (Choi, Lee, Kim, & Jhon, 2000)	120
Şekil 75. kFDM'lere ait TEM analizi görüntüleri	121
Şekil 76. kFDM'lerin EDX spektrumu	121
Şekil 77. kFDM'lerin FTIR spektrumu	122
Şekil 78. kFDM XRD spektrumu	123
Şekil 79. LA ve LA/MF kFDM için TG termogramları	123
Şekil 80. MF/LA kFDM'nin DSC grafiği	125
Şekil 81. Elde edilen kFDM'lerin C_p değerinin sıcaklıkla değişimi	126
Şekil 82. Suyun termal iletkenliğine karşı kFDM'nin termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	127
Şekil 83. Kapsül konsantrasyonuna karşı farklı sıcaklıklarda bulamacın kütle yoğunluğunun değişimi	128
Şekil 84. Farklı kapsül konsantrasyonları için bulamacın kütle yoğunluğunun sıcaklığa karşı değişimi	128
Şekil 85. kFDM-S ile Suyun özgül ısılarının karşılaştırılması	129
Şekil 86. Su ve %1, %1,5 ve %2'lik kFDM-S'lerin özgül ısılarının sıcaklıkla değişimi	130
Şekil 87. Doğrusallaştırılmış efektif özgül ısı kapasitesinin kFDM konsantrasyonu ile değişimi	130
Şekil 88. Su ve kFDM-S'nin durağan termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	131
Şekil 89. Su ve kFDM-S'nin efektif termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	131
Şekil 90. Su ve kFDM-S'nin Brownian etkileri altında efektif termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	132
Şekil 91. Su ile karşılaştırmalı olarak MF/LA kFDM'nin özgül ısı kapasitesi ve %5 MF/LA kFDM-S'nin termal iletkenliği	132
Şekil 92. Kapsül konsantrasyonuna karşı 293K'da MF/LA kFDM-S için viskozite modellerinin değerleri	133
Şekil 93. Kapsül konsantrasyonu ile 293K'de MF/LA kFDM-S'nin bağıl viskozitesi	133
Şekil 94. MF/LA kFDM-S viskozitesinin sıcaklıkla değişimi	134
Şekil 95. Test koşulları dışında PV modülünün güç ve açık devre geriliminin sıcaklıkla değişimi	136
Şekil 96. 800 ve 1000W/m ² güneş ışıınımı altında PV sisteminin hücre sıcaklığı ve açık devre geriliminin zamanla değişimi	137

Şekil 97. 800 ve 1000W/m ² güneş ışınlamı altında PV sisteminin Elektriksel Güç Üretiminin zamanla değişimi	137
Şekil 98. 800 ve 1000W/m ² güneş ışınlamı altında PV sisteminin Elektriksel Veriminin zamanla değişimi	138
Şekil 100. Farklı sıcaklık değerlerinde alınan ölçümlere göre 800 ve 1000W/m ² güneş ışınlamı altında PV sisteminin Elektriksel Güç Üretiminin hücre sıcaklığı ile değişimi ..	138
Şekil 99. 800 ve 1000W/m ² ışınlamı altında PV elektriksel veriminin hücre sıcaklığı ile değişimi.....	139
Şekil 101. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi.....	140
Şekil 102. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi.....	141
Şekil 103. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi.....	141
Şekil 104. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi.....	142
Şekil 105. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	143
Şekil 106. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	144
Şekil 107. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	145
Şekil 108. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	145
Şekil 109. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	146
Şekil 110. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	147
Şekil 111. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi.....	147
Şekil 112. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	148
Şekil 113. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında %2'lik kFDM içeren	

PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	149
Şekil 114. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %2'lik kFDM içeren	
PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	150
Şekil 115. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında %2'lik kFDM içeren	
PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	151
Şekil 116. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %2'lik kFDM içeren	
PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi	152
Şekil 117. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi.....	153
Şekil 118. 800W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi.....	153
Şekil 119. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi	154
Şekil 120. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi	154
Şekil 121. 800W/m ² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s).....	155
Şekil 122. 800W/m ² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,08m/s).....	155
Şekil 123. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s).....	156
Şekil 124. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,08m/s).....	156
Şekil 125. 800W/m ² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s).....	157
Şekil 126. 800W/m ² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,08m/s).....	157
Şekil 127. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s).....	158
Şekil 128. 1000W/m ² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,08m/s).....	158
Şekil 129. 800W/m ² güneş ışınlamı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s).....	159

Şekil 130. 800W/m ² güneş ışıınımlı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değışimi (v = 0,08m/s).....	159
Şekil 131. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değışimi (v = 0,04m/s).....	160
Şekil 132. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değışimi (v = 0,08m/s).....	160
Şekil 133. 800W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değışimi	161
Şekil 134. 800W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değışimi	162
Şekil 135. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değışimi	163
Şekil 136. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değışimi	164
Şekil 137. %2'lik kFDM-S akışkanın tüm ışıınımlı değışimleri ve giriş hızları için PVT sisteminin elektriksel veriminin zamanla değışimi	165
Şekil 138. 800W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı	166
Şekil 139. 800W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı	166
Şekil 140. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı	167
Şekil 141. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı	167
Şekil 142. 800W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları.....	168
Şekil 143. 800W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları.....	169
Şekil 144. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları.....	170
Şekil 145. 1000W/m ² güneş ışıınımlı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları.....	171
Şekil 146. %2'lik kFDM-S akışkanın tüm ışıınımlı değışimleri ve giriş hızları için ortalama yüzey	

sıcaklıkları ve kFDM-S çıkış sıcaklıkları	172
Şekil 147. kFDM konsantrasyonuna göre akışkan çıkış sıcaklıkları	173
Şekil 148. kFDM konsantrasyonuna göre ortalama yüzey sıcaklıkları	173
Şekil 149. Plaka üzerindeki 12 farklı ölçüm noktası sıcaklıklarının ortalama yüzey sıcaklığından standart sapması	174
Şekil 150. kFDM konsantrasyonuna göre plaka üzerindeki farklı sıcaklık değerlerinin ortalama yüzey sıcaklığından standart sapması	175
Şekil 151. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ısıtım şartlarında elektriksel verim	175
Şekil 152. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ısıtım şartlarında termal verim	176
Şekil 153. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ısıtım şartlarında elektriksel ve termal verimlerin değişimi	177
Şekil 154. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ısıtım şartlarında elektriksel ve termal verimlerin PVT-Sulu sisteme göre yüzde değişimleri	178
Şekil 155. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ısıtım şartlarında elektriksel ve termal verimlerin bağıl yüzde değişimleri	179
Şekil 156. kFDM konsantrasyonuna göre genel verimler	180
Şekil 157. Kararlı durumda su ve kFDM-S çözeltilerinin basınç düşümleri	181
Şekil 158. Başlangıç şartlarında su ve kFDM-S çözeltilerinin basınç düşümleri	182

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Katı-Sıvı FDM'lerin Başlıca Avantajları ve Dezavantajları (Islam, Pandey, Hasanuzzaman, & Rahim, 2016; Karthikeyan & Ramachandran, 2014)	11
Tablo 2. Parafinlerin Avantaj ve Dezavantajları (Biçer, 2009)	13
Tablo 3. Kabuk Malzemesinde Aranacak Genel Özellikler	27
Tablo 4. Çekirdek FDM'de Aranan Termal, Kinetik ve Kimyasal Özellikler (Alehosseini & Jafari, 2019; S. A. Ali, 2017; Aslan, 2014; Biçer, 2009; Browne et al., 2016; Chandel & Agarwal, 2017b; Sarı, 2011)	29
Tablo 5. Kapsülleme Yöntemlerine Göre Elde Edilebilecek Kapsül Çap Aralıkları (Z. Chen & Fang, 2011).....	32
Tablo 6. Literatürde Yer Alan Çeşitli Kabuk ve Çekirdek Malzemeleri ve Eldelerinde Kullanılan Mikrokapsülleme Yöntemleri (Z. Chen & Fang, 2011)	33
Tablo 7. Değişik Parametrelerin, Boyutsuz Sayıların Türbülanslı ve Laminer Akışlı Kapsüllenmiş kFDM-S'lerin Isı Transferine Etkileri (Qiu et al., 2017).....	37
Tablo 8. Melamin Formaldehitin Özellikleri	66
Tablo 9. Laurik Asitin Özellikleri.....	66
Tablo 10. Ön-polimer Oluşturulmasında Kullanılan Bileşen Malzemeler ve Miktarları	69
Tablo 11. Viskozite Üzerinde Etki Faktörü Analizi (Yang et al., 2019)	84
Tablo 12. Güneş Simülatörüne Ait Teknik Bilgiler.....	101
Tablo 13. Fotovoltaik Panel Teknik Özellikleri	103
Tablo 14. Isı Alıcı Plakaya Ait Teknik Detaylar	104
Tablo 15. Veri Kayıt Cihazları Teknik Özellikleri	106
Tablo 16. Piranometreye Ait Teknik Özellikler	108
Tablo 17. Fark Basınç Sensörüne Ait Teknik Özellikler	109
Tablo 18. Su Debimetresi Teknik Özellikleri	110
Tablo 19. Deney Sisteminde Kullanılan Güç Analizörünün DC Gerilim Ölçümüne İlişkin Elektriksel Özellikleri	111
Tablo 20. Gerçekleştirilen Deney Setleri.....	112
Tablo 21. Karakterize Edilen FDM ve kFDM Bilgileri.....	127
Tablo 22. PV Panelin V_{oc} ve P_{max} Değerlerinin Katalog Verilerine Göre Sıcaklıkla Değişimi.....	135
Tablo 23. Hesaplanan Belirsizlik Oranları.....	184

GİRİŞ

Günümüzde gerek fosil kaynakların hızla tükenmesi (Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan, 2017; Kara, 2020; Nguyen et al., 2021; Öner, Yeşilyurt, Yılmaz, & Ömeroğlu, 2016) ve mevcut potansiyelin hızla artan enerji ihtiyaçlarını (J. Chen, Liu, & Zheng, 2014; L. Chen, Wang, Zhao, & Zhang, 2014) uzun süre karşılayamayacak olması (Deymi-Dashtebayaz, Rezapour, & Farahnak, 2022), gerekse de fosil yakıtların olumsuz çevresel etkileri (Abdullah, Misha, Tamaldin, Rosli, & Sachit, 2018; Z. Chen & Fang, 2011) nedeniyle; yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilişkin yeni teknolojiler geliştirilmesi ve mevcut teknolojik uygulamalarda daha yüksek verim elde edilmesine yönelik araştırmalar oldukça önem kazanmaktadır (El Chaar, lamont, & El Zein, 2011; Ghodbane et al., 2022). Bu ihtiyaç, COVID-19 salgını ve devam eden süreçte küresel enerji sistemi üzerindeki etkileri (Hoang, Sandro, et al., 2021) ve sera gazı emisyonlarının azaltılması yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesine yönelik artan uluslararası çağrılar gibi son gelişmelerden sonra daha da artmıştır (Jäger-Waldau, Kougias, Taylor, & Thiel, 2020). Nitekim Atkin and Farid (2015), 2009 yılı başlarında sadece %13,5 olan yenilenebilir enerjinin dünya enerji üretimi içindeki payının, hızlı bir artış ile 2011 yılı sonu itibarıyla %19 değerine yükseldiğini bildirmiştir. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde çok çeşitli araştırmalar yapılmış ve büyük ilerlemeler kaydedilmiştir (Z. Fu et al., 2021). Kuşkusuz, güneş enerjisi hem toplam potansiyel hem de erişilebilirlik açısından (Allouche, 2016; Awad et al., 2022) hem de kurutma, nem alma, tuzdan arındırma damıtma vb. gibi enerji üretimi dışındaki uygulamaların çeşitliliği açısından (Hoang, Le, Chitsomboon, & Koonsrisook, 2021) en belirgin olanıdır (Adun et al., 2022).

Güneş enerjisinden Fotovoltaik paneller (PV) ile güç üretimi 2007 ile 2012 yılları arasındaki 5 yıllık dönemde %60 artış göstermiştir (Atkin & Farid, 2015, p. 217), ve artmaya devam etmektedir. PV ile güç üretiminin birçok avantajları bulunmakla birlikte, günümüzün en büyük çevre sorunlarının başında geldiğini rahatlıkla söyleyebileceğimiz sera gazı (CO₂) emisyonları ve buna bağlı küresel ısınma bakımından emisyon değeri 1000 gCO₂/kW h olan kömüre kıyasla 90 gCO₂/kW h gibi oldukça düşük bir değer sunuyor olması, belki de en önemli avantajıdır. (Atkin & Farid, 2015, pp. 217–218)

Güneş enerjisi, dünyanın enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılama potansiyeline sahiptir (Al-Waeli, Kazem, Chaichan, & Sopian, 2019), özellikle yakın geleceğin akıllı şehirlerindeki akıllı enerji sistemlerine (Hoang, van Pham, & Nguyen, 2021) dâhil

edildiğinde, 2030 yılına kadar dünyanın elektrik arzının karşılanmasında çok önemli bir rol oynayacağı tahmin edilmektedir (Z. Fu et al., 2021). Ayrıca, güneş sistemleri:

- Sessiz bir çalışma rejimine sahip olması (Messenger & Ventre, 2003),
- Hiçbir istenmeyen atık ya da zararlı madde üretmemesi ve emisyon oluşturmaması (Chandel & Agarwal, 2017a),
- Yüksek performans ve güvenilirlik sunması (Al-Waeli, Kazem, et al., 2019),
- 20 ila 30 yıl gibi tatminkâr bir ekonomik ömre sahip olması (İbrahim, Othman, Ruslan, Mat, & Sopian, 2011),
- İşletme ve bakım maliyetlerinin düşük olması (Agyekum, PraveenKumar, Alwan, Velkin, & Adebayo, 2021; Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan, 2017; Öner et al., 2016),

gibi avantajlar sunmaktadır.

Bununla birlikte, çok geniş coğrafyalarda büyük potansiyellerde mevcut olan (Awad et al., 2022) bu kaynağın;

- tekdüze olmayan bir soğutma ihtiyacı olduğundan yenilikçi emici tasarımlarına ihtiyaç olması (Abdullah et al., 2018),
- verimlerinin oldukça düşük olması nedeniyle geri ödeme sürelerinin ekonomik ömürlerine oranla uzun olması (Al-Waeli, Kazem, et al., 2019),
- imalat ve ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olması (Cartmell, Shankland, Fiala, & Hanby, 2004),
- mevcut bina ve sair yapılara entegre edilebilmek için uygun şekil ve yapıda olmamaları nedeniyle kurulum alanlarının sınırlı olması,
- ayrık kurulumlar için geniş alanlara ihtiyaç duyması ve bunun her zaman mümkün olmaması (Al-Waeli, Kazem, et al., 2019; Öner et al., 2016),

gibi önemli bazı handikapları da bulunmaktadır (Öner et al., 2016).

Bu sorunları ortadan kaldırmak için sürekli araştırmalar yapılmakta ve yeni teknolojiler geliştirilmekte ve iyileştirmeler sağlanmaktadır. Güneş enerjisinden faydalanmada güneş pili ve güneş paneli (kolektör) olmak üzere iki temel sistemden bahsedebiliriz (Fudholi et al., 2013; Said et al., 2022; H. A. Zondag, 2008).

Güneş ışınlarının sahip olduğu foton enerjisini elektrik enerjisine çeviren, uygulama alanı ve elde edilen enerjinin kullanım çeşitliliği bakımından daha endüstriyel bir sistem olarak fotovoltaik (PV) sistemler öne çıkmaktadır. PV sistemleri, sürdürülebilirlik parametreleri olarak da değerlendirilen ve ilk yatırım maliyetini de doğrudan etkileyen bir dizi olumsuz çevre ve sistem parametrelerinin etkisi altındadır. Bu parametreler arasında en önemlisi ise hiç şüphesiz güneş enerjisinin tamamen elektrik enerjisine çevrilememesi nedeniyle artık enerjinin ünite gövdesinde ısı enerjisi şeklinde birikmesi ve meydana gelen ısınmanın neden olduğu hasar ve düşük verimliliğidir.

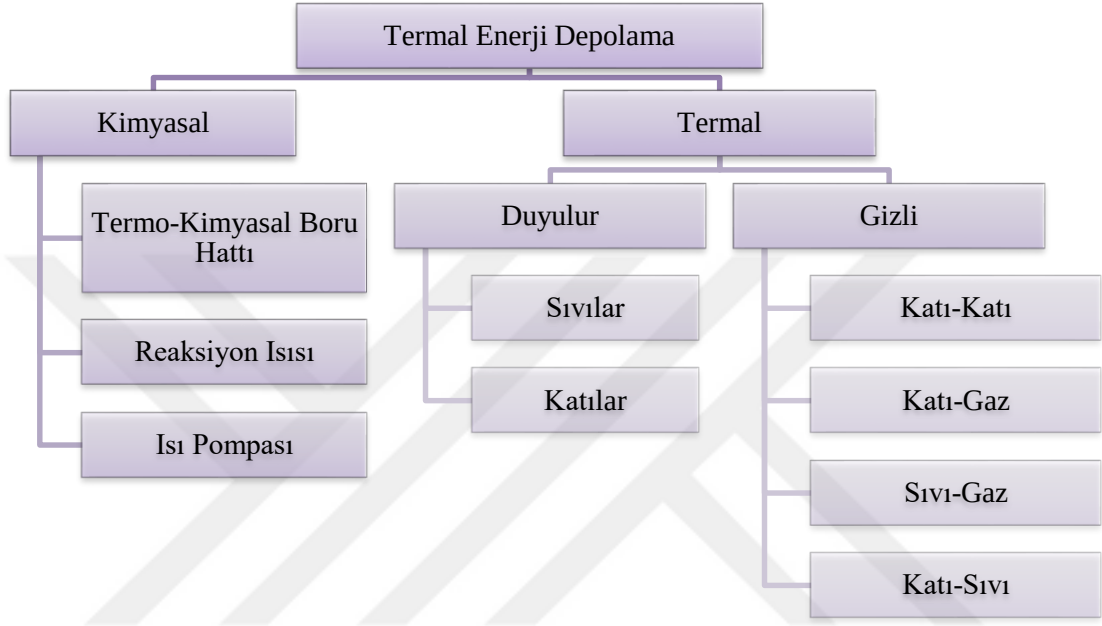
Yani, doğası gereği PV sistemler gelen ışıının tamamını elektriğe çeviremez ve güneş enerjisinin fazla kısmı panel gövdesinde ısı olarak birikir (Brahim & Jemni, 2017; Yeşilyurt, Ömeroğlu, Çomaklı, & Nadaroğlu, 2018), bu da dönüştürme performansının (Agyekum, PraveenKumar, Alwan, Velkin, Shcheklein, & Yaqoob, 2021; H. Chen et al., 2017) yanı sıra servis ömrünün düşmesine yol açar (Öner et al., 2016). Dolayısıyla, PV'lerin soğutulmaya ihtiyacı vardır. PV hücrelerinin aşırı ısınmasını engelleyerek verimlerini ve ekonomik ömürlerini uzatmak ve buradan çekilen ısı enerjisinden faydalanmak üzere ilk kez 1970'li yıllarda fotovoltaik termal bileşik (PVT) sistemler ortaya çıkmış ve problemin bir ölçüde giderilebilmesi (Santbergen, Rindt, Zondag, & van Zolingen, 2010) noktasında bu güne kadar büyük gelişme kaydedilmiştir (Fudholi et al., 2013).

Bugün güneş pillerinin çeşitli akışkanlar kullanan termal sistemler ile birleşiminden oluşan (Daghigh, Ruslan, & Sopian, 2011) PVT sistemleri oldukça geniş bir uygulama alanına sahip olup soğutma yöntemine, akışkanına ve tasarımına göre geniş bir yelpazede çeşitlilik kazanmıştır (Gelis, Ozbek, Celik, & Ozyurt, 2022). PVT sistemin PV ünitesini eş zamanlı olarak soğutması sayesinde, ısınmayla birlikte artan gövde sıcaklığına bağlı olarak elektrik direncinin yükselmesi ve akabinde meydana gelen verim düşüşü büyük ölçüde engellenebilmekte ve güneş pilinin optimum çalışma sıcaklığında sunduğu en yüksek verim değeri bu çalışma sıcaklığının sabit tutulması sayesinde büyük ölçüde korunabilmektedir (Özakın, 2016). Öte yandan iyi bir soğutma sistemi sadece PV'lerin verimini ve ömrünü uzatmakla kalmayıp aynı zamanda PVT sistemlerinin temel fikrini oluşturan ikincil termal sistemden elde edilecek faydalı ısı işini de artıracaktır.

PVT sistemlerinden ısı çekilmesinde, gazlar, soğutucu akışkanlar ve çeşitli sıvılar kullanılmaktadır. Çeşitli özelliklerinden dolayı hava ve su en çok kullanılan akışkanlar olmakla birlikte, bu doğal akışkanlar amaca yeterince hizmet etmediğinden, daha yüksek performans gösteren ısı transfer akışkanları (ITA) geliştirilmesine yönelik halen devam eden bir ilgi bulunmaktadır. Çeşitli katkılar ile özgül ısı kapasitesinin ve ısı transfer özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır (Sardarabadi, Passandideh-Fard, Maghrebi, & Ghazikhani, 2017). PVT sistemlerinin genel verimliliğini, yani PV sisteminin elektriksel verimliliğini ve entegre kolektör sisteminin termal verimliliğini artırmak için, araştırmacılar yeni ITA'lar geliştirmek için çalışmaktadırlar.

Sıvı soğutmalı PVT sistemler bu açıdan gün geçtikçe daha geniş uygulama alanı bulmaktadır. PVT-su sistemlerinin geleneksel PV'ye kıyasla elektrik verimliliğinde yaklaşık% 15 artış sağladığı (Gelis et al., 2022) gösterilirken, yeni ve yüksek performanslı ITA'lar

geliştirme arayışı ivme kazanmaktadır (Sardarabadi et al., 2017). Ana fikir her zaman atık ısıyı geri kazanmak ve mümkün olduğunca az pompalama gücü karşılığında verimlilik düşüşlerini önlemek, ayrıca ITA ve ilgili sistem bileşenlerine daha az harcama yapmak olmuştur. Bu bağlamda, yeni ITA yüksek özgül ısı kapasitesine sahip olmalı, ucuz ve hazır olmalı ve büyük pompalama gücü gerektirmemelidir. Bugüne kadar yapılan çok sayıda araştırma sonucunda su bazlı özel amaçlı sıvılar oldukça iyi alternatifler olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 1. Termal enerji depolama sistemleri (Sarbu & Sebarchievici, 2018; Atul Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009)

Termal enerji depolama, **Şekil 1**'de gösterildiği gibi, PVT sistemlerinde aktif veya pasif bir soğutma (Browne, Norton, & McCormack, 2015) veya bunların etkili bir (Agyekum, PraveenKumar, Alwan, Velkin, Shcheklein, & Yaqoob, 2021) uygulamak için kullanılabilecek çeşitli alternatif uygulamalara sahip kimyasal veya termal yollarla olabilir.

Kapasite, kurulum yeri ve istenen termal verim gibi sistem özelliklerine bağlı olarak, musluk suyundan farklı kimyasalların su bazlı solüsyonlarına kadar çeşitli ITA'lar enerji depolama ve aktarımı için kullanılmıştır. TA'lara kıyasla daha yüksek termal iletkenlikleri nedeniyle, nanoakışkanların ITA olarak kullanımı yaygınlaşmış ve çoğalmıştır. Şu anda, nanoakışkanlar farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı eşanjörlerinde ve PVT sistemlerinde kullanımları da artmaktadır. Ancak nanoakışkanlar performans ve uygulanabilirlik açısından farklı özellikler sergilemektedir. PVT sistemlerde kullanılabilecek en iyi nanoakışkanın belirlenmesine yönelik pek çok araştırma vardır (Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019; Al-Waeli, Chaichan, Sopian, & Kazem, 2019).

Tek fazlı akışkan sistemleri daha az enerji yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle yüksek debilerde sirkülasyon gerektirir. Bu da dolayısı ile gerekli pompalama gücünü artırmakta ve sistemin soğutulması ile elde edilen verim artışını anlamsız kılmaktadır. Duyulur ısı içeriğine ek olarak gizli füzyon ısısı sağlayarak ITA'nın termal kapasitesini arttırmanın bu soruna çözüm olacağı düşünülmüştür (V. D. Cao, Salas-Bringas, Schüller, Szczotok, & Kjønksen, 2019). Ancak akış sırasında ITA'nın katı-sıvı veya sıvı-gaz faz değişimine uğraması pratik olarak bazen mümkün olmamakta yahut önemli sorunlara neden olduğu için uygulanamamaktadır. Bu sebeple, Faz değişiminin akışkanın yalnızca bir kısmında olması ve faz değişiminin neden olacağı sorunların ortadan kaldırılabilmesi için taşıyıcı olarak kullanılan temel akışkanlara faz değişim malzemeleri (FDM) katılması düşünülmüştür. Böylece, gizli ısıdan faydalanmak suretiyle aynı sıcaklık aralığında daha fazla ısı çekmek mümkün olacaktır. Görüldüğü üzere, bir ortamın birim kütlesi/hacmi içinde depolanan ısı miktarı, yani depolama yoğunluğu, gizli ısı depolaması durumunda (ΔT sıcaklık farkı aralığında faz değişiminin gerçekleşmesi şartıyla), duyulur ısı depolamaya kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir. Birim hacim başına depolanan enerji miktarındaki bu artış, 5 ila 14 kat kadar yüksek olabilir (Atul Sharma et al., 2009; Yu et al., 2018). Ayrıca, termal iletkenlik ve depolama kapasitesi gibi bazı özellikler, FDM'ye nanopartikül eklenmesiyle daha da artırılabilir (Tarish & Alwan, 2017).

Özellikle son yıllarda teknolojiye kaydedilen gelişmeler, özellikle nanoteknolojideki gelişmeler sayesinde, FDM'lerin ITA'lara dâhil edilmesi, daha iyi özelliklere sahip ITA'lara olan ihtiyacı karşılamaya hizmet edecek bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Yeşilyurt, Nadaroğlu, & Çomaklı, 2020). FDM'nin dâhil edilmesiyle, duyulur ısı depolamaya ek olarak gizli ısı depolama da mümkün hale gelir ve bu da ITA'nın termal depolama kapasitesini artırır. Böylece aynı ısı transfer hızı için daha düşük debilerde sirkülasyon yapmak yeterlidir (Alva, Lin, Liu, & Fang, 2017; Salunkhe & Shembekar, 2012).

Faz değişimi olan bir ortamdaki ısı transfer mekanizması doğrusal değildir ve oldukça karmaşıktır, bu nedenle faz değiştiren bir termal sistemin performansının tam olarak değerlendirilmesi zordur (Regin, Solanki, & Saini, 2008) ve daha fazla araştırma ve inceleme gerektirir. Bir faz değişim sisteminin toplam depolama kapasitesi ise duyulur ve gizli ısı depolarının toplamına eşittir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Atul Sharma et al., 2009):

$$Q_{toplam} = Q_{duyulur} + Q_{gizli}$$

$$Q_{toplam} = \int_{T_i}^{T_e} mC_p dT + \psi m \Delta h \int_{T_e}^{T_o} mC_p dT \quad (1)$$

Burada, ψ FDM'nin sıvı içindeki yüzde kesridir. Faz değıştirme işleminin süresi ve sıcaklık aralığı, FDM'nin kütlesine, gizli ısı kapasitesine ve termal iletkenliğine ve ayrıca ısı transferini iyileştiren diğer faktörlere bağılı olarak değışir (Browne, Norton, & McCormack, 2016).

Bununla birlikte, faz değışim malzemelerinin ısı transfer akışkanlarında tam olarak uygulanması, boruların tıkanması ve düşük ısı iletkenliği gibi çeşitli operasyonel problemler nedeniyle ideal olmaktan uzaktır. Bu problemler önceleri faz değışim malzemelerinin kullanılabilirliğini oldukça sınırlandırmış yahut ertelemiştir. Teknolojinin gelişmesi ve problemlere getirilen yeni yaklaşımların bir sonucu olarak geliştirilen mikro-/nano-kapsülleme teknolojisi FDM'lerin kapsüller içerisine alınarak taşıyıcı akışkanlara katılmasını sağlayarak bu operasyonel problemlerin büyük ölçüde çözülmesine imkân sunmuştur.

kFDM'ler ve bunların ITA'larda katılması ile hazırlanan ve kFDM Slurry (kFDM-S) olarak adlandırılan özel akışkanlar hızlı bir şekilde yaygınlaşmış ve ivme kazanmıştır. FDM'lerin kapsüllenmesi, hem ısı transfer yüzey alanını (yüzey hacim oranı) artırarak hem de FDM reaktivitesini azaltarak (Farid, Khudhair, Razack, & Al-Hallaj, 2004) ve hacim değışiklikleri ve düşük termal iletkenliğin neden olduğu diğer bazı sorunları ortadan kaldırarak (Jegadheeswaran & Pohekar, 2009) performans iyileştirmeleri sağlamaktadır. Ayrıca kapsülleme sayesinde fazlar ısı transfer işlemi sırasında daima birbirlerinden ayrırırlar (Alva et al., 2017), böylece bir kFDM-S, mikro düzeyde iki fazlı akışın tüm avantajlarını sunarken, akışın kendisi makro düzeyde tek fazlı kalır (Alvarado, Marsh, Thies, et al., 2007, pp. 1771–1772).

Ancak bazı durumlarda, FDM aşırı soğumaya maruz kalabilir ve bu durumun önlenmesi için belirli bir konsantrasyonda uygun bir çekirdekleştirici ajan kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Alvarado, Marsh, Sohn, Phetteplace, & Newell, 2007). Ayrıca kFDM, TA içinde çökelme eğilimindedir, yani fiziksel olarak kararlı değildir, bu da kFDM-S'nin termal iletkenliğinde, dolayısıyla ısı transferinde bir azalmaya neden olur. Parçacıkların çökmesini önlemek/uzatmak için yüzey aktif maddelerin kullanılması gerekir. Başka bir deyişle, nano-akışkanın kararlılığı, emülsiyonda asılı nano-parçacıkların çökmesini yavaşlatmak için kullanılan yüzey aktif maddeye bağılıdır. Farklı yüzey aktif madde türlerini test ettikten sonra, kFDM-S'nin yoğunluğunun, viskozitesinin ve termal iletkenliğinin, kullanılan yüzey aktif maddenin tipinin değışmesinden önemsiz ölçüde etkilendiği ve yüzey aktif maddelerin daha fazla eklenmesinin yoğunluk ve viskozitede çok hafif bir artışa ve kFDM-S'nin termal

iletkenliğinde küçük bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir (Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019).

Kapsülleme sürecinin çok karmaşık, yorucu ve maliyetli olması nedeniyle en başta uygulamaların laboratuvar ölçeğinde kalması gerekiyordu. Ancak zaman içinde yöntemler çeşitlenmiş, uygulama kolaylığı ve maliyet açısından da kolaylaşmıştır (Nadaroğlu, Yeşilyurt, & Çomaklı, 2022). kFDM'nin bir ITA'ya dâhil edilmesi, faz değişiminin sabit sıcaklıkta gerçekleşmesi nedeniyle çekilen ısı miktarının nispeten daha düşük debilerde artırılabilmesine olanak tanır.

Son yıllarda bu alanda yapılan ve sayıları giderek artan çalışmalar sonucunda kapsülleme teknolojileri sürekli gelişmekte, uygulama sahası genişlemekte ve kullanılan malzemeler çeşitlenmektedir. Günümüzde, piyasada ticari olarak üretilen kapsüllenmiş faz değişim malzemeleri (kFDM) bulunmaktadır (Alva et al., 2017) ve birçok uygulama için tedarik edilerek kullanıma uygundur. Bunun bir sonucu olarak kapsüllenmiş faz değişim malzeme çözeltileri (kFDM-S), PVT sistemlerinin soğutulmasını da içeren geniş bir uygulama sahasında ITA olarak kullanılmakta ve bu alanda sayısı giderek artık bilimsel çalışmalar hızla artarak devam etmektedir. Hâlihazırda kFDM-S'ler transfer hızını artırmak için geliştirilmiştir ve ısıtma, soğutma, klima, ısı eşanjörleri ve havalandırma (Tyagi, Kaushik, Tyagi, & Akiyama, 2011; P. Zhang, Ma, & Rz, 2010) gibi çeşitli alanlarda uygulama bulmuşlardır (Barreneche, Delgado, Martínez, Fernández, & Cabeza, 2014; Said et al., 2022). Bununla birlikte, PVT sistemlerinde kullanımları nispeten yenidir ve PV hücrelerinin soğutulmasında (Gschwander & Schossig) ve güneş kolektörlerinde (Baronetto, Serale, Goia, & Perino, 2014) bugüne kadar çok az araştırma yapılmıştır (Jia, Zhu, & Fang, 2020).

Araştırmanın Konusu ve Önemi

FDM'lerin güneş enerjisi uygulamalarında kullanımı bilinen bir uygulama olup giderek yaygınlaşmakla birlikte, FDM'lerin kapsüllenenerek, taşıyıcı akışkan ile ve sistem bileşenleri ile etkileşime girmesinin engellenmesi yahut toksik ve zararlı etkilerinin bertaraf edilmesi gibi avantajlar kazandırılması yaklaşımı nispeten yenidir. Kapsüllenmiş FDM'ler kullanılarak hazırlanan sulu çözeltilerin, hava ya da su gibi geleneksel taşıyıcı akışkanlar yerine kullanılması; geliştirme ve uygulama aşamalarında birçok engelin aşılmasını, çok sayıda parametrenin etkilerinin test ve tespit edilmesini gerektiren meşakkatli bir süreçtir. Çok disiplinli bir doğası da bulunan bu araştırma konusunun PVT literatürüne katkısı önemlidir.

Bu çalışma Türkiye'de PVT-sulu sistemlerin soğutulmasında kFDM-S kullanıldığı ilk doktora tez çalışmasıdır.

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı; kurulmuş olan PVT sulu sistemin farklı parametreler için performansının belirlenmesi ve karşılaştırma verisi olarak saklanması ardından, iş yapan akışkan olarak farklı oranlarda hazırlanan kFDM içeren ITA'ların kullanıldığı deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırılması yoluyla, kullanılan kFDM-S'nin, sistemin elektriksel ve termal verimine nasıl etki ettiğinin ve bu etkinin çözelti karışım oranı ile ilişkisinin tespit ve tayin edilmesinden ibarettir.

kFDM sentezi, karakterizasyonu ve termal özelliklerinin tayini de tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Faz Değişim Malzemeleri (FDM)

FDM kavramı ve genel özellikler

PVT sistemlerinde elektrik enerjisi ve termal enerji eş zamanlı olarak elde edilir, ancak bu iki enerjinin faydalı işe dönüştürülmesi eş zamanlı olarak gerçekleşmeyebilir, özellikle termal enerji kazanımı için söz konusu olan bu durumda, elde edilen enerjinin depolanması gerekir.

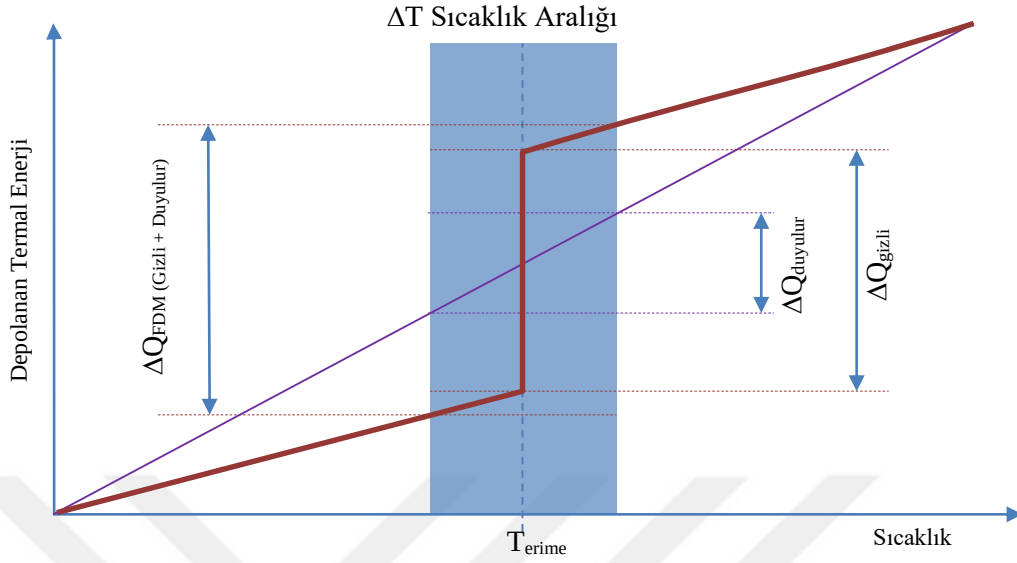
Termal enerji, termokimyasal ısı, duyulur ısı veya gizli ısı olarak depolanabilir (Aslan, 2014). Termokimyasal ısı depolaması tersinir endotermik/egzotermik kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi temeline dayanmakta olup, çoğu durumda elverişli olmamaktadır. Duyulur ısı şeklinde depolamada ise kullanılan madde tersinir olarak ısı alıverişinde bulunduğundan özgül ısı kapasitesi yüksek, çalışma ömrü uzun, korozyon veya toksik olmayan (Aslan, 2014; Biçer, 2009; Sarı, 2011) maddeler kullanılması gerekli olup, depolama süresince izolasyon ve insülasyon gereklidir. Gizli ısı yahut faz değişim ısısı olarak depolama ise, enerjinin sabit faz geçiş sıcaklığında madde içerisinde depo edilmesi şeklinde tanımlanır.

FDM malzemeler ise sabit sıcaklıkta ısı alışı-verişi yapabilme ve aldığı enerjiyi gizli ısı şeklinde depolama özellikleri (Barreneche, Martínez, Šumiga, Boštjan, Cabeza, & Fernández, 2015; Konuklu, 2008) nedeniyle hem daha yüksek enerji depolama yoğunluğu (Yu, Chen, & Yang, 2021; P. Zhang et al., 2010) sunmakta hem de özellikle optimum bir çalışma sıcaklığının korunması (R. K. Sharma, Ganesan, Tyagi, Metselaar, & Sandaran, 2015) gereken sistemlerde önemli avantajlar sağlamaktadır.

Hem kararlı bir çalışma rejimi elde etmek (S. Chen, Qiu, Liu, & Xing, 2015) hem de çekilen ısıнын depolanabilirliğini sağlamak için sabit sıcaklıkta ısı çekerek (Atul Sharma et al., 2009) gizli ısı şeklinde depolayan faz değiştiren malzemelerin (FDM [PCM]) güneş enerji sistemlerinde kullanılması fikri çok yeni olmamakla birlikte, fazlaca çalışılmış bir konu da değildir.

Şekil 2'deki gibi bir ısı transferi sürecinde; ilk sıcaklık (T_i) ile son sıcaklık (T_s) arasındaki bir erime sıcaklığında (T_e) faz değişimi olması durumunda, toplam transfer edilen toplam ısı miktarı, faz değişimi olmayan bir süreçten faz değişim gizli ısısı kadar daha fazladır ve Denklem 2 eşitliği ile elde edilir (Acar, 2014).

$$\int_{T_e}^{T_i} mC_p dT + mH_e + \int_{T_s}^{T_e} mC_p dT = m [H_e + C_k(T_e - T_i) + C_s(T_s - T_e)] \quad (2)$$



Şekil 2. ΔT sıcaklık farkında duyulur ve gizli ısı depolama sistemleri arasında depolanan ısı miktarının karşılaştırması (Agyekum, PraveenKumar, Alwan, Velkin, & Adebayo, 2021; Browne, Lawlor, Kelly, Norton, & Cormack, 2015; Browne, Norton, & McCormack, 2015; Reyna, 2018; Yeşilyurt & Çomaklı, 2023)

Çevre sıcaklığı FDM malzemenin faz değişim sıcaklığına ulaştığında, FDM faz değiştirmeye başlar ve bu faz değişim işlemi boyunca, faz değişiminin yönüne bağlı olarak çevresinden sürekli olarak ısı çeker yahut çevreye ısı yayar. Faz değişimi sırasında FDM tarafından soğurulan veya yayılan ısı, maddeyi o fazda sahip olduğu fiziki halde tutan kimyasal yapı ile ilişkili olup faz değişim boyunca duyulur ısıda, dolayısı ile malzemenin sıcaklığında bir değişim olmaz. FDM malzemeler, ortam sıcaklığında kayda değer düzeyde bir değişim olmaması durumunda, büyük miktarda gizli ısı soğurma ve yayma özellikleri ile ısı depolama ve sıcaklık stabilizasyonunda etkin çözüm alternatifleri sunmaktadır (Aslan, 2014; Barreneche, Martínez, et al., 2015).

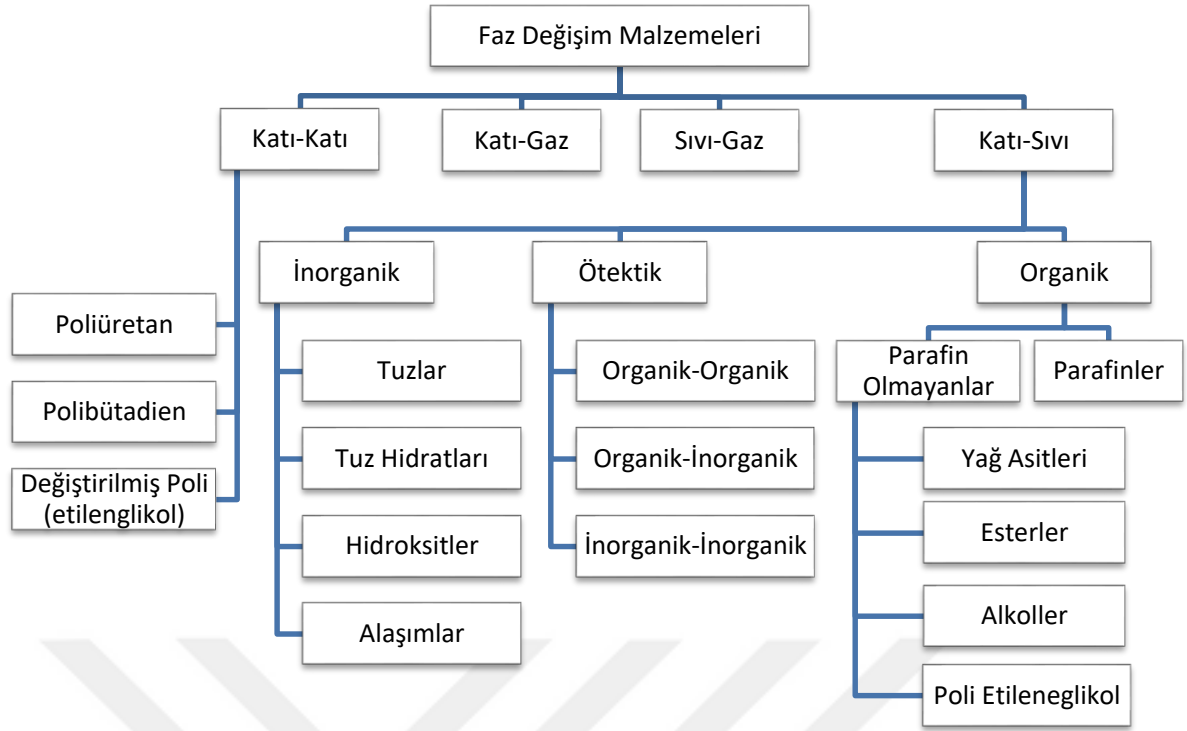
-5 °C ila 150 °C gibi geniş bir aralıkta füzyon enerjisine sahip FDM malzemeler bulunmaktadır (Kenisarin & Mahkamov, 2007). Öte yandan duyulur ısı depolama sistemlerine kıyasla FDM malzemeler birim hacim başına depolanabilen enerji miktarını 5 ila 14 kat artırmaktadır (A. Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009). Ancak kFDM'lerin gizli ısı depolama kapasitesinden tam olarak faydalanılabilmesi için FDM malzemesinin amaca hizmet etmesini temin edecek bazı termodinamik, kinetik, fiziki ve kimyasal özelliklere sahip olması gerekir.

Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması

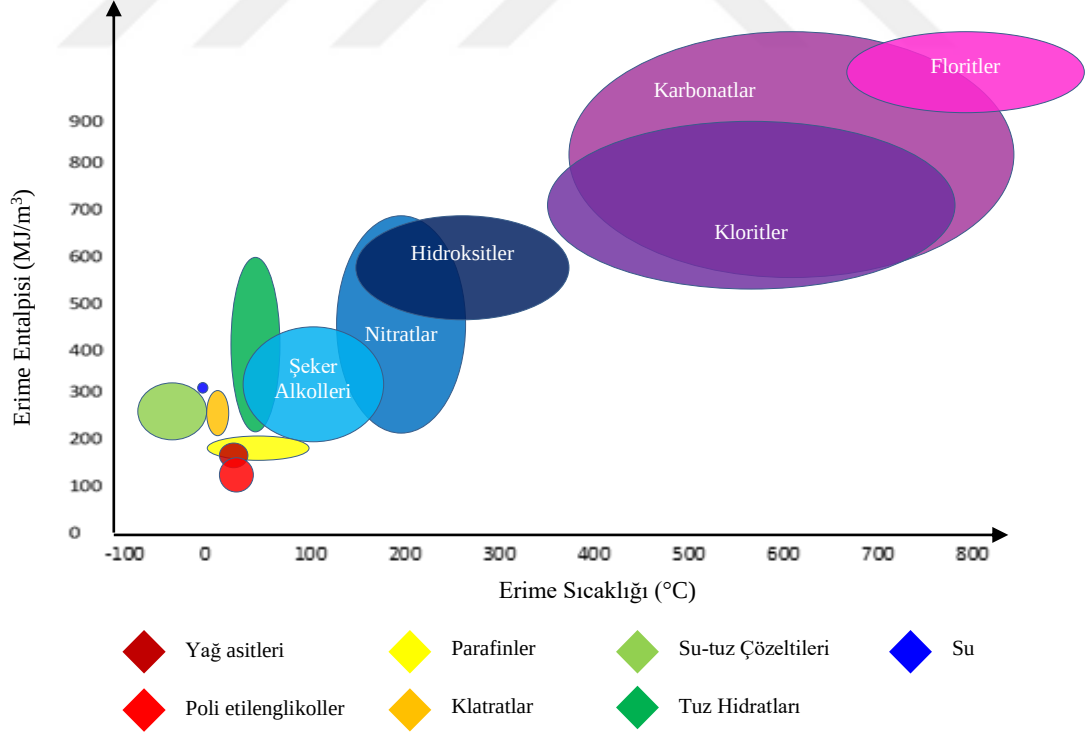
Genel olarak, faz değişim malzemeleri Şekil 3’de de gösterildiği şekliyle, katı-sıvı, katı-gaz, katı-katı ve sıvı-gaz olmak üzere dört tip olarak sınıflandırılır. Faz değişimi gizli ısı miktarı, fazın katıdan gaza doğru hareket etmesiyle artar. Bu bakımdan, katı-sıvı FDM’ler, katı-katı FDM’lerden (Alehosseini & Jafari, 2019) daha yüksek, ancak katı-gaz ve sıvı-gaz FDM’lerinden daha düşük gizli ısıya sahiptir. Bununla birlikte, daha yüksek gizli ısılarla sahip olmasına rağmen, büyük hacim değişimi ve basınç değişimi, katı-gaz ve sıvı-gaz FDM’lerinin uygulanabilirliğini büyük ölçüde sınırlar (W. Su, Darkwa, & Kokogiannakis, 2015), bu da katı-sıvı FDM’leri daha elverişli hale getirir. Dolayısıyla, katı-sıvı faz değişim malzemeleri daha fazla tercih edilmektedir (A. Sharma et al., 2009). Katı-sıvı faz değişim malzemeleri ise Organik, İnorganik ve Ötektik olmak üzere üç alt sınıfa ayrılmaktadır.

Tablo 1. Katı-Sıvı FDM’lerin Başlıca Avantajları ve Dezavantajları (Islam, Pandey, Hasanuzzaman, & Rahim, 2016; Karthikeyan & Ramachandran, 2014)

Tür	Avantajları	Dezavantajları
Organik	·Geniş sıcaklık aralığında mevcuttur ·Düşük veya süper soğutma yok ·Yüksek gizli ısı ·Kendi kendine çekirdeklenme özelliği ·uyumlu erime ·İyi fiziksel/kimyasal kararlılık ·İyi termal kararlılık ·Reaktif olmayan ·geri dönüştürülebilir ·Diğer malzemelerle iyi uyumluluk	·Düşük hacimsel ısı depolama kapasitesi ·Düşük termal iletkenlik ·Faz geçişinde büyük hacim/yoğunluk değişimi ·Yanıcı
İnorganik	·Daha büyük faz değişim entalpisi ·Yüksek termal iletkenlik ·Yüksek hacimli gizli ısı depolama ·Keskin erime noktası ·Faz geçişinde düşük hacim/yoğunluk değişimi ·Yanıcı değil ·Kolay tedarik / Bol ·Uygun maliyetli	·Süper soğutma ·Hızlı faz ayrımı ·Faz ayrımı ·Termal kararlılık eksikliği ·Tutarsız erime ·Aşındırıcı
Ötektik	·Keskin erime noktası ·Yüksek hacimsel ısı depolama yoğunluğu ·Erime veya donmada ayrışma yok	·Termo-fiziksel özelliklerle ilgili yetersiz veri



Şekil 3. Faz değıştiren malzemelerin sınıflandırılması (Bruno, Belusko, Liu, & Tay, 2015; Fong, 2020; Karellas, Roumpedakis, Tzouganatos, & Braimakis, 2018; R. K. Sharma et al., 2015; W. Su et al., 2015; Yeşilyurt, Nadaroğlu, & Çomaklı, 2019)



Şekil 4. Erime sıcaklıkları ve entalpilerine göre faz değışim malzemeleri (Biçer, 2009; Bruno et al., 2015; Konuklu, 2008; Yeşilyurt et al., 2019; A. H. Zondag, Smidt, Veldhuis, & Boer, 2016)

Organik faz değişim malzemeleri

Parafinler

Saf parafinler sadece alkanlardan oluşur ve alkanın zincir uzunluğına bağlı olarak düz zincirli (n-alkan) ya da dallanmış (izo-alkan) olabilir. C_nH_{2n+2} genel kimyasal formülünde bulunan ve büyük oranda ağır hidrokarbonlardan oluşan Parafinlerin yapısında bulunan karbon sayısı, parafinin normal şartlar altında bulunduğu fazın belirleyicisidir. Beş karbona kadar gaz, beş ile on beş karbon arasında sıvı, daha yüksek karbonlu olması durumunda ise wax halinde katı formda bulunurlar. Alkanların erime sıcaklıkları ve erime gizli ısıları karbon sayısının artmasıyla artar. C14-C40 aralığındaki alkanların erime noktaları 6-80 °C aralığındadır (Biçer, 2009).

Tablo 2. Parafinlerin Avantaj ve Dezavantajları (Biçer, 2009)

FDM	Avantajları	Dezavantajları
Parafinler	Faz ayrımı oluşmaz Kimyasal olarak kararlıdır Aşırı soğuma eğilimi göstermez bu nedenle çekirdekleştirici madde gerekmez Yüksek erime gizli ısı Korozif ve toksik değildir Düşük maliyete sahiptir Kolay temin edilir Düşük buhar basıncına sahiptir Erime esnasında hacim değişimi küçüktür Erime noktaları geniş bir aralık içindedir Düşük buhar basıncına sahiptir Faz ayrımı oluşmaz	Termal iletkenliği düşüktür Yanııcıdır Sabit bir erime sıcaklığına sahip değildir

Parafinler en yaygın olarak kullanılan FDM malzemesidir. Termal iletkenliğinin diğer alternatiflere kıyasla kısmen düşük olması ve yaklaşık 8.000 TL/ton gibi yüksek maliyetine rağmen daha cazip özellikleri sayesinde sıkça tercih edilmektedir. Özellikle, termal çevrimlerdeki kararlılığı gibi üstün termal özellikleri parafinleri, günlük olarak kayda değer sıcaklık farkları arasında ısınıp soğuyan PV ve PVT gibi sistemlerde en uygulanabilir FDM yapmaktadır (Atkin & Farid, 2015, p. 218; Barreneche, Martínez, et al., 2015; Hale, Hoover, & O'Neill, 1971).

İhmal edilebilir derecede aşırı soğuma, kimyasal kararlılık, yüksek gizli ısı, düşük buhar basıncı, faz ayrışması olmaması, kendiliğinden çekirdekleşme ve ticari olarak var olması gibi, bir termal depolama malzemesinde aranan çok sayıda özelliğe sahip olmakla birlikte; faz değişimi sırasında büyük hacimsel değişim olması ve termal iletkenliklerinin düşük olması başlıca dezavantajlarındandır.

Parafin olmayanlar

Esterler, yağ asitleri, glikoller ve alkoller gibi çok çeşitli organik faz değıştiren malzemeler bu gurup içinde yer alır. Aşırı soğuma olmadan mükemmel (erime / donma) karakteristikleri sergilerler .

Parafin olmayan FDM'ler genellikle $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ formülasyonunda bulunan asit formunda bulunmaktadır. Yağ asitleri, esasen kirlitici olmayan, bitkisel ve hayvansal kaynaklardan elde edilmektedir ve kaprilik, kaprik, laurik, miristik, palmitik ve stearik olmak üzere altı ana gurup altında toplanmaktadır. Birbirlerine çok benzer özelliklere sahip olan parafinlerden farklı olarak, yağ asitleri gurubu içindeki her bir malzeme kendine has farklı özelliklere sahiptir. Parafinlere kıyasla, yağ asitleri mükemmel faz değışim (katı-sıvı) özellikleri gösterir, ancak parafinlerden yaklaşık üç kat daha pahalıdır (R. K. Sharma et al., 2015).

Parafin olmayan organik faz değışim malzemeleri arasında özellikle yağ asitleri, parafinler gibi çok benzer karakteristiklere sahiplerdir. Yenilebilir bitkisel ve hayvansal kaynaklı trigliserit yağlardan elde edilmeleri sebebiyle bu adı alan yağ asitleri, parafinlerde olduğu gibi, sahip oldukları karbon sayısı arttıkça viskoziteleri de artar ve yüksek karbon sayılarında katı halde bulunurlar. Zayıf asit özelliğı gösteren düşük karbonlu yağ asitleri suda çözünmektedir ve sıvı fazda, polimer veya kil gibi bir adsorban maddenin yapısında tutunabilecek kadar yüksek yüzey gerilimine sahiptir. Ayrıca, yağ asitleri, koroziif olma, aşırı soğuma eğilimi ve kararsızlık gibi olumsuz özelliklerin hiç birini taşımadığı gibi özellikle enerji depolama malzemelerinde aranan tüm termodinamik, kinetik, kimyasal ve termal kriterlere sahiptirler (Biçer, 2009).

İnorganik faz değışim malzemeleri

İnorganik FDM'lerin başlıca türü tuz hidratlarıdır. Koroziif olma, aşırı soğuma eğilimleri ve kararsızlık gibi olumsuz özellikleri olmasına rağmen, yüksek erime gizli ısısı, yüksek su muhtevası, ucuz ve yanıcı olmama gibi özellikleri nedeniyle caziptirler. Olumsuz özelliklerinin giderilmesine yönelik çalışmalar bulunmakla birlikte, genellikle alternatif olarak organik FDM'ler tercih edilmektedir.

Ötektik faz değışim malzemeleri

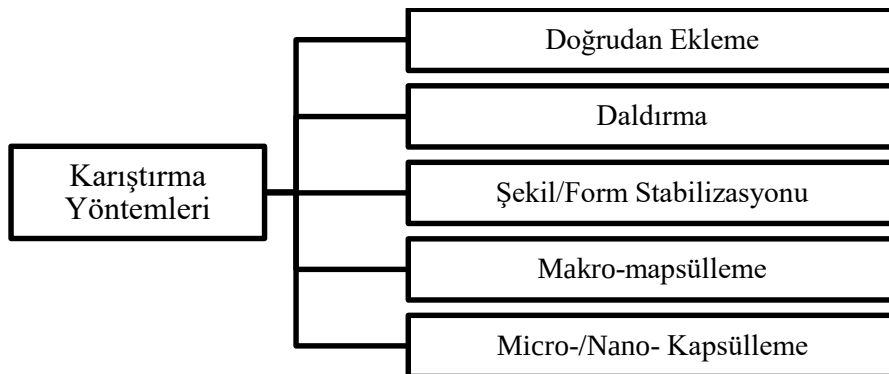
Ötektikler, iki veya daha fazla bileşenden oluşan faz değışim malzemeleridir, yani iki veya daha fazla kimyasal maddeden oluşan karışımlardır.

Bileşen tiplerine göre, organik-organik, inorganik-inorganik ve organik-inorganik karışımlar olarak sınıflandırılırlar. Ötektiklerin arkasındaki fikir, belirli bir uygulama için gerekli olan erime sıcaklığını elde edebilmektir. Ötektiklerin bileşimi o kadar esnek ki, 25-832 °C gibi geniş bir aralıkta erime sıcaklığında ve organik FDM ile benzer bir gizli füzyon ısısına sahip FDM'ler elde edilebilir (Karellas et al., 2018). Bununla birlikte, termo-fiziksel özellikleri belirlemek için deneysel çalışmalar henüz yeterli değildir.

Ötektik inorganik tuz ve su karışımları, su gibi davranan ancak sudan daha düşük sıcaklıklarda katılaştıran ve eriyen ve termal iletkenliği suya benzer bileşikler oluşturur. Ötektik sıcaklık olarak bilinen bu katılma noktasında genellikle aşırı soğuma meydana gelir, ancak bu fenomen tez içerisinde de değinilen çeşitli uygulamalar ile önlenabilir veya azaltılabilir. Ayrıca, ötektik su tuzu bileşikleri, tıpkı su gibi, katı ve sıvı fazlar arasında % 5 ila %10 arasında önemli bir hacim değişikliği sergiler. Bu kimyasal olarak kararlı bileşiklerin bir başka dezavantajı, metaller gibi bazı malzemeleri aşındırıcı olmalarıdır (Bruno et al., 2015).

FDM'lerin Akışkanlarla Kullanımı

FDM'lerin sirkülasyon devrelerinde doğrudan kullanıma uygun olmaması TA kullanımını kaçınılmaz hale getirmektedir. FDM'den yararlanırken; doğrudan birleştirme, gözenekli malzemelere daldırma ve şekil stabilizasyonu, makro kapsülleme ve mikro kapsülleme gibi farklı yöntemler (**Şekil 5**) arasından seçim yapmak gerekir (Serale, 2018; Zhou, Zhao, & Tian, 2012). FDM'nin kullanım amacı ve kullanıldığı uygulama, etkili bir karıştırma yönteminin seçilmesinde belirleyicidir (Yu et al., 2021). Ancak mevcut yöntemler istenen performansı vermekte yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, son 10-15 yılda FDM kullanımına yeni yaklaşımlar getirilmiştir. Bir FDM-S tipik olarak, bir TA ve TA içine dağılmış FDM karışımından oluşur.

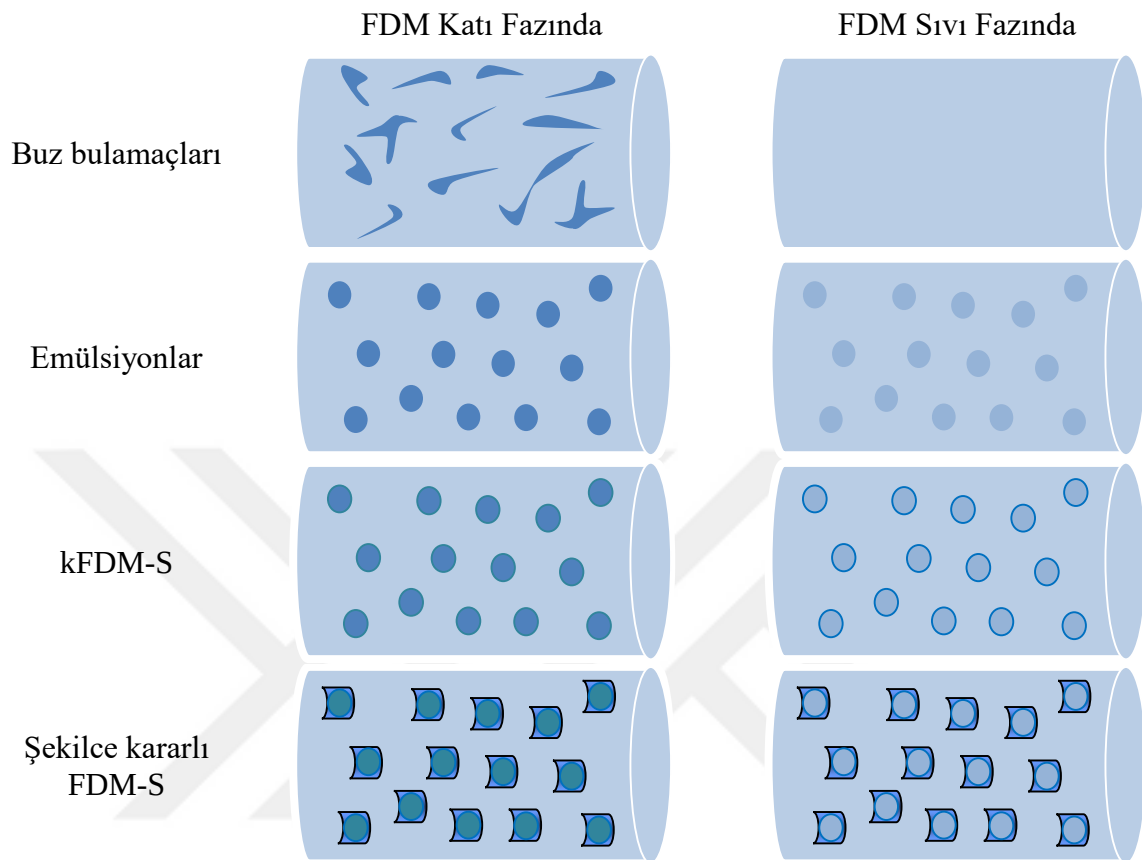


Şekil 5. FDM'lerin akışkanlarla karıştırılması (Serale, 2018; Zhou et al., 2012)

Çok sayıda alternatife rağmen, yüksek termal iletkenliğe ve kayda değer özgül ısı kapasitesine sahip olması (V. D. Cao et al., 2018), FDM'lerle uyumlu, kullanımı kolay, ucuz

ve güvenli (Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016) olması gibi çeşitli avantajları nedeniyle su TA olarak en çok tercih edilen akışkandır.

Literatürde belirtildiği gibi FDM-S'ler, **Şekil 6**'da görülen farklı tiplerde hazırlanabilir.



Şekil 6. Farklı tip FDM-Sıvı karışımları (Delgado, Lázaro, Mazo, & Zalba, 2012; Qiu, Li, Wang, Zhao, & Zhao, 2019; Serale, 2018; Yeşilyurt & Çomaklı, 2023)

Buz bulamaçları, su içinde tabakalanmış veya su üstünde yüzen buz parçacıklarından oluşan, yeryüzünde doğal olarak karşılaşılan tipik FDM-S'lerdir. Buz bulamaçlarında, TA ve FDM aynı maddededir ve FDM içeriğinin sıvı fazında karışım saf bir madde haline gelir. FDM emülsiyonları ise bir FDM ve emülsifiye edici bir maddenin eklenmesiyle homojenleştirilen bir TA'nın karışımıdır ve FDM'nin sıvı fazında bile bir bulamaç olarak kalır. FDM'nin diğer FDM parçacıklarıyla temasını engellemek veya diğer stabilizasyon sorunlarına maruz kalmasını önleme için bir kabuk malzemesi ile sarıldığı kapsülleme (Chandel & Agarwal, 2017b) ve sızıntıyı önlemek için (Qiu et al., 2019; Wu, Zhang, Xu, Lin, & Liu, 2020) sıvı FDM'yi emen (Serale, 2018) katılmış polimerlerin destek malzemeleri olarak kullanıldığı (Melone, Altomare, Cigada, & Nardo, 2012) şekil stabilizasyonu ise mikroemülsiyonların bazı dezavantajlarını önlemek için geliştirilmiş görece daha yeni yöntemlerdir ve daha karmaşık devrelerde dolaşan ITA'larda FDM'lerin uygulanabilirliği bakımından büyük çok yönlülük sunmaktadırlar.

Kapsülleme yaklaşımında, kapsülleme verimliliği, yani FDM'nin kabuk malzemesine oranı ve mekanik dayanım merkezi önemdeyken, şekil stabilizasyonunda kimyasal uyumluluk ve termal kararlılık çok daha önemlidir (Umair, Zhang, Iqbal, Zhang, & Tang, 2019). Makul bir hata payı ile kapsüller içerisindeki FDM'nin tüm süreç boyunca tek fazlı özellik gösterdiği kabul edilebilir, yani makro düzeyde, FDM-S'ler tek fazlı bir sıvı gibi davranır. Bu aynı zamanda FDM-S'lerin pompalanmasına ve termal devrelerde bir ITA olarak kullanılmasına imkan vererek, benzer çözümlere göre gizli ısı kullanımı, daha yüksek termal difüzyon, daha düşük debi ihtiyacı ve yüksek ısı transferi gibi birçok avantaj sunmaktadır.

Bununla birlikte, kFDM-S'lerin potansiyellerini tam olarak gerçekleştirebilmeleri ve avantajlarından tam olarak yararlanılabilmesi için aşılması gereken bazı sorunları vardır. Hal değişimi sırasında ısı transferi sürecinin doğrusal olmaması, hacimsel değişim ve ısı transfer mekanizmasının tam olarak bilinmemesi nedeniyle ısı transferinin tam olarak belirlenememesi, faz değişimi olan termal sistemlerin performansının tam olarak değerlendirilmesinin önündeki başlıca engellerdir (Regin et al., 2008).

FDM'lerin kapsüllenmesi, hem ısı transfer yüzey alanını (yüzey alanı / hacim oranı) artırarak performans artışı sağlar (Farid et al., 2004) hem FDM reaktivitesinin azaltılması sağlar, hem de hacim değişikliği ve düşük termal iletkenliğin neden olduğu diğer bazı sorunların ortadan kaldırılmasını (Jegadheeswaran & Pohekar, 2009) sağlar.

FDM ve FDM Çözeltilerinin Sorunları

Kapsülleme, temel olarak çekirdeklenmeden sonra damlacık boyutuna bağlı olan aşırı soğutma, düşük çekirdeklenme hızı ve düşük kristal büyüme hızı gibi FDM'nin bazı yaygın sorunlarının üstesinden gelmek için bir araç olarak hizmet eder. Hem cihaz hem de yöntem olarak teknolojiye paralel olarak daha küçük boyutlu kapsüller üretilebilmesi sayesinde FDM'lerin sahip olduğu bu tür sorunlar kısmen giderilebilmektedir. Çalışmalar, kapsül boyutunun kristalleşme sıcaklığını doğrudan etkilediğini ve aşırı soğuma sıcaklığının kapsül boyutuyla ters orantılı olarak 5-100 µm aralığında değiştiğini göstermiştir (Safari, Saidur, Sulaiman, Xu, & Dong, 2017). Bu sorunun çözümü ile ilgili olarak; F. Cao and Yang (2014) kapsül kabuğunun bileşimini optimize ederek kFDM'lerde aşırı soğutmayı bastırmak için yeni bir teknik geliştirdi.

Kapsülleme sonrası kabuk ve çekirdek şeklinde çıkan kompozit yapı sayesinde ve ısı alışverişi sırasındaki faz değişiminin kabuk içinde gerçekleşmesi nedeniyle hem çökme hem de ayrılma gibi problemler meydana gelebilir. FDM'lerin ve TA'nın doğrudan karışımlarının yanı sıra çekirdeğin sızma riski, kabuk malzemelerinin farklı özelliklerinden yararlanılarak

önlenebilir. Isı transferi uygulamalarında tercih edilecek kapsül yapısı, kabuk ve çekirdek malzemesi birim zamanda sistemden çekilecek ısı miktarına, sistemin kararlı çalışma sıcaklığına ve diğer bazı sistem parametrelerine bağlıdır. Yine de, en önemli noktalardan biri de seçilecek çekirdek malzemenin faz değişim sıcaklığının sistemin optimum çalışma sıcaklığına eşit veya yakın olması gerektiğidir. En önemlisi, pompalama sırasında kabuk malzemesinin hasar görmemesi, kırılmaması veya yırtılmamasıdır (Yeşilyurt et al., 2019).

Aşırı soğuma

Alt soğutma, bir sıvının kristalleşme olmaksızın füzyon sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa kadar soğuyabilmesi olarak tanımlanabilecek bir olgudur ve FDM'ler için önemli olan temel özelliklerden biridir. Kristalleşme ve füzyon sıcaklıkları arasındaki farkı temsil eder. FDM'lerin kullanılmasının ana amacı olan gizli füzyon ısısının kullanımı, aşırı soğutma nedeniyle geciktirilebileceği veya engellenebileceği için, FDM'lerin aşırı soğutma derecesi mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Bu nedenle, yüksek derecede aşırı soğutma sergileyen bir FDM'de bu derecenin düşürülmesi gerekir. Sorun, çözeltiye çekirdekleştirici ajan eklenerek çözülebilir (J. Chen et al., 2014).

Kararlılık

kFDM'nin sentezinde ve kullanımında dikkate alınması gereken en önemli faktör kararlılık olmalıdır. Bir kFDM'de gereken fiziksel özelliklerin doğası ve türü, uygulama alanlarına göre değişebilse de, tüm uygulamalar için kFDM'nin, beklenen işlevi yerine getirebilmesi için çalışma koşulları altında sahip oldukları veya edindikleri özellikleri koruyabilmesi gerekir. Örneğin, ısı transfer akışkanı olarak kullanılacak kFDM bulamaçlarının hem mekanik hem de termal yükler altında ve uzun süreler boyunca kararlı kalması gerekir.

Kararlılık, kFDM veya kFDM bulamacının parçacık boyutu veya şekli, termofiziksel özellikler ve bulamacın viskozitesi gibi özelliklerinde, çalışma koşulları altında veya zaman içinde herhangi bir değişiklik olup olmadığına bağlı olarak değerlendirilebilen bir göstergedir (J. Chen et al., 2014).

Kararlılık üç açıdan ele alınabilir: fiziksel kararlılık (mekanik kararlılık), yapısal kararlılık ve termal kararlılık (Qiu, Ma, Li, Zhao, & Wright, 2017).

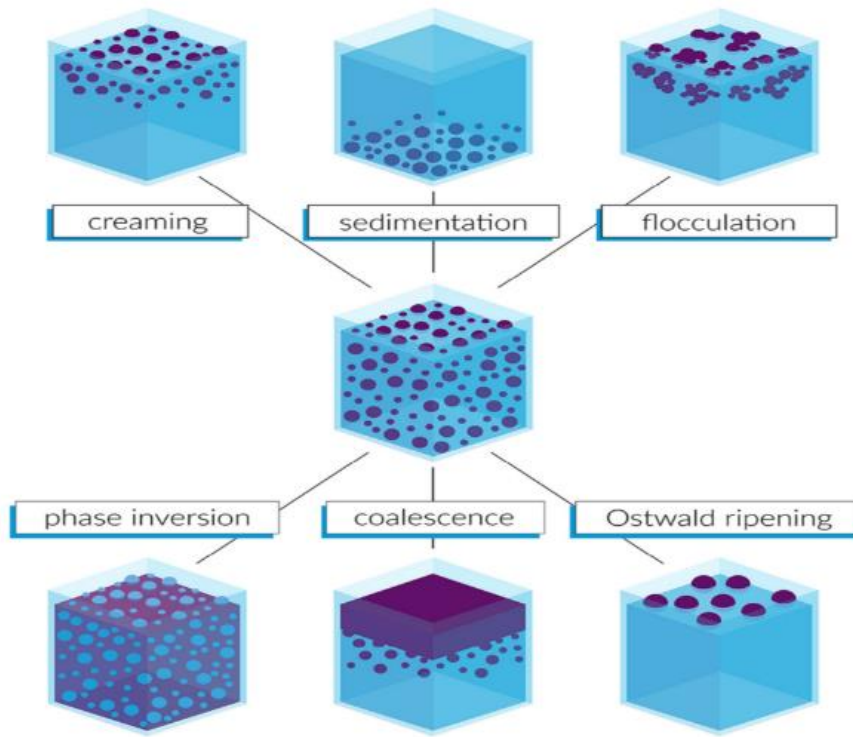
Fiziksel kararlılık

kFDM bulamaçlarının veya genel olarak emülsiyonların fiziksel kararlılığı, ısı transferi ve termal enerji depolaması için çok önemlidir (Qiu et al., 2019). Fiziksel kararlılık, yüzey aktif madde kütle konsantrasyon oranı, yüzey aktif madde türü, pH değeri ve yoğunluk farkı gibi

belirli emülsiyon parametreleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu parametrelerin bazıları ayarlanabilir veya düzenlenebilirken, bazıları ise malzeme seçimi aşamasında dikkate alınmalıdır.

Örneğin, süspansiyon pH değeri, geleneksel pH değeri düzenleyicileri olan sitrik asit ve trietanolamin eklenerek ayarlanabilir (Qiu et al., 2018). Ancak, fiziksel kararlılığı etkileyen baskın parametrelerden biri olan partiküller ve TA arasındaki yoğunluk farkına gelince, önceden dikkate alınmalıdır.

Şekil 7'de görüldüğü gibi, fiziksel kararlılık sorunları, yani fiziksel istikrarsızlık, kabaca beş ana fiziksel kararlılık sorununa atıfta bulunur: tabakalaşma (kremleşme veya çökelme), flokülasyon, birleşme, Ostwald olgunlaşması veya faz inversiyonu (Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016; Qiu et al., 2017).



Şekil 7. Emülsiyonlarda karşılaşılabilecek muhtemel kararsızlıklar (Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016; Kuroiwa, Kobayashi, Chuah, Nakajima, & Ichikawa, 2015; Qiu et al., 2017; Tadros, 2004)

Bir termal döngüde kullanılan kararlılık sorunları olan bir kFDM-S, fiziksel kararlılığı eski haline getirmek veya normal performansı korumak için çalışma sırasında homojen dağılımı sağlamak için karıştırma sırasında kesinlikle düşük performans gösterecektir veya karıştırma gerektirecektir (Alvarado, Marsh, Sohn, et al., 2007; X. Wang et al., 2007; Yasushi Yamagishi, Takeuchi, Pyatenko, & Kayukawa, 1999).

Kremleşme veya çökelme: Bu iki olgu, kFDM ve TA farkının yoğunlukları, yani dağılmış malzemenin ve sürekli fazın yoğunlukları farklı olduğunda gerçekleşir. Bu nedenle,

yoğunluk farkı ne kadar küçük olursa, süspansiyon o kadar kararlı olur (Qiu et al., 2018). kFDM'nin yoğunluğu TA'ninkinden daha büyük olduğunda, örneğin bir su içinde yağ emülsiyonunda olduğu gibi, kremleşme oluşabilir, oysa TA'nın yoğunluğu kFDM'ninkinden daha düşük olduğunda çökme oluşması muhtemeldir: yağ içinde su emülsiyonunda (Qiu et al., 2019).

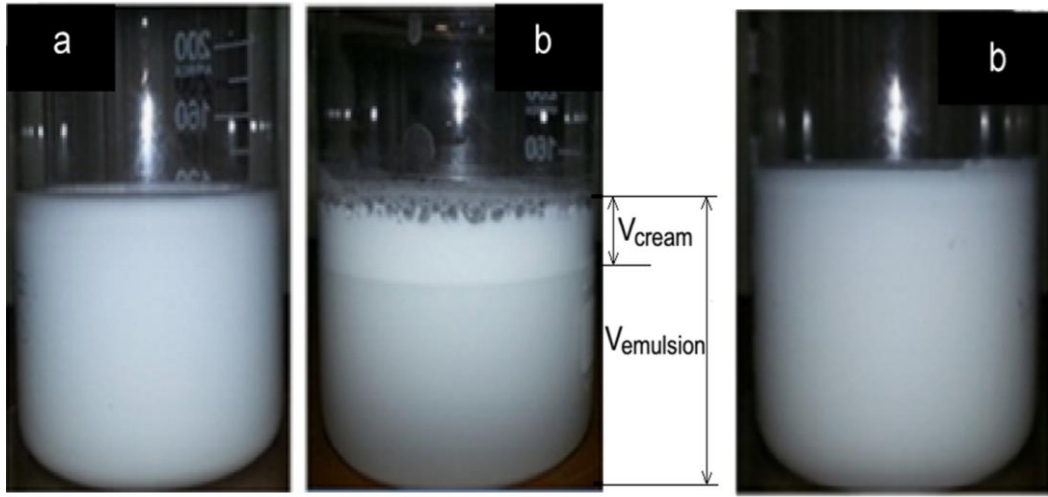
Flokülasyon: Flokülasyon olgusu, parçacıkların topaklaşması olarak tanımlanır (Delgado, Lázaro, Mazo, & Zalba, 2012) yakınlık nedeniyle çözüm içinde (Qiu et al., 2019). Daha küçük çaplarda, özellikle 10 μm 'den daha küçük olan kapsüller daha sağlamdır, ancak bu durumda çözelti, anyonik bir yüzey aktif madde eklenerek önlenebilecek topaklaşmaya eğilimli olabilir (S. A. Ali, 2017). Flokülasyon bir dispersiyon problemidir ve homojen olmayan bulamacı gösterir (Yasushi Yamagishi et al., 1999). Kapsüllerin hacim konsantrasyonu arttıkça birbirine yaklaşırlar, dolayısıyla kapsüller arasındaki etkileşim de artar ve daha büyük topakların oluşmasına neden olur. Tersine, bu aglomeralar kesme kuvvetleri altında daha küçük parçalara ayrılır. Flokülasyon, viskoziteyi ve kayma gerilimini artırır (V. D. Cao et al., 2019).

Birleşme/Topaklanma: Bu tür kararsızlık, temas sırasında iki veya daha fazla dağılmış damlacığın yeni bir tek damlacıkta birleşmesini içerir.

Ostwald olgunlaşması: Ostwald olgunlaşması, dağılmış fazın çözünürlük farkından dolayı katı veya sıvı fazlarda zaman içinde meydana gelen homojen olmama durumu olarak tanımlanır (Ghasemi, Tasnim, & Mahmud, 2022), küçük kristaller veya çözünen çözelti parçacıkları olarak ortaya çıkar, ardından daha büyük kristaller veya katı parçacıklar halinde yeniden çökme izler (Qiu et al., 2018).

Faz dönmesi: Adından da anlaşılacağı gibi, sürekli faz ve dağınık faz birbirine dönüştüğünde gerçekleşir (Delgado, Lázaro, Mazo, & Zalba, 2012; Qiu et al., 2019).

Kremleşme dışında, diğer kararsızlıkların bastırılması çoğunlukla kapsülleme ile sağlanan kabuk koruması ile sağlanabilir. Kabuk malzemesinin farklı özelliklerinden yararlanılarak karışımda oluşabilecek çökme ve ayrışma gibi problemler ortadan kaldırılırken, aynı zamanda korun penetrasyonu ve TA ile karışması engellenir. Kremleşmeyi önlemek için belirli bir yüzey aktif maddenin veya birkaç yüzey aktif madde karışımının kullanılması, **Şekil 8**'de görüldüğü gibi iyi bir emülsiyon kararlılığı sağlar.



Şekil 8. Tek bir sürfaktan kullanılması ve farklı sürfaktan karışımları kullanılması durumunda başlangıç durumu (a) ve 1 gün sonra (b) karışımda meydana gelen ayrışma (Al-Shannaq, Farid, Al-Muhtaseb, & Kurdi, 2015; Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016)

FDM-S'ler, aşırı soğutma ve faz ayrımı olaylarını azaltmanın yanı sıra yüksek termal atalet koruması ve daha yüksek termal yayılma özelliği sunar. Yine de, sızıntı gibi bazı problemler (Barreneche, Martínez, et al., 2015) ve çökeltme ile karşılaşılır ve bu, daha gelişmiş uygulamalarda kullanımlarını sınırlar. Bu noktada, birleştirme yöntemi, FDM ve TA arasında bir ayrımın da gerekli olduğu FDM bulamaçlarının oluşumu için kullanışlı hale gelir (Serale, 2018). Bu sorunu çözümenin bir yolu, FDM'leri farklı kabuk malzemeleriyle sararak bir tür kompozit malzeme elde etmektir (Chandel & Agarwal, 2017b, p. 586). Bu nedenle, FDM'ler, bulamaç aktif sistemlerde uygulandığında sızıntıyı önlemek ve termo-fiziksel özelliklerin etkinliğini korumak için mikrokapsüllerde yaygın olarak kullanılır (Barreneche et al., 2014).

Yapısal Kararlılık

kFDM-S ile ilgili diğer bir sorun da, pompalama geriliminin neden olduğu mekanik bir kesme kuvveti nedeniyle kapsüllerin olası yırtılması veya kırılması ile ilgili olan yapısal kararlılıktır (Qiu et al., 2017). Bu bağlamda, sirkülasyon pompasının seçimi de kapsüllerin yapısal kararlılığı için dikkate alınması gereken bir faktördür ve santrifüj pompalar, kapsüllere herhangi bir zarar vermeden bir bulamacı uzun süre pompalayabildiğinden amaç için en iyisidir (V. D. Cao et al., 2019; Gschwander, Schossig, & Henning, 2005). Yapısal kararlılık esas olarak kabuk malzemesine ve kalınlığına ve mikrokapsül çapına bağlıdır. 5µm'ye kadar daha küçük çaplı kapsüller, kırılmadan 5000 pompalama döngüsüne dayanacak kadar güçlüdür (Y. Yamagishi, Sugeno, Ishige, Takeuchi, & Pyatenko, 1996). Alvarado, Marsh, Sohn, et al. (2007) bu etkiyi farklı kFDM parçacıkları üzerinde yapılan birkaç deneyle doğruladı. Bununla birlikte, daha küçük boyutlu kapsüller akış basıncına dayanabilirken, TA içindeki kapsüller ne kadar küçükse, bulamacın viskozitesi o kadar yüksek olur (S. A. Ali, 2017).

Kapsül kabuğunun çatlaması veya kırılması, faz değişimi sırasında çekirdek FDM'nin hacimsel genişlemesinden de kaynaklanabilir. Bu nedenle, kapsülün yapısal kararlılığını sağlamak için, fazlar arasındaki hacim değişimine gerekli dikkat gösterilerek FDM seçimi yapılabilir (örneğin düşük hacim değişimine sahip bir inorganik FDM seçilebilir). Ancak FDM adaylarından herhangi birinde istenen tüm özelliklerin karşılanması neredeyse imkânsız olduğu için bu her zaman çözüm olmayabilir. Örneğin Kim and Cho (2002), uçucu sikloheksan FDM ile karıştırılır ve böylece karışım polimer kabuk ile kapsülendir, ardından faz değişimi sırasında sikloheksan buharlaştırılır ve FDM'nin hacim genişlemesi için yer bırakarak kabuğun etkilenmemesine izin verilir. Öte yandan, daha küçük ve daha üniform kapsül boyutuna, üniform kabuk kalınlığına yol açan herhangi bir parametre değişikliğinin yapısal kararlılık üzerinde etkili olduğu kabul edilebilir. Toplam kapsül boyutunun %15'i ve %30'u kadar kabuk duvar kalınlığına sahip n-eikosan ve stearik asit mikrokapsülleri ile yapılan deneylerde, ince duvarlı mikrokapsüllerin erime noktasının üzerindeki termal döngülere dayanamadığı bildirilmiştir (Roy & Sengupta, 1991). Kalın kabuklu kapsüllerin ise pompalama sırasında daha az hasar gördüğü, ancak daha kalın kabukların kabuktan çekirdeğe ısı transferini kötüleştirdiği gözlemlendi. Bu nedenle bu iki parametre arasında optimum seçim yapılmalıdır (V. D. Cao et al., 2019).

Parçacıkların gücü, bir atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak (Ghasemi et al., 2022) veya deneysel olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak, sirkülasyonda kullanılan pompanın türü, pompa hızı, kapsül çapı, hacim-ağırlık oranı, çekirdeğin düşük hacimde genişmesi veya kabuktaki genişleme odasının daha büyük olması, kabuk malzemesi ve kabuk kalınlığı etkili olan başlıca parametreler arasındadır (Qiu et al., 2017). Song, Li, Xing, Hu, and Marcus (2007), gümüş nanopartiküllerin eklenmesinin mikrokapsüllenmiş bromo-heksadekan mikrokapsüllerin kabuk yapısında bir güçlenme sağladığını göstermiştir. Ayrıca gümüş nanopartiküllerle birleştirilmiş FDM mikrokapsüllerinin termal ve yapısal kararlılığının da, geleneksel FDM mikrokapsüllerine kıyasla büyük ölçüde daha yüksek olduğu görülmüştür.

Termal Kararlılık

Termal kararlılık, kapsüllendiğinde FDM'nin ve kabuk malzemesinin termal kararlılığı ile doğrudan ilişkilidir (Gong, Zhang, & Wang, 2009). Parafin mumu, yüksek termal kararlılığa sahip, piyasada en kolay bulunabilen FDM tipidir (Abdelrazik, Al-Sulaiman, & Saidur, 2020). Bununla birlikte, tercih edilen herhangi bir FDM'nin termal kararlılığı değerlendirilebilir ve değerlendirilebilir. Temel olarak sıcaklık veya zamanın bir fonksiyonu olarak ağırlık değişiminin (kazançlar ve kayıplar) bir ölçümü olan Termal Gravimetrik Analiz (TGA), kurutma kaybı, faz geçiş sıcaklıklarının belirlenmesi yoluyla malzemenin termal kararlılığı ve

bileşim analizi hakkında bilgi sağlar (Ahuja & Scypinski, 2001; Alkan, Sarı, Karaipekli, & Uzun, 2009; Allouche, 2016). Bununla birlikte, genel olarak, FDM bozulmasının kaynağını görselleştirmek ve tanımlamak için eş zamanlı bir SEM analizi ve/veya Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) analizleri gerçekleştirilir (Allouche, 2016; Barreneche, Martínez, et al., 2015). Fei et al. (2015) ve W. Fu et al. (2017) kapsüllemenin termal kararlılık üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiş ve önemli bir gelişmeyi doğrulamıştır. Kabuk malzemesi tarafından sağlanan koruma (Karthikeyan, Ramachandran, & Shanmugasundaram, 2014) sadece malzemenin kendisine göre değil aynı zamanda kabuğun yapısına göre de farklılık gösterdiği bildirildi, X. Huang, Zhu, Lin, and Fang (2019) ağ şekilli poliüretan kabuğunun termal kararlılığının, lineer poliüre kabuğuna kıyasla açıkça arttırıldığını bildirdi. Bu bağlamda, kabuk bileşiminin değiştirilmesi bir uygulama olmuştur.

FDM mikrokapsüllerinin termal kararlılığı, pratik uygulamalar için çok önemlidir (Al Shannaq & Farid, 2015). Bu nedenle termal kararlılığın incelenmesi ve iyileştirilmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Salunkhe and Shembekar (2012) kapsül boyutunun, kabuk kalınlığının, kabuk malzemesinin ve kapsülleme geometrisinin termal enerji depolama sistemlerinin performansı üzerindeki etkilerini gözden geçirdi ve ısı depolama kapasitesinin ve termal kararlılığın büyük ölçüde çekirdek-kaplama kütle oranına bağlı olduğunu bildirdi. FDM'lerin stabilizasyonu, kompozitlerin gizli enerji depolama kapasitesini de artırabilen 3D yapıları destekleyici matrislerin geliştirilmesiyle elde edilebilir, organik FDM kompozitleri üreterek termal kararlılığı artırmak için nano-malzemesler de uygulanabilir (Alehosseini & Jafari, 2019).

Ayrıca, sıcaklık yükseldiğinde FDM'nin kabuğa baskı uygulamadan serbestçe genişlemesine izin veren mikrokapsülde genişleme alanının mevcudiyeti, termal kararlılığı artıran başka bir faktördür. Bazı kapsülleme yöntemlerinde, karıştırma hızı ve emülsifiye edici içerik gibi işlem parametrelerinin de termal kararlılık üzerinde etkili olduğu bildirilmiştir (Al Shannaq & Farid, 2015).

Kapsülleme ve Faz Değişim Malzemelerin Kapsülasyonu

FDM malzemeler özellikle sirkülasyon devrelerinde kullanım için her zaman uygun değildir. Özellikle katı-sıvı faz değişimlerinden faydalanma noktasında, sızma (Barreneche, Martínez, et al., 2015), çökelme gibi bazı sorunlar ile karşılaşmakta ve bu durum daha ileri düzey uygulamalarda kullanımlarını kısıtlamaktadır. Bu sorunu çözmenin bir yolu, FDM'lerin, farklı kabuk malzemeleri ile sarılarak bir çeşit kompozit malzeme elde etmektir (Chandel & Agarwal, 2017b, p. 586). Bu nedenle, FDM'nin sızmasının önlenmesi ve kFDM-S'nin

kullanıldığı sistemlerde termofiziksel özelliklerin etkinliğini korumak amacıyla yaygın olarak mikrokapsüller içerisine alınarak kullanılır (Barreneche et al., 2014).

Kapsülleme, katı veya sıvı malzeme parçacıklarının polimerik malzemelerle kaplandığı bir işlemdir. National Cash Register Company (NCR) tarafından yapılan karbonsuz kopya kağıdı üretme projesi, kapsülleme ile ilgili yürütülmüş ilk çalışma olarak kabul edilmektedir (Benita, 2005).

Kapsüllerin kabuğu, çekirdek malzemenin taşıyıcı sıvı ile etkileşime girmesini engeller, bu da malzemenin kararlılığını artırır ve partiküllerin kümelenmesini önler. Bu amaçla, kapsülleme teknolojisi, yıllardan beri farmasötik, kimya endüstrisi ve biyoloji mühendisliğinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Zaman içerisinde gelişen teknoloji yeni yeni problemlere yönelik çözüm arayışları kapsüllerin sayısı giderek artan alanlarda kullanımını beraberinde getirmiştir ve günümüzde nanometre ile milimetre aralığında değişen ölçülerde çok çeşitli kapsüller üretilebilmektedir.

Boyutlarına göre kapsüller kabaca:

- Nanokapsüller (boyutları 1 ve 1000 nm arasında)
- Mikrokapsüller (boyutları 1 ve 1000 µm arasında)
- Makro kapsüller (boyutları 1mm'den büyük)

olarak üç gruba ayrılırlar (Salunkhe & Shembekar, 2012). Kapsülleme prosesleri ise, proses sonucu elde edilecek kapsül boyutuna göre, makrokapsülleme (veya kapsülleme), mikrokapsülleme, ve nanokapsülleme olarak da adlandırılmaktadır.

Mikro/nano-kapsülleme, çok küçük parçacıkların veya damlacıkların bir film ile sarıldığı veya kaplandığı bir işlemdir. Parçacıklar sıvı, katı, gaz veya çok fazlı olabilirken ve kabuk olarak işlev gören film genellikle bir polimerdir (J. Chen et al., 2014). Bu şekilde üretilen malzemelere kapsüllenmiş FDM (kFDM) adı verilir. Kapsülleme, FDM'lerin termal ve mekanik özelliklerini iyileştirir (Alva et al., 2017), ısı transferi yüzey alanını (Chandel & Agarwal, 2017b, p. 586), dolayısı ile de yüzey-hacim oranını artırır ve taşıyıcı akışkanın termal kapasitesini ve ısı transfer verimliliğini önemli ölçüde iyileştirir (Aslan, 2014). Ayrıca kapsüller, malzemelerin sıvı haldeyken de katı partiküller olarak kullanılmalarına imkân sağlar ve faz değişimi sırasında gerçekleşecek hacim değişimini kabuk içerisinde dengelerler.

Son yıllarda, çekirdek malzemesi faz değişim malzemesi olan kapsüllerin bazı taşıyıcı akışkanlar ile karıştırılması ile hazırlanan süspansiyonların (kFDM-S) hazırlanması ve özellikleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmaya başlanmış olup, şimdiden önemli sonuçlar elde edilmiştir (Z. Chen & Fang, 2011, p. 4625).

Ayrıca FDM'lerin sorunları arasında aşırı soğuma ve düşük çekirdeklenme ve kristal büyüme hızı olduğu da bilinmektedir. Çekirdeklenme sonrasındaki sıvı damlacıklarının boyutu kristal büyümesini etkileyen başlıca faktördür. Kapsülleme bu sorunları gidermede de bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Gelişen teknolojik imkanlar ile daha küçük çaplı kapsüller üretme olanağı elde edildikçe, FDM'lerin bu sorunları kısmen ortadan kaldırılabilir. Yapılan çalışmalar mikrokapsüllerin boyutunun, kristalleşme sıcaklığı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğunu ve aşırı soğuma sıcaklığının boyutu 5-100 μm aralığında olan kapsüller için kapsül çapı ile ters orantılı değiştiğini göstermiştir (Safari et al., 2017). Buna ek olarak, F. Cao and Yang (2014) mikrokapsül reçine kabuğunun kompozisyonunu optimize etmek suretiyle kFDM'lerde aşırı soğumanın baskılanmasını sağlayan yeni bir teknik geliştirmişlerdir.

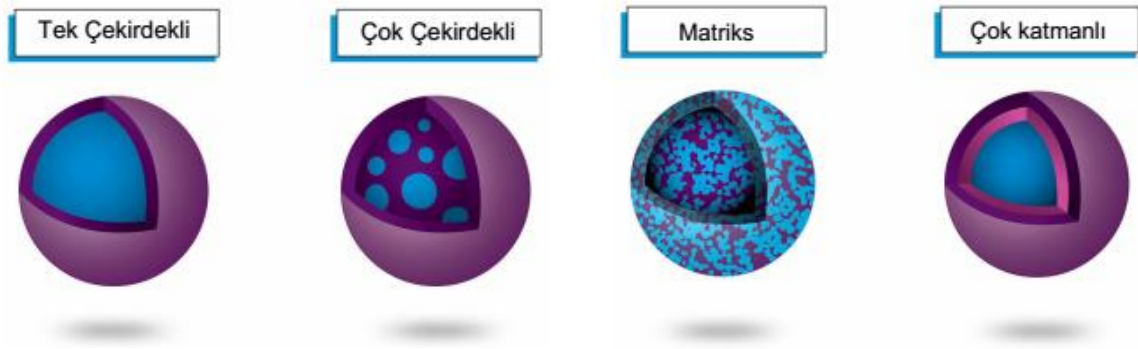


Şekil 9. Isı alışverişi sırasında kapsül içinde FDM malzemenin faz değişimi (Ghasemi et al., 2022; Qiu et al., 2017)

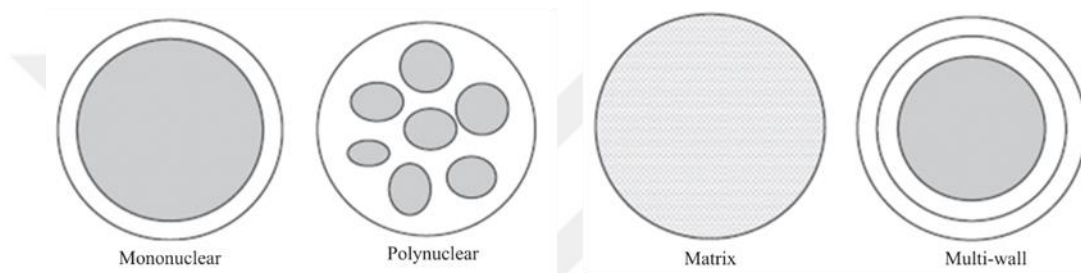
Şekil 9'da kapsülleme sonrasında kabuk ve çekirdek şeklinde ortaya çıkan kompozit yapı ve kabuk içerisinde FDM malzemelerin ısı alış verişi sırasındaki değişimi verilmiştir. Bu sayede hem kabuk malzemesinin değişik özelliklerinden faydalanarak karışımda meydana gelebilecek çökelme, ayrışma gibi sorunlar giderilebilmekte hem de çekirdeğin sızması ve taşıyıcı akışkan ile karışma önlenmektedir.

