
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME/METAL KOMPOZİTLERİN TERMAL KARAKTERİZASYONU

Mustafa ÖZÇATALBAŞ

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa ÖZÇATALBAŞ

31/12/2025

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME/METAL KOMPOZİTLERİN TERMAL KARAKTERİZASYONU

(Doktora Tezi)

Mustafa ÖZÇATALBAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılan parafin esaslı faz değiştiren malzemelerin (FDM) düşük termal iletkenliklerinden kaynaklanan sınırlamaların giderilmesi amacıyla, metal köpükler ve grafen nanoplatelet (GNP) katkıları ile elde edilen kompozitlerin termal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Rubitherm RT42 tipi parafin, farklı gözenek yoğunluklarına sahip açık hücreli alüminyum köpükler ve GNP katkıları kullanılarak üç farklı yapı hazırlanmış; (i) parafin–metal köpük, (ii) parafin–GNP ve (iii) parafin–metal köpük–GNP kompozitleri üretilmiş ve termal performansları deneysel olarak incelenmiştir. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve kontrollü ergitme deneyleriyle elde edilen sonuçlar, metal köpüklerin ısı iletim yolları oluşturarak ergime süresini kısalttığını ve sıcaklık dağılımını homojenleştirdiğini; gözenek yoğunluğu ve porozite değerlerinin ise sıcaklık farkları üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Öte yandan GNP katkısının, düşük oranlarda dahi, parafinin termal iletkenliğini 2–5 kat artırdığı; ancak buna karşılık gizli ısı değerlerinde sınırlı azalmaya yol açtığı belirlenmiştir. Kompozitlerin farklı ısı girdilerinde (3 W ve 5 W) test edilmesiyle, özellikle GNP ve metal köpüğün birlikte kullanıldığı yapılarla daha kararlı sıcaklık profilleri elde edilmiş ve faz değişim süresinin kısaldığı ortaya konmuştur. Sonuç olarak, metal köpük ve GNP katkılarının pozitif etkileri sayesinde parafin esaslı FDM'lerin termal performanslarının önemli ölçüde iyileştirilebileceği, bu kompozitlerin elektronik soğutma, batarya termal yönetimi ve güneş enerjisi destekli ısı depolama sistemleri gibi yüksek verim gerektiren uygulamalarda güçlü bir alternatif oluşturduğu ortaya konmuştur.

Bilim Kodu	:	92809
Anahtar Kelimeler	:	Faz değiştiren malzeme, metal köpük, grafen nanoplatelet
Sayfa Adedi	:	79
Danışman	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

THERMAL CHARACTERIZATION OF PHASE CHANGE MATERIAL/METAL COMPOSITES

(Ph. D. Thesis)

Mustafa ÖZÇATALBAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2025

ABSTRACT

In this doctoral study, the thermal characterization of composites developed to overcome the limitations arising from the low thermal conductivity of paraffin-based phase change materials (PCMs), widely used in energy systems, was carried out through the integration of metal foams and graphene nanoplatelets (GNPs). Using Rubitherm RT42 paraffin, open-cell aluminum foams with different pore densities, and GNP additives, three distinct composite structures were prepared: (i) paraffin–metal foam, (ii) paraffin–GNP, and (iii) paraffin–metal foam–GNP. These composites were produced and experimentally analyzed in terms of their thermal performance. Differential scanning calorimetry (DSC and controlled melting experiments revealed that metal foams form effective thermal conduction pathways, thereby shortening the melting duration and homogenizing the temperature distribution, while pore density and porosity values play a decisive role in temperature gradients. Furthermore, it was observed that the addition of GNPs, even at low concentrations, enhanced the thermal conductivity of paraffin by 2–5 times, though accompanied by a limited reduction in latent heat values. Testing under different heat inputs (3 W and 5 W) demonstrated that composites combining both GNPs and metal foams exhibited more stable temperature profiles and shortened phase change durations. Consequently, the positive effects of GNP and metal foam additives were shown to significantly improve the thermal performance of paraffin-based PCMs, making these composites a strong alternative for high-efficiency applications such as electronic cooling, battery thermal management, and solar energy-supported thermal storage systems.