Farklı kapsülleme yöntemleri, çekirdek ve kabuk malzemeleri kombinasyonları kullanılarak değişik morfolojik yapıya sahip kapsüllenmiş malzemeler elde etmek mümkündür. **Şekil 10'**da ve **Şekil 11'**de kapsül türleri, çekirdek/kabuk bileşimi açısından mononükleer, polinükleer, matris, kabuk yapılarının kaplama laminasyonu açısından tek katmanlı veya çok katmanlı ve kabuğun şekli açısından düzenli ve düzensiz olarak farklı kapsül tiplerini göstermektedir (Ghasemi et al., 2022; Jamekhorshid, Sadrameli, & Farid, 2014; Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016). Bununla birlikte, bazı araştırmacılara göre, çekirdek ve kabuk malzemelerinin matris bileşimi bir kapsül değil, bir küre oluşturmaktadır (Karthikeyan & Ramachandran, 2014). Kapsüllerin morfolojisi, farklı yönlerden; çekirdek malzeme, kabuk, malzeme, kapsülleme işlemi, tekrarlama kaplama işlemi gibi çeşitli faktörlerin yanı sıra karıştırma hızı, yüzey aktif madde tipi, emülsiyon tipi, reaksiyon ortamının sıcaklığı gibi diğer işlem parametrelerine bağlı olarak değişebilirken, kapsüllenmiş FDM'nin en yaygın morfolojik

yapısı tek çekirdekli (mononükleer) tiptir (Ghosh, 2010; Jamekhorshid et al., 2014; Mishra, 2015).



Şekil 10. Kapsüllenmiş malzemelerin morfolojileri (Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016)



Şekil 11. Çekirdek ve kabuk yapılarına göre kapsül çeşitleri; tek çekirdekli, çok çekirdekli, matriks ve çok katmanlı kabuklu (Alva et al., 2017; Jamekhorshid et al., 2014; C. Liu, Rao, Zhao, Huo, & Li, 2015)

Isı transferi uygulamalarında tercih edilecek kapsül yapısı, kabuk ve çekirdek malzemesi sistemden birim zamanda çekilecek ısı miktarına, sistemin kararlı çalışma sıcaklığına ve bir takım diğer sistem parametrelerine bağlıdır. Ancak en önemli noktalardan birisi seçilecek çekirdek malzemesinin faz değişim sıcaklığının sistemin kararlı çalışma sıcaklığına eşit veya daha altında yakın bir değerde olması, kabuk malzemesinin pompalama sırasında hasar görmemesi, kırılmaması veya yırtılmamasıdır.

Kabuk ve çekirdek malzemelerinin seçimi

Kabuk malzemesi ile çekirdek malzemeleri arasında kimyasal etkileşim olmaması gerektiğinden (Karellas et al., 2018) dolayı kabuk malzemeleri ve çekirdek malzemelerinin seçimi kullanım amacına ve birbirlerine bağlı olarak birlikte seçilmelidir. Kapsül içine alınacak malzemeden beklenen özelliklerin çok farklı ve çeşitli olması ve hem çekirdek malzemesi ile hem de kapsülün kullanılacağı ortamın fiziki koşulları ve işletme şartlarına dayanıklı (Yeşilyurt et al., 2019), amaca tam hizmet edebilecek kabuk malzemesi çiftinin seçilmesi oldukça zahmetli ve titizlikle yürütülmesi gereken bir süreçtir. Ayrıca kapsülleme yöntemleri sonucunda çevreye ve insan sağlığına zararlı bir takım ürünlerin üretildiği de nazar-ı dikkate alınmalıdır (Bayés-García et al., 2010, p. 1235).

Kabuk malzemesi bir koruyucu işlevi görür ve çoğunlukla kFDM'nin mekanik mukavemeti açısından önemli kabul edilir. Ancak çekirdek FDM ile TA arasındaki ısı transferi kabuk üzerinden gerçekleştiği için, kabuk malzemesi termal performans üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, kabuk malzemesinin iyi termal özelliklere sahip olması da önemlidir, zira termal özellikleri iyi ve mukavemeti yüksek olan bir kabuk malzemesi sistemin termal performansını artırmakla kalmayıp kFDM'nin termal döngü ömrünü de uzatacaktır (Salunkhe & Shembekar, 2012).

Kabuk malzemede aranan genel özellikler ve bu özelliklerin önem derecesi **Tablo 3**'teki gibi özetlenebilir.

Tablo 3. Kabuk Malzemesinde Aranacak Genel Özellikler

Önem	Özellik
Artı	İyi derecede esnekliğe sahip olması
Zorunlu	TA penetrasyonunu ve çekirdek sızıntısını önlemesi
Çok önemli	Faz değişim süreçlerinde yapısal ve termal kararlılığını koruması
Zorunlu	TA ve çekirdek FDM'ye karşı düşük reaktiviteye sahip olması,
Zorunlu	Makro, mikro ve nano ölçeklerde termo-fiziksel özelliklerini koruması
Artı	TA ve FDM arasında yüksek termal iletkenlik ve iyi ısı transferi sağlaması

Kabuk malzemesi olarak kullanılabilecek çeşitli organik ve inorganik bileşikler/maddeler bulunmakla birlikte, tipik kapsülleme işlemlerinde genellikle üre-formaldehit reçinesi gibi formaldehit reçineleri kullanılmaktadır. Ancak, kapsülleme işlemleri sonucunda ortaya çıkan atıkların bir kısmı çevre ve insan bakımından zararlı bileşenler içermektedir (Bayés-García et al., 2010, p. 1235). Bu da, gerek yeşil teknolojiler ve çevre hassasiyetleri bakımından, gerekse de uygulamalarda kaçınılması gereken bir kısıt parametresi olarak süreç içinde yer almaktadır.

Kabuk malzemesi olarak seçilecek malzemeler:

- (1) iyi bir esneklik derecesine sahip olmalı,
- (2) hem ITA nüfuziyetini engelleyecek hem de çekirdeğin sızmasını temin edecek düzeyde sızdırmaz olmalı,
- (3) faz değişim süreçlerinde yapısal ve termal olarak kararlılığını koruyabilecek düzeyde dayanıklı olmalı,
- (4) gerek taşıyıcı akışkana gerek çekirdek malzemesine karşı düşük reaktiviteye sahip olmalı,
- (5) makro boyutta sahip olduğu termofiziksel özellikleri mikro ve nano boyutlarda da

korumalı,

(6) ITA ile FDM arasındaki ısı geçişini engellemeyecek/geciktirmeyecek düzeyde yüksek bir termal iletkenliğe sahip olmalıdır (Salunkhe & Shembekar, 2012).

Bu özelliklere sahip birçok organik ve inorganik madde kabuk malzemesi olarak kullanılmak için uygundur ancak en yaygın olarak kullanılan kabuk malzemeleri polimerlerdir. Polistiren, polimetilmetakrilat, arap zıncısı, jelatin, amino plastikler, arap jelatin-sakızı, üre formaldehit reçinesi, melamin formaldehit reçinesi, jelatin formaldehit reçinesi ile polipropilen, poliolefin, poliamid ve benzerleri gibi kabuk malzemesi olarak seçilir (Salunkhe & Shembekar, 2012; D. Su, Jia, Alva, Liu, & Fang, 2017).

Kapsüllenmiş faz değişim malzemelerinin üretilmesinde kullanılacak çekirdek malzemesinin seçimi de oldukça önemli ve çok sayıda parametrenin göz önüne alınarak titizlikle yapılması gereken bir işlemdir.

Kabuk malzemelerinde olduğu gibi, hedeflenen kullanım amacına ve ortam şartlarına ve kullanım sırasında geçerli olacak işletme koşullarından ayrıca olarak, çekirdek malzemelerin de sahip olması gereken bazı başlıca özellikler bulunmaktadır. Çekirdek FDM; termodinamik açıdan; birim hacmin erimesi için gerekli olan gizli erime ısısının, birim hacimde depolanabilecek ısı miktarını da maksimum yaptığı için mümkün olduğu kadar yüksek olması arzu edilir. (Yu et al., 2018). Ayrıca katı-sıvı faz değişimi sabit sıcaklıkta gerçekleştiği için bu sıcaklık değeri sistemde kullanılan PV modülünün optimum çalışma sıcaklığına eşit veya çok yakın olmalıdır. Aranacak diğer bir özellik ise, tüm süreç kapalı bir sistem, yani kapsül, içinde gerçekleştiği için fazlar arasındaki hacimsel değişimin çok küçük olması ve buhar basıncının düşük olmasıdır. Ayrıca termal iletkenlik ve yoğunluğun yüksek olması ve faz değişimlerinin zaman içinde kararlı ve uyumlu olması tercih edilir. Kinetik açıdan bakıldığında, çekirdeklenme hızı ve kristal büyüme hızı büyük olmalıdır. Toksik olmamalı ve ekonomik ömrü uzun olmalıdır (Akçay, 2006; Al-Mamoori, 2017; Garg, Mullick, & Bhargava, 1985; Hale et al., 1971; Pasupathy, Velraj, & Seeniraj, 2008).

Literatürde çekirdek FDM'lerin sahip olması gereken özellikler için yapılan genel bir sınıflandırma şu şekilde verilmektedir (1) uygun faz değişim sıcaklığı veya sıcaklık aralığı, (2) yüksek faz değişim gizli ısı, (3) iyi termal iletkenlik, (4) fazlar arası düşük yoğunluk değişimi ve (5) düşük reaktivite şeklinde sıralanabilir (Aslan, 2014; Biçer, 2009; Sarı, 2011).

Tez çalışması kapsamında yapılan literatür taramasından elde edilerek sınıflandırılan temel özellikler ise **Tablo 4**'te sunulmuştur (Yeşilyurt et al., 2019).

Tablo 4. Çekirdek FDM’de Aranan Termal, Kinetik ve Kimyasal Özellikler (Alehosseini & Jafari, 2019; S. A. Ali, 2017; Aslan, 2014; Biçer, 2009; Browne et al., 2016; Chandel & Agarwal, 2017b; Sarı, 2011)

Özellik Sınıfı	Özellik
Termal	İstenilen çalışma sıcaklığı aralığında erime noktası Yüksek gizli ısı kapasitesi değeri Yüksek termal iletkenlik Yüksek özgül ısı değeri Tersinir donma/erime döngüsü
Kinetik	Süper soğuma olmaması Aşırı soğuma olmaması veya çok az olması Faz ayrımı olmaması İyi çekirdeklenme özellikleri
Kimyasal	Bir dizi donma çözülme döngüsü boyunca kimyasal kararlılık Aşındırıcı özelliği olmaması Toksik olmaması Yanıcı / Patlayıcı olmaması Kabuk malzemesi ile uyumlu olması
Fiziksel	Küçük buhar basıncı Fazlar arası hacim/yoğunluk değişikliğinin düşük olması Yoğunluğunun büyük olması
Diğerleri	Düşük maliyetli olması Kolayca elde edilebilir ve kullanılabilir olması Kokusuz olması Geri dönüştürülebilir/Yeniden kullanılabilir olması

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında zaman katı-sıvı faz organik malzemeler grubunda yer alan parafinlerin kapsüllenmiş faz değişim malzemelerinin üretiminde tercih edilen uygun ve pratik bir madde olduğu görülmektedir. İnorganik faz değişim malzemelerinin, yüksek termal iletkenlik ve yüksek enerji depolama yoğunluğu gibi avantajlar sunmasına rağmen sıvıdan katıya faz değişimi sırasında aşırı soğuması ve faz ayrışması oluşması nedeniyle pek tercih edilmediği söylenebilir. Her iki grup malzemenin de avantajlarından faydalanabilmek için organik veya inorganik FDM malzemelerinin karışımlarından ideal çekirdek malzemeleri de elde edilebilir (Z. Chen & Fang, 2011).

İhtiyaç duyulan uygulama için en ideal FDM kabuk ve çekirdek malzemelerinin mevcut alternatifler arasından en ideal şekilde seçilebilmesi oldukça zaman alıcı ve titizlikle irdelenmesi gereken yorucu bir süreçtir. FDM malzemelerin uygulama alanları ve

mikrokapsüllenmiş FDM malzemelerine ihtiyaç arttıkça bu işlemin daha kolay ve daha hassas bir şekilde seçilmesi, başlı başına bir mühendislik problemi olarak ortaya çıkmıştır. Barreneche, Navarro, Cabeza, and Fernández (2015), 1994 yılında İngiltere’de Cambridge Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde kurulan ve 2019 yılı başlarında ANSYS bünyesine katılan GrantaDesign tarafından geliştirilmiş bir Mühendislik Malzemeleri Seçim Programı olan CES Selector’ı kullanarak FDM malzemelerin Kimyasal yapıları, özellikleri ve uygulama alanlarına göre optimum olarak seçilmesinde kullanılabilecek bir veri tabanı hazırlamışlardır. Böylece herhangi bir uygulama için FDM malzemelerin seçiminde kolaylık sağlanabilecektir. Bununla birlikte, manuel bir FDM seçimi yapılacağı zaman, organik, inorganik ve ötektik FDM’nin ana avantajlarını ve dezavantajlarını kısaca özetleyen **Tablo 1** faydalı olabilir.

Tüm FDM’ler için uygun ve eksiksiz termo-fiziksel veriler mevcut olmadığından, Literatürde bu FDM’lerin uygulamaya özel amaçlar için nispi performansları da bulunmamaktadır. Ayrıca, herhangi bir uygulama için uygun FDM seçilebilmesi için mevcut alternatifler arasından bir seçim yapabilmek, sayısı binleri bulan FDM’lerin performanslarını teorik ya da deneysel olarak doğrulamış olmakla mümkün olacaktır ki, bu da oldukça zordur. En uygun malzemenin seçilmesi her zaman bir mühendislik problemi olarak karşımızda durmaktadır ve genellikle deneysel verilerin kullanılabilirliğine ve uzman kararlarına ve tecrübelerine dayanılarak yapılmaktadır. Fakat bu seçimler çoğunlukla, eğer her zaman değilse, en optimum karar olmaktan uzaktır.

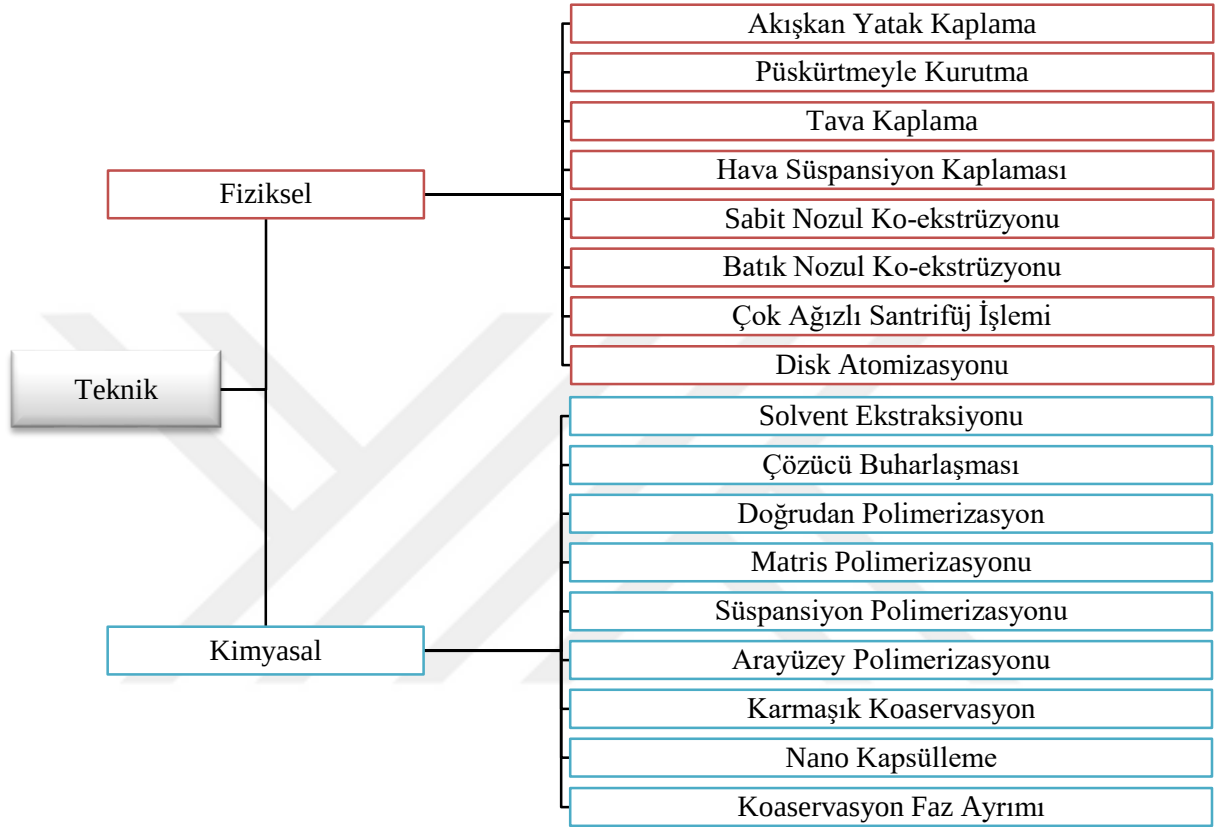
Malzeme seçiminin çok önemli olduğu ve en optimuma ulaşmanın önemli bir gösterge olduğu uygulamalarda bilimsel yöntemler ve özel yazılım ve metotlar kullanılarak seçim işlemleri yapılmalıdır. Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) yaklaşımı ve alt dalları olan Çoklu Amaçlı Karar Verme (MODM) ve Çoklu Nitelikli Karar Verme (MADM) teknikleri kullanılarak, Fayda Değerleri (FOM) kullanılarak alternatifler arasında fonksiyonel bir ilişki türetilir ve en yüksek FOM değerine sahip alternatif seçilerek, uygulamaya özel malzeme seçimleri optimum olarak yapılabilir. GrantaDesign tarafından geliştirilmiş olan Mühendislik Malzemeleri Seçim Programı CES Selector da bu amaçla kullanılabilecek yazılımlardandır.

Kapsülleme yöntemleri

Kapsülleme yöntemleri oldukça çeşitli olmakla birlikte, her bir yöntemin olumlu ve olumsuz yanları, istenen özellikleri sağlama noktasında başarılı ve başarısız olması söz konusudur. Genel olarak bakıldığında zaman kapsülleme yöntemlerini, kapsüllemenin gerçekleşme mekanizmasına göre; fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal yöntemler olmak üzere üç temel başlık altında toplanmaktadır:

- > Fiziksel yöntemler: Püskürtmeli kurutma, sprey soğutma, havada asılı kaplama, süperkritik akışkan metodu, santrifüjlü ekstrüzyon, elektrostatik çökeltme, vb.
- > Kimyasal yöntemler: Arayüz polimerizasyonu, in-situ polimerizasyon, delme katılaşmasını, süspansiyon çapraz bağlanma yöntemini vb.
- > Fizikokimyasal yöntem: Faz ayrımı.

Şekil 12’de Chandel and Agarwal (2017b) tarafından yapılan Fiziksel ve Kimyasal yöntemler sınıflandırması görülmektedir.

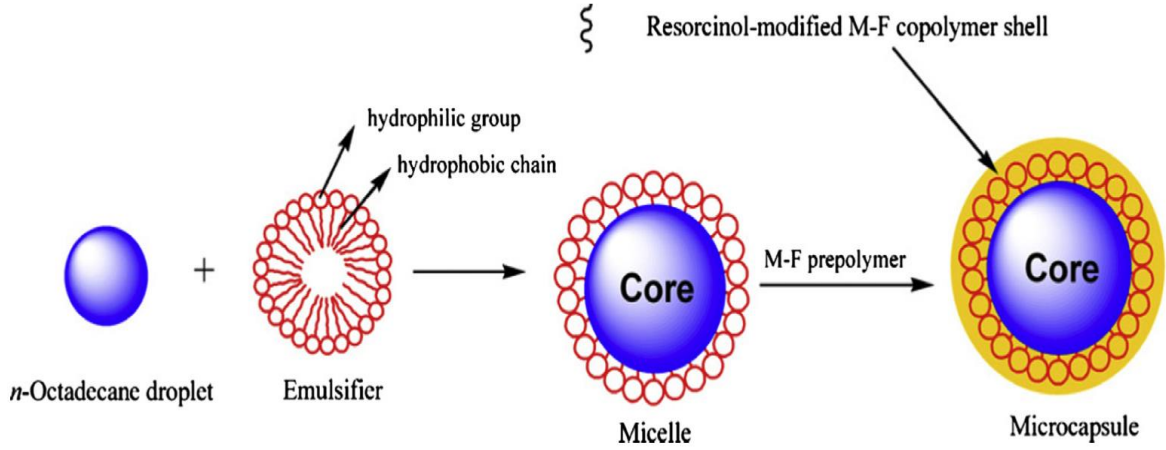


Şekil 12. Kapsülleme yöntemlerinin sınıflandırılması (Chandel & Agarwal, 2017b)

Çekirdek malzemesinin polimer kabuk malzemesi ile kaplanarak kapsül elde edilebilmesi için, birbirlerine karışmayan bu iki malzemenin birbiri içinde elde edilmesi istenen kapsül boyutuna göre nano, mikro ve mili çaplara sahip olacak şekilde dağılmasını sağlayacak bir emülsiyon hazırlanması ilk aşamadır.

Kapsülleme yöntemine bağlı olarak, kabuk ve çekirdek malzemelerine ilaveten, emulsifiye edici ajan (emulsifier), reaksiyon tetikleyici ajan (initiator), çapraz bağlayıcı (cross-linking agent), çekirdeklendirici (nucleating agent), yüzey aktif madde (surfactant) kullanılmaktadır. Ayrıca polimerizasyon sürecinde PH dengeleyici olarak NaOH, hidroklorik asit, trietanolamin ve asetik asit çözeltileri gibi diğer yardımcı malzemelere de ihtiyaç duyulabilmektedir (Alva et al., 2017).

Faz değişim malzemelerinin kapsülleme yöntemleri ve bu yöntemlerle elde edilebilecek kapsül boyutları **Tablo 5**'te sunulmuştur. **Tablo 6**'da ise literatürde bu kapsülleme yöntemleri ile kullanılan kabuk ve çekirdek malzemeleri yer almaktadır.



şekil 13. Oktadekan çekirdekli, melamin kabuklu kapsülün in-situ polimerizasyon yöntemi ile elde edilişi (Alva et al., 2017; L. Chen et al., 2014; Qiu et al., 2019)

Çekirdek ve kabuk yapıları farklı üretim tekniklerine bağlı olarak elde edilebilmekte ve farklı ihtiyaçlara cevap verecek şekilde tercih edilmektedir. (Z. Chen & Fang, 2011, pp. 4625–4627)

Tablo 5. Kapsülleme Yöntemlerine Göre Elde Edilebilecek Kapsül Çap Aralıkları (Z. Chen & Fang, 2011)

Kapsülleme Yöntemi	Çekirdek Malzemesi	Çap aralığı (μm)
Faz ayırma	Katı, sıvı	2–1200
Arayüzey polimerizasyonu	Katı, sıvı	2–2000
Sprey kurutma / soğutma	Katı, sıvı	6–600
Santrifüj ekstrüzyon	Katı, sıvı	1–5000
Yerinde polimerizasyon	Katı, sıvı	1–2000
Havada askıda kaplama	Katı	35–5000
Elektrostatik yağış	Katı, sıvı	1–50
Süspansiyon çapraz bağlanma yöntemi	Katı, sıvı	2–4000

Tablo 5'de görüldüğü gibi tüm kapsülleme yöntemlerinde mikro seviyelerde kapsül çapı elde etmek mümkündür. Literatürde yer alan çalışmalarda kapsül boyutlarının genellikle 2 ila 20 μm aralığında değiştiğı görülmektedir. Ayrıca bu boyutlar akışkan içerisinde taşınabilirlik ve pompalanabilirlik gibi özellikler açısından da uygun değerlerdir.

Tablo 6. Literatürde Yer Alan Çeşitli Kabuk ve Çekirdek Malzemeleri ve Eldelerinde Kullanılan Mikrokapsülleme Yöntemleri (Z. Chen & Fang, 2011)

Çekirdek malzeme	Kabuk malzemesi	Mikrokapsülleme yöntemi
Hekzadekan	TDI ve EDA	Arayüz polimerizasyonu
Parafin balmumu	SiO ₂	Sol – jel yöntemi
1-Bromoheksadekan	Amino plastikler	
Coco-yağ asidi	Arap Jelatin-sakızı	Koaservasyon
Tetradekan	Jelatin	Koaservasyon
Tetradekan	Melamin formaldehit	In situ polimerizasyon
Docasane	Polimetilmetakrilat	Emülsiyon polimerizasyonu
Eicosane	Polimetilmetakrilat	Emülsiyon polimerizasyonu
Parafin balmumu	Jelatin akasya	Koaservasyon / püskürtme kurutma
Tetradekan	Üre formaldehit	In situ polimerizasyon
Oktadekan	Melamin formaldehit	In situ polimerizasyon
Alkan karışımı	Arap / sterilize jelatin sakızı	Koaservasyon
Hekzadekan	Polisitren	Süspansiyon polimerizasyonu
Hekzadekan Oktadekan Nonadekan	Arap Jelatin-sakızı	Kompleks koaservasyon

Tablo 6’da literatürde yapılmış çalışmalarda kullanılan kabuk ve çekirdek malzemeleri ile kullanılan kapsülleme yöntemlerinin bir özeti yer almaktadır.

Ayrıca tez çalışması kapsamında, kapsülleme yöntemlerinin seçimi üzerine kapsamlı literatür araştırmaları yapılmıştır. Tezde kullanılacak kapsüllerin üretiminde hangi yöntemin daha uygun olacağını belirlemek maksatlı yapılan bu çalışma neticesinde derlenen bilgiler, uluslararası bilimsel kitap bölümü olarak yayımlanmıştır (Nadaroğlu et al., 2022). Kapsülleme yöntemleri ile ilgili detaylı bilgi bu kitap bölümünde görülebilir.

Kapsüllenmiş FDM’lerin kullanım alanları

kFDM genellikle beyaz veya kremi renkte, mikro ve nano boyutlarda toz formundadır. Kapsüllenmiş faz değişim malzemeleri (kFDM), en yaygın şekilde termal enerji depolama, ısı transferi ve sıcaklık kontrolü uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin, soğutma sistemlerinin ikincil çevrimlerinde ya da yapılarda ısı yalıtım malzemesi olarak uygulamaları bulunmaktadır. Yine dokuma kumaşların termal performansının iyileştirilmesinde de oldukça caziptir. (Z. Chen & Fang, 2011). Kapsüllenmiş FDM malzemeler kullanılan bir tavan sisteminde yapılan 4 aylık bir deney, sabit sıcaklık elde edildiğini ve akış debisinin önemli derecede düşürüldüğünü göstermiştir (Griffiths & Eames, 2007). Mikrokapsüllenmiş faz

değişim malzemeleri ve bu malzemelerin sulu karışımları ile ilgili mevcut araştırma ve uygulamalar üzerine çok sayıda ve inceleme çalışmaları bulunmaktadır (Tyagi et al., 2011; P. Zhang et al., 2010).



Şekil 14. Kapsüllenmiş FDM malzemelerden oluşan toz (Qiu, Ma, Zhao, Li, & Ali, 2016)

Özellikle hafif binalar için sıcaklık dalgalanmalarını gidermede beton ya da alçı içerisine FDM karıştırarak termal konforu artırmanın en iyi yolunun FDM'lerin mikrokapsüllenmesidir (Tyagi et al., 2011). Kapsül boyutunun mikro veya nano ölçekte olması, gerek doğrudan kullanım gerekse de makro boyutlu kapsülleme uygulamalarında görülen diğer bazı sorunlarla da başa çıkmanın en kolay yoludur. Ayrıca mikrokapsüllemenin yüksek ısı transfer hızı ve daha iyi faz değişim özellikleri sağladığı da belirlenmiştir. İçerisine 8 μm çapındaki FDM mikrokapsüller katılan alçı levhaların FDM ilavesi olmayan levhalara kıyasla, gece boyunca termal konfor durumunun korunması için sıcaklığı artırılan ortamın sıcaklığını gündüzleri 4 $^{\circ}\text{C}$ azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca FDM ilavesi olan odada azami sıcaklığa diğer odadakinden 1 saat daha sonra ulaşılmıştır (Schossig, Henning, Gschwander, & Haussmann, 2005). Alçı levhalar yerine FDM katkılı beton kullanılarak yürütülen çalışmada hacimleri aynı olan iki beton hücrenin sıcaklıkları arasında 4 $^{\circ}\text{C}$ fark gözlemlenmiştir ve azami sıcaklığa FDM katkılı hücrede 2 saat daha sonra ulaşılmıştır (Castellón et al., 2007).

kFDM'ler ayrıca, tekstil, gıda ve ambalaj sanayii gibi çeşitli dallarda da kullanım alanına sahip olmakla birlikte, en yaygın kullanımı TA'lara katılarak kFDM-S olarak ısı depolama ve ısı aktarım sistemlerinde ITA olarak kullanımıdır.

Kapsüllenmiş FDM Çözeltileri

Isı eşanjörleri, termal kontrol sistemleri ve termal depolama sistemleri gibi aktif termal enerji sistemleri, ısı transfer akışkanı (ITA) kullanır. Su gibi ITA'ların ısı taşıma kapasiteleri

FDM ile emülsiyon haline getirilerek iki fazlı bir akışkan haline getirilmek suretiyle arttırılabilir. Bu yöntemle; daha iyi bir ısı transfer hızı, neredeyse sabit sıcaklıkta ısı alışverişi, aynı ısı transfer hızı için daha düşük debi ihtiyacı ve hem termal enerji taşıma hem de depolama ortamı olarak kullanım imkânı elde edilebilmektedir (Alva et al., 2017; Salunkhe & Shembekar, 2012). Öte yandan, ITA içinde yer alan asılı mikrokapsüllerin, ITA ile doğrudan temas etmeyen mikrokapsüllere kıyasla daha büyük miktarda termal enerji depoladığı veya taşıdığı bildirilmiştir (Salunkhe & Shembekar, 2012).

ITA içindeki asılı FDM partikülleri akıcılığı etkilemekte ve ihtiyaç duyulan pompalama gücünü artırmakla birlikte, bu etkiler kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır (Alva et al., 2017; Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019; V. D. Cao et al., 2019; Trivedi & Parameshwaran, 2020). Ancak, FDM bulamaçlarının çözülmesi gereken birkaç sorunu vardır. FDM partikülleri, ısı eşanjörlerinin kanallarında katılaşabilir ve tıkanmaya neden olabilir. Ayrıca FDM emülsiyonunun kararlılığı, FDM'nin erime sıcaklığının üstünde pek de iyi değildir ve küçük FDM damlacıkları zamanla birbirleri ile bütünleşerek en nihayetinde taşıyıcı ITA ile tamamen ayrılmış tabakalar haline gelebilmektedir. FDM'lerin doğrudan ITA içine katılması yerine, yine bu karışımın tüm faydalarına sahip olan kFDM içeren çözelti ITA'lar kullanıldığında kabuk malzemesi FDM ile ITA arasındaki teması önlediğinden herhangi bir bütünleşme sorunu da olmaz (Alva et al., 2017).

Kısacası, kapsüllenmiş faz değişim malzeme çözeltileri (kFDM-S), faz değişim malzemelerinin gizli ısısından sorunsuz bir şekilde faydalanmak üzere hazırlanan ve çevrimin en az bir bölgesinde çok fazlı olan ısı transfer akışkanlarıdır, bu sayede de tek fazlı akışkanlardan daha verimli ısı taşıyıcılarıdır (V. D. Cao et al., 2019). Genellikle, çekirdeğinde bir parafin FDM'nin bulunduğu bir polimerik kabuktan oluşan mikro yahut nano boyutlu kapsüllerin su veya gliserol gibi taşıyıcı akışkanlar içerisinde çözündürülmesi ile oluşturulur. Faz değişim malzemelerinin sulu çözeltileri (bulamaçları) (FDM-S) taşıyıcı akışkanın ısı transfer hızını iyileştirmek için geliştirilmiştir. FDM-S'nin ısıtma, soğutma, iklimlendirme, ısı eşanjörleri ve havalandırma gibi birkaç yaygın uygulama alanı vardır (Barreneche et al., 2014, pp. 347–348).

kFDM-S termal enerji depolamada ve ısı transfer akışkanı olarak büyük potansiyele sahiptirler. Kapsül konsantrasyonundaki bir artış, faz değişim sıcaklığı aralığında ısı kapasitesini ve enerji depolama yoğunluğunu arttıracığından daha düşük debilerde çevrim kurularak ihtiyaç duyulan pompalama gücü azaltılabilir. Ancak buna karşılık olarak kFDM-S'nin viskozitesi de kapsül konsantrasyonu ile artarak pompalama direnci yükselebilir (Alva et al., 2017; V. D. Cao et al., 2019). Bu yüzden, kFDM çözeltilerinin reolojik özelliklerinin de

incelenmesi gerekmektedir. Birçok çalışmada kFDM çözeltilerinin Newtonyen akışkanlar olduğu değerlendirilmiştir ancak, bu türden birçok sistem Newtonyen değildir ve zamana bağımlı bir davranış sergiler (V. D. Cao et al., 2019).



Şekil 15. ITA olarak kullanılmak üzere hazırlanmış kFDM-S (Qiu et al., 2016)

FDM kapsül boyutları incelendiğinde, kalın kabuklu kapsüllerin pompalama sırasında daha az hasar gördüğü ancak bunun kabuktan çekirdeğe ısı transferini kötüleştirdiği görülmüştür. Bu iki parametre arasında optimum bir tercih yapılmalıdır. Ayrıca pompalama sırasında kapsüllerin zarar görmesi bakımından en iyi tercihin kapsül kabuklarına zarar vermeden uzun süre pompalayabilen santrifüj pompalar olduğu görülmüştür. Diğer taraftan kapsüller için taşıyıcı akışkan olarak suyun birçok yönden en ideal akışkan olduğu tespit edilmiştir. Su, kolay bulunabilirliği, ucuzluğu, yüksek ısı iletkenliği ve yüksek özgül ısı kapasitesi nedeniyle mikro kapsül çözeltileri için en çok kullanılan sıvıdır (V. D. Cao et al., 2019).

Su bazlı kFDM çözeltilerinin başlıca sorunları yüksek flotasyon (su yüzeyine çıkma) oranı ve işletilebileceği sıcaklık aralığının kısıtlı olmasıdır. Ek olarak, mikrokapsüllerin topaklaşması, viskozitenin artması, kanallarda ya da pompada tıkanması gibi çeşitli sorunlara neden olabilir. Topaklaşma, makul bir mikrokapsül konsantrasyonu tayin edilerek ya da yüzey aktif maddeler (sümfaktanlar) kullanılarak azaltılabilirken, flotasyonu engellemek için daha küçük boyutlu kapsüller kullanmak ve kapsüller ile taşıyıcı ortamın yoğunluğunun dengelenmesi çözüm sunabilmektedir (V. D. Cao et al., 2019, p. 180).

kFDM-S sistemleri normal sulu sistemlerle karşılaştırıldığında birçok yönden çok daha karmaşıktır. Kapsül ve çekirdek malzemesi olarak çeşitli malzemeler kullanılması, imalat yöntemlerinin çeşitliliği ve elde edilen kapsüllerin homojen olmaması, katkı maddeleri kullanılması, çekirdek/kabuk oranları ve kFDM'lerin çözelti içindeki kütle kesri gibi çok sayıda

parametre, bu akışkanların özelliklerinin tam ve kesin olarak tayin edilebilmesini zorlaştırmaktadır. Bu parametreler aynı zamanda kFDM-S'lerin asıltı kararlılığını, reolojik ve termal özelliklerini etkileyerek kFDM-S'leri önemli ölçüde çeşitlendirmekte ve farklılaştırmaktadır. Sonuç olarak, farklı çalışmalardan elde edilen verilerin ve bulguların karşılaştırılması ve kıyaslanması oldukça zorlaşmaktadır. Son yıllarda FDM'ler, avantajları nedeniyle araştırmacılar için tercih edilen bir araştırma sahası haline gelmeye başlamış ve termal uygulamalarda da üzerinde çokça çalışılmaya başlanmış olsa da, kFDM-S'lerin karakterizasyonu için halen uluslararası bir standart bulunmamaktadır (S. A. Ali, 2017).

kFDM sulu çözeltilerin termal performansı

kFDM-S'lerin mikro kanallı ısı eşanjörleri, güneş panelleri, termik santraller gibi birçok sistem için bir ITA olarak potansiyel uygulamaları vardır. kFDM-S kullanılmasıyla, ısı eşanjörü borularının duvar sıcaklıklarının düştüğü bulunmuştur. Isı transfer özelliklerini etkileyen parametreleri analiz etmek için yapılan teorik çalışmalar bulunmaktadır. Çalışmalar, Stefan sayısının ve bulamacın içindeki kFDM'nin hacimsel konsantrasyonunun, laminar akışlı bir sistemde ısı transfer hızı üzerindeki en etkili parametreler olduğunu göstermiştir. Sayısal çalışmalarda, kFDM-S'nin Nusselt sayısının tek fazlı akışkandan 1.5-4 kat daha yüksek olduğu (Salunkhe & Shembekar, 2012) öngörülmüştür. Çeşitli çalışmalarda, Stefan sayısı, hacimsel konsantrasyon, mikrokapsül çapının kanal çapına oranı, Reynolds sayısı ve süspansiyonun homojenliği gibi farklı parametreler deneysel olarak analiz edilmiştir (Alva et al., 2017) ve başlıcaları **Tablo 7**'de yer almaktadır.

Tablo 7. Değişik Parametrelerin, Boyutsuz Sayıların Türbülanslı ve Laminer Akışlı Kapsüllenmiş kFDM-S'lerin Isı Transferine Etkileri (Qiu et al., 2017)

Parametre/Sabit/Boyutsuz Sayı	Azalma (↓) veya Artma (↑)		Isı Transferini İyileştirme Sebebi
	Laminer	Türbülanslı	
Isı İletim Katsayısı	↑	↑	Daha fazla ısı aktarımı
Konsantrasyon	↑	↑	Aynı hacimde daha fazla gizli ısı
Tanecik boyutu (1-1000μ)	↑	↑	Artan partikül yayılımı
Debi veya hız	↑	↑	Artan türbülans
Reynolds Sayısı	↑	↑	Artan türbülans
Prandtl Sayısı	↑	↑	Bileşke kuvvet
Stephan Sayısı	↓	↓	Bileşke kuvvet
Peclet Sayısı	↑	-	Bileşke kuvvet
Faz değişim sıcaklık aralığı	↓	↓	Faz değişim entalpisi
Giriş aşırı soğutması	↓	↓	
Isı akısı	↓	↓	

Tablo 7’te de görüldüğü gibi kFDM-S ve çevresi arasındaki ısı transferi, FDM partiküllerinin ağırlıksal oranı, özgül ısı kapasitesi, gizli ısı, hız, Reynolds sayısı, Prandtl numarası ve Peclet sayısı arttırılarak veya giriş aşırı soğutması yahut faz değişim sıcaklığı ve yanı sıra Stefan sayısı azaltılarak arttırılabilir.

Türbülans girdapları ve laminer alt tabaka kalınlığı kadar küçük olan FDM kapsülleri içeren sulu karışımlar tek fazlı akış özelliği sergileyeceğinden; ısı transfer katsayısı akışkanın efektif ısı iletim katsayısı ile artar.

Faz değişim malzemesi içeren sulu karışımlar, laminer veya türbülanslı akış koşulları altında olsun ya da olmasın, ısı transfer katsayısını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Nitekim parafin partikülleri içeren sulu karışım ile 10 °C ila 20 °C arasındaki sıcaklık farklarında yapılan bir deneysel çalışma, ısı transfer katsayısında 3 kat artış olabileceğini göstermiştir (Qiu et al., 2017).

Çok sayıda termal çevrimden sonra FDM çözeltilerinin fizikokimyasal değişimler gösterdiği iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, kapsüllerin zarar görmesinde ve kabukların kırılmasında etkin olan yük de değişken olup çalışma sıcaklığının bir fonksiyonudur, bu nedenle FDM-S sistemlerin tasarımında ve işletmesinde göz önünde bulundurulması gereken başlıca nokta sıcaklıktır (Barreneche et al., 2014).

Özet olarak, kapsüllenmiş FDM içeren sulu karışımların ısı iletim katsayılarının arttığı ve sadece bu artışın dahi ısı transfer kapasitesinin artmasında etkili olduğu bir gerçektir, bununla birlikte bir faz değişiminin meydana gelmesi ısı transferindeki bu iyileşmeyi kayda değer şekilde artırmaktadır. Melaminin termal kararlılığı arttırdığı ve melamin eklendikten sonra kompozitlerin homojenliğinin korunduğu belirlenmiştir (Acar, 2014). J.-F. Su, Wang, and Ren (2006) FDM’lerin dış çevre ve çevresel malzemelerden etkilenmesini önlemek ve pratikte uzun ömür sağlamak için melamin formaldehit (MF) kullanmıştır.

Çekirdek olarak n-heptadekan ve kabuk olarak polistiren kullanılarak emülsiyon polimerizasyon yöntemiyle sentezlenen mikro/nano kapsüllenmiş faz değiştiren malzemelerin DSC sonuçlarına göre, erime ve donma sıcaklıkları sırasıyla 21.48 ve 21.37°C erime/donma gizli ısılarının ise 136.89 ve 134.67 J/g olduğunu tespit edilmiştir. Beş bin termal çevrim sonrasında ise bazı kapsüllerin pompalama sırasında hasar görmesi sebebiyle 136.89 J/g’den 128.27 J/g’ye düşmüştür. Termal gravimetrik analiz (TGA) sonuçları, Micro/nano FDM’nin proseste iyi bir termal kararlılık göstermiştir (Sarı, Alkan, Kahraman Döğüşcü, & Biçer, 2014).

FDM kullanmak suretiyle bir sistemi termal olarak daha verimli yapabilmek için başlıca gereksinim FDM ile çevre arasındaki ısı transferinin maksimize edilmesidir (Rady, 2009) ancak

organik FDM'ler başta olmak üzere birçok FDM'nin düşük termal iletkenlik sergilediği bilinmektedir. Dolayısı ile bu alandaki çalışmaların odaklandığı başlıca sorun da, elbette, FDM'lerin termal iletkenliğini artırmaktır. Literatürde, kanatçık kullanımı, yüksek termal iletkenliğe sahip metal matrislerin FDM içinde kullanımı, FDM'lerin içerisine yüksek iletkenliğe sahip partiküllerin katılarak dağıtılması ve mikro/nano kapsülleme gibi tekniklerin termal iletkenliği artırmada olumlu etki sağladığı rapor edilmiştir (Velraj, Seeniraj, Hafner, Faber, & Schwarzer, 1999).

Doğrudan FDM içine metal küreler/ızgaralar (Ettouney, Alatiqi, Al-Sahali, & Ahmad Al-Ali, 2004) yahut grafit eklemek (Sarı, 2004) gibi termal iletkenlik artırma yöntemlerinden başkaca kapsüllenmiş FDM'lerin kabuk yapıları üzerinde çeşitli yöntemler ile yapılan iletken tabaka oluşturma çalışmaları (US 7,544.416 B2, 2009) da olumlu sonuçlar vermiştir.

Faz değişimi olan bir ısı aktarımı sırasında; sürecin doğrusal olmaması, hacimsel değişim ve ısı transfer mekanizmasının yeteri kadar bilinmemesi gibi nedenlerle ısı transferinin net olarak belirlenememesi, faz değişimi olan termal bir sistemin performansının da tam olarak değerlendirilebilmesinin önündeki başlıca engeldir (Regin et al., 2008).

kFDM-S'lerin hidrodinamik performansı

kFDM-S başlıca sorunları, yüksek yüzdürme hızı ve sınırlı çalışma sıcaklığı aralığıdır. Ek olarak, mikrokapsüllerin aglomerasyonları, viskozitenin artması, tıkanmış kanallar veya pompa gibi çeşitli sorunlara neden olabilir. Aglomerasyon, makul bir mikrokapsül konsantrasyonu belirleyerek veya yüzey aktif maddeler (yüzey aktif maddeler) kullanılarak azaltılabilirken, yüzdürmeyi önlemek ve kapsüllerin ve taşıyıcı ortamın yoğunluğunu dengelemek için daha küçük boyutlu kapsüller kullanmak çözümler sunabilir (V. D. Cao et al., 2019, p. 180).

Bazı durumlarda basınç düşüşünde kısmi artışlar olmasına rağmen, kFDM bulamacının konvektif ısı transferini arttırdığını gösteren birçok teorik ve deneysel çalışma vardır. %25'in altındaki hacimsel bulamaç konsantrasyonlarının Newton olduğu varsayılabilir ve bu şekilde analiz edilebilir. İdeal koşullar altında, kFDM bulamacının Nusselt sayısı, tek fazlı akışınkinden 1,5 ila 4 kat daha yüksektir. Stefan sayısı, mikrokapsüllerin hacimsel konsantrasyonu, boyutsuz alt soğutma derecesi, boyutsuz faz değişim sıcaklık aralığı ve mikrokapsüllerin çapı, kFDM bulamacının ısı transferi geliştirmesini etkileyen baskın parametreler olarak bulunurken, mikrokapsülün kabuğu, FDM'ye özgü ısı fonksiyonunun şekli, özgül ısıların oranı ve termal iletkenliklerin ısı transfer özellikleri üzerinde çok az etkisi vardır (Hu & Zhang, 2002). kFDM-S, termal enerji depolama ortamı ve aynı anda HTF olarak büyük bir potansiyele sahiptir (Yang,

Liu, & Zheng, 2019). Kapsül konsantrasyonundaki bir artış, faz değişim sıcaklığı aralığındaki ısı kapasitesini ve enerji depolama yoğunluğunu artıracığından, gerekli pompalama gücü daha düşük akış hızlarında çevrim ile azaltılabilir. Bununla birlikte, buna karşılık, kFDM-S'nin viskozitesi, kapsül konsantrasyonu ile artarak pompalama direncini artırabilir (Alva et al., 2017; V. D. Cao et al., 2019). Bu nedenle kFDM solüsyonlarının reolojik özellikleri de araştırılmalıdır. Birçok çalışma, kFDM çözümlerini Newtonyen sıvılar olarak değerlendirmiştir, ancak bu tür birçok sistem Newton değildir ve zamana bağlı bir davranış sergilemektedir (V. D. Cao et al., 2019).

Fotovoltaik Termal Sistemler

Fotovoltaik termal sistemlerin gelişimi

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme işlemi, Fransız fizikçi Edmond Becquerel'in 1839'da ortaya koyduğu ilkelere uygun olarak gerçekleşir. Elektronlar, enerji taşıyan fotonun çarpması üzerine emici malzemenin valans bandından koparak daha yüksek bir enerji seviyesine çıkar. Böylece malzeme içerisinde bir elektrik akımı oluşur. Güneş pillerinde kullanılan malzemelerin bant enerjileri farklı değerlerdedir ve değerlik bant eşik enerjisinin güneş spektrumundaki foton enerjileriyle tam olarak örtüşmesi mümkün değildir. Foton enerjisinin, bant aralığı enerjisinden daha yüksek olan kısmı atıl kalır ve ısı enerjisine dönüştürülür. Bu atık ısı, güneş hücrelerinin ısınmasına ve hücrelerin elektrik verimliliğini olumsuz yönde etkilemesine neden olur. Ayrıca, gece ya da bazı hava olaylarının etkisi ile oluşan ısınma-soğuma döngüsü termal yorulma oluşturmakta ve PV hücrelerinin ömürlerinin azalmasına da neden olur (Öner et al., 2016).

Güneş kolektörlerinin 19. yüzyıla dayanan uzun bir ticari geçmişi olmasına rağmen, PV hücreleri ancak 1950'li yıllardan sonra ticari olarak varlık göstermeye başlamıştır. 1960'lı yıllarda güneş pilleri oldukça pahalı sistemler olarak ancak Ar-Ge ve uzay endüstrisine yönelik idi. 1973/1974'te OPEC ülkelerinin petrol ambargosundan sonra petrol fiyatlarında meydana gelen büyük artış birçok ülkede yenilenebilir enerji araştırmalarının güçlü bir şekilde teşvik edilmesine neden oldu. Böylece, daha önce çok pahalı olduğu düşünülen ve buna karşın verimleri oldukça düşük olan güneş pillerinin daha ekonomik ve verimli hale getirilmesine yönelik çalışmalarda büyük bir ivmelenme meydana geldi.

Fotovoltaik sistemlerde ısı akümüasyonu olmasına ve bu ısının PV verimine olumsuz etkileri olmasına rağmen, bu sistemlerden termal enerji kazanımı yoktur. Martin Wolf, 1976 yılında PV sistemlerinden termal olarak da faydalanabileceği fikrini öne sürmüştü (Wolf, 1976) ve geleneksel PV sistemi ile güneş kolektörünü birleştiren ve Fotovoltaik/Termal (PVT) adı

verilen ilk öncü çalışmayı yapmıştır. Bu çalışmada Boston, Massachusetts'teki 167 m²'lik bir müstakil konutun 37.985 kWh olan yıllık ısı yükünün 50 m² PV/T alanı ile karşılanabileceğini ve önemli enerji tasarruflarının elde edilebileceğini göstermiştir (Karellas et al., 2018).

Ardından, Arizona Eyalet Üniversitesi, MIT Lincoln Araştırma Laboratuvarı gibi üniversiteler ve çok sayıda özel araştırma ve geliştirme kuruluşları ve şirketler tarafından PVT çalışmalarına başlanmıştır. 1980 yılına gelindiğinde araştırmalar ABD'de yoğunlaşmış olmakla birlikte, Japonya, Almanya ve Fransa'da da başlamış bulunuyordu. 1982 yılına geldiğinde petrol fiyatlarında yaşanan sert düşüşler ve enerji piyasasındaki rahatlama, güneş enerjisine olan ilgiyi oldukça düşürmüştü ve 1981-1989 yılları arasında Reagan yönetimindeki ABD'de yenilenebilir enerji araştırmalarına ayrılan kaynaklar oldukça kısıtlanmıştır. Daha sonraki yıllarda Avrupa'da yenilenebilir enerjiye olan ilginin yeniden artması ve Hollanda'da sıcak kullanım suyu üretimi için güneş panelleri yerine camlı PVT sistemlerinin kullanılabilirliğini konu edinen doktora tezi ile birlikte yeniden canlanan PVT araştırmaları genişleyerek ve çeşitlenerek devam etmektedir (Fudholi et al., 2013; Said et al., 2022; H. A. Zondag, 2008).

Fotovoltaik/termal sistemlerde elektrik ve ısı birlikte üretilir (Browne, Lawlor, et al., 2015; X. Cao, Dai, & Liu, 2016). Geleneksel güneş ısıtıcıları (kolektörler) ile güneş pillerinin birleşiminden oluşan ikili sistem olarak kabul edilebilen PVT sistemlerinin teknik olarak uygulanabilir olduğu ve maliyetinin düşük olduğu gösterildikten sonra birçok çalışmaya kaynak olmuş ve aradan geçen yıllar boyunca çeşitlenmiş ve geliştirilmiştir (Al-Waeli, Sopian, Chaichan, et al., 2017, p. 693; Bakır, 2012; Browne, Lawlor, et al., 2015; Ömeroğlu & Öner, 2018).

Her biri geniş uygulama alanlarına sahip olan güneş pilleri ve güneş kolektörleri farklı amaçlar için kullanılıyor olsalar da, kurulum ve kullanım alanları, pazar ve son kullanıcı ihtiyaçları açısından karşılaştırıldıklarında çok farklı değillerdir. Buna rağmen, bu iki sistemi bir araya getirerek aynı sistemden hem ısı hem de elektrik elde eden PVT sistemlerine uzunca bir süre sınırlı ilgi gösterilmiştir (Öner et al., 2016).

PVT sistemleri termal ve elektriksel yön görünümünden açısından ayrıca değerlendirilebilmekle birlikte, PVT sistemlerinin performansını iyileştirmeye yönelik çoğu çalışmanın odağında, elektrik tarafından ziyade termal taraf yer almaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalarda, PVT sistemleri arasında performans parametreleri ve verimlilik açısından karşılaştırmalar sunulmakta ve daha önce yapılmış araştırmalarda elde edilen bulguların eleştirel irdelemeleri yapılmaktadır. Yenilenebilir Enerjinin giderek önemini artırdığı günümüzde PVT sistemlerinin de varlığını giderek artıracığı ve bu bağlamda önemini koruyacağı kabul edilmektedir (Özakın, 2020). Örneğin, PV/T havalı sistemlerin ön ısıtma

havası uygulamaları için umut verici olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, suyun temel akışkan olarak kullanıldığı, nanopartikül katkılı ITA'ların kullanılmasının, genel sistem verimliliğini arttırdığı sonucunu rapor eden çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu bağlamda, öne çıkan yenilikçi araştırma konularından birisi de kapsüllenmiş faz değişim malzemelerinin taşıyıcı akışkanlar ile kullanılması yoluyla bu sistemlerin verimliliklerinin artırılmasına yönelik çalışmalardır. Maliyetlerin azaltılması ve bu sistemlerin teknik tasarımının iyileştirilmesi ve etkinliğinin artırılması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu (Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan, 2017, p. 109) ve yeni çalışmalar için fırsatların var olduğu görülmektedir.

Sürdürülebilir enerji stratejileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının azami kullanımına yönelik çalışmalar, sıfır enerji binalar, yeşil enerji gibi konsept ve kavramlar çerçevesinde ve özellikle nanoteknolojik gelişmeler ile birlikte yeniden ilgi odağı olan bu sistemlerde kayda değer derecede hızlı bir ivme yakalanmıştır.

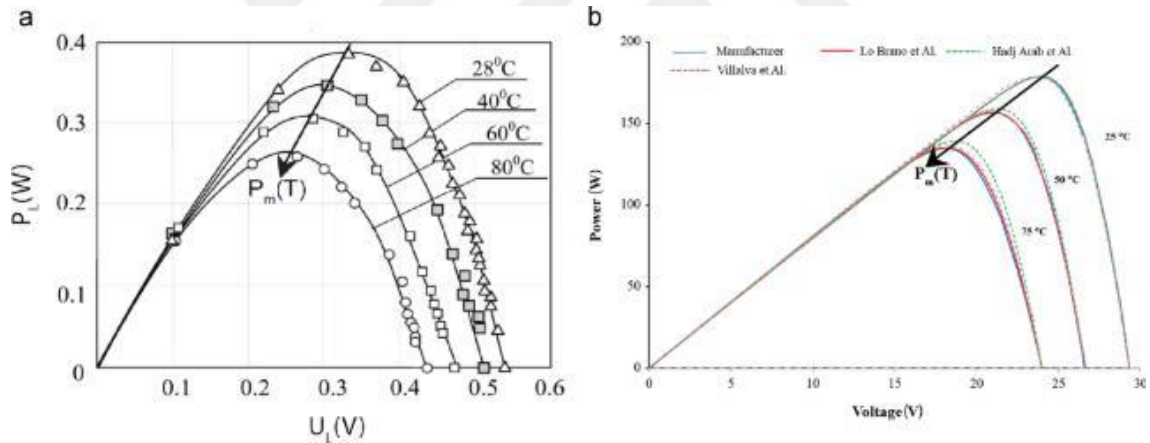
Fotovoltaik termal sistemlerin çalışma prensipleri

Çeşitli teknolojilerle, farklı malzemelerden üretilen ve farklı verim yüzdelere sahip fotovoltaik hücreler mevcuttur. En çok kullanılan fotovoltaik hücreler tek-kristalli silikon hücrelerdir. PV hücre üretiminin yaklaşık %80'i tek kristalli silikon bazlı PV hücrelerden oluşmaktadır. Bu pillerin verimi %28'e kadar çıkabilmekle birlikte ticari monokristal pillerin çoğunun verimi %15 ila %17 arasındadır. Verimi etkileyen ana faktörler arasında güneş radyasyonunun yoğunluğu, kullanılan yarı iletkenin kalitesi ve PV hücresinin çalışma sıcaklığı yer almaktadır.

Fotovoltaik sistemlerde hücre sıcaklığının yükselmesiyle birlikte verimin düştüğünü ve bu düşüşün engellenmesi için soğutma ihtiyacının olduğu bilinmektedir. Ancak soğutmanın özdeş olması, yani tüm hücre yüzeyinin aynı derecede soğutulması da önemlidir. Nitekim soğutmanın özdeş olmamasının güneş pili üzerinde önemli etkileri de olmaktadır. PV sisteminde meydana gelen ve seri direnci artırarak pil verimini düşürme eğiliminde olan etkiler arasında düzgün olmayan ısıma/aydınlanma ve sıcaklık dağılımı da yer almaktadır. Özellikle yoğunlaştırıcı PV/PVT sistemlerinde daha bariz olarak görülen PV panelinin yüzeyinde düzgün olmayan ışıınım akısı ve buna bağlı sıcaklık dağılımı, PV sisteminin performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve hücre sıcaklığını, seri direnci ve verimi etkilemektedir (H. M. Bahaidarah, Baloch, & Gandhidasan, 2016; Luque, Sala, & Arboiro, 1998). Geleneksel soğutma mekanizmalarının özdeş bir soğutma sağlayamaması ve hücre üzerinde sıcak bölgeler meydana gelmesine ve bunun sonucunda kısa vadede verim düşmesine, uzun vadede ise termal gerilmeler nedeniyle kalıcı yapısal hasarlara sebebiyet vermektedir (H. M. Bahaidarah et al., 2016).

Sonuç olarak, PV hücre sıcaklığının kontrol edilmesi, hücre verimliliğini artırma açısından en pratik yöntemidir. Mono-kristalli silikon bir PV hücresinin sıcaklığı ile verimi arasındaki yaygın olarak kabul edilen ilişki, elektrik üretiminin her bir K sıcaklık artışıyla yaklaşık olarak %0,4 ila %0,5 azaldığını göstermektedir (Atkin & Farid, 2015, p. 218; H. M. Bahaidarah et al., 2016). Diğer yaygın güneş pilleri ise çok kristalli ve amorf silikon hücreler olup bu fotovoltaik hücrelerin de elektriksel verimleri sıcaklık ile düşmektedir. Bu verim düşüşünü engellemek için PV hücresinin soğutulması ve optimum çalışma sıcaklığında tutulması gerekmektedir (Browne, Norton, & McCormack, 2015).

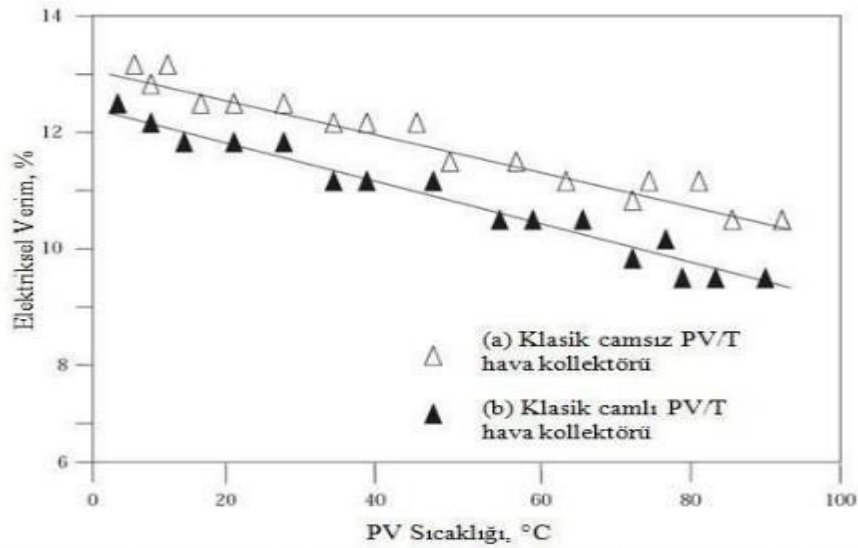
PVT sistemlerde ise; PV verimi açısından önemli olan, sıcaklığın, modülün optimum çalışma sıcaklığında veya yakın bir değerde tutulması iken, sistemden elde edilecek termal verimin de maksimize edilebilmesi ve toplam verimin yükseltilmesi için PV modülü genellikle bir kompartıman içerisine alınarak gerek ısıtım, gerekse de iletim ve taşınım ile ısı kayıplarının önüne geçilebileceği şekilde bir tasarım ile sisteme gelen güneş enerjisinin ısıya dönüştürülen kısmının, yani sistemde depolanan termal enerjinin, sadece PVT sistemin iş yapan akışkanı tarafından çekilebilmesi amaçlanmaktadır (Bakır, 2012; Vries, 1998, p. 1).



Şekil 16. (a) Silikon bir PV panel gücü ve geriliminin hücre sıcaklığı ile değişimi (Browne, Norton, & McCormack, 2015, p. 763)

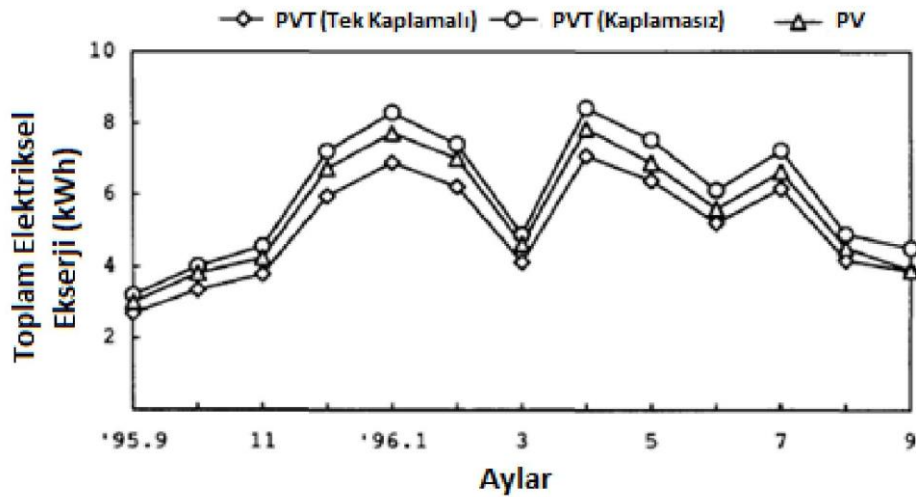
Şekil 16 (a)'da, sabit güneş ışınlamı altında, dört farklı sıcaklıktaki bir güneş pilinin çıkış gücü ve voltajının değişimini göstermektedir. Maksimum çıkış gücünün sıcaklığa bağlılığı, grafikte sıcaklık arttıkça gücün azalması ile açıkça görülmektedir. (b)'deki benzer grafikte ise farklı araştırmacılar tarafından literatüre rapor edilen çalışma sonuçlarına göre bir silikon PV panelde sıcaklık yükselmesi ile birlikte gücünde meydana gelen azalma görülmektedir.

Kaplanmamış PVT modüllerine sahip bir sistem iyi elektrik çıkışı sağlayabilir, ancak termal çıktısı hala küçük ve düşük sıcaklıkta olacaktır (X. Cao et al., 2016, p. 205).

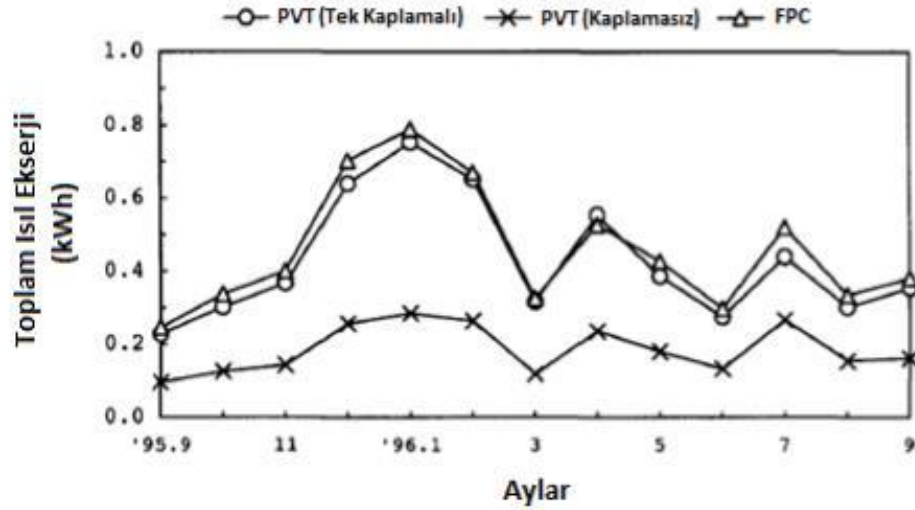


Şekil 17. PV veriminin hücre sıcaklığı ile değişimi (Bakır, 2012)

Camlı PVT sistemi içerisinde yer alan bir PV panelinin verimi, termal sistemin ihtiyaç duyduğu kompartımanın güneşe bakan saydam kısmında meydana gelen yansıma kayıpları nedeniyle, tek başına kurulu olan aynı PV panelinin veriminden göreceli olarak daha düşüktür. Ancak PVT sistemler içerisinde yer alan PV panellerin ortalama yıllık hücre sıcaklıkları ayırık PV sistemlerin yıllık ortalama hücre sıcaklıklarından daha düşük olarak gerçekleşmekte ve bu da PVT sistemi içerisinde yer alan PV panelinin ortalama elektriksel verimini iyileştirmektedir. Benzer şekilde PVT sistemlerde elde edilen termal verim, daha düşük optimal emici yüzey alanı ve emici yüzey ile taşıyıcı akışkan arasındaki termal direncin daha büyük olması nedeniyle, ayırık güneş kolektörlerine göre daha düşük olmaktadır. Bununla birlikte, bileşik sistemin sağladığı alan tasarrufu ve düşük kurulum maliyetleri PVT sistemlerin ayırık sistemler karşısındaki bu dezavantajlarını telafi etmekte ve bu sistemleri ekonomik kılmaktadır (Vries, 1998, p. 2).



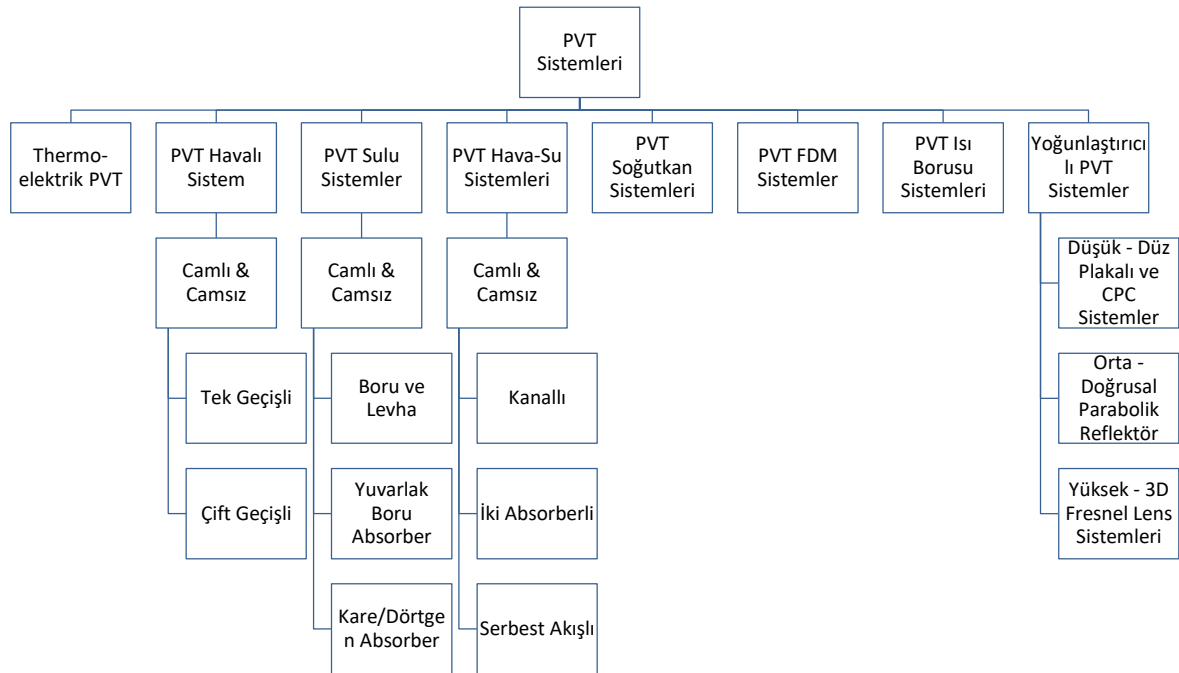
Şekil 18. PV ile kaplamalı ve kaplamasız PVT için elektriksel ekserji (Bakır, 2012)



Şekil 19. Termal ekserji bakımından kaplamalı PVT, kaplamasız düz levha kolektör (FPC) sistemlerinin karşılaştırılması (Bakır, 2012)

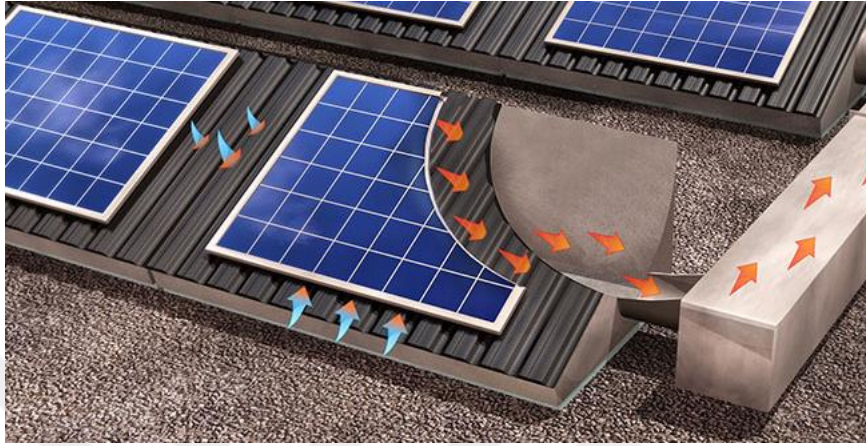
Fotovoltaik-termal entegrasyon için birçok alternatif bulunmaktadır. Güneş hücreleri mono-kristal, polikristal, amorf silikon (c-Si / pc-Si / a-Si), ince film veya bir başka teknoloji ürünü olabilir, modüller sırlı veya sırsız olabilir, akışkan dolaşımı doğal veya zorlanmış olabilir, akışkan hava, su, soğutkan veya özel akışkan olabilir, ya da sistem harici veya binaya bütünleşik olabilir (Öner et al., 2016). Farklı seçeneklerin her birindeki değişim ve gelişim PVT sistemlerinin performansını doğrudan etkilemektedir.

Bununla birlikte PVT sistemleri, **Şekil 20**'de görüldüğü gibi, başlıca olarak sistemden ısı çekme yöntemine ve akışkan türüne göre sınıflandırılmaktadır.



Şekil 20. PVT sistemlerin sınıflandırılması (Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan, 2016)

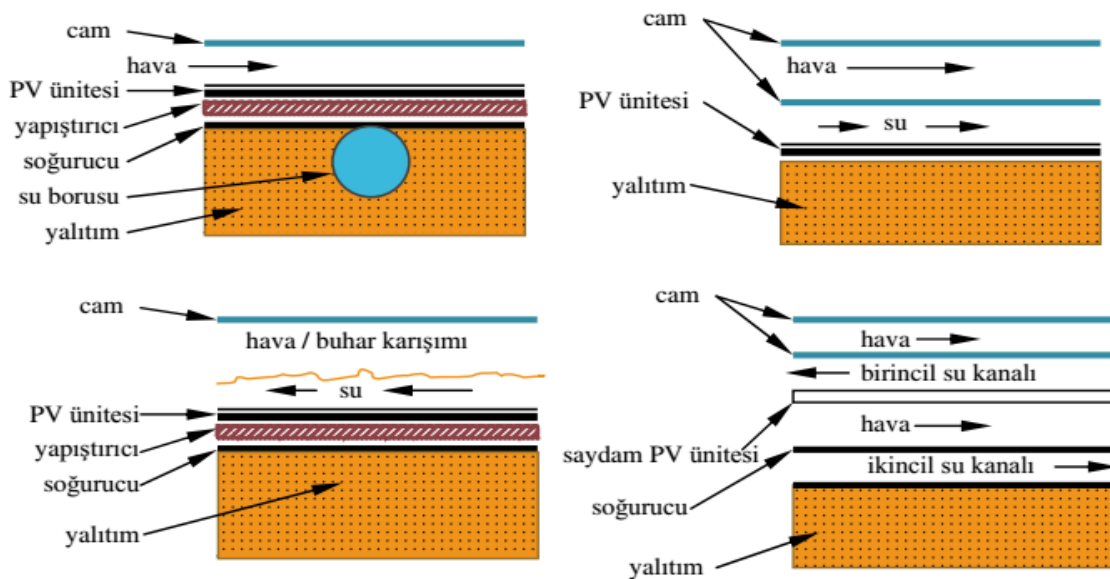
Hava ile soğutma sistemlerinde küçük maliyetli eklenti ve entegrasyonlar ile iyileştirme sağlanabilmektedir (Tonui & Tripanagnostopoulos, 2007). Ancak hem havanın özgül ısı kapasitesinin düşük olması, hem de sıcak/ılık havanın uygulama ve kullanım alanlarının kısıtlı olması nedeniyle, PVT hava sistemlerinde çekilen ısının faydalı işe dönüştürülebilmesi biraz daha zordur. Dolayısı ile su ve özgül ısı kapasitesi daha yüksek akışkanların kullanılması ile ilgili çalışmalar da giderek artmaktadır.



Şekil 21. Tipik bir PVT havalı sistem (SolarWall, 2019)

Örneğin Şekil 21’de gösterilen tipik bir PVT-hava sistemi %8 elektrik verimi, %40 termal verim sunar (Solanki, Dubey, & Tiwari, 2009) ve bu sistemlerin maliyeti düşük, entegrasyonu kolaydır (Tonui & Tripanagnostopoulos, 2007). Ancak, hava düşük ısı kapasitesine sahiptir ve sıcak hava sınırlı kullanım alanına sahiptir.

PVT sulu sistemlerde ise elektriksel verim %9,5 ve termal verim ise %50 dolayında elde edilebilmektedir (B. Huang, Lin, Hung, & Sun, 2001).



Şekil 22. Tipik bir PVT sulu sistem (Öner et al., 2016)

PVT sistemlerde su ya da hava kullanıldığında, ısı çeken hava ya da su doğrudan kullanıma sunulabilmektedir (direkt sistem). Ancak, özellikle farklı karışımlara sahip etilen glikol, nanoakışkanlar veya kFDM-S çözeltileri gibi özel akışkanların kullanıldığı durumlarda gerek maliyet, gerek sağlık ve konfor şartları nedeniyle, açık bir sistem kullanılması söz konusu değildir. PVT sisteminden çekilen ısıнын bir ısı değıştiricisi üzerinden başka bir ortama ya da akışkana aktarılması gerekmektedir (indirekt sistem) (Al-Waeli, Kazem, et al., 2019).

Böyle sistemlerde çekilen ısıнын miktarı birinci derecede belirleyici olmakta ve ısı aktarımında ısı pompası çevrimi kullanılmaktadır. Çekilen ısıнын miktarının az olması durumunda genellikle havalı ısı değıştiricileri, ısı miktarının yüksek olduğu durumlarda ise sulu ısı değıştiricileri kullanılmaktadır. Bununla birlikte suyu sistemde dolaştırmak için gerekli pompa gücü daha büyük olmaktadır. Soğutma sonrası PV'den elde edilen elektriksel verimdeki artışın büyük kısmı artan pompa gücünün karşılanmasına harcandığından dolayı net verim istenilen seviyeye ulaşmamaktadır. Bu nedenle özgül ısı kapasitesi daha yüksek ancak gerekli pompalama gücü düşük, ucuz ve kolay temin edilebilir yeni akışkan veya akışkan karışımlarının elde edilmesine yönelik araştırmalar önem kazanmıştır.

Bu kapsamda, TA'lara kıyasla daha yüksek termal iletkenlikleri nedeniyle nanoakışkanların ITA olarak kullanımı yaygınlaşmış olup PVT sistemlerinde kullanımları da oldukça artmıştır. Ancak nanoakışkanlar performans ve uygulanabilirlik açısından farklı özellikler sergilemektedir. PVT sistemlerinde kullanılacak en iyi nanoakışkanın belirlenmesine yönelik pek çok araştırma olmasına rağmen (Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019; Al-Waeli, Chaichan, Sopian, & Kazem, 2019), bugüne kadar, termofiziksel özellikleri bakımından kararlı nano-akışkanlar hazırlamakta kullanılacak ideal ve istikrarlı bir yöntem belirlenememiştir (Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019, p. 4).

Konu ile İlgili Çalışmalar

PV'lerin verimliliğinin sıcaklıkla ters orantılı değıştiğı ve PV soğutmanın gerekli olup olmadığı artık bir tartışma konusu değildir, ancak hangi soğutma yönteminin en etkili olduğu konusunda hala bir tartışma konusudur. Tüm dünyada sayısız çalışma yapılmıştır. Konu o kadar geniş ve derin ki, bir araştırmacının veya bir grup araştırmacının tüm soğutma tekniklerini tüm yönleriyle ele alması mümkün bile değildir. Bu nedenle bazı araştırmacılar, her biri PV soğutmanın farklı yöntem ve yönlerini ele alan kendi araştırmalarını yapılandırmak veya planlamak için önceki çalışmaların kapsamlı incelemelerini yapmak zorunda kalmıştır (Agyekum, PraveenKumar, Alwan, Velkin, Shcheklein, & Yaqoob, 2021; H. M. Ali, 2020; H. M. Bahaidarah et al., 2016; H. Bahaidarah, Subhan, Gandhidasan, & Rehman, 2013; Baloch, Bahaidarah, Gandhidasan, & Al-Sulaiman, 2015; Chandel & Agarwal, 2017a; Feng, Huang,

Ling, Fang, & Zhang, 2021; Lingkun Liu, Jia, Lin, Alva, & Fang, 2017; Mojumder, Chong, Ong, Leong, & Abdullah-Al-Mamoon, 2016; Nižetić, Giama, & Papadopoulos, 2018; Nižetić, Papadopoulos, & Giama, 2017; Ren, Ma, Lin, Fan, & Li, 2018; Shahsavar, Eisapour, & Talebizadehsardari, 2020; Shen et al., 2021; Shukla, Kant, Sharma, & Biwole, 2017; Zhe et al., 2019). Bununla birlikte, gelecekteki çalışmalarda göz önünde bulundurulacak temel fikirleri ve prensipleri tespit etmek ve bu alandaki araştırmaların sınırlarını bilmek adına mevcut çalışmaların taranması ve incelenmesi de ayrıca önemlidir (Al-Waeli et al., 2016).

En etkili soğutma yöntemi olmak, maliyet etkinliği, uygulanabilirlik, sıvı/soğutma ortamının maliyeti, maliyet geri kazanım faktörü, geliştirme faktörü vb. gibi çeşitli alt faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, herhangi bir soğutma belirli durumlarda uygulama için uygun olabilir veya olmayabilir. Örneğin Chandel and Agarwal (2017a), bir PV-FDM sisteminin yalnızca yıl boyunca yüksek güneşe alan ve mevsimler arası iklim değişikliğinin nispeten az olduğu bölgelerde etkili olacağını bildirmiştir. Yine de, bu durum hala değişmeye açıktır. Nitekim, bir zamanlar PV enerji üretimi sadece laboratuvar ölçeğinde bir uygulamaydı ve uydular için yalnızca dünya dışı güç üretimi için bir seçenek olarak kabul edildi, ancak şimdi fosil yakıt bazlı enerji üretimine bağımlılığı azaltmak ve hatta değiştirmek için uygun bir seçenek haline geldi (Misha, Abdullah, Tamaldin, Rosli, & Sachit, 2019).

PVT sistemleri, kurulum alanından tasarruf etmek, maliyetleri azaltmak ve verim artırmak için geleneksel olarak iki ayrı sistem olan güneş panelleri ve güneş pillerinin birleştirilmesi ile ortaya çıkmıştır ve PV panelinin hava, su, nano-akışkan, faz değişim malzemeleri (FDM) ve bunların kombinasyonlarından oluşan çeşitli soğutma yöntemleri ile soğutulmasını ve birçok örneğinde elde edilen ısı enerjisinin faydalı ısı olarak kullanılmasını amaçlayan farklı PVT tasarımları ve konfigürasyonları önerilmiştir (Al-Waeli, Chaichan, Sopian, Kazem, et al., 2019, p. 178).

Her geçen gün güneş enerjisi alanında, özellikle de bilinen en yaygın iki güneş enerjisi uygulaması olan güneş kolektörleri ve güneş pillerinin bir birleşimi olan hibrit PVT sistemler üzerine daha fazla araştırma yapılmaktadır. Araştırmacılar, hem PV hem de güneş kolektörlerine kıyasla daha yüksek bir genel verime sahip olduklarından bu sistem üzerinde çalışmayı tercih etmektedirler. Bu itibarla, PVT sistemlerinin genel verimliliği, yalnızca PV modülünün elektriksel verimliliğinin iyileştirilmesine değil, aynı zamanda entegre termal sistemin termal verimliliğine de bağlıdır. Bu nedenle, PV soğutma sistemlerinin veya mekanizmalarının verimliliği ile ilgili olarak, PV panelinden çekilen ısıнын yararlı ısıya dönüştürülüp dönüştürülemeyeceği dikkate değerdir (Misha et al., 2019). Son otuz ila kırk yılda PVT sistemleri üzerinde yapılan çok sayıda araştırmaya rağmen, piyasada sadece birkaç verimli

PVT sistemi olmuştur (Sathe & Dhoble, 2017). Birçok araştırmacı halen yeni modeller / tasarımlar önermekle birlikte, bazı araştırmacılar da var olan model ve konfigürasyonların farklı iklim ve çevre koşulları altında performansını incelemeye yönelik çalışmalar yürütmektedir.

PVT havalı sistemler ticari ve teknolojik olarak ilerlemiş olmakla birlikte bu sistemle elde edilebilecek elektriksel ve termal verimler azami değerlerde sırasıyla %8 ve %39'a ulaşabilmektedir ve sıcak havanın uygulama alanları kısıtlıdır. PVT sulu sistemler de yaygın bir teknolojidir ve bu sistemlerde verimler su akış hızına ve sıcaklığına, akış kanalı şekli, boyutu ve geometrisine bağlı olarak %9,5 ve %50 gibi değerlerle daha verimlidir. ITA olarak suyun kullanıldığı mevcut sıvı soğutma sistemlerinde termal kapasite oldukça sınırlıdır ve soğutma talebi ancak yüksek debilerde ve yüksek hacimsel kapasitede karşılanabilmektedir. Bununla birlikte, çalışma süresi boyunca su sıcaklığının artması gibi karakteristik bir teknik problemin varlığı bu sistemlerin iyileştirme olasılığını sınırlandırmaktadır.

Ayrıca, PVT alanında çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen, iş yapan akışkan sıcaklığının sistemin kararlı çalışma sıcaklığından yüksek olması, çekilen ısı miktarının yetersizliği, akışkanın gece sistem içerisinde donması ya da sistem dışına sızıntı olması gibi bazı teknik problemler halen tam anlamıyla giderilebilmiş değildir.

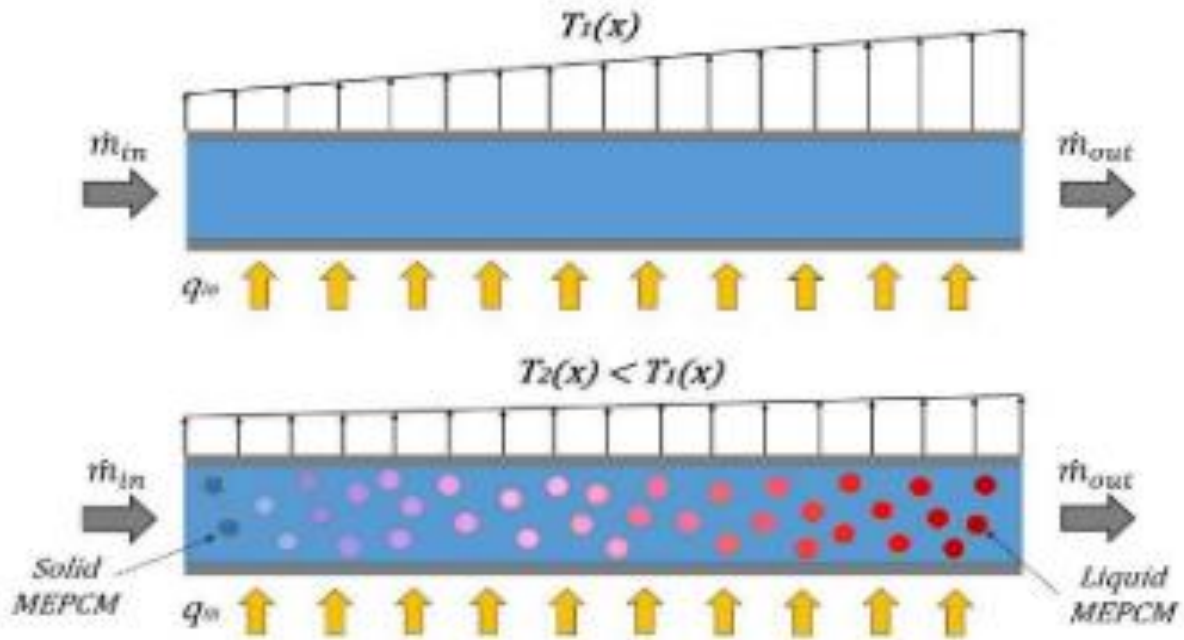
Soğutucu akışkanların kullanıldığı PVT sistemleri, sulu ve havalı sistemlere göre güneş enerjisinden faydalanma oranını artırabilmekte ve hem elektrik hem de termal verimde bu sistemlerin üzerinde %10 ve %65 seviyelerine ulaşabilmektedir. Ancak akışkanın sistemden sızması ve faz değişimleri nedeniyle akışkanın sistemde dengesiz dağılımı, çalışma rejiminde basınç kontrolünün sağlanmasındaki teknik sorunlar ve zorluklar nedeniyle genellikle ısı pompaları ile entegre olarak kullanılması ve ancak gelecekte daha popüler olması mümkün görülmektedir.

Termal iletkenlikleri temel akışkanlardan daha yüksek olduklarından dolayı ısı transfer ajanı olarak nanoakışkanların kullanılması yaygınlaştı ve çoğaldı. Hâlihazırda, nanoakışkanlar farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı değiştiricilerinde ve PVT sistemlerinde kullanımı da giderek artmaktadır. Ancak, nanoakışkanlar performans ve uygulanabilirlik bakımından farklı özellikler sergilemektedir. PVT sistemlerinde kullanılabilecek en iyi nano-akışkanı belirlemeye yönelik birçok araştırma vardır (Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019; Al-Waeli, Chaichan, Sopian, & Kazem, 2019). Bunlar arasında TA içerisinde dağılmış birden fazla nano-malzeme içeren yeni tip hibrit nano-akışkanlar da yer almaktadır (P. Sharma et al., 2022).

Yakın zamanda oldukça ilgi gören FDM uygulamalarından birisi de Faz değişim malzemelerinin mikro veya nano boyutlu kapsüller içerisine alınarak su veya farklı çözeltiler

içerisine değişik oranlarda karıştırılmak suretiyle elde edilen akışkanlar ile sıvıların erime/donma gizli ısılarından faydalanmak, ve böylece sirkülasyon devrelerinde tasarruf ederek sistemin elektriksel ve termal verimlerinde artış sağlamaya yönelik olan çalışmalardır. Bu yaklaşım, güneş kolektörleriyle ilişkili teknolojik kısıtlamaların ve handikapların üstesinden gelmede de etkilidir (Baronetto et al., 2014). Çalışma sıvısı olarak kFDM-S kullanan PVT sistemleri, hala erken araştırma aşamasında olduğu düşünülebilecek derecede yeni bir konudur. Ancak PV örneğinde olduğu gibi kFDM-S'ler de sadece yirmi yıl kadar önce laboratuvar ölçeğinde kullanılabilirken, yıllar içerisinde teknoloji bu özel sıvıları ısı transfer prosesleri için uygulanabilir ve verimli bir seçenek olarak geliştirmesini mümkün kılmıştır (Alvarado, Marsh, Sohn, et al., 2007; Liu Liu, Niu, & Wu, 2021; Yuan et al., 2022).

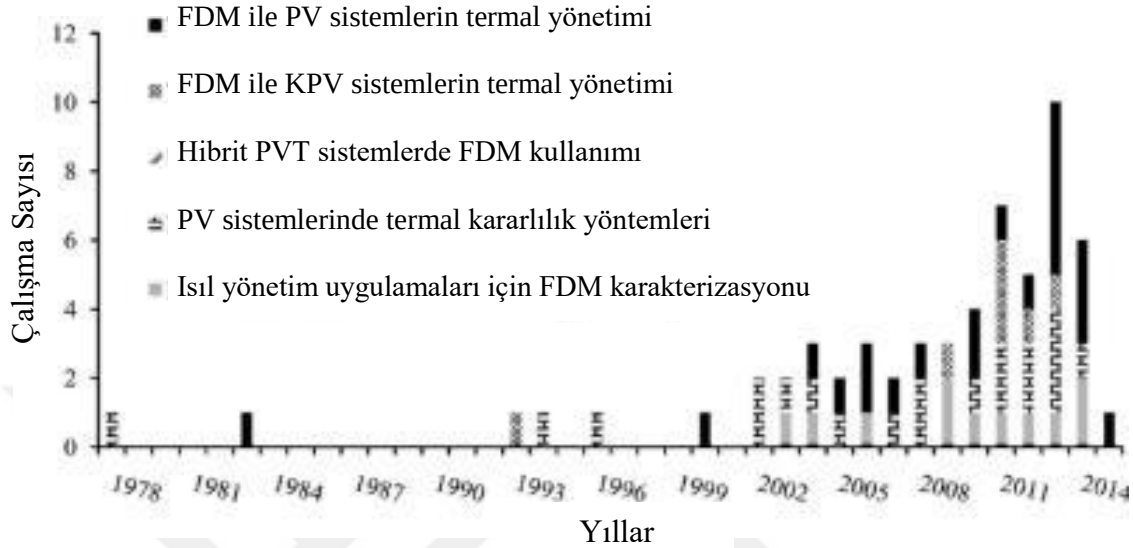
Öte yandan kFDM-S, termal sistemlerin termal kapasitesini artırmanın başarılı bir yolu olarak kabul edilmektedir. Bulamaçtaki faz değişim süreci ve kFDM'nin kütle oranı, ısı transfer sürecini etkiler. Bununla birlikte, fiziksel özellikleri ve ısı transfer özellikleri henüz tam olarak anlaşılamamıştır (Alvarado, Marsh, Sohn, et al., 2007, p. 1938) ve daha fazla araştırmaya hala ihtiyaç vardır.



Şekil 23. kFDM-S'nin suya kıyasla cidar sıcaklık gradyanı üzerindeki etkisi (Young, Benner, Santamaria, & Asme)

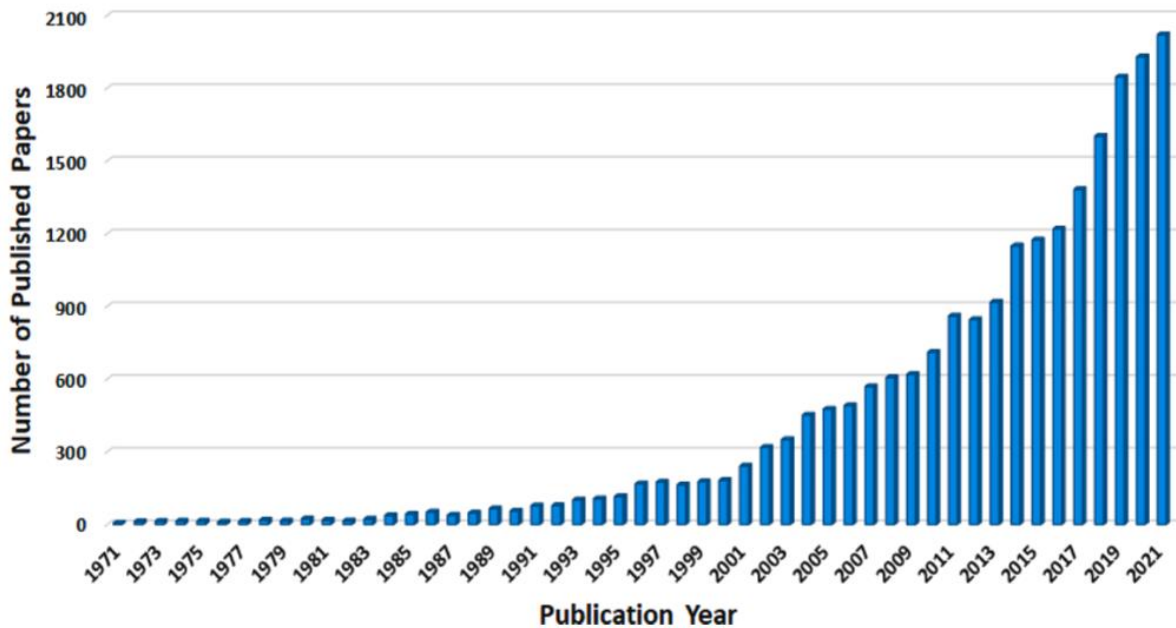
FDM kullanarak PV modüllerinin termal olarak kontrol ve denetimi üzerine yapılan çalışmalar ve literatüre eklenen makaleler, bu alandaki ilk çalışmanın yapıldığı 1978 yılının üzerinden geçen 24 yılın ardından, 2002 yılı itibari ile düzenli olarak ve giderek artmaktadır. **Şekil 24** her yıl yayınlanan FDM kullanılan çalışmaların sayısını ve çalışmaların tamamlandığı alanı göstermektedir. Fotovoltaik modüllerin termal olarak düzenlemesine olan ilgi ve termal

yönetimi için Faz değiştiren malzemelerin kullanımı, bu iki alanın birleştirilmesinden çok yıllar önce başlamıştır. Son 10 yılda FDM kullanılarak PV, CPV ve PVT sistemlerinin termal olarak kontrol edilmesi ve yönetilmesi üzerine çalışmalar ve yayınlar hızla artmış ve çeşitlilik kazanmıştır (Browne, Norton, & McCormack, 2015, p. 765).

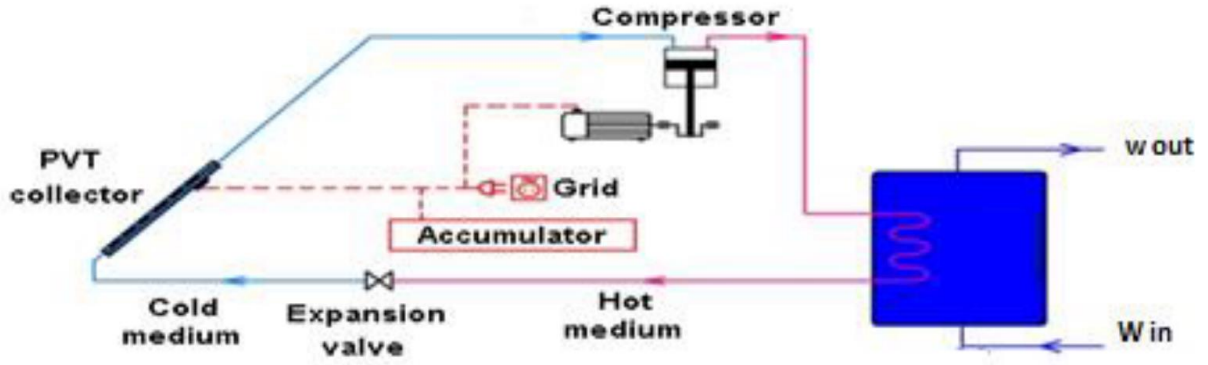


Şekil 24. FDM kullanılarak PV ve PVT sistemlerinin termal kararlılığı üzerine yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı (Browne, Norton, & McCormack, 2015, p. 765)

FDM'nin PV ve PVT sistemlerinde kullanımı üzerine yapılan çalışmaların 2000'li yıllarda dikkate değer olmaya başladığı gerçeğinin yanı sıra, yıllar içinde FDM'lerin mikro/nano kapsüllenmesini ve kFDM-S kullanımını da kapsayacak şekilde çeşitlenmiştir. **Şekil 25'**te görüldüğü gibi 2021 yılına kadar yaklaşık iki bin çalışma yayımlanmıştır.

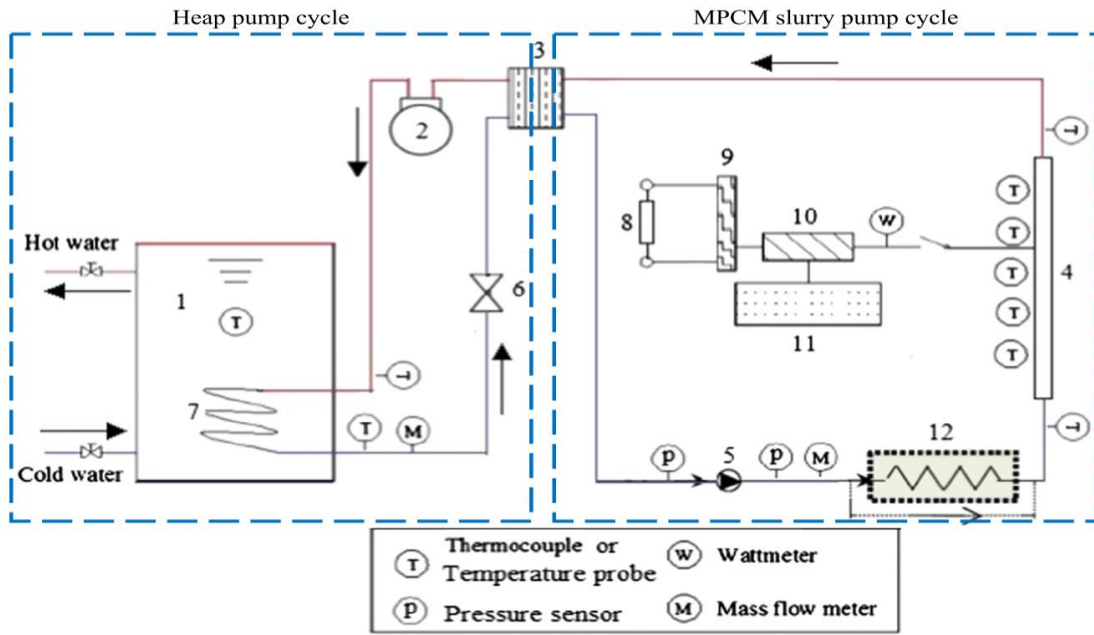


Şekil 25. FDM, kFDM ve kFDM-S kullanımı üzerine yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı (Ghasemi et al., 2022)



Şekil 26. Bir PVT Hibrit sistemin genel yapısı (S. A. Ali, 2017).

Yıl boyunca yenilenebilir enerji kaynaklarından ürettiği enerjinin yıllık tüketiminden daha fazla olduğu çevreci (Energy-plus) evlerde ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının sürdürülebilir bir şekilde karşılanabilirliğini araştıran bilim adamları, kapsüllenmiş FDM içeren sulu karışımların/çözeltilerin fotovoltaiik / termal (PVT) sistemde iş yapan akışkan olarak kullanmışlar ve elektriksel ve termal verimin sulu sistemlere oranla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir (Al-Waeli, Sopian, Chaichan, et al., 2017, p. 695).



Şekil 27. FDM sulu karışımları kullanan PVT sistemi ve çevrimler (Qiu et al., 2016)

kFDM-S çözeltilerinin hazırlanması nispeten maliyetli olduğu ve çok büyük miktarlarda kullanılması ekonomik olmadığından, genellikle çift çevrimli sistemlerde birincil çevrim akışkanı olarak kullanılmaktadır. **Şekil 27'**da yer alan örnek bir deney sisteminde, PVT modülü, kFDM-S-soğutkan eşanjörü (evaporatör), bir kompresör, bir soğutkan-su ısı eşanjörü (kondenser), bir su deposu, bir invertör ve pompa, vanalar, bir elektriksel direnç ve kontrolör gibi diğer gerekli kontrol ve ölçüm elemanları kullanılmıştır. Bir güneş simülatörü ile aydınlatılan PVT modülü gelen güneş ışınımından elektrik üretmekte, artık ısı ise PV

hücrelerinin arka yüzeyine tutturulmuş serpantin borusundan akan kFDM-S ile çekilmektedir. Çekilen ısı kFDM-S içindeki FDM parçacıklarının erimesine neden olarak sabit sıcaklıkta faz değişimi sayesinde akışkanda sıcaklığında oldukça düşük bir artışa neden olarak düşük debilerde yüksek miktarda ısı çekilmesini sağlamaktadır. kFDM-S daha sonra ısı pompasının evaporatörüne akarak ısı pompası çevrimindeki iş yapan akışkana (R134a) ısı transferi gerçekleşmektedir. Böylece, kFDM-S içindeki FDM tanecikleri atılan ısı nedeniyle yeniden donarak ısı pompası çevrimindeki soğutkanının (R134a) buharlaşmasına yol açar. Soğutucu akışkan içindeki ısı da daha sonra kondenserden geçen kullanım suyuna atılarak sıcak su elde edilmiş olur (Qiu et al., 2016, pp. 263–264).

kFDM-S'nin ITA olarak kullanılmasının, viskozitede dolayısıyla da pompalama gücünde makul bir artışa karşılık TA'nın etkin ısı kapasitesinde, enerji yoğunluğunda ve etkili termal iletkenliğinde dikkate değer bir gelişme sağlayarak daha düşük bir duvar sıcaklığı gradyanı sağladığı gösterilmiştir (Alva et al., 2017; Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019; V. D. Cao et al., 2019; Trivedi & Parameshwaran, 2020).

Literatüre bakıldığında, ticari kFDM kullanılarak veya özel olarak tasarlanmış ve sentezlenmiş kFDM'ler ve kFDM-S ITA'lar kullanılarak yapılan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. kFDM-S'lerin ITA olarak kullanıldığı termal sistemler arasında ısı depolama sistemlerinin yanı sıra PVT sistemlerini de içeren ısı aktarım sistemleri yer almaktadır. kFDM-S'nin hazırlanmasında kullanılmak üzere hali hazırda mikro veya nano boyutta ticari kFDM'ler piyasada bulunmaktadır. Son on yılda çeşitli kFDM sentez ve karakterizasyon çalışmaları yapılmış ve ticari kapsüller kullanılarak hazırlanan kFDM-S'lerin PVT sistemlerinde kullanımı üzerinde de bazı çalışmalar yapılmıştır (Yeşilyurt et al., 2019). Bununla birlikte, belirli problemler özel çözümler gerektirdiğinden, özel kFDM/kFDM-S'nin hazırlanmasına hala ihtiyaç vardır.

Akışkanın efektif viskozitesi ile FDM'nin mikro ve nanokapsüllerle termal dilatasyonu arasındaki ilişki araştırılması gereken parametrelerden olmakla birlikte (Dutil, Rousse, Salah, Lassue, & Zalewski, 2011), katı ve sıvı sınır tabaka hareketinin ve iki fazın karışımının yeterince bilinmemesi nedeniyle, faz değişim sürecinin simüle edilebilmesi önemli bir sorundur (Prakash, Garg, & Datta, 1985). Özellikle FDM'nin derinliğinin artmasıyla arafaz sınırının malzemenin bir ucundan diğerine hareketini geciktirmesi nedeniyle, faz değişiminin simüle edilebilirliği daha da zorlaşmaktadır. Ancak, FDM'nin mikrokapsüller içinde tek fazlı özellik gösterebileceğini ve makul bir hata payı dahilinde bu sorunun çözümünün basitleştirebileceği sayısal çalışmalar ile gösterilmiştir. Nano-akışkan ve nano-FDM tabanlı yenilikçi PVT sistemleri için geliştirilen matematiksel bir modelin, deneysel sonuçlarla tatmin

edici bir şekilde uyumlu sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Chamrathy and Utturkar (2009) kFDM-S kullanan sıvı soğutmalı sistemler için bir tasarım kılavuzu olarak kullanılabilecek nitelikteki çalışmada, kFDM-S'ler kullanılarak elde edilen fayda marjlarını değerlendirmek için teorik bir performans ölçüsü geliştirmiş ve bunu kullanarak teorik olarak hesapladığı kFDM-S'lerin efektif ısı kapasitelerini deneysel ölçümlerle karşılaştırmıştır.

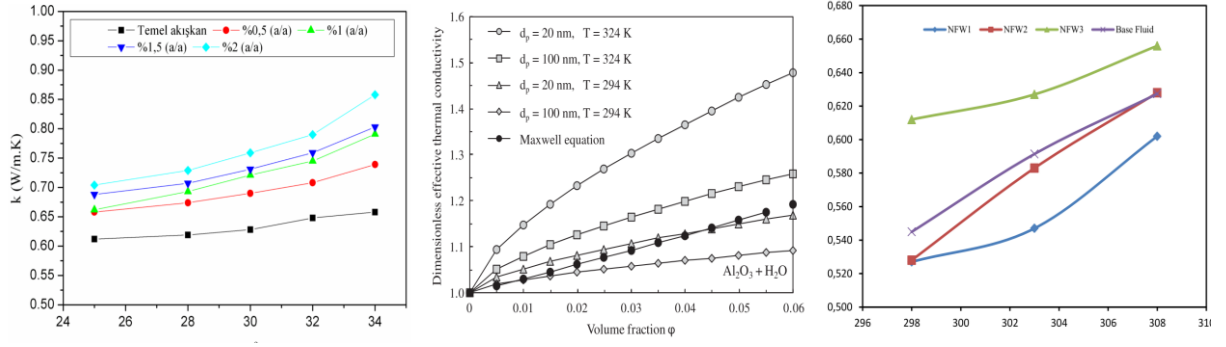
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi, Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ve Termo-Gravimetrik Analiz (TGA) kullanılarak dokosan çekirdekli ve polimetilmetakrilat (PMMA) kabuklu kFDM karakterizasyonu dokosanın 41.01°C'de eridiğini ve 40.61°C'de kristalleştiğini ve bu faz değişimlerinde sırasıyla 54.6 J/g ve 48.7 J/g gizli ısı alışverişi olduğu gözlemlenmiştir. TGA analizinde ise iyi bir kimyasal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür. Hızlandırılmış termal döngü testlerinde, kFDM'nin termal kararlılığının da iyi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, dokosan kFDM'lerin termal enerji depolamada yüksek kullanım potansiyeline sahip olduğu ve PVT sistemleri gibi termal uygulamalarda kullanıma uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Alkan et al., 2009, p. 143).

5-10000 µm aralığındaki kapsül çapları ile yapılan araştırmalar, 100 µm'nin kristalleşme sıcaklığının arttığı ancak bu değerin üzerinde etkilenmediği kritik bir değer olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, kapsül çaplarının mümkün olduğu kadar küçük olması arzu edilir. Ayrıca, daha küçük çaplar, pompalama sırasında kapsüllerin hasar görmesini de en aza indirecektir (X. Zhang, Fan, Tao, & Yick, 2005).

12 µm, 4,3 µm ve 104 nm boyutlarında, küresellik faktörü 0,94-0,95 olan küresel morfolojilerde iki farklı yöntemle sentezlenen Rubitherm RT27 çekirdekli ve farklı kabuk malzemelerine sahip kFDM'lerin termal karakterizasyonu, yüksek ayrışma sıcaklığı ve termal ortaya koydu. kFDM'lerin termal sistemlerde beklenen işlevleri yerine getirmek için tamamen uygun olduğu bildirildi (Bayés-García et al., 2010, p. 1235).

Başka bir çalışmada (Alvarado, Marsh, Thies, et al., 2007, p. 1772) oktadekan kFDM'nin suyla karıştırılmasıyla elde edilen kFDM-S'nin sudan daha yüksek bir ısı transfer kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir. Gizli füzyon ısısının, erime ve katılaşma noktalarının ve kFDM dâhil olmak üzere katı veya sıvı numunelerin özgül ısı kapasitelerinin doğru bir şekilde ölçülmesini sağlayan DSC analizleri ile, kFDM'nin kütle konsantrasyonunun yaklaşık %15 olduğu durumda ITA'nın termal kapasitesinin %70 arttığı rapor edilmiştir.

MF/LA kFDM-S ile elde edilen termal iletkenlik iyileştirmeleri literatürle uyumludur (Corcione, 2011; Doruk, 2017; Erdoğan, 2017).



Şekil 28. kFDM-S'nin farklı kapsül konsantrasyonları için sıcaklığa karşı termal iletkenliği (Corcione, 2011; Doruk, 2017; Erdoğan, 2017).

kFDM-S'nin dolaşımı, malzeme seçimi aşamasında özel dikkat ve değerlendirme gerektiren başka bir sorunu içerir: yapısal kararlılık. kFDM'lerin kabuğu, pompalamanın neden olduğu kuvvetlere dayanacak kadar güçlü olmalıdır. Yapılan bir çalışmada melamin ilavesinden sonra melamin termal kararlılığı arttırdığı ve kompozitlerin homojenliğini koruduğu tespit edilmiştir (Acar, 2014). Bu nedenle FDM'lerin dış ortamdan ve malzemelerden etkilenmesini önlemek ve uygulamalarda dayanıklılıklarını ve sağlamlıklarını sağlamak için melamin formaldehit kullanılmıştır (J.-F. Su, Wang, & Ren, 2006). Pek çok çalışmada, kFDM'ler kabuk malzemesi olarak melamin-formaldehit reçinesi kullanılarak sentezlenmiş, çekirdek malzemesi çoğunlukla n-oktadekan ve sentez yöntemi yerinde polimerizasyon olmuştur (Sarı, Alkan, Karaipekli, & Uzun, 2009).

Üre-melamin-formaldehit kabuğu ve n-oktadekan çekirdekli kFDM'nin faz değişim özellikleri ve termal kararlılığı üzerine yapılan bir çalışmada, en iyi performans, termal kararlılığın arttığı bildirilen 0,2: 0,8:3 molar karışım oranında elde edildi. 163°C. Ayrıca, sikloheksan eklenerek termal kararlılık 200°C'ye yükseltilebilir (X. Zhang, Tao, Yick, & Wang, 2004).

Geniştirilmiş perlit (EP) kabuk ve LA çekirdek malzemesi kullanılarak, ağırlıkça %60 LA'dan oluşan kararlı bir FDM elde edildi ve yapılan DSC analizi ile 44.13 °C'de gizli füzyon ısısı 93.36 J/g bulundu. Ayrıca, 1000 termal döngüden sonra termal ve kimyasal kararlılığını koruduğu bildirildi. Sonuç olarak, LA'nın enerji sistemlerinde kullanım için tercih edilebilir ve uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Sarı, Karaipekli, & Alkan, 2009).

Çok sayıda FDM, bir dış mekan C-PVT sisteminde test edildi; burada laurik asidin PV sıcaklığını 22 derece düşürerek en iyi FDM olduğu bildirildi, ikinci en yakın ise 19.5 azalma ile palmitik asit oldu (Browne, Norton, & McCormack, 2015).

Bir uygulama için optimal olan herhangi bir FDM'nin başka bir uygulama için uygun olmayabileceğinin bilincinde olarak, bu çalışmada kullanılan PVT sisteminin ihtiyaçları ve sınır

koşulları temel alınarak FDM seçimi yapılmıştır. Bu itibarla PV modülün Nominal Çalışma Hücresi Sıcaklığının $45^{\circ}\text{C} \pm 2$ olduğu göz önüne alındığında, Laurik Asit (LA) amaca hizmet edecek iyi bir FDM olarak seçilirken, hem üstün mekanik özellikleri hem de termal özellikleri sayesinde Melamin Formaldehit (MF)'nin kabuk malzemesi olarak uygun bir malzeme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Al-Waeli, Chaichan, Sopian, and Kazem (2019) katkı maddesi olarak nano-SiC ve yüzey aktif madde olarak setil-trikromil amonyum bromür kullanıldıkları üç farklı tip nano akışkanın termo-fiziksel özelliklerini incelemişler ve su, %35 etilen glikol ve %35 propilen glikol karışımı ile PVT uygulamalarında kullanmak için en iyi temel akışkanı bulmaya çalışmışlardır. Üç nano-akışkanın termal iletkenliği, çalışılan sıcaklıklar bölgesinde birbirine yakın olmakla birlikte Glikol çözeltilerinin sudan daha kararlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Al-Waeli, Chaichan, Sopian, Kazem, et al. (2019, p. 178) yeni bir nanoakışkan / nano-FDM esaslı PVT sistemi için matematiksel bir model geliştirmiş ve bu modeli deneysel olarak test etmişlerdir. Önerilen matematiksel modelin deney sonuçları ile tatmin edici bir şekilde uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Çalışma, matematiksel ve deneysel metotlar için elektriksel ve termal verimlerin sırasıyla %13,7, %13,2 ve %72, %71,3 olduğunu göstermektedir. Cam, PV hücre, balmumu ve nano-akışkanda kaydedilen maksimum sıcaklıkların ise sırasıyla 41.2, 39.92, 38.8 ve 36.5 olduğu bulunmuştur.

İçerisinde FDM bulunan silindirik kapların depolama tankının üst kısmında konulduğu güneş paneli ile geleneksel güneş paneline göre sadece marjinal bir iyileştirme etkisi gözlenmiş, hatta bazı durumlarda performans kaybı olduğu rapor edilmiştir (Talmatsky & Kribus, 2008). Benzer bir deneyi alüminyum şişeler ile kapsüllediği sodyum asetat trihidrat FDM ile deneysel ve sayısal olarak yapan Ibáñez, Cabeza, Solé, Roca, and Nogués (2006) ise kapsüllenmiş FDM'nin sisteme dâhil edilmesi nedeniyle toplam enerji ihtiyacı içindeki güneş enerjisi kesrinin %4'ten %8'e yükseldiğini rapor etmişlerdir, ancak FDM ilavesinin performans iyileştirmesi için kritik bir değere sahip olduğunu ve kritik eşik aşıldıktan sonra sistemin performansını artırmayacağı, aksine azaltacağı bildirilmiştir.

X. Zhang et al. (2004), üre-melamin-formaldehit kabuk malzemeleri ile n-oktadekan çekirdekten elde ettikleri kFDM ile faz değişim özellikleri ve termal kararlılık üzerine incelemeler yaptıkları çalışmalarında en iyi performansın, 0,2: 0,8: 3mol karışım oranında elde edildiğini ve bununla termal kararlılığın 163°C 'ye kadar artmasının sağlandığı rapor edilmiştir. Kararlılık, sikloheksan ilave edilerek 200°C 'ye yükseltilebilmiştir. US 2009/0291309 A1, 2009 numaralı patentte, formaldehit / melamin (F/M) oranının, amino reçinesi ile kapsüllenen parafinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişler ve düşük

F/M oranının, pürüzsüz kapsül yüzeyi sunmakla birlikte mikrokapsülün yapısal mukavemetinde önemli bir azalmaya neden olduğunu, ancak, daha yüksek F/M oranlarında, kFDM'nin daha iyi mekanik özellikler sergilediğini bildirmişlerdir.

Suyun ikincil akışkan olarak kullanıldığı mevcut soğutma ve ısıtma dağıtım sistemlerinde termal kapasite oldukça sınırlı olduğundan yalnızca yüksek debi ve yüksek hacimsel kapasite ile ihtiyaçları karşılayabilecek durumdadır. Mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemeleri ile hazırlanan kFDM-S, sistemlerin termal kapasitesini arttırmanın başarılı bir yolu olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, 2-8 °C aralığında kFDM sulu çözeltisinin fiziksel özelliklerinin ve ısı transfer özelliklerinin tam olarak anlaşılması hala mümkün olmamıştır (Alvarado, Marsh, Sohn, et al., 2007, p. 1938).

Alvarado, Marsh, Sohn, et al. (2007) farklı debilerde ve ısı akısı değerlerinde çalıştırılan bir ısı transfer çevrimi kullanarak basınç düşümü ve konvektif ısı transferi verileri ile kFDM-S için gizli füzyon ısısı, erime ve donma noktaları ve sıcaklığa ve konsantrasyona bağlı viskozite verilerini topladıkları çalışmanın bulgularına göre süper soğuma fenomenini önlemek için çekirdekleştirici madde tipi ve konsantrasyon seçiminin gerekli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Araştırma faz değişim sürecinin ve kFDM'nin çözelti içindeki kütle kesrinin ısı transfer sürecini etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, sabit ısı akısı ve türbülans koşulları altında kFDM-S ile birlikte iyileştirilmiş yüzey borulaması kullanılmasının etkilerini araştırmışlardır.

Alkan et al. (2009, p. 143) emülsiyon polimerizasyonu yöntemini kullanarak polimetilmetakrilat (PMMA) kabuk ile dokosan çekirdeği kaplayarak enerji depolamada kullanmak üzere mikrokapsüller sentezlemişlerdir. SEM ve FT-IR spektroskopisi kullanılarak mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemelerinin (mkFDM) karakterizasyonu yapılmıştır. DSC ve TGA analizleri ile kapsüllerin termal özellikleri ve kararlılığı test edilmiştir. DSC analizi mikrokapsüller içerisindeki dokosanın 41.01°C'de eridiğini ve 40.61°C'de kristalize olduğunu göstermiştir. Erime ve kristalleşme gizli ısıları sırasıyla 54.6 ve 48.7 J/g olarak bulunmuştur. TGA analizi mkFDM'nin ayırt edilebilir üç aşamada bozunduğunu ve kimyasal kararlılığının iyi olduğunu göstermiştir. Hızlandırılmış termal çevrim testleri mkFDM'lerin termal kararlılığının da oldukça iyi olduğunu göstermiştir. Araştırma sonuçları, dokosan mkFDM'lerin termal enerji depolamasında kullanılma açısından yüksek bir potansiyele sahip olduğu ve güneş enerji kaynaklı alan ısıtması gibi termal uygulamalarda kullanıma uygun olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Sarı, Karaipekli, and Alkan (2009) çalışmalarında genleştirilmiş perlit (GP) kabuk ve laurik asit çekirdek malzemesi ile kararlı bir FDM elde etmişlerdir. Kütlece %60 laurik asit içeren FDM DSC verilerine göre 44,13°C' de 93,36 J/g'lık erime gizli ısısı ve 40,97°C' de

94,87 J/g'lık donma gizli ısıyla faz değişimleri gerçekleştirmiştir. 1000 termal çevrim sonunda termal ve kimyasal olarak kararlılığını koruduğu gözlenmiştir. Çalışma laurik asit çekirdeğin kimyasal ve termal kararlılığının ve termal enerji depolama özelliklerinin enerji sistemlerinde kullanıma uygun olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Al-Waeli, Chaichan, Kazem, and Sopian (2019) termal iletkenliğini arttırmak için nano-silisyum karbür ilave su esaslı nano-akışkanın termofiziksel özelliklerini beş yüzey aktif madde kullanarak incelenmişlerdir. Nano-akışkanın kararlılığının, emülsiyon içinde asılı nanoparçacıkların çökmesini yavaşlatmak için kullanılan yüzey aktif maddeye bağlı olduğu görülmüştür. Çökme ise nano-akışkanların termal iletkenliğini önemli ölçüde düşürmekte ve böylece ısı transferini azaltmaktadır. Emülsiyonda süspansiyon edilmiş nanopartiküllerin asılı kalma süresinin esas olarak kullanılan yüzey aktif maddenin türüne ve ultrasonifikasyon süresine bağlı olduğu gösterilmiştir. Yoğunluk, viskozite ve termal iletkenlik ölçümleri, kullanılan yüzey aktif maddenin değişmesinin önemli bir fark yaratmadığını ve daha fazla miktarlarda yüzey aktif madde eklemenin, nanoakışkanların yoğunluğu ve viskozitesinde çok sınırlı bir artışa neden olduğu ve termal iletkenlikte küçük bir azalmaya sebep olduğu rapor edilmiştir (Al-Waeli, Chaichan, Kazem, & Sopian, 2019).

Al-Mamoori (2017) Irak'ın El-Musayyib şehrinde gerçek zamanlı dış ortam testlerinde küresel kabuk içerisinde bulunan, biri Irak'ta birisi Almanya'da sentezlenmiş olan iki farklı parafin esaslı FDM malzemenin, borulu ısı eşanjör içerisindeki erime süreçlerini inceleyerek FDM'lerin termal depolama performansını araştırdığı çalışmasında literatür ile tutarlı sonuçlar elde ettiğini bildirmiştir.

(Al-Waeli, Sopian, Chaichan, et al., 2017) Malezya Selangor'da açık havada deneylerini yaptıkları çalışmalarında hem elektriksel verimi korumak hem de toplam verimi arttırmak için sistemin ısı kapasitesini kontrol etmek amacıyla bir SiC nano-akışkanlı sirkülasyon devresi ile parafin FDM kullanmışlardır. 0,17kg/s akışkan debisinde en yüksek güneş ışıyım periyodunda (12: 30-01: 30) hücre sıcaklığını 30 C düşürmüştür. Böylece önerilen PV/T-nano FDM-nano akışkan sistemi açık devre gerilimini 11–13 V'den 20-21 V'ye, gücü 61,1W'dan 120,7 W'a ve elektrik verimini %7,1'den %13,7'ye yükseltmiştir. Ayrıca, sistemin termal verimi %72 olarak kaydedilmiştir. (Al-Waeli, Sopian, Chaichan, et al., 2017, p. 693)

Melaminin termal kararlılığı arttırdığı ve melamin katkılандırıldıktan sonra kompozitlerin homojenliğinin korunduğu belirlenmiştir (Acar, 2014). J.-F. Su, Wang, and Ren (2006) FDM'lerin dış ortamdan ve çevre malzemelerinden etkilenmesini engellemek ve uygulamada uzun ömürlü olmasını sağlamak için melamin formaldehit (MF) kullanmışlardır. Çok sayıda çalışmada in-situ polimerizasyon yöntemi kabuk olarak melamin-formaldehit

reçinesi ve çekirdek olarak n-oktadekan kullanılarak mikro kapsüllenmiş FDM'ler sentezlenmiştir (Sarı, Alkan, et al., 2009).

Pakistan'da açık havada test edilen ve termal kararlılığının FDM kullanılarak sağlandığı bir C-PVT sisteminde çok sayıda FDM test edilmiştir. En uygun FDM seçiminin uygulamaya bağlı olarak seçilmesi gerektiği ve bir uygulama için optimum olan FDM'nin başka bir uygulama için uygun olmayabileceği notunu düşerek verdikleri deney sonuçlarına göre; laurik asidin PV sıcaklığının 22°C azaltılmasını sağladığı, en yakın ikinci değerin ise palmitik asit içeren FDM ile 19.5°C olarak elde edilebildiği bildirilmiştir (Browne, Norton, & McCormack, 2015).

X. Zhang et al. (2005) 5-1000 µm aralığında çaplara sahip kapsüller üzerinde yaptığı çalışmalarda 100 µm'nin kritik değer olduğunu, bu çapın altında çapın küçülmesinin kristalleşme sıcaklığını arttırdığını, fakat bu değerin üzerinde değişmediğini göstermiştir. Termal bir sistemde iş yapan akışkan içerisinde kullanılacak olması ve pompalama sırasında zarar görmemesi bakımından da kapsül boyutlarının olabildiğince küçük olması avantaj sağlayacağından, üretim yöntemi üzerinde kapsül boyutuna etkisi olan parametrelerin kontrolü sağlanarak optimum kapsül boyutunun elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Bayés-García et al. (2010, p. 1235) Rubitherm RT 27 marka ticari faz değişim malzemesi ile iki farklı yöntemle mikrokapsüller elde etmiş ve TOM (termo-optik mikroskopi) ve DSC (diferansiyel taramalı kalorimetri) ile termal olarak karakterize etmişlerdir. Küresel morfolojileri (0.94-0.95'in küresellik faktörü) ve parçacık büyüklüğü dağılımları belirlenmiştir. Farklı yöntemler ve farklı kabuk malzemeleri için 12 mm, 4.3mm ve 104 nm boyutlara sahip kapsüller elde etmişlerdir. Termal kararlılık tayini, Termogravimetrik analizleri (TGA) ile yapılmış ve sonuçlar yüksek bir ayrışma sıcaklığı olduğunu göstermiştir. Genel olarak, hazırlanan mikro kapsüllenmiş FDM'lerin, termal enerji depolamada öngörülen fonksiyonları yerine getirmeye tamamen uygun olduğu rapor edilmiştir (Bayés-García et al., 2010, p. 1235)

Chamarthy and Utturkar (2009, p. 239) kFDM-S'lerin kullanılmasıyla elde edilen fayda marjlarını değerlendirmek için teorik bir performans ölçümü geliştirmişlerdir. kFDM çözeltisinin etkili ısısı hakkındaki teorik tahminler deneysel ölçümlere kıyaslanmış ve kFDM-S kullanan sıvı soğutmalı uygulamalar için bir tasarım kılavuzu olarak kullanılabilecek sonuçlar rapor etmişlerdir (Chamarthy & Utturkar, 2009, p. 239).

FDM'lerin kapsüllenmesi üzerine yapılan deneysel çalışmalardan ayrıca olarak, kapsülleme teknolojisini ve uygulamalarını çeşitli yönlerden ele alan derleme çalışmaları da yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar da gerek sayı bakımından gerekse kapsam bakımından hala

yeterli seviyede değildir. C. Y. Zhao and Zhang (2011) mikrokapsüllerin sentezlenme yöntemleri ve uygulamaları ile ilgili derleme çalışmaları yapmışlar ancak sentez yöntemlerinden başlıca olarak kimyasal yöntemler üzerine odaklanmışlardır. Jamekhorshid et al. (2014) de sentezleme yöntemleri üzerine kapsamlı bir derleme çalışması yayınlamıştır. Giro-Paloma, Martínez, Cabeza, and Fernández (2016) yine mikrokapsüllerin sentezlenmesi, karakterizasyonu ve uygulama alanları ile ilgili derleme çalışması yapmıştır. Alva et al. (2017, p. 277) ise, sentezleme teknolojileri, karakterizasyonu ve uygulamaları ile ilgili olarak 2017 yılı itibarıyla son gelişmeleri özetlemeyi amaçlayan kapsamlı bir derleme çalışmasını literatüre kazandırmıştır.

Alvarado, Marsh, Thies, et al. (2007, p. 1771) faz değişim malzemesi olarak oktadekan içeren kFDM-S çözeltisi ile suyu ısı transfer akışkanı olarak karşılaştırdığı çalışmasında kFDM-S'nin suya oranla daha yüksek ısı taşımama kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir.

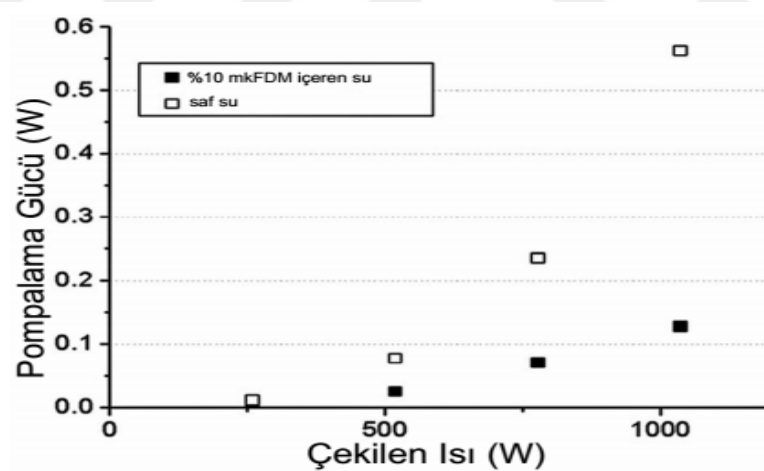
Trivedi and Parameshwaran (2020) FDM olarak Dimetil Adeptat ve kabuk malzemesi olarak melamin formaldehit kullandığı çalışmasında in-situ (yerinde) polimerizasyon yöntemini kullanarak üç aşamalı bir yöntemle çapları 5.6 μm ve 5.2 μm olan iki farklı kabuk-çekirdek oranına sahip yüksek küresellik ve esnekliğe sahip mikrokapsüller sentezlemiş ve daha sonra bu kapsülleri uygun hacim oranlarında taşıyıcı akışkanlar ile karıştırarak çözelti hazırlamıştır. Kapsüllerin mikro yapı, kimyasal yapı, termal kararlılık ve faz değişim karakteristiklerini araştırmış ve hazırladığı koloidal çözeltinin viskozite ölçümlerini yapmıştır. 2 ve 4MPa basınç testleri ile kapsüllerin mekanik dayanımını test etmiş ve entalpi kayıplarını ölçmüştür. Ayrıca kapsüllemeyi kaynaklanan termal iletkenlik düşüşlerini taşıyıcı akışkanın termal iletkenliğine oranla hesaplamış ve 1 numaralı ve 2 numaralı mikrokapsüllerde sırasıyla %0.01 ve %0.2 kayıp ile marjinal düzeyde etkili olduğunu göstermiştir. Kabuk kararlılığının iyi ve çatlama ve kırılmalara karşı mekanik direncinin yüksek olduğunu bulunan kapsüllerin taşıyıcı akışkan ile herhangi bir kimyasal reaksiyon vermediği rapor edilmiştir. Ayrıca hazırlanan çözelti Newtonyen özellikler göstermiş ve kapsüllerin akışkan viskozitesine etkisi de marjinal düzeyde gerçekleşmiştir (Trivedi & Parameshwaran, 2020).

Benzer sonuçlar elde eden Yasushi Yamagishi et al. (1999) kFDM'lerin ısı kapasitesi arttırıcıları olarak potansiyelini oldukça sağlam bir şekilde ortaya koymuştur (Yasushi Yamagishi et al., 1999). Mikro kapsüllenmiş faz değişim malzemeleri de dâhil olmak üzere sıvı numunelerin gizli füzyon ısısı, erime ve katılaşma noktalarının ve özgül ısı kapasitesinin doğru bir şekilde ölçülmesini mümkün kılan ve birçok araştırmacı tarafından sıklıkla kullanılmakta olan diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ile yapılan termal analizler sonucunda, mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemelerinin kütleli konsantrasyonun yaklaşık %15 olduğu

durumda, ITA'nın termal kapasitesinin %70 arttığı tespit edilmiştir. (Alvarado, Marsh, Thies, et al., 2007, p. 1772)

kFDM-S esaslı PVT sistemler

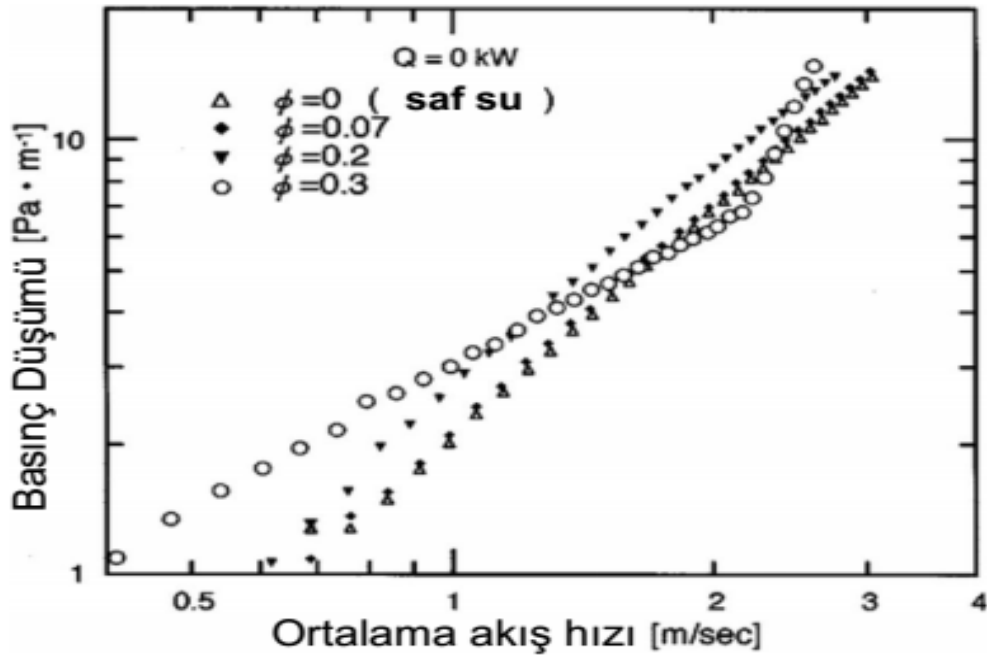
PV sistemlerinden ısı çekilmesinde kullanılan akışkanların genelde bütün termodinamik özellikleri önemlidir. Kullanılan akışkanın özgül ısı kapasitesi ve viskozitesi akışkanın sistemde dolaştırılması için gerekli pompalama gücü açısından birinci derecede belirleyici olmaktadır. Hava ve su gibi akışkanlar için sistemden çekilmesi gereken toplam ısı değerine karşılık gelen debileri özgül ısı kapasitelerine bağlı olarak artmaktadır. Artan debi ise akışkanın dolaştırılması için daha fazla güç harcanmasını (fan gücü veya pompa gücü) gerektirir. FDM'lerin ve kFDM'lerin kullanım alanları üzerine yapılan araştırmalar içerisinde PVT sistemleri de dâhil olmuştur. Literatürde genellikle PVT/PCM olarak adlandırılan FDM'lerin doğrudan kullanıldığı sistemler ile ilgili çalışmalar da bulunmakla birlikte, iş yapan akışkan olarak kFDM-S'lerin kullanıldığı PVT sistemleri, FDM'lerin sunduğu avantajlardan olumsuz yönlerini bertaraf ederek faydalanma açısından en öne çıkan sistemlerdir. **Şekil 29**'te görüldüğü üzere, kapsüllenmiş FDM malzemeler içeren sulu karışımlar ve saf su ile aynı miktarda ısı çekmek için harcanması gereken pompalama gücü, saf su için çok daha fazladır.



Şekil 29. Kapsüllenmiş FDM malzemeler içeren sulu karışımlar ile saf suyun çekilen ısı miktarına göre gerekli pompa gücü (Delgado, Lázaro, Mazo, Marín, & Zalba, 2012; Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016)

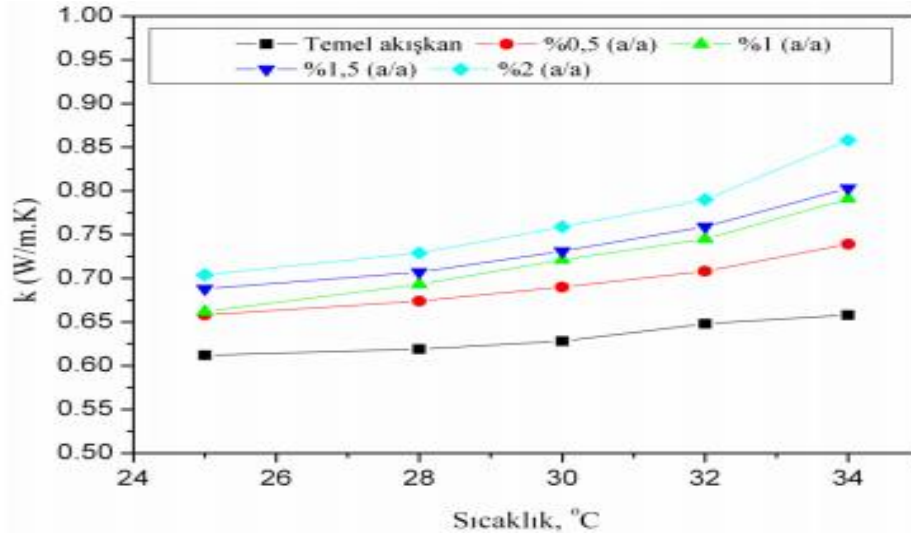
kFDM-S ısı transferi sırasında kazandığı enerjinin bir kısmını gizli ısı olarak depoladığı için birim hacim başına depolanan enerji miktarını 5 ila 14 kat artırmaya yardımcı olur (Atul Sharma et al., 2009). Bu nedenle, aynı miktarda ısı daha az akışkanla veya daha düşük debide, yani 5 kata kadar daha az pompalama gücüyle çekilebilir. Örneğin, 1000 Watt ısı çekmek için, saf su ile neredeyse beş kat pompalama gücüne ihtiyaç vardır. Ayrıca pompa gücü ile çekilen ısı arasındaki ilişki saf su için parabolik iken, kFDM-S için neredeyse doğrusaldır.

Diğer bir parametre ise viskozite ve akışkanın hızıdır, akışkanın viskozitesi ne kadar yüksek olursa, akışkanın sistemde dolaştırmak için gereken güç de o oranda artacağından kullanılacak akışkanın viskozitesinin düşük olması istenir. Kapsüllenmiş FDM malzemeler içeren sulu karışımların ortalama akış hızlarına karşılık sistemde oluşan basınç düşümleri saf su ile karşılaştırılmıştır. **Şekil 29** ve **Şekil 30** birlikte değerlendirildiğinde, düşük pompalama gücüne karşılık, sistemde neden olduğu basınç düşümlerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir.



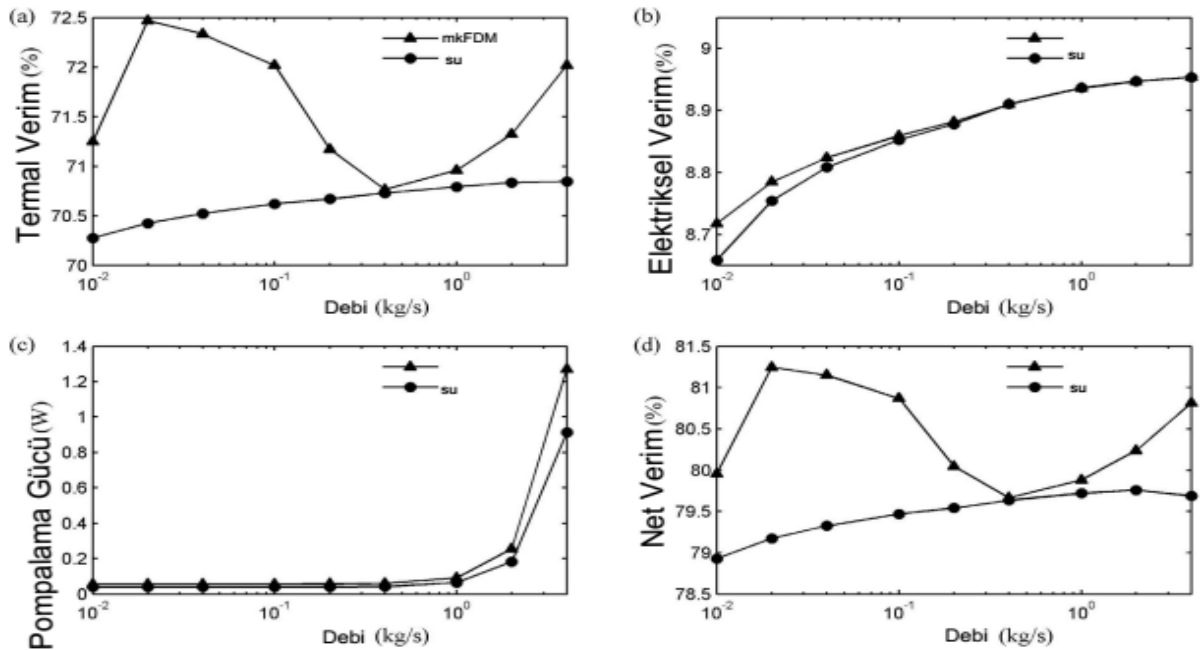
Şekil 30. Oda sıcaklığında saf su ve kapsüllenmiş FDM için ortalama debilere karşılık gelen basınç düşümleri (Yasushi Yamagishi et al., 1999)

Erdoğan (2017) ağırlıkça farklı konsantrasyonlarda kFDM içeren kFDM-S'nin termal iletkenliğini incelemiş ve her oranda kFDM ilavesinin daha büyük bir termal iletkenlikle sonuçlandığını bildirmiştir. **Şekil 31**'de görülebileceği gibi, yüzde 0,5 kFDM içeriği, akışkanın termal iletkenliğinde neredeyse %15 artışa neden olmuştur. Bununla birlikte, sıvının viskozitesini, dolayısıyla sıvıyı sistemde dolaştırmak için gerekli olan pompalama gücünü de arttırdığından, optimum kFDM içeriği, kabuk malzemesine ve parçacık boyutuna bağlı olarak değişebilir, ancak ağırlıkça yaklaşık yüzde 2 ila 5 oranının optimum olduğu bildirilmiştir.



Şekil 31. Kapsüllenmiş FDM içeren suyun termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi (Erdoğan, 2017)

Lingkun Liu et al. (2017) yaklaşık olarak aynı pompalama gücünde çalışma sıvısı olarak kFDM-S kullanarak PVT sistemlerinin hem termal hem de elektriksel verimliliğinde bir iyileşme sağladıklarını bildirmiştir. Su ve kFDM-S'yi farklı debilerde termal verimlilikleri ve elektriksel verimlilikleri açısından karşılaştırmışlar (Şekil 32.(a) ve (b)) ve bu debilerde gerekli olan pompalama gücünü ölçerek iki PVT-Sıvı sisteminin net verimliliğini tespit etmeye çalışmışlardır (Şekil 32.(c) ve (d)). $v = 0.015\text{m/s}$ hız ve $\dot{m} = 0.67\text{ kg/s}$ debide büyük bir ısı depolama kapasitesinde önemli bir iyileştirme elde edildiğini ve kFDM-S'nin ITA olarak su üzerindeki üstünlüğünün kanıtlandığını bildirmişlerdir.



Şekil 32. Kapsüllenmiş FDM içeren sulu karışımlar kullanılan PVT sistemlerde normal sulu sistemlere kıyasla (a) termal verim (b) elektriksel verim (c) pompalama gücü (d) net verim (Lingkun Liu et al., 2017)

Tez konusu özelinde, PVT sisteminde kullanılacak bir kapsülün çekirdek malzemesi ele alındığında; termodinamik açıdan; birim hacimde depolanabilecek ısı miktarının azami olmasını sağlayacağından, birim hacminin erimesi için gereken erime gizli ısısının olabildiğince yüksek olması istenir. Ayrıca katı-sıvı faz değişimi sabit sıcaklıkta gerçekleştiğinden bu sıcaklık değeri kullanılacak sistemin optimum çalışma sıcaklığına eşit olmalıdır. Üçüncü olarak, kapalı bir sistem içinde yer alacak olması nedeniyle, fazlar arası hacimsel değişimin çok küçük olması ve buhar basıncının düşük olması istenir. Termal iletkenliğinin ve yoğunluğunun yüksek olması ve faz değişimlerinin zamanla kararlı ve düzgün olması tercih edilir. Kinetik açıdan çekirdekleşme hızı ve kristal büyüme hızı büyük olmalıdır. Toksik olmamalı, ekonomik ömrü uzun olmalı, sağlığa zararlı olmamalı, temininde sorun olmamalı ve sağladığı faydalara kıyasla maliyeti düşük olmalıdır (Akçay, 2006; Al-Mamoori, 2017; Garg et al., 1985; Hale et al., 1971; Pasupathy et al., 2008).

kFDM'lerin maliyetleri ve doğrudan kullanımlarının uygulanabilirliği düşünüldüğünde, kFDM-S kullanılan PVT sistemlerinde ikincil çevrim kullanılmaktadır, bu nedenle PVT sulu sistemler ile karşılaştırıldığında, hem ilk kurulum maliyetleri hem de işletme maliyetleri daha yüksektir (S. A. Ali, 2017; Salunkhe & Shembekar, 2012).

MATERYAL VE YÖNTEM

Faz değiştiren malzemeler, ısı alış verii sırasında duyulur ısıya ilaveten faz değişimi için gerekli olan gizli ısıyı da sistemden çektiğinden dolayı bu malzemelerin ikincil ısı transferi akışkanlarına katılması termal kapasiteyi dört kat kadar artırmaktadır, ancak sınırlı ısı transfer hızı ve katı fazda boru ve kanal yüzeylerine yapışma nedeniyle sistemi tıkama veya daraltma gibi sorunlar nedeniyle yaygın olarak kullanılamamaktadır. Örneğın tuz hidratları nemli bölgelerde akarlar ve oluşan nem değişikliğı ile hidrat sayısında değişiklikler olabilir. Hidrokarbonlar eridiğinde viskozitesi azalabilir ve böylece binanın duvarları içerisinden akabilirler. Buharlaşma ile de havanın uçucu organik bileşimini sınır değerlerinin üstüne yükseltebilirler. Bu sorunların üstesinden gelmek için faz değiştiren malzemelerin kapsüllenmesi uygulanabilir bir seçenektir (Alvarado, Marsh, Sohn, et al., 2007, p. 1938; Konuklu, 2008).

Kapsülleme, düşük ısı iletkenliğı, hacimsel değişim ve karasız erime gibi FDM'ler ile ilgili bazı temel problemler için de çözümler sunar. Kapsül polimerik bir kabuk ve bu kabuk tarafından çevrelenmiş olan faz değişim malzemesinden (çekirdek) oluşur. Kabuk malzemeleri çekirdek malzemesi ile inert bir malzemedan seçilmelidir. Jelâtin, Arap zımkı, aljinat, ağıar, nişasta doğal polimerlerin yanı sıra poliamid, poliester, polietilenglikol, polistiren, sterik asit, stiren maleik anhidrit gibi sentetik polirnerler kabuk malzemesi olarak kullanılan maddeler arasındadır (Konuklu, 2008).

Kapsüller, tane boyutu ve yapısı, çekirdek maddesi, kabuk maddesi, kabuk kalınlığı ve özellikleri, katkı maddeleri ve geçirgenliğı gibi özellikleri ihtiyaca göre belirlenebilir olması sayesinde, mühendislikten tıbbı, eczacılıktan kozmetiğe, tekstilden gıdaya, elektronikten yapı malzemelerine ve hatta tarıma kadar çok geniş alanda uygulamalara sahiptir (Alva et al., 2017).

Kapsül Tasarımı ve Üretimi

Kabuk, çekirdek ve kapsülleme proses malzemeleri

Yapılan literatür taraması neticesinde, erime sıcaklığı 42-44 °C, Erime gizli ısısı 178 kJ/kg, termal iletkenliğı 0,1921 @72,5°C ve 0,1852 @90°C ve yoğunluğu 862 kg/m³ @60°C, 1007 kg/m³ @24°C olarak bilinen (Acar, 2014) laurik asidin (CH₃(CH₂)₁₀COOH), çekirdek FDM'si olarak kullanılmasının uygun olduğı değerlendirilmiştir. Bu sebeple, çekirdek malzemesi olarak laurik asit, kabuk malzemesi olarak Melamin (% 99 saf) ve formaldehit (ağırlıkça% 37 sulu çözelti) kullanıldı. Emülgatör olarak Sodyum Dodesil Sülfat (SDS), Twin 80 ce CTAB gibi yüzey aktif maddeler (sürfaktan) kullanıldı. Melamin formaldehit kabuk için

bağlayıcı olarak rezorsinol (1,3 benzendiol,% 99 saf) ve çekirdekleştirici ajan olarak da saf amonyum klorür kullanılmıştır.

Daha sonra kFDM-S'nin hazırlanmasında kullanılacak olan kFDM'nin sentezinde kullanılan çekirdek FDM ve kabuk malzemesinin özellikleri **Tablo 8** ve

Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. Melamin Formaldehitin Özellikleri

Parametre	Değer
Termal Yayılma	0,28 mm ² /s
Yoğunluk	1,49 gr/cm ³
Ayrışma Sıcaklığı	350 °C
Özgül Isı Kapasitesi	1200 J/kgK
Termal Genleşme	6E-06 1/K
Termal İletkenlik	0,5 W/mK
Elastik Modülü	7,0 GPa
Gerilme Direnci	30 MPa

Tablo 9. Laurik Asitin Özellikleri

Parametre	Özellik
Katılaşma Sıcaklığı (K)	316
Erime Sıcaklığı (K)	318
Faz Değişimi Entalpisi (J/kg)	183200
Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK)	2180 (katı) / 2390 (sıvı)
Termal İletkenlik (W/mK)	0,1921
Yoğunluk (kg/m ³)	940 (katı) / 883 (sıvı)
Termal Yayılma	6,5E-05 mm ² /s
Termal Genleşme	9,6E-04 1/K

Kapsülleme yöntemi

Mikrokapsülleme tekniği onlarca yıldır bilinmesine rağmen, işlemin pratik uygulama için çok pahalı olduğu düşünülmüştür. Ancak yeni sentezleme yöntemlerinin geliştirilmesi ve mevcut yöntemlerin yeni teknikler ve teknolojik imkânlar ile iyileştirilmesi sayesinde maliyetler düşmüş ve mikrokapsüllenmiş FDM'ler çeşitli uygulama alanları bulmuştur. Her geçen gün bu uygulama alanlarına yenileri eklenmektedir. Bugüne kadar literatüre rapor edilmiş olan, kimyasal, fiziksel ve fiziko-kimyasal kapsül sentezi yöntemlerinin sayısı 25

dolayındadır. Ancak bu yöntemler içerisinde en çok uygulanan yöntem gurubu kimyasal yöntemler olup, kimyasal yöntemler arasında da in-situ polimerizasyon oldukça gelişmiş ve ticarileşmiş (Duan, 2015) olan ve en fazla uygulanan (A. H. Zondag et al., 2016) yöntemdir.

Yerinde polimerizasyon yöntemiyle cidarlarının difüzyon sıklığı ve 5 ila 100 µm arasında değişen boyutlarda kapsül edebilmek bakımından en iyi kalitede mikrokapsüller üretmek mümkündür. Bu nedenle, yerinde polimerizasyon yöntemleri, mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemelerinin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır (Qiu et al., 2019).

Yerinde polimerizasyon, genellikle birbirleriyle reaksiyona girerek ön-kondensat oluşturacak tamamlayıcı, doğrudan etkili, organik ara maddeler içeren su ve organik çözücü gibi iki karışmaz sıvıyı bir araya getiren bir yöntemdir. Tüm polimerizasyon, arayüzey polimerizasyonunda olduğu gibi iki fazdan ziyade sürekli fazda meydana gelir. Arayüzey polimerizasyonuna çok benzer bir yöntem olan yerinde polimerizasyonun ayırt edici özelliği çekirdek malzemede hiçbir reaktan bulunmamasıdır (Qiu et al., 2019). Sürekli fazda çözünmüş haldeki monomer ve katalizörün çekirdek maddeden ayrı bulunduğu ve polimerizasyon reaksiyonunun ilerlemesi süresince ön polimerin çekirdek malzemesinin yüzeyinde aşamalı olarak olduğu kimyasal bir yöntem olan yerinde polimerizasyon yöntemi (Erdoğan, 2017) ile çok sayıda kapsülleme çalışması yapılmıştır (C. Y. Zhao & Zhang, 2011).

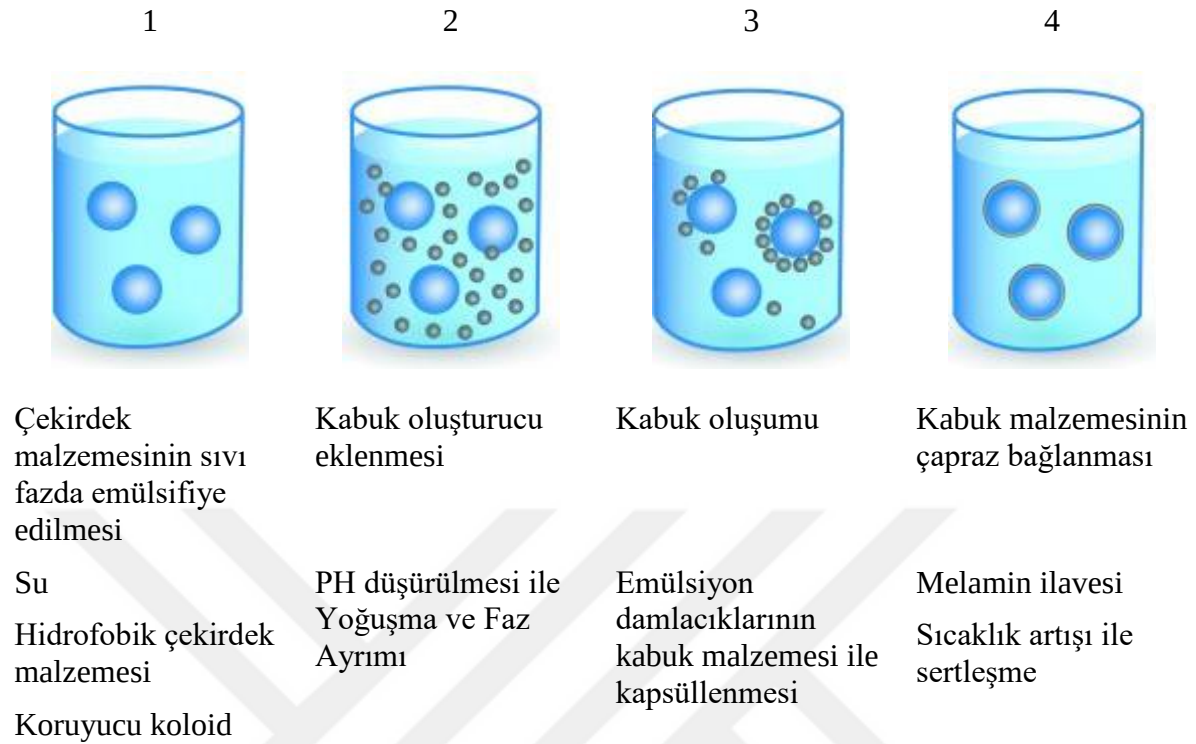
Tez çalışması kapsamında, mevcut laboratuvar imkânları ve üretim yönteminin uygulanabilirliği de göz önünde bulundurularak, tez çalışmamda kullanacağım micro/nano kapsüllerin üretiminde yerinde polimerizasyon yönteminin uygun olduğu değerlendirilmiştir. Kapsül sentezi de yerinde (in-situ) polimerizasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yerinde polimerizasyon için sentez prosedürü ve tez çalışmasında izlenen üretim süreci aşağıda verilmiştir.

Yerinde polimerizasyon yöntemi için sentez prosedürü

Farklı başlangıç malzemeleri ve formüllere göre işlemler biraz farklılık göstermekle birlikte, suyla karışmayan bir yağı kapsüllemek için, in-situ polimerizasyon yönteminin temel adımlarını Duan (2015) aşağıdaki gibi belirtmiştir:

- Reaktanları içeren (yani Melamin-Formaldehit veya Üre-Formaldehit reçine ön-polimeri) su içinde yağ (O/W, oil-in-water) fazının dağıtılarak istenen yağ damlacığı boyutunda kararlı bir emülsiyon oluşturulması
- Su fazından polimerizasyon ve monomer/oligomerin yağ fazı üzerine çöktürülmesi
- Kabuk oluşumu ve kütleme (Duan, 2015)

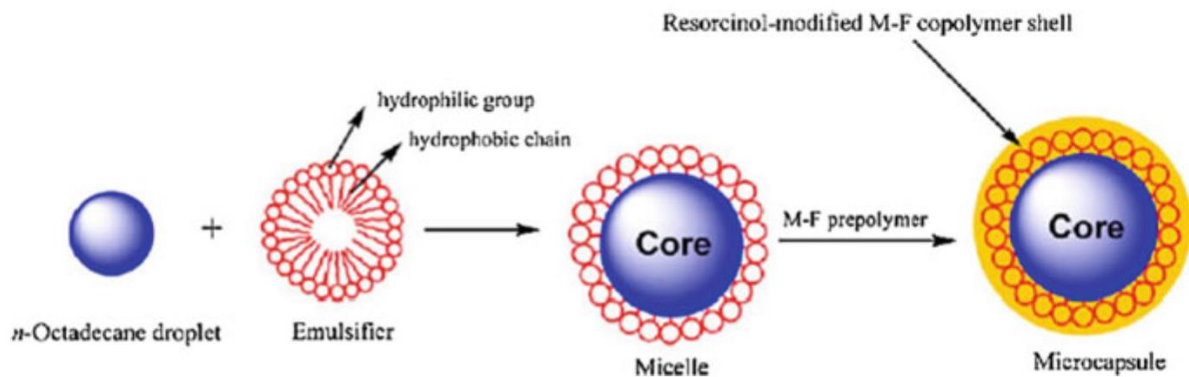
Daha detaylı ve anlaşılabilir bir proses örneği Koehler tarafından **Şekil 33**'de görüldüğü gibi verilmektedir.



Şekil 33. Yerinde polimerizasyon yoluyla mikrokapsülleme işleminin genel şeması (Koehler)

Birinci aşamada, çekirdek malzemesinin yapısına göre su içinde yağ (oil-in-water) veya yağ içinde su (water-in-oil) emülsiyonları hazırlanır. Hazırlanan bu karışıma kabuk malzemesi eklendikten sonra ortamın pH değeri düşürülerek yoğuşma ve faz ayrımı sağlanır. Kabuk malzemesinin çekirdek yüzeyine bağlanmaya başlamasının ardından ortama melamin ilave edilerek sıcaklığın artırılması ile kabuk malzemesinin sertleşmesini sağlanır. Bu şekilde çekirdek malzeme kapsüllenmiş olur.

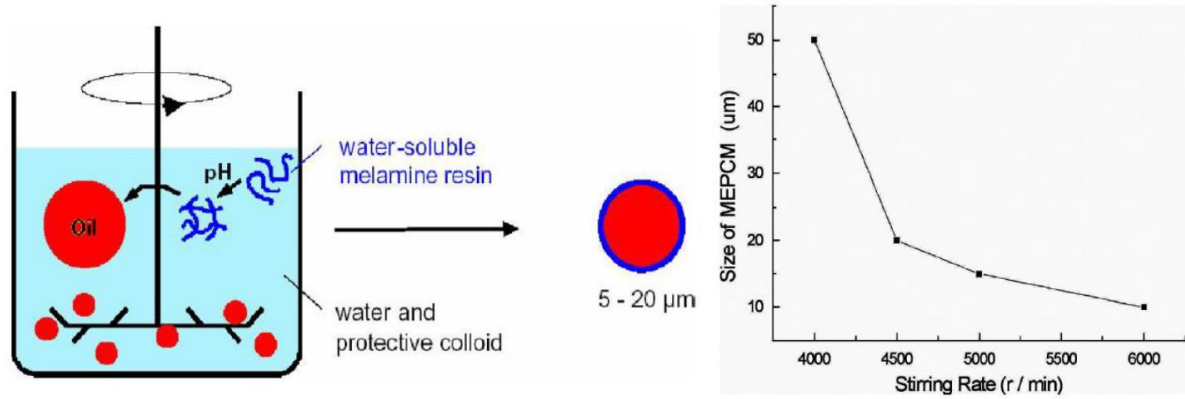
Kimyasal süreç açısından daha açıklayıcı olması bakımından **Şekil 34**, yerinde polimerizasyon işleminin adımlarını daha açıklayıcı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 34. In-situ polimerizasyon yöntemi ile kapsülleme (Alva et al., 2017; L. Chen et al., 2014; Karthikeyan & Ramachandran, 2014; Qiu et al., 2019)

Kabuk oluşumu aşamasında damlatma hızı ve emülsiyonun karıştırma hızı elde edilecek kapsül boyutu ve kapsüllerin küreselliği ve fiziki yapısı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte reaksiyon ortamının sıcaklığı da önemli etken parametreler arasındadır.

Şekil 35, karıştırma hızının mikrokapsülleme sürecinde kapsül boyutuna etkisini göstermektedir.



Şekil 35. Mikrokapsülleme süreci ve karıştırma hızının kapsül boyutuna etkisi (A. H. Zondag et al., 2016)

Tez kapsamında, çekirdek malzemesi olarak laurik asit, kabuk malzemesi olarak da melamin form aldehit kullanılarak, yerinde polimerizasyon yöntemiyle mikrokapsül sentezi gerçekleştirilmiştir. Yöntemin genel aşamaları şu şekilde gerçekleşmiştir. 100 g laurik asit 15 g yüzey aktif malzeme (SDS, CTAB ve Tween 80) 100 mL saf su içerisinde çözöldü. Ardından karışım 1000 mL saf su içerisinde 8 C manyetik karıştırıcıda karıştırıldı.

Tablo 10. Ön-polimer Oluşturulmasında Kullanılan Bileşen Malzemeler ve Miktarları

Bileşen	Miktar
Melamin (g)	30
De-iyonize Distile Su (mL)	100
Yüzeyaktif Madde (CTAB) (g)	15
Formaldehit 37% (mL)	60

Farklı bir balonda 30 g melamin ve %37'lik formaldehit 100mL saf su içerisinde çözöldükten sonra, etanolamin ile pH'sı 8,5-9'a ayarlanarak 1 saat süre ile karıştırılarak pre-polimer hazırlanmış oldu. Ön-polimer oluşturulmasında kullanılan maddeler ve miktarları **Tablo 10**'da yer almaktadır.

Yağ emisyonu üzerine damlatma hunisi üzerine konulan melamin-formaldehit karışımı yavaş yavaş ilave edildi (400 damla/dakika). Ortamın pH'sı %10'luk amonyum klorür çözöltisi ile 5,5'a ayarlandı ve 2 saat süre ile 65 °C'de reflü edildi. 30 dakika süre ile karıştırıldıktan sonra karışım etil alkol ve su ile yıkandıktan sonra elde edilmiş olan kapsüller 24 saat süre ile

40 °C’de etüv de kurutuldu ve saklandı. Bu işlemler yeterli miktarda kapsül elde edilinceye kadar tekrar edilmiştir.

Kapsül Özellikleri ve Karakterizasyonu

Bir kFDM’nin genel özellikleri, seçilen kabuk ve çekirdek malzemelerinin yoğunluk, termal iletkenlik, erime ve donma sıcaklıkları, özgül ısı kapasiteleri ve FDM’nin erime gizli ısısına bağlıdır. Bu parametreler FDM ve kapsülleme işlemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Temel olarak FDM’nin tüm değerleri tamamen deneysel ve analitik olarak ölçülebilir veya temel birkaç ölçüm verisi kullanılarak kütle ve enerjinin korunumu ilkelerine dayanan, denenmiş ve doğrulanmış bazı korelasyonlar yardımıyla hesaplanabilir (Yasushi Yamagishi et al., 1999). Bağlantılar üzerinden hesaplama yapılabilmesi için, kabuk ve çekirdek malzemelerinin termo-fiziksel özelliklerinin ve kapsül içerisinde bu malzemelerin kütle kesrinin bilinmesi gerekir. Bunun için de FDM ve kFDM için ayrı ayrı Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi yapılması gereklidir.

Ayrıca çeşitli, fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerin belirlenmesi için çeşitli test ve analizler yapılabilmektedir. Aşağıda tez çalışması kapsamında yapılan test ve analizlere ilişkin materyal ve metot bilgilerine yer verilmiştir.

SEM analizi

Bir elektron demeti ile numune yüzeyinin düzgün bir şekilde taranması ile numunelerin mikro yapılarının incelenmesinde kullanılan ve ayırım gücü oldukça yüksek SEM cihazları kullanılarak analiz yapılmaktadır.

Sentezlenen mikrokapsüllerin yapısal morfolojilerini analiz etmek için SEM (Taramalı elektron mikroskobu) analizi, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan Zeiss Sigma 300 Scanning Electron Microscope (SEM) cihazı hizmet alımı yoluyla kullanılarak yapılmıştır. Bu şekilde incelenen numunenin yüzey morfolojisi ve tanecik büyüklüklüğü, ve fiziki yapıları hakkında bilgi sahibi olunacaktır. SEM analizinde, TEM (Transmission Electron Microscope) veya OM (Optical Microscope) diğer alternatif yöntemlerde de olduğu gibi, mikrokapsüllerin; çapları, kabuk kalınlığı, kapsüllerde kümelenme (clustering) olup olmadığı, kabuk yüzeylerinin pürüzlülüğü, ezilme, kırılma yahut benzeri deformasyonlar veya gözenekler olup olmadığı, kapsüllerin küreselliği ve küreselliğin düzenliliği ve devamlılığı gibi konularda bilgi edinmek mümkündür (Alva et al., 2017).

SEM cihazında aynı zamanda kompozit yapılarının mineral madde kompozisyonunu belirlemek için Enerji Dağılımı X-ışını analizi (EDX) yapılacaktır. EDX analizi ile elde edilen veriler analiz yapılan numunenin gerçek bileşimini meydana getiren elementlere karşılık gelen pikleri gösteren spektrumdan oluşmaktadır.

FTIR analizi

Kızılötesi (IR) absorpsiyon spektroskopisinde, görünür ışıktan daha uzun dalga boyuna sahip olan IR ışınlarının, karakterize edilen malzeme tarafından soğurularak moleküllerinin yapısındaki bağların titreşim veya dönme hareketleri yapmasına neden olmaktadır. Moleküler düzeyde meydana gelen bu enerji değişimlerinden faydalanılarak elde edilen IR spektrumu malzemenin karakterize edilmesinde kullanılmaktadır. Çalışmada üretilen mikrokapsüllenmiş FDM'nin kimyasal yapısını incelemek için Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan Bruker VERTEX 70v FT-IR (Fourier Transform Infra-Red) spektroskopisi hizmet alımı yoluyla kullanılarak 4000-400 cm^{-1} dalga sayısı aralığında analiz yapılmıştır.

XRD analizi

Mikrokapsüllerin kristal yapısı powder X-Ray Diffraction (powder XRD) ile $\text{Cu-K}\alpha$ radyasyonu kullanılarak X-ışını kırınımı (XRD) analizi yöntemi ile yapılmıştır. Kristal fazların tayini $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ dalga boyunda Bragg yasası uygulanarak yapılmıştır. Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan *PANalytical Empyrean X-Ray Diffractometer (UK)* hizmet alımı yoluyla kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

DSC analizi

Belirli bir ısıtma hızında, bir referansa (alümina pan Al_2O_3) göre numunenin enerji değişiminin zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak elde edilerek incelendiği DSC analiz tekniği temel olarak referans ile numune arasındaki sıcaklık farkını eşitlemek için numuneye verilen enerjiyi ölçmektedir. Bu ölçümler sonucu elde edilen değerler yatay eksen sıcaklığı, düşey eksen ise numuneye aktarılan enerjiyi gösteren bir dağılım grafiği olarak çizilir. Grafiğin pik yaptığı noktaya çizilen teğetlerin kesişim noktası numunenin erimeye başladığı sıcaklık değerini (T_{erime}) verirken, pikin altında kalan alanın integrasyonu ile de erime süresince numuneye aktarılan ısı miktarı yani erime gizli ısı (ΔH_{erime}) elde edilir. Aynı veriler üzerinden cihazın yazılım fonksiyonları aracılığı ile numunenin ısı kapasitesi (C_p) de belirlenebilmektedir.

Araştırmada laurik asit içerikli mikrokapsüllerin ısı depolama ve yayma özelliklerinin incelenmesi için, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümünde NETZSCH STA 409PC/PG cihazı kullanılarak, DSC (diferansiyel taramalı kalorimetre) analizi yapılmıştır. Yapılan DSC analizi ile faz değiştiren madde içerikli mikrokapsüllerin erime entalpisi (ΔH_m) ve katılma entalpisi ($-\Delta H_c$) ile erime ve katılmanın başladığı sıcaklıklar ölçülmüştür.

TG analizi

Termogravimetrik analiz (TG), fiziksel ve kimyasal değişikliklerin zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak sabit bir ısıtma oranı ile ölçüldüğü termal bir analizdir. Numune, cihazın içindeki fırında, hassas bir mikro terazi görevi gören bir denge kolu veya bu kola asılı bir pota kabına yerleştirilir. Denge kolunun konumu numunemin ağırlığına bağlı olarak değişen bir tork uygulanmak suretiyle elektro-optik bir sistem tarafından sabit tutulur. Değişen tork değerleri değişen kütlenin ifadesidir. Öte yandan ısıtma odası, zamanın bir fonksiyonu olarak gerekli sıcaklık profilini (yani ısıtma hızını) sağlayacak şekilde sürekli kontrol edilmektedir (Pal, Pandey, & Sen, 2018).

TG analizinde sıcaklıkla kütlede bir değişimin (genellikle azalma şeklinde) meydana geldiği, organik ve inorganik içeriğin belirlenmesi, gazların emme oranı; uçucu kirletici maddelerin (monomerler, çözücüler, akışkanlaştırıcı ve diğer katkı maddelerinin) desorpsiyonu; gazların ve polimer bozunmalarının difüzyonu ve geçirgenliği gibi bir takım polimerik olayların tespit ve tayini oksidatif, inert veya vakum ortamında gerçekleştirilebilmektedir (Mudalige et al., 2019; Pal et al., 2018; Shojaei & Azhari, 2018). Numunelerin pirolizi ile polimerler tanımlanabilmekte ve böylece numunelerin karakterizasyonu yapılabilmektedir. Çeşitli termal ortamlarda polimer numunelerinin uzun vadede kararlılıklarının tahmin edilmesi için de TG testleri uygulanmaktadır (Pal et al., 2018).

Yani TG, numune ağırlığının/kütlesinin, numunenin sıcaklığına ya da zamana göre ölçümüdür. Numune genel olarak sabit sıcaklık adım değerinde ısıtılır ya da sabit bir sıcaklıkta tutulur. Bu esnada numunede meydana gelen kütle kaybı zaman ve/veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedilir. Termogram olarak adlandırılan bu kayıtlardan, ağırlığın belirli eşik değerleri ve bu değerlere karşılık gelen sıcaklık değerlerinin irdelenmesi yoluyla farklı polimer türleri tanımlanabilmektedir (Chandrasekaran & Sharma, 2019). Ayrıca literatürde yer alan deneysel sonuçlar ve malzemelerin bilinen teknik özelliklerine dayanarak, numunenin tamamen yandığı sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda kalan ağırlık yüzdesinin numunenin bünyesinde var olan diğer impüriteler ve katalizör partikülleri olarak kabul edilebilir (Shojaei & Azhari, 2018).

Numune hava/oksijen altında ısıtıldığında oksidasyon meydana gelir; böylece numunede bulunan katalizör impüritelerin miktarının belirlenmesinde kullanılabilir. Azot gazı kullanıldığında ise; oksidasyon önlenir; böylelikle, ağırlık kaybının numunenin yapısında bulunan kusurlar ve/veya fonksiyonel gruplarla doğrudan ilişkili olduğu anlamına gelir (Shojaei & Azhari, 2018).

TG analizi Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümünde NETZSCH STA 409PC/PG cihazı kullanılarak 35-750 °C aralığında 10 °C/dak ısıtma hızında azot ortamında yapılmıştır.

Kapsülleme oranı

Kapsülleme oranı (ER) kapsülü oluşturan çekirdek ve kabuk malzemelerinin oranını ifade etmektedir. Daha doğru bir ifade ile mikrokapsül içerisindeki çekirdek malzemesinin miktarını gösterir (Saraç, Öner, & Kahraman, 2019). DSC analizi ile belirlenen kapsüllenmiş FDM gizli ısıısının ($\Delta H_{\text{micro-FDM}}$) saf çekirdek malzemesi için elde edilen gizli ısıya (ΔH_{FDM}) oranının yüzde olarak ifadesi olup bir FDM'nin kapsül içerisindeki efektif performansının ölçüsünü gösterir ve Denklem 3'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır (Alva et al., 2017; H. Liu, Wang, & Wu, 2019; Salunkhe & Shembekar, 2012; Sarı, Alkan, et al., 2009).

$$ER = \frac{\Delta H_{\text{erime,kFDM}}}{\Delta H_{\text{erime,FDM}}} \quad (3)$$

Denklem 3 ile hesaplanan yüzdesel değer kapsülün ağırlıkça ne kadarının FDM'den oluştuğunun ifadesidir. Böylece kapsül yapısının geriye kalan kısmının kabuk malzemesinden oluştuğu söylenebilir. Kapsüllenmiş FDM malzemelerinin yüzey alanları ve/veya kabuk kalınlıkları, dolayısı ile çapları, arttıkça kapsülleme oranının düşeceği görülmektedir.

Kapsülleme verimi

Tamamen tersinir bir FDM için erime ve kristalleşme (donma) gizli ısıları aynı olmalıdır. Bu iki değer arasında fark olması durumunda FDM'nin aşırı soğuma sorunu olduğuna veya eşleşik olmayan erime ve katılaşma süreçlerine işaret etmektedir.

$$EE = \frac{\Delta H_{\text{erime,kFDM}} + \Delta H_{\text{donma,kFDM}}}{\Delta H_{\text{erime,FDM}} + \Delta H_{\text{donma,FDM}}} \times 100 \quad (4)$$

Kapsülleme verimi (EE) ise Denklem 4'de verildiği üzere kFDM'nin erime ve donma gizli ısılarının toplamının FDM'nin erime ve donma gizli ısıları toplamına oranının yüzde ifadesidir (H. Liu et al., 2019; Saraç et al., 2019). Yüksek kapsülleme verimi, yüksek mekanik mukavemet ve sızdırmazlık anlamına gelir. kFDM'nin faz değişim entalpisi kapsülleme oranı

ve kapsülleme veriminin (J.-F. Su, Wang, Ren, Huang, & Meng, 2006) güçlü bir fonksiyonu olup kapsülleme verimi, kapsüllenecek FDM miktarının belirlenmesinde kritik bir parametredir (Salunkhe & Shembekar, 2012).

Yoğunluk

Mikrokapsüllerin yoğunlukları hassas mikro terazi ve taşıma kapları kullanılarak kolayca ölçülebilmektedir. Bununla birlikte, aynı zamanda karşılaştırma ve doğrulama verisi olarak kullanılmak üzere, çeşitli formüller ile de yoğunluk hesaplamaları yapılabilmektedir.

kFDM'nin kapsülleme oranı çekirdek ve kapsüllerin DSC testlerinden elde edilen verilerden hesaplandığında, kapsüllerin ağırlıkça yaklaşık ne kadarının çekirdek malzemesinden ne kadarının da kabuk malzemesinden oluştuğu tespit edilebilmektedir. Çekirdek ve kabuk malzemelerinin termofiziksel özelliklerinin farklı olması sebebiyle mikrokapsüllerin özellikleri de bileşenlerin ayrı ayrı özellikleri dikkate alınarak hesaplanmalıdır.

$$\rho_{kFDM} = \rho_{FDM,ort} * ER + \rho_{kabuk} * (1 - ER) \quad (5)$$

Mikrokapsüllerin yoğunluğu, kütle dengesi ve kompozit küre yaklaşımı kullanılarak çekirdeğin ve kapsülün çapları üzerinden aşağıdaki formül (Goel, Roy, & Sengupta, 1994; Languri, Shaaban, Kong, & Alvarado, 2013; Qiu et al., 2019) ile de hesaplanabilmektedir.

$$\rho_{kFDM} = \left(\frac{d_{FDM}}{d_{kFDM}} \right)^3 \frac{\rho_{FDM,ort}}{ER_{FDM}} \quad (6)$$

Burada, FDM çekirdeğin yoğunluğu katı ve sıvı haldeki yoğunluklarının ortalaması olarak alınmış olup, W kütle oranı, d çapı, ρ ise yoğunluğu temsil etmektedir (Qiu et al., 2019). Buna göre, aynı denklem kütle oran, d ve ρ parametreleri için çekirdek yerine kabuk malzemesine ait değerler kullanılarak da kapsül yoğunluğunun hesaplanması yapılabilir.

Bununla birlikte, kapsül ve çekirdek FDM'nin çapı da kendi termal genleşme katsayılarına bağlı olarak sıcaklıkla değişir ve kapsül çapının çekirdeğe oranı da sıcaklığa bağlı olarak:

$$\rho_{kFDM-S}(T) = \rho_{su}(T) * (1 - \phi) + \rho_{su}(T) * \phi \quad (7)$$

şeklinde ifade edilmelidir.

Kapsül çapı

Denklem 3 ifadesinden yola çıkarak, ağırlıkça oranları bilinen küresel formdaki malzemelerin ağırlıklarını hacim ve özgül ağırlıklarının çarpımı cinsinden değerlendirmek suretiyle, aşağıdaki denklemden (Tseng, Fang, Tsai, & Yang, 2005), ortalama kapsül çapı da aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \frac{m_{FDM}}{m_{FDM} + m_{kabuk}} &= \frac{\frac{4}{3}\pi R_{FDM}^3 \rho_{FDM}}{\frac{4}{3}\pi R_{FDM}^3 \rho_{FDM} + \frac{4}{3}\pi(R^3 - R_{FDM}^3)\rho_{kabuk}} \\ &= \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{R}{R_{FDM}} \right)^3 - 1 \right] \left(\frac{\rho_{kabuk}}{\rho_{FDM}} \right)} \end{aligned} \quad (8)$$

Bununla birlikte, PSD (Particle Size Distribution) analizi ile partiküllerin çap dağılımları ve buna bağlı olarak partikül çapları hesaplanabilir ya da SEM analizinde görüntülenen kapsüllerin çapları ölçülerek kabaca bir ortalama kapsül çapı da hesaplanabilir. Bu şekilde elde edilen ortalama kapsül çaplarının doğrulaması da Denklem 5 kullanılarak, diğer yöntemlerle ölçülen yoğunluk değeri referans alınmak sureti ile yapılabilmektedir.

Özgül ısı kapasitesi

Bir termal enerji sisteminin bağlı olduğu en önemli özelliklerden biri olarak (Etaig & Saleh, 2017) özgül ısı kapasitesi büyük öneme sahiptir. Özgül ısı kapasitesi (C_p), bir maddenin sıcaklığında 1K değişiklik meydana getirmek için o maddeye verilmesi veya maddeden alınması gereken ısı miktarı olarak tanımlanır. Özgül ısı kapasitesi malzemeye özgü fiziksel bir büyüklük olan özgül ısı kapasitesi, aynı zamanda sıcaklığın bir fonksiyonudur. Yani her bir birim sıcaklık artışı için gerekli olan ısı miktarı eşit değildir, ya da tersten ifade etmek gerekirse, herhangi bir malzemenin her bir sıcaklık değerinde tutabileceği ısı miktarı yani ısı kapasitesi birbirinden farklı olacaktır. Bununla birlikte, özgül ısıdaki değişim o kadar büyük değildir ve C_p , ilk sıcaklık değeri ile son sıcaklık değerindeki C değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanan ortalama bir özgül ısı değerine eşit kabul edilebilir.

Su için 1 olarak kabul edilmiş olan özgül ısı kapasitesi, 1 kg su kütlelerinin sıcaklığının 13,5 dereceden 14,5 dereceye yükseltilmesi için 1 kilo kalori ısı gerekir şeklinde tanımlanmıştır. Böylece her bir sıcaklık değeri için C_p değerleri, sürekli bir DSC eğrisinin her noktasında birbirinden farklı olarak hesaplanabilmektedir.

DSC verisi Denklem 9'da gösterildiği şekilde elde edilmektedir.

$$DSC = m \times C_p \times Hassasiyet \times Isıtma Hızı$$

$$[\mu V] = mg \times \left(\frac{J}{gK}\right) \times \left(\frac{\mu V}{mW}\right) \times \left(\frac{K}{s}\right) \quad (9)$$

Buradan;

$$C_p = \frac{DSC(Sinyalfarkı(Numune - Referans))}{m \times Isıtma Hızı \times Hassasiyet}$$

$$C_p = \frac{\mu V}{mg \times \left(\frac{K}{s}\right) \times \left(\frac{\mu V}{mW}\right)} = \left(\frac{J}{gK}\right) \quad (10)$$

şeklinde doğrudan DSC analiz verisi üzerinden hesaplanabilmektedir (Netzsch, 2019).

Ayrıca, mikrokapsüllerin ısı kapasitesi enerji dengesi kullanılarak da, aşağıdaki denklem (Goel et al., 1994; Qiu et al., 2019) yoluyla hesaplanabilmektedir.

$$C_{p,kapsül} = \frac{(W_{çekirdek} \times C_{çekirdek} + W_{kabuk} \times C_{kabuk})\rho_{çekirdek}\rho_{kabuk}}{(W_{çekirdek} \times \rho_{kabuk} + W_{kabuk} \times \rho_{çekirdek})\rho_{kapsül}} \quad (11)$$

Burada, W ağırlıkça konsantrasyonu göstermektedir. Aynı denklem kapsülleme oranı üzerinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_{p,kapsül} = \frac{(ER \times C_{çekirdek} + (1 - ER) \times C_{kabuk})\rho_{çekirdek}\rho_{kabuk}}{(ER \times \rho_{kabuk} + (1 - ER) \times \rho_{çekirdek})\rho_{kapsül}} \quad (12)$$

veya

$$C_{p,kapsül} = ER * C_{p,çekirdek} + (1 - ER) * C_{p,kabuk} \quad (13)$$

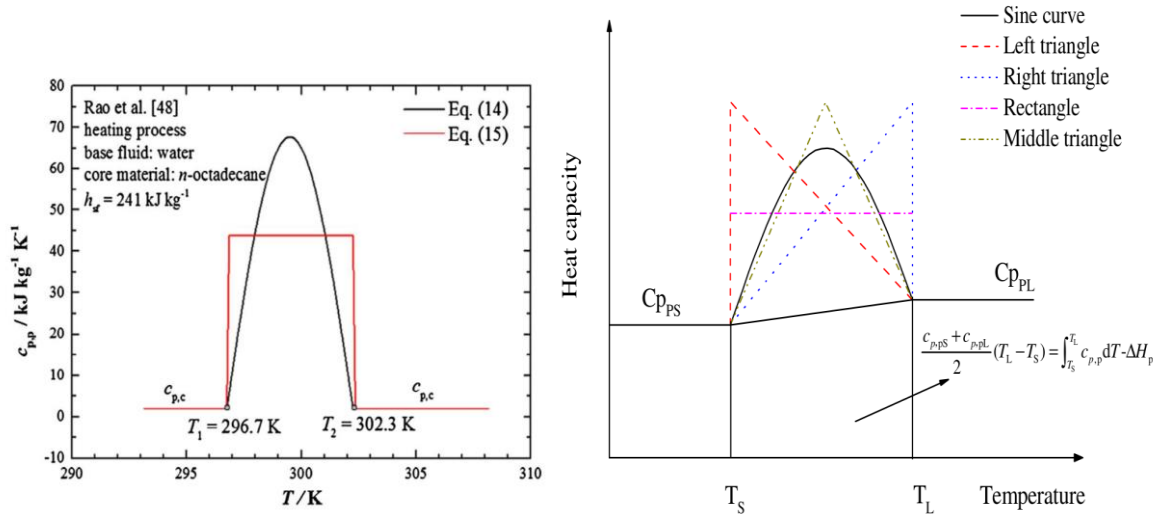
formülü ile (Guo, Zhang, Yang, Xu, & Du, 2017) hesaplanabilir.

Ancak esasen, kapsülün özgül ısı kapasitesi, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, sıcaklığın faz değişim sıcaklığı aralığında olup olmamasına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterecektir, bu nedenle yukarıda anılan ortalama ısı kapasitesi kullanılamaz (**Şekil 37**).

$$C_{p,kapsül} = \begin{cases} C_{p,kapsül,s} & T \leq T_s \\ \frac{C_{p,kapsül,s} + C_{p,kapsül,l}}{2} + \frac{\Delta H_{eFDM}}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ C_{p,kapsül,l} & T \geq T_l \end{cases} \quad (14)$$

Faz değişim sıcaklığı aralığının dışında, kapsülün özgül ısı kapasitesi Denklem 12 veya Denklem 13'te, FDM'nin ısı kapasitesini (sıvı veya katı) yerine yazılmak suretiyle hesaplanacak değere eşit kabul edilir. Ancak, erime aralığındayken, kapsülün özgül ısısının, faz

değişimi gizli ısısını da yansıtmalı gerektiğinden Denklem 14'te gösterildiği gibi özgül ısıyı sıcaklığa karşı sürekli olarak değerlendirmelidir ve buna göre hesaplanmalıdır (Ashagre & Rakshit, 2022; L. Chen et al., 2014). Sıcaklık faz değişim sıcaklığı aralığında değilken, kapsülün özgül ısı kapasitesi çekirdeğin özgül ısı kapasitesine eşit kabul edilirken, bu aralıktaki özgül ısı kapasitesi faz değişim entalpisinin çeşitli yaklaşımlar kullanılarak faz değişim sıcaklık aralığına dağıtılması ile hesaplanır.



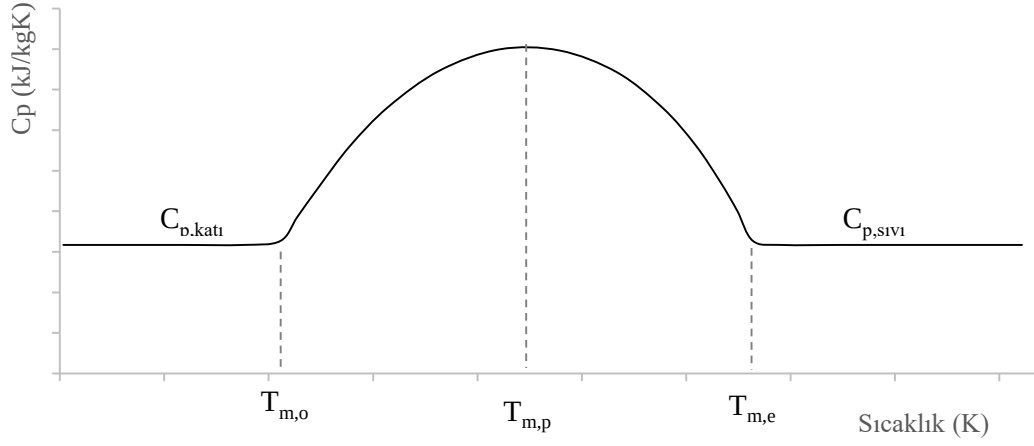
Şekil 36. FDM'nin faz değişim entalpisinin kapsülün özgül ısı kapasitesi üzerine dağıtılmasına yönelik yaklaşımlar; dikdörtgen (Chai, Shaukat, Rabia, Wang, & Wang, Hua Sheng, 2018) ve üçgen veya sinüs (Ma & Zhang, 2013) formları

Şekil 36'da gösterildiği gibi dikdörtgen (Lingkun Liu et al., 2017), üçgen (Z. Chen, Shan, & Fang, 2012) veya sinüs (Zeng et al., 2009) formları gibi FDM'nin gizli ısısını özgül ısı kapasitesine yansıtmak için farklı yaklaşımlar getirilmiştir. Bu bağlamda, DSC analizlerinde gözlemlenen gerçek forma daha çok benzeyen sinüs formunda özgül ısısının doğru değerini verebilen tek bir formül olarak:

$$C_{p,kapsül} = C_{p,çekirdek} + \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{h_{s,svl}}{T_{m,e} - T_{m,o}} - C_{p,çekirdek} \right) \sin \pi \left[\frac{T - T_{m,o}}{T_{m,e} - T_{m,o}} \right] \right\} \quad (15)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Kuravi, 2009).

Denklem 15 ile hesaplanan C değerinin grafik gösterimi Şekil 37'de gösterildiği şekilde elde edilmektedir.



Şekil 37. kFDM'in özgül ısı kapasitesinin sıcaklık ile değişimi (FDM'in katı ve sıvı haldeki Cp değerleri eşit kabul edilerek) (Kuravi, 2009)

Bu formüller ile hesaplanan C değeri DSC analizinde elde edilen C değerinin doğrulaması için kullanılabilir. Kapsüllenmiş FDM'nin C değeri, DSC eğrisinin teğetler yöntemi ile belirlenen başlangıç ve bitiş noktaları arasında kalan kısmının altındaki alan ile hesaplanan, yani eğri fonksiyonunun bu noktalar arasında integre edilmesi ile elde edilen, ΔH değerinin numune kütlesi ve numunenin bu noktalar arasındaki sıcaklık değişimine oranı ile ölçülmektedir.

Termal iletkenlik

Termal iletkenlik, bir PVT sisteminin genel termal performansını yönetenler arasında bir diğer önemli parametredir. Bu nedenle, termal iletkenliğin de mümkün olduğu kadar büyük olması istenmektedir. Bununla birlikte, neredeyse tüm FDM'lerin sudan daha düşük termal iletkenliğe sahip olduğu bilinmektedir. Ancak bu durum sadece kFDM'nin durağan termal iletkenliği dikkate alındığında geçerlidir. Mikrokapsülün termal iletkenliği kompozit küre yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilmektedir (Alva et al., 2017; Dutkowski & Kruzel, 2021; Guo et al., 2017; Qiu et al., 2016).

$$\frac{1}{k_{kapsül}d_{kapsül}} = \frac{1}{k_{çekirdek}d_{çekirdek}} + \frac{d_{kapsül} - d_{çekirdek}}{k_{kabuk}d_{kapsül}d_{çekirdek}} \quad (16)$$

Denklem 16 yeniden düzenlendiğinde:

$$k_{kapsül} = \frac{1}{\left(\left(\frac{1}{k_{FDM} * d_{FDM}} \right) + \left(\frac{d_{kapsül} - d_{FDM}}{k_{kabuk} * d_{kapsül} * d_{FDM}} \right) \right) * d_{kapsül}} \quad (17)$$

elde edilir.

Bununla birlikte, kFDM'nin efektif termal iletkenliği aynı zamanda geçerli fazın termal iletkenliğine de bağlıdır ve bu nedenle **Şekil 38**'te görüldüğü üzere sıcaklığın faz değişim

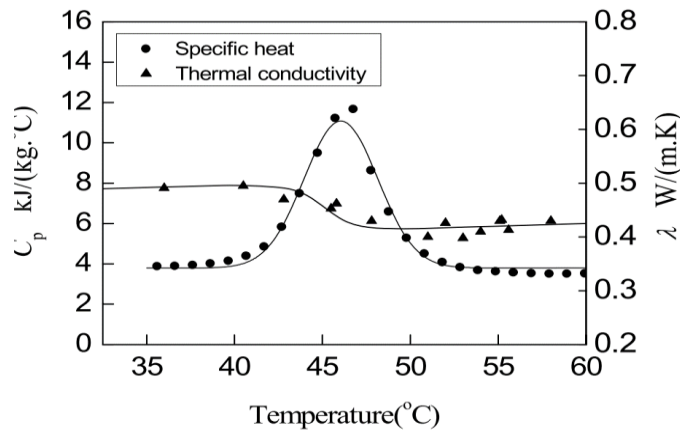
sıcaklığı aralığının içinde olup olmadığı dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla (Doshi, Kashyap, & Tiwari, 2022):

$$k_{kapsül,eff} = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}} * k_{kapsül,katı} + \left(1 - \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}}\right) * k_{kapsül,sıvı} \quad (18)$$

Bu itibarla, kFDM'nin efektif termal iletkenliği sıcaklığın fonksiyonu olarak:

$$k_{kapsül,eff} = \begin{cases} k_{kapsül,katı} & T \leq T_{katı} \\ k_{yığın} & T_{katı} < T < T_{sıvı} \\ k_{kapsül,sıvı} & T \geq T_{sıvı} \end{cases} \quad (19)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 38. kFDM'lerin ısı kapasitesi ve termal iletkenliğinin faz değişim aralığında değişimi (Dai, Wang, & Zhang, 2008)

Çözelti Karakterizasyonu ve Hidrodinamik Özelliklerin Tayini

Çözelti karakterizasyonu da esas olarak TA, ve kFDM özelliklerine ve kFDM'nin TA içindeki konsantrasyonuna bağlı olarak bazı korelasyonlar kullanılarak hesaplanabilmekte (Yasushi Yamagishi et al., 1999) yahut deneysel olarak ölçülebilmektedir. TA ve kFDM'ye ait termo-fiziksel özelliklerin net olarak bilinmesi durumunda kFDM-S'ye ait tüm özellikler bağıntılar ile yüksek doğrulukla elde edilebilmektedir.

Yoğunluk

kFDM-S'nin yoğunluğu, TA'nın yanı sıra çekirdek FDM'nin ve kabuk malzemesinin yoğunluğuna bağlıdır. Bu bağlamda kFDM'nin yoğunluğu öncelikle FDM ve kFDM için ayrı ayrı elde edilen DSC sonuçlarına göre hesaplanan ve Denklem 5 ve Denklem 6'ya göre veya deneysel olarak belirlenen kFDM yoğunluğu, kFDM'nin TA içindeki yüzde kesri ve TA'nın yoğunluğuna bağlıdır.

Yoğunluk aynı zamanda sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, çekirdek ve kabuk malzemelerinin yoğunluğu farklı sıcaklıklarda farklı olacaktır. Böylece, belirli bir sıcaklıktaki yoğunluk şu şekilde elde edilir:

$$\rho(T) = \rho_0 - \left((\beta * \rho_0 * (T - T_{katı})) + 1 \right) \quad (20)$$

Burada, β termal genleşme katsayısını, T_s katılma sıcaklığını ρ_0 T_s sıcaklığındaki yoğunluğu ifade eder.

Bu bağlamda, kFDM-S yoğunluğunun da sıcaklığa göre aşağıdaki şekilde ifade edilmesi gerekir:

$$\rho_{kFDM-S}(T) = \rho_{su}(T) * (1 - \phi) + \rho_{kFDM}(T) * \phi \quad (21)$$

Özgül ısı kapasitesi

Hazırlanan kFDM-S'nin ısı kapasitesi ($C_{p,\text{çözültü}}$), daha önce hesaplanan kFDM'nin ısı kapasitesine ve kFDM'nin TA içindeki kütle kesrine bağlı olarak kompozit yaklaşım ile aşağıdaki denklemden hesaplanabilir (Guo et al., 2017; Languri et al., 2013).