Science Code	:	92809
Keywords	:	Phase change material, metal foam, graphen nanoplatelet
Page Number	:	79
Supervisor	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

TEŞEKKÜR

İnsan hiçbir zaman kendi kendine yeter bir varlık olmadı. Eksikleri, zaafları ve korkuları ile yaşamak zorunda kaldığı için birlikteliğe ihtiyaç duydu. Belki de bundandır ki çevremizdekilerden destek görmek ister, zorlandığımız noktalarda onlardan güç alırız. İşte bu çalışma da sadece benim değil, bana destek olan birçok değerli şahıs ve kurumun katkısı ile ortaya çıktı. Başta sevgili eşim Melis ve canım kızım Özüm her daim çalışmalarımda beni rahat ettirebilmek için desteklerini esirgemedi. Umutsuzluğa kapıldığımda neşe kaynaklarım oldu. Babam Yusuf ÖZÇATALBAŞ her zaman bana yol gösterdi ve motive etti. Annelerin yüreği yufka olur. Annem beni sürekli çalışırken görmekten pek mutlu değildi tabi. Kıymetli danışmanım Prof. Dr. Adnan SÖZEN'in katkıları sayesinde deneysel çalışmalarımı ilerletebildim. Kendisinin değerli bilgi ve görüşleri neticesinde bu tezi sonlandırabilmekteyim. Ayrıca ASELSAN A.Ş'nin tez sürecinde bana vermiş olduğu teçhizat ve ekipman destekleri sayesinde birçok zorluğun üzerinden gelebildim. İşte bu nedenlerden dolayı hepsine minnettar olduğumu belirtmek ister, teşekkürü ise bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Nano Malzemelerin Kullanımı 5

2.2. FDM/Metal Yapıların Kullanımı 10

2.2.1. Eklemeli imalat ile üretilen metal yapıların kullanımı 10

2.2.2. Metal köpüklerin kullanımı 13

2.2.3.Termal hesaplamalarda sayısal yöntemlerin kullanımı 25

3. TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR 27

3.1. Termal Enerji Depolama Sistemleri 27

3.1.1. Duyulur ısı depolama sistemleri 28

3.1.2. Gizli ısı depolama sistemleri 28

3.1.3. Termokimyasal ısı depolama sistemleri 29

3.2. Parafin Esaslı Faz Değiştiren Malzemeler 30

3.2.1. Kimyasal ve fiziksel özellikleri 31

3.2.2. Parafinlerin termofiziksel analizi 32

3.3. Metal Köpükler 35

Sayfa

3.3.1. Açık gözenekli metal köpüklerin üretim yöntemleri 36
3.3.2. Termal özellikleri 37
3.4. Grafen Nanoplatelet 39
3.4.1. Termofiziksel özellikleri 40
3.4.2. Üretim yöntemleri 41
4. MATERYAL VE YÖNTEMLER 43
4.1. Materyaller 43
4.1.1. FDM Parafin: RUBITHERM42 44
4.1.2. Açık gözenekli Al metal köpükler 45
4.1.3. Nano partikül: Grafen nanoplatelet 46
4.2. Deney Düzeneği 46
4.3. Ölçüm Belirsizlikleri 48
4.4. Numune Hazırlığı 50
4.4.1. Parafin-Al köpük numune hazırlığı 50
4.4.2. Parafin-Grafen nanoplatelet karışımının hazırlanması 51
4.4.3. Parafin-Al köpük-Grafen nanoplatelet numune hazırlığı 52
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 53
5.1. Parafin-Alüminyum Köpük Kompozitlerin Deneysel Sonuçları 53
5.2. Parafin-Grafen Nanoplatelet Karışımın Deneysel Sonuçları 59
5.3. PGNK – Al Köpük Kompozitlerin Deneysel Sonuçları 63
5.4. Termal İletkenliklerin karşılaştırılması 68
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 71
ÖZGEÇMİŞ 79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Karbon sayısına bağlı olarak bazı parafinlerin ergime noktaları ve gizli ısı değerleri. 31

Çizelge 3.2. Eksfoliasyon yöntemleri 42

Çizelge 4.1. RT42'ye ait özellikler 44

Çizelge 4.2. Al köpük numunelere ait porozite PPI değerleri 45

Çizelge 4.3. Nano platelet özellikleri 46

Çizelge 4.4. Ölçüm belirsizlikleri 48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Faz değişim prosesinin şematik gösterimi 1