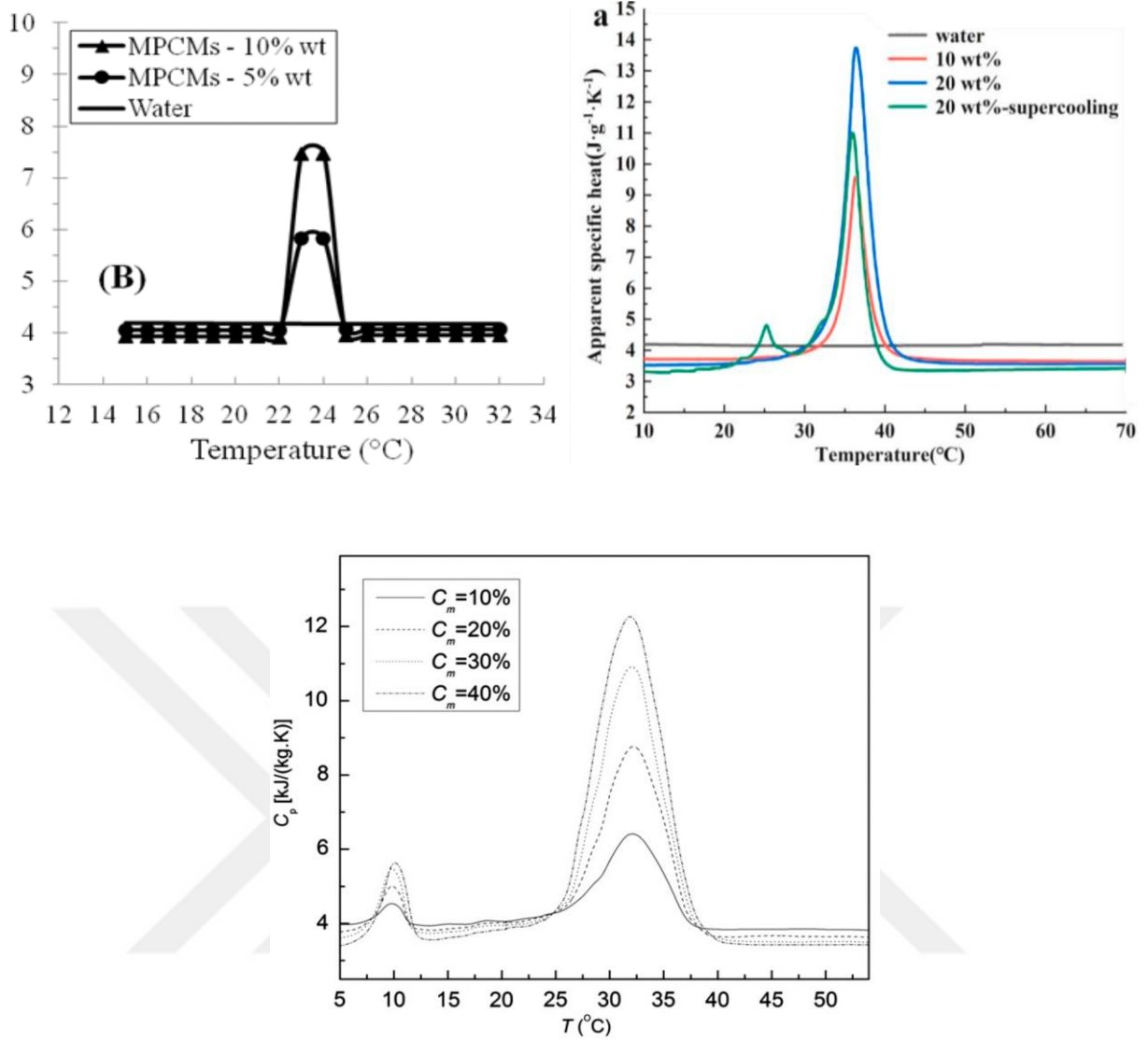
$$C_{p,kFDM-S} = W_{kapsül} C_{p,kapsül} + W_{su} C_{p,su} \quad (22)$$

Aynı hesaplama, denkleme sıcaklığa bağlı yoğunluk değerlerinin de dahil edilmesiyle hacimsel kesirler üzerinden de hesaplanabilir:

$$C_{p,kFDM-S} = \frac{(1 - \phi) * (\rho_{su} * C_{p,su}) + (\phi * (\rho_{kFDM} * C_{p,kFDM}))}{\rho_{kFDM-S}} \quad (23)$$

Burada, ϕ kFDM'nin TA içindeki hacimce konsantrasyonunu göstermektedir.

Daha önce yapılan sayısal ve deneysel çalışmalarda (Feng et al., 2021; Languri et al., 2013; Y. Zhang, Wang, Rao, & Xie, 2011) elde edilen farklı ağırlık veya hacim kesirlerine sahip kFDM-S'lerin özgül ısıları **Şekil 39**'da sunulmuştur.



Şekil 39. Bazı kFDM’lerin C_p değerlerinin karşılaştırılması (Feng et al., 2021; Languri et al., 2013; Y. Zhang et al., 2011)

Şekil 39’da açıkça görülebileceği üzere ve (Alvarado, Marsh, Sohn, et al., 2007) tarafından bildirildiği gibi, kFDM’nin TA içindeki kesri arttıkça daha yüksek ısı kapasitesi elde edilmektedir. Termal devrelerde kFDM’nin kullanılması, ITA’nın efektif özgül ısısını büyük ölçüde artırır ve sıcaklık artışını azaltır (Chamarthy & Utturkar, 2009). Buna karşılık, viskozitedeki artış, nispeten ihmal edilebilir düzeyde olup. Aynı miktarda ısı çekmek için gereken pompalama gücü, kFDM-S’de saf sudan çok daha az olduğu bildirilmişti (Wang, Shugang, Wang, Jihong, & Zhang, Tengfei, 2017).

Termal iletkenlik

Termal iletkenlik, bir PVT sisteminin genel termal performansını etkileyen parametreler arasında önemli yer tutmaktadır. Bu nedenle, termal iletkenliğin de mümkün olduğunca büyük olması istenir. Bununla birlikte, hemen hemen tüm FDM’lerin termal iletkenliklerinin sudan

daha düşük olduğu bilinmektedir. Ancak bu durum statik halde geçerli olup, kFDM'lerin parçacıklı yapısı sebebiyle TA içerisinde oluşturduğu efektif termal iletkenlik daha yüksek düzeyde gerçekleşmektedir.

kFDM-S'nin durağan haldeki termal iletkenliği Maxwell bağıntıları kullanılarak elde edilen aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir (Qiu et al., 2016; Qiu et al., 2019).

$$k_{\text{kFDM-S}} = \frac{2k_{su} + k_{\text{kapsül}} + 2W_{\text{kapsül}}(k_{\text{kapsül}} - k_{su})}{2k_{su} + k_{\text{kapsül}} - W_{\text{kapsül}}(k_{\text{kapsül}} - k_{su})} \quad (24)$$

Benzer bir formülasyon aşağıdaki şekilde verilmiştir (Allouche, 2016; Alqaity, Al-Dini, Wang, & Yilbas, 2012):

$$\frac{k_{\text{kFDM-S}}}{k_{su}} = \frac{2 + \frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} + 2\phi \left(\frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} - 1 \right)}{2 + \frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} - \phi \left(\frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} - 1 \right)} \quad (25)$$

Denklem yeniden düzenlendiğinde (Languri et al., 2013):

$$k_{\text{kFDM-S}} = k_{su} \left[\frac{2 + \frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} + 2\phi \left(\frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} - 1 \right)}{2 + \frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} - \phi \left(\frac{k_{\text{kapsül}}}{k_{su}} - 1 \right)} \right] \quad (26)$$

olarak ekle edilir.

Ancak kFDM-S'lerin termal iletkenlikleri; partikül boyutu, termal genleşme katsayısı, Brownian etkileri gibi başka birçok faktöre bağlıdır ve bu bağıntılar söz konusu faktörlerin etkisini içermemektedir. Söz konusu parametreler ise genellikle zamana bağlı olup, kFDM-S'lerin efektif termal iletkenliklerinin de zamana bağlı bir fonksiyon olmasını gerektirir (Al-Maghalseh, 2014).

Sonuç olarak, efektif termal iletkenlik durağan termal iletkenlik ile iyileştirme faktörlerinin toplamı şeklinde ifade edilmelidir (Etaig & Saleh, 2017):

$$k_{eff} = k_{\text{durağan}} + k_{\text{brownian}} \quad (27)$$

Burada durağan termal iletkenlik (Corcione, 2011):

$$k_{\text{durağan}} = k_{su} * \left[1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} * Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{\text{donma}}} \right)^{10} \left(\frac{k_{\text{kFDM}}}{k_{su}} \right)^{0.03} \phi^{0.66} \right] \quad (28)$$

şeklinde, Brownian hareket etkileri ise:

$$k_{brownian} = (5 \times 10^4) \beta \Phi \rho_{su} C_{p,su} \sqrt{\left(\frac{K_{boltz} * T}{\rho_{kFDM} * d_{kFDM}} \right)} * f(T, * \Phi) \quad (29)$$

şeklinde ifade edilir. Burada β bir sabit olup:

$$\beta = (5 \times 10^4) (Z_1 * (100 * \Phi)^{Z_2}) \quad (30)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 29'da yer alan $f(T, * \Phi)$ ise sıcaklık fonksiyonu olup:

$$f(T, * \Phi) = ((c_1 * \Phi + c_2) * T) + (c_3 * \Phi + c_4) \quad (31)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Efektif termal iletkenlik aynı zamanda, durağan termal iletkenliğin yukarıda anılan tüm etkileri kapsayacak bir katsayı ile çarpılması şeklinde de ifade edilmiştir (Z. Chen & Fang, 2011):

$$k_{eff} = f * k_{kFDM-S} \quad (32)$$

Bu yaklaşımda ise f (Chai et al., 2018; Z. Chen & Fang, 2011; Zeng et al., 2009):

$$f = 1 + B + \phi Pe_{cap}^m \quad (33)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} B = 0, m = 1.5 & Pe < 0.67 \\ B = 1.8, m = 0.18 & 0.67 \leq Pe \leq 250 \\ B = 3.0, m = \frac{1}{11} & Pe > 250 \end{array} \right\}$$

kFDM-S içindeki kFDM konsantrasyonuna ve difüzyonla taşınım hızının adveksiyonla taşınım hızına oranını ifade eden Peclet sayısına bağlı olarak hesaplanabilir. Peclet sayısı ise:

$$Pe_{kapsül} = \frac{\gamma d_{kapsül}^2}{\alpha_{su}} \quad (34)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada α termal difüzyon katsayısı, γ kayma hızı ve d ise kFDM çapını ifade etmektedir.

Viskozite ve konsantrasyon tayini

PV'lerin soğutulmasının ardındaki fikir, optimum çalışma sıcaklığını korumak, dolayısıyla elektrik verimliliğini en üst düzeyde tutmaktır. Soğutma aynı zamanda PV modüllerinin hizmet ömrünü olumlu yönde etkilemekte ve termal yorulmayı önlemektedir, ancak soğutma ile geri kazanılan enerji miktarı verimlilik ve uygulanabilirlik açısından soğutma sistemlerinin işletme ve yatırım maliyetlerinin geri ödemesinde eşik olarak kabul edilir. Bu

nedenle, pompalama gücü ihtiyacının geri kazanılan enerji içindeki payının düşük olması gerekir. Dolayısıyla, soğutma sıvılarının viskozitesi büyük önem taşımaktadır, çünkü artan viskozite değerleri daha yüksek pompalama gücüne neden olur ve geri kazanılan enerjinin daha büyük bir kısmı artan güç talebini telafi etmek harcanır, bu da soğutmanın verimsiz ve etkisiz bir hal almasına neden olur.

Yang et al. (2019), çeşitli faktörlerin kFDM-S ITA'nın viskozitesi üzerindeki etkisini rapor etmişlerdir. **Tablo 11**'de görülebileceği gibi, sıcaklığın yanı sıra TA içindeki kFDM kesri, parçacık çapı, yüzey aktif madde, faz değişim süreci ve kabuk malzemesi gibi çeşitli faktörlerin viskozite üzerinde etkileri vardır.

Tablo 11. Viskozite Üzerinde Etki Faktörü Analizi (Yang et al., 2019)

Faktör	Değişim	Viskoziteye etki	Kayma hızına etki
Anyonik yüzey aktif madde	↑	↓	-
Hacim kesri	↑	↑	↑
Sıcaklık	↓	↑	↑
Parçacık çapı	↑	↑	-
Faz değiştirme süreci	✓	Kararlı durumda etki yok, kararlı olmayan durumda ↑	-
Kabuk malzemesi	✓	İhmal edilebilir etki	-

Elbette, kFDM gibi sert parçacıkların TA'ya katılması, viskozitede bir artışa neden olacaktır. Einstein, sert kabuklu rijid küreler içeren seyreltik çözeltilerin viskozitesini tahmin etmek için bir korelasyon önermiştir:

$$\mu = \mu_0(1 + k\phi) \quad (35)$$

Burada μ , süspansiyonun viskozitesidir, μ_0 saf çözücünün viskozitesi, ϕ hacimce konsantrasyon ve k ise parçacıkların şekil, rijidlik ve bir ortamda asılı halde bulunan parçacıkların rastgele hareketini ifade eden Brownian hareketine bağlı bir sabit olup küresel formda olan rijid parçacıklar (cam küreler) için 2,5 olarak belirlenmiştir (Vand, 1945).

Süspansiyonun, parçacık ilavelerine hidrodinamik olarak homojen bir ortam gibi davrandığı kabul edildiğinde; hâlihazırda V hacmi kadar benzer parçacık içeren A hacmindeki saf sıvıdan oluşan μ viskozitesindeki solüsyona dV hacmine sahip bir parçacık ilave ederek daha yüksek konsantrasyonlar için geçerli olabilecek teorik bir viskozite formülü elde edilebilir (Vand, 1945). Böylece solüsyonun viskozitesindeki artış genel olarak;

$$\mu + d\mu = \mu \left(1 + k \frac{dV}{A+V} \right)$$

Denklem düzenlendiğinde;

(36)

$$\frac{d\mu}{\mu} = 1 + k \frac{dV}{A+V}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu diferansiyel değişim toplam değişim aralığında integre edildiğinde;

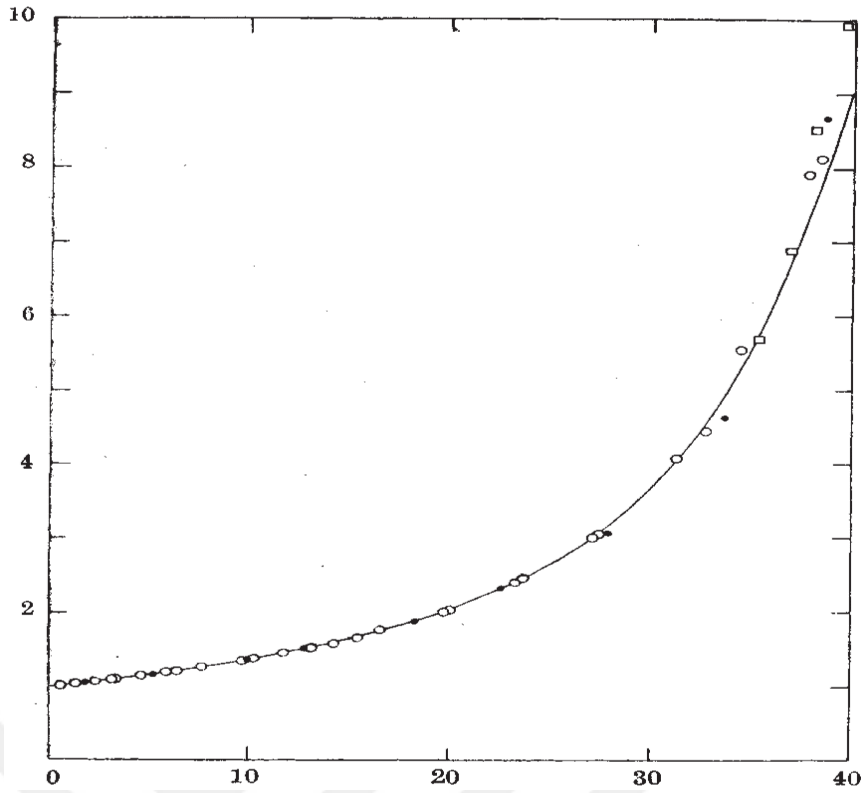
$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{V}{A} \right)^k = \mu_0 (1 - \phi)^{-k} \quad (37)$$

genel formülü elde edilir. Burada ϕ yukarıda da anıldığı gibi hacimce konsantrasyondur.

Süspansiyonun hidrodinamik olarak homojen olduğu varsayımı, yalnızca parçacıkların yeterince ayrı olduğu, dolayısıyla karşılıklı etkileşimlerinin genel bir viskozite artışına sebep olmak dışında ihmal edilebildiği durumlarda geçerlidir. Bununla birlikte, sıvının kayma hareketi altında parçacıklar birbirine göreli olarak hareket eder ve çarpışmalar meydana gelir. Parçacıklar kayma etkisi altında birbirlerinden yeniden ayrılincaya kadar birbirlerini yuvarlarlar. Küresel parçacıkların birbirleri ile temas halinde oldukları sürenin konsantrasyon ile doğru orantılı olduğu gösterilmiştir. Bu temas süresince belirli bir hacimdeki sıvı bu temas noktası çevresinde hareketsiz kalır. Dolayısı ile birbirleri ile temas halinde bulunan iki kürenin viskozite artışı üzerindeki etkisinin birbirinden ayrık halde bulunan iki küreye nazaran daha büyük olacağı açıktır. Kürelerin temas noktaları civarında hareketsiz kalan sıvının hacmi kürelerin hacmi ile orantılıdır. Dolayısı ile bu hareketsiz kalan hacim, q deneysel olarak belirlenebilen bir orantı sabiti olmak üzere ($qV\phi$) olup, A sıvı hacminden çıkarılarak V parçacık hacminde eklenmesi gerekir. Çarpışan iki kürenin, bu temas süresi boyunca küresel olmayan bir parçacık gibi davranacağı düşünüldüğünde, şekil faktörü k da konsantrasyonla biraz değişmelidir; ancak bu etki hareketsizleştirilmiş sıvının etkisine kıyasla çok önemsiz olduğundan ihmal edilebilir (Vand, 1945). Böylece Denklem 37, aşağıdaki hali alır.

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{V + qV\phi}{A - qV\phi} \right)^k = \mu_0 (1 - \phi - q\phi^2)^{-k} \quad (38)$$

Ostwald viskozimetreleri ile yapılan deneysel verilere, en uygun eğri Denklem 38'ün $k=2.5$ ve $q=1.16$ değeri için uydurulan eğri olduğu rapor edilmiş ve **Şekil 40**'da verilmiştir.



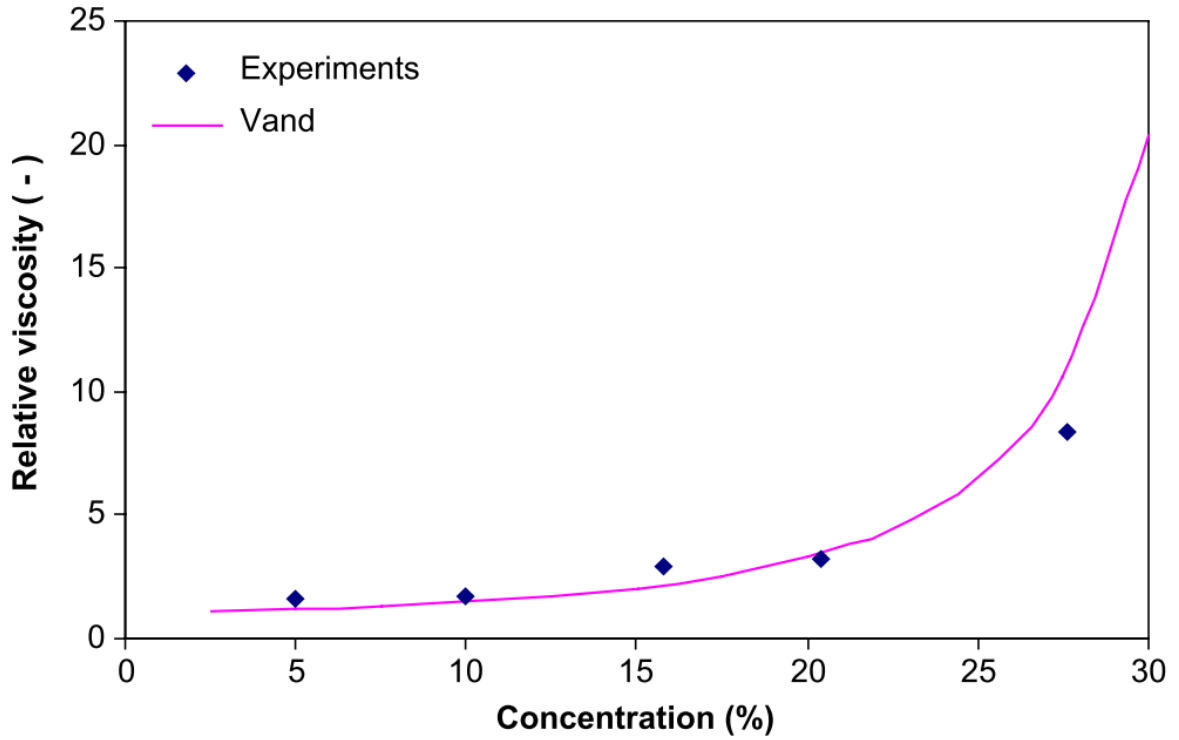
Şekil 40. Hacimsel Konsantrasyonun Fonksiyonu Olarak Cam Küreler İçeren Süspansiyonların Bağıl Viskozitesi [Ostwald viskozimetre ölçümleri, kılcal çap 0.23 cm (○) ; kılcal çap 0.38 cm (●), couette viskozimetre ölçümleri (□), Teorik eğri Denklem (38)'un $k = 2.5$, $q = 1.16$ için (Vand, 1945).

Bu grafik incelendiğinde bağıl viskozitenin %5'in altındaki değerler için oldukça küçük olduğu, özellikle %1, %2 gibi değerler için 1'e çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle ITA'nın viskozitesindeki artışın kayda değer düzeyde olmaması için %1, %1.5, %2 karışım oranlarında çözelti hazırlanmasına karar verilmiştir.

$$\frac{\mu_{kFDM-S}}{\mu_{su}} = (1 - \phi - A_{\phi}\phi^2)^{-2,5} \quad (39)$$

Burada ϕ çözelti içerisindeki kFDM'nin hacimsel konsantrasyonudur. Parçacığın büyüklüğüne, şekline ve tipine bağlı olan A_{ϕ} ise deneysel olarak belirlenebilen orantı sabitidir (Vand formülasyonunda q ile gösterilmiştir).

X. Wang et al. (2007) Denklem 39 ile hesaplanan viskozite değerleri ile yukarıda **Şekil 40**'da yer alan Vand eğrisini karşılaştırmıştır. **Şekil 41**'de yer alan grafikte, hesaplamalar ile deneysel sonuçlar arasında kabul edilebilir bir uyumluluk olduğu görülmektedir.



Şekil 41. Bağlı viskozitenin kapsül konsantrasyonu ile değişimi (X. Wang et al., 2007)

Vand (1945) tarafından verilen korelasyon, Goel et al. (1994), X. Wang et al. (2007) ve (Qiu et al., 2019) tarafından aşağıdaki genel formda çözelti viskozitelerinin hesaplanmasında kullanılmış ve geçerli olduğu rapor edilmiştir. Qiu et al. (2019), kFDM-S'lerin özellikleri ve bunların Güneş sistemlerinde kullanımı üzerine yaptıkları çalışmalarında, ticari mikrokapsüller için A_ϕ orantı sabitinin 3,7 olduğunu belirtmiştir (Qiu et al., 2019).

$$\frac{\mu_{kFDM-S}}{\mu_{su}} = (1 - \phi - 3,7\phi^2)^{-2,5} \quad (40)$$

Şekil 40'da görüldüğü üzere, özellikle hacimce konsantrasyonun %25'in altında olduğu değerlerde formül ile elde edilen bağlı viskozite değerleri ile ölçüm sonuçları arasında oldukça yüksek bir uyum vardır. Thomas (1965) bu oranın %97,5 olduğunu belirtmiş, ancak artan konsantrasyon değeri ile birlikte uyumun giderek artan bir oranda kaybolduğunu, örneğin %40 için %60'a, %60 konsantrasyon içinse %8,7'ye düştüğünü, bu nedenle de yüksek konsantrasyonlar için güvenilir olmadığını ifade etmiştir. Thomas (1965), aynı zamanda, Denklem 40'ın daha iyi uyum sağlayan bir varyantını da oluşturmuş ve bunu:

$$\mu_{eff} = \mu_{su} + 2.5\phi + 10.05\phi^2 + 0.00273 \exp(16.6\phi) \quad (41)$$

şeklinde ifade etmiştir. Ancak, çalışmamızda çözelti konsantrasyonu düşük olduğu için (%1, %1.5 ve %2) Denklem 39, Denklem 40 ve Denklem 41 kabul edilebilir düzeyde uyumluluk

göstermektedir ve literatürde de %25'in altındaki konsantrasyonlar için bu denklemlerin her birisinin kullanıldığı örnekler bulunmaktadır.

Basınç düşümü ve pompalama gücü

Darcy-Weisbach korelasyonu kullanılarak, teorik basınç düşümü aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Bellos & Tzivanidis, 2017; X. Wang et al., 2007; G. Zhang, Cui, Dou, Wang, & Goula, 2018):

$$\Delta P = f_D \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (42)$$

Burada f_D sürtünme katsayısı, L sirkülasyon devresinin toplam uzunluğu, D boru çapı, ρ yığın yoğunluğu, ve v ITA'nın ortalama akış hızını göstermektedir ve:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho_{kFDM-s} \cdot \left(\pi \frac{D^2}{4} \right)} \quad (43)$$

olarak ifade edilir.

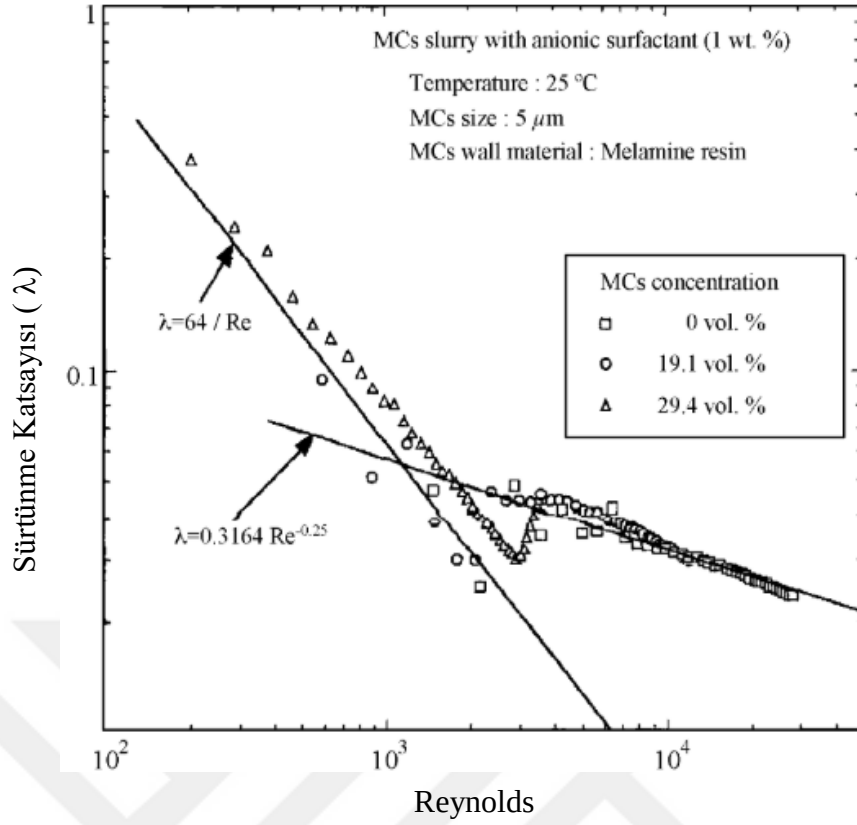
Denklem 42'de v yerine konur ve giriş ve çıkış arasındaki kot farkları da dikkate alınarak düzenlenirse:

$$\Delta P = \rho g (L \sin \theta) + \frac{8 \dot{m}^2}{\pi^2 g \rho^2 D^4} \left(f \frac{L}{D} + K \right) \quad (44)$$

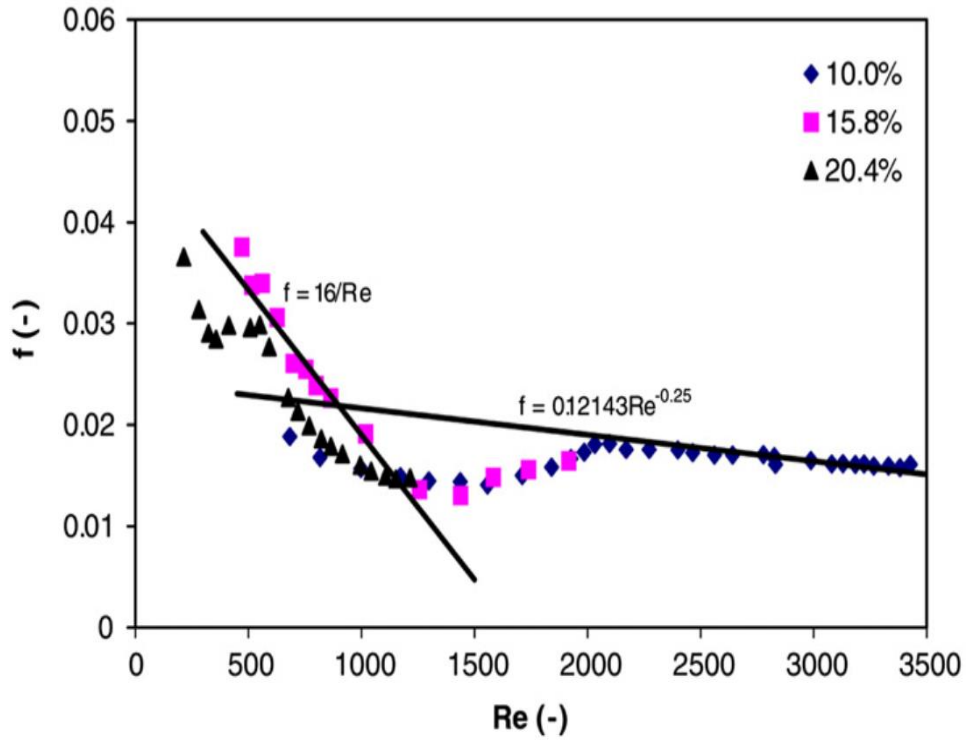
şeklinde hesaplanabilir (Yazdanifard, Ebrahimnia-Bajestan, & Ameri, 2016). Burada K yerel kayıpları, θ ise giriş ve çıkış arasındaki eğim açısını ifade etmektedir.

Hagen–Poiseuille denklemi uyarınca, f ve Re arasındaki korelasyon laminar akış ($Re < 2000$), geçişli akış ($2000 < Re < 3000$) ve türbülanslı akış ($Re > 3000$) olarak üç farklı akış rejiminde tanımlanmaktadır (Yang et al., 2019). Sürtünme katsayısı da akışın hangi bölgede olduğuna göre Re'ye bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

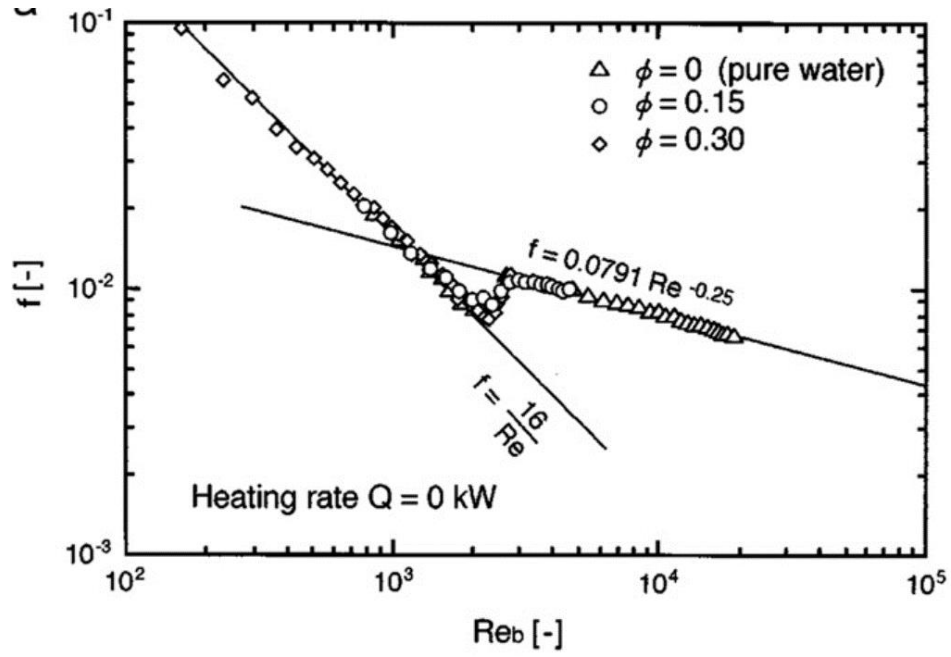
$$f_D = \begin{cases} 64/Re & Re < 2300 \text{ (laminar akış)} \\ 0.3164 Re^{-0,25} & Re > 4000 \text{ (türbülanslı akış)} \end{cases} \quad (45)$$



Şekil 42. Sürtünme katsayısının, akışın laminar veya türbülanslı bölgede olmasına göre değişimi ve ilgili korelasyonlar (10mm çapında boru) (Y. Yamagishi et al., 1996; P. Zhang et al., 2010)



Şekil 43. Sürtünme katsayısının, akışın laminar veya türbülanslı bölgede olmasına göre değişimi ve ilgili korelasyonlar (4mm çapında boru için) (P. Zhang & Ma, 2012)



Şekil 44. Sürtünme katsayısının, akışın laminar veya türbülanslı bölgede olmasına göre değişimi ve ilgili korelasyonlar (10.1mm çapında boru için)

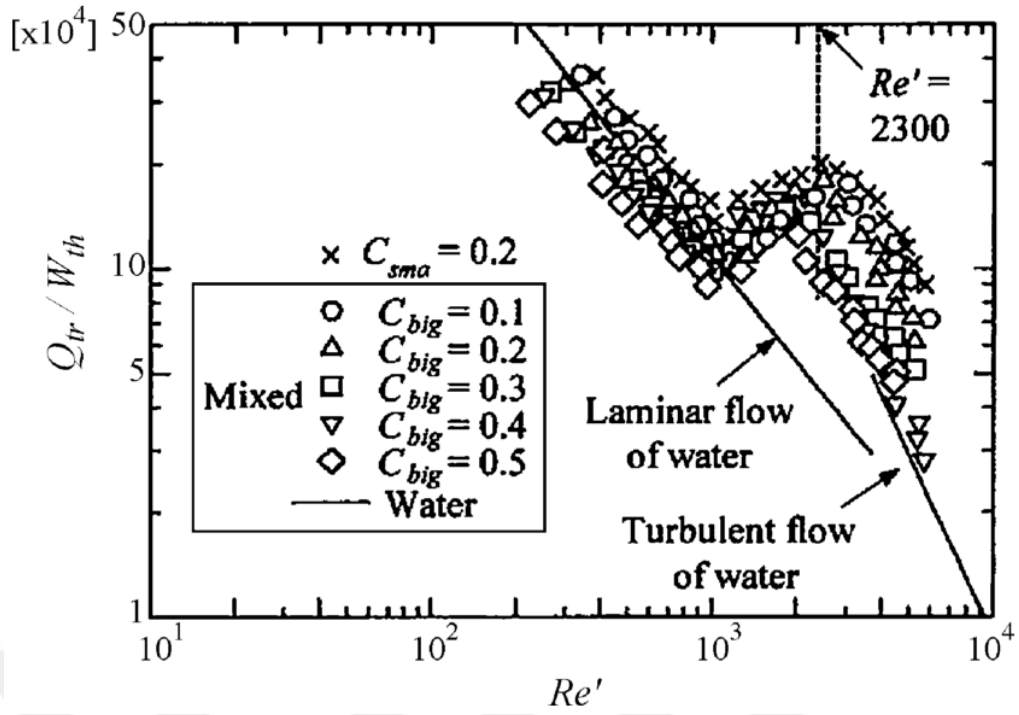
Ayrıca, ϵ kanalın bağıl pürüzlülük değeri olmak üzere, Colebrook korelasyonu kullanılarak da sürtünme faktörü hesaplanabilmektedir (Naghdbishi, Yazdi, & Akbari, 2020).

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_D}} \right) \quad (46)$$

Burada Re:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu_{kFDM-S}} \quad (47)$$

Viskozite artışı ve buna bağlı basınç düşümleri pompalama gücünde görece bir artışı da beraberinde getirmektedir. Ancak, ısı transferince elde edilen iyileştirme ile pompalama gücünde meydana gelen artış kıyaslandığında birçok nano akışkanda olduğu şekilde ve fakat daha önemli bir oranda görece ihmal edilebilir bir pompama gücü artışına mukabil önemli miktarda iyileşme sağlandığı görülmüştür. kFDM-S tarafından taşınan ısı yükünün pompalama gücüne oranının, kuvvet yasası uyarınca viskozite değişimine bağlı olarak yeniden hesaplanmış olan düzeltilmiş Re sayısı (Re') (Inaba, Kim, & Horibe, 2004) ile değişimi de **Şekil 45**'te farklı kFDM konsantrasyonları için verilmiştir.



Şekil 45. Farklı kFDM konsantrasyonlarında çekilen ısı miktarının pompalama gücüne oranının düzeltilmiş Re sayısına karşı değişimi (P. Zhang et al., 2010)

Basınç düşümüne (Δp) ve pompanın mekanik verimine göre (η_p) kFDM-S'yi sistemden dolatırmak için gerekli olan pompalama gücü:

$$P_{pompa} = \frac{\dot{m}\Delta p}{\rho_{kFDM-S}\eta_p} \quad (48)$$

şeklinde hesaplanır (Garba, 2020; Hosseinzadeh, Sardarabadi, & Passandideh-Fard, 2019; Yazdanifard et al., 2016).

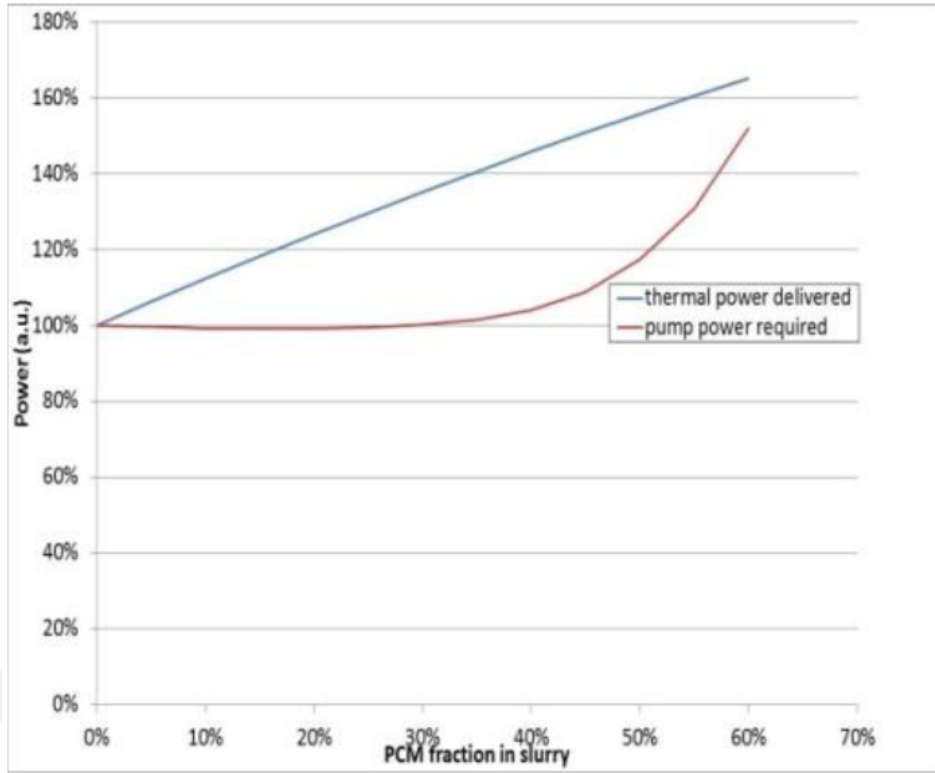
Ayrıca pompanın kFDM-S'yi sistemde dolaştırması için ihtiyaç duyulan elektrik gücü ampirik olarak (Sobhnamayan, Sarhaddi, Alavi, Farahat, & Yazdanpanahi, 2014):

$$P_{pompa} = \frac{1.2465 \times 10^4 A_{PVT} h_f^{3.5} \mu^{1.83} D_h^{0.5}}{k^{2.33} C_p^{1.17} \rho^2 \eta_p} \quad (49)$$

şeklinde de hesaplanabilir. Burada D_h hidrolik çap olup, δ boru boyunu göstermek üzere:

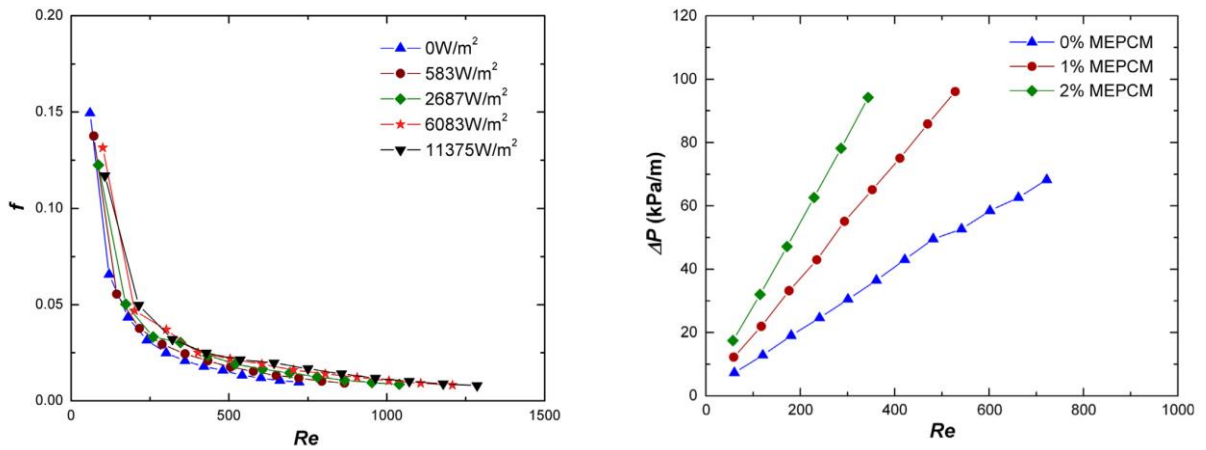
$$D_h = \frac{4\delta D}{2(\delta + D)} \quad (50)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 46. Çekilen ısı ile ihtiyaç duyulan pompalama gücünün kFDM konsantrasyonuna göre değişimi (A. H. Zondag et al., 2016)

Şekil 46’da görüldüğü üzere, %30’un altındaki kFDM içeriği nedeniyle ihtiyaç duyulan ilave pompalama gücü genellikle ihmal edilebilecek derecede düşükken, bu seviyeden daha yüksek kFDM içeriği için ihtiyaç duyulan pompalama gücü parabolik olarak artmaktadır.

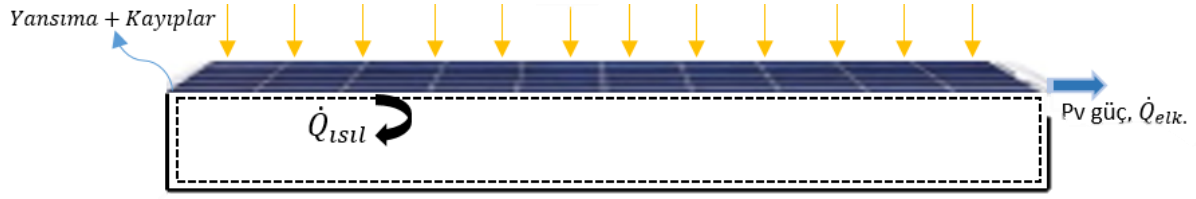


Şekil 47. Farklı ısıtım değerlerinde sürtünme katsayısının ve farklı kFDM oranlarında basınç düşümünün Re ile değişimi (Y. Wang, Chen, & Ling, 2016)

PVT/kFDM-S İçin Matematiksel Model

Termal sistemlerin analizi ve değerlendirilmesi, tersinmezliklerin neden olduğu kayıpların da dahil olduğu ve salt enerjinin niceliği ile ilgili hesaplamaları içeren birinci yasa analizleri (enerji analizleri) ve enerjinin faydalı iş potansiyelini temel alarak niteliği, yani

kullanılabilirliği ile ilgili hesaplamaları içeren ikinci yasa analizlerinin (ekserji analizleri) yapılmasını gerektirir.



Şekil 48. Deney sistemini ifade eden tipik bir kontrol hacmi.

Şekil 48’te tipik bir örneği görülen, deney sistemini oluşturan PVT panelinin bir kontrol hacmi olduğu göz önünde bulundurulduğunda; bu kontrol hacminde kütle ve enerjinin korunumu denklemlerinin geçerlidir. Yani, sürekli şartlarda sistem içerisindeki toplam kütlenin zamanla değişimi sabittir ($m_{KH} = \text{sabit}$ veya $\dot{m}_{KH} = 0$ veya $\frac{d}{dt}m_{KH} = 0$). Bunun için, sistemin sınırlarından giren ve çıkan kütleler eşit olmalıdır, yani:

$$\sum(m_g) = \sum(m_c) \quad (51)$$

Benzer şekilde, sürekli şartlarda kontrol hacmindeki toplam enerji değişiminin de sıfır olması gerekir ($E_{KH} = \text{sabit}$ veya $\dot{E}_{KH} = 0$ veya $\frac{d}{dt}E_{KH} = 0$).

Dolayısı ile açık bir sistem olan PVT sisteminin sınırlarından geçen ısı, kütle veya iş şeklindeki enerjilerin toplamının sıfır olması gerekir.

Sisteme giren enerji güneş ışınlamından elde edilen enerji kadardır ve;

$$\dot{Q}_{giren} = \dot{Q}_{güneş} \quad (52)$$

şeklinde ifade edilir.

PV panele gelen enerji miktarı, panelin ve bileşenlerinin özelliklerine, yani camın ve tedların absorpsiyon katsayılarına (α_t ve α_c), güneş hücresinin ve varsa kapak camının geçirir katsayılarına (τ_c ve τ_g), panelin doldurma oranına (packing factor veya fill factor) (F), panelin alanına (A), güneş ışınlamı değerine (I) bağlıdır.

Dolayısı ile varsa kapak camının içindeki toplam enerji:

$$E_{cam} = IA\alpha_{cam} \quad (53)$$

Güneş panelindeki toplam enerji (Farzanehnia & Sardarabadi, 2019):

$$E_c = IA\tau_{cam}F\alpha_{pv} \quad (54)$$

Tedlar içindeki toplam enerji:

$$E_{tedlar} = IA\tau_{cam}[(1 - F) + F\tau_{pv}]\alpha_{tedlar} \quad (55)$$

Akışkana geçen toplam enerji ise:

$$E_{akışkan} = IA\tau_{cam}[(1 - F) + F\tau_{pv}]\tau_{tedlar} \quad (56)$$

şeklinde ifade edilir.

Sistemden çıkan enerjiler ise:

$$\dot{Q}_{çıkan} = \dot{Q}_{ısı} + \dot{Q}_{elk} + \dot{Q}_{yansıyan} \quad (57)$$

olarak sıralanabilir. Termal enerji sisteme gelen enerjinin (yani PV paneli üzerine düşen toplam ısı gücünün yansıyan kısmı hariç) PV paneli tarafından elektrik enerjisine dönüştürülen kısmı dışında kalan ve termal kapasiteye temel teşkil eden ısı enerjisini ifade etmektedir.

Gelen ışınımın bir kısmı PV tarafından elektrik enerjisine çevrilmektedir. Dolayısı ile PV'nin elektriksel dönüştürme verimi:

$$\eta = \eta_{ref}[1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})] \quad (58)$$

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülemeyen kısmı, ısı enerjisi olarak çeşitli bileşenlere yayılır. Sistemde kayıpların sıfır olması durumunda termal kapasitenin tamamı sistemden çekilebilir, ancak kayıpları sıfıra indirmek imkânsız olarak kabul edilebilir. Buna göre, kayıplar ($\dot{Q}_{kayıp}$) da göz önünde bulundurulmalı ve $\dot{Q}_{ısı}$ 'dan çıkarılmalıdır.

Net termal enerji, PV panelinden, ısı alıcısı plakaya, ısı alıcısı plakadan kFDM-S'ye, kFDM-S'den de ikincil çevrim üzerinden kullanım suyuna aktarılacaktır. kFDM-S tarafından absorbe edilen toplam ısı enerjisi:

$$E_{kFDM-S} = (E_{kFDM,\zeta} - E_{kFDM,g}) + (E_{su,\zeta} - E_{su,g}) \quad (59)$$

olur.

Dolayısı ile giriş ve çıkıştaki entalpi akışı:

$$E = E_{kFDM-S} + E_p = m_{su}C_{su}T + \int_{alan} dA \int_{T_{erime}}^{T_{erime}+\Delta T} \Delta m C_{kFDM}(T) dT \quad (60)$$

Burada E_p pompalama gücü, kFDM-S'nin Denklem 40 veya Denklem 41 ile hesaplanan viskozitesine ve buna bağlı olarak sistemde neden olduğu basınç düşümüne bağlı olarak hesaplanacaktır. Ayrıca, kFDM'nin özgül ısı kapasitesi de faz değişim gizli ısısı dikkate alınarak Denklem 23 ile hesaplanan özgül ısı değeri olacaktır.

Deneysel sistemi oluşturan PVT/kFDM-S sisteminde PV ünitesi kFDM-S çevriminin dahil olduğu termal sistem ile panel yüzeyinden zorlanmış taşınım ısı transferi gerçekleştirilmek suretiyle, Newton'un soğuma yasası uyarınca soğutulmuştur. Buna göre, sistemden taşınım ısı transferi (Agyekum, PraveenKumar, Alwan, Velkin, Shcheklein, & Yaqoob, 2021):

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} = hA_s(T_{\text{yüzey}} - T_{\text{kFDM-S}}) \quad (61)$$

ise;

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{kFDM-S}} &= H_{\text{plaka-kFDM-S}} dA(T_{\text{plaka}} - \overline{T_{\text{kFDM-S}}}) \\ &= m_{\text{kFDM-S}} \cdot c_p \cdot dT_{\text{nf}} \dot{m} \cdot c_p (T_{\text{ç}} - T_{\text{g}}) + \Delta H_{\text{erime,kFDM}} \end{aligned} \quad (62)$$

olacaktır.

Buna göre kFDM-S'nin ısı alıcı plakası içerisindeki sıcaklığı:

$$T_{\text{kFDM-S}}(x) = (T_{\text{kFDM-S,g}} - T_{\text{plaka}})e^{-Cx} + T_{\text{plaka}} \quad (63)$$

denklemini ile ve çıkıştaki sıcaklığı da:

$$T_{\text{kFDM-S,o}} = T_{\text{kFDM-S}} L_{\text{kanal}} = T_{\text{kFDM-S,g}} A + T_{\text{plaka}} (1 - A) \quad (64)$$

denklemini ile elde edilir.

Denklem 59 ve Denklem 60 birlikte çözüldüğünde, sistemde dolaşan kFDM-S'nin ortalama sıcaklığı:

$$\overline{T_{\text{kFDM-S}}} = \frac{1}{L_{\text{kanal}}} \int_0^{L_{\text{kanal}}} T_{\text{kFDM-S}}(x) dx = T_{\text{kFDM-S,g}} B + T_{\text{plaka}} S (1 - B) \quad (65)$$

şeklinde hesaplanır (D. Su, Yuting, Lin, & Fang, 2017).

Enerji ve ekserji analizi

PVT sistemlerinde elektriksel enerji ve termal enerji birlikte üretilbildiğinden dolayı, enerji analizi elektriksel ve termal verim olmak üzere iki farklı bileşen halinde yapılmalıdır. Elektriksel verim (η_e , I. Yasa verimi), sistemin ürettiği elektrik gücü ile ITA'yı PVT sisteminde dolaştırmak için gerekli olan pompalama gücünün farkının gelen güneş enerjisine oranı olup:

$$\eta_e = \frac{P - \dot{E}_p}{I_r A_{pv}} \quad (66)$$

şeklinde hesaplanır (Wolf, 1976). Burada, P güneş paneli tarafından üretilen elektriksel gücü, $\dot{E}_p$, pompalama için harcanan gücü, I_r güneş ışıınımı şiddetini, A_{pv} panel yüzey alanını göstermektedir.

ITA'yı sistemde dolaştırmak için gerekli olan pompalama gücü ise akışkanın debisine, devrede oluşan basınç düşümüne, akışkanın yoğunluğuna ve pompanın mekanik verimine (η_p) bağlı olarak:

$$\dot{E}_p = \frac{\dot{m}\Delta p}{\rho_{kFDM-S}\eta_p} \quad (67)$$

şeklinde hesaplanır (Garba, 2020; Hosseinzadeh et al., 2019).

Buna göre, termal verim (η_t , I. Yasa verimi) sistemden çekilen ısı enerjisinin, sisteme gelen toplam güneş enerjisine oranı olarak hesaplanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Evola & Marletta, 2014; Ooshaksaraei, Sopian, Zaidi, & Zulkifli, 2017):

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_t}{I_r A_{pv}} = \frac{\dot{m}c_p(T_\zeta - T_g)}{I_r A_{pv}} \quad (68)$$

Ancak sistemde faz değişimi gerçekleşmektedir, faz değişiminin belirli bir sıcaklık aralığında ve ısı alıcısı boyunca farklı lokalizasyonlarda değişik kesir değerlerinde gerçekleştiği ve faz değişiminin sabit sıcaklıkta gerçekleştiği göz önüne alındığında çekilen toplam ısıнын T_g ve T_ζ sıcaklık farkları üzerinden hesaplanması uygun olmayacaktır. Bu nedenle; η_0 giriş ve ortam sıcaklıkları arasındaki farkın sıfır olduğu durumdaki termal verim, α ısı kayıp katsayısı ve T_o ortam sıcaklığı olmak üzere, termal verim:

$$\eta_t = \eta_0 - \alpha\left(\frac{T_g - T_o}{I_r}\right) \quad (69)$$

şeklinde hesaplanmalıdır (Lee, Hwang, & Lee, 2019).

Buna göre sistemin toplam verimi de, elektriksel ve termal verimlerin toplamı olarak ifade edilebilir. Ancak, burada enerji türlerinin ve dönüşüm oranlarının önemi büyük olup, dikkate alınmalıdır. Zira, elektrik enerjisi yüksek kaliteli enerji sınıfında olup, kayıpsız bir şekilde ısı enerjisine dönüştürülebilir, ancak ısı enerjisinden elektrik enerjisi elde etme verimi oldukça düşüktür. Dolayısıyla, η_{don} termal enerjiden elektrik enerjisi üretim verimi olmak üzere, toplam verim:

$$\eta_{top} = \eta_t + \frac{\eta_e}{\eta_{dön}} \quad (70)$$

şeklinde ifade edilebilir. Güneş ışıınının ekserjisi (Poredoš et al., 2020):

$$E_{güneş} = I_r [1 - \frac{4}{3} (\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}}) + \frac{1}{3} (\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}})^4] \quad (71)$$

Benzer şekilde ekserji verimleri, elektriksel ve termal olarak (Shahsavar et al., 2020; Sharaf & Orhan, 2014):

$$\eta_{ex} = \frac{P - \dot{E}_p}{I_r A_{pv} [1 - \frac{4}{3} (\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}}) + \frac{1}{3} (\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}})^4]} \quad (72)$$

ve

$$\eta_{tx} = \frac{\dot{m} c_p (T_{\zeta} - T_g) [1 - \frac{T_a}{T_g + T_{\zeta}}]}{I_r A_{pv} [1 - \frac{4}{3} (\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}}) + \frac{1}{3} (\frac{T_{ortam}}{T_{güneş}})^4]} s \quad (73)$$

olarak ifade edilir (Bellos & Tzivanidis, 2017; Ooshaksaraei et al., 2017; Petela, 1964; Shahsavar et al., 2020).

Buna göre toplam ekserji verimi ise

$$\eta_{topx} = \eta_{tx} + \eta_{ex} \quad (74)$$

olarak elde edilir.

Deney Sistemi

Deneyler Atatürk Üniversitesi Termodinamik Laboratuvarında kurulmuş olan ve **Şekil 49**'da görülen güneş enerji sistemi deney setinde yapılmıştır. Deney sistemi, PVT sisteminden ısı çeken kFDM-S çevrimi ve ikincil eşanjör devresi olmak üzere iki farklı çevrimden oluşmaktadır. Ayrıca sisteme entegre bir adet elektrik panosu, Farklı sistemlerin bağlanabilmesi için montaj ayakları, sistemin hareket ettirilebilmesini sağlayan tekerlekler ve güneş simülatörleri için yapılmış, portatif bir bağlama çubuğu bulunmaktadır.

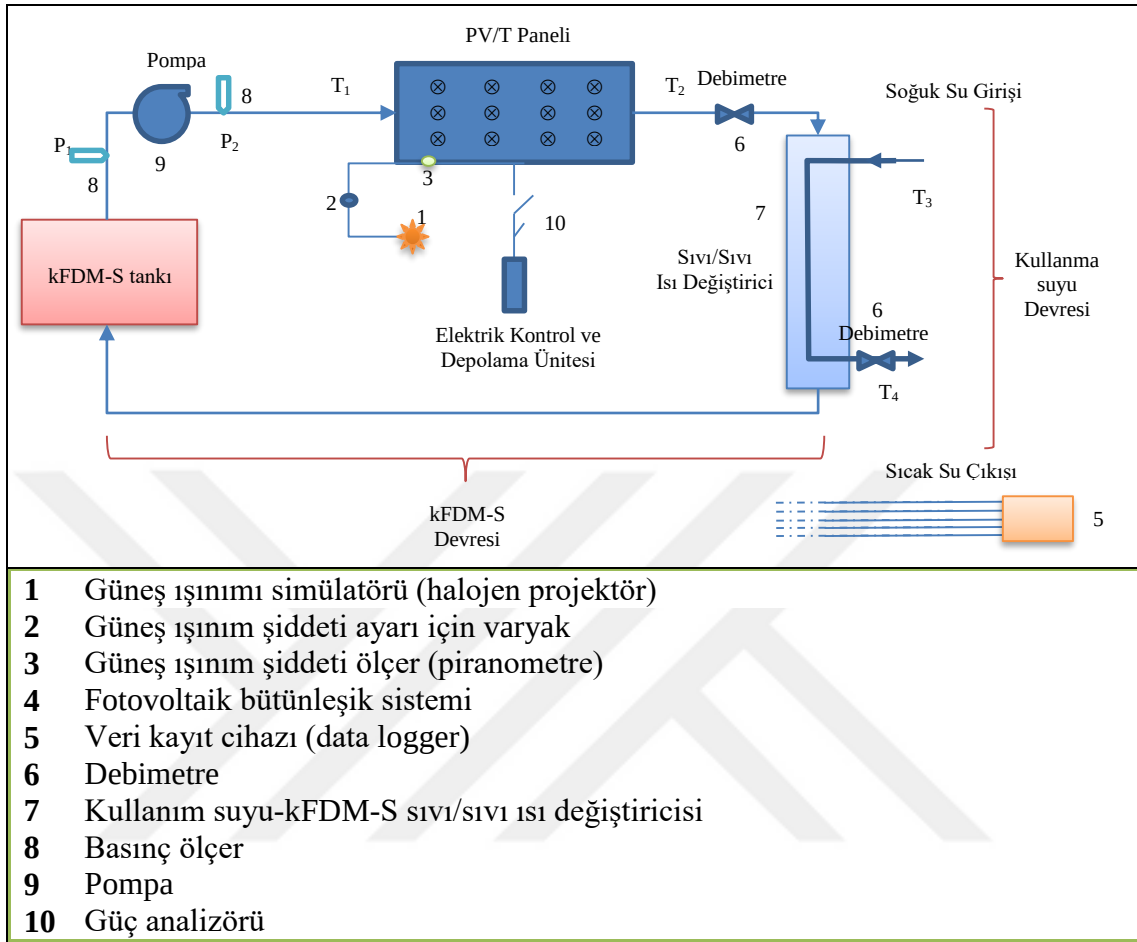


Şekil 49. Deney sistemi

kFDM-S çevriminde, düşey bir çerçeveye sabitlenmiş bir adet PV modülü, PV modülünün arka kısmında, bir yüzeyine termal macun uygulanarak PV paneline yapıştırılmış ve serpantin şeklinde kanal oyulmuş iki çift alüminyum plakanın birleştirilmesinden oluşan bir adet ısı alıcı plaka, veri okuma kartına bağlanmış bulunan ve ısı alıcı plakasının orta hattı üzerinde yerleştirilmiş 12 adet T tipi termoçift, kFDM-S devresinde bir sirkülasyon pompası, çevrimin bileşenleri arasında bağlantıyı sağlayan bakır borular, kFDM-S tankı, PV modülü yanına yerleştirilmiş pano içerisinde pompaların hız ve tork ayarlamasını yapmakta kullanılan iki adet invertör ve ilgili kontrol üniteleri yer almaktadır. Kullanım suyu devresinde ise kFDM-S devresine entegre ortak ısı değiştiricisi, bir adet santrifüj sirkülasyon pompası, bir adet su-hava ısı değiştiricisi, bağlantı boruları, vana, musluk ve ek parçaları yer almaktadır.

Deney sisteminde, tez çalışma kapsamında yapılan çalışmalar sırasında karşılaşılan bazı sorunların giderilmesi adına bazı değişiklikler yapılmıştır. Öncelikle, hâlihazırda gerektiğinden daha uzun olan, sökölüp takılması, temizlenmesi, yalıtılması zor olduğundan ve deneyler sırasında sistemin kararlı hale gelmesini geciktirdiği için bakır borular sökölerek bunların yerine aynı çapta şeffaf plastik hortumlar takılmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan akışkanların farklı olduğu ve boşaltılıp yeniden doldurma sırasında tank içinde ve borular içinde önceki deney akışkanından artıklar kalmadığından emin olabilmek adına, deney sistemini taban plakasına kaynaklı olarak imal edilmiş olan yerleşik depolama tankı devreden çıkarılarak,

portatif, şeffaf plastik bir depolama tankı sisteme dâhil edilmiştir. Panelin dış çerçevesi ısı alıcı plakasının panel arka yüzeyine tam olarak oturtulmasına engel teşkil ettiği için, panel kasası olarak kullanılan alüminyum çerçeve kesilmiştir.



Şekil 50. Deney sisteminin şematik gösterimi

Sistemin tanımı ve çalışma prensibi

Deney sistemi temel olarak bir PVT-sulu sistemdir. Sistemde, iş yapan akışkan olarak kullanılan kapsüllenmiş faz değışim malzemesi (kFDM) içeren sulu çözelti (kFDM-S), güneş panelinden çekilen atık ısıyı su-su ısı değıştiricisi üzerinden kullanma suyuna aktarmaktadır.

Güneş ışınlarının sahip olduğu foton enerjisinin tamamıyla elektrik enerjisine çevrilememesi ve bant enerjisi altında kalan yahut ışının enerjisinin bant enerjisinden fazla olan kısmının panel bünyesinde ısı olarak depolanması nedeniyle, güneş panelinin sıcaklığı yükselmektedir. Bu sıcaklık artışı aynı zamanda güneş hücrelerinden elde edilen elektrik geriliminin düşmesine, yani hücre veriminin azalmasına neden olmaktadır. Isı pompası çevrimi ile güneş panelinden çekilen ısı, panelin optimum çalışma sıcaklığında kalmasını sağlayarak sistemin veriminde meydana gelen düşüşü engellemeyi amaçlamaktadır.

Su içerisine katılan kFDM'nin çekirdek malzemesinin erime sıcaklığı ısı alıcısı girişindeki akışkan sıcaklığının üzerinde olduğundan, katı formda bulunmaktadır. Sistemden çekilen ısı ile hem taşıyıcı akışkan olan suyun hem de kapsüllerin sıcaklığı yükselmekte ve sıcaklık çekirdek malzemesinin erime sıcaklığına ulaştığında erime gizli ısısı kadar termal enerji sistemden sabit sıcaklıkta çekilebilmektedir. Termal dengeye ulaşıncaya kadar çekilen ısının miktarı bu şekilde yükseltilmiş olduğundan aynı miktarda ısı çekmek için gerekli debi daha az olmaktadır. Benzer şekilde, ısı alıcısından çıkan akışkan, eşanjöre ulaştığında yine katılaşma (kristallenme) sırasında sabit sıcaklıkta faz değişimi gerçekleşmekte düşük debide daha fazla miktarda ısı atılabilmektedir.

Faz değişimleri kapsül içerisinde gerçekleştiği için, akış makro boyutta tek fazda gerçekleşmekte ancak mikro boyutta faz değişimin avantajlarından ve gizli ısılardan faydalanılabilmektedir (Alvarado, Marsh, Thies, et al., 2007).

Sistemin bileşenleri

Deney sistemi, Güneş paneli, panel arkasına ısı çekmeyi kolaylaştıran ve içerisinde akışkanı taşıyan ısı alıcısı, dış ortama ısı kayıplarını engelleme amaçlı inslasyon ve muhafaza, güneş ışıınımlı simülatörü, fark basınç sensörü, su-su plakalı eşanjör, santrifüj pompa, debimetre, veri kayıt cihazı, panelin elektriksel çıktılarını ölçmekte kullanılan g analizörü (multimetre), termal çiftler (termokupullar), bağlantı elemanları ve taşıyıcı sistemden oluşmaktadır.

Sistemin tüm mekanik, elektriksel ve elektronik bağlantıları, güvenlik ve güvenirliği sağlayacak şekilde yapılmıştır. Boru bağlantılarının sızdırmazlığı, ısı alıcısı kısmının termal yalıtımı sağlanmıştır. Gerekli yerlerde kelepçeler, vidalar, termal macun kullanılarak sistemin sağlamlığı ve kararlılığı temin edilmiştir.

Güneş simülatörü

Atatürk Üniversitesi Isı Transferi Laboratuvarında kurulan deney sisteminde güneş ışıınımlı simüle etmekte benzer çalışmalarda kullanılan halojen projektörler kullanılmıştır. **şekil 51**'de görseli yer alan CATA marka 500W gücündeki projektörler kullanılmak sureti ile deneysel çalışmada ihtiyaç duyulan 800W/m^2 ve 1000W/m^2 ışıınımlı değerleri elde edilmiştir. rne ait teknik zellikler **Tablo 12**'te yer almaktadır.



Şekil 51. Deney sisteminde güneş simülatörü olarak kullanılan halojen projektörler

Tablo 12. Güneş Simülatörüne Ait Teknik Bilgiler

Özellik	Değer
Marka	CATA
Maksimum Güç	500 Watt
Çalışma Gerilimi	230V
Koruma Sınıfı	IP67
Malzeme	Alüminyum
Yükseklik	24 cm
Derinlik	12,5 cm
Genişlik	18,3 cm
Renk	Siyah
Duy Tipi	E27

Varyak

Yapay güneş ışınımının deneylerde kullanılan ışınım değerlerini karşılamasını temin etmek üzere, güneş simülatörlerinin akım ve gerilim değerleri Varsan marka değişken transformatör kullanılarak ayarlanmıştır. Sistemde kullanılan varyak **Şekil 52**'de görülmektedir.



Şekil 52. Deney sisteminde kullanılan Varsan varyak

Hız kontrol cihazları

Deney sisteminde, motor sürücüsü olarak kullanılan ve sistemde yer alan pompaların hız ve tork değerlerinin ayarlanmasında kullanılan iki adet hız kontrol cihazı (invertör) yer almaktadır. Invertörler aracılığı ile elektrik enerjisinin gerilim ve frekans değerleri ayarlanabilmektedir. Bu sayede deneylerde istenen giriş hızlarını ve debi değerlerini elde etmek için pompa motorlarının hızları ayarlanmıştır. Sistemde yer alan invertörlere ilişkin görsel **Şekil 53**'de görülmektedir.



Şekil 53. Deney sisteminde yer alan DC-AC akım dönüştürücü invertörler

PV paneli

Sistemde 47W gücünde polikristal PV paneli kullanılmıştır. PV panele ait teknik detaylar **Tablo 13**'te yer almaktadır.



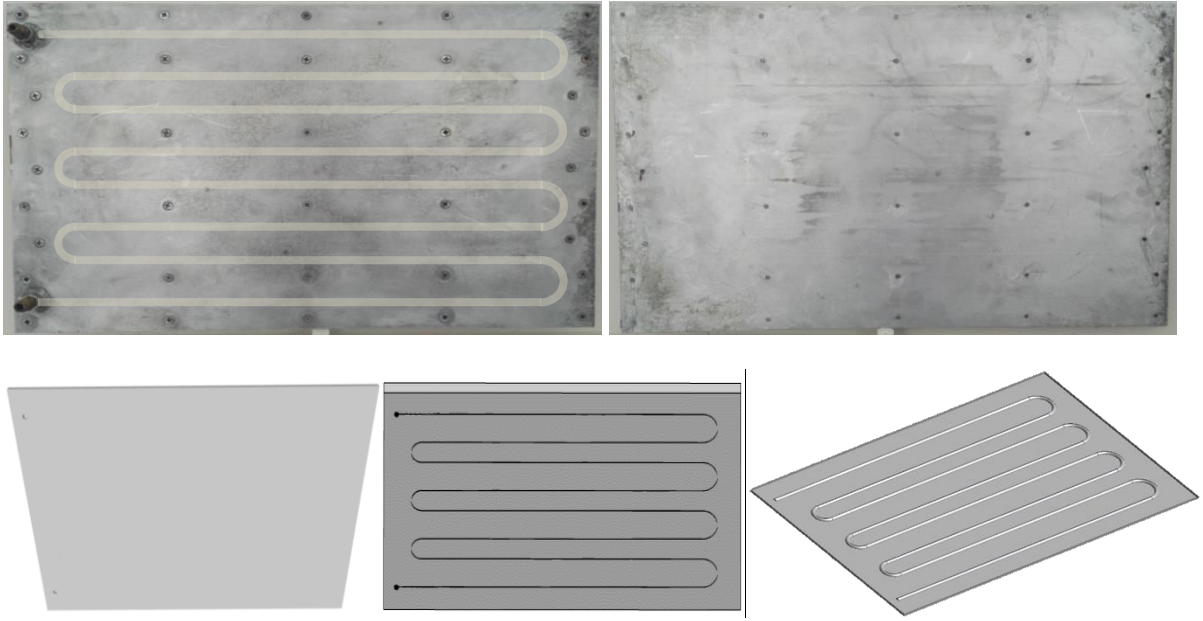
Şekil 54. Deney sisteminde kullanılan güneş paneli

Tablo 13. Fotovoltaik Panel Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
Hücre Tipi	Polikristal Güneş Modülü
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-40 ~ +85°C
Hücre Sayısı	20 (4x5)
Hücre Boyutları	78x157
Nominal Çalışma Hücresi Sıcaklığı (NOCT)	45°C±2°C
Sıcaklık Katsayısı (Isc, Voc, Pmax)	0,06, -0,31, -0,38 %/°C
Nominal Maksimum Güç (Pmax)	47 Wp
Maksimum Güçte Gerilim (Vmp)	19,73V
Maksimum Güçte Akım (Imp)	2,39 A
Açık Devre Gerilimi (Voc)	23,22V
Kısa Devre Akımı (Isc)	2,50 A
Maksimum Sistem Gerilimi	1000 V
Voltaj	12 V
Cam Özellikleri	3,2mm Low iron, Temperli cam
Bağlantı kutusu	IP65
Uygulama Sınıfı	A

Isı alıcısı

Deney sisteminde PV panelinden ısı çekmek üzere, 5mm kalınlığında iki adet alüminyum levha üzerine 4mm yarı çapa sahip yarım silindirik serpantin formunda kanallar açtırılmış, ve iki plakanın birleştirilmesi ile ısı alıcı plaka ve sirkülasyon devresinin plaka içinden geçen kanal kısmı elde edilmiştir. Plakanın giriş ve çıkış uçları kFDM-S tankı ve birinci ısı değiştiricisi ile birleştirilerek kFDM-S devresi oluşturulmuştur.



Şekil 55. Deney sisteminde kullanılan alüminyum ısı alıcı plakaya ait görsel ve modeller

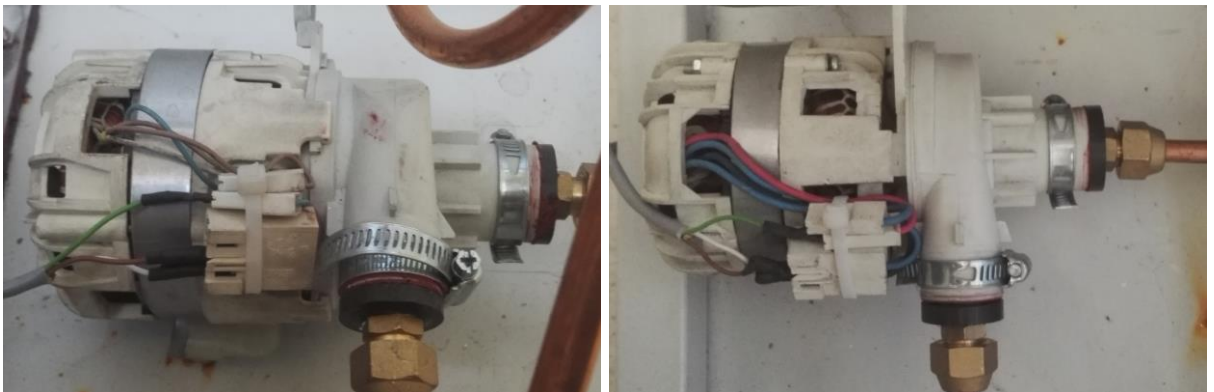
Isı alıcı plakaya ilişkin görsel ve şematik çizimler **Şekil 55**'de teknik detaylar ise **Tablo 14**'te yer almaktadır.

Tablo 14. Isı Alıcı Plakaya Ait Teknik Detaylar

Özellik	Değer
Malzeme	Alüminyum
Boyutlar	670x430mm
Et kalınlığı	2x5mm
Kanal Çapı	8mm
Toplam Kanal Boyu	5600mm
Ağırlık	7,150 kilogram

Pompa

Deney sisteminde her iki sirkülasyon devresinde birer adet santrifüj tip pompa yer almaktadır.



Şekil 56. Deney sisteminde yer alan santrifüj tip sirkülasyon pompaları

Isı değiştiricileri

İki devreli deney sisteminde plakadan ısı çekmekte kullanılan ve birinci devrede dolaşan akışkan ısı değiştiricisine girmekte ve burada deney düzeneğinde yer alan su-hava eşanjörü bulunan ikincil çevrime bağlanmaktadır.



Şekil 57. Deney sisteminde yer alan kFDM-S devresi ısı eşanjörü (a) ve ikincil devre ısı eşanjörü (su-hava) (b)

Deneyler sırasında su-hava eşanjörüne hava üflemek için fan gücünün yetersiz kalması nedeniyle ikincil devre, su-su eşanjöründen ayrılarak, eşanjöre **Şekil 50**'de görüldüğü gibi kullanım suyu bağlanmıştı. Böylece sistemde yer alan eşanjör kuyu gibi işlevi görmüştür.

kFDM-S

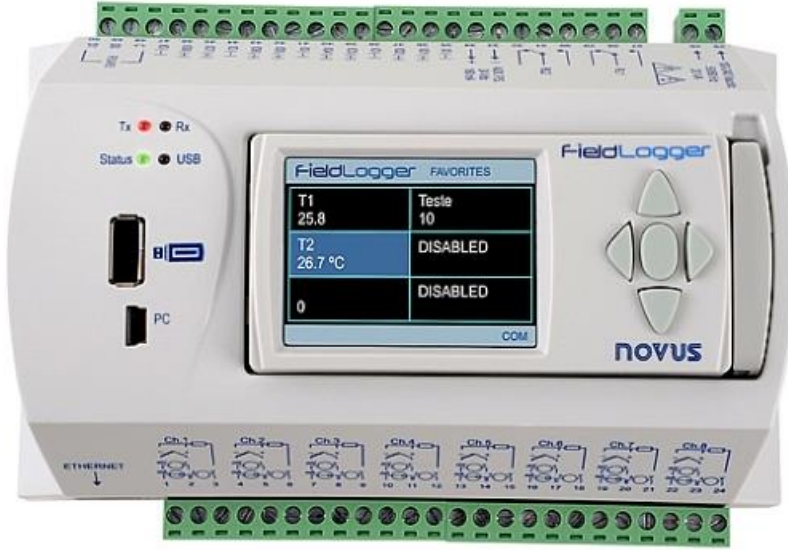
Deney sisteminde iş yapan akışkan olarak kapsüllenmiş faz değişim malzemeleri içeren sulu çözelti (kFDM-S) kullanılmıştır. Suyun taşıyıcı akışkan olduğu, hacimce %1, %1,5 ve %2 oranında kFDM içeren çözeltiler hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır. Çekirdeği Laurik Asit, kabuğu ise Melamin Formaldehitten oluşan kapsüller tez çalışması kapsamında üretilmiş olup fiziksel, kimyasal ve termal karakterizasyonları tez kapsamında yapılmıştır.

Test ve ölçüm elemanları

Veri kaydedici

Deney sisteminde verilerin kaydedilmesi için NOVUS Fieldlogger veri kaydedici kullanılmıştır. Cihaz ile PVT sisteminin, güneş ışıınımı, basınç, sıcaklık ve debi ölçümleri kaydedilmiştir ve USB harici bellek kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır.

Kayıt cihazına ait görseller ve teknik bilgiler **Şekil 58** ve **Tablo 15**'te verilmiştir.



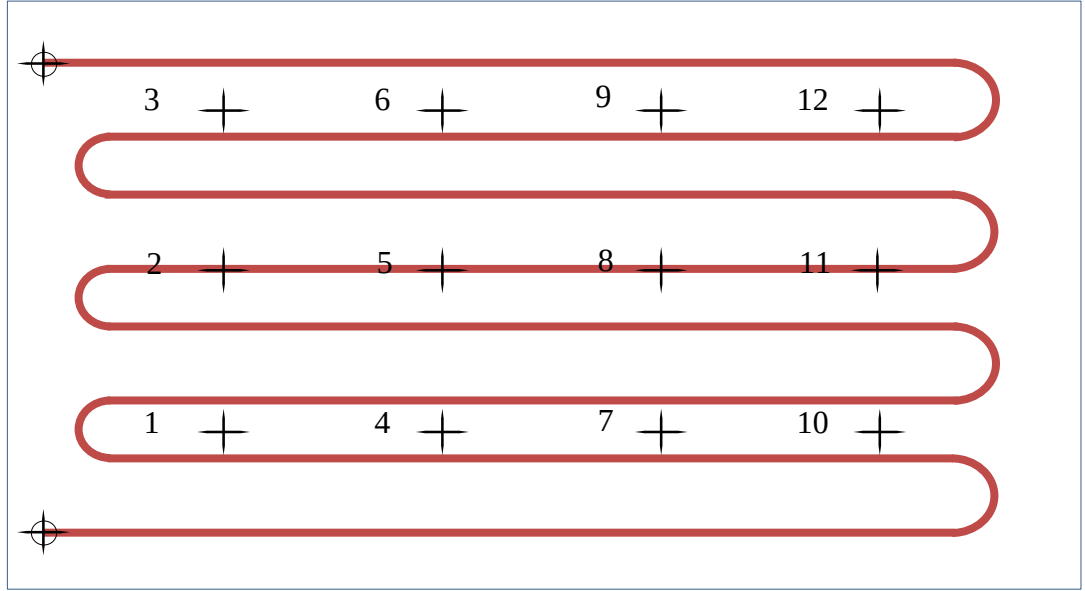
Şekil 58. Veri kayıt cihazı

Tablo 15. Veri Kayıt Cihazları Teknik Özellikleri

Parametre	Özellik
Port tipi	Analog
Port Özellikleri	8 adet ısılıçift 8 adet voltaj ve akım çıkışı
Ölçüm Hassasiyeti	$\pm 0,15$
Röle Sayısı	2
Haberleşme Protokolü	RS485 Modbus
Uyumlu Protokol ve Servisler	Modbus RTU, HTTP, TCP/IP, SMTP, DHCP, SNMP, FTP
Dâhili Bellek Kapasitesi	2048 KB
Harici Hafıza Desteği	SD Kart Desteği
Operasyonel Koşullar	0 - 50 °C Ortam sıcaklığı Azami %80 bağıl nem, 2000m irtifa
Güç Besleme	220V AC 50 HZ
Boyutlar	165x117x70 mm

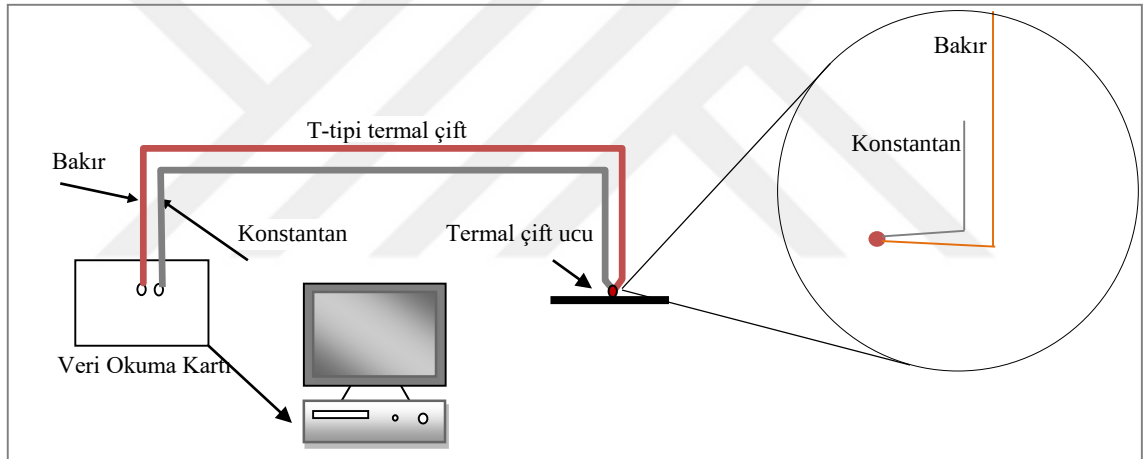
Termal çiftler

Deney sisteminde PV modülünün arka yüzü ile ısı alıcı plakası arasına, ısı alıcı plakası üzerinde **Şekil 59**'da gösterildiği şekilde konumlandırılmış 12 adet termal çift kullanılarak panel yüzey sıcaklıkları ısı alıcı plakanın giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen 2 adet termal çift ile de kFDM-S giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür.



Şekil 59. Termal çiftlerin ısı alıcı plakası üzerindeki yerleşimi

Kullanılan termal çiftlerin tipi, yapısı ve bağlantı şekilleri **Şekil 60**'da verilmektedir.



Şekil 60. Isı sensörü olarak kullanılan T-tipi termal çiftler (Yeşilyurt, 2015)

Piranometre

Deneyler laboratuvar ortamında ve yapay ışınlm altında yapıldığı için ışınlm değeriinin zamandan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Her bir deneyden önce ışınlm değeriinin panel yüzeyi boyunca düzgün dağılmış olduğu ve belirlenen değerde olduğu piranometre ile yapılan ölçümler ile belirlendikten sonra deneylere başlanmıştır. Güneş simülatörü besleme hattında meydana gelebilecek gerilim düşümleri nedeniyle projektörün ürettiği güçte azalma olması ihtimaline karşın, deneyler süresince piranotmetre güneş paneli ile yatayda aynı açıda olacak şekilde tespit edilmiş olarak tutulmuş ve deney süresince belirli aralıklar ile ölçüm değeriileri kontrol edilmiştir.



Şekil 61. Işınım şiddetini ölçmekte kullanılan piranometre

Ölçüm aralığı 0-1600W/m² ve ölçüm hassasiyeti W/m² başına sadece 15 µV olan, dijital sensörlü Hukseflux marka SR-05 DA2 model piranometre 1 saniye aralıklarla okuduğu değerleri 1 dakikalık ortalamalar halinde kaydetmektedir. Cihaza ait görsel ve teknik özellikler sırasıyla **Şekil 61** ve **Tablo 16**'da yer almaktadır.

Tablo 16. Piranometreye Ait Teknik Özellikler

Özellik	Değer
Marka / Model	Hukseflux / SR05 DA2
Ölçülen Büyüklük	Yarım küre güneş radyasyonu
ISO sınıflandırması	2 - İkincil standart piranometre
Kalibrasyon belirsizliği	<% 1.8 (k = 2)
Kalibrasyon izlenebilirliği	WRR (World Radiometric Reference)
Spektral aralık	285 ila 3000 x 10 ⁻⁹ m
Ölçüm Aralığı	0 – 1600W/m ²
Ölçüm Hassasiyeti	~15x10 ⁻⁶ V/(W/m ²)
Nominal çalışma sıcaklığı aralığı	-40 ila +80 ° C
Nominal çalışma gerilimi	5 ila 30 V DC aralığı
Haberleşme Arayüzü	Rs485

Fark basınç sensörü

Şekil 50'de gösterildiği üzere, deney sisteminin pompa giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı Jiangsu Huahai / SHHDP-9600 model diferansiyel basınçölçer kullanılarak kaydedilmiştir. Cihaza ilişkin görsel ve resimler **Şekil 62**'de yer almaktadır.



Şekil 62. Fark Basınç Sensörü

Fark basınç sensörüne ilişkin teknik bilgiler **Tablo 17'**de verilmiştir.

Tablo 17. Fark Basınç Sensörüne Ait Teknik Özellikler

Özellik	Değer
Marka / Model	Jiangsu Huahai / SHHDP-9600
Ölçülen Büyüklük	Fark basınç
Ölçüm Aralığı	0 – 2500 mbar
Ölçüm Belirsizliği	+/- 0.1%
Çıkış	4-20mA+HART
Nominal çalışma gerilimi	24 V DC

Debimetre

PVT sisteminde kFDM devresinin debisinin ölçülmesinde kullanılan debimetreye ait görüntüsü **Şekil 63'**te ve teknik özellikleri **Tablo 18'**de verilmiştir.



Şekil 63. Sıvı debimetresi

Tablo 18. Su Debimetresi Teknik Özellikleri

Özellik	Değer
Marka	IFM SM6000
Çalışma prensibi	Manyetik indüktif
Ölçüm aralığı	0,1-25 L/dk
Çalışma sıcaklığı	-10...70°C
Maksimum basınç	16 Bar
Üretim yeri	Hong Kong
Çalışma gerilimi	18-31 VDC
Çözünürlük	0,02 L/dk
Ağırlık	542,5 gram
Malzeme	Paslanmaz çelik
Analog akım çıkışı	4-20 mA
Analog voltaj çıkışı	0-10 VDC
Ortam	İletken sıvılar; Su veya su bazlı sıvılar

Güç analizörü

PV sisteminde üretilen gücün ve çeşitli sistem parametrelerinin gerçek zamanlı olarak ölçülebildiği ve kayıt edilebildiği bir güç analizörü kullanılmıştır. Cihaz ile PV panelin I-V eğrisi, maksimum gücü (P_{max}), (60V, 12A) aralığında otomatik ve manuel olarak tarama yapabilme, maksimum gerilim (V_{maxp}), maksimum akım (I_{maxp}), açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), verim (%) hesaplama işlemleri anlık veya belirli bir zaman aralığı için gerçekleştirilebilmektedir.

Deney sisteminde kullanılan Prova 210 güç analizörünün görüntüsü **Şekil 64**'te teknik özellikleri ise **Tablo 19**'da verilmiştir.

**Şekil 64.** Solar Modül Analizörü ve PV I-V eğri ölçüm cihazı

Tablo 19. Deney Sisteminde Kullanılan Güç Analizörünün DC Gerilim Ölçümüne İlişkin Elektriksel Özellikleri

Aralığı (60V / 6A)	Çözünürlük	Doğruluk
0- 10V	0.001V	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } V_{oc} \pm 0.1V)$
10-60V	0.01V	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } V_{oc} \pm 0.1V)$
DC akım ölçümü:		
Aralığı (60V / 6A)	Çözünürlük	Doğruluk
0.01 - 10A	1mA	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } I_{sc} \pm 9mA)$
10-12A	1mA	$\pm 1\% \pm (1\% \text{ of } I_{sc} \pm 9mA)$
DC akım simülasyon:		
Aralığı (60V / 6A)	Çözünürlük	Doğruluk
0.01-10A	1mA	$\pm 1\% \pm 9mA$
6-10A	1mA	$\pm 1\% \pm 0.09A$

DeneySEL Tasarım ve Yöntem

Araştırma değişkenleri, üç sürekli ve iki kategorik değişken olmak üzere beş adet olarak belirlenmiştir. Sürekli değişkenler, ışıınım değeri, debi, giriş sıcaklığı, kategorik değişkenler akışkan tipi ve ısı alıcı plakasıdır. Bağımlı değişken, çıkış suyu sıcaklığı, güneş paneli ortalama yüzey sıcaklığı, panel elektrik verimi, panel termal verimi, açık devre gerilimi, kısa devre akımı gibi farklı parametreler ile kendini gösteren ve esasen tamamen birbirine bağlı olarak elde edilen pil hücre sıcaklığıdır.

Deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Termodinamik Laboratuvarında kurulu olan PVT sistemi üzerinde 20 Ekim – 05 Kasım 2022 ve 03 Aralık – 20 Aralık 2022 tarihleri arasında iki set halinde gerçekleştirilmiştir. Bütün deneyler, sınanmayacak olan tüm sistem parametrelerinin sabit olduğu ve zamanla değişmediği görüldükten sonra, kararlı hal şartları altında yapılmıştır. **Tablo 20**'de verilen deney setleri gerçekleştirilmiş ve bu deneylerde sıcaklık, ışıınım değeri, basınç, güç, debi ölçümleri yapılmıştır. Veriler kaydedilmeden önce sistemin en az on beş dakika kararlı hal şartlarında çalıştığı gözlemlenmiş ve ardından Novus Fieldlogger veri okuma ve kayıt kartı (DAC/DAQ) kullanılarak veriler kaydedilmiştir.

Deneylerin amacı, iş yapan akışkan olarak suyun kullanıldığı Deney1'de elde edilen verilerin, iş yapan akışkan olarak ağırlıkça %0.5, %1 ve %1.5 kFDM ile hazırlanan sulu çözeltiler kullanıldığında nasıl değiştiğini araştırmaktır. Yani, kFDM-S'nin sistemin termal ve elektriksel verimine etkilerinin deneysel olarak araştırılması ve bu kFDM-S için uygun karışım oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, kFDM-S'lerin özgül ısı kapasiteleri suya göre daha düşük ve viskoziteleri ihmal edilebilir düzeyde de olsa sudan yüksektir. Dolayısı ile kFDM-S'leri suya karşı avantajlı hale getiren kapsül içerisinde gerçekleşen faz değişimi süreci ve bu süreçte sabit sıcaklıkta çekilen gizli ısıdır. Bu nedenle deneylerde kullanılacak akışkan debisi ve giriş sıcaklığı, 800 ve 1000W/m² ışıınım değerleri

altında ısı alıcı plakadan çekilecek olan ısı enerjisinin kFDM-S'yi faz değişim sıcaklığına ulaştıracak ve hatta faz değişiminin bütünüyle gerçekleşmesini temin edecek düzeyde olması gerekmektedir. Debinin gerektiğinden daha yüksek olması, kFDM-S'nin faz değişim sıcaklığına ulaşmadan yahut ulaşsa bile faz değişimi tamamlanmadan plakadan çıkmasına neden olacaktır, gerektiğinden daha düşük olması ise plaka içerisinde erken bir noktada faz değişiminin tamamlanmasına ve geri kalan kanal boyunca kFDM-S'nin sıradan bir akışkan gibi davranmasına neden olacaktır. Her iki durumda da, kFMD-S'nin gizli ısı potansiyelinden tam olarak yararlanılamayacaktır.

Bu bağlamda, her sıcaklık değeri için hacim ve yoğunluk değerleri farklılık gösterdiği için, daha doğru bir kıyas parametresi olması bakımından debi yerine akışkan giriş hızı kullanılmış ve yapılan hesaplamalar neticesinde, giriş hızları 0,04m/s ve 0,08m/s, giriş sıcaklığı ise 300K olarak belirlenmiştir. PVT sisteminde ikincil çevrim yerine şebeke suyu bağlanmış olup, kFDM-S giriş sıcaklığının istenen değerde elde edilmesi eşanjöre giren kullanım suyu debisi ayarlanmak suretiyle sağlanmıştır.

Tablo 20. Gerçekleştirilen Deney Setleri

Deney No	Akışkan	Giriş Hızı	Işınım	Isı Alıcısı	Giriş Sıcaklığı
Deney 1	Yok	-	800W/m ²	Yok	-
Deney 2	Yok	-	1000W/m ²	Yok	-
Deney 3	Su	0,04m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 4	Su	0,08m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 5	Su	0,04m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 6	Su	0,08m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 7	%1v kFDM-S	0,04m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 8	%1v kFDM-S	0,08m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 9	%1v kFDM-S	0,04m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 10	%1v kFDM-S	0,08m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 11	%1,5v kFDM-S	0,04m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 12	%1,5v kFDM-S	0,08m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 13	%1,5v kFDM-S	0,04m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 14	%1,5v kFDM-S	0,08m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 15	%2v kFDM-S	0,04m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 16	%2v kFDM-S	0,08m/s	800W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 17	%2v kFDM-S	0,04m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K
Deney 18	%2v kFDM-S	0,08m/s	1000W/m ²	Al oyma serpantin	300 K

Deneyler öncesinde, projektörler ile sağlanan yapay güneş ışınımının şiddeti bir dimmer ile ayarlanmıştır. Ölçüm hassasiyeti açısından panel üzerinde bulunan 4x9 sıralı 39 hücreli panelin **Şekil 65**'te gösterilen 12 hücrenin orta noktası olarak seçilmiş olan 12 noktadan piranometre ile alınan ölçümlerin ortalaması, gerçek ışınım değeri olarak kabul edilmiştir.

		6	
11			8
	3		
		2	
9			10
	1		
		4	
7			12
	5		

Şekil 65. PV paneli üzerinde ışınım ölçümü yapılan noktalar

Deneylerde ışınım değeri olarak belirlenen 800 ve 1000W/m² değerinin net olarak hesaplanabilmesi için 12 noktadan ölçülen değerlerin ortalaması ve standart sapması hesaplanmış, ortalamanın ve standart sapmanın 1 ve 2 numaralı ölçümlere oranı belirlenmiştir. Daha sonra bu noktalardan yapılan ölçümler bu oran ile çarpılmak sureti ile ortalama ışınım değeri hesaplanmıştır.

Ölçümler ve Belirsizlik Analizi

PVT kFDM-S deney sisteminde yapılan ışınım, debi, basınç, elektrik akım ve gerilimi, sıcaklık gibi fiziksel büyüklüklerin ölçümleri çeşitli ölçüm cihaz ve elemanları kullanılarak yapılmıştır. Değerlerin doğruluğunun test edilmesi ve belirsizlik düzeylerinin tespit edilmesi için belirsizlik analizi yapılması önemlidir.

Belirsizlik analizi, ölçüm sonuçlarının güvenilirliği ile ilgili bilgi veren önemli bir parametredir. Özellikle standart sapmaların yüksek olması muhtemel ölçümlerin belirsizlik analizinin yapılması oldukça önemlidir.