Şekil 1.2. Faz değiştiren malzemelerin gizli ısıları ve faz değişim sıcaklıklarına göre sınıflandırılması 2

Şekil 1.3. Faz değiştiren malzemelerin kimyasal sınıflandırılması 2

Şekil 2.1. Parafin/Grafen SEM görüntüsü (a) 10000x büyütme; (b) 50000x büyütme 6

Şekil 2.2. Nano partikülün yapısı ve kütle oranına bağlı olarak (a) termal iletkenlik; (b) viskozite değişimi 8

Şekil 2.3. FDM/nano malzeme kompozitlerin termal iletkenlikleri 9

Şekil 2.4. Eklemeli imalat ile üretilmiş kanatlı boru 11

Şekil 2.5. Kanatlı boru/Parafin ısı değiştiricisi test düzeneği 11

Şekil 2.6. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş parafin ısı kuyusu. 12

Şekil 2.7. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş farklı gözenek büyüklüklerine sahip FDM'li ısı depolama yapıları. 12

Şekil 2.8. Bakır ve Nikel köpük malzemeler. ε = %95 Bakır köpük (a), ε = %97 Bakır köpük, (b), ε = %97 Nikel köpük 14

Şekil 2.9. Aynı sürede sadece parafin ve parafin/metal köpük yapıdaki ergime miktarları 15

Şekil 2.10. Aynı zaman dilimlerinde (a) sadece parafin ve (b) bakır köpük/parafin kompozit katı-sıvı arayüzlerinin ergime sürecindeki görüntüsü 16

Şekil 2.11. Efektif termal iletkenlik (a) Bakır köpük/parafin kompozit, (b) Nikel köpük/parafin kompozit 17

Şekil 2.12. Faz değişim arayüzleri. (a) %96,9 10PPI, (b) %93,4 10PPI, (c) %88,4 10PPI 18

Şekil 2.13. Porozite oranı (a) ve gözenek boyutunun (b) taban sıcaklığına etkisi 19

Şekil 2.14. Test düzeneği 20

Şekil 2.15. (a) Sadece parafin olduğunda ve (b) parafin/bakır köpük olduğu durumda kompozit içerisindeki sıcaklık dağılımı 21

Şekil 2.16. Vakum emprenye yöntemi 23

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.17. Faz değiştiren malzemeler için tipik bir DSC grafiği 24
Şekil 2.18. FDM/Metal köpük yapıların PPI değerine göre termal iletkenlikleri 25
Şekil 2.19. Farklı zamanlar için verilen sıvı katı-sıvı dağılımı 25
Şekil 2.20. FDM ve metal köpüklerin ayrı olarak modellenmesi 26
Şekil 3.1. Termal enerji depolama sistemleri 27
Şekil 3.2. Isı depolama tankı 28
Şekil 3.3. FDM katkılı kanatlı-boru ısı değiştirici 29
Şekil 3.4. Basitleştirilmiş bir kimyasal ısı depolama çevrimi 30
Şekil 3.5. (a) Düz ve (b) dallanmış yapıdaki parafin zinciri 30
Şekil 3.6. Hitachi DSC7000 serisi DSC cihazı 33
Şekil 3.7. DSC grafiği ve yorumlanması 34
Şekil 3.8. Örnek bir TGA grafiği 35
Şekil 3.9. (a) Açık ve (b) kapalı gözenekli metal köpük 36
Şekil 3.10. Hassas döküm yöntemi ile açık gözenekli köpük üretimi 37
Şekil 3.11. Replika yöntemi ile açık gözenekli köpük üretimi 37
Şekil 3.12. Metal köpüklü hava soğutmalı ısı değiştiriciler 38
Şekil 3.13. Açık gözenekli köpük şematik hücre yapısı 39
Şekil 3.14. GNP'ye ait SEM görüntüsü 40
Şekil 3.15. Grafen nanoplatelet makro görüntüsü 41
Şekil 4.1. Deneysel çalışma adımları 43
Şekil 4.2. RT42 DSC grafiği 45
Şekil 4.3. Al köpük (a)10 PPI, (b)20 PPI ve (c)30 PPI 46
Şekil 4.4. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü 47
Şekil 4.5. Termokupl demeti 47
Şekil 4.6. Deney düzeneği 48
Şekil 4.7. Hazne yalıtımı 48