Ölçüm sonuçlarında karşılaşılan hatalar, sabit hata, rassal hata, ya da sistematik hata sınıflarından biri veya bunların toplamı şeklinde karşılaşılabılır. Dolayısı ile sonuçlar üzerindeki toplam belirsizliğin hesaplanması gereklidir. Moffat (Moffat, 1988) tarafından önerilen Denklem 65 kullanılarak belirsizlik miktarları her bir değişken için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$\delta_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \delta v_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial v_2} \delta v_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} \delta v_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (75)$$

Burada R, bağımsız değişkeni temsil etmek üzere, δ_R herbir bağımsız değişken ($v_1, v_2, \dots, v_n$) için yapılan ölçümde oluşan toplam belirsizlik miktarını göstermektedir ve $v_1, v_2, \dots, v_m, v_{m+1}, \dots, v_n$, v parametrelerinin ölçümlelerinde meydana gelen hata değerleri $\delta v_1, \delta v_2, \dots, \delta v_m, \delta v_{m+1}, \dots, \delta v_n$ olmak üzere:

$$R = \frac{v_1 \times v_2 \times \dots \times v_m}{v_{m+1} \times \dots \times v_n} \quad (76)$$

şeklinde ifade edilir.

$v_1, v_2, \dots, v_m, v_{m+1}, \dots, v_n$ bağımsız ise R'nin belirsizlik kesri (Sardarabadi et al., 2017):

$$\frac{\delta R}{R} = \left[\left(\frac{\delta v_1}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta v_2}{v_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta v_m}{v_m} \right)^2 + \left(-\frac{\delta v_{m+1}}{v_{m+1}} \right)^2 + \dots + \left(-\frac{\delta v_n}{v_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (77)$$

şeklinde hesaplanır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında yürütülen araştırma faaliyetleri ve bunlara ilişkin bulgular, kFDM Sentezi, kFDM Karakterizasyonu, kFDM-S Karakterizasyonu, PVT/kFDM-S Sisteminin Deneysel Analizi olmak üzere dört ana başlık altında toplanmış ve sunulmuştur.

kFDM Sentezi bölümünde FDM seçimi, kapsülleme için sentez yöntemi ve kabuk malzemesinin seçimi ile ilgili bulgular sunulmuştur. kFDM Karakterizasyonu bölümünde, kullanılan yöntemin başarısı, elde edilen kapsüllerin kimyasal, fiziksel ve termal özelliklerinin belirlenmesi ve bu doğrultuda yapılan analiz, test, ölçüm ve hesaplamaların sonuçlarına ilişkin bulgular sunulmuştur. kFDM-S Karakterizasyonu başlığı altında ise elde edilen kapsüllenmiş FDM'lerin su ile karıştırılması ile hazırlanan kFDM-S ITA'sının termal ve reolojik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Son olarak, bu özel akışkanın PVT sisteminde deneysel performans incelemesi yapılmış ve bu deneylerden elde edilen bulgu ve sonuçlar grafiklerle sunulmuş, ayrıca sistemin verimlilik analizleri yapılarak, kFDM-S akışkanın su ile karşılaştırması yapılmıştır.

kFDM Üretimi

In-situ polimerizasyon yöntemi kullanılarak, boyutları 1 ila 4 μm arasında değişen LA/MF kFDM başarıyla sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir.

Şekil 67 ve **Şekil 66**'de Kapsül sentezi aşamalarına ilişkin görseller verilmiştir.



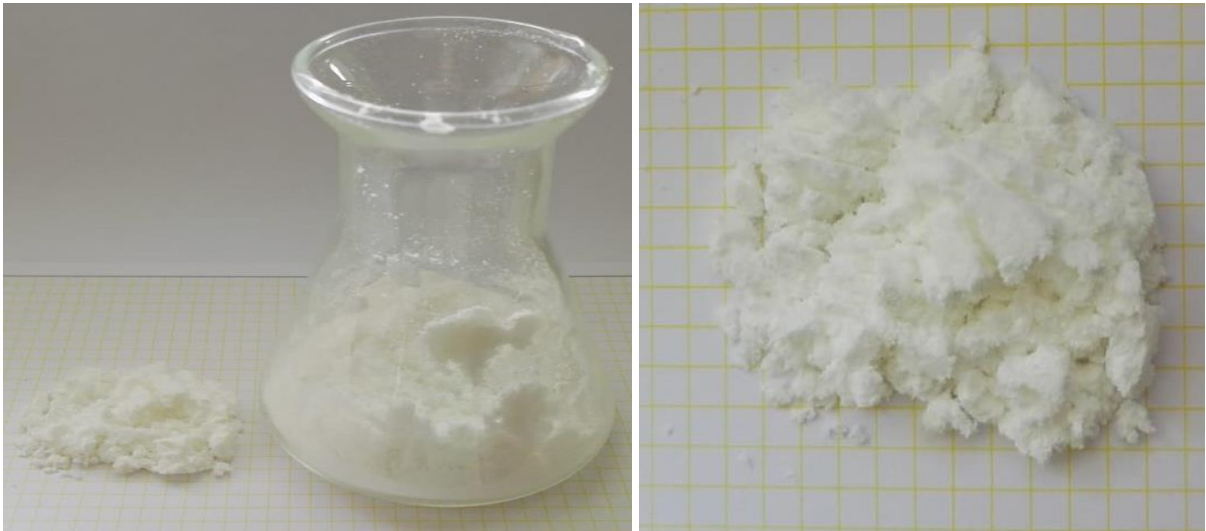
Şekil 66. Çözelti içerisinde çöktürülmüş olan kapsüller ve ayrılmış çözelti



Şekil 67. Pre-polimer hazırlanması (sol) ve damlatma hunisi ile kabuk malzemesinin karıştırıcı üzerinde ortama eklenmesi

Elde edilen karışımlar santrifüj karıştırıcıda çöktürüldükten sonra sıvı çözeltiden süzülerek ayrıştırılıp, etüvde kurutuldu.

Çökelmiş kapsüller üzerindeki süpernatant sıvı alındıktan sonra kapsüller etüvde kurutulmuş ve depolanmıştır. Kurutulmuş mikrokapsüller **Şekil 68**'de görülmektedir.

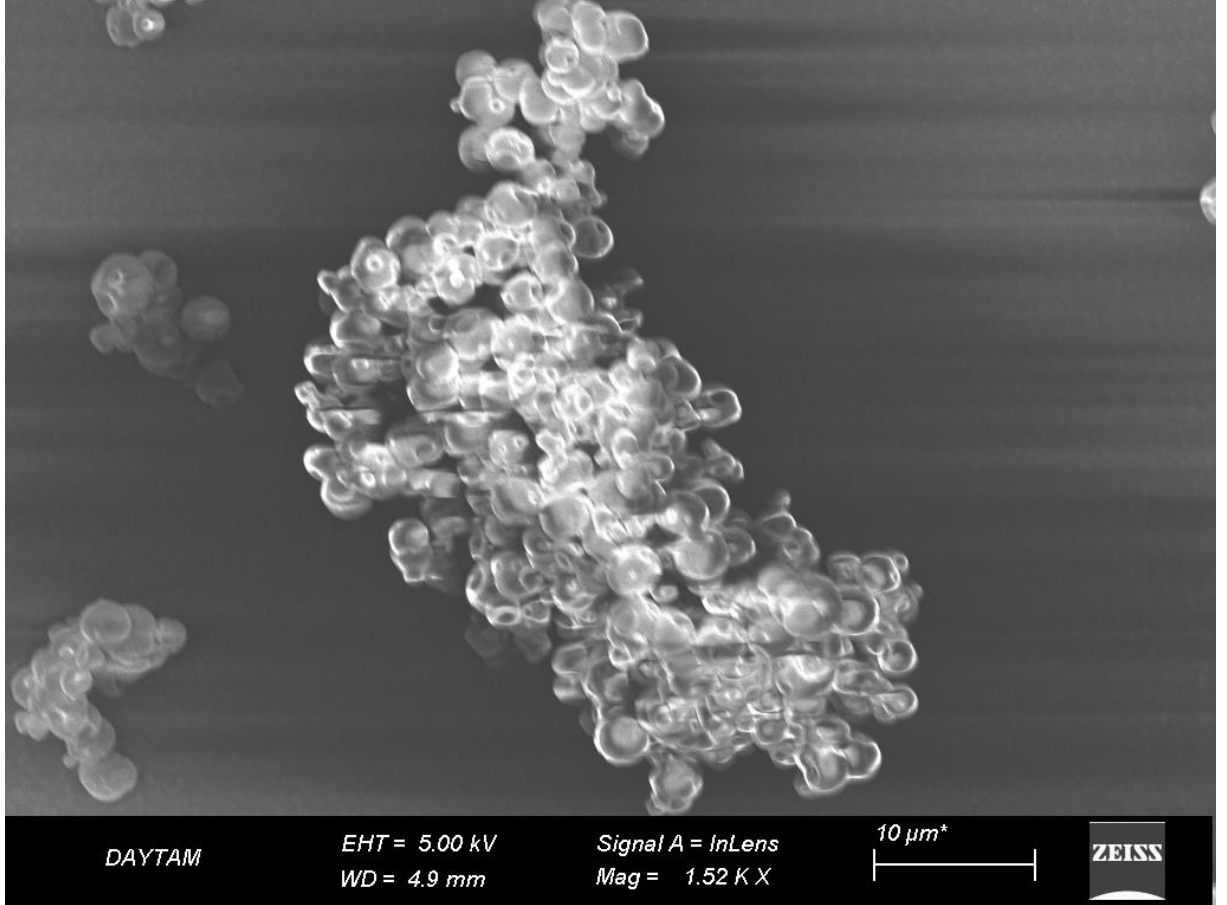


Şekil 68. Yerde polimerizasyon yöntemi ile üretilen MF/LA kFDM

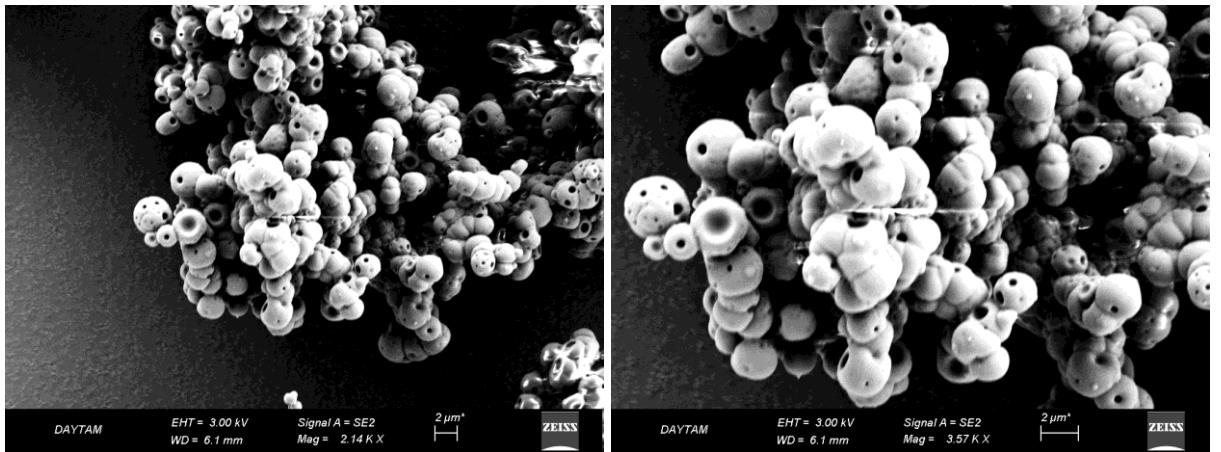
kFDM Karakterizasyonu

SEM ve TEM analiz sonuçları

Melamin formaldehit (MF) ile kapsüllenmiş Laurik Asit, görüntüleri SEM analizleri ile incelenmiştir.

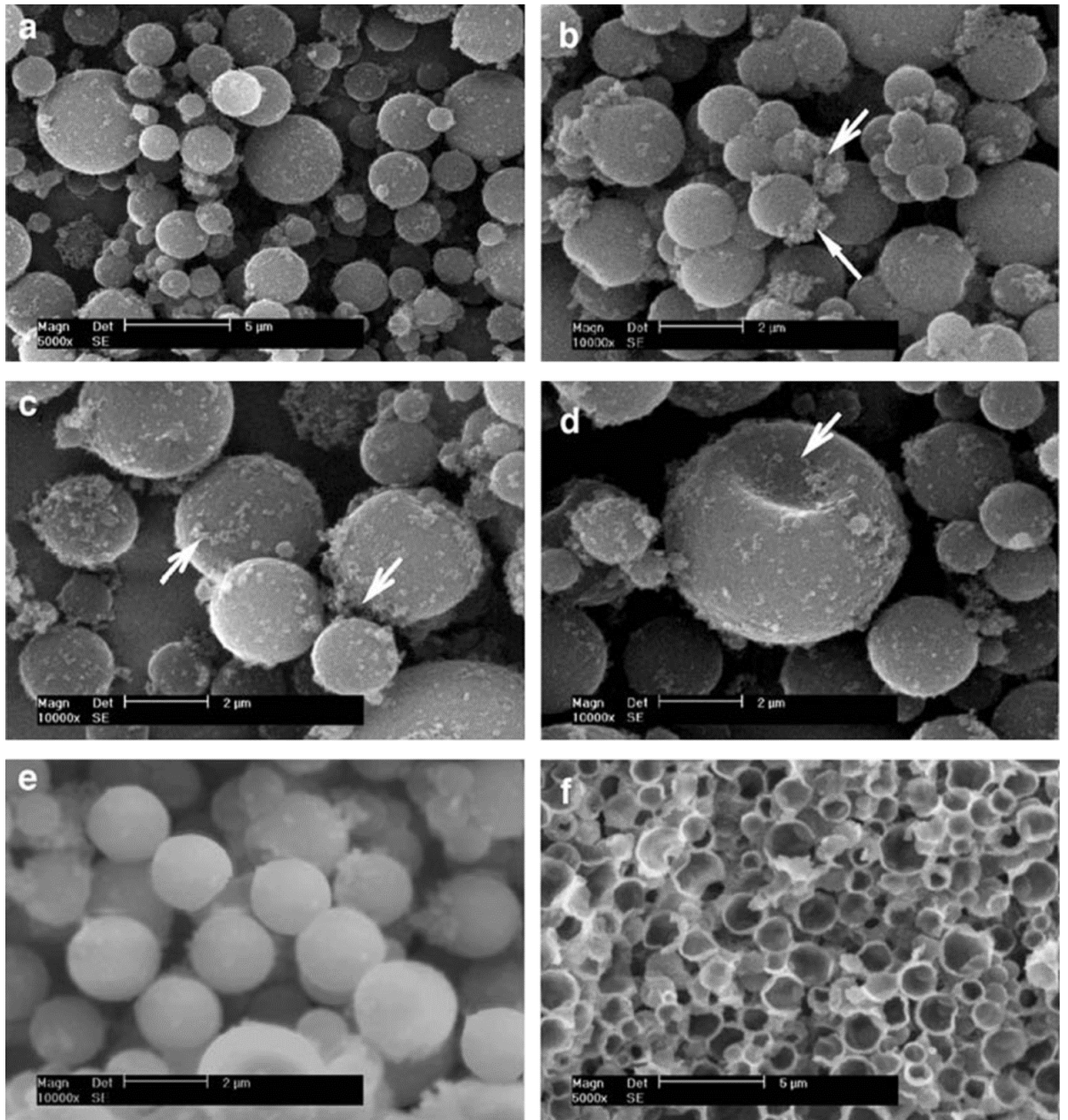


Şekil 69. İlk sentezde elde edilen mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemesine ait SEM görüntüsü @5.00 kV ve 1,52K yakınlaştırma seviyesi



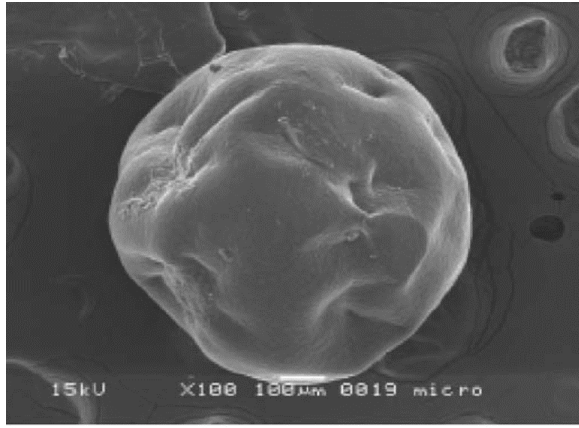
Şekil 70. İlk sentezde elde edilen mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemesine ait SEM görüntüsü @3.00 kV ve 3,57K yakınlaştırma seviyesi

Test üretimi sayılabilecek ilk kapsül sentezinde reaksiyon ortam ısının ve proses sürecinin iyi kontrol edilememesi nedeniyle olduğu düşünülen morfolojik sorunlar görülmüştür. **Şekil 70**'te yer alan SEM görüntüleri incelendiğinde kapsüllerin yüzeylerinde krater benzeri çukurluklar olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri kapsül yüzeylerinde yer alan bu çukurların kabuk malzemesinde delik oluşturup oluşturmadığı hakkında bilgi vermedi. Bu yüzey deformasyonlarının varlığı, sebepleri ve kapsüllerin termal çevrim sürecindeki performansına etkileri üzerine yapılan araştırmalar sonucunda benzer yüzey deformasyonlarının literatürde yapılan bazı çalışmalarda da rapor edildiği (Delgado, Lázaro, Mazo, & Zalba, 2012; C. Y. Zhao & Zhang, 2011) tespit edildi.

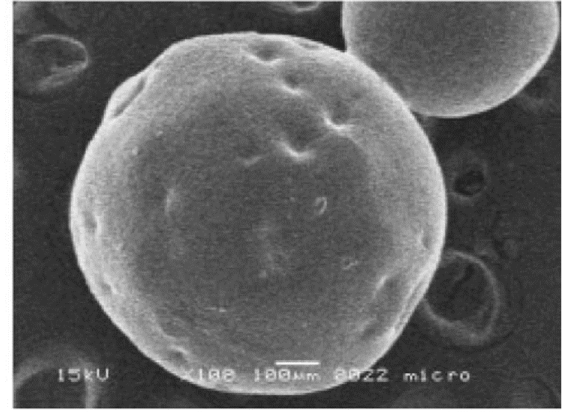


Şekil 71. Kapsüllerin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüleri (Delgado, Lázaro, Mazo, & Zalba, 2012)

Bununla birlikte üretimde meydana gelen yüzey morfolojisindeki bozuklukların termal çevrim sayısı ile doğru orantılı olarak azaldığının bildirildiği çalışmalar da bulunmaktadır (C. Y. Zhao & Zhang, 2011). Isı alışverişi sırasında termal olarak genleşme ve büzülme yaşayan kabuk malzemesinin daha üniform bir yapıya kavuşması anlaşılabilir olmakla birlikte, bu değişimin kabuk malzemesinde belirli bölgelerde incelmelere ve belki termal yorulmalar nedeniyle çatlama ve kırılmalara da neden olabileceği değerlendirildiğinden ilk üretimde yüzey morfolojisinin olabildiğince üniform olarak elde edilmesinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır.



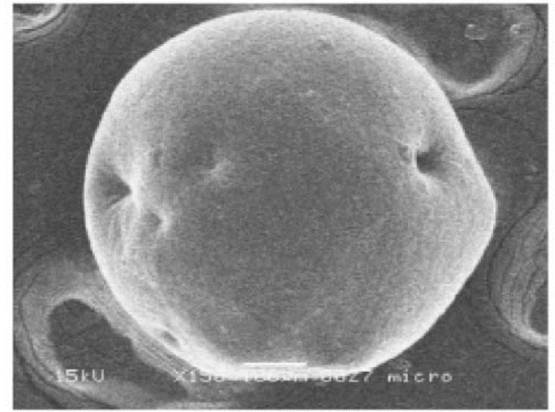
0 cycle



200 cycles



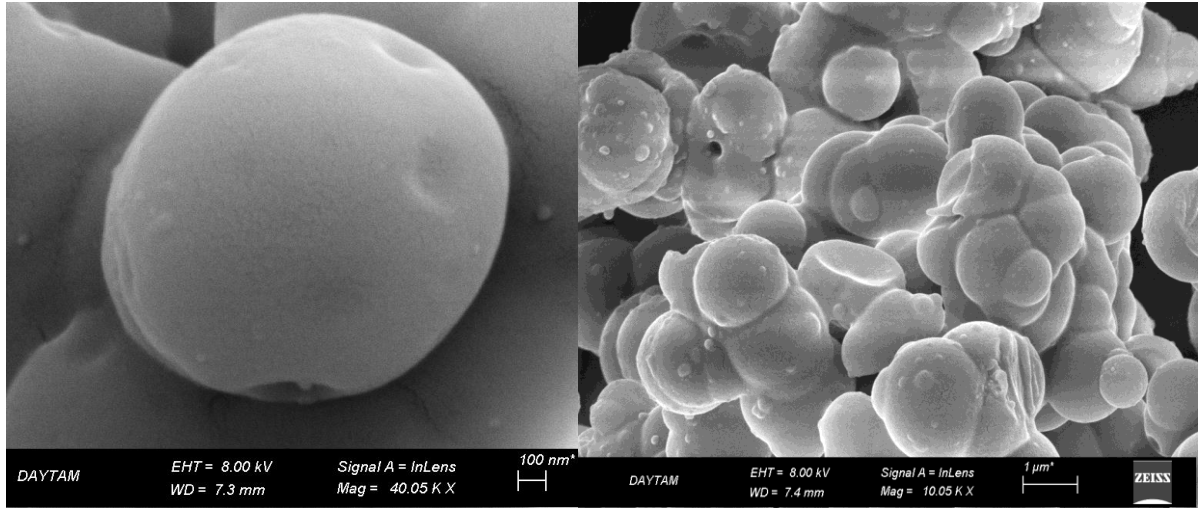
500 cycles



1000 cycles

Şekil 72. Kabuk deformasyonlarının termal çevrimler sonrasındaki değişimi (Hawllader, Uddin, & Zhu, 2002; Smith, 2009; C. Y. Zhao & Zhang, 2011)

Nitekim literatürde yer alan Kong, Alvarado, Terrell, and Thies (2016) tarafından yapılan çalışmada kabuk kalınlığı yetersiz olan kapsüllerin belirli bir termal çevrim sonrasında dayanamadığı (Kong et al., 2016) ve bozulduğu bildirilmiştir.



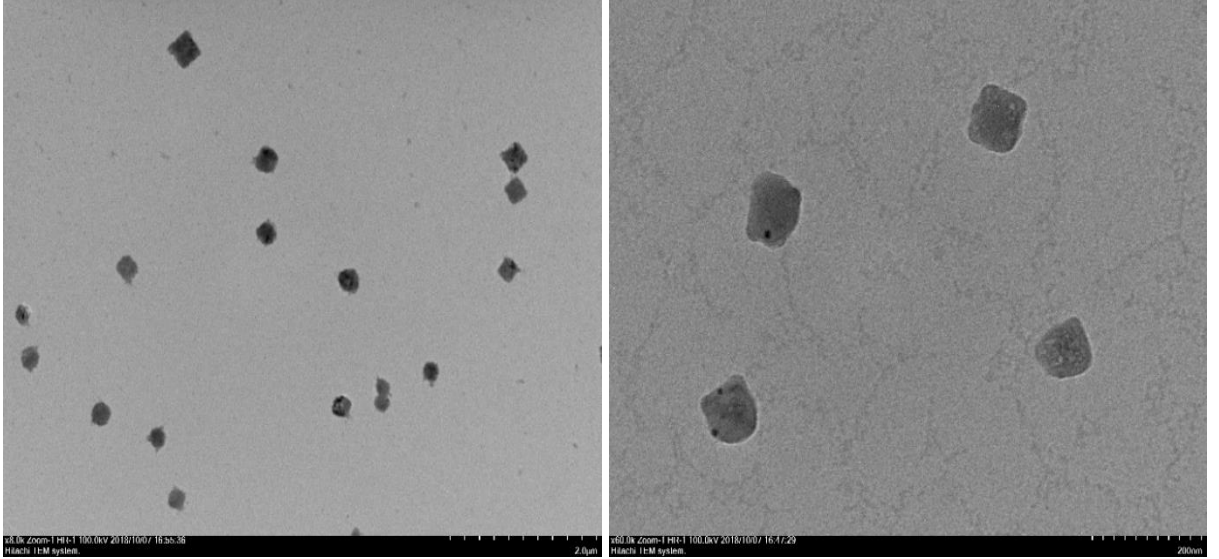
Şekil 73. Müteakip sentez çalışmalarında elde edilen kapsüllerden alınan SEM görüntüleri

Daha sonraki üretimlerde sentezlenen kapsüllerin **Şekil 73**'te yer alan SEM görüntüleri yeniden incelendiğinde üretim yönteminin uygulanmasında yapılan düzenlemelerin olumlu etkisi sağladığı görülmüştür. Ayrıca daha önce ortalama 4 µm çapında elde edilen kapsüllerin yüzey morfolojisindeki deformasyonların büyük ölçüde giderilmiş olmasının yanı sıra ortalama kapsül çapında 1-2 µm küçülme elde edilmiştir.

Bazı SEM görüntülerinde kapsüllerin birbirinden ayrılmadığı bütünleşik gibi görülmesi üzerine bu alanda literatür taraması genişletilmiş ve benzer kapsül SEM görüntüleri bulunduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda **Şekil 74**'te görülen polianilin kapsüllere ilişkin SEM görüntüsünün de çok benzer olduğu görülmüştür.



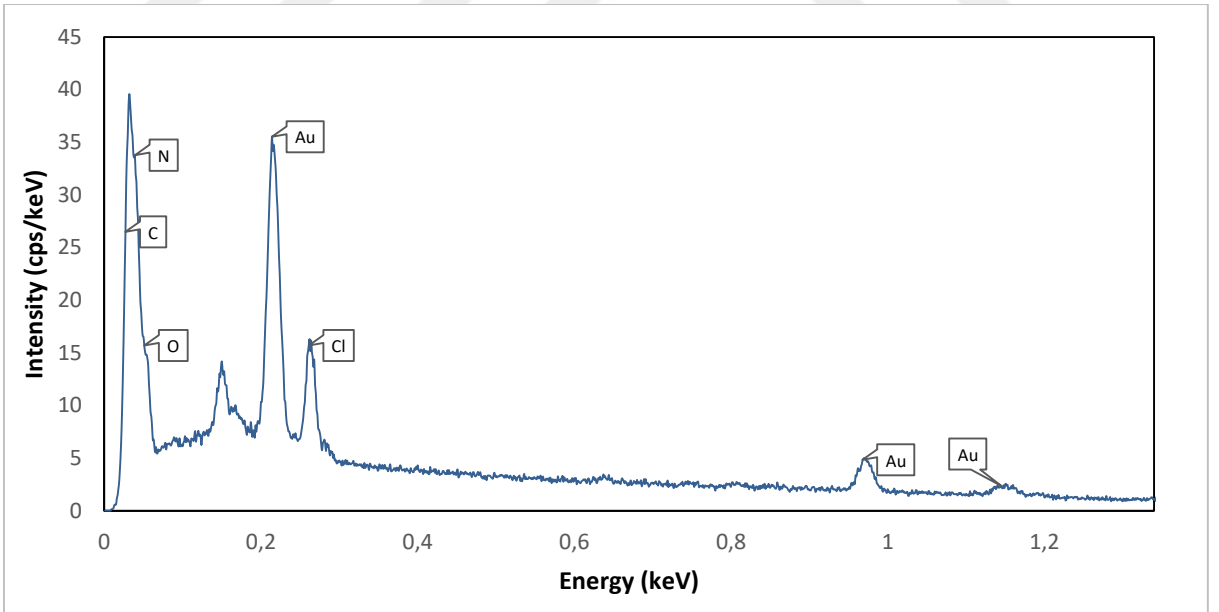
Şekil 74. Kapsüllemiş polianiline ait SEM görüntüsü (Choi, Lee, Kim, & Jhon, 2000)



Şekil 75. kFDM'lere ait TEM analizi görüntüleri

Şekil 75'de yer alan LA/MF kFDM'ye ait TEM mikrograflarından boyutları 1-1,5 mikron ila 3 mikron arasında değişen küçük kapsül kümeleri görülmektedir. Kapsül yapılarının kısmen düzgün, küresel bir şekle sahip olduğu görülebilir. Bazı kümelerin yakınlarda daha küçük, nano ölçek boyutlu kapsüllerin mevcut olduğu da görülebilmektedir.

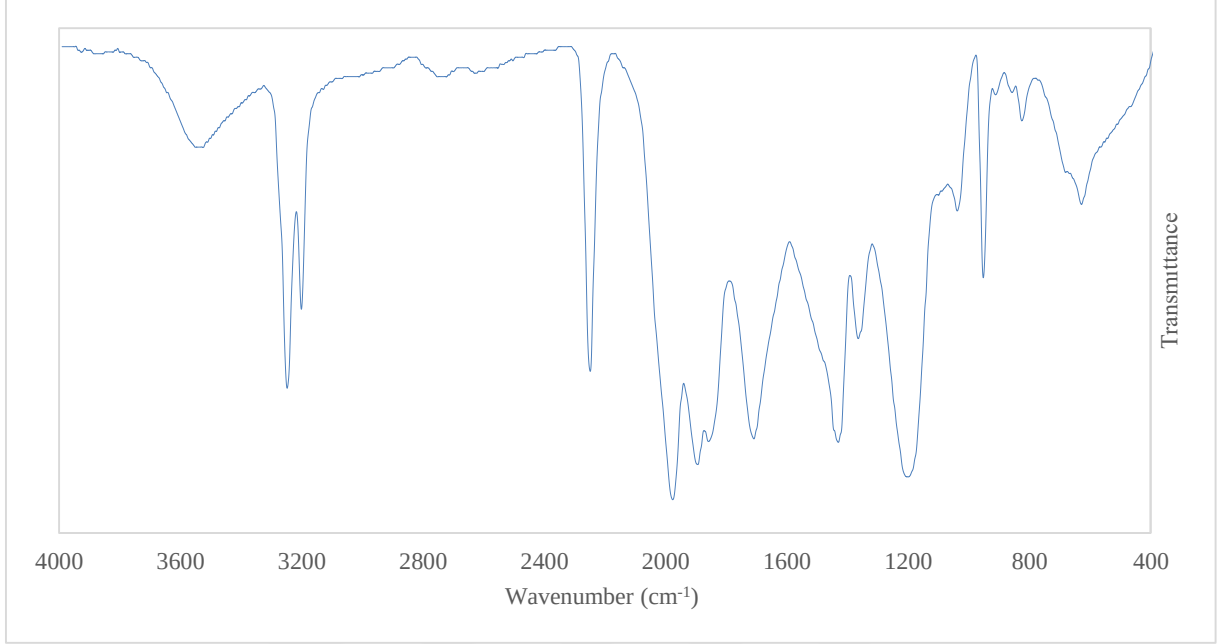
EDX, FTIR ve XRD analizleri



Şekil 76. kFDM'lerin EDX spektrumu

FDM mikrokapsüllerinin kimyasal bileşimleri ayrıca EDX analizi yapılarak incelenmiştir. Şekil 76, kFDM numunesinin EDX analizinden elde edilen atomik yüzdelerin verilerini göstermektedir. C, O ve N elementlerinin bir dizi yoğun sinyali şekilde açıkça gözlemlenmekte ve böylece mikrokapsül yapısının kabuk yapısının varlığına dair kanıt

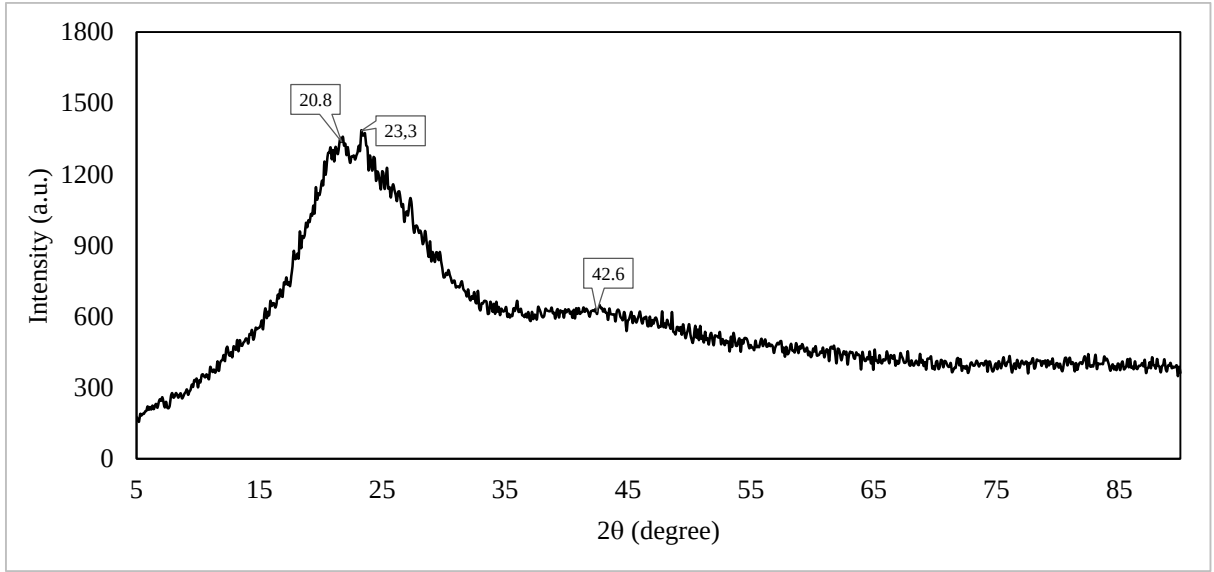
sağlanmaktadır. EDX analizinde, kapsül yapısı sadece birkaç μm iç kısma ulaşacağı için, Laurik Asite ait C ve O elementlerinin varlığı ile EDX grafiğindeki elementlerin sinyallerinin güçlendiği görülmektedir.



Şekil 77. kFDM'lerin FTIR spektrumu

kFDM'lerin FTIR spektrumu incelendiğinde, 1426 ve 1704'teki CN ve NH pikleri, kapsül yapısının karakteristik piklerini göstermektedir. Laurik Asit-melamin mikrokapsül yapısındaki karakteristik pikler ile ilgili olarak, 3300-3700 aralığındaki pikler serbest hidroksil ve karboksil gruplarını gösterirken, NH primer amin grubunun çekme tepe noktası 3100-3500 cm^{-1} arasında, 2700-2800 aralığı CH grubunun alifatik zincirlerini gösterirken, NH bükülme zirvesi 1755 cm^{-1} 'de, C=H grubu 1426 cm^{-1} 'de görülmektedir. 1064-1321 cm^{-1} civarındaki pikler COC yapısına aittir. Yoo, Martinez, and Youngblood (2017) ve Khorasani, Ataei, and Neisiany (2017) tarafından bildirilen karakteristik pikler bulgularımızı desteklemektedir.

XRD yöntemi, her bir kristal yapının, benzersiz atomik dizilimleri nedeniyle X-ışınlarını benzersiz bir şekilde kırması ilkesine dayanır. Her kristal fazında, bu kırınım profilleri, bir parmak izini misali, o kristali tanımlamayı sağlar. XRD analiz yöntemi, analiz sırasında numuneyi bozmaz ve çok küçük numunelerin bile (sıvı, toz, kristal ve film) incelenmesine olanak tanır.

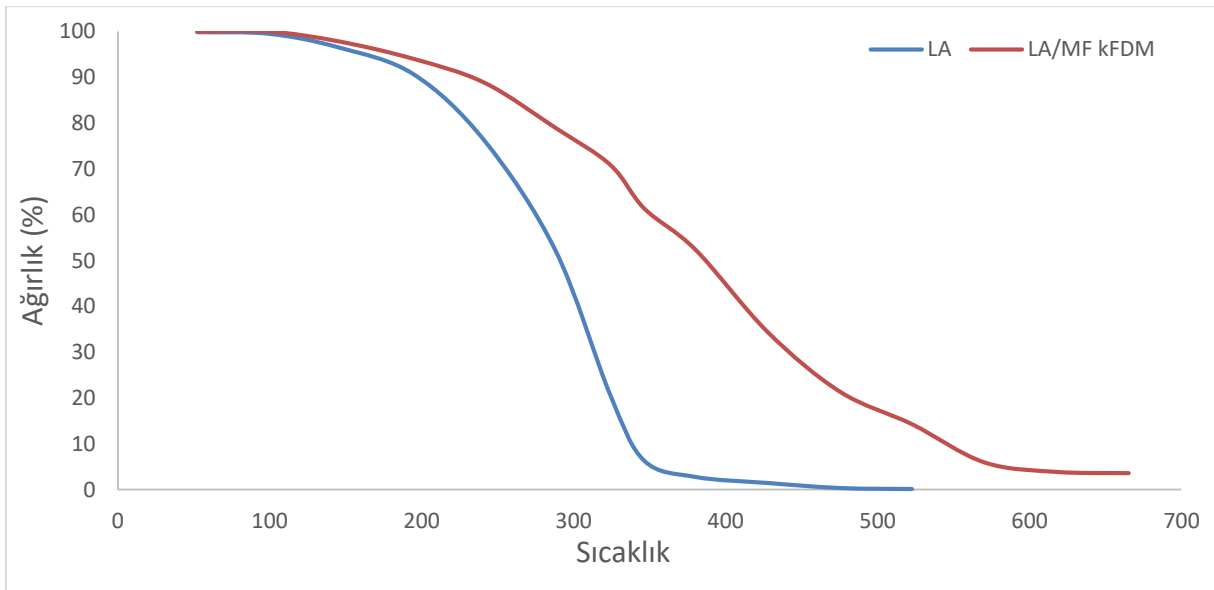


Şekil 78. kFDM XRD spektrumu

Şekil 78’deki XRD spektrumunda kFDM’lerin kristal yapıları incelenmiştir. 20.8, 23.3, 42.6’daki tepe noktaları düzenli kristalleşme gösterir. Özellikle, 20.8 ve 23.3’teki iki keskin kırınım tepe noktası, FDM’nin karakteristik tepe noktalarıdır. 10-30 civarındaki zirveler, sentezlenen FDM yapısının kristal düzlemlerine bağlanabilir.

TG analiz sonuçları

Bu çalışmada sentezlenen mikrokapsüllerin termal kararlılığını belirlemek için, ortam sıcaklığından (~30 °C) yaklaşık 700 °C’ye kadar 5 °C/dk ısıtma hızında, ve salınan tüm gazları uzaklaştırmak ve termo-oksidatif bozunmayı önlemek için nitrojen ortamında 20 mL/dk gaz akışında TG analizi yapılmıştır.



Şekil 79. LA ve LA/MF kFDM için TG termogramları

Şekil 79'da verilen LA ve MF/LA kFDM termogramları, LA için kritik %5'lik kütle kaybının 115 °C'de ve ayrışmanın 195 °C'de gerçekleştiğini göstermektedir. Öte yandan, 155 °C'de %5 MF/LA kFDM kütle kaybı meydana gelmiş ve sırasıyla 241°C ve 324°C'de iki adımda bozunduğu gözlemlenmiştir. LA 300 dereceden sonra neredeyse kalıntı bırakmadan ayrışsa da, azot içeriğinden dolayı MF/LA kFDM'nin %2 civarında kalıntı bıraktığı görülmüştür.

kFDM yoğunluk ölçüm ve hesaplamaları

Sentezlenen kFDM yoğunlukları Denklem 5 ve Denklem 6 ile verilen bağıntılardan ve deneysel olarak ölçülerek hesaplanmıştır.

Çekirdek malzemesinin yoğunluğu (LA),

Tablo 9'da verilen katı ve sıvı fazlardaki yoğunluğunun ortalaması olarak 0,9115 g/cm³ olarak alınmıştır. Fiziksel analizlerden elde edilen bulgulara göre (SEM), ortalama kapsül çapı 2 mikron ve kabuk kalınlığı kabaca 0,06 mikrondur. Bu değerleri Denklem 5'de yerine yazıldığında kFDM kapsül yoğunluğu:

$$\rho_{kFDM,ort} = 0.9115 * 0.6839 + 1.490 * (1 - 0.6839) = 1.0944 \quad (78)$$

Denklem 6'da yerine yazıldığında ise:

$$\rho_{kFDM,ort} = \left(\frac{1.88}{2.0}\right)^3 \times \left(\frac{0.9115}{0.6839}\right) = 1.1070 \quad (79)$$

olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan değerlerin yanı sıra, kapsüllerin kütle yoğunluğu, Merck'ten elde edilen ve sertifikalı yoğunluğu 0.9982 g/mL olan saf su hassas bir teraziye yerleştirilmiş ölçekli bir behere 20 mL doldurulup üzerine kapsüller eklenerek yoğunluk ölçümü yapıldı. Laboratuvar koşullarında, tara 64.1150g idi. Hassas terazi, darası alınarak sıfırlandı ve 20mL saf su eklendikten sonra, hassas terazi ekranda ağırlık 19.964g olarak okundu, böylece ölçümdeki su seviyesinin tam olarak 20mL'de olduğu doğrulandı. Sabit bir kamera, su seviyesini ve 20mL ölçek çizgisi işaretlenerek hassas bir şekilde konumlandırıldı. Daha sonra su seviyesi 25mL'ye yükselene kadar suya mikrokapsüller eklendi, bu durumda hassas terazinin ekranında 25.4405g okundu. Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra, çekirdeği katı fazda bulunan ve suya eklenen kapsüllerin toplam ağırlığının 5.4765g olduğu belirlenmiştir. Buna göre, suya katılan kapsüllerin yoğunluğu aşağıdaki denklemden:

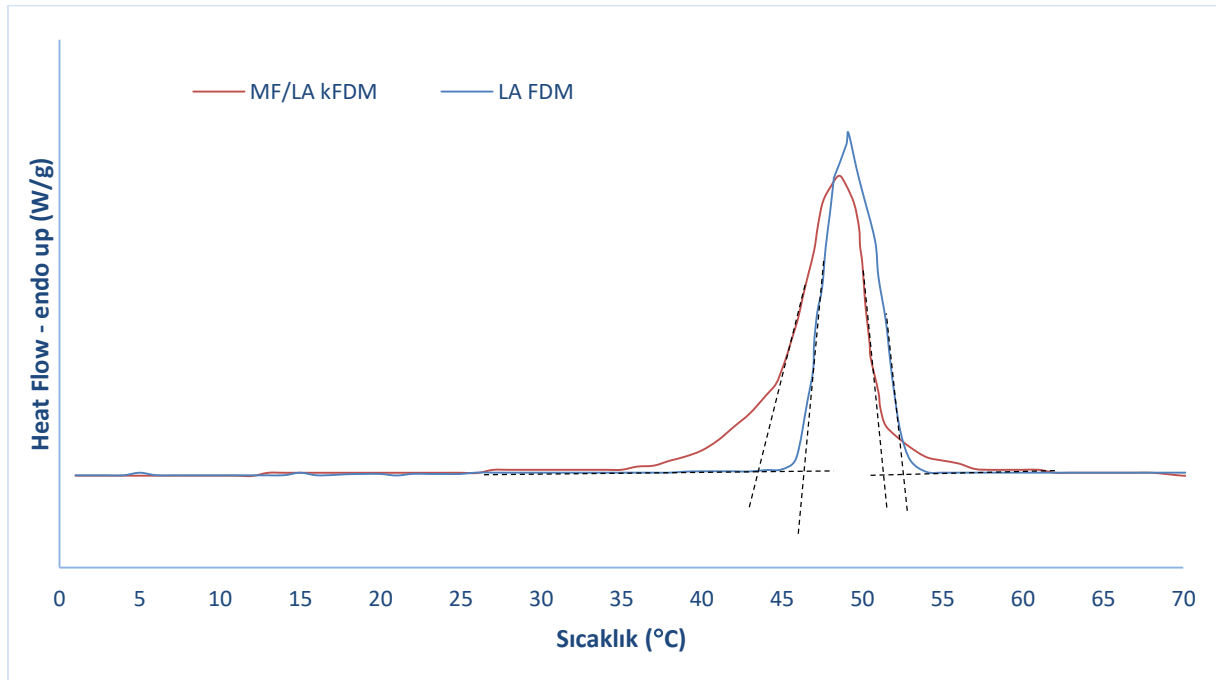
$$\rho_{kFDM} = \frac{m_{kFDM}}{V_{kFDM}} = \frac{5.4765}{5} = 1.0953 \quad (80)$$

olarak hesaplanmıştır.

DSC analiz sonuçları ve kapsüleleme oranı hesaplamaları

Sentezlemede kullanılan LA FDM ve elde edilen kFDM'ler 20 mL/dak debide 0°C ile 70 °C arasında 5°C/dakika ısıtma hızında bir azot atmosferi altında DSC analizi yapılmıştır. DSC analizinden elde edilen grafik **Şekil 80**'de verilmiştir.

Literatürde raporlanan değerlerle tutarlı olarak, LA'nın erime sıcaklığı aralığı 317K-323K iken, MF/LA kapsüllerinin erime aralığı 316K-319K olarak belirlenmiştir. **Şekil 80**'de gösterilen tepe noktalarının altında kalan alan, erime gizli ısısını (ΔH_m) vermektedir ve FDM ve kFDM için sırasıyla 183.2 J/g ve 125.29 J/g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 80. MF/LA kFDM'nin DSC grafiği

kFDM'nin erime entalpisinin çekirdek FDM'nin erime entalpisine oranı olarak tanımlanan ve kapsülün ne kadarının çekirdek malzemenin ne kadarının kabuk malzemesinden oluştuğunu ifade eden kapsüleleme oranı (ER), Denklem 3 uyarınca:

$$ER = \left(\frac{125.29}{183.20} \right) = 0.6839 \quad (81)$$

olarak elde edilmiştir.

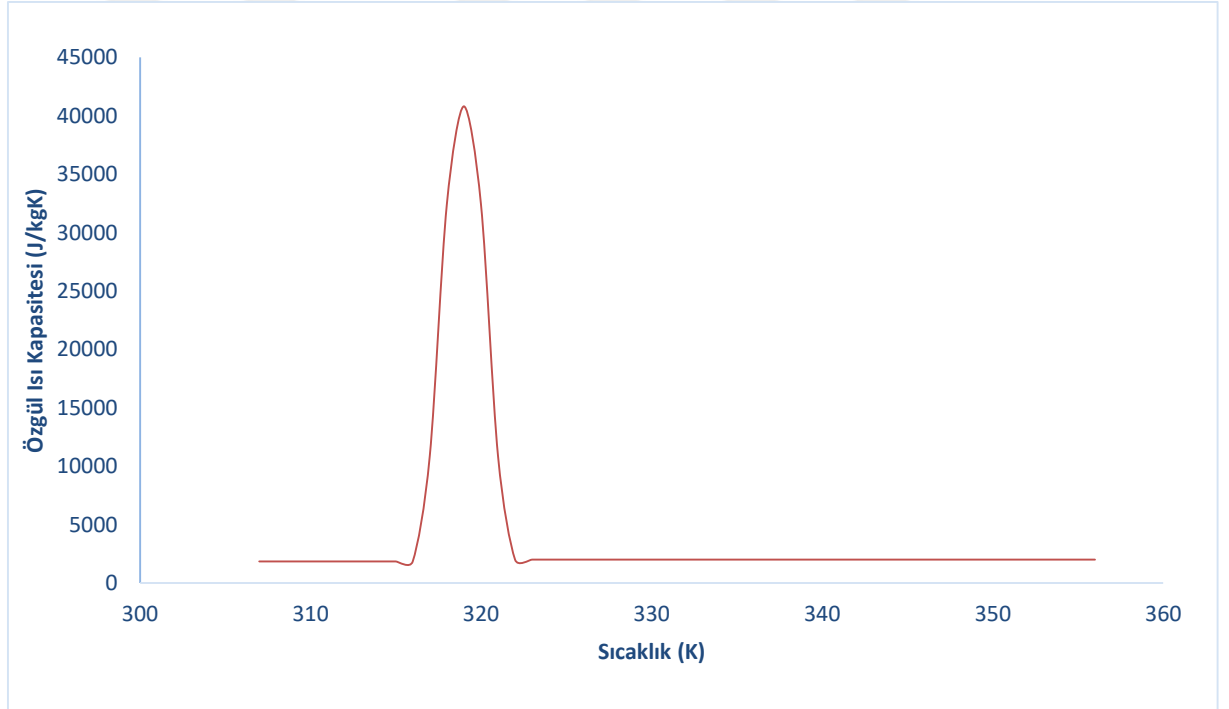
ER bilindikten sonra, kapsüllerin bileşimi belirginleşir. Bu bilgiler ışığında, bizim çalışmamızda kapsülün sadece yüzde 68.39'u LA'dan oluşmaktadır. Diğer bir deyişle, (1-ER), yani 0.3161, kabuk malzemesinin kapsül kütlesi içindeki kesrini ifade etmektedir.

Özgöl ısı kapasitesi sonuçları

Yapılan DSC analizi sonuçlarına göre, kFDM'nin erime entalpisi 125.290,48 J/kg olarak elde edilmiştir. Bu değer FDM'nin DSC analizinde ise 183.200 J/kg olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre $ER = 0,6839$, ve çekirdek FDM'nin sıvı fazda olduğu durumda $C_{p,sıvı} = 2018,789$ J/kgK ve çekirdeğin katı olduğu durumda ise $C_{p,katı} = 1861,492$ olarak elde edilmiştir.

Buna göre kFDM'lerin özgül ısı kapasiteleri, faz değişim aralığı dışında kalan, katı ve sıvı bölgelerde sırası ile 1861,492 ve 2018,789 J/kgK iken, DSC analizine göre faz değişim aralığındaki C_p değeri 127450,773 J/kgK olarak belirlenmiştir.

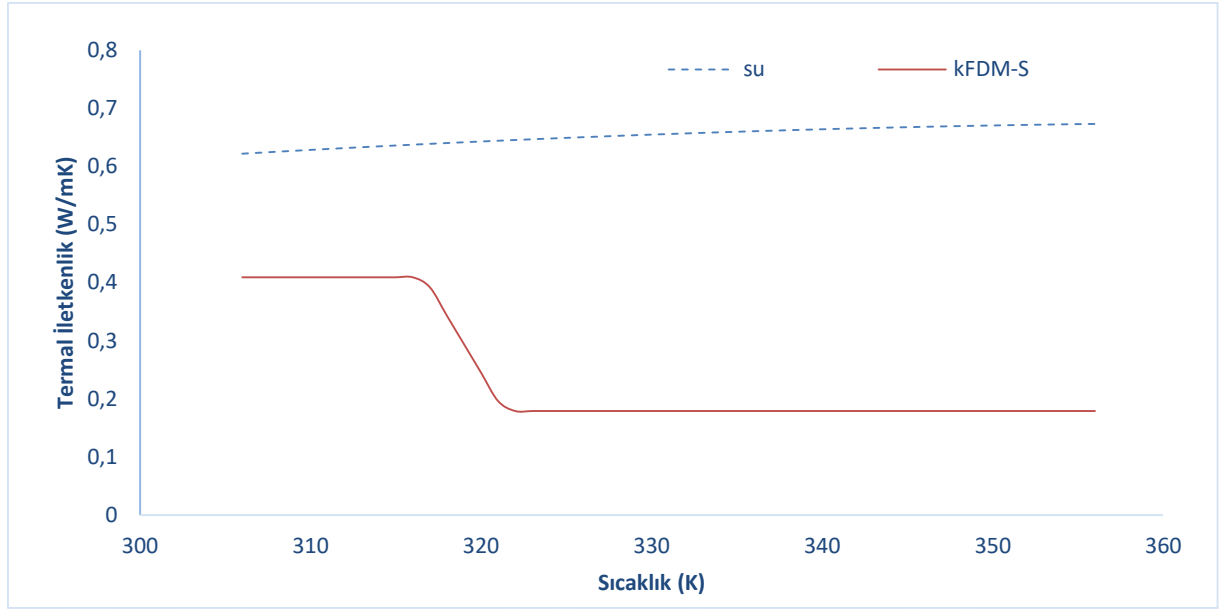
Bu veriler ışığında kFDM'nin C_p grafiği Denklem 15 ile elde edilen değerler üzerinden aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.



Şekil 81. Elde edilen kFDM'lerin C_p değerinin sıcaklıkla değişimi

Termal iletkenlik hesaplamaları

kFDM'lerin termal iletkenliği, Decagon KD2 Pro gibi bir termal özellik analizörü kullanılarak ölçülebilir veya Denklem 19 ile verilen kompozit küre yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilir. Denklem 19 ile hesaplanmış termal iletkenlik değerleri Şekil 82'de verilmiştir.



Şekil 82. Suyun termal iletkenliğine karşı kFDM'nin termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi
Buna göre kFDM'nin termal iletkenlik değeri FDM'nin katı fazda olduğu durumda 0,4090W/mK sıvı fazda olduğu durumda ise 0,1789W/mK olarak hesaplanmıştır.

Genel sonuçlar

kFDM karakterizasyonu ile ilgili olarak buraya kadar yapılan tüm analiz ve hesaplamalar sonucunda elde edilen özellikle **Tablo 21**'de sunulmuştur.

Tablo 21. Karakterize Edilen FDM ve kFDM Bilgileri

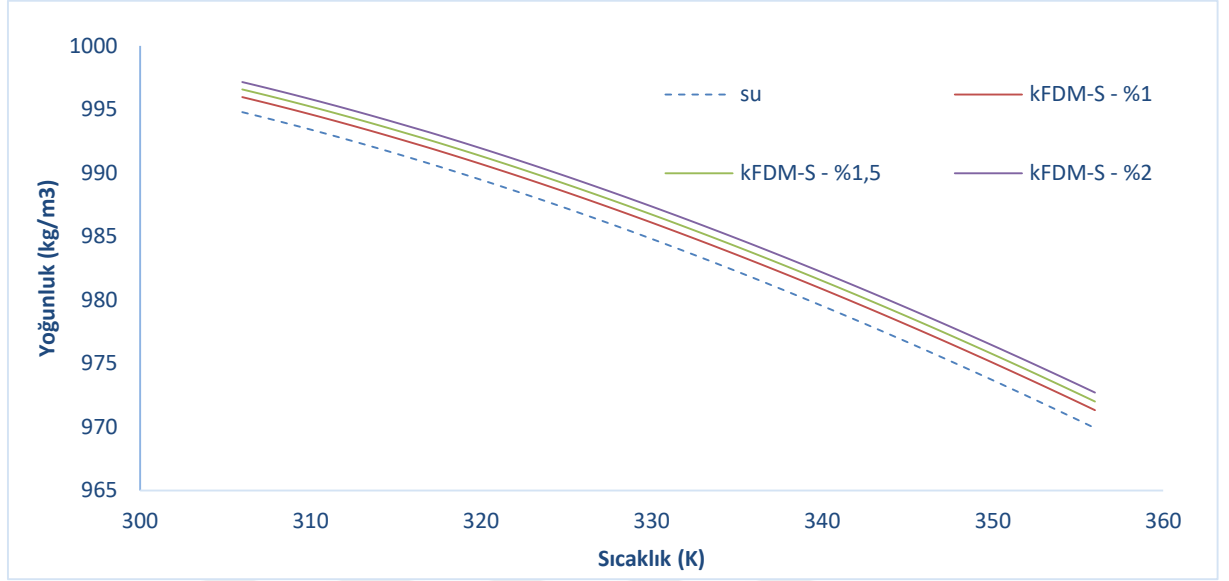
Özellik	FDM	kFDM
Katılaşma Sıcaklığı (K)	317	316
Sıvılaşma Sıcaklığı (K)	323	319
Faz Değişim Entalpisi (J/kg)	183200	125290
Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK)	2180	2018.79
Termal İletkenlik (W/mK)	0.1921	0.1784
Yoğunluk (kg/m ³)	883 (katı) – 940 (sıvı)	1095.3 (ölçülen) / 1094.4 (hesaplanan)
Viskozite (Pa.s)	0,008 (sıvı)	-
Kapsülleme Oranı	-	68,39

kFDM-S Karakterizasyonu

kFDM-S yoğunluğu

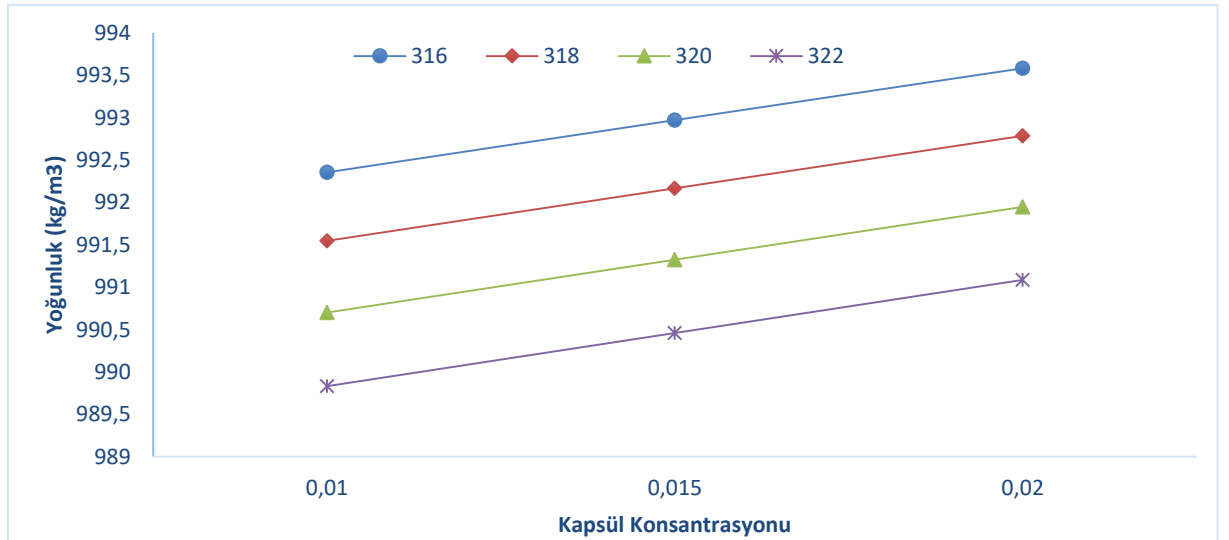
Bununla birlikte, sentez işlemi, FDM'nin sıvı fazda olduğu ve kabuk içindeki faz değişiminin, hacim değişimi FDM'nin fazından bağımsız olan kapsül kabı içinde gerçekleştiği bir sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden, FDM'nin yoğunluğunu sıvı yoğunluğu olarak almak kabul

edilebilir. Bu bakımdan, kFDM-S yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi, yalnızca TA'nın sıcaklıkla olan yoğunluk değişimine ve kabuk malzemesi MF'nin termal genleşme katsayısına bağlıdır.



Şekil 83. Kapsül konsantrasyonuna karşı farklı sıcaklıklarda bulamacın kütle yoğunluğunun değişimi

TA'nın yoğunluk değişimi ve MF'nin termal genleşme katsayısı dikkate alındığında, LA'nın katı sıcaklığının 10K altında ve sıvının 25K üzerinde bir aralığa karşılık gelen 306K ve 356K sıcaklık aralığında bulamacın kütle yoğunluğunun değişimi dikkate alındığında LA sıcaklığı, farklı kapsül konsantrasyonları başına **Şekil 84**'te sunulmuştur.

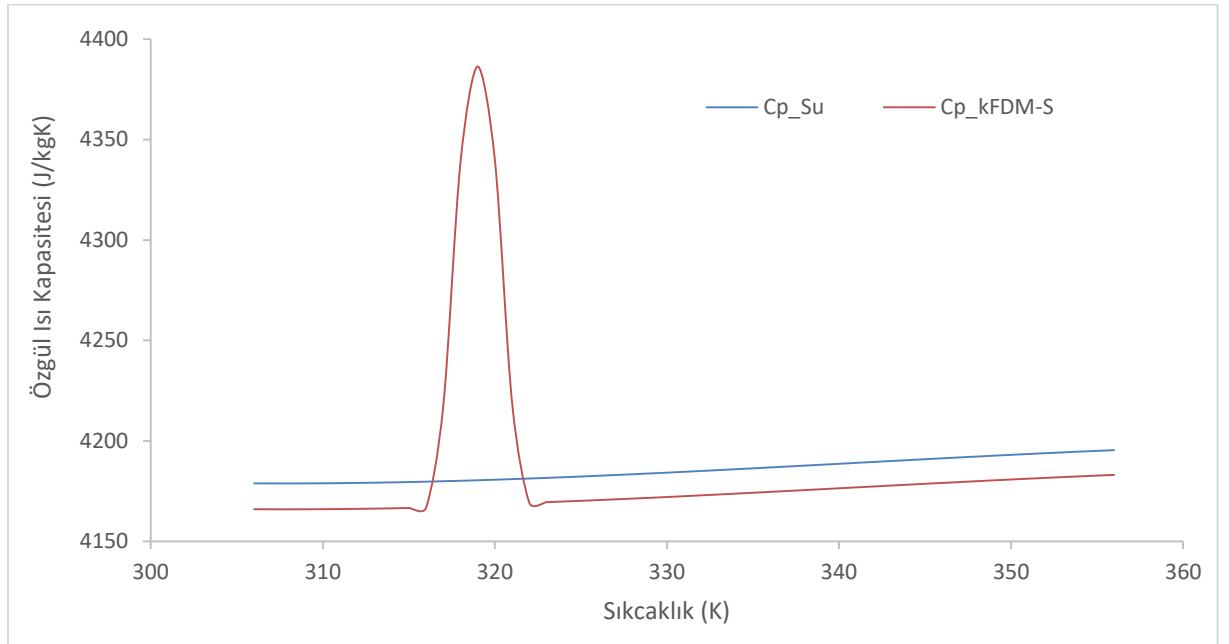


Şekil 84. Farklı kapsül konsantrasyonları için bulamacın kütle yoğunluğunun sıcaklığa karşı değişimi

Şekilde görüldüğü gibi, çok az bir miktarda olmasına rağmen MF'nin 1,5 kat daha yüksek yoğunluğu nedeniyle kFDM bulamacının göreceli yoğunluğu TA'ninkinden daha yüksektir.

Özgül ısı kapasitesi

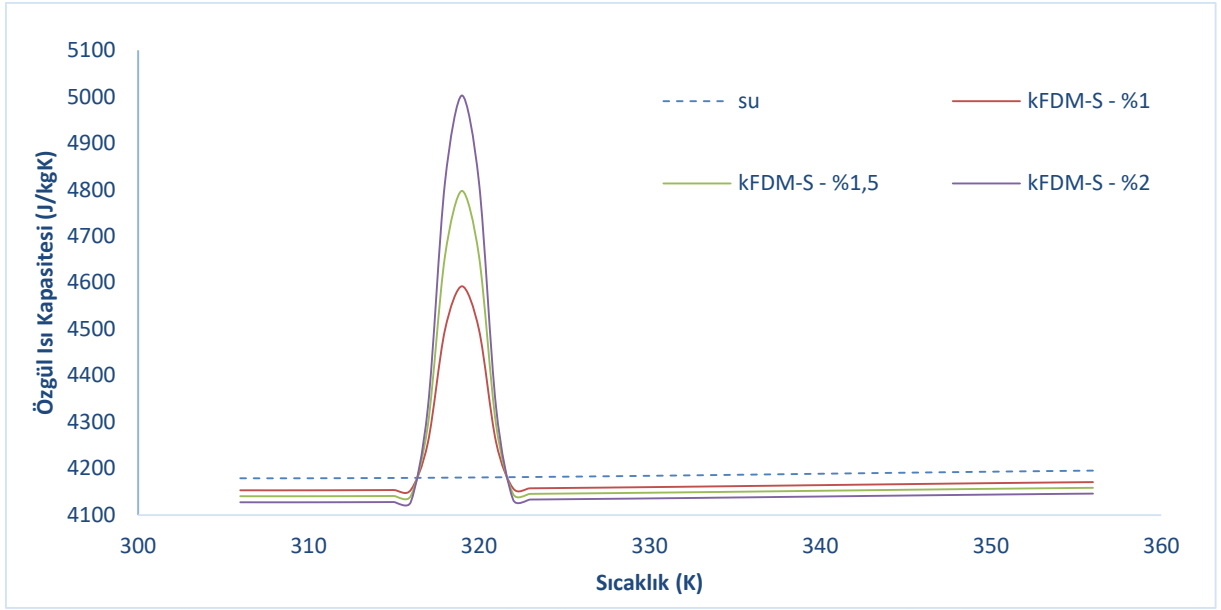
Bir kFDM-S'nin etkin özgül ısısını belirlemek için öncelikle kapsülün özgül ısı kapasitesi belirlenmelidir. Karışımların özellikleri karışımı oluşturan sıvıların karışım içindeki kesirleri ile doğru orantılı olarak, bileşenlerin özelliklerine bağlı olarak elde edilir. Tez çalışması kapsamında sentezlenen ve karakterizasyonu yapılan kFDM'lerin özgül ısıları, belirlenmiş ve yukarıda sunulmuştur.



Şekil 85. kFDM-S ile Suyun özgül ısılarının karşılaştırılması

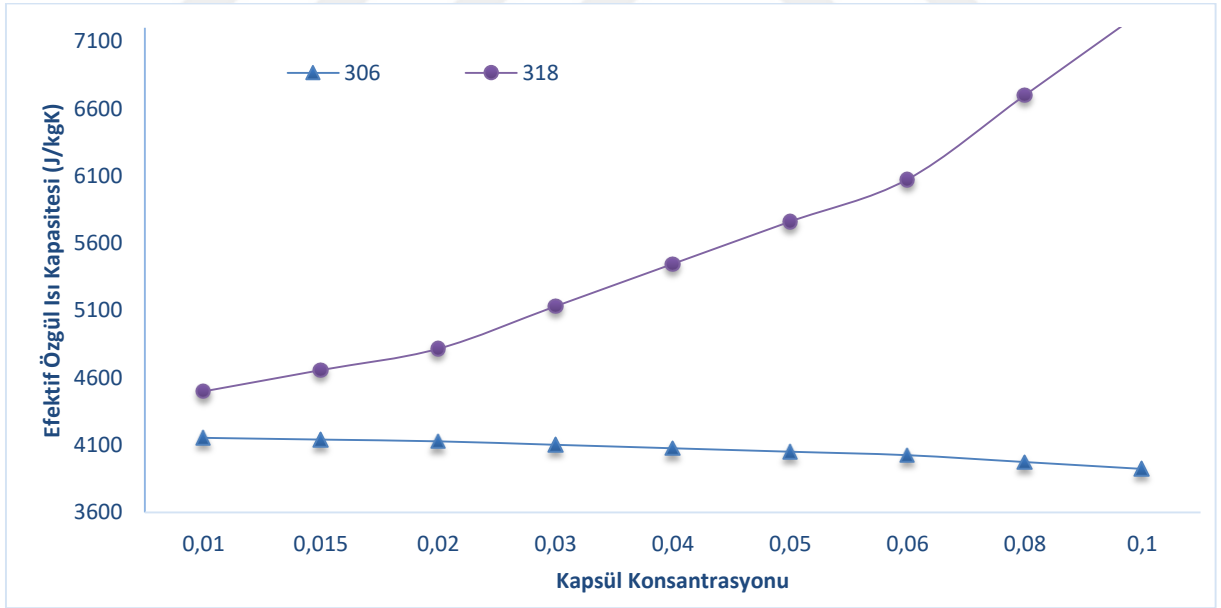
Şekil 85 üzerinde de görülebileceği üzere normalde, FDM'nin ve kFDM'nin özgül ısı kapasiteleri sudan küçüktür ancak faz değişimi sırasında sabit sıcaklıkta çekilen gizli ısı C_p üzerine dağıtılması ile efektif özgül ısı kapasitesi faz değişim sıcaklığı aralığında ani bir artış göstermektedir.

Buna göre, daha önce belirlenen %1, %1,5 ve %2'lik hacimce konsantrasyonlara sahip olan kFDM-S'lerin özgül ısılarının sıcaklıkla değişimi Şekil 86'da görülmektedir.



Şekil 86. Su ve %1, %1,5 ve %2'lik kFDM-S'lerin özgül ısılarının sıcaklıkla değişimi

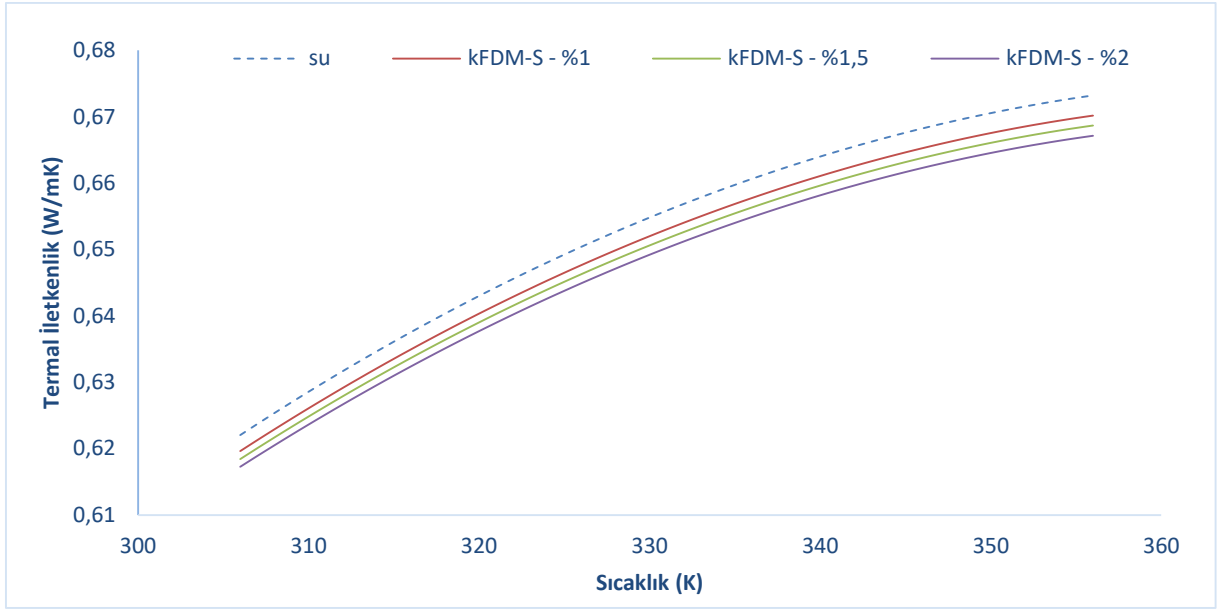
Görüldüğü gibi faz değişimi gizli ısılarının kFDM-S'nin özgül ısı kapasitesi üzerindeki etkisi önemli derecede büyüktür. Bu etki doğrusallaştırıldığında, farklı hacimce konsantrasyonlardaki kFDM-S'nin efektif özgül ısı kapasitesinin, faz değişim bölgesinin içinde ve dışında olmasına göre, **Şekil 87** ile gösterildiği gibi değişmektedir.



Şekil 87. Doğrusallaştırılmış efektif özgül ısı kapasitesinin kFDM konsantrasyonu ile değişimi

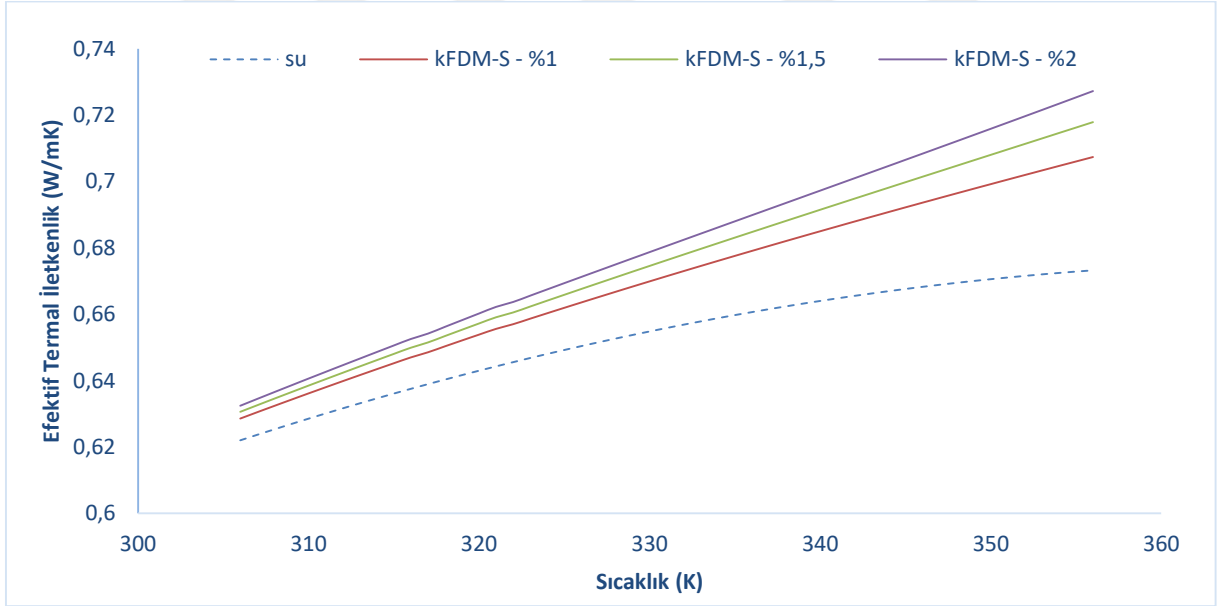
Termal iletkenlik

Termal iletkenlik durağan ve akış durumları için ve Brownian hareketlerinin etkileri dikkate alınarak Denklem 26, Denklem 28 ve Denklem 29 ile ayrı ayrı hesaplanmış ve **Şekil 88**, **Şekil 89**, ve **Şekil 90**'da ayrı ayrı gösterilmiştir.



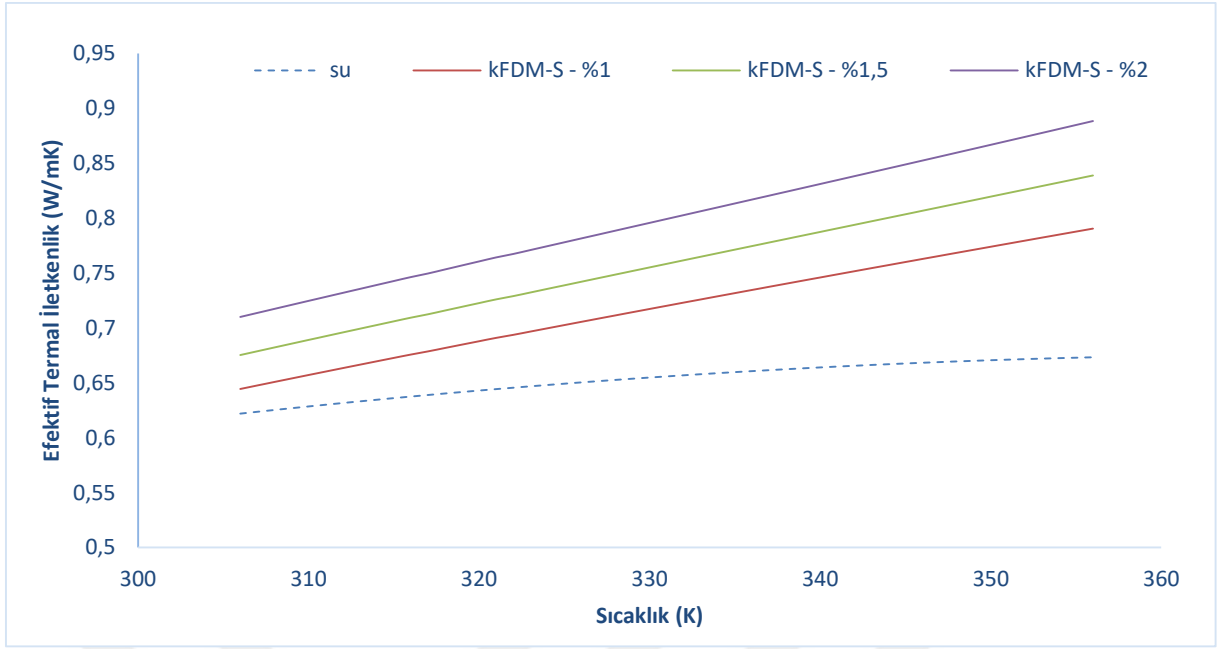
Şekil 88. Su ve kFDM-S'nin durağan termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi

Durağan halde, kFDM'nin düşük termal iletkenliğinden kaynaklı olarak sudan daha düşük bir termal iletkenliğe sahip olmakla birlikte, akış durumunda parçacık etkisinden kaynaklı olarak kFDM-S'nin efektif termal iletkenliği sudan daha yüksek düzeyde gerçekleşmektedir.



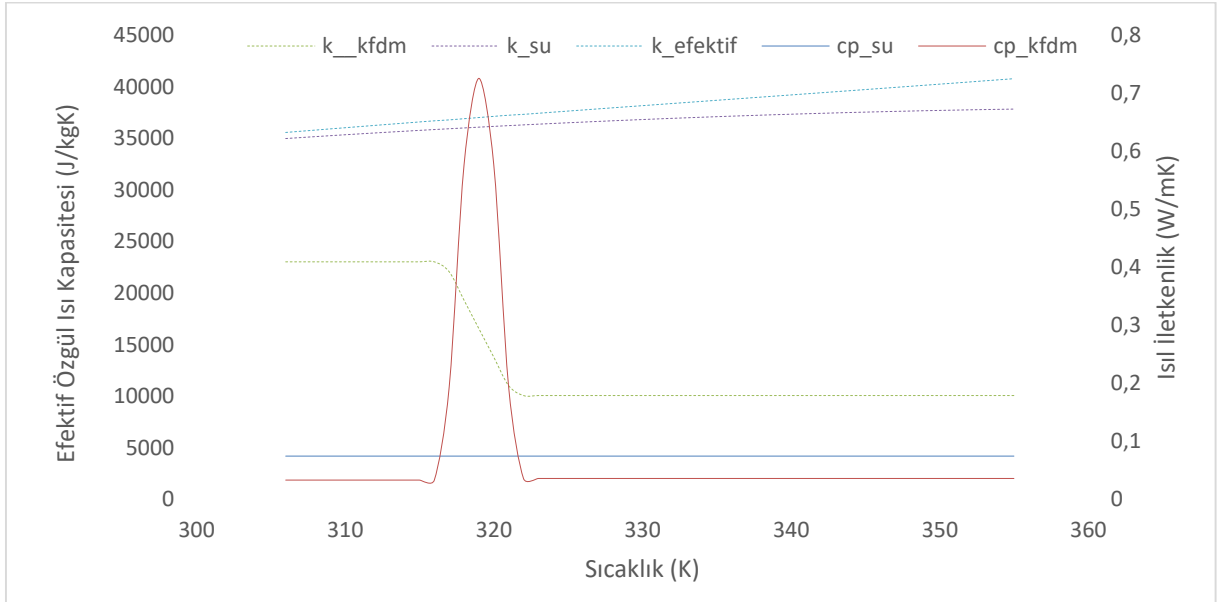
Şekil 89. Su ve kFDM-S'nin efektif termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi

Akışkan içinde hareket eden parçacıkların sayısı ile orantılı olarak değişen Brownian etkileri TA'nın termal iletkenliğinden daha fazla bir iyileşme sağlayabilir. Ancak viskozitedeki artışlar ve gerekli pompalama gücü dikkate alındığı için genellikle %5'in altında bir partikül içeriği ile çalışılmaktadır. Bu da, %10 ila %30 arasında bir iyileşme sağlamaktadır.



Şekil 90. Su ve kFDM-S'nin Brownian etkileri altında efektif termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.

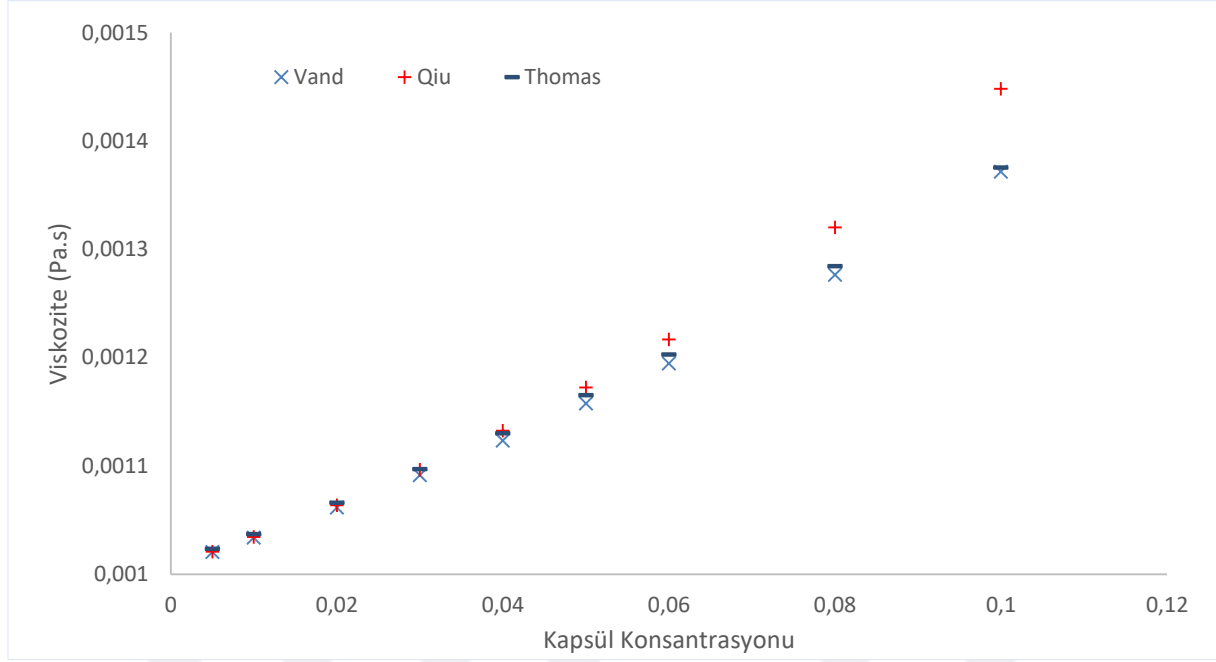
Bu çalışma kapsamında sentezlenen MF/LA kFDM-S'nin efektif termal iletkenliği **Şekil 90** ile gösterildiği gibi hesaplanmıştır. 318K sıcaklık değeri içinde suyun termal iletkenlik değeri 0,640322W/mK iken %2 kFDM içeren kFDM-S'nin aynı sıcaklıkta Brownian etkilerini içeren efektif termal iletkenliği 0,753273 olarak hesaplanmıştır. Buna göre kFDM ile sağlanan termal iletkenlik iyileştirmesi %17,6 seviyesinde gerçekleşmiştir.



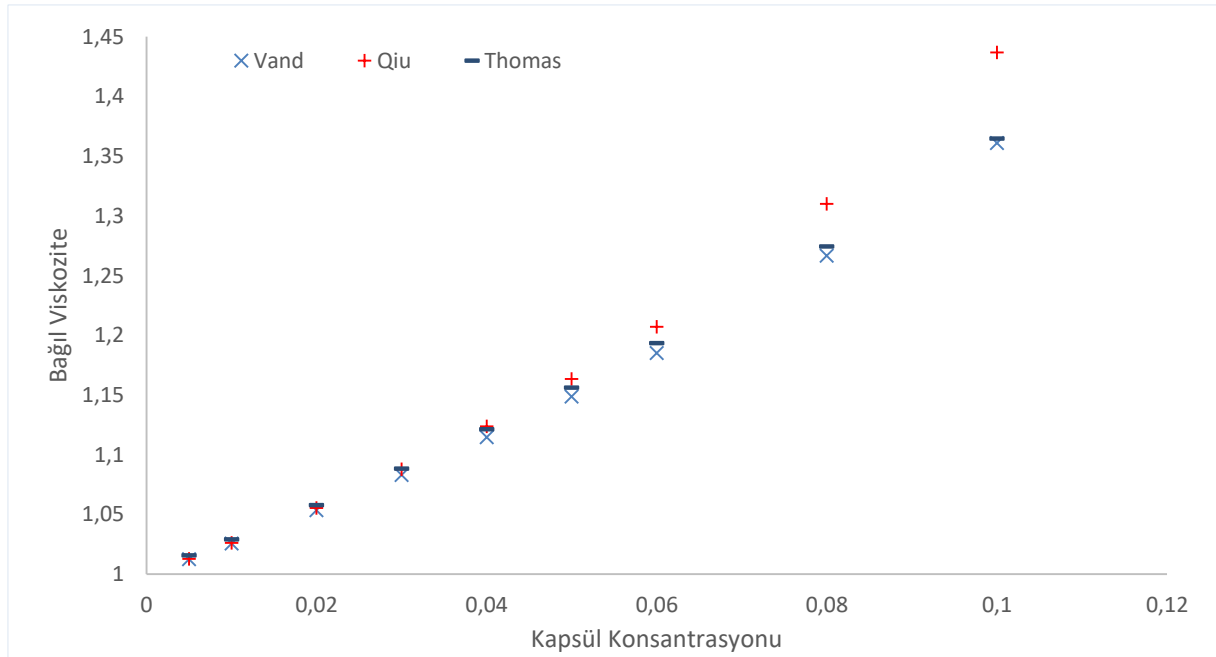
Şekil 91. Su ile karşılaştırmalı olarak MF/LA kFDM'nin özgül ısı kapasitesi ve %5 MF/LA kFDM-S'nin termal iletkenliği

Viskozite

kFDM-S'nin hem viskozimetre ile ölçümleri yapılmış hem de Denklem 39, Denklem 40 ve Denklem 41 ile elde edilen değerleri referans amaçlı olarak karşılaştırılmıştır. Ancak kFDM-S yüksek uyum bölgesi içinde kalan düşük hacim konsantrasyonlarında olduğu için birbirine oldukça yakın değerler elde edilmiştir.

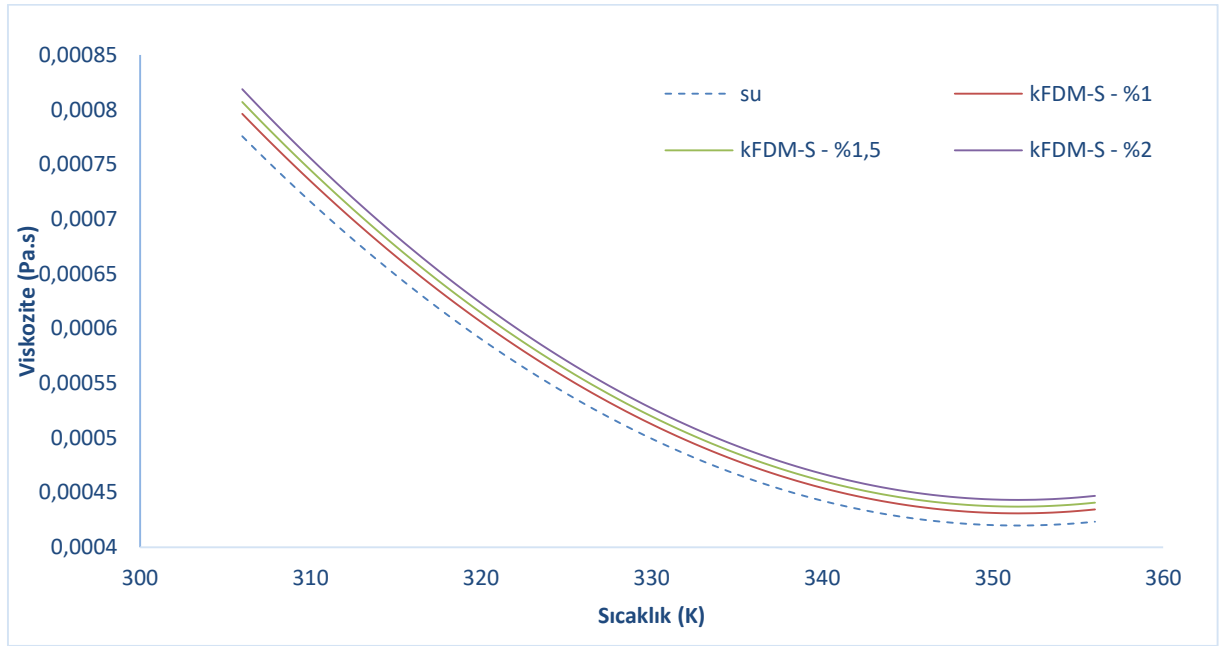


Şekil 92. Kapsül konsantrasyonuna karşı 293K'da MF/LA kFDM-S için viskozite modellerinin değerleri



Şekil 93. Kapsül konsantrasyonu ile 293K'de MF/LA kFDM-S'nin bağlı viskozitesi

Bu çalışma için üç korelasyonun sonuçları mutlak ve bağıl viskozite olarak **Şekil 92** ve **Şekil 93**'te sunulmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi, Thomas (1965) tarafından önerilen korelasyon, Vand (1945) korelasyonunun daha yüksek konsantrasyonlar için daha iyi bir uyum sağlamayı amaçlayan bir varyantıdır. Tüm korelasyon değerlerinin deneysel ölçümlerle iyi bir uyum içinde olmasına rağmen, Vand korelasyonunun ticari kFDM'ler için düzeltilmiş bir şekil faktörü ile güncellenmiş formu olan Qiu et al. (2019) korelasyonunun en yüksek uyumu gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, deneysel ve teorik değerler arasındaki fark viskozimetrenin hata payı içinde kalacak derecede küçük olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 94. MF/LA kFDM-S viskozitesinin sıcaklıkla değişimi

Çalışmada kullanılan %1, %1,5 ve %2 konsantrasyonlara sahip kFDM-S'lerin ve suyun viskozitelerinin sıcaklıkla değişimi **Şekil 94**'te görülmektedir.

kFDM-S esaslı PVT Sistemin Deneysel Analizi

Tez çalışmasının temel amacı kFDM-S ITA'ların PVT-sıvı sistemlerde en yaygın şekilde kullanılan ITA olan suya göre performansının genel anlamda değerlendirilmesidir. Bu kapsamda kFDM-S ITA'nın sağladığı verim artışı ile birlikte sistemde neden olduğu basınç düşümleri ve buna bağlı olarak artan pompalama gücünün su ile elde edilen aynı değerlerle karşılaştırılması gereklidir.

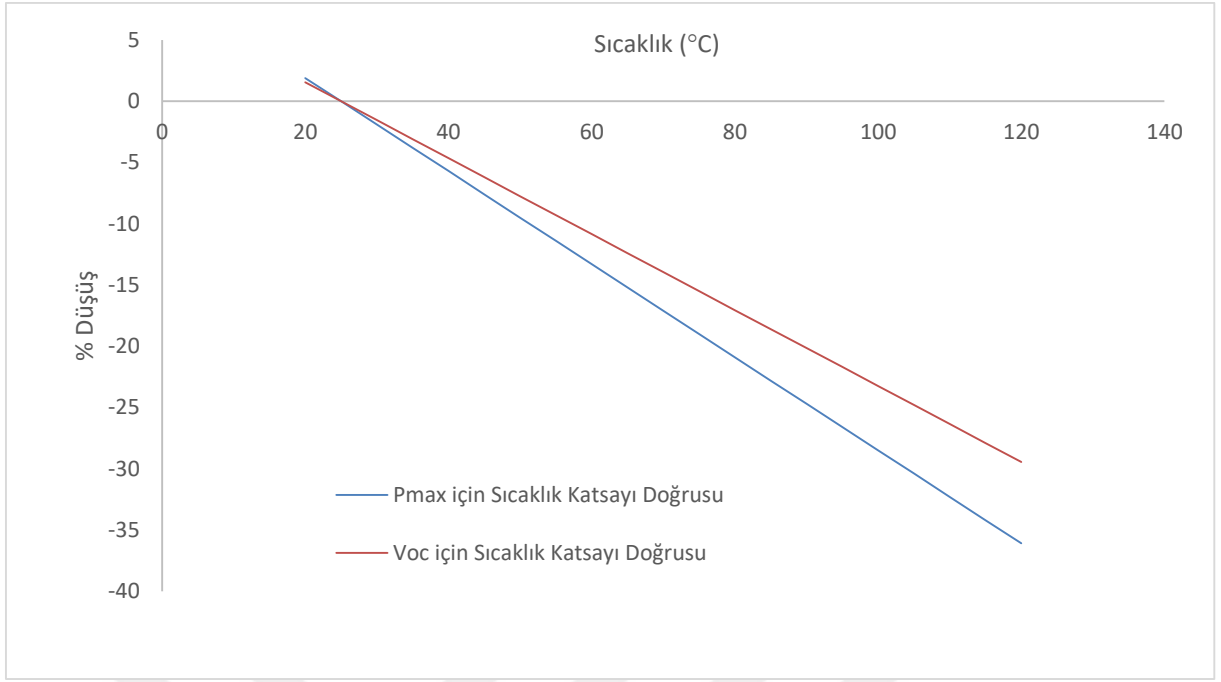
Bunun için **Tablo 20**'de verilen deney programı takip edilmiş ve öncelikle yalın olarak yaklaşık 20°C ortam sıcaklığında bulunan PV sisteminin 800 ve 1000W/m² güneş ışıınımlı altındaki hücre sıcaklığı, gerilim, güç ve buna bağlı olarak elektriksel verimi belirlenmiştir.

Tablo 13'te verilen PV paneline ait teknik bilgilere bakıldığında, P_{max} için sıcaklık katsayısının, $-0,38 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ olarak belirtildiği görülmektedir. Buna göre PV panelinin reel hücre sıcaklığının test koşullarının ortam sıcaklığından her bir derece sapma meydana gelmesi durumunda PV panelin ürettiği güç sapma ile ters orantılı olarak $0,38$ değişim göstermektedir. Buna göre, PV panelinin maksimum elektriksel verimin elde edildiği 25°C ortam sıcaklığından başlayarak, panel üzerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değeri olan $101,25^{\circ}\text{C}$ 'yi de içine alacak şekilde her 5°C sıcaklık farkı için meydana gelecek verim düşüşleri hesaplanmış ve **Tablo 22**'de sunulmuştur.

Tablo 22. PV Panelin V_{oc} ve P_{max} Değerlerinin Katalog Verilerine Göre Sıcaklıkla Değişimi

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	V_{oc} % Değişim	V_{oc}	P_{max} % Değişim	P_{max}
20	1,55	23,579910	1,903	47,893
25	-0,003	23,219280	-0,003	47,000
30	-1,55	22,859370	-1,903	46,107
35	-3,10	22,499460	-3,803	45,214
40	-4,65	22,139550	-5,703	44,321
45	-6,20	21,779640	-7,603	43,428
50	-7,75	21,419730	-9,503	42,535
55	-9,30	21,059820	-11,403	41,642
60	-10,85	20,699910	-13,303	40,749
65	-12,40	20,340000	-15,203	39,856
70	-13,95	19,980090	-17,103	38,963
75	-15,50	19,620180	-19,003	38,070
80	-17,05	19,260270	-20,903	37,177
85	-18,60	18,900360	-22,803	36,284
90	-20,15	18,540450	-24,703	35,391
95	-21,70	18,180540	-26,603	34,498
100	-23,25	17,820630	-28,503	33,605
105	-24,80	17,460720	-30,403	32,712

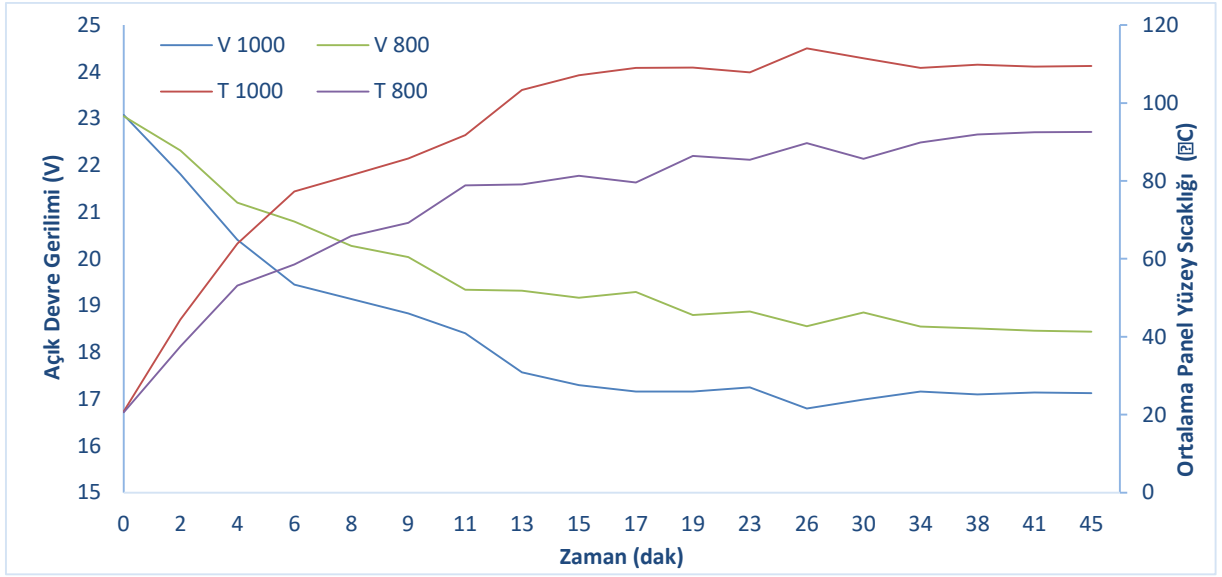
PV modülünün katalog değerlerine göre elektriksel güç ve açık devre geriliminin sıcaklıkla değişimi, yani Güç sıcaklık katsayısı ve Gerilim sıcaklık katsayısı değerlerinin grafiği **Şekil 95**'te verildiği gibidir.



Şekil 95. Test koşulları dışında PV modülünün güç ve açık devre geriliminin sıcaklıkla değişimi

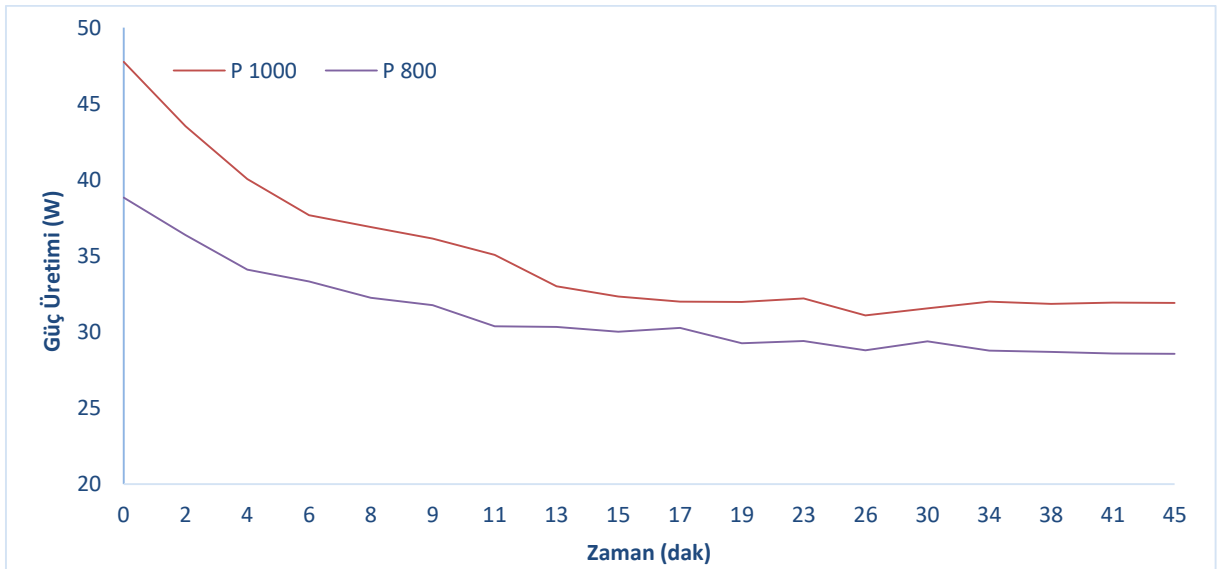
Görüldüğü üzere güç doğrusunun eğimi, gerilim doğrusunun eğiminden daha büyüktür. 800 ve 1000W/m² güneş ışınlamı altında PV modülünün hücre sıcaklığının zamanla değişimi **Şekil 96**'da verilmiştir. Yüzey sıcaklıkları panel arkasına yerleştirilmiş olan ve konumları **Şekil 59**'da verilmiş olan 12 ısıl-çift ile sürekli olarak okunan sıcaklık değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca farklı zamanlarda panel yüzeyinden farklı noktalardan lazer sıcaklık ölçüm cihazı ile alınan sıcaklık ölçümlerinin ortalamaları da kaydedilmiş ve yüzeyden ölçülen sıcaklıklar ile panel arkasından okunan sıcaklıklar arasında 2 ila 3 derece sıcaklık farkı olduğu gözlemlenmiştir. Bu sıcaklık farklarının yüzeyden ısı alıcı plakaya olan ısı iletimindeki gecikme ve kayıplardan kaynaklı ve makul olduğu değerlendirilmiştir. Netice itibari ile hücre sıcaklığı ile ısı alıcı plaka sıcaklıkları kıyaslandığında ortalama hücre sıcaklığının, ortalama plaka sıcaklığından yaklaşık 3 derece daha sıcak olduğu kabul edilebilir. Otuz beşinci dakikadan sonra sıcaklık değerlerindeki artışın marjinal olarak gerçekleştiği ve 40'ıncı dakikadan sonra nispeten kararlı hale geldiği ve 45'dakikadan sonra değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle tüm deneylerde ölçüm alınan süre 45 dakika olarak sınırlandırılmıştır.

800 ve 1000W/m² güneş ışınlamı altında güneş panelinin yüzey sıcaklığı, elektriksel güç üretimi ve açık devre gerilimi başlangıç sınır şartlarından itibaren 45 dakika süre ile ölçülmüş ve elde edilen değerler **Şekil 96**, **Şekil 97** ve **Şekil 98**'de sunulmuştur.



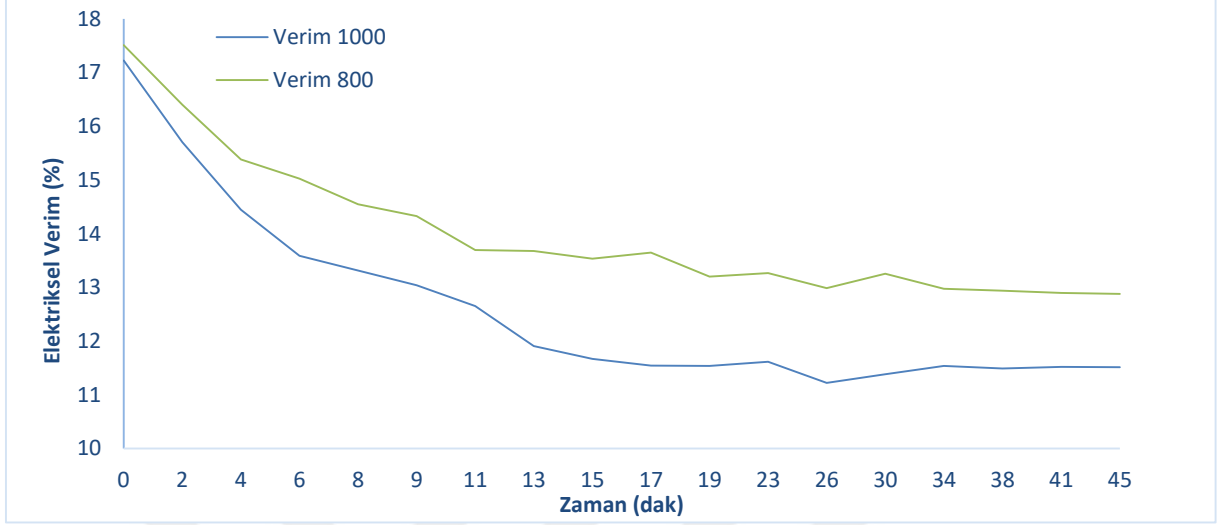
Şekil 96. 800 ve 1000W/m² güneş ışınımı altında PV sisteminin hücre sıcaklığı ve açık devre geriliminin zamanla değişimi

Deneylerin yapıldığı laboratuvar ortam sıcaklığı 20°C olup, başlangıç yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığına eşittir. Güneş simülatörünün çalıştırılması ile eş zamanlı olarak ilk ölçümler alınmış ve ardından 2 ila 4 dakika arasında değişen aralıklarla tekil ölçümler yapılarak PV panelinin değerleri kaydedilmiştir. Buna göre, 800W/m² güneş ışınımı altında panel yüzey sıcaklığı 45 dakika sonra maksimum 92,58°C'ye (365,73K), 1000W/m² değerinde ise 109,49°C'ye (382,64K) ulaşmıştır. Buna karşılık açık devre gerilimi maksimum değeri olan 23,05'ten 800W/m² için %20 düşüş göstererek 18,44V'ye 1000W/m² için %25,68 düşüş göstererek 17,13V'ye düşmüştür.



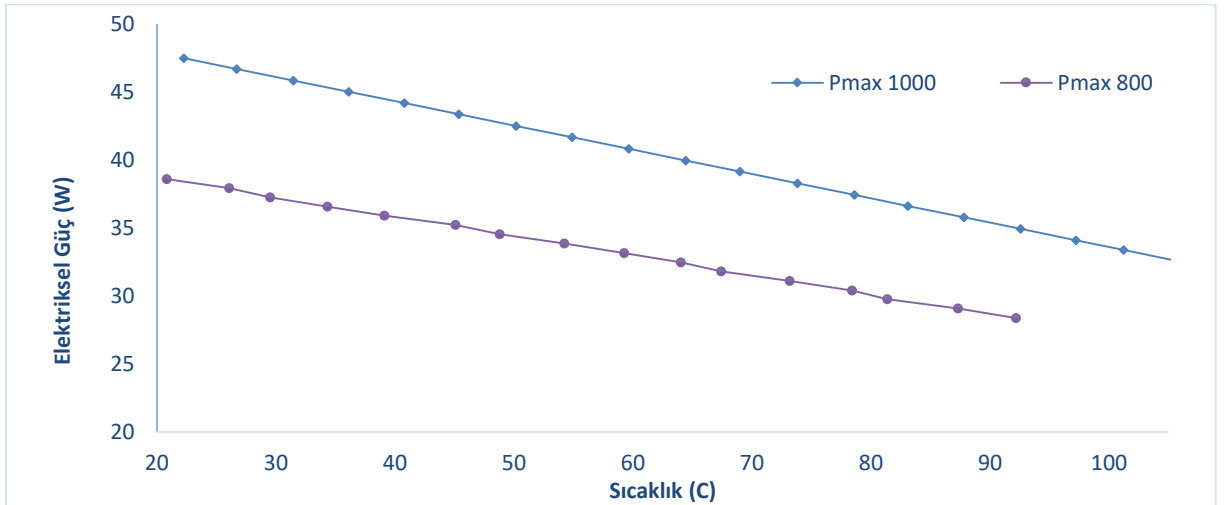
Şekil 97. 800 ve 1000W/m² güneş ışınımı altında PV sisteminin Elektriksel Güç Üretiminin zamanla değişimi

800W/m² ışı nım değ eri altında g üneş panelinin g üç üre timi %26,44 d üş üş g östererek 38,83W'tan 28,56W'a, 1000W/m² ışı nım değ eri altında ise %33,17 d üş üş g östererek 47,75W'tan 31,91W'a gerilemiştir.

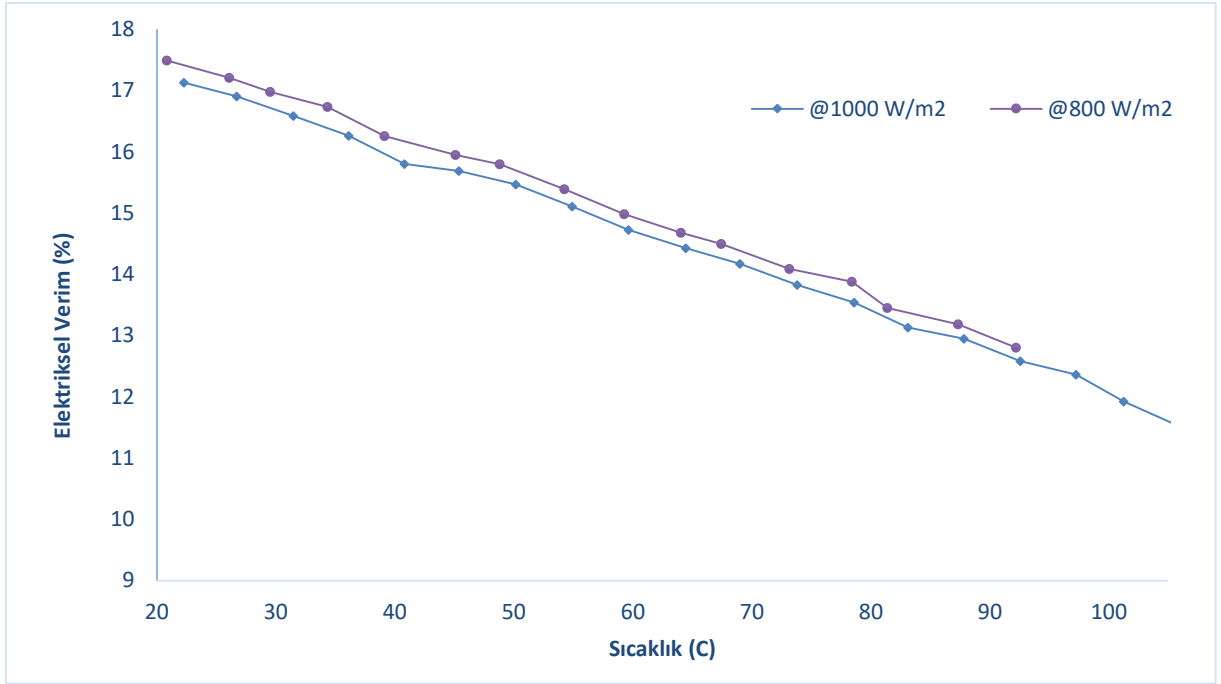


Şekil 98. 800 ve 1000W/m² g üneş ışı nım ı altında PV sisteminin Elektriksel Veriminin zamanla değ iş imi

Buna g öre sistemin 800W/m² g üneş ışı nım ı altındaki verimi %17,50 olan maksimum değ erinden %26,40 d üş üş le %12,88'e, 1000W/m² ışı nım altında ise %17,22'den %33,16 d üş üş le %11,51'e d üş m üştür. Aç ık devre gerilimi ve buna ba ğ lı olarak elektriksel verimin zamana g öre değ iş imi parabolik olarak gerç ekleş miş ve 45'dakikadan sonra sistemin termal dengeye ulaş masıyla birlikte sabitlenmiştir. G üneş panelinin elektriksel veriminin zamana ve sıcaklık a ba ğ lı olarak değ iş imi de gözlemlenmiş ve sırasıyla **Şekil 100** ve **Şekil 99**'de verilmiştir.



Şekil 99. Farklı sıcaklık değ erlerinde alınan ölç ümlere g öre 800 ve 1000W/m² g üneş ışı nım ı altında PV sisteminin Elektriksel G üç Üre timinin hücre sıcaklığı ile değ iş imi

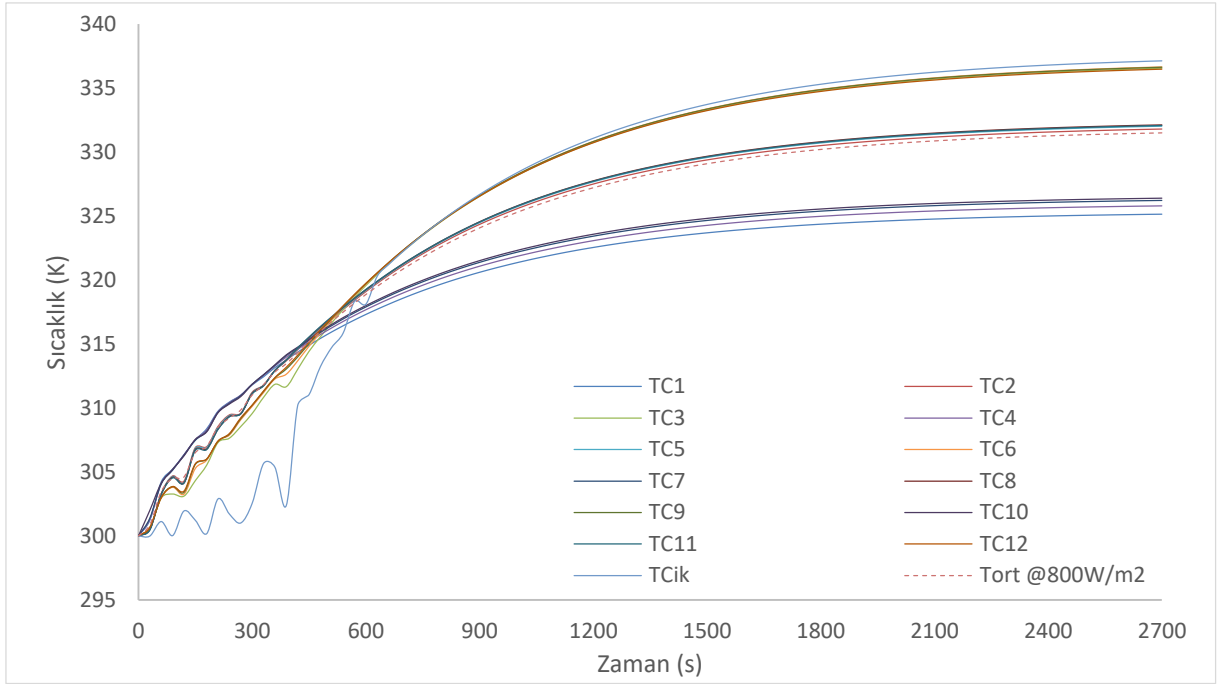


Şekil 100. 800 ve 1000W/m² ışınlam altında PV elektriksel veriminin hücre sıcaklığı ile değişimi

Sistemin elektriksel güç üretimi ve elektriksel veriminin **Şekil 95**'te verilen sıcaklık katsayı doğrularıyla uyumlu bir şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Elektriksel güç üretimi 1000W/m² ışınlam altında 800W/m² ışınlam altındaki güç üretiminin daha yüksek olmakla birlikte, yüksek ışınlam değeri altında hücre sıcaklığının daha fazla artması sebebiyle 800W/m² ışınlam değerinde panelin elektriksel veriminin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

PV sistemin 800W/m² ve 1000W/m² ışınlam değerleri altındaki değerlerinin elde edilmesinin ardından, sistemin su ile ve kFDM-S ile soğutulması durumunda performansının nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu deneyler için soğutma sıvısının sisteme giriş sıcaklığı ve sistemdeki dolaşma hızı kFDM'nin sistem içerisinde faz değişim sıcaklığına ulaşabileceği değerler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Ayrıca akışkanların yoğunluk değerleri farklı olduğundan giriş sınır şartı debi yerine hız olarak belirlenmiştir.

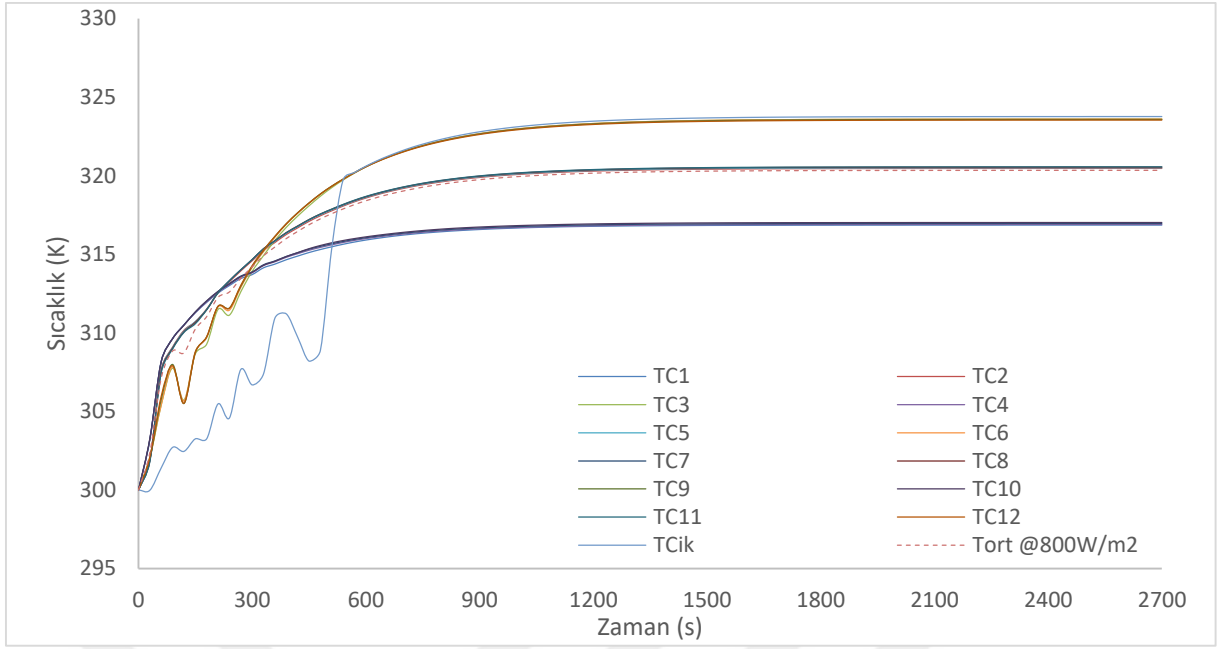
Buna göre giriş sıcaklığı 27°C (300K) ve giriş hızı da 0,08m/s ve 0,04m/s olarak seçilmiştir. Öncelikle PVT-sulu sistemin performansı, aynı ışınlam değeri ve ortam koşulları altında her iki giriş hızında belirlenmiş ve kFDM-S ile yapılacak deneylerde kıyas verisi olarak kullanmak üzere saklanmıştır.



Şekil 101. 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

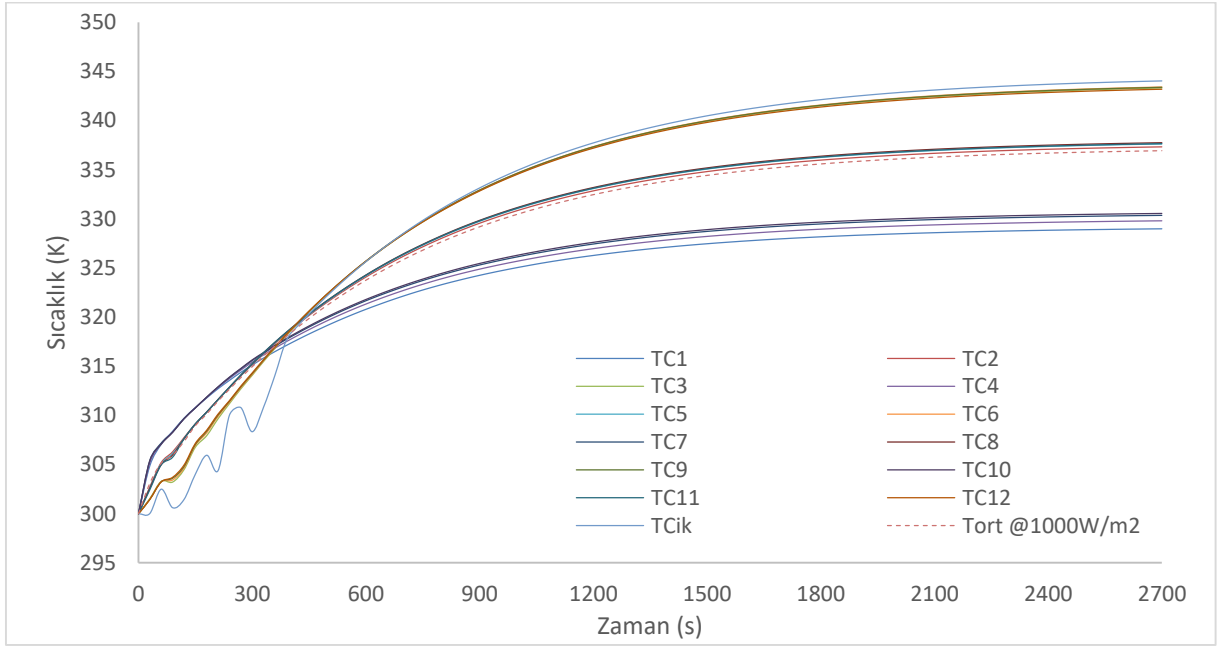
0,04m/s giriş hızında 800W/m² güneş ışınlamı altında ısı alıcı plakası üzerinde 3 farklı sıcaklık değerinde kademeli bir dağılım meydana gelmiştir. Sisteme 300K’de giren su, sistemden 337,14K’de çıkmış, plaka üzerinde kaydedilen en yüksek sıcaklık değerleri ise çıkışa en yakın olan ve **Şekil 59**’da gösterildiği üzere serpantin kanalın son iki yatay sırası arasında bulunan 3, 6, 9 ve 12 numaralı noktalarda ortalama olarak 336,5K olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde panelin giriş kısmında en alt sırada bulunan 1, 4, 7 ve 10 numaralı noktalarda ise en düşük sıcaklık değeri ortalama 325,90K olarak elde edilmiştir. Aynı kanal hattı paralelinde bulunan tüm noktalarda sıcaklık değerleri akış yönünde artış göstermiştir. Tüm panel yüzeyinin ortalama sıcaklığı ise 331,49K olarak belirlenmiştir.

Şekil 101’de açıkça görülebildiği üzere akışkanın giriş kısmından itibaren ısı çekerek ısınması ve buna bağlı olarak düşen sıcaklık farkı nedeniyle esasen homojen olarak ısınan plakadan homojen olmayan bir şekilde ısı çekilmesi neticesinde panel üzerinde akışkanın ilerleme yönünde dikey doğrultuda üç farklı sıcaklık bölgesi oluşmaktadır.



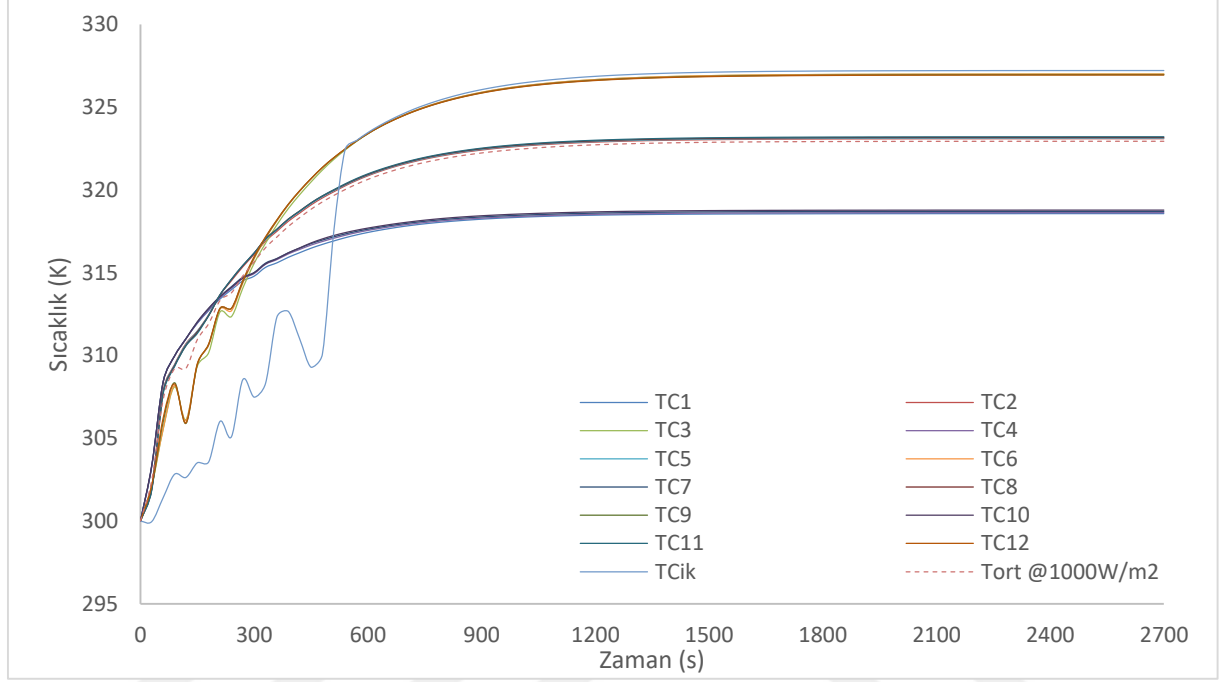
Şekil 102. 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

Akışkan giriş hızının 0,08m/s olduğu deneylerde ise, aynı sıcaklık dağılım profili, en yüksek sıcaklık değeri ortalama 323,58K ve en düşük sıcaklık değeri 316,94K olacak şekilde gerçekleşmiştir. Bu giriş hızı değerinde akışkanın çıkış sıcaklığı 323,78K ortalama yüzey sıcaklığı ise 320,35K olarak ölçülmüştür. Plaka üzerindeki sıcaklık dağılımı ise, alt kısımda ortalama 316,94K, orta kısımda 320,52K ve üst kısımda 323,58K olarak belirlenmiştir.



Şekil 103. 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

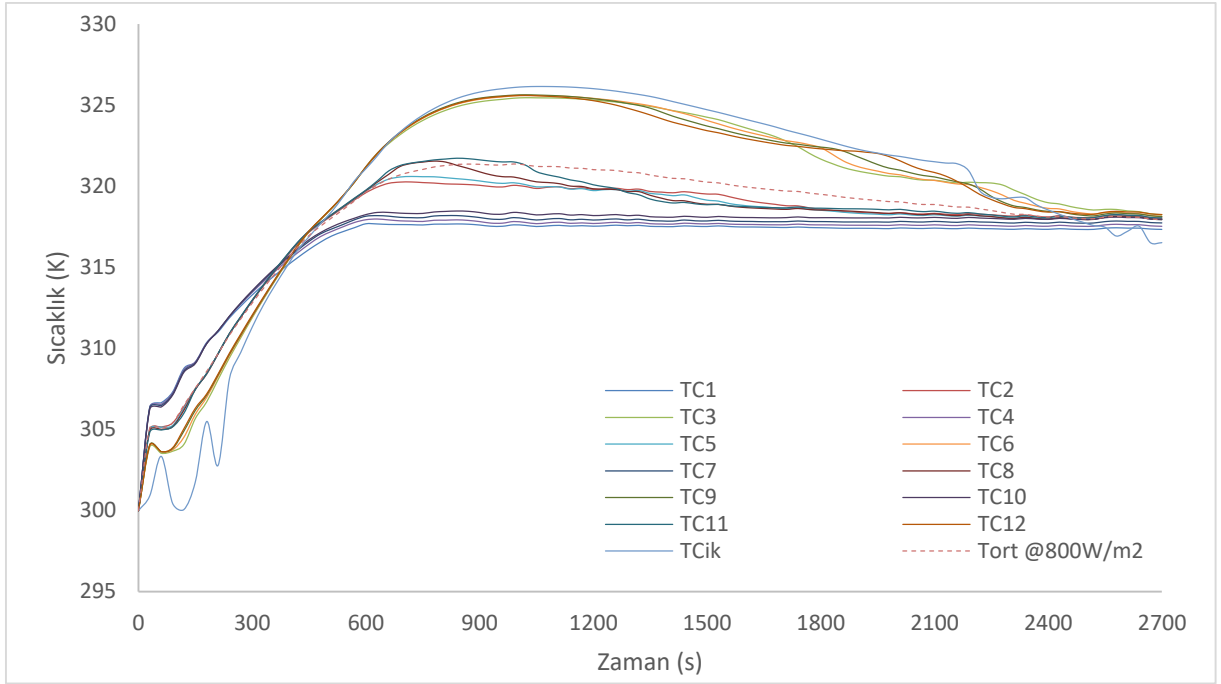
Işınım değeri 1000W/m^2 'ye yükseltildiğinde ise $0,04\text{m/s}$ giriş hızında tüm sıcaklık değerlerinde ısı akısının büyüklüğü ile orantılı olarak bir artış gözlemlenmiştir. Buna göre, akışkan çıkış sıcaklığı $344,02\text{K}$, ortalama plaka sıcaklığı $336,94\text{K}$ olarak ölçülürken plakadaki sıcaklık kademeleri alt kısımda ortalama $329,92\text{K}$, orta kısımda $337,58\text{K}$, üst kısımda ise $343,32\text{K}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 104. 1000W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,08\text{m/s}$ giriş hızında PVT-Su sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

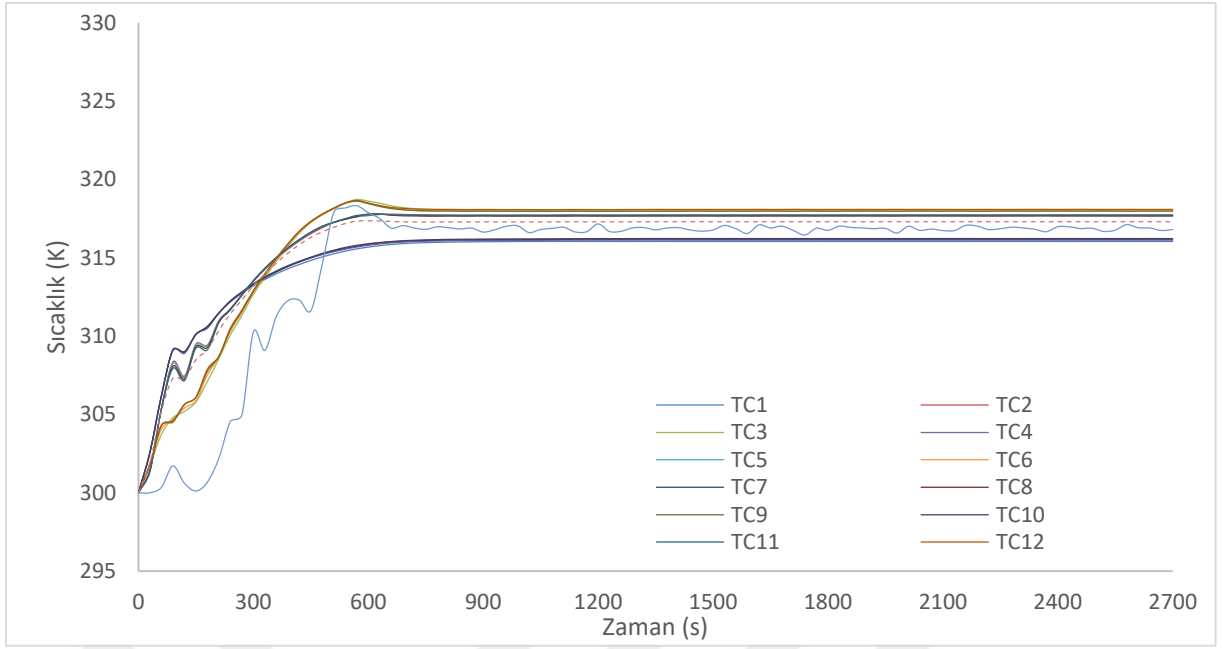
Giriş hızı $0,08\text{m/s}$ olduğunda ise ısı transfer hızının artmasına paralel olarak plakadaki sıcaklık değerlerinde ve çıkış suyu sıcaklığında bir düşüş meydana gelmiştir ancak kademeli sıcaklık dağılımı devam etmiştir. Sonuç olarak, akışkan çıkış sıcaklığı $327,22\text{K}$, ortalama plaka yüzey sıcaklığı $322,93\text{K}$ olarak ölçülürken, sıcaklık kademe değerlerinin alt kısımda $318,67\text{K}$, orta kısımda $323,15\text{K}$ ve üst kısımda $326,98\text{K}$ olduğu görülmüştür.

PVT-sulu sistemin 800W/m^2 ve 1000W/m^2 ışınlım değerleri altında $0,04\text{m/s}$ ve $0,08\text{m/s}$ giriş hızlarında sağladığı iyileştirme ortalama yüzey sıcaklıklarında sırasıyla $331,49\text{K}$, $320,35\text{K}$, $336,94\text{K}$ ve $322,93\text{K}$ değerlerine kadar soğuma sağlamıştır. Ancak panel yüzeyinde homojen bir soğuma elde edilemediği görülmektedir.



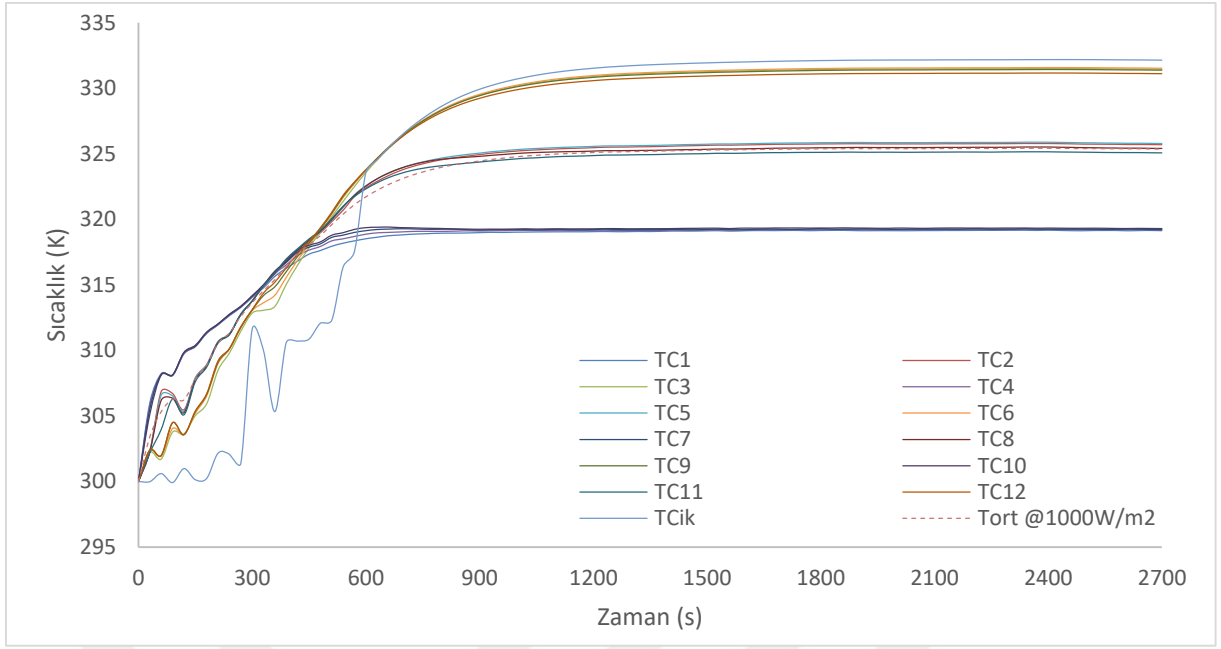
Şekil 105. 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,04\text{m/s}$ giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

%1'lik kFDM-S ile 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,04\text{m/s}$ giriş hızında plaka üzerindeki ısı dağılımında kademeli görünümün 1800s dolaylarına kadar kısmen 3 kademeli, 2300s dolaylarına kadar iki kademeli olarak devam ettiği 2400s'den sonra özdeş bir hal aldığı görülmektedir. Burada kFDM konsantrasyonunun düşük olması nedeniyle ve plaka içerisinde ısı yayılımının kararlı hale gelmesinin zaman almasına bağlı olarak birinci kademede ve ikinci kademede kısmen gizli ısı çekilebildiği ancak üçüncü kademede kapsül içerisindeki FDM'nin tamamen erimesiyle birlikte duyulur ısı artışı neticesinde sıcaklığının yükseldiği söylenebilir. Ayrıca yüzey sıcaklık dağılımının kararlı hale gelmesinden sonra 2400s zamanına kadar yükselen yüzey sıcaklığı ile birlikte taşınım ile ısı kayıplarının artmasının da bu süreden sonra yüzey sıcaklığının özdeş bir hal almış olmasında etkisi olduğu söylenebilir. Bu ışınlam ve debi değerinde kararlı durumda ortalama yüzey sıcaklığı $317,94\text{K}$ olarak gerçekleşmiştir.



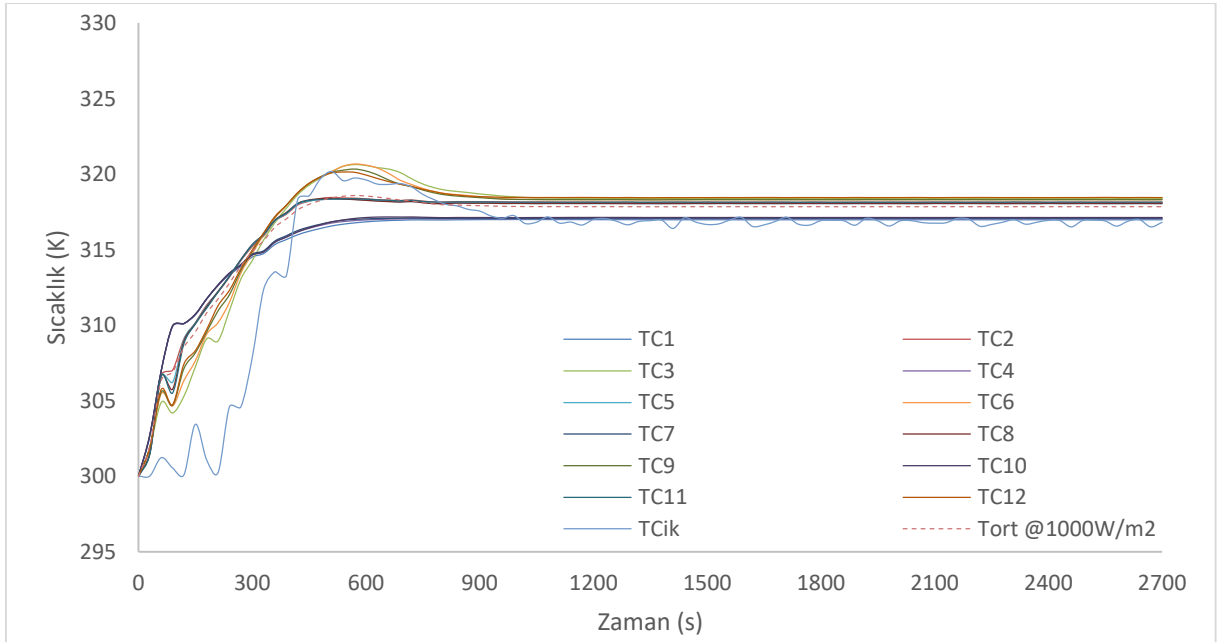
Şekil 106. 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,08\text{m/s}$ giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

%1'lik kFDM ile 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,08\text{m/s}$ giriş hızında, debinin artmasına paralel olarak birim akışkan kütlelerinin plaka ile temas süresi azaldığından birim zamanda çekilen kütle başına ısı miktarı düşmüş ve böylece birinci kademede daha az ısınan akışkanın içerisindeki kFDM'nin tamamen erimesi üçüncü kademeye gelene kadar ertelenebilmiştir. Ancak grafikten ve sıcaklık değerlerinden, ışınlam değerinin $0,08\text{m/s}$ giriş hızında tüm kFDM kesrinin erimesi için yeterli olmadığı, aynı zamanda akışkan içerisindeki kFDM miktarının ihtiyaç duyulan gizli ısıyı çekmeye yeterli olmadığı da söylenebilir. Neticede, birinci kademede akışkan sıcaklığının kFDM'nin erime sıcaklığı değerine erişemediği ve bu kısımda panelden yeterince gizli ısı çekilemediği anlaşılmaktadır. Bu ışınlam ve giriş hızı değerlerinde ortalama yüzey sıcaklığı $317,30\text{K}$ değerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 107. 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

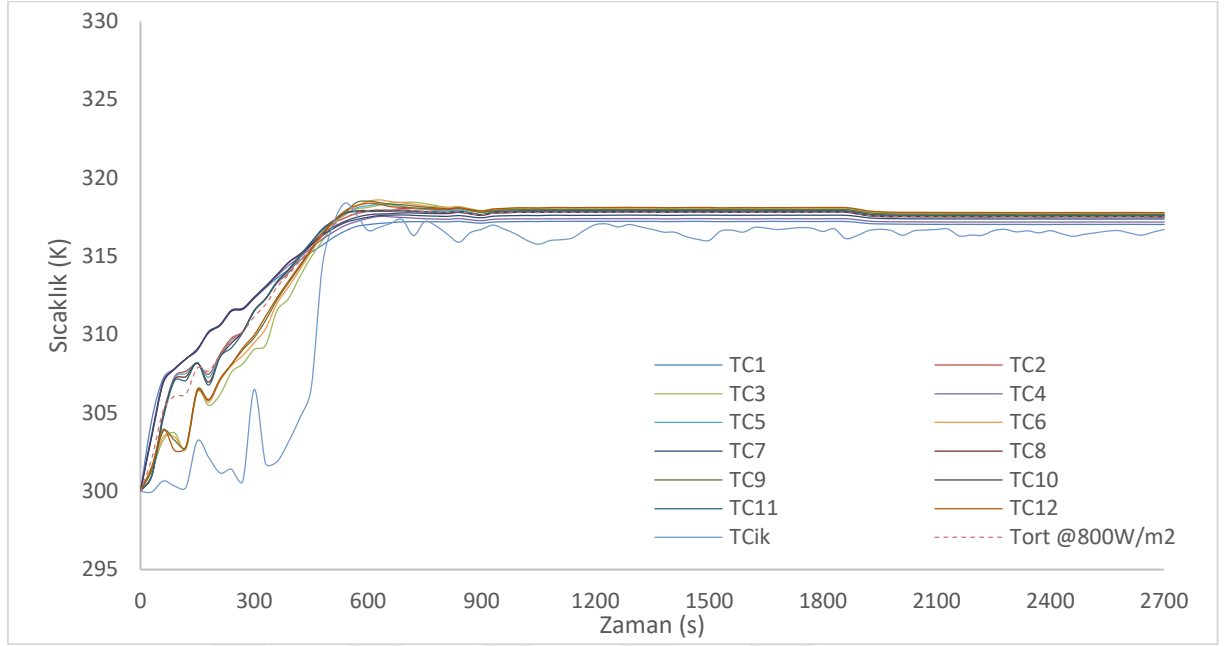
0,04m/s giriş hızında 1000W/m² güneş ışınlamı altında %1'lik kFDM-S, 800W/m² ışınlam değerinde olduğu gibi, faz değişimini tamamlamış ve sıvı fazda duyulur ısısını artırarak panel üzerindeki kademeli ısı dağılımının devam etmesine neden olmuştur. %1'lik kFDM-S için ışınlam değerini yüksek, debinin düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 108. 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %1'lik kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

Giriş hızı 0,08m/s değerine yükseltildiğinde %1'lik kFDM-S'nin 900s'de ikinci ve üçüncü kademelerde kararlı ve homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmesini sağladığı ancak

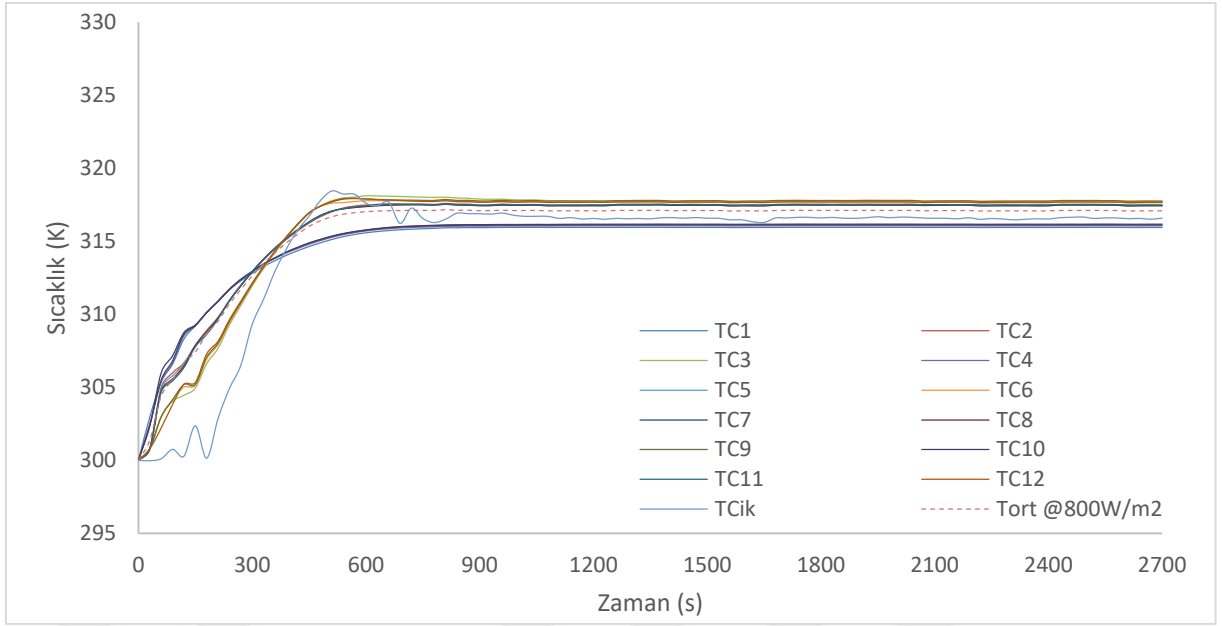
yine birinci kademede faz değişimin tamamlanamadığı değerlendirilmektedir. Bu sıcaklık ve ısınım değerlerinde ortalama yüzey sıcaklığı 317,84K olarak geręekleşmiştir.



Şekil 109. 800W/m² güneş ısınımında 0,04m/s giriş hızında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

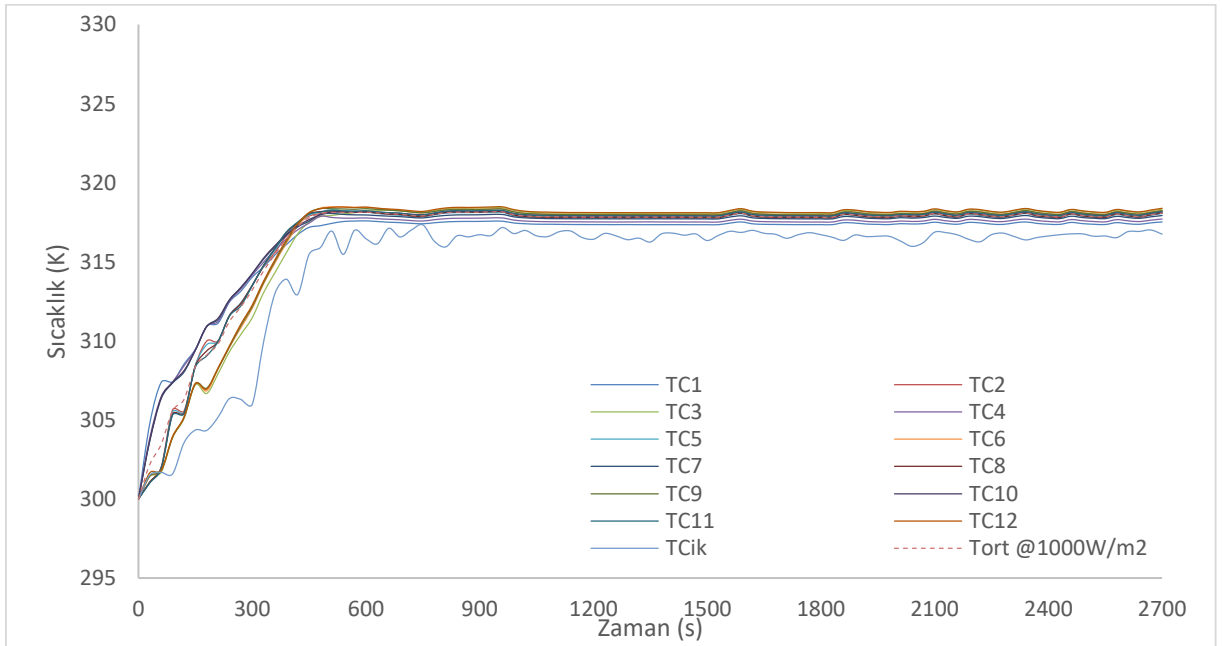
800W/m² güneş ısınımında 0,04m/s giriş hızında %1,5'luk kFDM-S ile panel üzerinde özdeş bir soğutma sağlandığı görülmektedir. ısınım değerinin nispeten düşük olmasının panelin aşırı ısınmasına ve dolayısı ile kFDM-S'nin sıcaklığının erime sıcaklığının üzerinde artmasına neden olmadığı görülebilmektedir. Plaka boyunca gizli ısı çekilmesinin sağlandığı aşikâr olmakla birlikte, sıcaklık değerinin 318K'nin altında kalmış olması, akışkan içerisindeki kFDM kesrinin tamamının erimediğini dolayısı ile kFDM-S'nin ısı çekme potansiyelinden tam olarak istifade edilemediği de görülmektedir. Nitekim bu ısınım ve giriş hızı değerinde plakanın ortalama yüzey sıcaklığı 317,53K değerinde geręekleşmiş ve ısınım değerinin düşük kaldığı yahut giriş hızının biraz yüksek olduğu söylenebilir.

Hal böyleyken aynı ısınım değerinde daha yüksek giriş hızında yahut daha düşük ısınım değerlerinde plakanın giriş bölgesinde akışkan içerisindeki kFDM kesrinin erime sıcaklığının altında kalacağı yahut ısı çekme potansiyelinin tümüyle kullanılamayacağı aşikârdır.



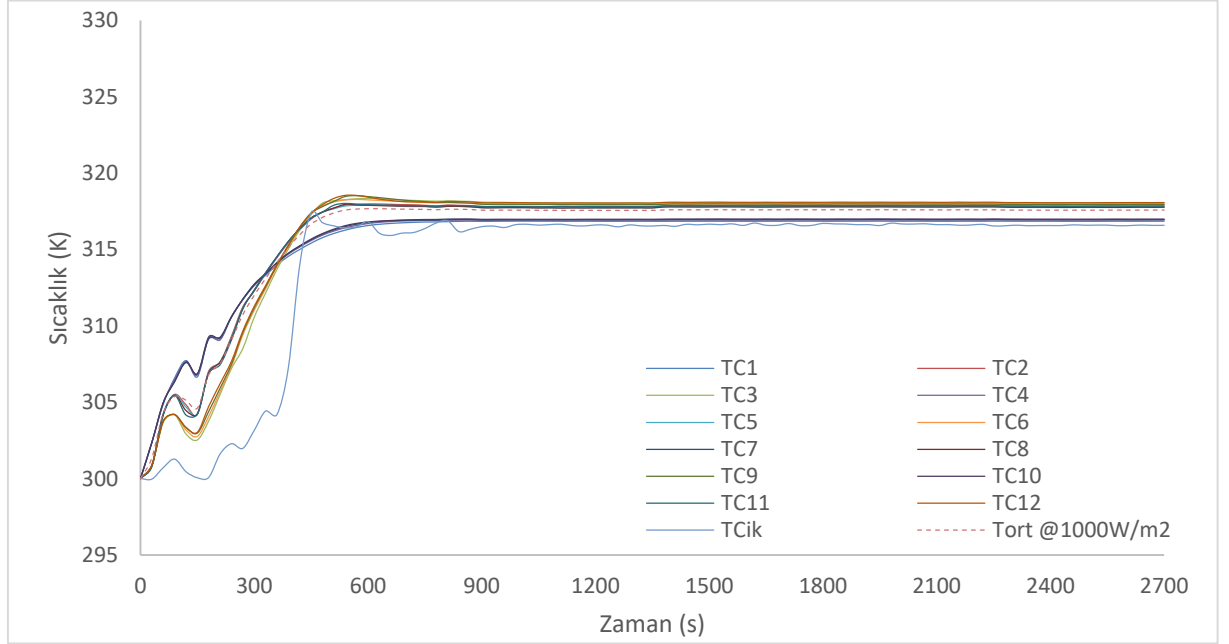
Şekil 110. 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

Nitekim 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %1,5'luk kFDM ile plakanın giriş bölgesinde yani birinci kademedeki sıcaklık değeri 316K dolayında kalmış ve bu bölgenin sıcaklığı plakanın geri kalanından daha düşük gerçekleşmiştir. Bu da plakanın geri kalan kısmında kFDM-S'nin bütünüyle faz değiştirmesine yetecek kadar ısı çekilememiştir. 317,08K olarak ölçülen ortalama plaka sıcaklığının 0,04m/s giriş hızına nazaran daha düşük kalması da giriş bölgesinde faz değişim sıcaklığına ulaşamamış olması nedeniyledir.



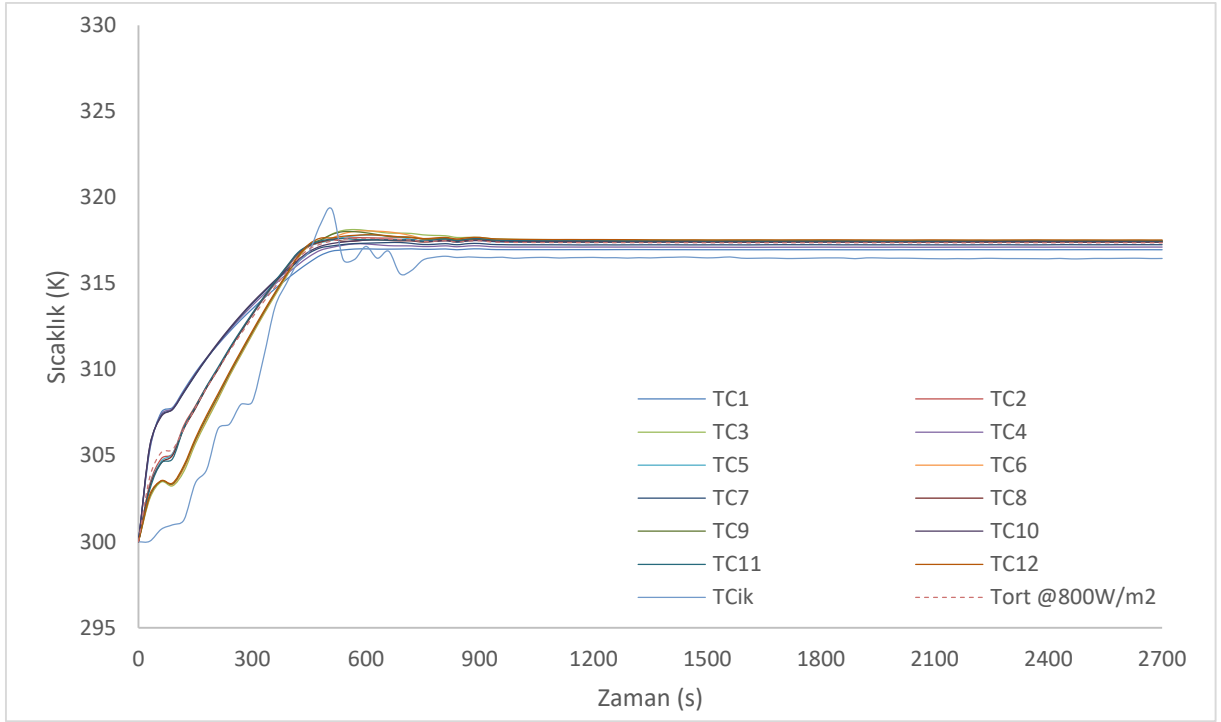
Şekil 111. 1000W/m² güneş ışınlamı altında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

%1,5'luk kFDM-S için ısıtım değeri 1000W/m^2 değerine yükseltildiğinde; $0,04\text{m/s}$ giriş hızında tüm plaka yüzeyinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildiği görülmüştür. Sıcaklık değerinin $318,1\text{K}$ ile faz değişim sıcaklığında olduğu düşünüldüğünde akışkan içerisindeki kFDM-S'nin büyük oranda erimiş olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte kFDM-S'nin ısı çekme potansiyelinden bütünüyle faydalanılıp faydalanılamadığı ancak erime sıcaklığının $1-2\text{K}$ üzerinde bir kararlı sıcaklık değerine ulaşılmış olması ile net olarak bilinebilir. Bu da üçüncü kademedeki çıkışa yakın noktada plaka sıcaklığında bir kademelenme ile kendini gösterecektir. Grafik yakından incelendiğinde kahverengi seri ile gösterilen ve çıkışa en yakın termofit noktası olan T12 sıcaklık değerinin diğerlerinin hemen üzerinde küçük bir kademe farkı gösterdiği görülecektir. Böylece bu ısıtım ve giriş hızı değerinde akışkan içerisindeki kFDM kesrinin tamamen eridiği ve kFDM-S'nin gizli ısı çekme kapasitesinden tam olarak faydalanılabildiği söylenebilir.



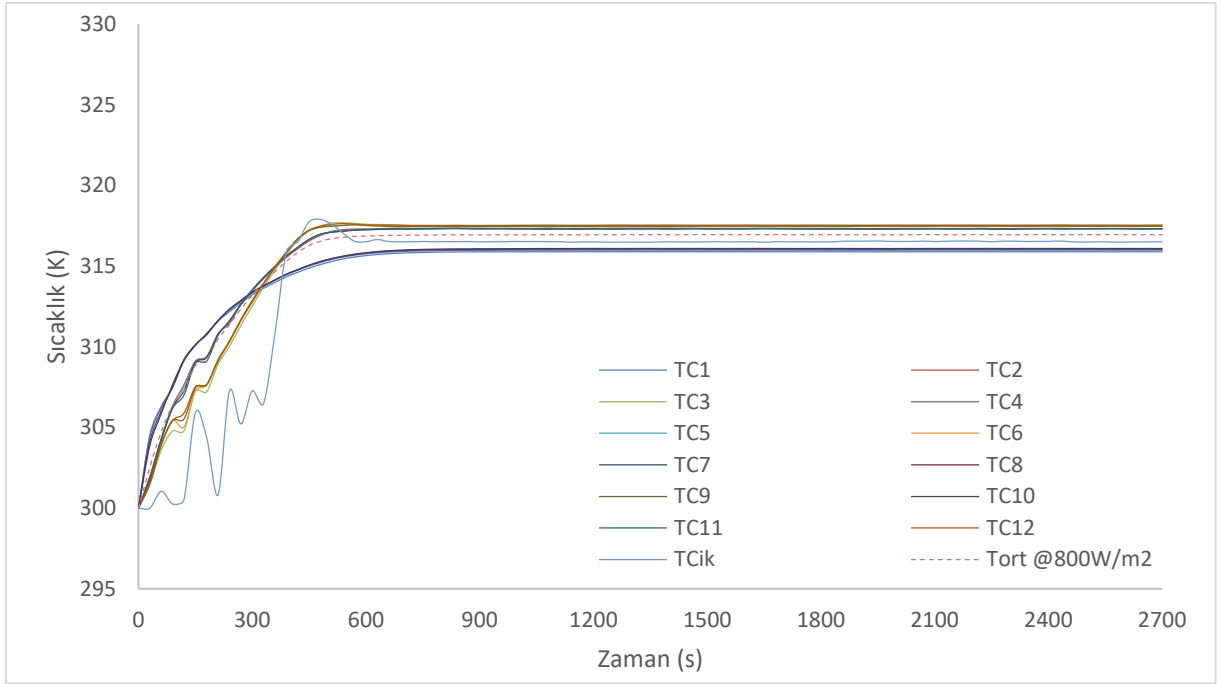
Şekil 112. 1000W/m^2 güneş ısıtım altında $0,08\text{m/s}$ giriş hızında %1,5'luk kFDM içeren PVT-kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

Giriş hızı $0,08\text{m/s}$ değerine yükseltildiğinde, 1000W/m^2 ısıtım altında %1,5'luk kFDM-S'nin plakanın giriş kısmında ve birinci kademe boyunca $316,70\text{K}$ ile $317,5\text{K}$ aralığında kaldığı ve faz değişim sıcaklığına tam olarak ulaşamadığı ve özellikle plaka içerisinde ısı yayılımının kararlı hale geldiği 700 saniye dolayına kadar çıkış bölgesine yakın üçüncü kademedeki duyulur ısı olarak sıcaklığının bir süreliğine faz değişim sıcaklığı üzerine çıktığı, devam eden süreçte plaka içerisinde ısı yayılımının kararlı hale gelmesi ile birlikte faz değişim bölgesinde kararlı bir seyir gösterdiği görülmektedir. Bu ısıtım ve giriş hızı değerinde ortalama plaka sıcaklığı $317,59\text{K}$ olarak gerçekleşmiştir.



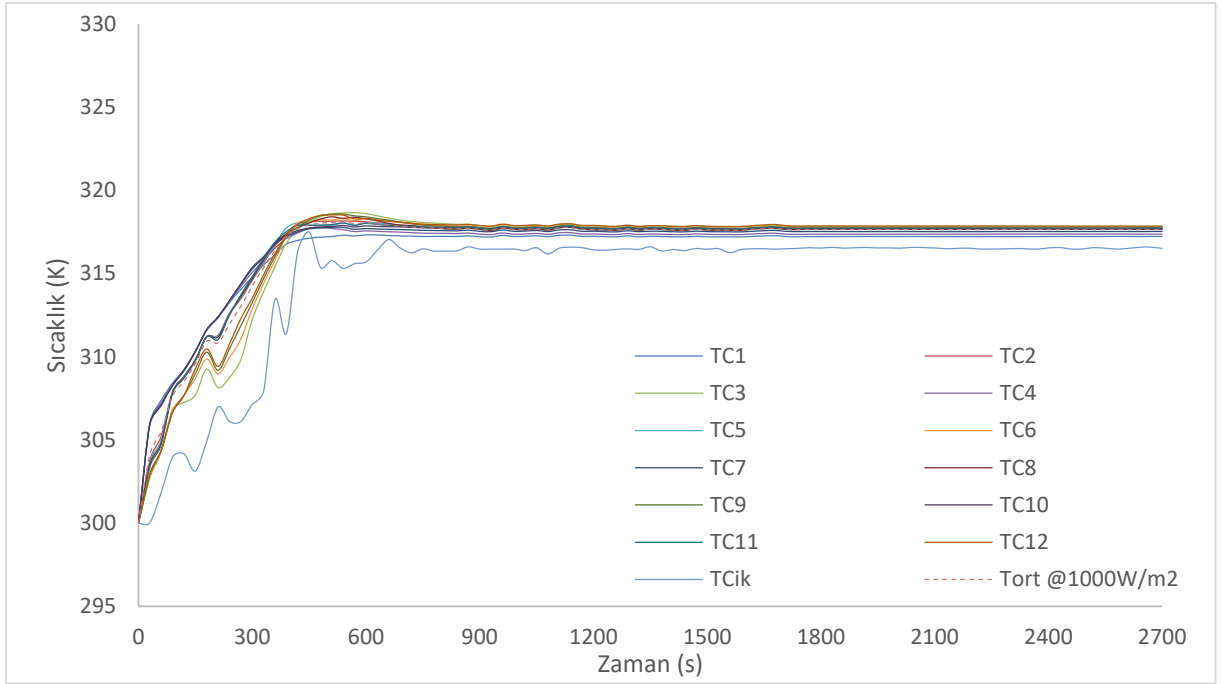
Şekil 113. 800W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında %2'lik kFDM içeren PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

Yukarıda %1,5'luk kFDM-S ile iyi bir durum elde edilmiş olduğu 800W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında oldukça düzgün bir sıcaklık dağılımı ve ortalama sıcaklık değeri elde edilmiş olmakla birlikte, %2'lik kFDM'nin sunduğu gizli ısı çekme kapasitesinin tam olarak karşılanamadığı değerlendirilmektedir. Faz değişim bölgesine girilmiş olmasına rağmen akışkan içerisindeki kFDM kesrinin bütününün erimediği, elde edilen sıcaklık profilinin 0,5 puanlık konsantrasyon artışının beraberinde getireceği viskozite ve pompalama gücü artışının, her ne kadar küçük oranlarda olsa da, anlamsız olacağı düşünülmektedir. Yine de tam olarak karar verilebilmesi için termal ve elektriksel verim değerlerinin de kıyaslanması önemlidir.



Şekil 114. 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,08\text{m/s}$ giriş hızında %2'lik kFDM içeren PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

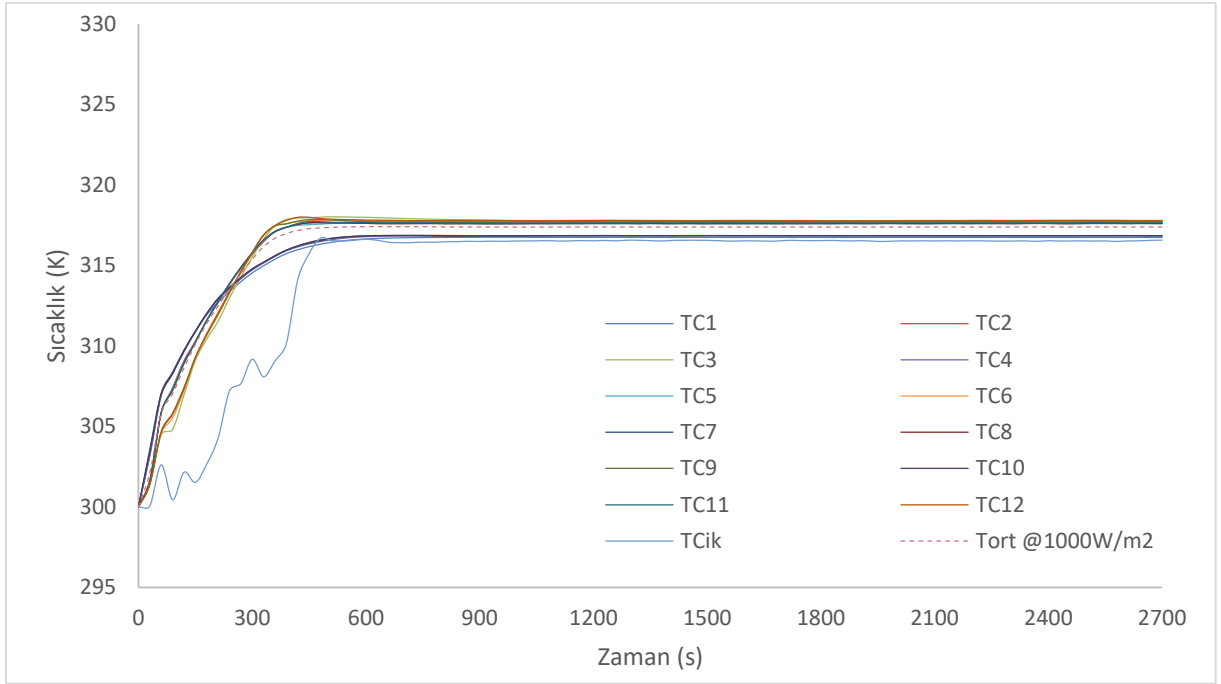
Yukarıda verilen $0,04\text{m/s}$ giriş hızındaki sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, daha yüksek giriş hızları ve daha düşük ışınlam değerlerinin %2'lik kFDM-S için uygun olmayacağı açıktır. Nitekim $0,08\text{m/s}$ giriş hızında %2'lik kFDM-S ile plakanın giriş bölgesinde yeterli ısı girişi sağlanamamış ve sıcaklık değerleri 316K dolayında kFDM'nin faz değişim sıcaklığı altında kalmıştır. Plakanın orta ve üst kademelerinde çekilen ısı ile birlikte faz değişim bölgesine girilmiş ancak akışkan içerisindeki kFDM-S kesrinin bütünüyle erimesine yetecek kadar ısı çekilememiştir. Bu giriş hızı ve ışınlam değerleri altında ortalama plaka sıcaklığı $316,94\text{K}$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 115. 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında %2'lik kFDM içeren PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

%2'lik kFDM-S ile 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında, %1,5'luk kFDM-S ile 800W/m² güneş ışınlamı altında aynı giriş hızında elde edilene benzer bir sıcaklık dağılımı ve ortalama yüzey sıcaklığı elde edilmiştir. 800W/m² ile 1000W/m² arasındaki ilave ısı girişinin %1,5'luk kFDM-S ile %2'lik kFDM-S arasındaki ilave 0,5 puanlık kFDM artışının sağladığı ısı çekme potansiyeli ile büyük ölçüde karşılanmış olduğu görülmektedir. Ortalama sıcaklık değerleri arasında sadece 0,3K dolayında bir fark bulunması PV veriminin yaklaşık aynı olacağını, buna karşın ilave kFDM konsantrasyonu nedeniyle termal verimin daha yüksek olacağı görülmektedir. Diğer taraftan, bu giriş hızı ve ışınlamı değerinde elde edilen sıcaklık değerleri, daha düşük giriş hızları ya da daha yüksek ışınlamı değerlerinin %2'lik kFDM-S için uygun olmayacağını açıkça göstermektedir.

Nitekim 0,08m/s giriş hızında, akışkanın birim kütesinin plaka ile temas süresinin kısılmasına paralel olarak plakanın giriş kısmında, faz değişim sıcaklığına tam olarak ulaşılamadığı için sıcaklık dağılımında kademelenme görülmektedir. 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında %2'lik kFDM-S ile ortalama plaka sıcaklığı birinci kademede faz değişim sıcaklığına ulaşamaması nedeniyle bir miktar düşüş göstererek 317,4K olarak gerçekleşmiştir.

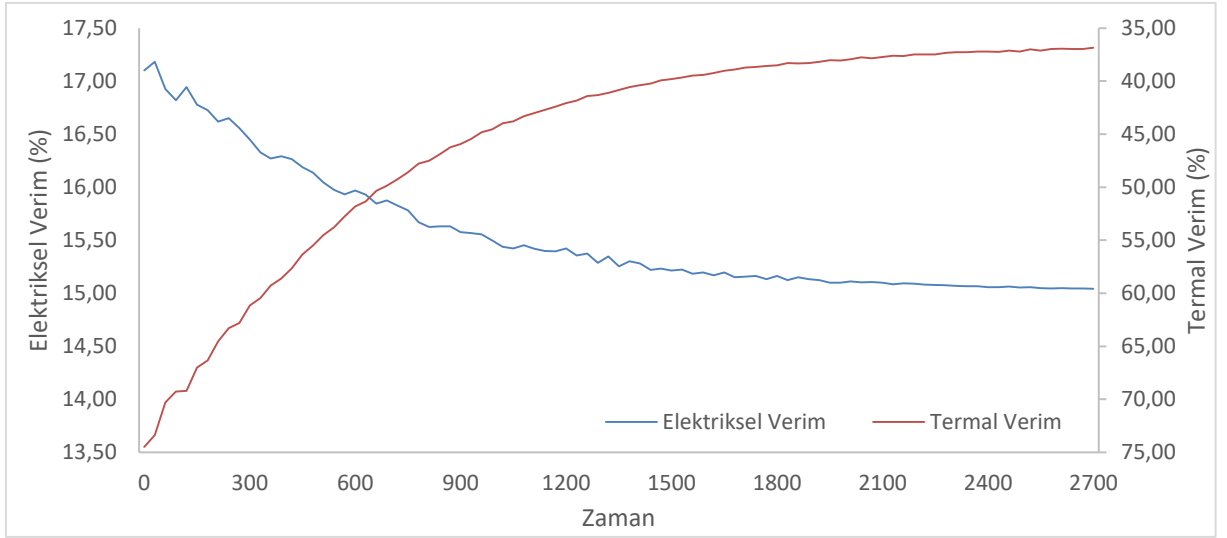


Şekil 116. 1000W/m² güneş ışınlımı altında 0,08m/s giriş hızında %2'lik kFDM içeren PVT/kFDM-S sisteminin hücre sıcaklığının zamanla değişimi

PV Sisteminde yapılan ve yukarıda **Şekil 96**, **Şekil 97** ve **Şekil 98**'de verilen yüzey sıcaklığı, elektriksel güç üretimi ve açık devre gerilimi grafikleri ile **Şekil 100** ve **Şekil 99**'de verilmiş olan elektriksel verim grafiklerine benzer şekilde, su ile yapılan deneylerde de sistemin ortalama yüzey sıcaklığı ve elektriksel çıktı parametreleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Buna bağlı olarak sistemin elektrik ve termal verimleri belirlenmiştir.

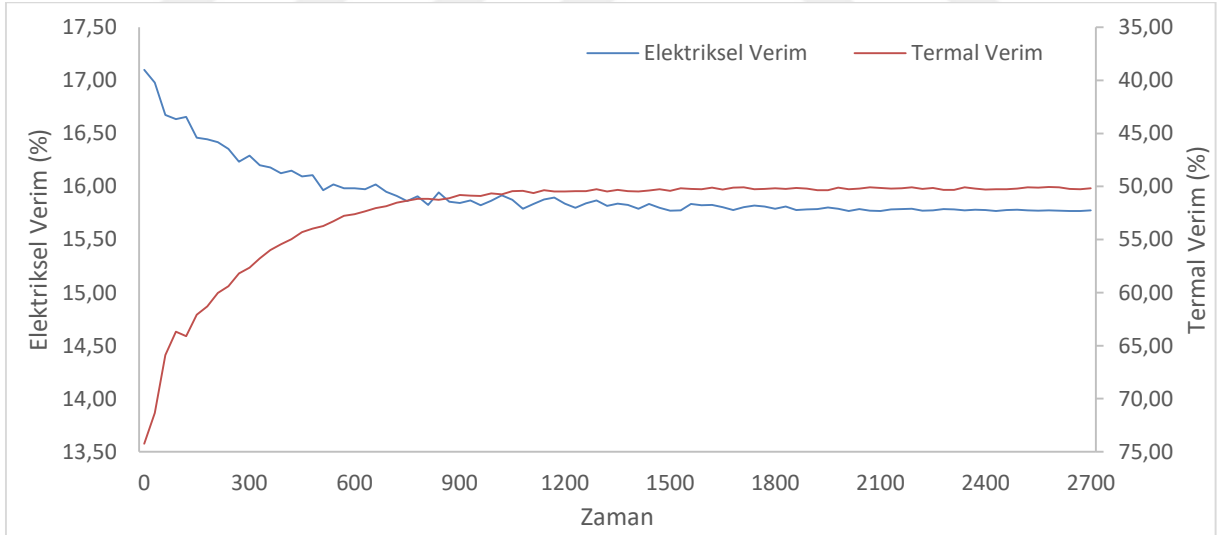
Ölçümlerin alınmaya başladığı ve plaka sıcaklığının ortam sıcaklığına eşit olduğu 0s zamanında, hücre sıcaklığının en düşük değerinde olması nedeniyle en yüksek elektriksel güç elde edilmektedir. Benzer şekilde, plaka sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farkın sıfır (0) veya sıfıra çok yakın olması ve termal kayıpların da minimum düzeyde olması nedeniyle en yüksek termal güç elde edilmektedir.

Zamanla plaka sıcaklığının yükselmesine paralel olarak, hücre sıcaklığındaki yükselişin beraberinde getirdiği elektriksel direnç artışı, elektriksel güç üretiminde güneş hücresinin sıcaklık katsayısı oranında bir düşüş meydana getirmektedir. Sıcaklığın zamanla kümülatif yükselişi elektriksel güç üretiminde de zamana bağlı olarak parabolik bir düşüşe neden olmaktadır (Bellos & Tzivanidis, 2017). Benzer şekilde artan konvektif ısı kayıpları nedeniyle termal güç üretimi de zamanla parabolik olarak düşüş göstermektedir.



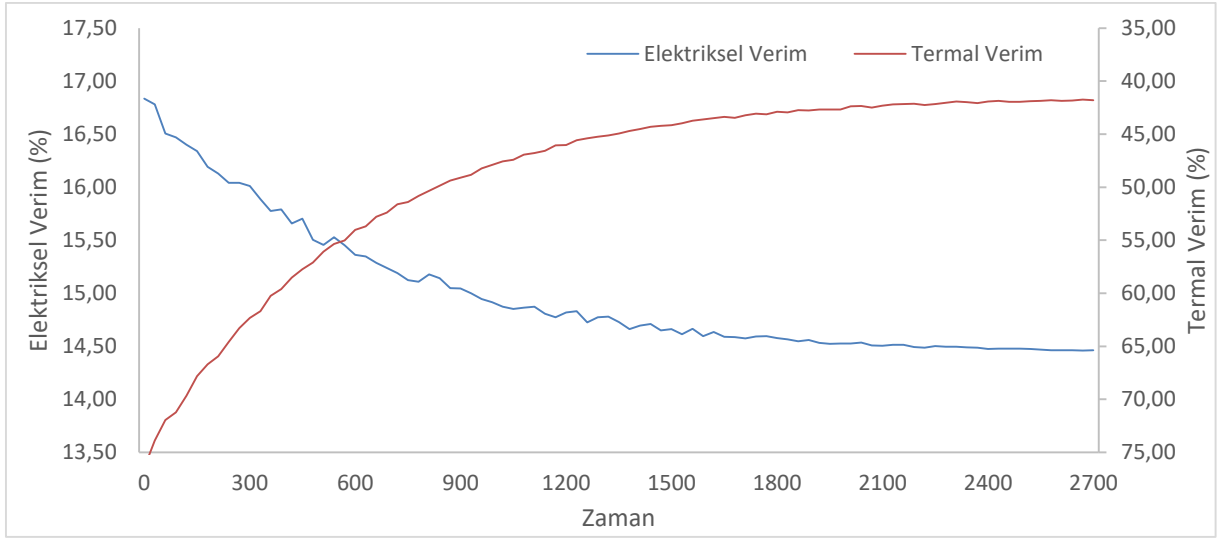
Şekil 117. 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi

800W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminde elde edilen elektriksel verim %17,18 olan en yüksek değerinden kararlı durumda %15,04 değerine kadar gerilemiştir. Aynı ışınlam değerinde soğutulmayan PV panelinde elektriksel verim %17,50 olan maksimum değerinden %12,88'e gerileyerek (Şekil 98) 5,99 puan kayıpla %34,22 düşüş göstermiştir.



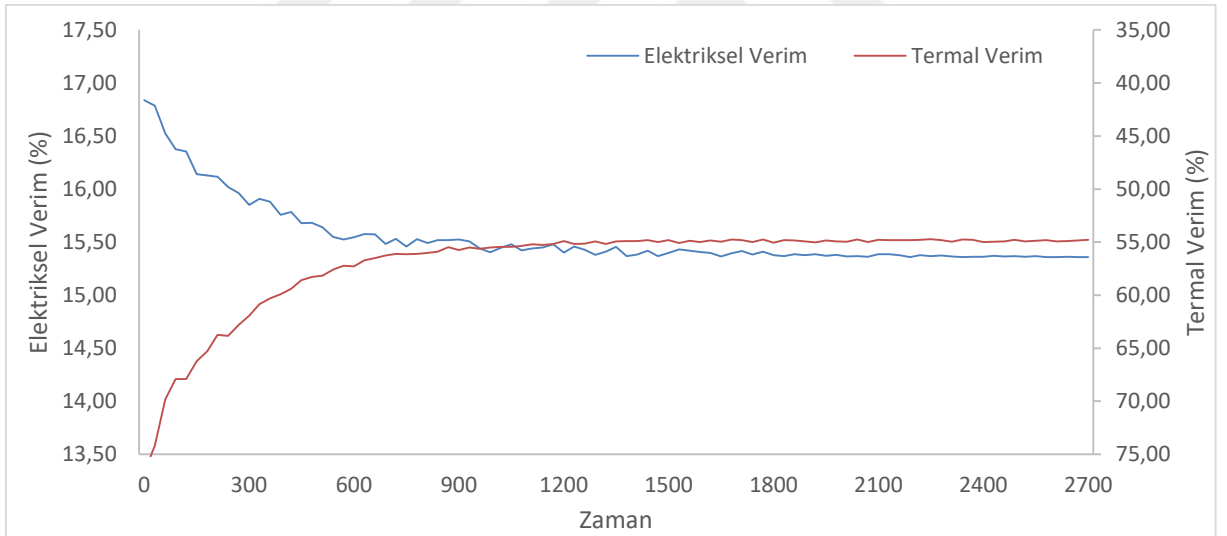
Şekil 118. 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi

Giriş hızı 0,08m/s değerine yükseltildiğinde, hesaplanan maksimum elektriksel verim %17,10 iken hücre sıcaklığının artması ile birlikte %15,78 değerine kadar gerilemiştir. Termal verim ise %74,24'lük maksimum değerinden kararlı durumda %50,16 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 119. 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi

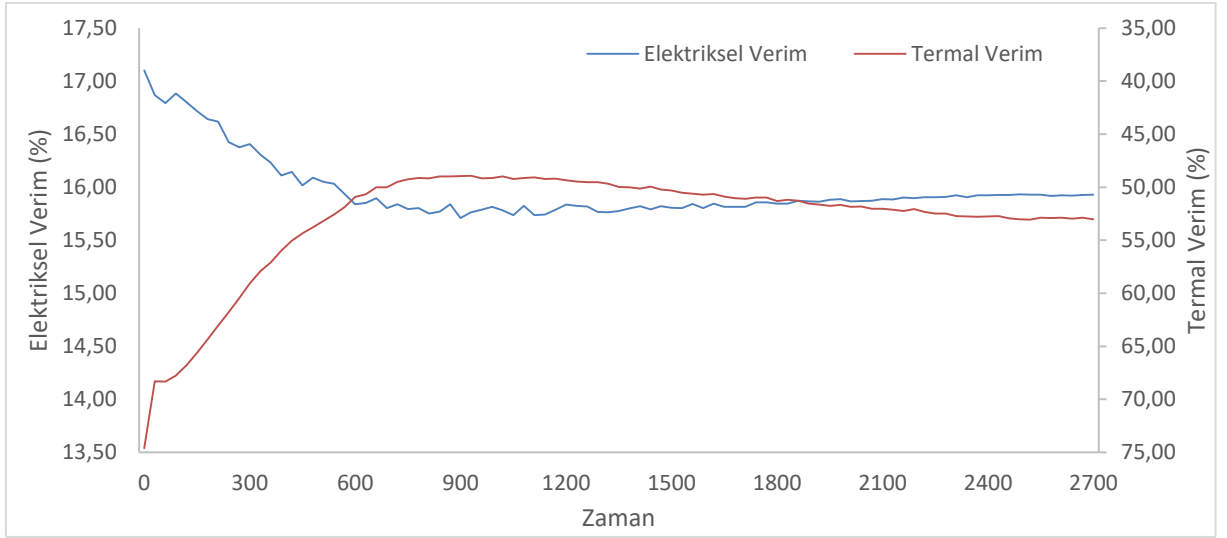
1000W/m² güneş ışınlamında, su ile soğutma yapılan deneylerde 0,04m/s giriş hızında elektriksel verim %16,84 olan maksimum verim kararlı durumda %14,46 değerine kadar düşüş göstermiştir. Termal verim ise %76,46 değerinden %41,80'e kadar gerilemiştir.



Şekil 120. 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızında PVT-Su sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi

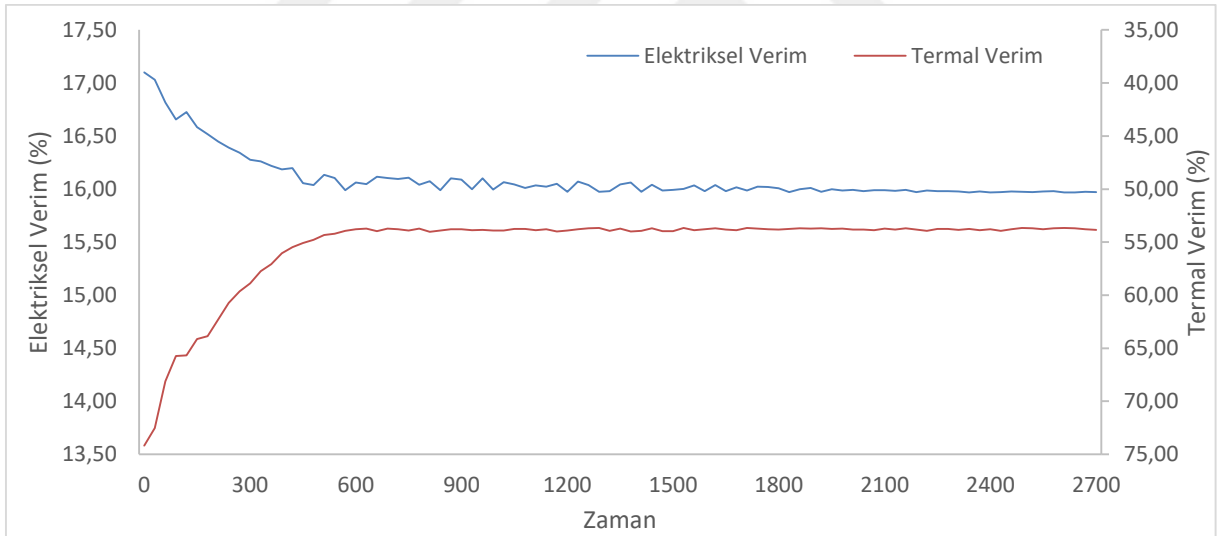
Giriş hızının 0,08m/s olduğu durumda ise elektrik ve termal verimlerin maksimum değerlerinden kararlı haldeki minimum değerlerine düşüşü sırasıyla %16,84'ten %15,36'ya ve %76,76'dan %54,80'e şeklinde gerçekleşmiştir.

800 ve 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s ve 0,08m/s giriş hızlarında %1, %1,5 ve %2'lik kFDM-S akışkanlar ile tekrar edilen deneylerde elde edilen elektriksel ve termal verim değerleri her bir ışınlam ve giriş hızı değeri için aşağıda ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 121. 800W/m² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s)

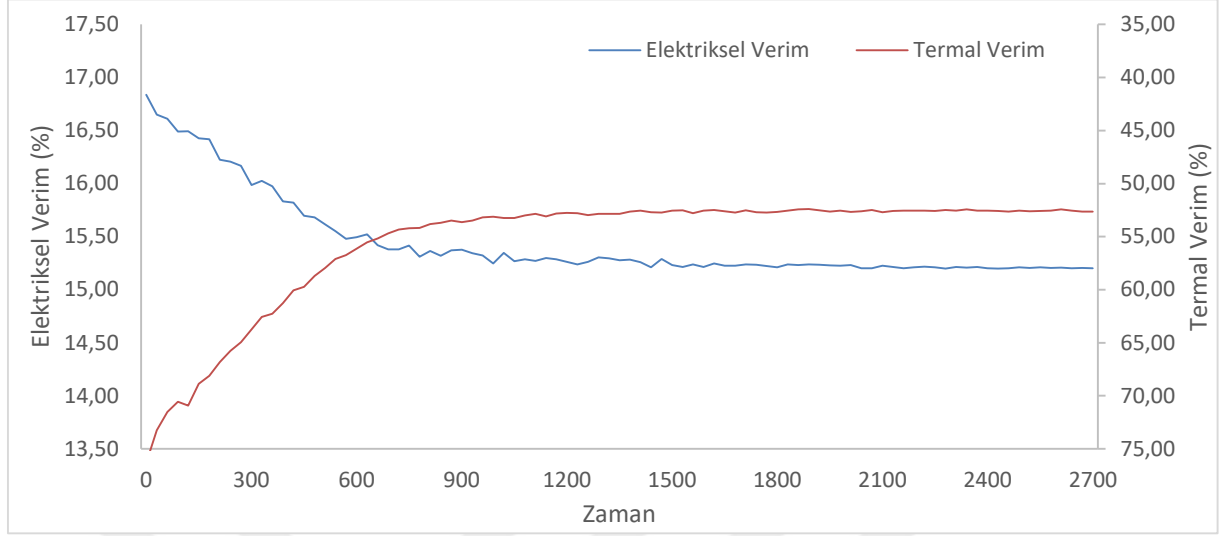
Sistemin %1'lik kFDM-S ile 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında elde edilen elektriksel ve termal verimler maksimum değerlerinde sırasıyla %17,10 ve %74,62 olurken kararlı durumda %15,93 ve %53,02 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 122. 800W/m² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,08m/s)

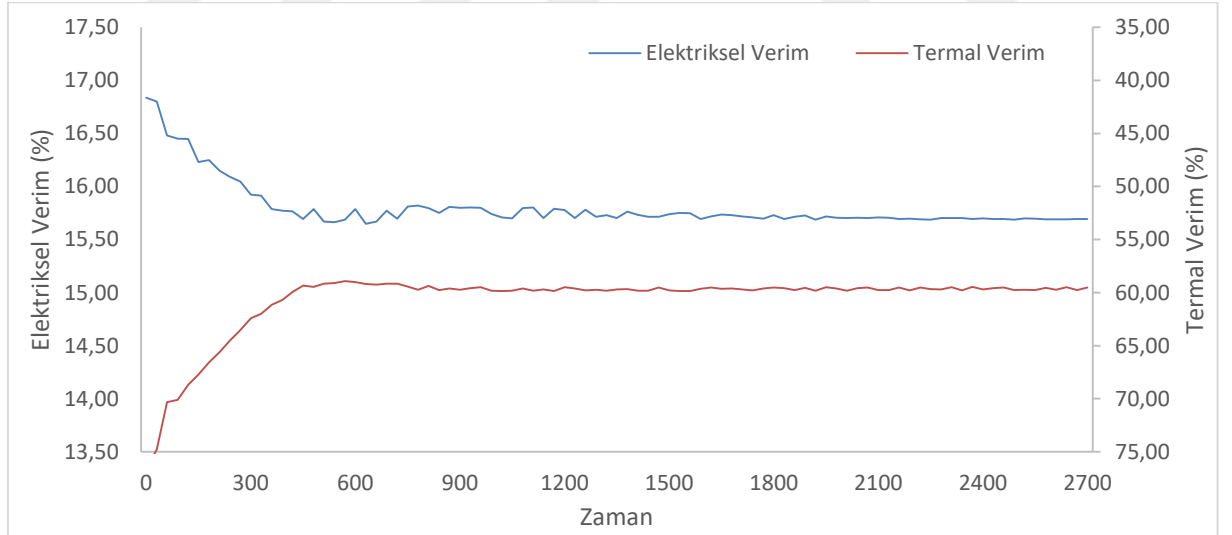
0,08m/s giriş hızında ise %17,03 olan elektriksel verimin %15,97'ye, %74,19 olan termal verimin ise %53,84'e kadar gerilediği görülmüştür. Işınlam değeri 1000W/m² değerine yükseldiğinde ise sabit sıcaklıkta ısı çekilmesine imkân tanıyan kFDM içeriği sayesinde panel sıcaklığındaki artışın toplam ısı akısındaki artışa kıyasla daha düşük olması nedeniyle, tüm kFDM oranları için aynı ışınlam ve debi değerleri altında elektriksel verimdeki düşüş ile termal verimdeki düşüş arasında pozitif uyumsuzluk meydana geldiği görülmüştür. Bu durum,

grafiklerde elektriksel ve termal verim eğrilerinin birbirinden uzaklaşması şeklinde görülmektedir.



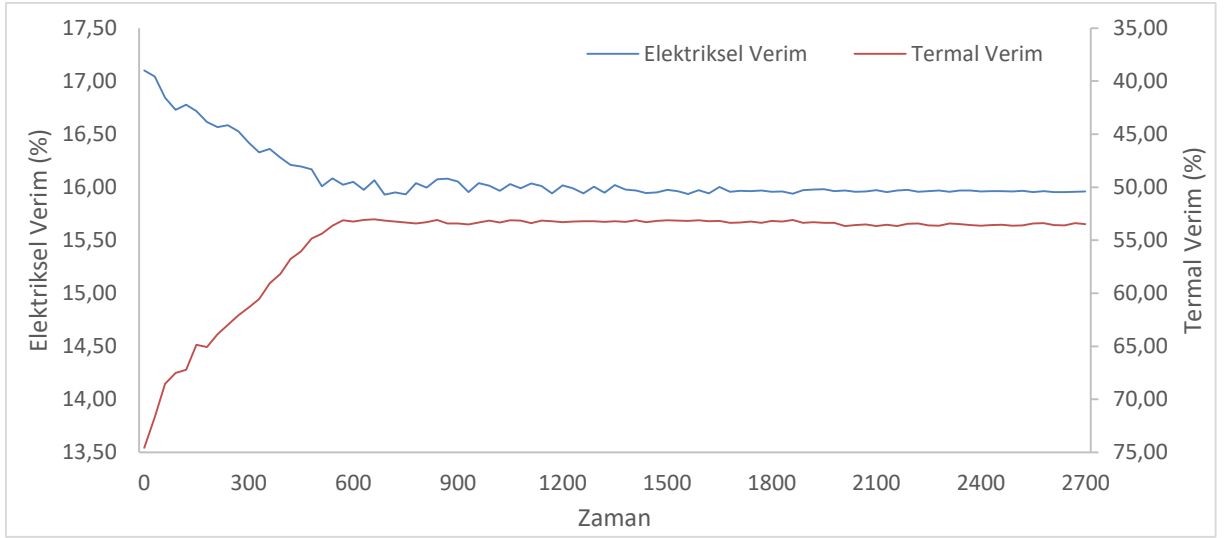
Şekil 123. 1000W/m² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi ($v = 0,04\text{m/s}$)

1000W/m² güneş ışınlamı altında %1'lik kFDM-S ile 0,04m/s giriş hızında termal verim %76,33 ile %52,64 aralığında bir düşüş gösterirken, elektriksel verimin değişimi %16,84 ile %15,20 arasında ölçülmüştür.