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. Parafin-Al köpük hazırlığı 51

Şekil 4.9. Parafin-Grafen nanoplatelet hazırlığı 51

Şekil 4.10. Parafin-Al köpük-Grafen nanoplatelet hazırlığı 52

Şekil 5.1. 3W ısı girdisinde taban konumu sıcaklık değişimi 54

Şekil 5.2. 3W ısı girdisinde orta konumu sıcaklık değişimi 54

Şekil 5.3. 3W ısı girdisinde üst konumu sıcaklık değişimi 55

Şekil 5.4. 3W ısı girdisinde sıcaklık farkları 56

Şekil 5.5. 5W ısı girdisinde taban konumu sıcaklık değişimi 57

Şekil 5.6. 5W ısı girdisinde orta konumu sıcaklık değişimi 57

Şekil 5.7. 5W ısı girdisinde üst konumu sıcaklık değişimi 58

Şekil 5.8. 5W ısı girdisinde sıcaklık farkları 59

Şekil 5.9. Parafin ve parafin-grafen nanoplatelet DSC grafiği 60

Şekil 5.10. 3W ısı girdisinde sadece parafin ve parafin-grafen nanoplatelet karışımının sıcaklık değişimi 61

Şekil 5.11. 5W ısı girdisinde sadece parafin ve parafin-grafen nanoplatelet karışımının sıcaklık değişimi 61

Şekil 5.12. 3W ısı girdisinde sadece parafin ve PGNK'nın sıcaklık farkları 62

Şekil 5.13. 5W ısı girdisinde sadece parafin ve PGNK'nın sıcaklık farkları 63

Şekil 5.14. 3W ısı girdisinde parafin-10 PPI Al köpük ve PGNK-10 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları 64

Şekil 5.15. 3W ısı girdisinde parafin-20 PPI Al köpük ve PGNK-20 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları 64

Şekil 5.16. 3W ısı girdisinde parafin-30 PPI Al köpük ve PGNK-30 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları 65

Şekil 5.17. 5W ısı girdisinde parafin-10 PPI Al köpük ve PGNK-10 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları 66

Şekil 5.18. 5W ısı girdisinde parafin-20 PPI Al köpük ve PGNK-20 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları 66

Şekil 5.19. 5W ısı girdisinde parafin-30 PPI Al köpük ve PGNK-30 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları 67

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.20. Termal iletim katsayılarının karşılaştırması 68

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

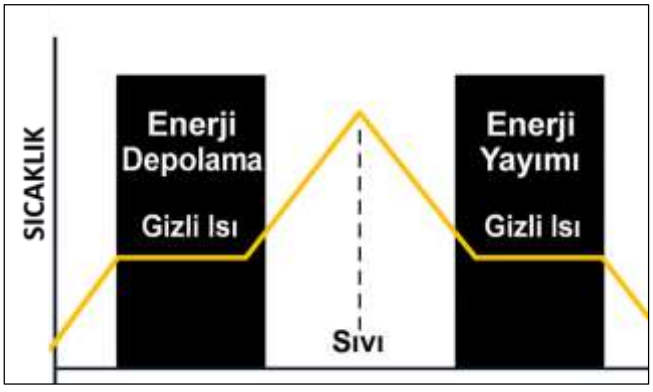
Simgeler	Açıklamalar
A	Isı Transfer Alanı
c_p	Özgül Isı Kapasitesi
f	Faz Değişim Oranı
H	Gizli Isı
I	Elektrik Akımı
L	Isı İletim Yönündeki Mesafe
m	Kütle
Q	Isı Enerjisi
T	Sıcaklık
T_i	Başlangıç Sıcaklığı
T_f	Son Sıcaklık
T_m	Ergime Sıcaklığı
T_0	Başlangıç Referans Sıcaklığı
T^*	Boyutsuz Sıcaklık
V	Elektrik Gerilimi
W	Watt
µW	Mikro Watt
ε	Porozite
ω	Gözenek Yoğunluğu
λ	Termal İletkenlik
µ	Dinamik Vizkosite
ρ	Yoğunluk
ρ_s	Katı Yoğunluğu
σ	Ölçüm Belirsizliği
ΔT	Sıcaklık Farkı

Kısaltmalar	Açıklamalar
Al	Aluminyum
CNT	Karbon Nanotüp
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
EPDM	EthylenePropylene Diene Monomer
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GNP	Graphene Nanoplatelet
PGNK	Parafin–Grafen Nanoplatelet Karışımı
PCM	Phase Change Material
PPI	Pore Per Inch (Birim İnç Başına Gözenek Sayısı)
RT42	Rubitherm RT42 Parafin
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TED	Termal Enerji Depolama
TGA	Termogravimetrik Analiz
VAC	Alternatif Akım Gerilimi

1. GİRİŞ

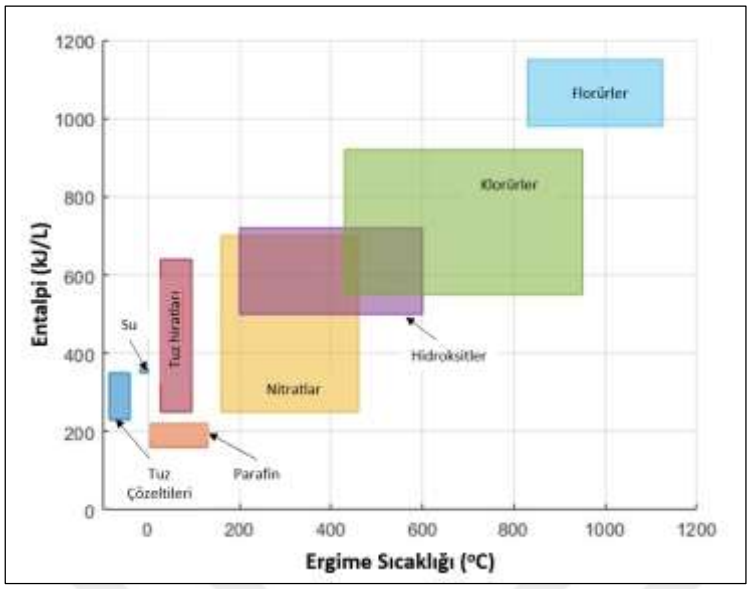
Faz Değiştiren Malzemeler (FDM); yüksek ısı depolayabilme ve faz değişimlerini sabit sıcaklıkta gerçekleştirebilme özelliklerine sahiptir. Basit bir kıyaslama yapmak gerekirse FDM'lerin su, yapı malzemesi ve kayaya göre 5 ile 14 kat arasında daha fazla birim hacim başına ısı depolayabildiği belirlenmiştir [1]. Bu sayede FDM'ler elektronik soğutma, elektrikli araç batarya termal yönetimi, binaların ısı kayıplarının önlenmesi ve güneş kolektörlerinin verimlerinin arttırılması gibi birçok alanda kullanılmaktadır [2-4]. Ayrıca, FDM'lerin uzay araçları ve uydu termal yönetim sistemlerine entegre edilmesine yönelik çalışmalar eskiye dayanmaktadır. [5, 6]. Verilen örneklerden anlaşılacağı üzere cep telefonlarından, bina yalıtımlarına kadar farklı ölçeklerdeki sistemlere FDM'ler uygulanabilir niteliktedir.

Faz değiştiren malzemelerin ısınma ve soğuma çevrimlerindeki sıcaklıkları Şekil 1.1'de şematik olarak verilmiştir. Belirtildiği üzere FDM ergime süreci sırasında ısıyı soğurur ve donma sırasında serbest bırakır. Bu faz geçişleri nispeten sabit sıcaklıklarda gerçekleştiğinden uygun FDM seçimi ile istenilen sıcaklıkta sistemlerin termal yönetimi sağlanır. Örneğin; Li-İon bataryaların optimum çalışma sıcaklığı 15-35 ^{o}C aralığındadır [7]. Bu durumda, 15-35 ^{o}C aralığında faz değiştiren bir malzemenin elektrikli araç batarya soğutma sisteminde kullanılması aktif soğutma sisteminin enerji sarfiyatı azaltılacaktır.