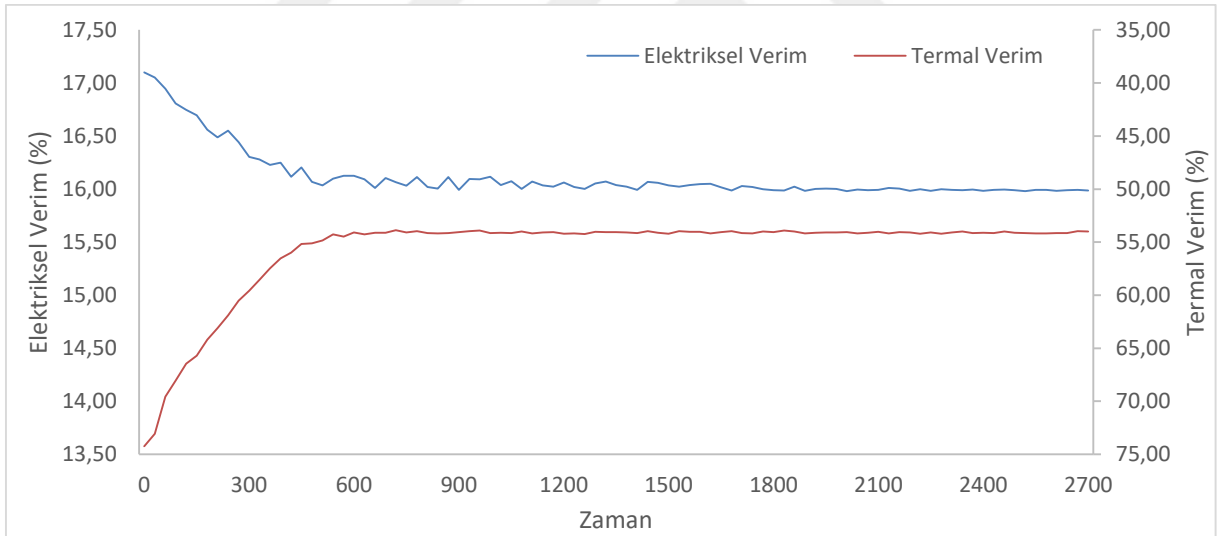
Şekil 124. 1000W/m² güneş ışınlamı altında %1'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi ($v = 0,08\text{m/s}$)

Giriş hızının 0,08m/s değerine yükselmesiyle birlikte elektriksel verim %16,84 ile %15,69'a, termal verim ise %76,61'den %59,53'e kadar düşüşler göstermiştir.



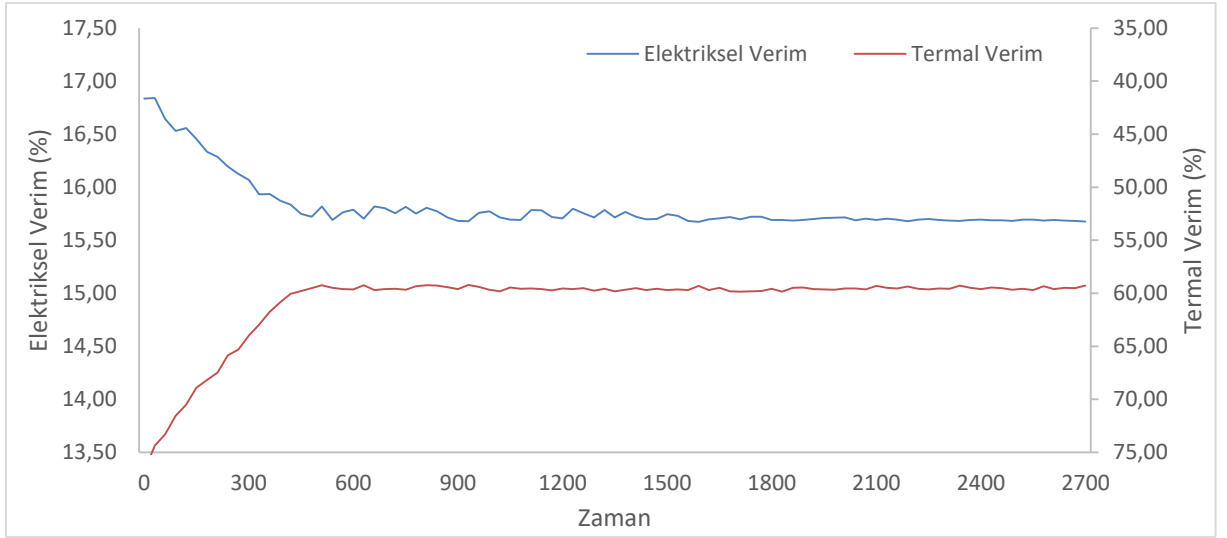
Şekil 125. 800W/m² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s)

%1,5 kFDM içeriğiyle 0,04m/s giriş hızında 800W/m² güneş ışınlamı altında sistemin elektriksel verimi %17,10 değerinden %15,96 değerine kadar gerilerken, termal verimi aynı zaman aralığında %74,59 olan maksimum değerinden %53,47'ye kadar düşmüştür.



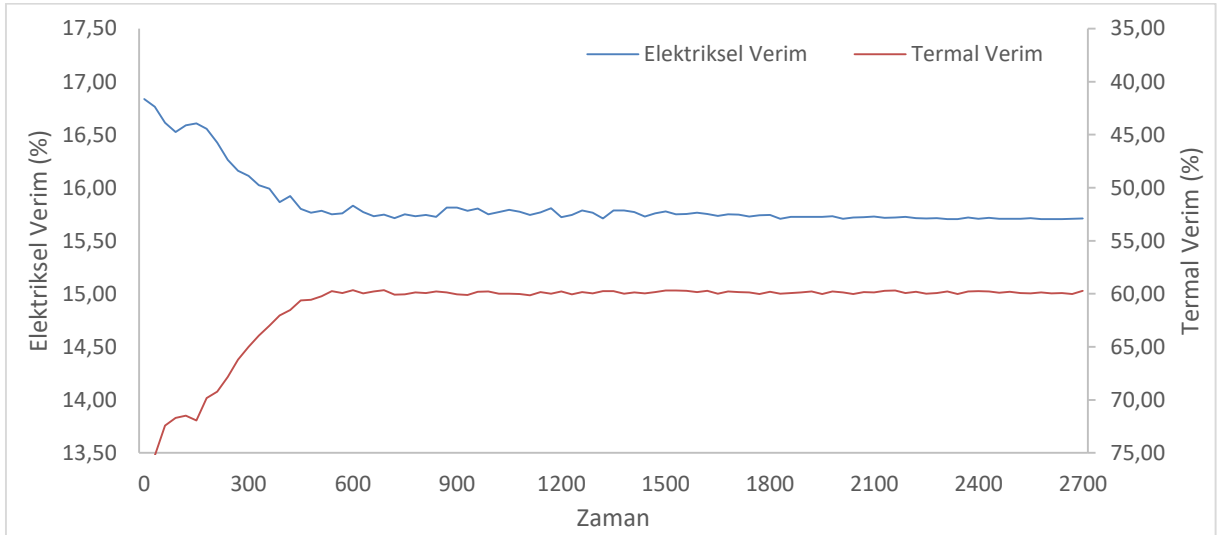
Şekil 126. 800W/m² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,08m/s)

Giriş hızının 0,08m/s değerine yükseltildiği deneylerde ise en yüksek değerleri %17,05 ve aralığında %74,24 olan elektriksel ve termal verimler sırasıyla %15,99 ve %54,01'e gerilemiştir. Beklendiği gibi debinin artışı yüzey sıcaklığında az da olsa ilave bir düşüş getirerek elektriksel verimin marjinal olarak iyileşmesini sağlamıştır. Buna mukabil termal verimde de 0,54 puanlık bir artış ile %1 düzeyinde bir iyileşme görülmüştür.



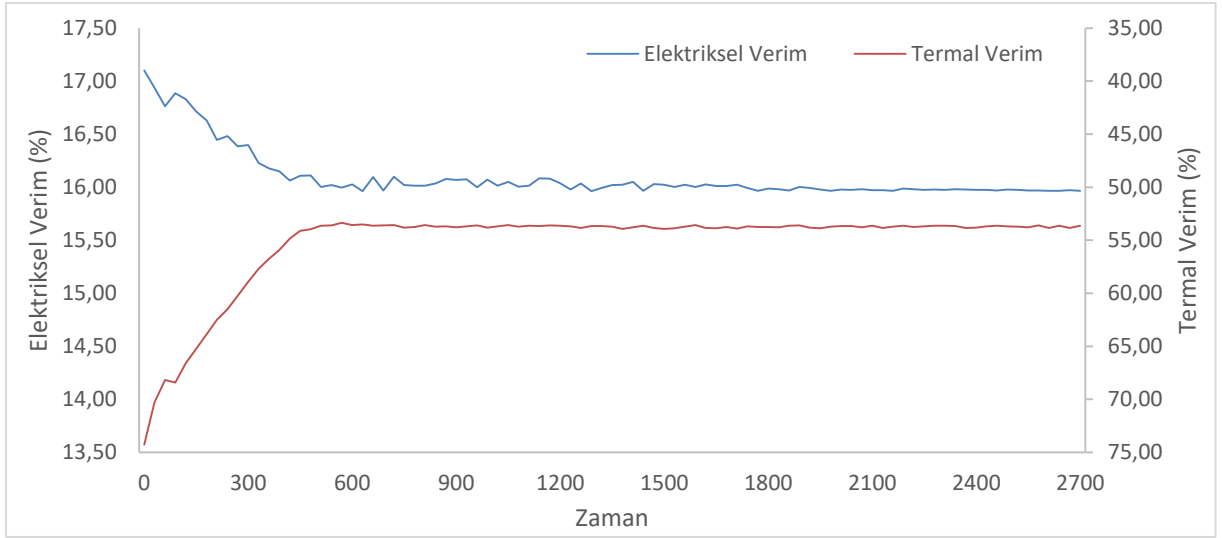
Şekil 127. 1000W/m² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,04m/s)

Diğer kFDM yüzdellerinde olduğu üzere, ışınlam değerindeki artışlar termal verimlerde görece artış meydana getirmekle birlikte çoğu kez daha yüksek hücre sıcaklığına neden olması dolayısıyla elektriksel verimin düşmesine neden olmaktadır. Nitekim termal verim %76,77 gibi bir maksimum değere ulaşırken elektriksel verimin en yüksek değeri %16,84 olarak gerçekleştirmiş ve zamanla hücre sıcaklığının ve buna bağlı olarak elektrik dirençlerinin ve termal kayıpların artmasıyla sırasıyla %59,27 ve %15,68 değerlerine gerilemiştir.



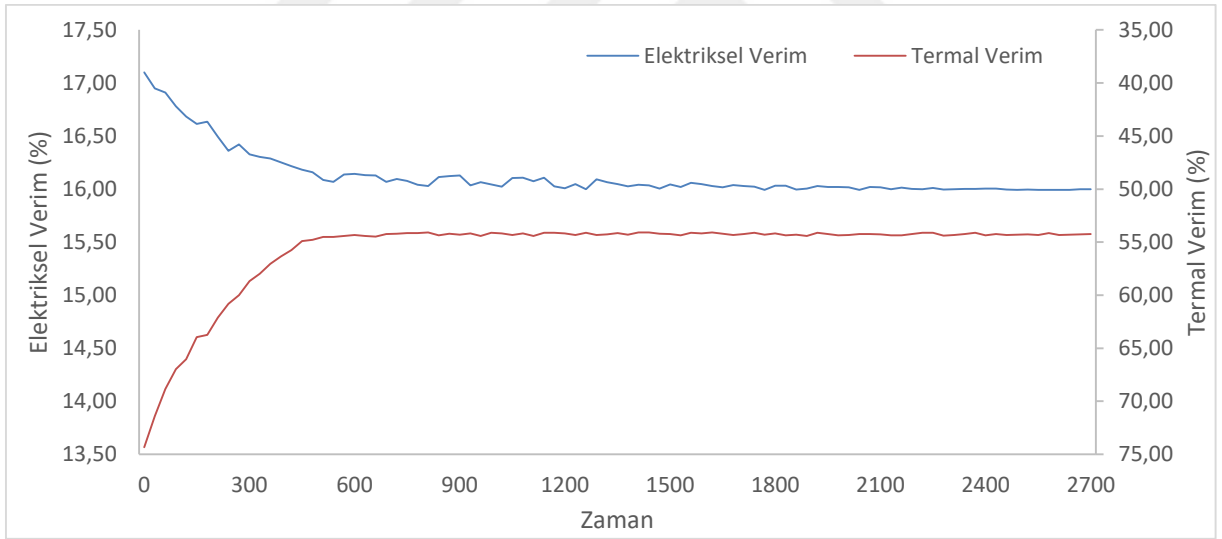
Şekil 128. 1000W/m² güneş ışınlamı altında %1,5'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi (v = 0,08m/s)

Benzer şekilde, 1000W/m² güneş ışınlamı altında 0,08m/s giriş hızındaki elektriksel ve termal verimlerin 800W/m² ışınlam değeri altında aynı giriş hızındaki değerlerine kıyasla oldukça benzer bir değişim gösterdiği görülmektedir.



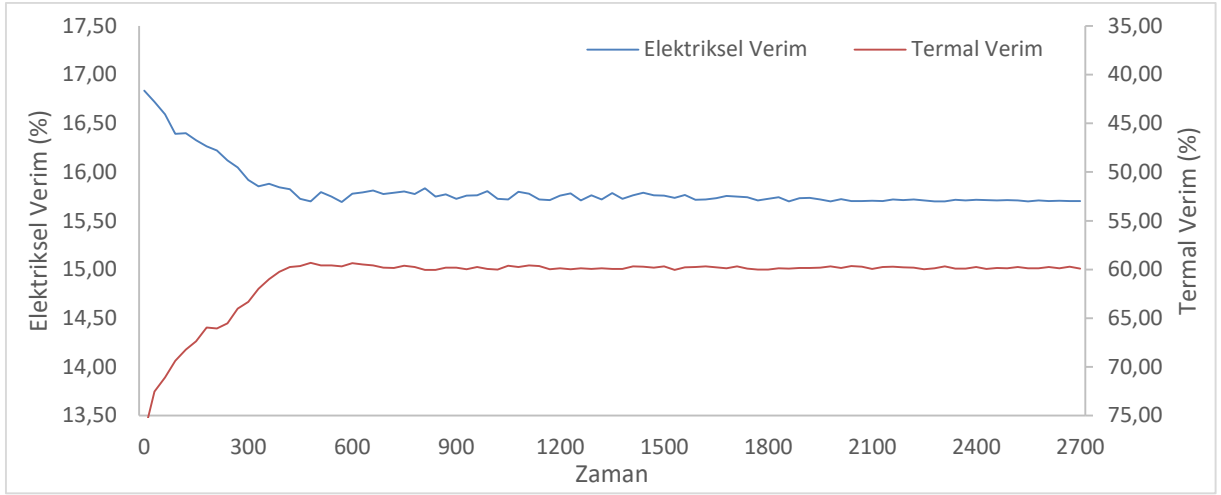
Şekil 129. 800W/m^2 güneş ışınlamı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi ($v = 0,04\text{m/s}$)

%2'lik kFDM-S ile 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,04\text{m/s}$ giriş hızında elde edilen elektriksel ve termal verimler maksimum değerlerinde sırasıyla %17,10 ve %74,28 olurken kararlı durumda %15,97 ve %53,63 olarak hesaplanmıştır.



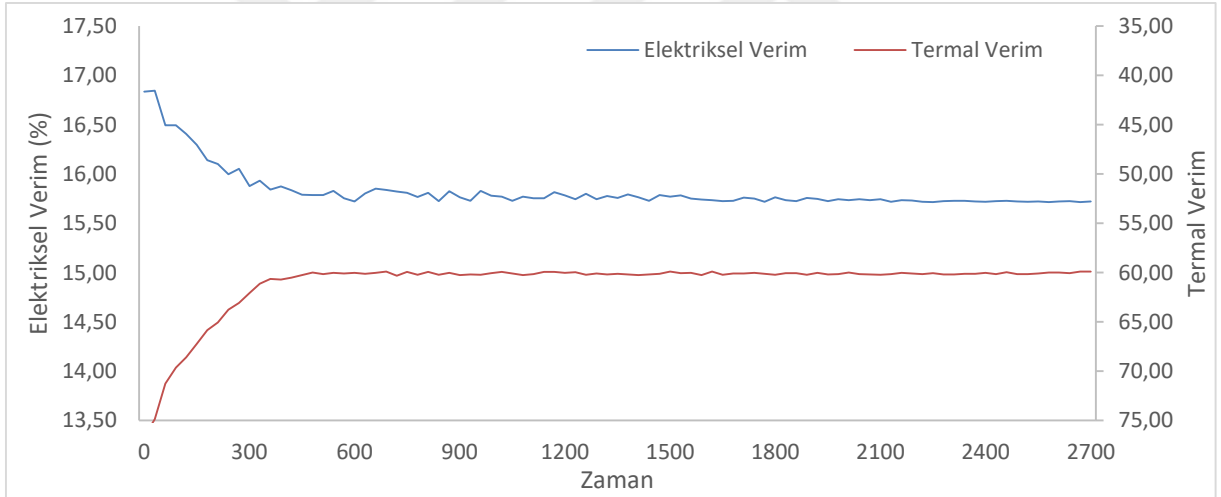
Şekil 130. 800W/m^2 güneş ışınlamı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi ($v = 0,08\text{m/s}$)

$0,08\text{m/s}$ giriş hızında ise %17,10 olan elektriksel verimin %16,00'a, %74,33 olan termal verimin ise %53,23'e düştüğü görülmektedir.



Şekil 131. 1000W/m² güneş ışınlamı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi ($v = 0,04\text{m/s}$)

Işınım değeri 1000W/m² değerine yükseldiğinde ise %1'lik kFDM-S ile 0,04m/s giriş hızında termal verim %76,85 ile %59,92 aralığında bir düşüş gösterirken, elektriksel verimin değişimi %16,84 ile %15,70 arasında ölçülmüştür.



Şekil 132. 1000W/m² güneş ışınlamı altında %2'lik PVT/kFDM-S sisteminin elektriksel ve termal veriminin zamanla değişimi ($v = 0,08\text{m/s}$)

Giriş hızının 0,08m/s değerine yükselmesiyle birlikte elektriksel verim %16,84 ile %15,72'ye, termal verim ise %76,64'ten %59,89'a kadar gerilemiştir.

Performans karşılaştırması

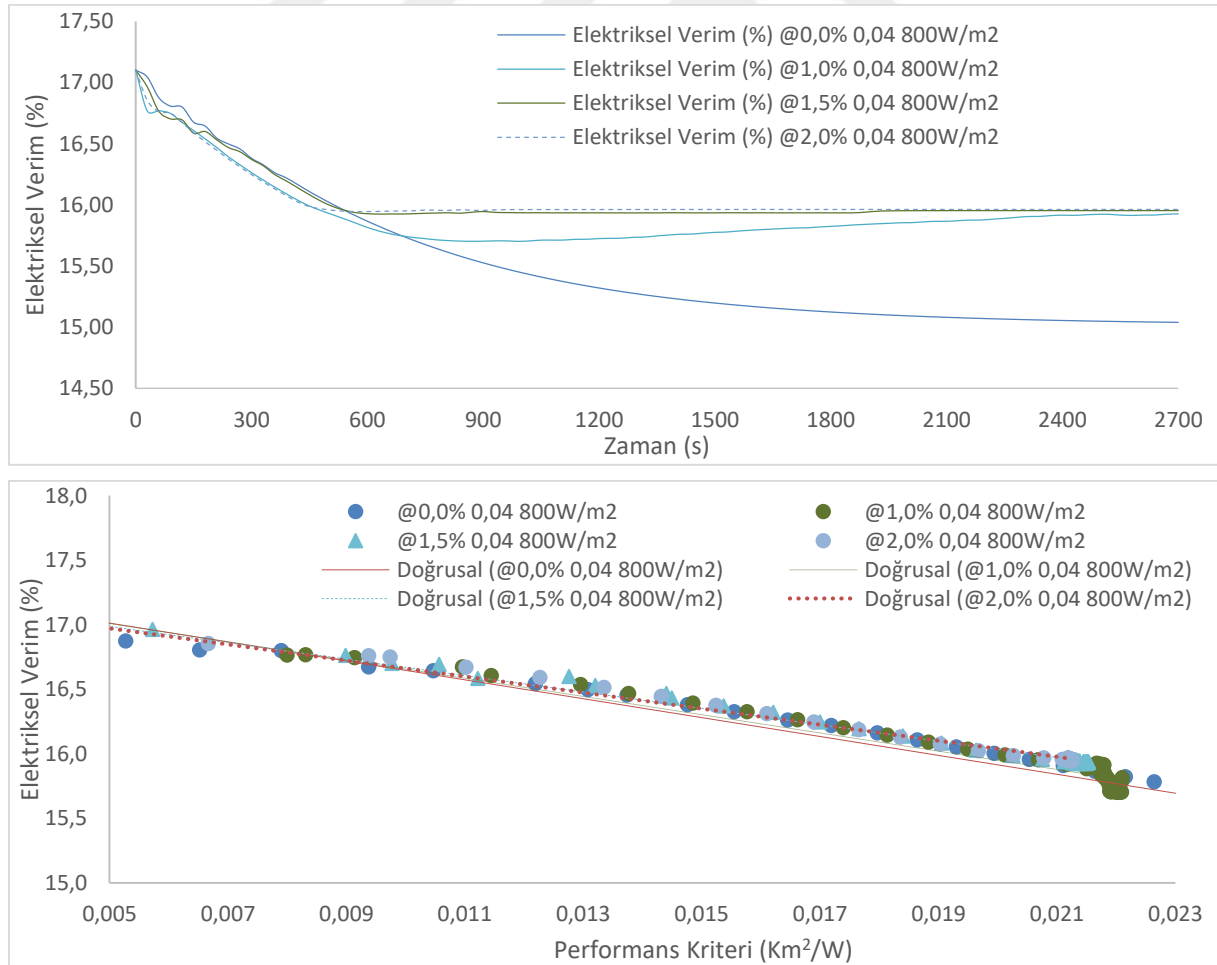
Farklı işletme koşulları ve test parametreleri ile elde edilen güç ve verim değerlerinin birbiri ile karşılaştırılabilmesi bakımından parametrik farklılıkları dışarıda bırakan bir ölçek üzerinde karşılaştırmak gerekir. Bu bakımdan güneş kolektörlerinde ve PVT sistemlerinde elektriksel ve termal verim hesaplamalarında ve karşılaştırmalarında genellikle performans kriteri olarak taşınım ısı kayıplarının bir göstergesi olarak kabul edilmiş olan giriş sıcaklığı

ve ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının güneş ışınlamına oranına karşılık gelen değerlerine göre çizilir.

Bu performans kriterine karşı tüm deneysel sonuçların birlikte gösterilmesi mümkün olmakla birlikte, grafiklerin daha anlaşılır ve kolay yorumlanabilir olması için her bir akışkan giriş hızı (0,04m/s ve 0,08m/s) ve ışınlam değeri (800W/m² ve 1000W/m²) için ayrı ayrı olmak üzere toplam dörder adet farklı grafikte elektrik ve termal performans değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

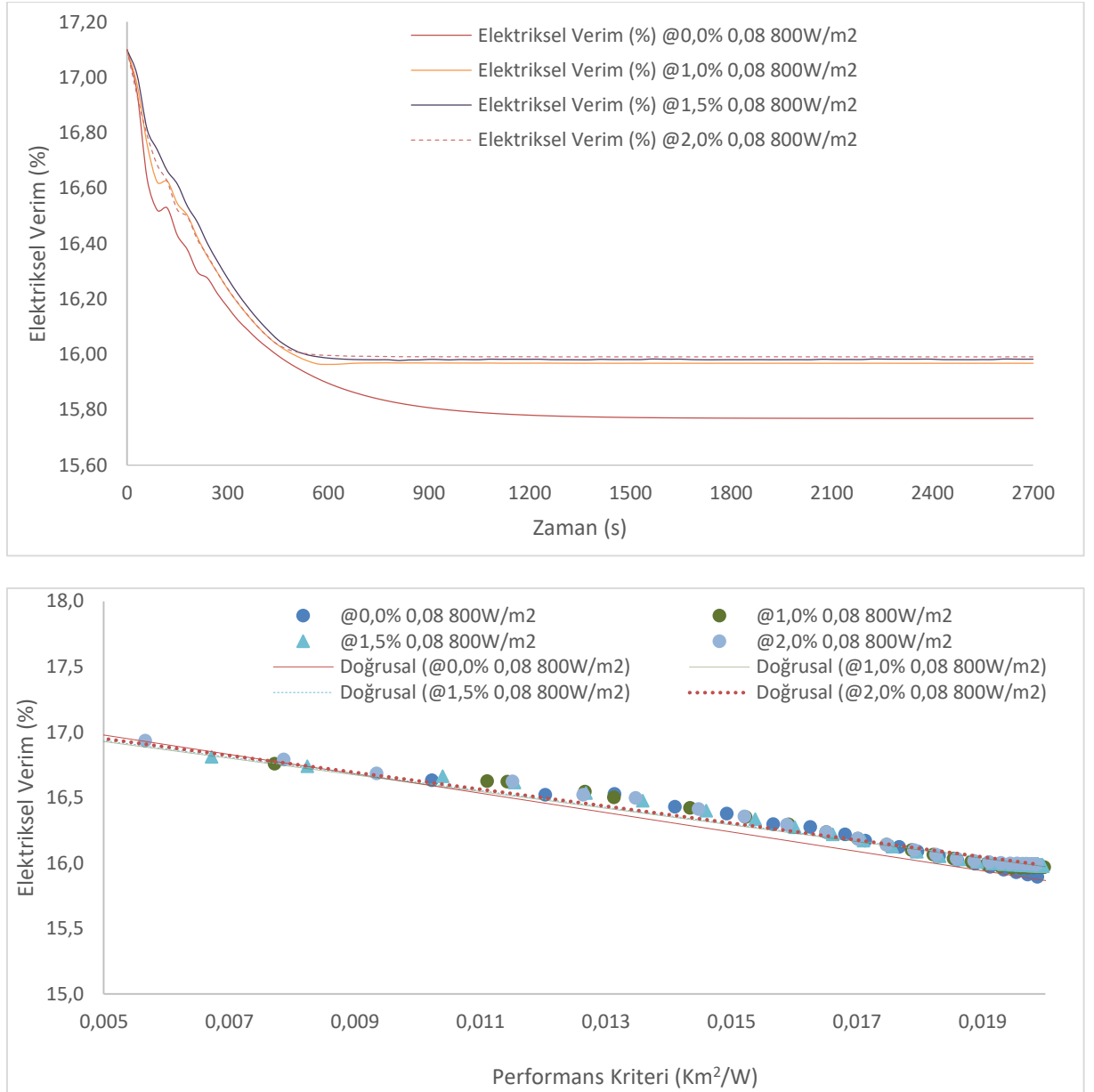
Elektriksel verimlerin karşılaştırması

PVT-kFDM sistemlerinde, giriş hızı ya da akışkan debisi ve güneş ışınlam değeri ile kFDM'nin fiziko-termal özelliklerine bağlı olarak akışkan içerisindeki kesri arasında bir denge gözetilmesi gerekmektedir. Sistemin nispeten küçük olması nedeniyle bu denge daha hassas bir aralıkta kurulmaktadır. Sistemin performansının daha iyi değerlendirilebilmesi açısından, sabit ışınlam değeri ve sabit giriş hızı şartlarında sistemin elektriksel ve termal verimlerinin kFDM içeriğine göre nasıl değiştiği de incelenmiştir.



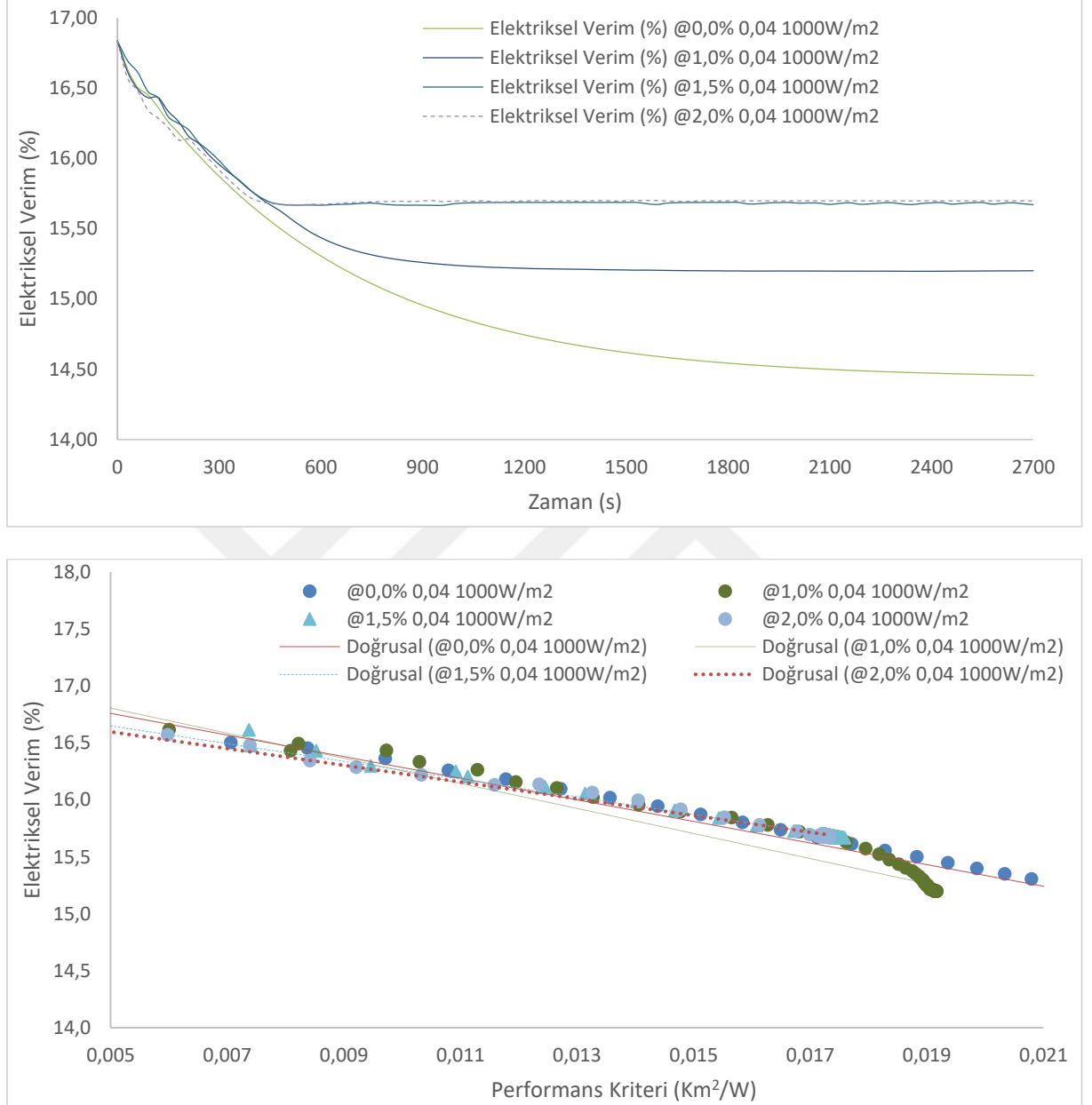
Şekil 133. 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değişimi

Buna göre, 800W/m^2 güneş ışınlımı altında $0,04\text{m/s}$ giriş hızında, başlangıç şartlarından itibaren denge durumuna ulaşınca kadar elektriksel verimdeki düşüşün en küçük olduğu, yani kararlı durumda en yüksek elektriksel verimin elde edildiği kFDM içeriği %2 olarak belirlenirken, %1,5'luk kFDM içeriğine göre iyileşmenin marjinal düzeyde kaldığı görülmektedir. %2'lik kFDM-S ile kararlı durumda elektrik verim %15,96 iken %1,5'luk kFDM-S ile kararlı durumda elde edilen elektriksel verim sadece 0,01 puanlık fark ile %15,95 olarak kaydedilmiştir. kFDM içeriği 0 olan, taşıyıcı akışkan durumunda %15,04 olan elektriksel verim kFDM içeriğindeki artış ile paralel olarak %1, %1,5 ve %2 kFDM kesirlerinde sırasıyla %15,93, %15,95 ve %15,96 seviyelerine iyileşirken sırasıyla %5,92, %6,05 ve %6,12 artış sağlanmıştır.



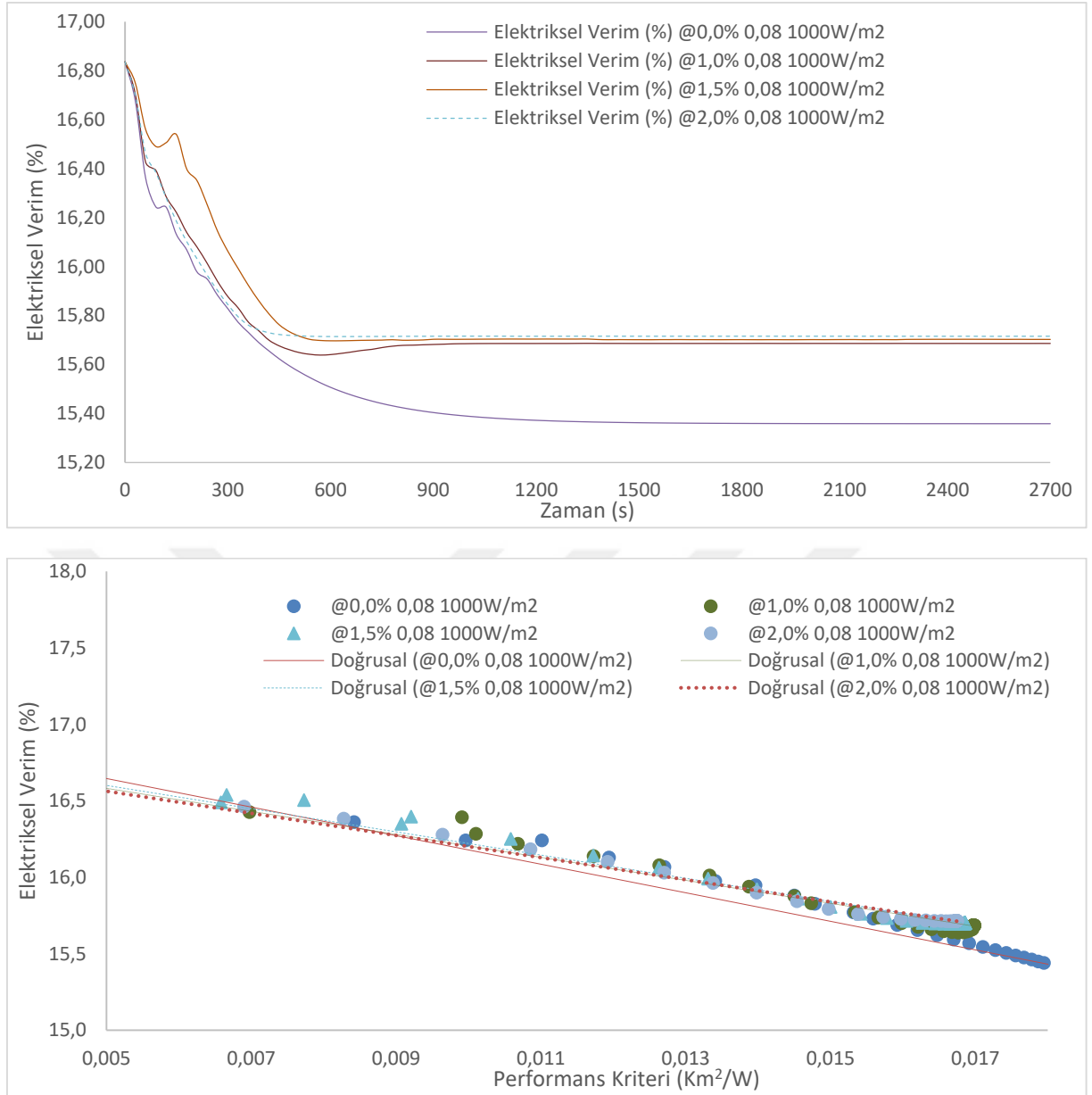
Şekil 134. 800W/m^2 güneş ışınlımı altında $0,08\text{m/s}$ giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değişimi

800W/m² güneş ışınlımı altında 0,08m/s giriş hızında taşıyıcı akışkan durumunda %15,77 olan elektriksel verim, %1, %1,5 ve %2 kFDM kesirleri sırasıyla %15,97, %15,98 ve %15,99 seviyelerine iyileşirken sırasıyla %1,27, %1,33 ve %1,40 artış sağlanmıştır.



Şekil 135. 1000W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değişimi

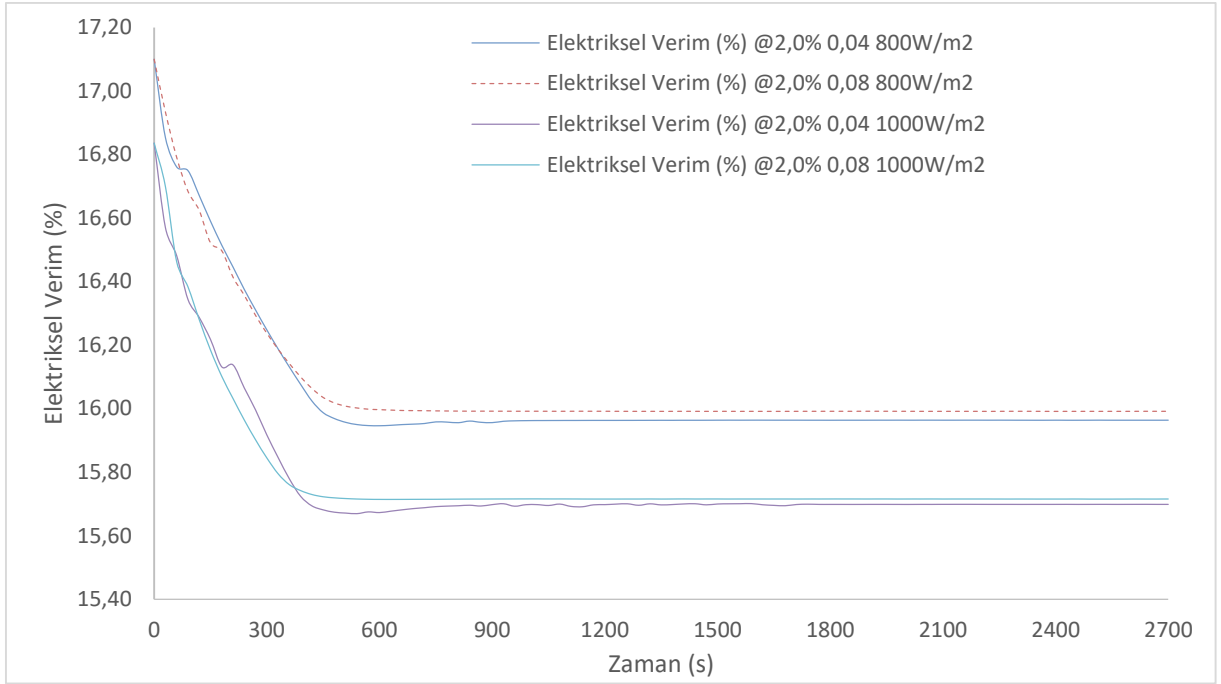
1000W/m² ışınlım altında 0,04m/s giriş hızında kararlı durumda elektriksel verimler tüm kFDM kesirleri için sırasıyla %15,20, %15,67 ve %15,70 olarak gerçekleşirken, su ile yapılan değerlerde elde edilen kararlı durum verimi %14,46 düzeyinde kalmıştır. Bu veriler ışığında, 1000W/m² ışınlım altında 0,04m/s giriş hızında PVT-kFDM-S sisteminin PVT-Su sistemine kıyasla %5,12, %8,37 ve %8,58 daha verimli olduğu görülmüştür.



Şekil 136. 1000W/m² güneş ışınlımı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin elektriksel verimlerinin zamanla değişimi

1000W/m² ışınlım altında 0,08m/s giriş hızında ise PVT-Su sisteminden %15,36 elektriksel verim elde edilirken PVT-kFDM sisteminde %1, %1,5 ve %2'lik kFDM içerikleri için sırasıyla %15,69, %15,70 ve %15,72 elektriksel verim elde edilmiştir. kFDM-S ile sağlanan verim artışı ise %2,15, %2,21 ve %2,34 olarak hesaplanmıştır.

Elektriksel verim grafiklerinden görüldüğü üzere, tüm giriş hızı ve ışınlım değerlerinde %2'lik kFDM-S çözeltisi ile kararlı durumda PVT sisteminden en yüksek elektriksel verim elde edilmiştir.



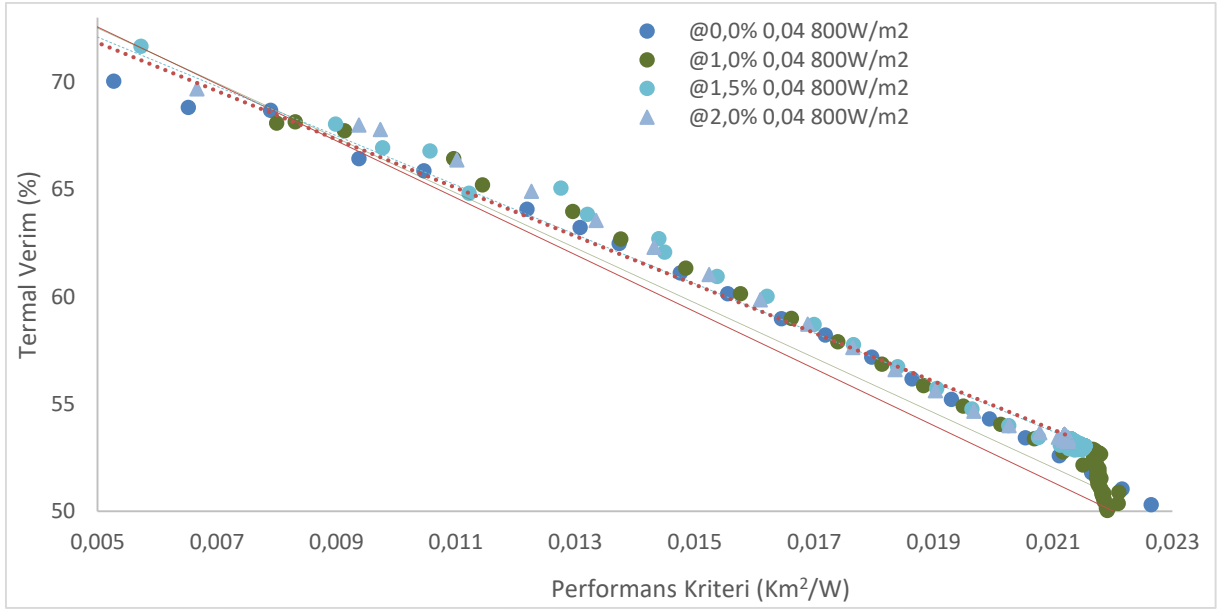
Şekil 137. %2’lik kFDM-S akışkanın tüm ışınlam değerleri ve giriş hızları için PVT sisteminin elektriksel veriminin zamanla değişimi

%2’lik kFDM-S akışkanlar tüm giriş hızı ve güneş ışınlamı değerlerinde elde edilen elektriksel verimler karşılaştırıldığında ise verimin giriş hızı ile doğru orantılı, ışınlam ile ters orantılı olarak arttığı görülmektedir. 0,08m/s giriş hızı ve 800W/m² ışınlam değerinde en yüksek verim %15,99 olarak ölçülürken, 0,04m/s giriş hızı ve 1000W/m² ışınlam değerinde en düşük verim %15,70 olarak ölçülmüştür.

Termal verimlerin karşılaştırması

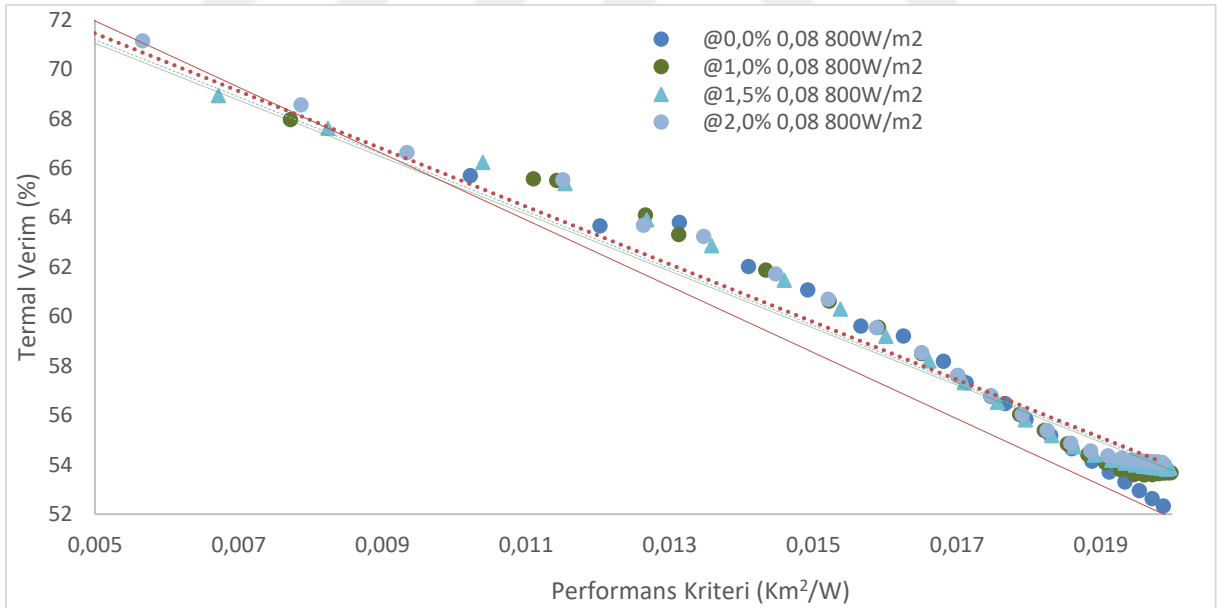
PVT-kFDM-S sistemi PVT-Su sistemi ile termal verim açısından karşılaştırıldığında, kFDM-S akışkanlarla daha yüksek termal verim elde edilebildiği görülmüştür. Performans kriteri olarak birim güneş ışınlamı altında sistemin belirli bir bölgesinde (girişte) elde edilen sıcaklık değeri (T_i) ile ortam sıcaklığı (T_o) arasındaki farkın güneş ışınlam değerine (W/m²) oranı, performans kriteri (Km²/W) olarak alınıp, tüm termal verim eğrileri doğrusallaştırıldığında, her bir PVT-kFDM sisteminin suya ve diğer kFDM-S sistemlerine göre performansının daha üstün olduğu performans kriterleri belirlenebilmektedir.

Performans kriterinin 0 başlangıç değeri itibarıyla PVT-Su sistemlerinin daha yüksek termal verim sağladığı görülebilmektedir. Bununla birlikte, performans kriterinin daha büyük değerleri için PVT-kFDM-S sistemleri daha yüksek termal verim sağlamaktadır.



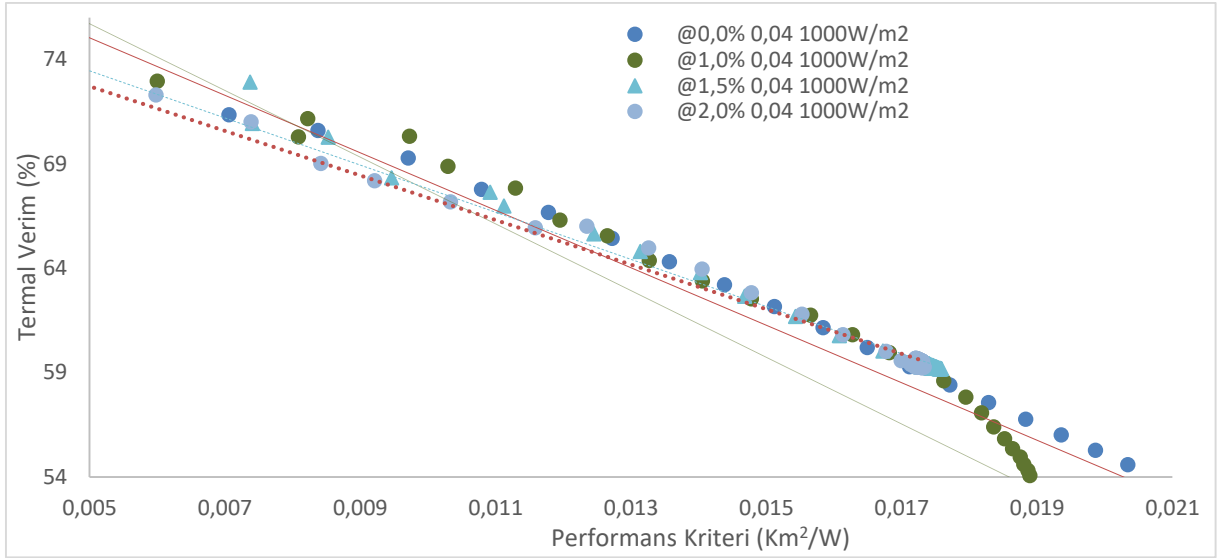
Şekil 138. 800W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı

PVT-kFDM-S sistemi PVT-Su sistemi ile termal verim açısından karşılaştırıldığında, 800W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında yaklaşık 0,008 Km²/W değerinden sonra tüm kFDM-S sistemleri sulu sistemden daha yüksek termal verim sağlamıştır.



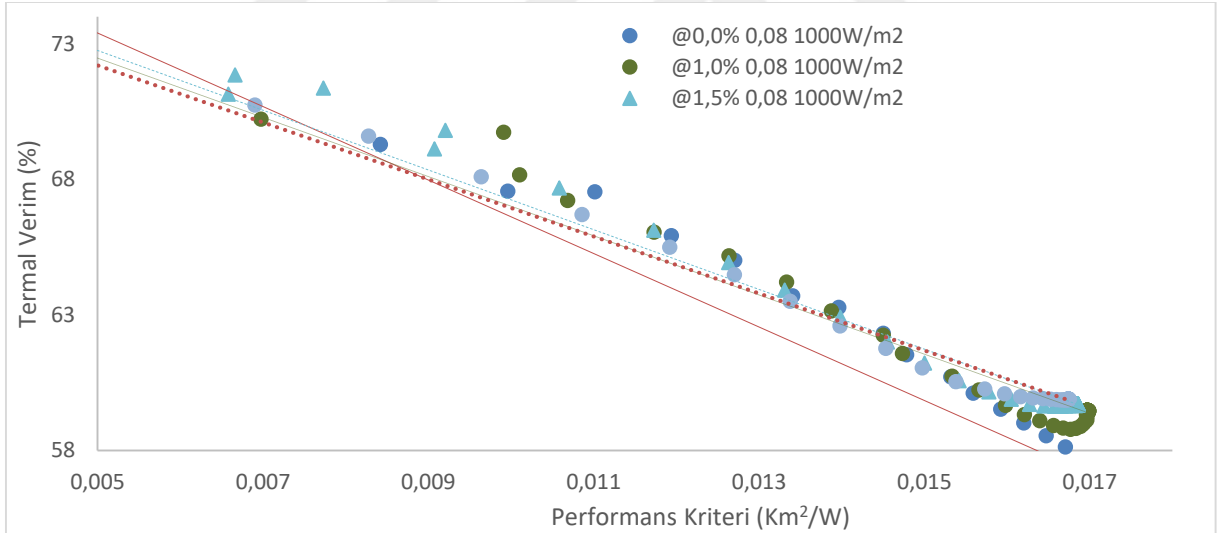
Şekil 139. 800W/m² güneş ışınlımı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı

Aynı ışınlım değeri altında 0,08m/s giriş hızında ise yaklaşık 0,009 Km²/W değerinden sonra tüm kFDM-S sistemlerinin sulu sistemden daha yüksek termal verimle çalıştığı görülmektedir.



Şekil 140. 1000W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı

1000W/m² güneş ışınlımı altında da, giriş hızı değerlerine göre kısmen farklılık göstermekle birlikte 0,009 ila 0,012 aralığındaki bölgenin üzerinde kFDM-S daha yoğun değer üretmekte ve daha yüksek termal verim sağlamaktadır.



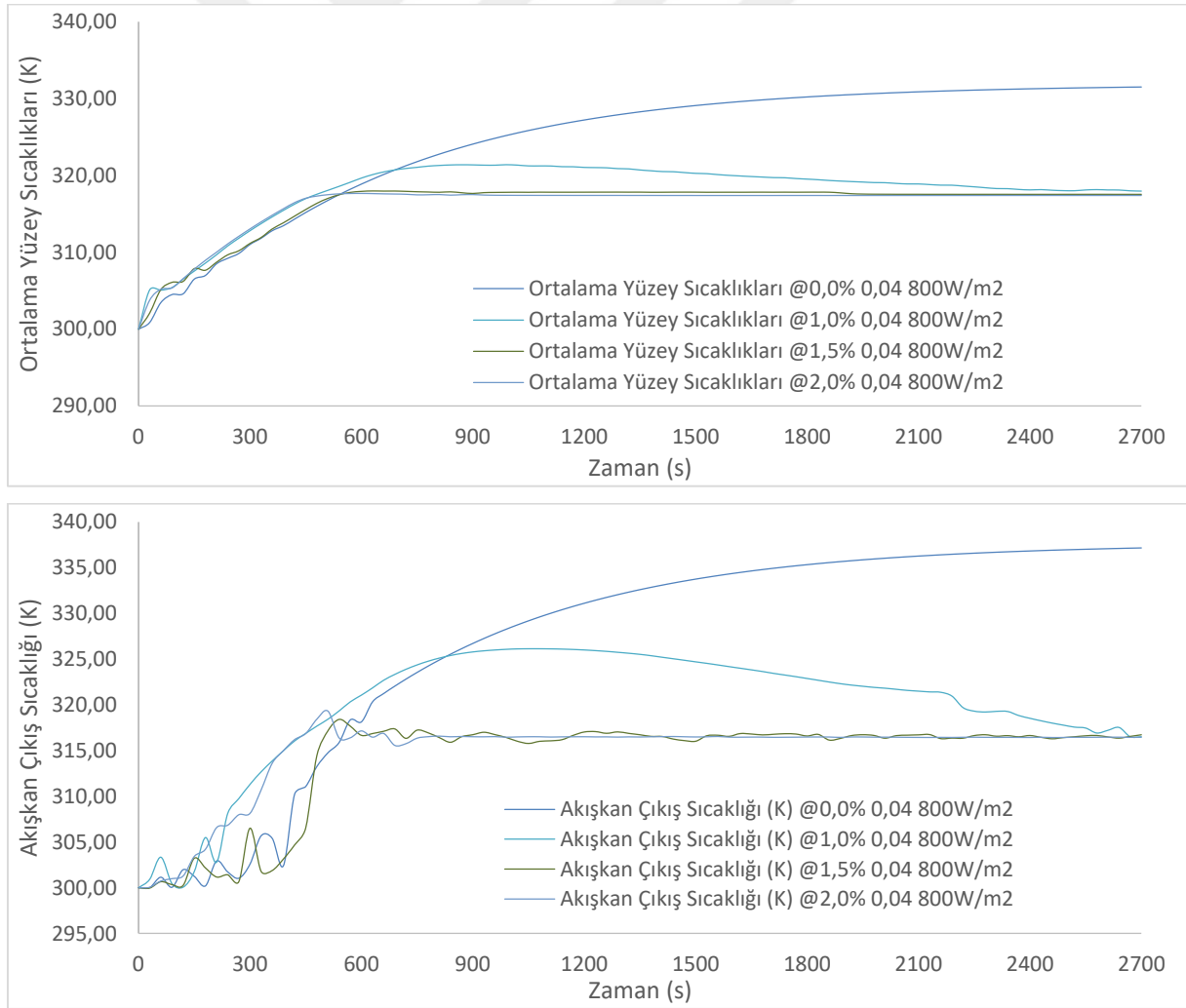
Şekil 141. 1000W/m² güneş ışınlımı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için PVT sisteminin termal performansı

%1,5 ve %2 kFDM içeren akışkanların termal verimlerinin özellikle performans kriterinin daha büyük değerlerinde daha yoğun değer ürettiği görülmektedir. Bu da, belirli bir zaman aralığı boyunca aynı ışınlım değeri ve debi koşulları altında PVT-kFDM-S sistemlerin daha kararlı çalıştığı ve panel sıcaklığının bu zaman aralığında daha uzun süre kararlı halde kaldığı yahut çok daha az değişim gösterdiği anlamına gelmektedir. Akışkan içerisinde yer alan FDM'lerin faz değişimi sırasında sabit sıcaklıkta ısı alıp veriyor olmaları bakımından bu, beklenen bir durumdur.

Akışkan çıkış ve ortalama yüzey sıcaklıkları

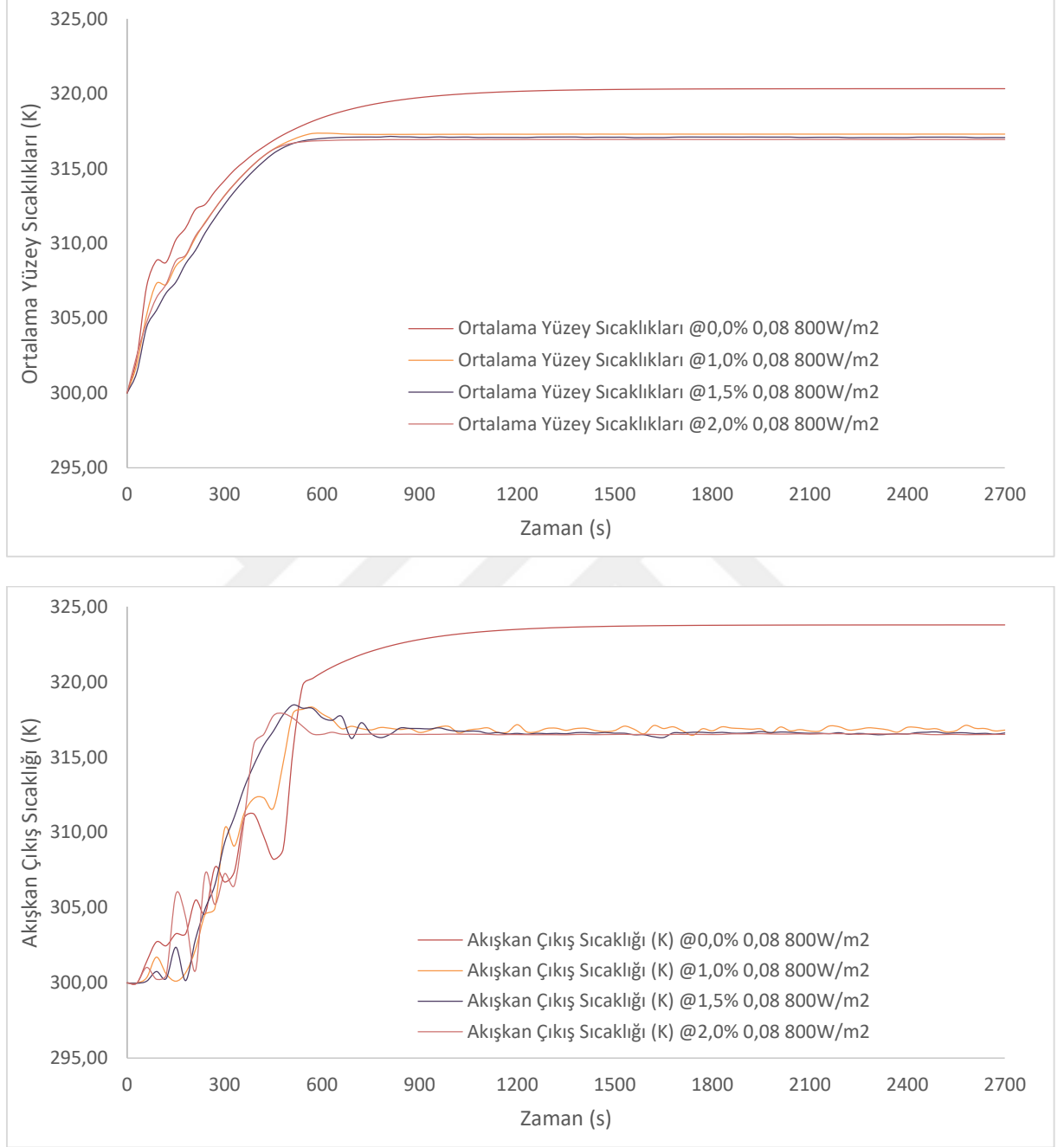
Şekil 142 - Şekil 146 her iki giriş hızı ve güneş ışınlamı değeri için su ve %1, %1,5 ve %2'lik kFDM-S akışkanları için çıkış sıcaklıklarının değişimlerini göstermektedir. kFDM-S çözeltilerinin çıkış sıcaklıkları tüm giriş hızları ve ışınlamı değerleri için suyun çıkış sıcaklığından daha düşük olduğu görülmektedir.

Akışkan giriş hızı ve kFDM-S çözeltisi içerisindeki kFDM konsantrasyonu arttıkça çıkış sıcaklıkları daha fazla düşmüştür. Suya kıyasla, daha fazla ısı taşıma kapasitesine sahip olan kFDM-S'nin aynı giriş hızlarında ve aynı ışınlamı değerleri altında ısı alıcı plakanın ortalama yüzey sıcaklığının da daha düşük kalmasını sağladığı görülmektedir. Su için düşük çıkış sıcaklığı daha yüksek ısı alıcısı yüzey sıcaklığı anlamına gelirken kFDM-S ile gizli ısı çekilmesinden kaynaklı olarak çekilen ısıya mukabil sıcaklığının artmaması PV panelinin hem daha etkin hem de daha homojen soğutulmasını sağlayarak daha yüksek elektriksel verim elde edilmesine de olanak sağlamaktadır.

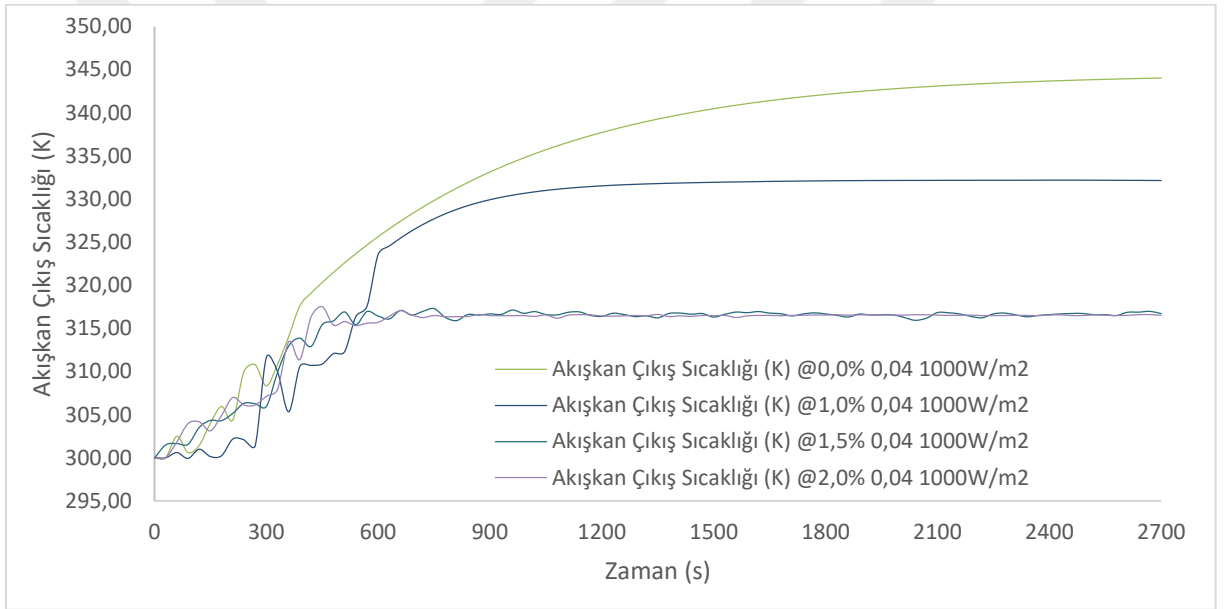
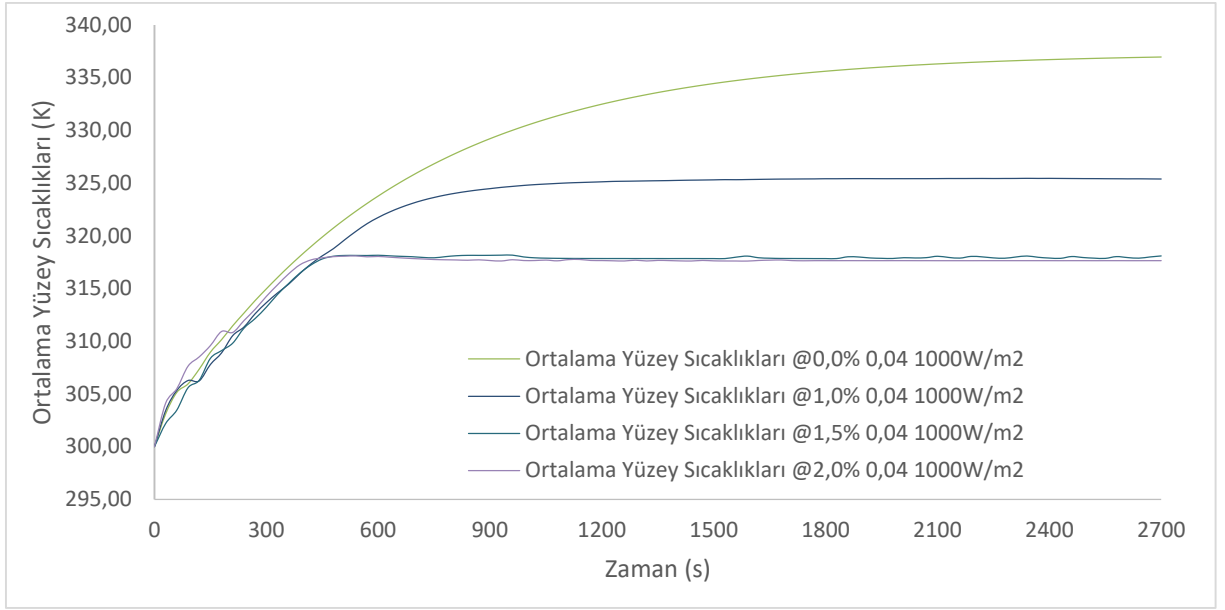


Şekil 142. 800W/m² güneş ışınlamı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları

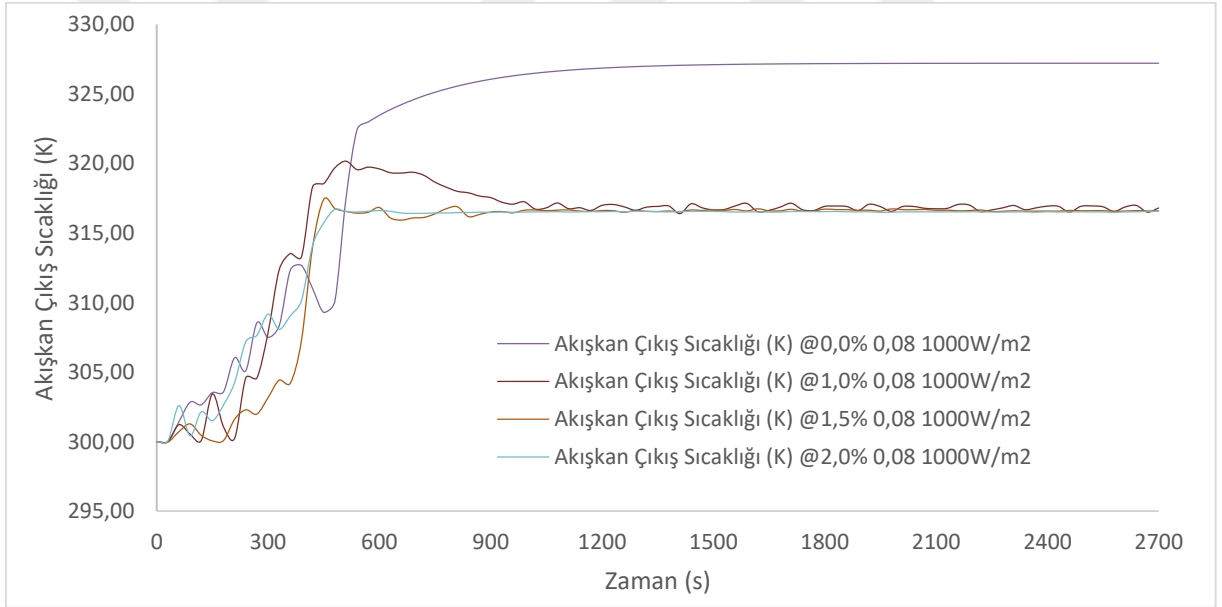
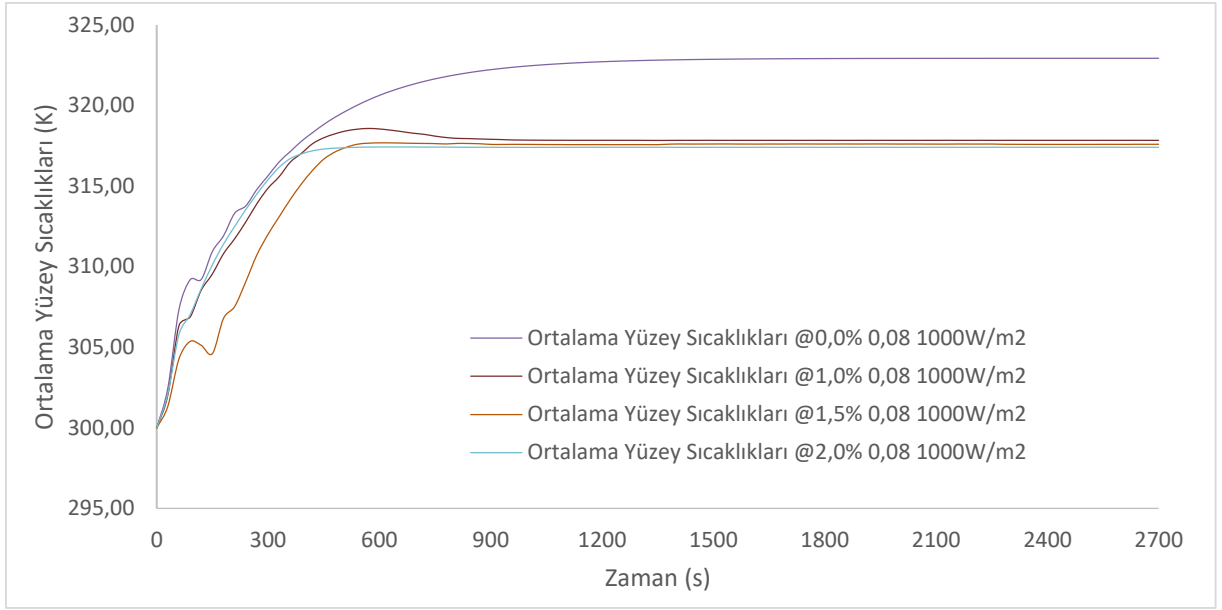
800W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında PVT-su sisteminde çıkış suyu sıcaklığı 337,14K ve ortalama yüzey sıcaklığı 331,49K iken %2'lik kFDM-S çözeltisi ile çıkış suyu sıcaklığı 316,46 K'ye ortalama yüzey sıcaklığı ise 317,37K'ye düşmüştür.



Şekil 143. 800W/m² güneş ışınlımı altında 0,08m/s giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları

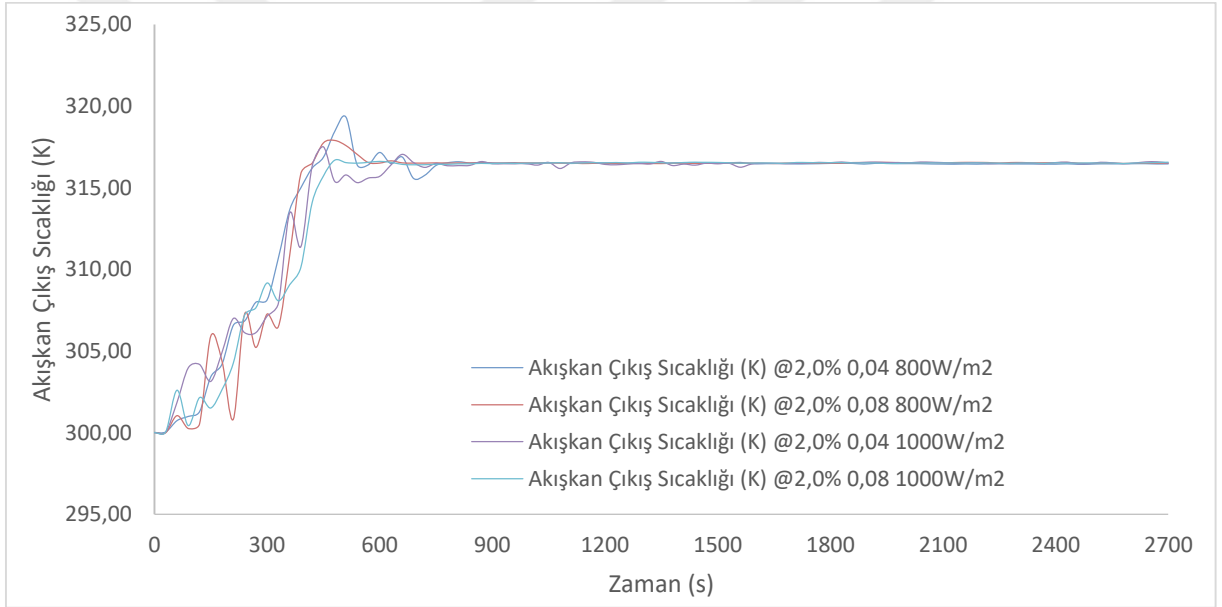
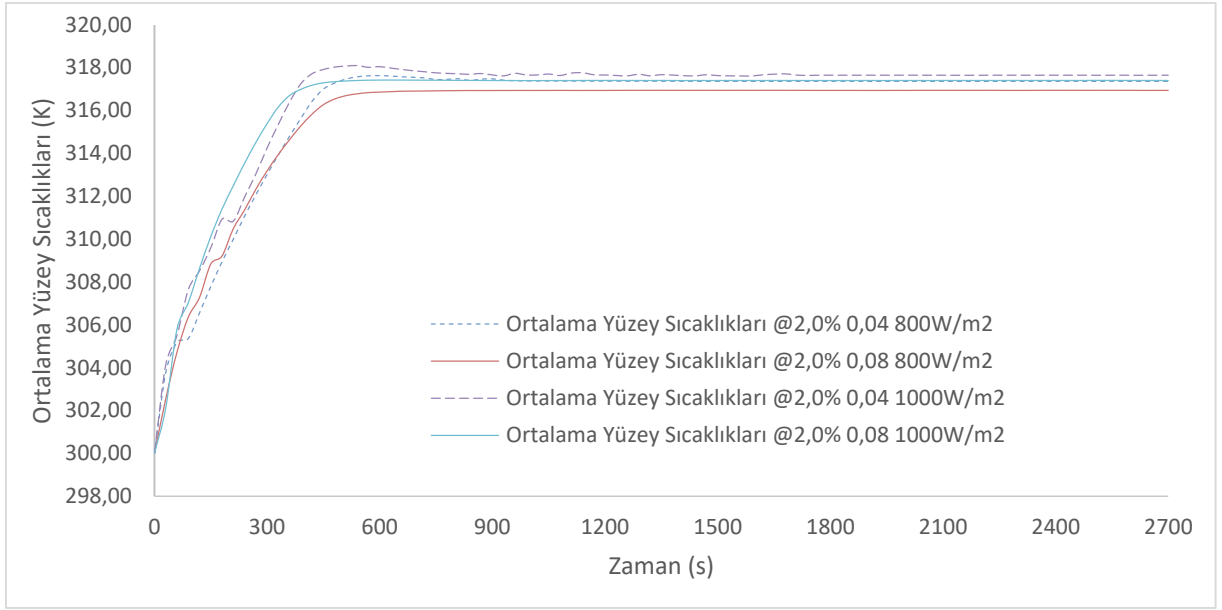


Şekil 144. 1000W/m² güneş ışınlımı altında 0,04m/s giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları



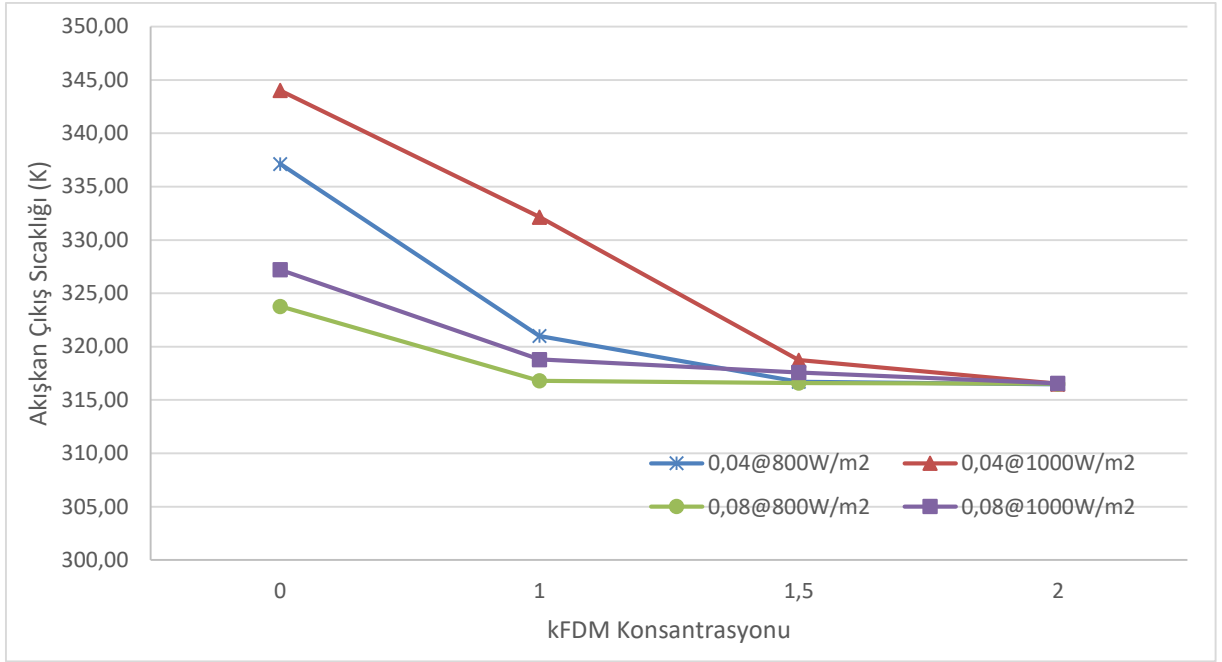
Şekil 145. 1000W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,08\text{m/s}$ giriş hızında tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları

Tüm giriş hızı ve güneş ışınlamı değerlerinde tüm akışkanlar için ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimleri karşılaştırılarak değerlendirildiğinde, akışkan çıkış sıcaklığı ve ortalama yüzey sıcaklıklarının kFDM-S durumunda birbirine en yakın olduğu görülmektedir.



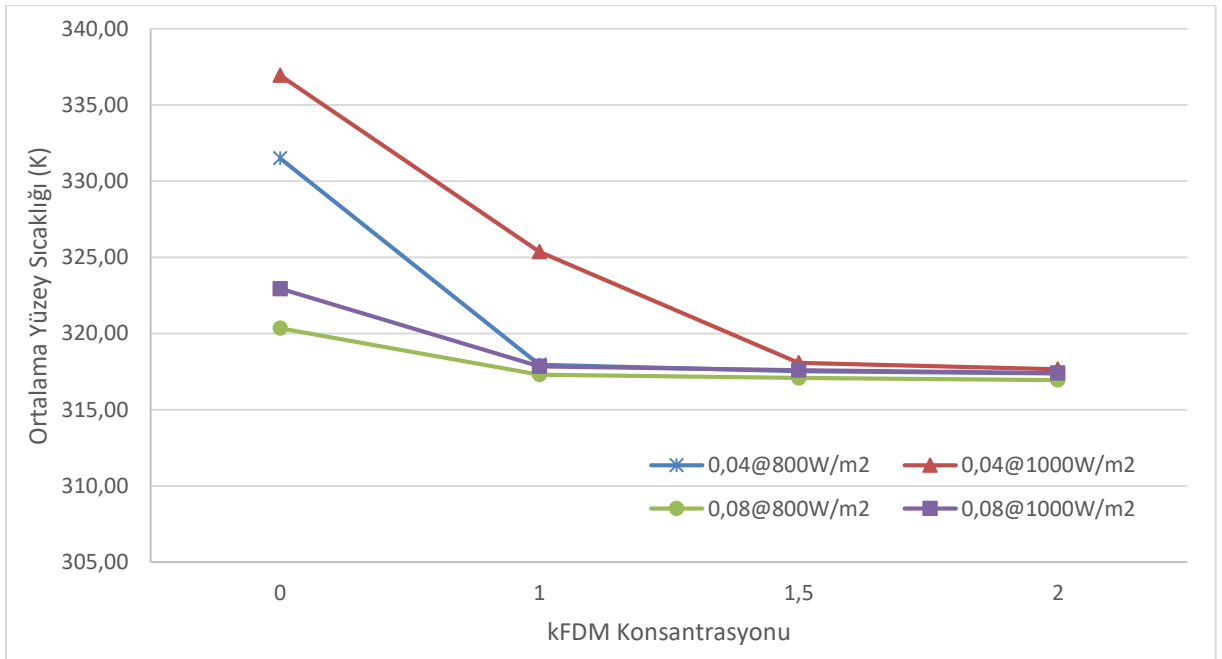
Şekil 146. %2'lik kFDM-S akışkanın tüm ısıtım değerleri ve giriş hızları için ortalama yüzey sıcaklıkları ve kFDM-S çıkış sıcaklıkları

Ortalama yüzey sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklıkları ısıtım ile doğru, giriş hızı ve kFDM kesri ile ters orantılı değişmiştir. Elektriksel ve termal verimlerin en yüksek değerinde ölçüldüğü %2'lik kFDM-S durumunda en yüksek ortalama yüzey sıcaklığı 0,04m/s giriş hızı ve 1000W/m² güneş ışıınımı şartlarında gerçekleşmiştir.



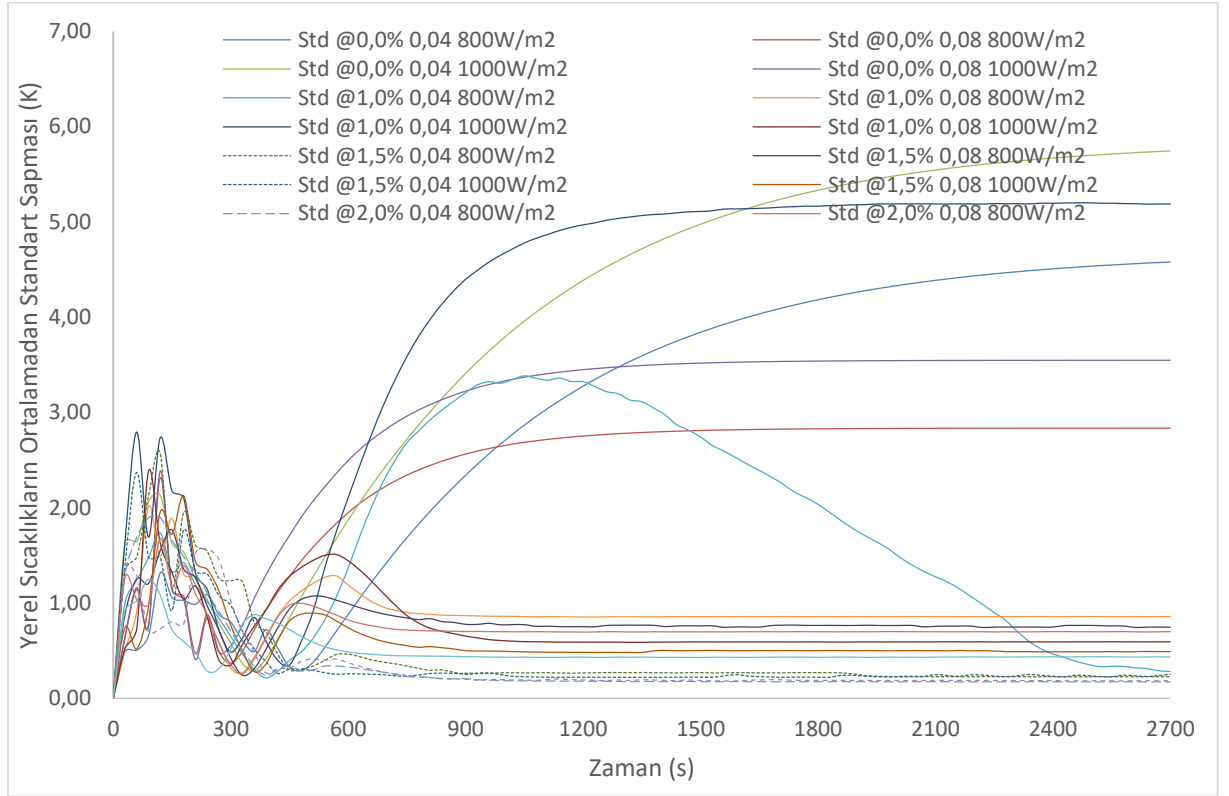
Şekil 147. kFDM konsantrasyonuna göre akışkan çıkış sıcaklıkları

Su ve %1, %1.5 ve %2'lik kFDM-S akışkanları akışkan çıkış sıcaklığı ve ortalama yüzey sıcaklıkları açısından karşılaştırıldıklarında en yüksek akışkan çıkış sıcaklığının su ile 1000W/m² güneş ışınlamı ve 0,04m/s giriş hızı şartlarında elde edildiğini, en düşük akışkan çıkış sıcaklığının ise 800W/m² güneş ışınlamı ve 0,08m/s giriş hızı şartlarında yine su ile elde edildiği görülmektedir. Dammel and Stephan (2010) mini-kanallar içerisinde akan kFDM-S akışkanına olan ısı transferini incelediği çalışmasında artan kFDM konsantrasyonuna karşılık akışkan çıkış sıcaklığının düştüğünü göstermiştir.



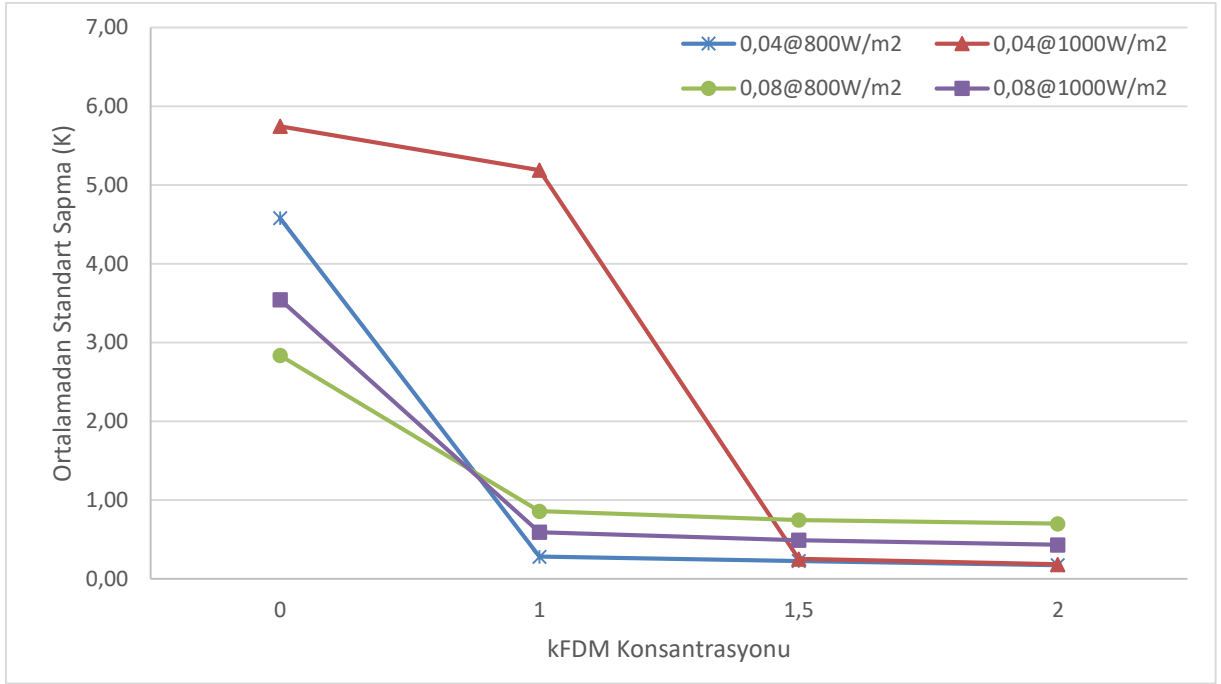
Şekil 148. kFDM konsantrasyonuna göre ortalama yüzey sıcaklıkları

Ortalama yüzey sıcaklıklarının da giriş hızı ve ışıınım koşulları altında akışkan çıkış sıcaklığı ile çok benzer şekilde değişmekle birlikte, akışkan içerisindeki kFDM kesri arttıkça giriş hızı ve ışıınım parametrelerinin etkilerinin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Feng et al. (2021) yeni bir soğutma sıvısı olarak FDM nanoemülsiyonları kullandığı çalışmasında yaklaşık 90C olan PV ortalama sıcaklığını 45C dolayına düşürdüğünü raporlamıştır. Ortalama sıcaklığın düşmesi önemli olmakla birlikte, yerel ortalama değerlerin birbirine yakınlığı, tekil değerlerin ortalamadan standart sapmalarının değeri özdeş ısı dağılımı ve soğutmanın elde edilip edilemediğini değerlendirmek bakımından önemlidir.



Şekil 149. Plaka üzerindeki 12 farklı ölçüm noktası sıcaklıklarının ortalama yüzey sıcaklığından standart sapması

Tüm ışıınım değerleri ve giriş hızı şartlarında su ve %1, %1,5 ve %2'lik kFDM-S akışkanlar için plaka üzerindeki ölçüm noktalarının sıcaklık değerlerinin ortalama yüzey sıcaklığı değerinden standart sapmaları **Şekil 149**'da verilmiştir. Hem %1,5'lik hem de %2'lik kFDM-S akışkanlar için her iki ışıınım değeri altında da 0,04m/s giriş hızı değerinde elde edilen standart sapmalar oldukça küçük ve birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. En küçük standart sapmalar %2'lik kFDM-S ile 0,04m/s giriş hızı ve 800W/m² ışıınım koşullarında gerçekleşmiştir.

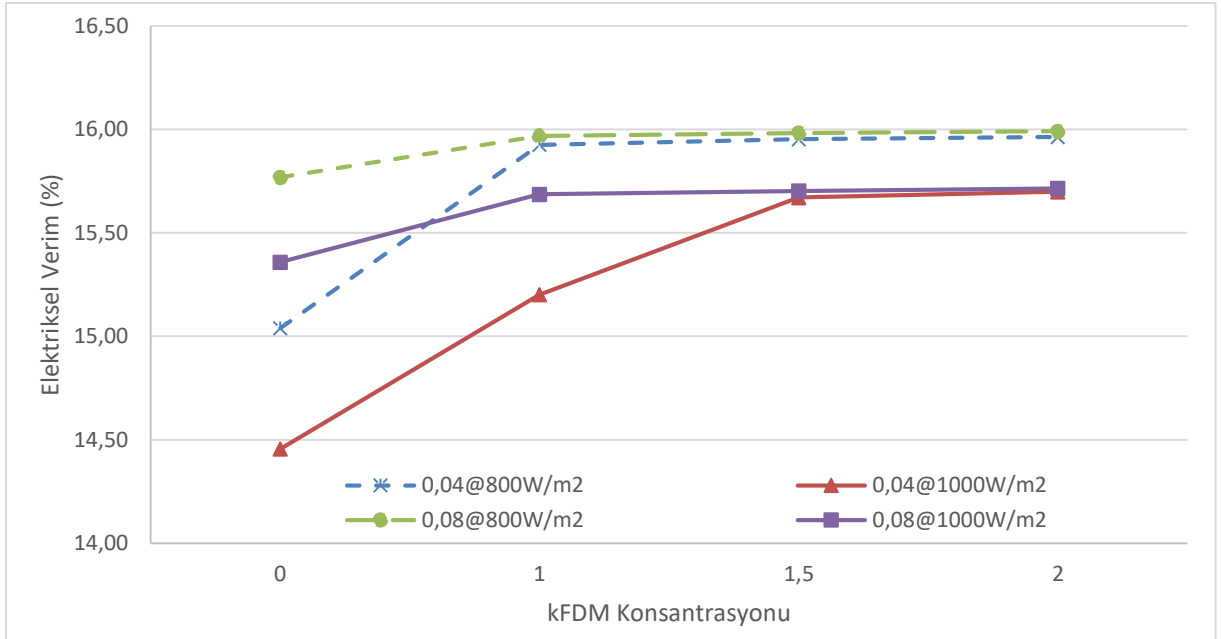


Şekil 150. kFDM konsantrasyonuna göre plaka üzerindeki farklı sıcaklık değerlerinin ortalama yüzey sıcaklığından standart sapması

Diğer karşılaştırma kriterlerinde de olduğu üzere, %1,5'lik kFDM-S ile %2'lik kFDM-S arasındaki iyileştirme 800W/m² ısıtım ve 0,04m/s giriş hızı şartlarında marjinal düzeydedir.

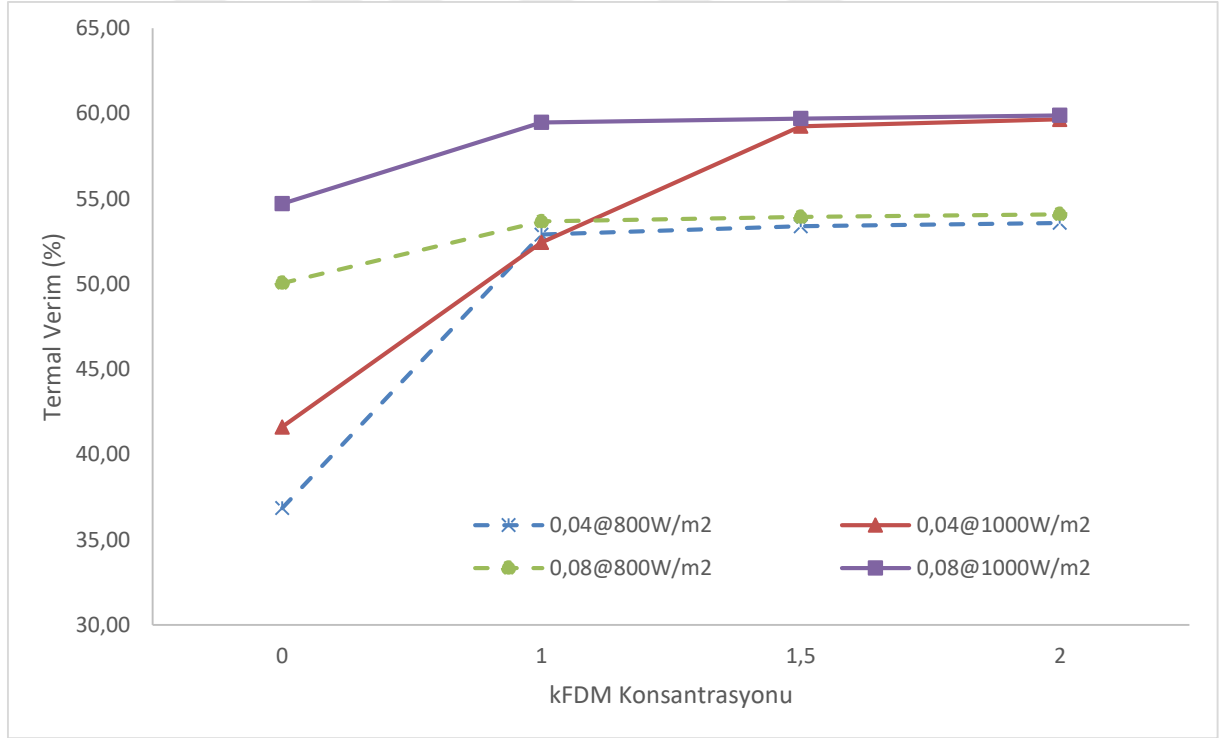
Verimlilik karşılaştırması

PVT sisteminin su, %1'lik kFDM-S, %1,5'lik kFDM-S ve %2'lik kFDM-S için elektriksel ve termal verimler tüm ısıtım ve giriş hızı şartlarında karşılaştırılmıştır.