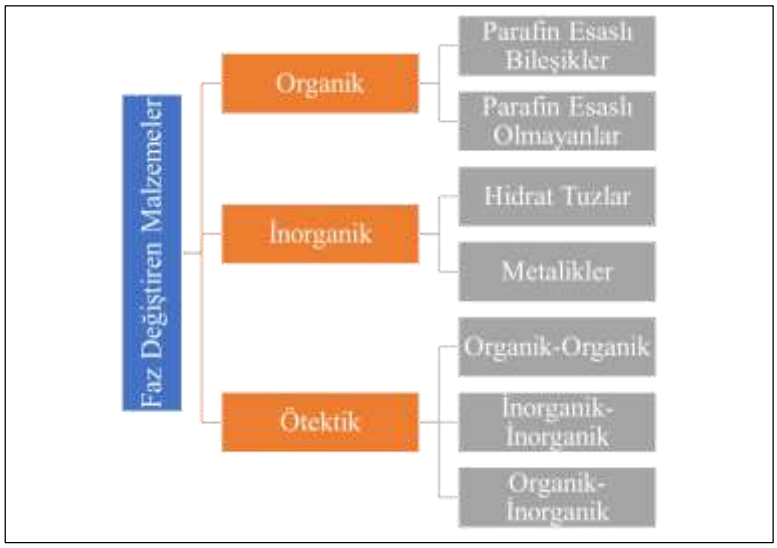
Şekil 1.1. Faz değişim sürecinin şematik gösterimi

Faz değiştiren malzemeler; asitler, organik bileşikler, metaller ve minerallerden oluşur. Bu malzemelerin ergime sıcaklıkları –100°C ile 1100°C arasında değişmektedir. Faz değişim sıcaklıkları ve entalpilerine bağlı olarak FDM'ler Şekil 1.2'deki gibi kategorize edilirler [8].



Şekil 1.2. Faz değiştiren malzemelerin gizli ısıları ve faz değişim sıcaklıklarına göre sınıflandırılması [8]

Faz değişim sıcaklık aralıkları (0°C ila 150°C) ve korozif olmayan kimyasal yapıları nedeniyle parafinler, termal yönetim sistemlerinde en yaygın kullanılan FDM'lerdir. Parafinler yüksek gizli ısı kapasitesine sahip olmalarına rağmen, ısı iletimi konusunda sınırlı bir performans sergilerler. Yaklaşık 0,2 W/mK olan düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle, faz değişimi sırasında ısı transferi hızı düşer [9]. Parafin bazlı bileşiklerin bir diğer dezavantajı ise yüksek hacimsel genleşmeleridir. Parafinin sıcaklığı arttıkça yoğunluğu azalır, bu da önemli hacim değişimlerine yol açar ve pratik uygulamalarda mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır [10].



Şekil 1.3. Faz değiştiren malzemelerin kimyasal sınıflandırılması [11]

Şekil 1.3'te belirtildiği üzere FDM'ler; organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Organik FDM'ler, stabil ergime özelliklerine sahip olup faz ayrışması veya gizli ısı kaybı olmadan defalarca katı-sıvı hal değişimleri gösterirler. Ayrıca, kendi kendine çekirdeklenme özellikleri sayesinde çok az veya hiç aşırı soğuma olmadan katılaşırlar. Aynı zamanda parafin esaslı FDM'lerin korozif etkileri azdır. İnorganik FDM'lerin başlıca türü olan hidrat tuzları, birim hacim başına yüksek gizli ısı depolama, nispeten yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip olma ve ergime sırasında düşük hacim değişimi gibi avantajlara sahiptir. Ötektik FDM'ler ise iki veya daha fazla bileşenin kompozisyonundan oluşur. Böylece ötektik FDM'ler yüksek gizli ısı değeri ve termal iletkenlik katsayısına sahip olurken düşük korozif etkiler oluşturur [11].