Şekil 151. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ısıtım şartlarında elektriksel verim

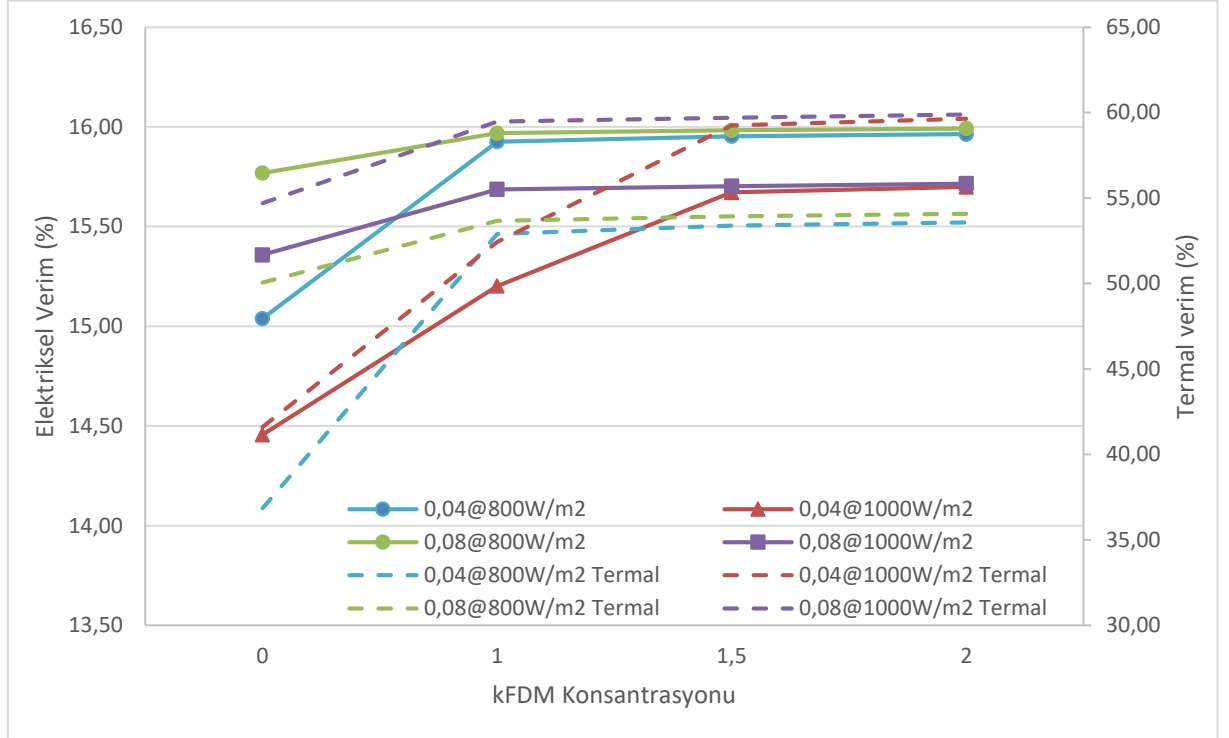
PVT-Sulu sistem, 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,04\text{m/s}$ giriş hızında %15,4, $0,08\text{m/s}$ giriş hızında ise %15,77 elektriksel verim sağlamıştır. Işınlam 1000W/m^2 değerine yükseldiğinde ise aynı giriş hızlarında elektriksel verimler %14,46 ve %15,36 olarak elde edilmiştir. kFDM içeriğindeki artışla birlikte %1'lik kFDM-S ile suya kıyasla önemli ölçüde iyileşme sağlandığı görülmektedir. %1'lik kFDM-S ile $0,04\text{m/s}$ ve $0,08\text{m/s}$ giriş hızlarında 800W/m^2 ışınlam altında sırasıyla %15,93 ve %15,97 verim elde edilirken %1,5'luk kFDM-S ile %15,95 ve %15,98, %2'lik kFDM-S ileyse %15,96 ve %15,99 verim elde edilmiştir. 1000W/m^2 ışınlam altında $0,04\text{m/s}$ ve $0,08\text{m/s}$ giriş hızlarında elde edilen verimler ise; %1'lik kFDM-S için %15,20 ve %15,69, %1,5'luk kFDM-S için %15,67 ve %15,70, ve %2'lik kFDM-S için %15,70 ve %15,72 olmuştur. %1'lik kFDM-S ile $0,04\text{m/s}$ giriş hızında 1000W/m^2 ışınlam altında önemli miktarda duyulur ısı artışı olmasına karşın gizli ısı çekme açısından potansiyel varlığı görülmektedir. Diğer konfigürasyonlarda %1'den sonraki kFDM kesirlerinin verim artışı bakımından etkisinin daha sınırlı olduğu söylenebilir.



Şekil 152. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ışınlam şartlarında termal verim

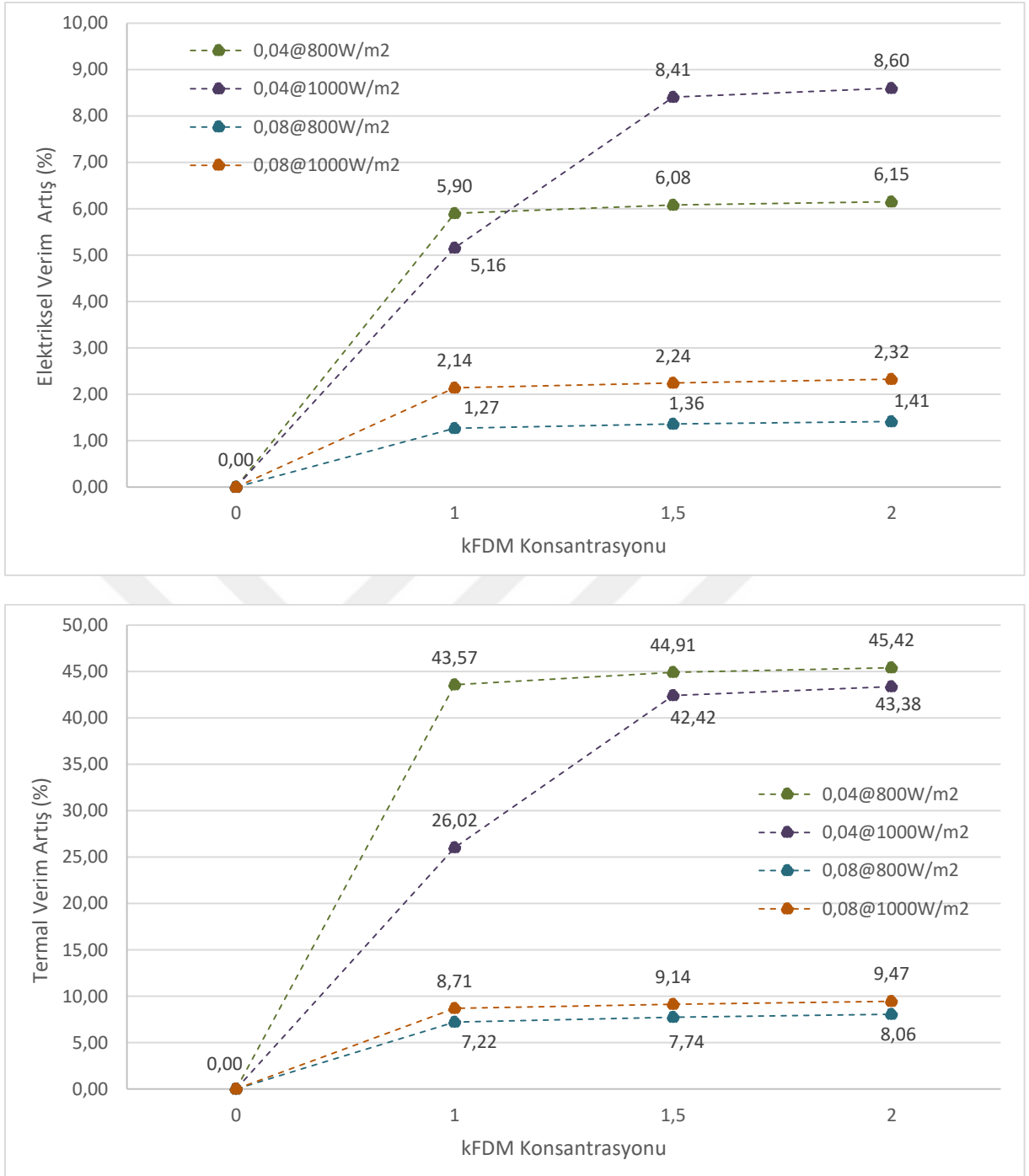
PVT-Sulu sistem, 800W/m^2 güneş ışınlamı altında $0,04\text{m/s}$ giriş hızında %36,84, $0,08\text{m/s}$ giriş hızında ise %50,05 termal verim sağlamıştır. Işınlam 1000W/m^2 değerine yükseldiğinde ise aynı giriş hızlarında termal verimler %41,60 ve %54,71 olarak elde edilmiştir. %1'lik kFDM-S ile $0,04\text{m/s}$ ve $0,08\text{m/s}$ giriş hızlarında 800W/m^2 ışınlam altında sırasıyla %52,90 ve %53,66 verim elde edilirken %1,5'luk kFDM-S ile %53,39 ve %53,92, %2'lik kFDM-S ileyse %53,58 ve %54,08 termal verim elde edilmiştir. 1000W/m^2 ışınlam altında

0,04m/s ve 0,08m/s giriş hızlarında elde edilen verimler ise; %1'lik kFDM-S için %52,43 ve %59,47, %1,5'luk kFDM-S için %59,25 ve %59,71 ve %2'lik kFDM-S için %59,65 ve %59,89 olmuştur.



Şekil 153. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ısıtım şartlarında elektriksel ve termal verimlerin değişimi

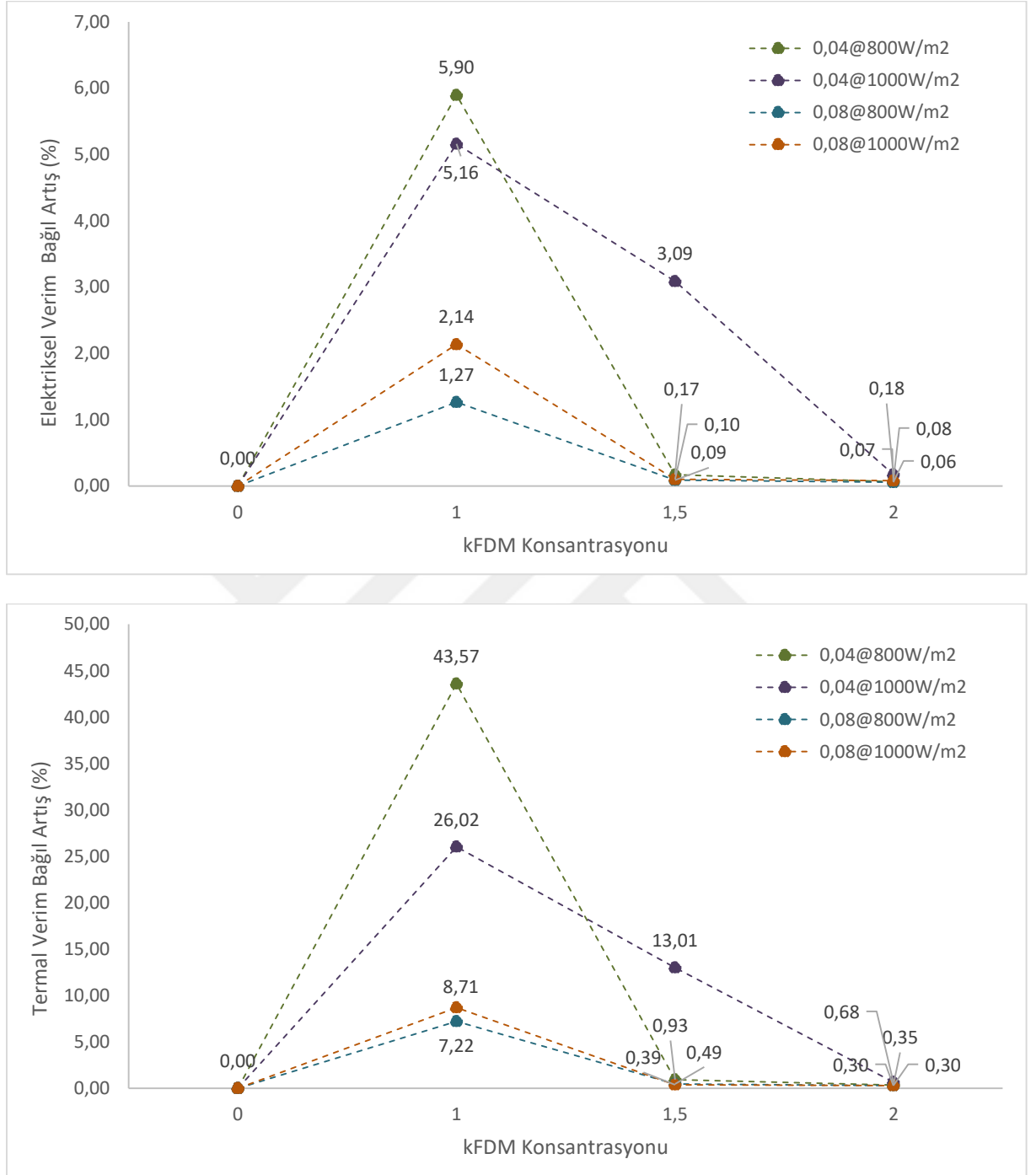
Şekil 153'da tüm elektriksel ve termal verimlerin kFDM konsantrasyonuna göre değişimleri verilmiştir. kFDM-S'lerin ısı transfer özellikleri çözelti içerisindeki kFDM kesri ile doğru orantılı olarak artmaktadır (Languri et al., 2013). Buna bağlı olarak, kFDM konsantrasyonunun artması daha büyük ısı transferi ve daha düşük yüzey sıcaklığı sağlamıştır (Dammel & Stephan, 2010). Ancak, elde edilen iyileştirmelerin anlamlılık düzeylerinin daha iyi değerlendirilebilmesi bakımından iyileştirme oranlarının suya ve bir önceki kFDM kesrine göre yüzdece değişimleri Şekil 154'de verilmiştir.



Şekil 154. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ışıınım şartlarında elektriksel ve termal verimlerin PVT-Sulu sisteme göre yüzde değişimleri

Bu çalışmada, PVT-Su sistemine kıyasla kFDM-S ile hem termal verimde hem de elektriksel verimde önemli artışlar elde edilmiştir. Elektriksel verimdeki en büyük artış %8,60 artış ile %2'lik kFDM-S ile 1000W/m² ışıınım ve 0,04m/s giriş hızı koşullarında elde edilmiştir. Termal verimdeki en büyük artış ise 800W/m² ışıınım ve 0,04m/s giriş hızı koşullarında yine %2'lik kFDM-S ile elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında düşük giriş hızı değerlerinde hem termal hem de elektriksel verimde yüksek giriş hızı değerlerine kıyasla daha büyük artışlar elde edilmiştir. Aynı giriş hızında, ışıınım değerleri karşılaştırıldığında termal verim artışları yüksek

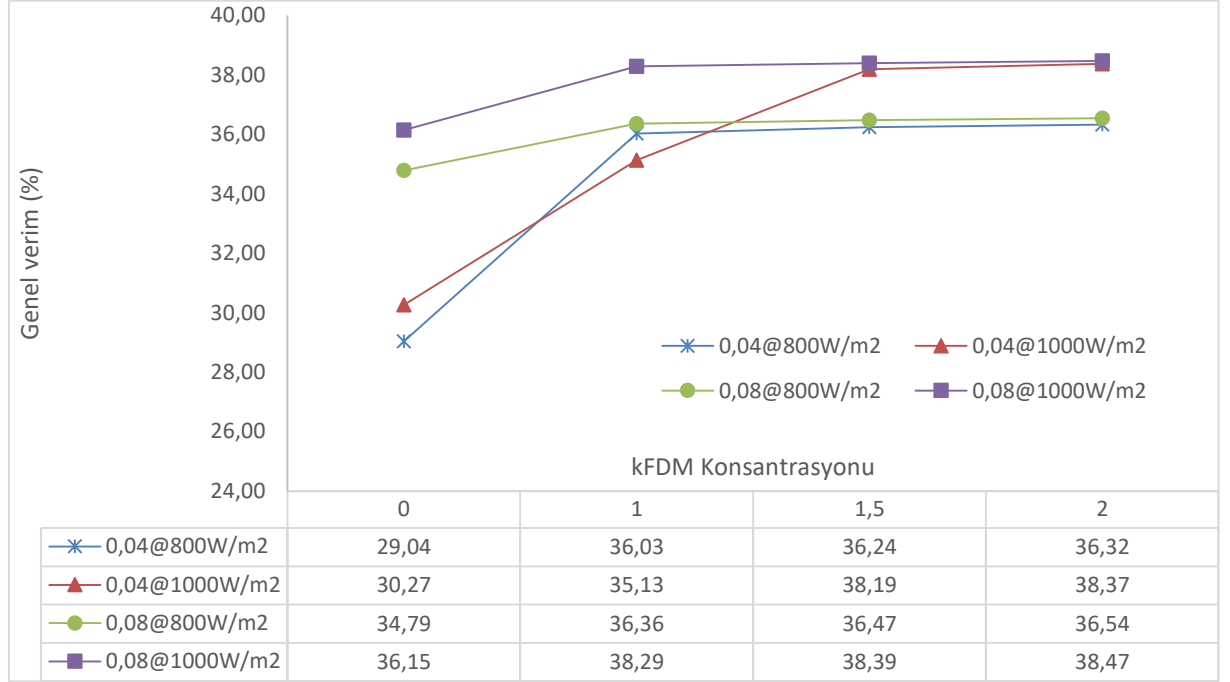
ışınım değerlerinde daha büyükken, elektriksel verim artışları düşük ışınım değerlerinde daha büyük olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 155. kFDM konsantrasyonuna göre farklı giriş hızı ve ışınım şartlarında elektriksel ve termal verimlerin bağıl yüzde değişimleri

Bağıl artışlar göz önüne alındığında, en yüksek elektriksel verim artışı %5,90 ile 0,04m/s giriş hızı ve 800W/m² ışınım altında %1'lik kFDM-S ile elde edilmiştir. En yüksek termal verim artışı ise %43,57 ile yine 800W/m² ışınım altında %1'lik kFDM-S ile elde edilmiştir.

Elektriksel ve termal olarak sistemin genel verimleri Denklem 70 kullanılarak hesaplanmıştır. Genel verim hesaplamalarında termal enerjiden elektriksel enerji dönüşüm verimi genel kabul üzere 0,38 (Lee et al., 2019) olarak kabul edilmiştir.



Şekil 156. kFDM konsantrasyonuna göre genel verimler

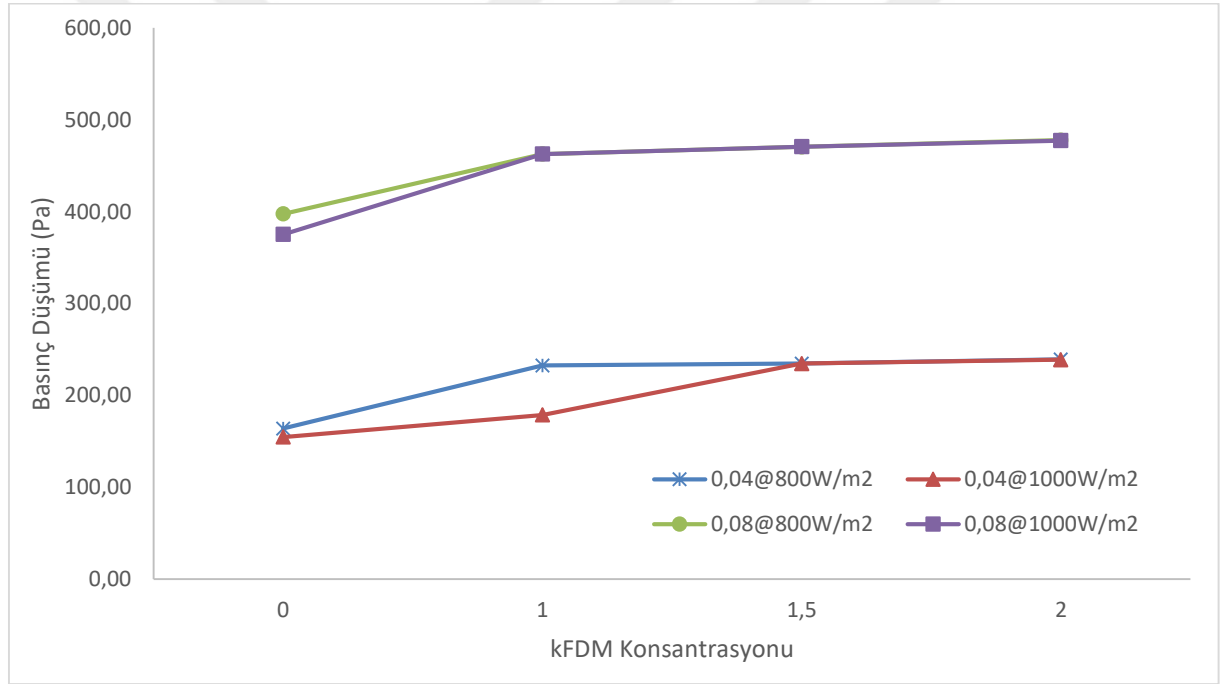
kFDM-S konsantrasyonuna göre sistemin genel verimleri **Şekil 156**'da verilmiştir. Buna göre en yüksek genel verim %38,47 ile %2'lik kFDM-S ile 0,08m/s giriş hızında 1000W/m² ısıtım altında elde edilmiştir. Bununla birlikte aynı ısıtım değerinde ve giriş hızında %1,5'luk kFDM-S ile %38,39, %1'lik kFDM-S ile %38,29, ve 1000W/m² 0,04m/s giriş hızında %2'lik kFDM-S ile %38,37 ve %1,5'luk kFDM-S ile %38,19 değerinde genel verimler elde edilmiştir. Bu değerlerin en düşüğü olan %38,19 ile en yükseği olan %38,47 arasındaki iyileşme oranı sadece %0,7 (binde 7) dolayındadır. Daha önce belirtildiği üzere, %2'lik kFDM-S ile 1000W/m² ısıtım değerinde kFDM'nin gizli ısı çekme potansiyelinden tam olarak faydalanılamadığı anlaşılmaktadır. Bu durumda %2'lik kFDM-S ile elde edilen fayda bu çalışmada kullanılan giriş hızı ve ısıtım değeri kombinasyonlarında marjinaldir.

Basınç düşümleri

Deneylerde pompa giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkları okunmuş ve sistemde meydana gelen basınç düşümleri kararlı hal şartları elde edildiği durumda alınan ölçümler (Alvarado, Marsh, Sohn, et al., 2007) ile belirlenmiştir. Basınç düşümü büyük oranda akış hızına, ikincil derecede de kFDM konsantrasyonuna (Ashagre & Rakshit, 2022) ve sıcaklığa bağlıdır. kFDM-S'lerin bağıl viskozitelerinin deneylerde kullanılan %1, %1.5 ve %2 gibi düşük

konsantrasyonlarda 1'e çok yakındır. %25'in altındaki konsantrasyonlarda %97,5 ve üzerinde doğrulukta viskozite tayin edilebildiği belirtilen korelasyonlarla (Qiu et al., 2019) kFDM-S'lerin bağıl viskoziteleri %1'lik kFDM-S için 1,01, %1.5'lik kFDM-S için 1,02 ve %2'lik kFDM-S için %1,05 olarak belirlenmişti.

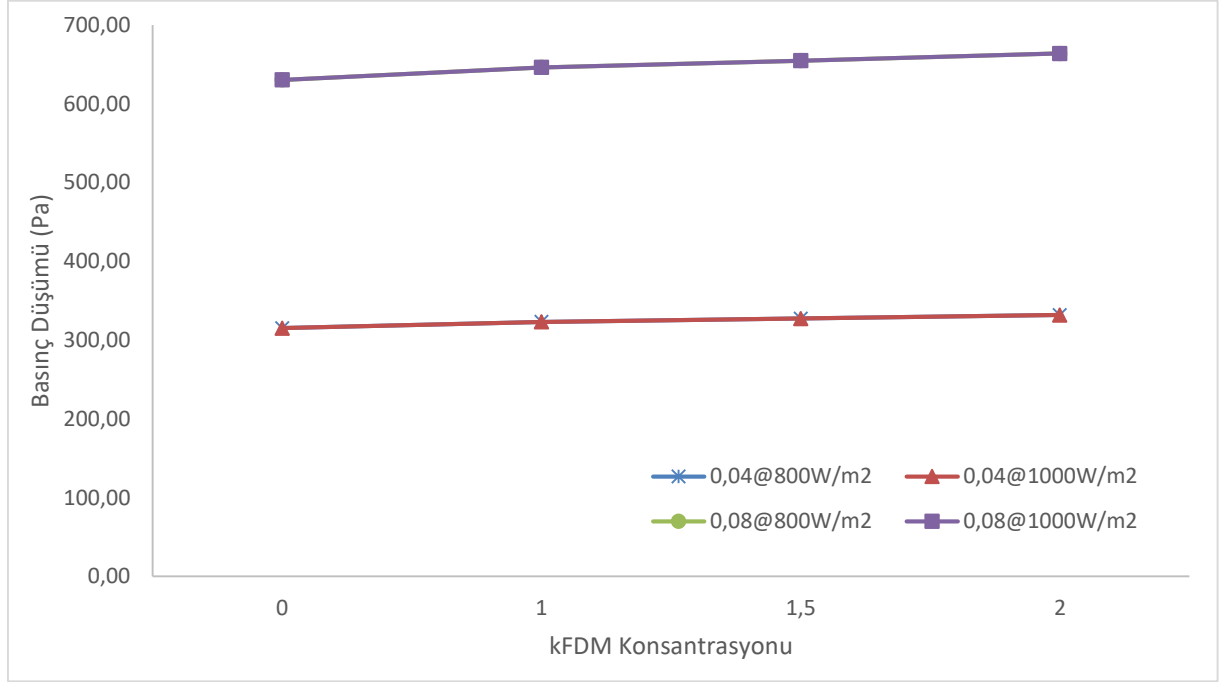
Ayrıca gelişmiş akış rejimi durumunda, katı partiküllerin akışın ortasında halkasal bir şekilde kümelenme eğiliminde olması (Kuravi, 2009), katı partiküllerin boru içi akışta neden olacağı cidar sürtünmelerinin aynı viskozite değerindeki homojen akışkana göre görece daha düşük olacağı değerlendirilebilir. Bununla birlikte, **Şekil 157**'de verilen basınç düşümleri incelendiğinde, %1'lik kFDM-S'nin sebep olduğu basınç düşümü suya göre oldukça fazla iken, bunun tam iki katı fazla kapsül içeren %2'lik kFDM-S'nin sebep olduğu basınç düşümü görece çok daha düşüktür. Bu fark viskozite değerleri arasındaki farka göre negatif uyumsuzdur.



Şekil 157. Kararlı durumda su ve kFDM-S çözeltilerinin basınç düşümleri

Bunun nedeni, kFDM-S akışkanlara kıyasla kararlı durumdaki çıkış sıcaklıklarının çok daha fazla olmasıdır (**Şekil 147**). Yine bu sıcaklık değerinde suyun yoğunluğu da 995 kg/m^3 değerinden 970 kg/m^3 değerine kadar düşmektedir (**Şekil 83**). Basın düşümlerinin sıcaklıkla azaldığı gerçeği (Bellos & Tzivanidis, 2017) de göz önüne alınmalıdır. kFDM-S durumunda gizli ısı çekilmesi nedeniyle düşen çıkış sıcaklıkları, hem taşıyıcı akışkan olan suyun yoğunluğunun daha yüksek bir değerde olmasına, basınç düşümlerinin daha düşük sıcaklık değerinde daha büyük gerçekleşmesine neden olmaktadır.

Bu nedenle, kFDM-S'lerin neden olduğu basınç düşümlerinin sıcaklıkların eşit olduğu giriş şartlarından itibaren yapılan basınç düşümü değerleri üzerinden karşılaştırılması, kFDM-S'lerin sistemde neden olduğu basınç düşümleri hakkında daha iyi bir fikir verebilir.



Şekil 158. Başlangıç şartlarında su ve kFDM-S çözeltilerinin basınç düşümleri

Başlangıç şartlarında sıcaklıklar eşit olduğundan, basınç düşümü grafikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olmaktan çıkarak sadece viskozitenin ve hızın bir fonksiyonu olmuştur. **Şekil 158'**de görülebileceği üzere, kFDM-S'lerin sistemde neden olduğu basınç düşümleri aynı sıcaklık değerleri için oldukça düşük düzeydedir ve bu da kFDM-S'lerin kayda değer bir basınç düşümüne neden olmaksızın daha yüksek miktarda ısı çekilmesinde kullanılabileceği yönündeki daha önceki araştırmacıların bulgularını (Delgado, Lázaro, Mazo, Marín, & Zalba, 2012; Jurkowska & Szczygieł, Ireneusz, 2016) desteklemektedir.

Belirsizlik Analizi Sonuçları

Denklem 65 kullanılarak yapılan bazı parametrelerin belirsizlik hesaplama adımları aşağıda verilmiştir.

Pompalama Gücü için Belirsizlik hesaplamaları

$$\overline{\dot{E}_p} = f(\overline{\dot{m}}, \overline{\Delta p}, \overline{\rho_{kFDM-S}}, \overline{\eta_p})$$

$$u_{\dot{E}_p} = f(u_{\dot{m}}, u_{\Delta p}, u_{\rho_{kFDM-S}}, u_{\eta_p})$$

$$u_{\dot{E}_p} = \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{E}_p}{\delta \dot{m}} u_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{E}_p}{\delta \Delta p} u_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{E}_p}{\delta \rho_{kfDM-S}} u_{\rho_{kfDM-S}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{E}_p}{\delta \eta_p} u_{\eta_p}\right)^2}$$

$$\frac{u_{\dot{E}_p}}{\dot{E}_p} = \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta p}}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_{kfDM-S}}}{\rho_{kfDM-S}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\eta_p}}{\eta_p}\right)^2}$$

$$\frac{u_{\dot{E}_p}}{\dot{E}_p} = 2,65\%$$

Elektriksel verim için belirsizlik hesaplamaları

$$\bar{\eta}_e = f(\bar{V}, \bar{I}, \bar{\dot{E}_p}, \bar{I}_r, \bar{A}_{pv})$$

$$u_{\eta_e} = f(u_V, u_I, u_{\dot{E}_p}, u_{I_r}, u_{A_{pv}})$$

$$u_{\eta_e} = \sqrt{\left(\frac{\delta \eta_e}{\delta V} u_V\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_e}{\delta I} u_I\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_e}{\delta \dot{E}_p} u_{\dot{E}_p}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_e}{\delta I_r} u_{I_r}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_e}{\delta A_{pv}} u_{A_{pv}}\right)^2}$$

$$\frac{u_{\eta_e}}{\eta_e} = \frac{100}{I_r A_{pv} \eta_e} \sqrt{(I u_V)^2 + (V u_I)^2 + (-u_{\dot{E}_p})^2 + \left(\frac{\dot{E}_p - VI}{I_r} u_{I_r}\right)^2 + \left(\frac{\dot{E}_p - VI}{A_{pv}} u_{A_{pv}}\right)^2}$$

$$\frac{u_{\eta_e}}{\eta_e} = 3,85\%$$

Termal verim hesaplamaları

$$\bar{\eta}_t = f(\bar{\dot{m}}, \bar{c_p}, \bar{T_\zeta}, \bar{T_g}, \bar{I}_r, \bar{A}_{pv})$$

$$u_{\eta_t} = f(u_{\dot{m}}, u_{c_p}, u_{T_\zeta}, u_{T_g}, u_{I_r}, u_{A_{pv}})$$

$$u_{\eta_t} = \sqrt{\left(\frac{\delta \eta_t}{\delta \dot{m}} u_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_t}{\delta c_p} u_{c_p}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_t}{\delta T_\zeta} u_{T_\zeta}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_t}{\delta T_g} u_{T_g}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_t}{\delta I_r} u_{I_r}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta_t}{\delta A_{pv}} u_{A_{pv}}\right)^2}$$

$$\frac{u_{\eta_t}}{\eta_t} = \sqrt{\left(\frac{u_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_p}}{c_p}\right)^2 + \left(\frac{u_{T_\zeta}}{T_\zeta - T_g}\right)^2 + \left(\frac{u_{T_g}}{T_\zeta - T_g}\right)^2 + \left(\frac{u_{I_r}}{I_r}\right)^2 + \left(\frac{u_{A_{pv}}}{A_{pv}}\right)^2}$$

$$\frac{u_{\eta_t}}{\eta_t} = 3,25\%$$

Ayrıca parametrelerin ölçüm değerlerinde oluşan belirsizliklerin detayları da **Tablo 23**'te sunulmuştur.

Tablo 23. Hesaplanan Belirsizlik Oranları

Değişken	Belirsizlik (W_R)
Sıcaklık	0,0143
Basınç	0,016
kFDM ve Su debisi	0,02
Voltaj	0,03
Akım	0,03
Işınım	0,014
Pompalama Gücü	2,65
Elektriksel Verim	3,85
Termal Verim	3,25

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Yenilenebilir enerji ile ilgili çalışmalar sürdürülebilir kalkınma ve temiz enerji stratejileri çerçevesinde önemlidir. PVT sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek potansiyele ve en geniş uygulama alanına sahip olan güneş enerjisi uygulamaları arasında giderek yaygınlaşmaktadır. PVT sistemlerinin hem elektriksel hem de termal verimliliğini artırma çabaları, sistemin farklı parametreleri üzerinde farklı yaklaşımlarla devam etmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada kFDM-S'lerin ile ITA olarak kullanılmasıyla daha düşük pompalama gücü ile sistemden daha fazla ısı çekilmesi ve daha kararlı bir çalışma sıcaklığı elde edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında, laurik asit içeren melamin kabuklu kapsüller yerinde polimerizasyon yöntemi ile başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. FT-IR, XRD ve EDX sonuçları, MF/LA mikrokapsüllerinin başarıyla üretildiğini göstermiştir. SEM analizi, kFDM'nin ortalama çapının 1 ila 5 μm arasında değiştiğini, nispeten düzgün ve kompakt bir yüzey profiline sahip olduklarını gösterilmiştir. Erime ve kristallenme sıcaklıkları, kabuk-çekirdek oranı ve gizli ısıları DSC yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ek olarak, TG analiziyle kapsüllerin iki aşamada ayrıştığı ve dirençli olduğu gösterilmiştir. Hazırlanan kFDM'lerin taşıyıcı akışkan olarak su içerine katılarak PVT sisteminin soğutulmasında ITA olarak kullanım potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi neticesinde aşağıdaki çıkarımlara ulaşılmıştır:

- Deneysel bulgulara göre;
 - En yüksek elektriksel verim $0,04\text{m/s}$ 800W/m^2 %2 kFDM-S ile %15,99;
 - En yüksek elektriksel verim artışı $0,04\text{m/s}$ 1000W/m^2 %2 kFDM-S ile %8,6
 - En yüksek marjinal elektriksel verim $0,04\text{m/s}$ 800W/m^2 %1 kFDM-S ile %5,9
 - En yüksek Termal verim $0,08\text{m/s}$ 1000W/m^2 %2 kFDM-S ile %59,89
 - En yüksek Termal verim artışı $0,04\text{m/s}$ 800W/m^2 %2 kFDM-S ile %45,42
 - En yüksek marjinal Termal verim $0,04\text{m/s}$ 800W/m^2 %1 kFDM-S ile %43,57
 - En yüksek genel verim $0,08\text{m/s}$ 1000W/m^2 %2 kFDM-S ile %38,47
 - En düşük ortalama yüzey sıcaklığı $0,08\text{m/s}$ 800W/m^2 %2 kFDM-S ile 316,94K

- En özdeş yüzey sıcaklığı $0,04\text{m/s}$ 800W/m^2 %2 kFDM-S ile $317,37\text{K}$ olarak elde edilmiştir.

- kFDM ve kFDM-S'nin kimyasal, fiziksel ve termal karakterizasyonlarıyla elde edilen özellikleri ve ampirik formüller ve bağıntılar yoluyla hesaplanan özelliklerinin deneylerden elde edilen çıktılar ile büyük oranda tutarlı ve doğrulanabilir olduğu görülmüştür.

- Deneyler, yüzde 1, 1,5 ve 2 gibi düşük oranlarda bile kFDM ilavesinin taşıyıcı akışkanının ısı kapasitesinde anlamlı bir artış sağladığını göstermiştir.

- Faz değişim sürecinde ısı transfer kapasitesinin önemli ölçüde arttığı ve sabit sıcaklıkta ısı çekilmesi neticesinde plaka yüzeyinde yerel ortalama sıcaklık değerlerinin birbirine daha çok yaklaştığı ve bu nedenle daha üniform bir soğutma sağlandığı görülmüştür.

- kFDM-S kullanımı düşük giriş hızları veya debilerde yüksek giriş hızları veya debilere nazaran daha avantajlıdır. Aynı giriş hızı veya debi değerlerinde ise, termal verim artışı bakımından yüksek ısıtım değerlerinde, elektriksel verim artışları bakımından ise düşük ısıtım değerlerinde daha etkilidir.

- kFDM-S'leri termal kapasitelerinden tam olarak faydalanılabilmesi için, akışkan debisi, ısıtım değeri ve akışkan içerisindeki kFDM konsantrasyonu arasında gözetilmesi gereken bir denge bulunmaktadır. Dolayısı ile toplam kanal boyu, kanal kesiti, ısı alıcı plaka malzemesi, kalınlığı gibi sistem parametreleri ve kFDM ve kFDM-S özellikleri belirleyicidir ve her sistem için parametrelerin optimum değerleri birbirinden farklıdır. kFDM-S'ler ısı transfer sistemlerine özel olarak tasarlanmalıdır.

- Sudan daha viskoz olmasına ve kanal içerisinde neden olduğu basınç düşüşüne rağmen iyileştirilmiş bir ısı transfer katsayısına sahip olması, kFDM-S'nin gelişmiş bir ısı transferi akışkanı olabileceğinin anlamlı şekilde göstermiştir.

- Sistemin çalışma sıcaklığı, faz değişim malzemesinin erime sıcaklığı aralığında olduğunda kFDM-S'den maksimum termal fayda sağlanmıştır.

- kFDM-S için ısı transfer özelliklerinin çözelti konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir, ancak pompalama gereksinimini artırması, faz değişim aralığı dışında termal özelliklerinin suya göre daha düşük kalması ve belirli bir orandan sonra marjinal faydasının anlamsız kalması nedeniyle bu çalışmada kullanılan deney sistemi için %2'lik kapsül oranının kritik sınır niteliğinde kabul edilebileceği görülmüştür.

- Bu tezden elde edilen deneysel sonuçlar, PVT sistemin soğutulmasında kFDM-S kullanılmasının suya kıyasla anlamlı derecede ısı kapasitesi artışı sağlayabildiğini göstermiştir.

Öneriler

PVT sistemlerinde kFDM-S'nin kullanımı, FDM malzemelerinin ve sentez yöntemlerinin doğru seçiminin yanı sıra en iyi TA içerisinde ve doğru oranda kullanımı da önem arz etmektedir. kFDM-S'lerin seçimi, sentezi ve kullanımı bir dizi alanda uzmanlık veya geniş bir arka plan bilgisi ve disiplinler arası işbirliğinin yanı sıra kapsamlı bir çalışma gerektirir. Bu çalışmada kapsüllemenin ihtiyacı ve değeri, faz değişim malzemeleri ve sentezleri, karakterizasyon yöntemleri ile bunların avantajları, özellikleri, dezavantajlarının ve sorunlu yanlarının giderilmesi, PVT sistemlerinde ITA olarak kullanımlarına özel bir atıf yapılarak kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu nedenle bu çalışma, avantaj, dezavantaj, zorluklar ve fırsatlar açısından hemen hemen tüm etkili parametreleri ele alarak, PVT sisteminde iş yapan akışkan olarak kFDM-S'lerin kullanımına ilişkin olarak en başından uygulama aşamasına kadar başvurulabilecek temel bir rehber olarak kullanılabilir.

Gelecekte yapılacak araştırmalarda, nano teknoloji alanında kaydedilen yeni gelişmelerden istifade edilerek gerek kapsül boyutunda gerek kapsül kabuk ve çekirdek malzemelerinde iyileştirme elde etmek yahut yeni malzemeler geliştirmek üzere çalışmalar derinleştirilmelidir. Ayrıca, özellikle binalara entegre PVT (BIPVT) sistemleri bakımından sistemin, laboratuvar ortamı dışında, gerçek bina kurulumları kullanılmak suretiyle gerçek iklim şartları altında uzun süreli testlerinin yapılması gereklidir. Bu tip sistemlerin gerçek performansları, ekonomik ömürleri ve çevresel etkileri ancak bu araştırmalar neticesinde tam anlamıyla ortaya konulabilir ve sürdürülebilir bir temiz enerji uygulaması olarak gelecekte binalarda kullanımının yaygınlaşması sağlanabilir.

kFDM'nin suyun veya diğer akışkanların seyreltik çözeltilerinde, ısı transfer sıvısı veya termal depolama ortamı olarak termal sistemlerde iş yapan akışkan olarak uygulanmasına ilişkin gelecekteki araştırmaların, ısının daha geniş bir sıcaklık aralığında gizli ısı olarak aktarılmasını sağlamak için ikili (binary), üçlü (ternary) veya hatta dördü (quaternary) kFDM-S tasarlanması ve geliştirilmesini amaçlaması önerilmektedir. Faz değişim sıcaklık aralığının dar penceresi, akış hızı üzerinde bir kısıtlama olarak işlev görür ve FDM'nin kısa ısı değişim devreleri içinde erimesine izin verecek şekilde düşük olmaya zorlar, ancak bu, diğer yandan, döngünün diğer kısımlarında sorunlara neden olabilir. Öte yandan, uzun eşanjör devrelerinde, faz değişimi, değişim devresinin daha kısa bir bölümünde gerçekleşecek ve devrenin geri kalanında duyulur ısı depolanmasına neden olacaktır. Ayrıca, gelecekteki araştırmalar, özellikleri daha da geliştirmek için tek veya çok duvarlı karbon nanotüplerin yanı sıra diğer nanopartiküllerin ve hatta grafenin kapsüllerin kabuğuna veya çekirdeğine dâhil edilmesini amaçlamalıdır.

Ayrıca kFDM-S'lerin FDM'nin organik bileşimi nedeniyle sahip olduğu düşük ısı iletkenliğinin ve ortalama konvektif ısı transfer katsayısının iyileştirilmesi için de çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Abdelrazik, A. S., Al-Sulaiman, F. A., & Saidur, R. (2020). Numerical investigation of the effects of the nano-enhanced phase change materials on the thermal and electrical performance of hybrid PV/thermal systems. *Energy Conversion and Management*, 205, 112449. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112449>
- Abdullah, A. L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M. A. M., & Sachit, F. A. (2018). Photovoltaic Thermal Solar PVT Collector PVT System Based on Fluid Absorber Design: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 48(2), 196–208. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Penerbit_Akademia_Baru/publication/327815525_Photovoltaiic_Thermal_Solar_PVT_Collector_PVT_System_Based_on_Fluid_Absorber_Design_A_Review/links/5ba5bc35a6fdccd3cb69e9dc/Photovoltaic-Thermal-Solar-PVT-Collector-PVT-System-Based-on-Fluid-Absorber-Design-A-Review.pdf
- Acar, S. Ş. (2014). *Faz Değiştirici Maddeler ve Uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Adun, H., Adedeji, M., Ruwa, T., Senol, M., Kavaz, D., & Dagbasi, M. (2022). Energy, exergy, economic, environmental (4E) approach to assessing the performance of a photovoltaic-thermal system using a novel ternary nanofluid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101804. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101804>
- Agyekum, E. B., PraveenKumar, S., Alwan, N. T., Velkin, V. I., & Adebayo, T. S. (2021). Experimental Study on Performance Enhancement of a Photovoltaic Module Using a Combination of Phase Change Material and Aluminum Fins—Exergy, Energy and Economic (3E) Analysis. *Inventions*, 6(4), 69. <https://doi.org/10.3390/inventions6040069>
- Agyekum, E. B., PraveenKumar, S., Alwan, N. T., Velkin, V. I., Shcheklein, S. E., & Yaqoob, S. J. (2021). Experimental Investigation of the Effect of a Combination of Active and Passive Cooling Mechanism on the Thermal Characteristics and Efficiency of Solar PV Module. *Inventions*, 6(4), 63. <https://doi.org/10.3390/inventions6040063>
- Ahuja, S., & Scypinski, S. (2001). *Handbook of modern pharmaceutical analysis. Separation science and technology: Vol. 3*. San Diego CA: Academic Press.
- Akçay, M. (2006). *Isıl Enerji Depolama Amaçlı Bazı Polimer/Yağ Asidi Karışımlarının Hazırlanması Ve Isıl Özelliklerinin Belirlenmesi* (Master Thesis). Gaziosmanpaşa University, Tokat.
- Al Shannaq, R., & Farid, M. M. (2015). Microencapsulation of phase change materials (PCMs) for thermal energy storage systems. In L. F. Cabeza (Ed.), *Woodhead Publishing series in energy: Vol. 66. Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications / edited by Luisa F. Cabeza* (pp.247–284). Cambridge: Elsevier/Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781782420965.2.247>
- Alehosseini, E., & Jafari, S. M. (2019). Micro/nano-encapsulated phase change materials (PCMs) as emerging materials for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.003>
- Ali, H. M. (2020). Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review. *Solar Energy*, 197, 163–198. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.075>

- Ali, S. A. (2017). *Investigation of a Novel MPCM-S Based PV/T System* (Doktora Tezi). De Montfort University, Leicester, England.
- Alkan, C., Sarı, A., Karaipekli, A., & Uzun, O. (2009). Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.09.009>
- Allouche, Y. (2016). *PCM Energy Storage Modeling: Case Study For A Solar-Ejector Cooling Cycle* (Doctoral Thesis). University of Porto, Porto. <https://doi.org/10.1093/med/9780190636036.003.0008>
- Al-Maghalseh, M. (2014). *Compact Solar Thermal Energy Storage Systems Using Phase Change Materials* (PhD Thesis). University of Northumbria, Newcastle. Retrieved from http://nrl.northumbria.ac.uk/id/eprint/23579/1/al-maghalseh.maher_phd.pdf
- Al-Mamoori, A. H. (2017). *Thermal Characteristics of Phase Change Material Used as Thermal Storage System by Using Solar Energy* (Yüksek Lisans Tezi). Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara.
- Alqaity, A. B., Al-Dini, S. A., Wang, E. N., & Yilbas, B. S. (2012). Numerical investigation of liquid flow with phase change nanoparticles in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 38, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.10.001>
- Al-Shannaq, R., Farid, M. M., Al-Muhtaseb, S., & Kurdi, J. (2015). Emulsion stability and cross-linking of PMMA microcapsules containing phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.036>
- Alva, G., Lin, Y., Liu, L. [Lingkun], & Fang, G.-Y. (2017). Synthesis, characterization and applications of microencapsulated phase change materials in thermal energy storage: A review. *Energy and Buildings*, 144, 276–294. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.063>
- Alvarado, J. L., Marsh, C., Sohn, C., Phetteplace, G., & Newell, T. (2007). Thermal performance of microencapsulated phase change material slurry in turbulent flow under constant heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(9-10), 1938–1952. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.026>
- Alvarado, J. L., Marsh, C., Thies, C., Soriano, G., Garg, P., & Asme (2007). Characterization of thermal properties and heat transfer behavior of microencapsulated phase change material slurry and multiwall carbon nanotubes in aqueous suspension. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- Al-Waeli, A. H., Chaichan, M. T., Kazem, H. A., & Sopian, K. (2019). Evaluation and analysis of nanofluid and surfactant impact on photovoltaic-thermal systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100392>
- Al-Waeli, A. H., Chaichan, M. T., Sopian, K., & Kazem, H. A. (2019). Influence of the base fluid on the thermo-physical properties of PV/T nanofluids with surfactant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100340. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.10.001>
- Al-Waeli, A. H., Chaichan, M. T., Sopian, K., Kazem, H. A., Mahood, H. B., & Khodom, A. A. (2019). Modeling and experimental validation of a PVT system using nanofluid coolant and nano-PCM. *Solar Energy*, 177, 178–191.
- Al-Waeli, A. H., Kazem, H. A., Chaichan, M. T., & Sopian, K. (2019). *Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27824-3>

- Al-Waeli, A. H., Sopian, K., Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Ibrahim, A., Mat, S., & Ruslan, M. H. (2017). Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Energy Conversion and Management*, 151, 693–708. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.032>
- Al-Waeli, A. H., Sopian, K., Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2016). Photovoltaic Solar Thermal (PV/T) Collectors Past, Present and Future: A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(22), 10757–10765.
- Al-Waeli, A. H., Sopian, K., Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2017). Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 109–130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.126>
- Ashagre, T. B., & Rakshit, D. (2022). Study on flow and heat transfer characteristics of Encapsulated Phase Change Material (EPCM) slurry in Double-Pipe Heat Exchanger. *Journal of Energy Storage*, 46, 103931. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103931>
- Aslan, O. (2014). *Faz Değiştiren Malzemelerle Güneş Enerjisinin Depolanması* (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Atkin, P., & Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 114, 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.037>
- Awad, M. M., Ahmed, O. K., Ali, O. M., Alwan, N. T., Yaqoob, S. J., Nayyar, A., . . . Alrasheedi, A. F. (2022). Photovoltaic Thermal Collectors Integrated with Phase Change Materials: A Comprehensive Analysis. *Electronics*, 11(3), 337. <https://doi.org/10.3390/electronics11030337>
- Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P., & Rehman, S. (2013). Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*, 59, 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.050>
- Bahaidarah, H. M., Baloch, A. A., & Gandhidasan, P. (2016). Uniform cooling of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1520–1544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.064>
- Bakır, C. (2012). *Fotovoltaik/Isıl Sistemlerde Performans İyileştirmesi ve Termo-Ekonomik Analiz* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Baloch, A. A., Bahaidarah, H. M., Gandhidasan, P., & Al-Sulaiman, F. A. (2015). Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. *Energy Conversion and Management*, 103, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.018>
- Baronetto, S., Serale, G., Goia, F., & Perino, M. (2014). Numerical Model of a Slurry PCM-Based Solar Thermal Collector. In A. Li, Y. Zhu, Y. Li, S. Baronetto, G. Serale, F. Goia, & M. Perino (Eds.), *Numerical Model of a Slurry PCM-Based Solar Thermal Collector: Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning* (Vol. 263, pp. 13–20). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39578-9_2
- Barreneche, C., Delgado, M., Martínez, M., Fernández, A. I., & Cabeza, L. F. (2014). Physicochemical and Thermal Study of a MPCM of PMMA Shell and Paraffin Wax as a Core. *Energy Procedia*, 48, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.040>
- Barreneche, C., Martínez, M., Šumiga, Boštjan, Cabeza, L. F., & Fernández, A. I. (2015). Comparison of phase change slurries: Physicochemical and thermal properties. *Energy*, 87, 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.071>

- Barreneche, C., Navarro, M. E., Cabeza, L. F., & Fernández, A. I. (2015). New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications. *Journal of Energy Storage*, 3, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.08.003>
- Bayés-García, L., Ventolà, L., Cordobilla, R., Benages, R., Calvet, T., & Cuevas-Diarte, M. A. (2010). Phase Change Materials (PCM) microcapsules with different shell compositions: Preparation, characterization and thermal stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(7), 1235–1240. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.03.014>
- Bellemare, J. V. (2009) US 7,544.416 B2.
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2017). A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors. *Energy Conversion and Management*, 149, 275–292. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.035>
- Benita, S. (Ed.) (2005). *Microencapsulation: Methods and Industrial Applications, Second Edition*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=sz-669oFo6AC>
- Biçer, A. (2009). *Bazı Yağ Asidi Esterlerinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Enerji Depolama Özelliklerinin Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Brahim, T., & Jemni, A. (2017). Economical assessment and applications of photovoltaic/thermal hybrid solar technology: A review. *Solar Energy*, 153, 540–561. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.081>
- Browne, M. C., Lawlor, K., Kelly, A., Norton, B., & Cormack, S. J. M. (2015). Indoor Characterisation of a Photovoltaic/ Thermal Phase Change Material System. *Energy Procedia*, 70, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.112>
- Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. J. (2015). Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 762–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.050>
- Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. J. (2016). Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM. *Solar Energy*, 133, 533–548. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.024>
- Bruno, F., Belusko, M., Liu, M., & Tay, N. (2015). Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems. In L. F. Cabeza (Ed.), *Woodhead Publishing series in energy: Vol. 66. Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications / edited by Luisa F. Cabeza* (pp. 201–246). Cambridge: Elsevier/Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781782420965.2.201>
- Cao, F., & Yang, B. (2014). Supercooling suppression of microencapsulated phase change materials by optimizing shell composition and structure. *Appl Energy*, 113, 1512–1518.
- Cao, V. D., Salas-Bringas, C., Schüller, R. B., Szczotok, A. M., Hiorth, M., Carmona, M., . . . Kjøniksen, A.-L. (2018). Rheological and thermal properties of suspensions of microcapsules containing phase change materials. *Colloid and Polymer Science*, 296(5), 981–988. <https://doi.org/10.1007/s00396-018-4316-9>
- Cao, V. D., Salas-Bringas, C., Schüller, R. B., Szczotok, A. M., & Kjøniksen, A.-L. (2019). Time-dependent structural breakdown of microencapsulated phase change materials suspensions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(2), 179–185. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1462194>
- Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the

- state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- Cartmell, B., Shankland, N., Fiala, D., & Hanby, V. A. (2004). A multi-operational ventilated photovoltaic and solar air collector: Application, simulation and initial monitoring feedback. *Solar Energy*, 76, 45–53.
- Castellón, C., Medrano, M., Roca, J., Nogués, M., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2007). Use of microencapsulated phase change materials in building applications.
- Chai, L., Shaukat, Rabia, Wang, L. [Liang], & Wang, Hua Sheng (2018). A review on heat transfer and hydrodynamic characteristics of nano/microencapsulated phase change slurry (N/MPCS) in mini/microchannel heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 135, 334–349. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.068>
- Chamarthy, P., & Utturkar, Y. (2009). Theoretical Evaluation and Experimental Investigation of Microencapsulated Phase Change Materials (MPCM) in Electronics Cooling Applications. In *2009 25th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, San Jose, CA.
- Chandel, S., & Agarwal, T. (2017a). Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1342–1351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.001>
- Chandel, S., & Agarwal, T. (2017b). Review of Current State of Research on Energy Storage, Toxicity, Health Hazards and Commercialization of Phase Changing Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 581–596.
- Chandrasekaran, S. R., & Sharma, B. K. (2019). From waste to resources: How to integrate recycling into the production cycle of plastics. In *Plastics to Energy* (pp. 345–364). Elsevier.
- Chen, H., Zhang, L. [Lei], Jie, P., Xiong, Y., Xu, P., & Zhai, H. (2017). Performance study of heat-pipe solar photovoltaic/thermal heat pump system. *Applied Energy*, 190, 960–980. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.145>
- Chen, J., Liu, F. [Fengjiao], & Zheng, Y. [Yifei] (2014). Review on Phase Change Material Slurries. *Advanced Material Research*, 860-863, 946-951.
- Chen, L., Wang, T., Zhao, Y., & Zhang, X.-R. (2014). Characterization of thermal and hydrodynamic properties for microencapsulated phase change slurry (MPCS). *Energy Conversion and Management*, 79, 317–333. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.026>
- Chen, S., Qiu, Z., Liu, F. [Fengjiao], & Xing, J. [Jin] (2015). Review of Laminar Convection Heat-Transfer With Microencapsulated Phase Change Material Slurry. In *ICISMME 2015*.
- Chen, Z. [Zhi], & Fang, G.-Y. (2011). Preparation and heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4624–4632. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.090>
- Chen, Z. [Zhi], Shan, F., & Fang, G.-Y. (2012). Dynamic Heat Transfer Characteristics Modeling of Microencapsulated Phase Change Material Slurries. *CHEMICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY*, 35(5), 834–840. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100601>
- Choi, H. J., Lee, Y. H., Kim, C. A., & Jhon, M. S. (2000). Microencapsulated polyaniline particles for electrorheological materials. *Journal of Materials Science Letters*, 19(6),

533–535. <https://doi.org/10.1023/A:1006718107735>

- Corcione, M. (2011). Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 789–793. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.072>
- Daghighi, R., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2011). Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4156–4170. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.028>
- Dai, C., Wang, H., & Zhang, L. [Liang] (2008). Prediction of Bulk Density of Microencapsulated Phase Change Material Slurry. In *Proceedings of the Micro/Nanoscale Heat Transfer: Presented at the Micro/Nanoscale Heat Transfer International Conference, January 6-9, 2008, Tainan, Taiwan / sponsored by ASME Nanotechnology Institute* (pp. 1113–1118). New York: American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/MNHT2008-52038>
- Dammel, F., & Stephan, P. (2010). Heat Transfer to Suspensions of Microencapsulated Phase Change Material (MEPCM) Flowing Through Minichannels. In *Proceedings of the ASME International Heat Transfer Conference 2010* (pp. 399–408). New York, NY: ASME. <https://doi.org/10.1115/IHTC14-22253>
- Delgado, M., Lázaro, A., Mazo, J., Marín, J. M., & Zalba, B. (2012). Experimental analysis of a microencapsulated PCM slurry as thermal storage system and as heat transfer fluid in laminar flow. *Applied Thermal Engineering*, 36, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.050>
- Delgado, M., Lázaro, A., Mazo, J., & Zalba, B. (2012). Review on phase change material emulsions and microencapsulated phase change material slurries: Materials, heat transfer studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 253–273. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.152>
- Deymi-Dashtebayaz, M., Rezapour, M., & Farahnak, M. (2022). Modeling of a novel nanofluid-based concentrated photovoltaic thermal system coupled with a heat pump cycle (CPVT-HP). *Applied Thermal Engineering*, 201, 117765. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117765>
- Doruk, S. (2017). *Faz Değiştiren Madde İçeren Nanokapsül Sentezi ve Nanoakışkan Hazırlanmasında Kullanımı*, Erzurum.
- Doshi, S., Kashyap, G., & Tiwari, N. (2022). Thermo-hydraulic and entropy generation investigation of nano-encapsulated phase change material (NEPCM) slurry in hybrid wavy microchannel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 0. <https://doi.org/10.1108/HFF-06-2021-0422>
- Duan, B. (2015). Microencapsulation via In Situ Polymerization. In M. K. Mishra (Ed.), *Handbook of Encapsulation and Controlled Release* (pp. 307–314). CRC Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1201/b19038-19>
- Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. B., Lassue, S., & Zalewski, L. (2011). A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 112–130.
- Dutkowski, K., & Kruzel, M. (2021). Experimental Investigation of the Apparent Thermal Conductivity of Microencapsulated Phase-Change-Material Slurry at the Phase-Transition Temperature. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/ma14154124>
- El Chaar, L., lamont, L. A., & El Zein, N. (2011). Review of photovoltaic technologies.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2165–2175.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.004>
- Erdoğan, T. (2017). *Isı Transfer Uygulamaları İçin Nanokapsüllenmiş Faz Değiştiren Madde İçeren Süspansiyonların Hazırlanması ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı.
- Etaig, & Saleh (2017). *Investigation of the Enhancement of Convective Heat Transfer for Wall-Bounded Flows Utilizing Nanofluids* (PhD Thesis). Northumbria University, Newcastle.
- Ettouney, H. M., Alatiqi, I., Al-Sahali, M., & Ahmad Al-Ali, S. (2004). Heat transfer enhancement by metal screens and metal spheres in phase change energy storage systems. *Renewable Energy*, 29(6), 841–860.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.11.003>
- Evola, G., & Marletta, L. (2014). Exergy and thermoeconomic optimization of a water-cooled glazed hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector. *Solar Energy*, 107, 12–25.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.041>
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9), 1597–1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>
- Farzanehnia, A., & Sardarabadi, M. (2019). Exergy in Photovoltaic/Thermal Nanofluid-Based Collector Systems. In M. Aziz (Ed.), *Exergy and Its Application - Toward Green Energy Production and Sustainable Environment* (pp. 1–13). London: IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.85431>
- Fei, X., Zhao, H. [Hongbin], Zhang, B., Cao, L., Yu, M., Zhou, J., & Yu, L. (2015). Microencapsulation mechanism and size control of fragrance microcapsules with melamine resin shell. *Colloids and Surfaces a: Physicochemical and Engineering Aspects*, 469, 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.01.033>
- Feng, J., Huang, J., Ling, Z., Fang, X., & Zhang, Z. [Zhengguo] (2021). Performance enhancement of a photovoltaic module using phase change material nanoemulsion as a novel cooling fluid. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 225, 111060.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111060>
- Fong, M. (2020). *Integrating Renewable Thermal Sources Through Latent Heat Thermal Energy Storage* (Yüksek Lisans Tezi). McGill University, Montreal.
- Fu, W., Liang, X. [Xianghui], Xie, H., Wang, S. [Shuangfeng], Gao, X., Zhang, Z. [Zhengguo], & Fang, Y. (2017). Thermophysical properties of n-tetradecane@polystyrene-silica composite nanoencapsulated phase change material slurry for cold energy storage. *Energy and Buildings*, 136, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.001>
- Fu, Z., Li, Y. [Yongwei], Liang, X. [Xiaotian], Lou, S., Qiu, Z., Cheng, Z., & Zhu, Q. (2021). Experimental investigation on the enhanced performance of a solar PVT system using micro-encapsulated PCMs. *Energy*, 228, 120509.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120509>
- Fudholi, A., Ibrahim, A., Othman, M. Y. H., Ruslan, M. H., Hussein, A. K., Zaharim, A., & Kamaruzzaman, S. (2013). Energy and Exergy Analyses on Water based Photovoltaic Thermal (PVT) Collector with Spiral Flow Absorber. In A. Zaharim (Ed.), *Energy, environmental and structural engineering series*, 2227-4359: Vol. 18. *Recent advances in energy environment and geology: Proceedings of the 2nd international conference on natural resource management (NRM '13), Proceedings of the 2nd international conference on energy systems, environment, entrepreneurship and innovation (ICESEEI*

- '13), *Proceedings of the 6th international conference on environmental and geological science and engineering (EG '13)*, Antalya, Turkey, October 8-10, 2013. Greece: WSEAS Press. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Hussein_A_Kazem/publication/260164190_Performance_characterization_of_single-path_and_double-path_air-based_bifacial_photovoltaic_thermal_solar_collector/links/5787815f08aedc252a9359e.pdf
- Garba, M. A. (2020). *Performance Analysis Of Photovoltaic-Thermal (Pv/T) Solar Systems* (Master Thesis). Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara. Retrieved from <http://acikerisim.ybu.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2500/650813.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Garg, H. P., Mullick, S. C., & Bhargava, A. K. (1985). *Solar thermal energy storage*. Dordrecht, Boston, Hingham, MA: D. Reidel; Sold and distributed in the U.S.A. and Canada by Kluwer Academic Publishers.
- Gelis, K., Ozbek, K., Celik, A. N., & Ozyurt, O. (2022). A novel cooler block design for photovoltaic thermal systems and performance evaluation using factorial design. *Journal of Building Engineering*, 48, 103928. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103928>
- Ghasemi, K., Tasnim, S., & Mahmud, S. (2022). PCM, nano/microencapsulation and slurries: A review of fundamentals, categories, fabrication, numerical models and applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102084. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102084>
- Ghodbane, M., Said, Z., Ketfi, O., Boumeddane, B., Hoang, A. T., Sheikholeslami, M., . . . Truong, T. H. (2022). Thermal performance assessment of an ejector air-conditioning system with parabolic trough collector using R718 as a refrigerant: A case study in Algerian desert region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102513. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102513>
- Ghosh, S. K. (2010). Functional Coatings and Microencapsulation: A General Perspective. In S. K. Ghosh (Ed.), *Functional coatings: By polymer microencapsulation* (pp. 1–28). Weinheim: Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527608478.ch1>
- Giro-Paloma, J., Martínez, M., Cabeza, L. F., & Fernández, A. I. (2016). Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1059–1075. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.040>
- Goel, M., Roy, S. K., & Sengupta, S. (1994). Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(4), 593–604.
- Gong, C., Zhang, H., & Wang, X. [X.] (2009). Effect of shell materials on microstructure and properties of microencapsulated n-octadecane. *Iran Polym J*, 18, 501–512.
- Griffiths, P. W., & Eames, P. C. (2007). Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium. *Appl Therm Eng*, 27, 1756–1760.
- Gschwander, S., & Schossig, P. *Phase Change Slurries as heat transfer and storage fluids for cooling applications*. Retrieved from Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) website: <https://pdfs.semanticscholar.org/7f4a/fe9c9187b9a49978283b6a810c3a614889c5.pdf>
- Gschwander, S., Schossig, P., & Henning, H. (2005). Micro-encapsulated paraffin in

- phasechange slurries. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 89, 307–315.
- Guo, Y., Zhang, X. [Xinglong], Yang, L. [Lijun], Xu, C., & Du, X. (2017). The Heat Transfer of Microencapsulated Phase Change Material Slurry and Its Thermal Energy Storage Performance of Combined Heat and Power Generating Units. *Energies*, 10(10), 1662. <https://doi.org/10.3390/en10101662>
- Hale, D. V., Hoover, M. J., & O'Neill, M. J. (1971). *Phase Change Materials Hand Book*. Alabama: NASA.
- Hawladar, M., Uddin, M. S., & Zhu, H. J. (2002). Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: Experiments and simulation. *International Journal of Energy Research*, 26(2), 159–171. <https://doi.org/10.1002/er.773>
- Hoang, A. T., Le, T. H., Chitsomboon, T., & Koonsrisook, A. (2021). Experimental investigation of solar energy-based water distillation using inclined metal tubes as collector and condenser. *Energy Sources, Part a: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1966139>
- Hoang, A. T., Sandro, N., Olcer, A. I., Ong, H. C., Chen, W.-H., Chong, C. T., . . . Nguyen, X. P. (2021). Impacts of COVID-19 pandemic on the global energy system and the shift progress to renewable energy: Opportunities, challenges, and policy implications. *Energy Policy*, 154, 112322. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112322>
- Hoang, A. T., van Pham, V., & Nguyen, X. P. (2021). Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127161>
- Hosseinzadeh, M., Sardarabadi, M., & Passandideh-Fard, M. (2019). Nanofluid and Phase Change Material Integrated into a Photovoltaic Thermal System. In V. Mittal (Ed.), *Phase Change Materials* (pp. 93–127). Australia: Central West Publishing (CWP).
- Hu, X. X., & Zhang, Y. P. (2002). Novel insight and numerical analysis of convective heat transfer enhancement with microencapsulated phase change material slurries: laminar flow in a circular tube with constant heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(15), 3163–3172.
- Huang, B., Lin, T., Hung, W., & Sun, F. (2001). Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, 70, 443–448.
- Huang, X., Zhu, C., Lin, Y., & Fang, G.-Y. (2019). Thermal properties and applications of microencapsulated PCM for thermal energy storage: A review. *Applied Thermal Engineering*, 147, 841–855. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.007>
- Ibáñez, M., Cabeza, L. F., Solé, C., Roca, J., & Nogués, M. (2006). Modelization of a water tank including a PCM module. *Applied Thermal Engineering*, 26(11-12), 1328–1333. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.022>
- Ibrahim, A., Othman, M. Y. H., Ruslan, M. H., Mat, S., & Sopian, K. (2011). Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.024>
- Inaba, H., Kim, M. J., & Horibe, A. (2004). Melting heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurries with plural microcapsules having different diameters. *Journal of Heat Transfer*, 126(4), 558–565. <https://doi.org/10.1115/1.1773584>
- Islam, M. M., Pandey, A. K., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2016). Recent progresses

- and achievements in photovoltaic-phase change material technology: A review with special treatment on photovoltaic thermal-phase change material systems. *Energy Conversion and Management*, 126, 177–204. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.075>
- Jäger-Waldau, A., Kougias, I., Taylor, N., & Thiel, C. (2020). How photovoltaics can contribute to GHG emission reductions of 55% in the EU by 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 126, 109836. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109836>
- Jamekhorshid, A., Sadrameli, S. M., & Farid, M. M. (2014). A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 531–542. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.033>
- Jegadheeswaran, S., & Pohekar, S. D. (2009). Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2225–2244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.024>
- Jia, Y. [Yuting], Zhu, C., & Fang, G.-Y. (2020). Performance optimization of a photovoltaic/thermal collector using microencapsulated phase change slurry. *International Journal of Energy Research*, 44(3), 1812–1827. <https://doi.org/10.1002/er.5028>
- Jurkowska, M., & Szczygieł, Ireneusz (2016). Review on properties of microencapsulated phase change materials slurries (mPCMS). *Applied Thermal Engineering*, 98, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.051>
- Kara, F. (2020). The knowledge and opinions of prospective elementary school science teachers in Turkey regarding renewable energy. *International Journal of Social Sciences and Education Research*, 6(1), 31–40. <https://doi.org/10.24289/ijsser.669087>
- Karellas, S., Roumpedakis, T. C., Tzouganatos, N., & Braimakis, K. (2018). *Solar Cooling Technologies*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=0CBtDwAAQBAJ>
- Karthikeyan, M., & Ramachandran, T. (2014). Review of thermal energy storage of micro- and nanoencapsulated phase change materials. *Materials Research Innovations*, 18(7), 541–554. <https://doi.org/10.1179/1433075X13Y.0000000143>
- Karthikeyan, M., Ramachandran, T., & Shanmugasundaram, O. L. (2014). Synthesis, characterization, and development of thermally enhanced cotton fabric using nanoencapsulated phase change materials containing paraffin wax. *The Journal of the Textile Institute*, 105(12), 1279–1286. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.886368>
- Kenisarin, M. M., & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913–1965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.005>
- Khorasani, S. N., Ataei, S., & Neisiany, R. E. (2017). Microencapsulation of a coconut oil-based alkyd resin into poly(melamine–urea–formaldehyde) as shell for self-healing purposes. *Progress in Organic Coatings*, 111, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.05.014>
- Kim, J., & Cho, G. (2002). Thermal Storage/Release, Durability, and Temperature Sensing Properties of Thermostatic Fabrics Treated with Octadecane-Containing Microcapsules. *Textile Research Journal*, 72(12), 1093–1098. <https://doi.org/10.1177/004051750207201209>
- Koehler. In-situ Polimerizasyon Yöntemi ile Mikrokapsülleme. Retrieved from

<https://www.koehlerinnovative.com/kis-en/microencapsulation/microencapsulation.php>

- Kong, M.-S., Alvarado, J. L., Terrell, W., & Thies, C. (2016). Performance characteristics of microencapsulated phase change material slurry in a helically coiled tube. *Int J Heat Mass Transf*, 101, 901–914.
- Konuklu, Y. (2008). *Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama İle Binalarda Enerji Tasarrufu* (Doktora Tezi). Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Kuravi, S. (2009). *Numerical Study Of Encapsulated Phase Change Material (epcm) Slurry Flow In Microchannels* (Doktora Tezi). University of Central Florida, Orlando, Florida.
- Kuroiwa, T., Kobayashi, I., Chuah, A. M., Nakajima, M., & Ichikawa, S. (2015). Formulation and stabilization of nano-/microdispersion systems using naturally occurring edible polyelectrolytes by electrostatic deposition and complexation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 226(Pt A), 86–100. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.09.003>
- Languri, E. M., Shaaban, A. H., Kong, M.-S., & Alvarado, J. L. (2013). Numerical Simulation of a Microencapsulated Phase Change Material Slurry Flowing in a Helical Coil Heat Exchanger. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - 2013 -: Presented at ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 15-21, 2013, San Diego, California, USA*. New York, N.Y.: American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-63509>
- Lee, J. H., Hwang, S. G., & Lee, G. H. (2019). Efficiency Improvement of a Photovoltaic Thermal (PVT) System Using Nanofluids. *Energies*, 12(16), 3063. <https://doi.org/10.3390/en12163063>
- Liu, C., Rao, Z., Zhao, J., Huo, Y., & Li, Y. [Yimin] (2015). Review on nanoencapsulated phase change materials: Preparation, characterization and heat transfer enhancement. *Nano Energy*, 13, 814–826. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.02.016>
- Liu, H., Wang, X. [Xiaodong], & Wu, D. (2019). Innovative design of microencapsulated phase change materials for thermal energy storage and versatile applications: A review. *Sustainable Energy & Fuels*, 3(5), 1091–1149. <https://doi.org/10.1039/C9SE00019D>
- Liu, L. [Lingkun], Jia, Y. [Yuting], Lin, Y., Alva, G., & Fang, G.-Y. (2017). Performance evaluation of a novel solar photovoltaic–thermal collector with dual channel using microencapsulated phase change slurry as cooling fluid. *Energy Conversion and Management*, 145, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.089>
- Liu, L. [Liu], Niu, J., & Wu, J.-Y. (2021). Preparation of Stable Phase Change Material Emulsions for Thermal Energy Storage and Thermal Management Applications: A Review. *Materials*, 15(1), 121. <https://doi.org/10.3390/ma15010121>
- Luque, A., Sala, G., & Arboiro, J. C. (1998). Electric and thermal model for non-uniformly illuminated concentration cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 51(3-4), 269–290. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00228-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00228-6)
- Ma, Z. W., & Zhang, P. (2013). Modeling the heat transfer characteristics of flow melting of phase change material slurries in the circular tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 874–881. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.026>
- Melone, L., Altomare, L., Cigada, A., & Nardo, L. de (2012). Phase change material cellulosic composites for the cold storage of perishable products: From material preparation to computational evaluation. *Applied Energy*, 89(1), 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.039>

- Messenger, R. A., & Ventre, J. (Eds.) (2003). *Photovoltaic System Engineering Photovoltaic System* (2nd ed.). New York: CRC Press.
- Misha, S., Abdullah, A. L., Tamaldin, N., Rosli, M. A. M., & Sachit, F. A. (2019). Simulation CFD and experimental investigation of PVT water system under natural Malaysian weather conditions. *Energy Reports*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.162>
- Mishra, M. K. (2015). Overview of Encapsulation and Controlled Release. In M. K. Mishra (Ed.), *Handbook of Encapsulation and Controlled Release* (pp. 3–19). CRC Press.
- Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3–17. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X)
- Mojumder, J. C., Chong, W. T., Ong, H. C., Leong, K. Y., & Abdullah-Al-Mamoon (2016). An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy and Buildings*, 130, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.040>
- Mudalige, T., Qu, H., van Haute, D., Ansar, S. M., Paredes, A., & Ingle, T. (2019). Characterization of Nanomaterials: Tools and Challenges. In *Nanomaterials for Food Applications* (pp. 313–353). Elsevier.
- Nadaroğlu, H., Yeşilyurt, M. K., & Çomaklı, Ö. (2022). Micro-/Nano-Encapsulation and Encapsulation Applications. In W. Ahmed & E. Nourafkan (Eds.), *Science and Applications of Nanoparticles* (pp. 55–102). Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd.
- Naghdbishi, A., Yazdi, M. E., & Akbari, G. (2020). Experimental investigation of the effect of multi-wall carbon nanotube – Water/glycol based nanofluids on a PVT system integrated with PCM-covered collector. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115556. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115556>
- Netzsch (2019). Specific Heat Capacity (cp) by DSC. Retrieved from <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/tr/enduestriler-branslar/glossary/specific-heat-capacity-cp/>
- Nguyen, X. P., Le, N. D., van Pham, V., Huynh, T. T., van Dong, H., & Hoang, A. T. (2021). Mission, challenges, and prospects of renewable energy development in Vietnam. *Energy Sources, Part a: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1965264>
- Nižetić, S., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2018). Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: Active cooling techniques. *Energy Conversion and Management*, 155, 301–323. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.071>
- Nižetić, S., Papadopoulos, A. M., & Giama, E. (2017). Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: Passive cooling techniques. *Energy Conversion and Management*, 149, 334–354. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.022>
- Ooshaksaraei, P., Sopian, K., Zaidi, S. H., & Zulkifli, R. (2017). Performance of four air-based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells. *Renew Energy*, 102, 279–293.
- Ömeroğlu, G., & Öner, İ. V. (2018). Fotovoltaik termal (pvt) sistemlerinde farklı tip kanatçıklar kullanılarak optimum çalışma sıcaklığının tayini. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(1), 177–183. Retrieved from <http://dergipark.org.tr/download/article-file/452832>
- Öner, İ. V., Yeşilyurt, M. K., Yılmaz, E. Ç., & Ömeroğlu, G. (2016). Photovoltaic Thermal

- (PVT) Solar Panels. *International Journal of New Technology and Research*, 2(12), 13–16. Retrieved from https://www.ijnr.org/download_data/IJNTR02120033.pdf
- Özakın, A. N. (2016). *Hava soğutmalı fotovoltaiik termal (PVT) sisteminin termodinamik analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Özakın, A. N. (2020). *Bütünleşik Fotovoltaiik - Isı Pompası Sisteminin Performans Analizi [Performance Analysis of Photovoltaic - Heat Pump Integrated System]* (PhD Thesis). Atatürk University, Erzurum.
- Pal, P., Pandey, J. P., & Sen, G. (2018). Synthesis and Application as Programmable Water Soluble Adhesive of Polyacrylamide Grafted Gum Tragacanth (GT-g-PAM). In V. K. Thakur (Ed.), *Biopolymer Grafting: Applications* (pp. 153–203). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810462-0.00005-3>
- Pasupathy, A., Velraj, R., & Seeniraj, R. V. (2008). Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 39–64. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.010>
- Petela, R. (1964). Exergy of Heat Radiation. *Journal of Heat Transfer*, 86(2), 187–192. <https://doi.org/10.1115/1.3687092>
- Poredoš, P., Tomc, U., Petelin, N., Vidrih, B., Flisar, U., & Kitanovski, A. (2020). Numerical and experimental investigation of the energy and exergy performance of solar thermal, photovoltaic and photovoltaic-thermal modules based on roll-bond heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 210, 112674. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112674>
- Prakash, J., Garg, H. P., & Datta, G. (1985). A solar water heater with a built-in latent heat storage. *Energy Conversion and Management*, 25(1), 51–56. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(85\)90069-X](https://doi.org/10.1016/0196-8904(85)90069-X)
- Qiu, Z., Li, P., Wang, Z. [Zhangyuan], Zhao, H. [Han], & Zhao, X. (2019). PCM and PCM Slurries and Their Application in Solar Systems. In X. Zhao & X. Ma (Eds.), *Advanced Energy Efficiency Technologies for Solar Heating, Cooling and Power Generation* (pp. 101–141). Cham: Springer International Publishing.
- Qiu, Z., Ma, X., Li, P., Zhao, X., & Wright, A. (2017). Micro-encapsulated phase change material (MPCM) slurries: Characterization and building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 246–262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.001>
- Qiu, Z., Ma, X., Zhao, X., Li, P., & Ali, S. (2016). Experimental investigation of the energy performance of a novel Micro-encapsulated Phase Change Material (MPCM) slurry based PV/T system. *Applied Energy*, 165, 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.053>
- Qiu, Z., Qin, C., Peng, L., Zhao, X., Zhang, T., Li, Z., . . . Zheng, Y. [Yurou] (2018). Physical instability suppression of microencapsulated phase change material(MPCM) suspensions. *Journal of Thermal Science and Technology*, 13(2). <https://doi.org/10.1299/jtst.2018jtst0033>
- Rady, M. (2009). Granular phase change materials for thermal energy storage: Experiments and numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15), 3149–3159. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.018>
- Regin, A. F., Solanki, S. C., & Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438–2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>

- Ren, H., Ma, Z., Lin, W., Fan, W., & Li, W. (2018). Integrating photovoltaic thermal collectors and thermal energy storage systems using phase change materials with rotary desiccant cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, 36, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.021>
- Reyna, A. M. (2018). *Modélisation du stockage de chaleur par changement de phase d'alliages à composition binaire soumis à un refroidissement contrôlé*. University of Bordeaux, Bordeaux. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02102859/document>
- Roy, S. K., & Sengupta, S. (1991). An evaluation of phase change microcapsules for use in enhanced heat transfer fluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 18(4), 495–507. [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(91\)90064-B](https://doi.org/10.1016/0735-1933(91)90064-B)
- Safari, A., Saidur, R., Sulaiman, F. A., Xu, Y., & Dong, J. (2017). A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 905–919. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.272>
- Said, Z., Sharma, P., Tiwari, A. K., van Le, V., Huang, Z. [Zuohua], van Bui, G., & Hoang, A. T. (2022). Application of novel framework based on ensemble boosted regression trees and Gaussian process regression in modelling thermal performance of small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) using hybrid nanofluid. *Journal of Cleaner Production*, 360, 132194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132194>
- Salaün, F., Devaux, E., Bourbigot, S., & Rumeau, P. (2009) US 2009/0291309 A1.
- Salunkhe, P. B., & Shembekar, P. S. (2012). A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5603–5616. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.037>
- Santbergen, R., Rindt, C., Zondag, H. A., & van Zolingen, R. (2010). Detailed analysis of the energy yield of systems with covered sheet-and-tube PVT collectors. *Solar Energy*, 84(5), 867–878. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.014>
- Saraç, E. G., Öner, E., & Kahraman, M. V. (2019). Microencapsulated organic coconut oil as a natural phase change material for thermo-regulating cellulosic fabrics. *Cellulose*, 26(16), 8939–8950. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02701-9>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 10(191). <https://doi.org/10.3390/su10010191>
- Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M., Maghrebi, M.-J., & Ghazikhani, M. (2017). Experimental study of using both ZnO/ water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.11.032>
- Sarı, A. (2004). Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid–liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties. *Energy Conversion and Management*, 45(13-14), 2033–2042. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.022>
- Sarı, A. (2011). Faz Değişimi Yoluyla Isıl Enerjinin Depolanması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar. In *Kimya Lisans Öğrencileri (Kimyagerlik, Kimya Öğretmenliği Ve Kimya Mühendisliği) Araştırma Projesi Eğitimi Çalıştayı*. Çanakkale. Retrieved from http://maycalistaylari.comu.edu.tr/kimya2/sunumlar/danisman/Ahmet_Sari_Danisman.pdf
- Sarı, A., Alkan, C., Kahraman Döğüşcü, D., & Biçer, A. (2014). Micro/nano-encapsulated n-heptadecane with polystyrene shell for latent heat thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 126, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.03.023>

- Sarı, A., Alkan, C., Karaipekli, A., & Uzun, O. (2009). Microencapsulated n-octacosane as phase change material for thermal energy storage. *Sol Energy*, 83(10), 1757–1763.
- Sarı, A., Karaipekli, A., & Alkan, C. (2009). Preparation, characterization and thermal properties of lauric acid/expanded perlite as novel form-stable composite phase change material. *Chemical Engineering Journal*, 155(3), 899–904. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.005>
- Sathe, T. M., & Dhoble, A. (2017). A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 645–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.075>
- Schossig, P., Henning, H., Gschwander, S., & Haussmann, T. (2005). Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2-3), 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.017>
- Serale, G. (2018). *Innovative solar energy technologies and control algorithms for enhancing demand-side management in buildings* (Doctoral Thesis). Politecnico di Torino, Torino. <https://doi.org/10.6092/POLITO/PORTO/2711298>
- Shahsavari, A., Eisaipour, M., & Talebizadehsardari, P. (2020). Experimental evaluation of novel photovoltaic/thermal systems using serpentine cooling tubes with different cross-sections of circular, triangular and rectangular. *Energy*, 208, 118409. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118409>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II - Implemented systems, performance assessment, and future directions. *Renew Sustain Energy Rev*, 50, 1566–1633.
- Sharma, A. [A.], Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 13, 318–345.
- Sharma, A. [Atul], Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Sharma, P., Said, Z., Memon, S., Elavarasan, R. M., Khalid, M., Nguyen, X. P., . . . Nguyen, L. H. (2022). Comparative evaluation of AI-based intelligent GEP and ANFIS models in prediction of thermophysical properties of Fe₃O₄-coated MWCNT hybrid nanofluids for potential application in energy systems. *International Journal of Energy Research*, 46(13), 19242–19257. <https://doi.org/10.1002/er.8010>
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., & Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193–228.
- Shen, C., Liu, F. [Feifan], Qiu, S., Liu, X., Yao, F., & Zhang, Y. [Yan] (2021). Numerical study on the thermal performance of photovoltaic thermal (PV/T) collector with different parallel cooling channels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101101. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101101>
- Shojaei, T. R., & Azhari, S. (2018). Fabrication, functionalization, and dispersion of carbon nanotubes. In *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures* (pp. 501–531). Elsevier.
- Shukla, A., Kant, K., Sharma, A. [Atul], & Biwole, P. H. (2017). Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160, 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.047>

- Smith, M. C. (2009). *Microencapsulated phase change materials for thermal energy storage: development, evaluation, and application: Microencapsulated phase change materials for thermal energy storage: development, evaluation, and application* UR - <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/5603> (PhD Thesis). The University of Auckland, Auckland.
- Sobhnamayan, F., Sarhaddi, F., Alavi, M. A., Farahat, S., & Yazdanpanahi, J. (2014). Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept. *Renew Energy*, 68, 356–365.
- Solanki, S. C., Dubey, S., & Tiwari, A. (2009). Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors. *Applied Energy*, 86, 2421–2428.
- SolarWall (2019). SolarWall PV/T. Retrieved from <https://www.solarwall.com/technology/pv-t/>
- Song, Q., Li, Y. [Yi], Xing, J. [Jianwei], Hu, J. Y., & Marcus, Y. (2007). Thermal stability of composite phase change material microcapsules incorporated with silver nano-particles. *Polymer*, 48(11), 3317–3323. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.03.045>
- Su, D., Jia, Y. [Y.], Alva, G., Liu, L. [Lingkun], & Fang, G.-Y. (2017). Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors integrated with phase change materials. *Energy Convers Manag*, 131, 79–89.
- Su, D., Yuting, J., Lin, Y., & Fang, G.-Y. (2017). Maximizing the energy output of a photovoltaic–thermal solar collector incorporating phase change materials. *Energy and Buildings*, 153, 382–391. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.027>
- Su, J.-F., Wang, L. [Lixin], & Ren, L. (2006). Fabrication and thermal properties of microPCMs: Used melamine-formaldehyde resin as shell material. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(3), 1522–1528. <https://doi.org/10.1002/app.23151>
- Su, J.-F., Wang, L.-X., Ren, L., Huang, Z. [Zhen], & Meng, X.-W. (2006). Preparation and characterization of polyurethane microcapsules containingn-octadecane with styrene-maleic anhydride as a surfactant by interfacial polycondensation. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(5), 4996–5006. <https://doi.org/10.1002/app.25001>
- Su, W., Darkwa, J., & Kokogiannakis, G. (2015). Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.044>
- Tadros, T. (2004). Application of rheology for assessment and prediction of the long-term physical stability of emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 108-109, 227–258. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2003.10.025>
- Talmatsky, E., & Kribus, A. (2008). PCM storage for solar DHW: An unfulfilled promise? *Solar Energy*, 82(10), 861–869. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.04.003>
- Tarish, A. L., & Alwan, N. T. (2017). Experimental Study of Paraffin Wax-Copper Nanoparticles Thermal Storage Material. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering*, 3(3). <https://doi.org/10.20431/2454-9711.0303002>
- Thomas, D. G. (1965). Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles. *Journal of Colloid Science*, 20(3), 267–277. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(65\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90016-4)
- Tonui, J. K., & Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy*, 81(4), 498–511. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.002>

- Trivedi, G., & Parameshwaran, R. (2020). Microencapsulated phase change material suspensions for cool thermal energy storage. *Materials Chemistry and Physics*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122519>
- Tseng, Y.-H., Fang, M.-H., Tsai, P. S., & Yang, Y.-M. (2005). Preparation of microencapsulated phase-change materials (MCPCMs) by means of interfacial polycondensation. *Journal of Microencapsulation*, 22(1), 37–46. <https://doi.org/10.1080/02652040400026558>
- Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., & Akiyama, T. (2011). Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1373–1391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.006>
- Umair, M. M., Zhang, Y. [Yuang], Iqbal, K., Zhang, S., & Tang, B. (2019). Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage—A review. *Applied Energy*, 235, 846–873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.017>
- Vand, V. (1945). Theory of Viscosity of Concentrated Suspensions. *Nature*, 155(3934), 364–365. <https://doi.org/10.1038/155364b0>
- Velraj, R., Seeniraj, R. V., Hafner, B., Faber, C., & Schwarzer, K. (1999). Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage System. *Solar Energy*, 65(3), 171–180. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00128-5)
- Vries, D. W. de (1998). *Design of a photovoltaic/thermal combi-panel* (Doktora Tezi). Eindhoven University of Technology, Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR516491>
- Wang, X. [Xichun], Niu, J., Li, Y. [Yi], Wang, X. [Xin], Chen, B., Zeng, R., . . . Zhang, Y. [Yinping] (2007). Flow and heat transfer behaviors of phase change material slurries in a horizontal circular tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(13-14), 2480–2491. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.12.024>
- Wang, Y., Chen, Z. [Zhenqian], & Ling, X. (2016). An experimental study of the latent functionally thermal fluid with micro-encapsulated phase change material particles flowing in microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 105, 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.159>
- Wang, Shugang, Wang, Jihong, & Zhang, Tengfei (2017). Analytical Modeling of Microchannel Heat Sinks Using Microencapsulated Phase Change Material Slurry for Chip Cooling. *Procedia Engineering*, 205, 2704–2711. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.194>
- Wolf, M. (1976). Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, 16(1-2), 79–90. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8)
- Wu, Y., Zhang, X. [Xuelai], Xu, X., Lin, X., & Liu, L. [Lu] (2020). A review on the effect of external fields on solidification, melting and heat transfer enhancement of phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 31, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101567>
- Yamagishi, Y. [Y.], Sugeno, T., Ishige, T., Takeuchi, H., & Pyatenko, A. T. (1996). An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium. In P. R. K. Chetty & W. D. Jackson (Eds.), *IECEC 96: Proceedings of the 31st intersociety energy conversion engineering conference* (pp. 2077–2083). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECEC.1996.553442>

- Yamagishi, Y. [Yasushi], Takeuchi, H., Pyatenko, A. T., & Kayukawa, N. (1999). Characteristics of microencapsulated PCM slurry as a heat-transfer fluid. *AIChE Journal*, 45(4), 696–707. <https://doi.org/10.1002/aic.690450405>
- Yang, L. [Liu], Liu, S., & Zheng, H. (2019). A comprehensive review of hydrodynamic mechanisms and heat transfer characteristics for microencapsulated phase change slurry (MPCS) in circular tube. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109312>
- Yazdanifard, F., Ebrahimnia-Bajestan, E., & Ameri, M. (2016). Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime. *Renewable Energy*, 99, 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.004>
- Yeşilyurt, M. K. (2015). *İki Fazlı Akışlarda Konik Yayların Boru İçi Isı Transferi ve Akış Kararsızlığı Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Yeşilyurt, M. K., & Çomaklı, Ö. (2023). Encapsulated Phase Change Material Slurries as Working Fluid in Novel Photovoltaic Thermal Liquid Systems: A Comprehensive Review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00599-0>
- Yeşilyurt, M. K., Nadaroğlu, H., & Çomaklı, Ö. (2019). Phase Change Materials and Selection Thereof for Heat Transfer Applications. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 3(2), 16–22. Retrieved from <http://www.injirr.com/article/download/33/35>
- Yeşilyurt, M. K., Nadaroğlu, H., & Çomaklı, Ö. (2020). Characterization of Physical, Thermal and Hydrodynamic Properties of Microencapsulated Phase Change Material Slurry as a Heat Transfer Fluid. In *4th International Symposium on Advanced Materials and Nanotechnology*.
- Yeşilyurt, M. K., Ömeroğlu, G., Çomaklı, Ö., & Nadaroğlu, H. (2018). Encapsulated Phase Change Material Slurries (ePCM-S) As Working Fluid In Heat Transfer Applications. In *4th International Conference on Sustainable Development*, Athens.
- Yoo, Y., Martinez, C., & Youngblood, J. P. (2017). Synthesis and Characterization of Microencapsulated Phase Change Materials with Poly(urea-urethane) Shells Containing Cellulose Nanocrystals. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(37), 31763–31776. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b06970>
- Young, J., Benner, J., Santamaria, A. D., & Asme. Fluid Properties of Microencapsulated Phase Change Material Slurries. In.
- Yu, Q., Chen, X., & Yang, H. (2021). Research progress on utilization of phase change materials in photovoltaic/thermal systems: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111313>
- Yu, Q., Tchenbou-Magaia, F., Al-Duri, B., Zhang, Z. [Zhibing], Ding, Y., & Li, Y. [Yongliang] (2018). Thermo-mechanical analysis of microcapsules containing phase change materials for cold storage. *Applied Energy*, 211, 1190–1202. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.021>
- Yuan, Z., Liang, K., Xue, Y., Yamada, Y., Isobe, K., & Horibe, A. (2022). Experimental study of evaluation of dynamical utilization of a microencapsulated phase change material slurry based on temperature range matching analysis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 130, 105788. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105788>

- Zeng, R., Wang, X. [Xin], Chen, B., Zhang, Y. [Yinping], Niu, J., Wang, X. [Xichun], & Di, H. (2009). Heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurry in laminar flow under constant heat flux. *Applied Energy*, 86(12), 2661–2670. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.025>
- Zhang, G., Cui, G., Dou, B., Wang, Z. [Zilong], & Goula, M. A. (2018). An experimental investigation of forced convection heat transfer with novel microencapsulated phase change material slurries in a circular tube under constant heat flux. *Energy Conversion and Management*, 171, 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.029>
- Zhang, P., & Ma, Z. W. (2012). An overview of fundamental studies and applications of phase change material slurries to secondary loop refrigeration and air conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5021–5058. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.059>
- Zhang, P., Ma, Z. W., & Rz, W. (2010). An overview of phase change material slurries: MPCs and CHS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.08.015>
- Zhang, X. [Xing-xiang], Fan, Y., Tao, X., & Yick, K. (2005). Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 281(2), 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.046>
- Zhang, X. [Xing-xiang], Tao, X., Yick, K., & Wang, X. [Xue-chen] (2004). Structure and thermal stability of microencapsulated phase-change materials. *Colloid and Polymer Science*, 282(4), 330–336. <https://doi.org/10.1007/s00396-003-0925-y>
- Zhang, Y., Wang, S. [S.], Rao, Z., & Xie, J. (2011). Experiment on heat storage characteristic of microencapsulated phase change material slurry. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(10), 2726–2733. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.015>
- Zhao, C. Y., & Zhang, G. H. (2011). Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3813–3832. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.019>
- Zhe, L. W., Yusoff, M. I., Abd Razak, A., Misrun, M. I., Ibrahim, S., Fahmi, M. I., & Rosmi, A. S. (2019). Effect of Water Cooling Temperature on Photovoltaic Panel Performance by Using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 56(1), 133–146. Retrieved from http://www.akademiabaru.com/doc/ARFMTSV56_N1_P133_146.pdf
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
- Zondag, A. H., Smidt, R. P. de, Veldhuis, J. B., & Boer, R. de (2016). *Advanced Heat Transfer Fluids*. Petten: Netherlands Ministry of Energy (ECN).
- Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 891–959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.012>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammet Kaan YEŞİLYURT
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Yeşilyurt M.K., Çomaklı Ö., 2023. Encapsulated Phase Change Material Slurries as Working Fluid in Novel Photovoltaic Thermal Liquid Systems: A Comprehensive Review. Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering https://doi.org/10.1007/s40997-023-00599-0 2. Yeşilyurt, M.K., Nadaroğlu, H. and Çomaklı, Ö., 2019. Phase Change Materials and Selection Thereof for Heat Transfer Applications. International Journal of Innovative Research and Reviews, 3 (2), 16–22. 3. Yeşilyurt MK, Nadaroğlu H, Çomaklı Ö (2020) Characterization of Physical, Thermal and Hydrodynamic Properties of Microencapsulated Phase Change Material Slurry as a Heat Transfer Fluid. In: 4th International Symposium on Advanced Materials and Nanotechnology, pp 232–237 4. Yesilyurt MK, Omeroglu G, Comaklı Ö, Nadaroğlu H (2018) Encapsulated Phase Change Material Slurries (ePCM-S) As Working Fluid In Heat Transfer Applications. In: 4th International Conference on Sustainable Development	