Faz değiştiren malzemeler organik, inorganik ya da ötektik olsalar dahi termal iletkenlik katsayıları metallere göre oldukça düşüktür. Genel olarak bu malzemelerin termal iletkenliklerinin 0,2 W/mK mertebesinde olduğunu belirtebiliriz [9]. Bu değer paslanmaz çeliğin termal iletkenliğinin yaklaşık %2'si, alüminyumun %0,15'i ve bakırın %0,5'i kadardır. Düşük termal iletkenlik, FDM açısından önemli bir dezavantaj teşkil etmektedir; zira bu durum, ısının malzeme içerisinde yavaş bir şekilde iletilmesine neden olarak faz değişim sürecinin etkinliğini düşürmektedir. Isının yetersiz iletimi, FDM'in yalnızca yüzey bölgelerinde faz değişiminin gerçekleşmesine, iç kısımlarda ise bu sürecin gecikmesine yol açmakta; böylece malzemenin tüm ısı depolama potansiyelinden yararlanılması engellenmektedir. Ayrıca, düşük iletkenlik malzeme içerisinde belirgin sıcaklık gradyentlerinin oluşmasına neden olmakta, bu da sistemin tepki süresini uzatarak sıcaklık kontrolünü güçleştirmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında FDM'lerin termal iletkenliğinin arttırılması amaçlanmıştır. Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan parafin FDM olarak seçilmiş ve termal iletkenliğini arttırıcı değişiklikler deneysel yöntemlerle incelenmiştir. İncelenen yöntemler 3 farklı guruba ayrılmıştır. İlk olarak parafin farklı gözenek yoğunluğuna sahip açık gözenekli köpükler ile birleştirilmiştir. İkinci uygulamada parafin nano-grafen malzeme ile bir araya getirilmiş ve son olarak ilk iki yöntem tek bir yapı haline getirilerek parafin-Al köpük-grafen birleşimi oluşturulmuştur. Çalışma süresince deneysel yöntemler ile belirtilen parafin birleşimlerinin FDM üzerindeki termal iletkenlik katkıları kıyaslanmıştır.

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

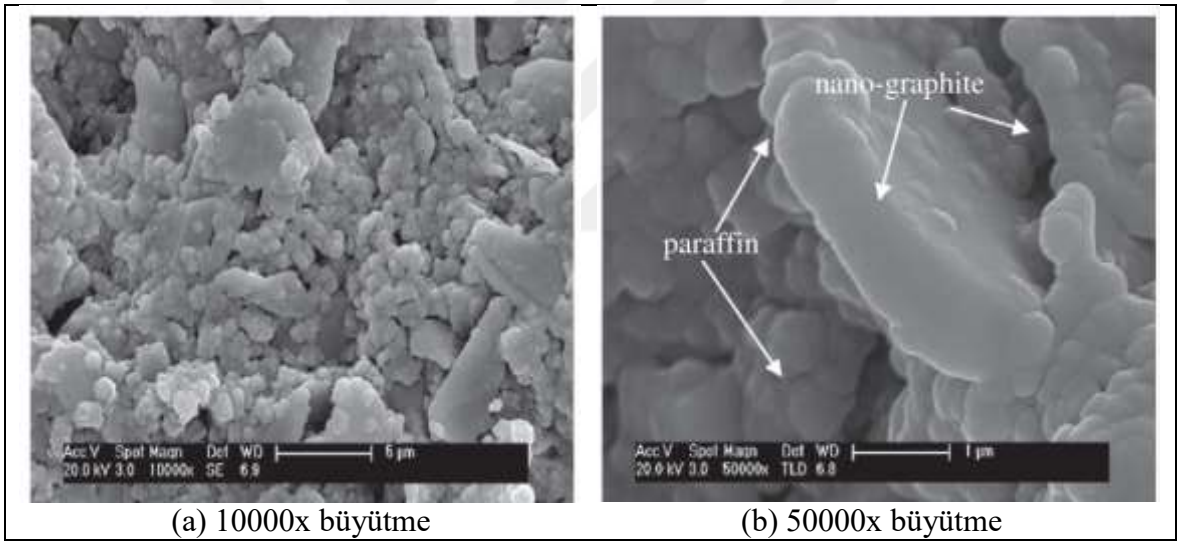
FDM'lerin termal iletkenliklerini iyileştirmeye yönelik uygulamalar nano partikül eklenmesi ve yüksek iletkenliğe sahip metal yapılar ile FDM'lerin birleştirilmesi çevresinde toplanmaktadır. Literatürde FDM'lerin termal iletkenliğini arttırırken ısı depolama kapasitelerini minimum etkileyen yöntem deneysel ya da sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Bu bölüm içerisinde literatürde belirtilen uygulamalar özetlenecektir.

2.1. Nano Malzemelerin Kullanımı

Nano partiküller yüksek termal iletkenlikleri, karışım oluşturabilme kabiliyeti ve geniş yüzey alanları sayesinde farklı ısıl sistemlerde kullanılmaktadır. Bu sistemlerden başlıcaları nano akışkan tabanlı ısı değiştiricilerdir. Son zamanlarda Bacak ve diğerleri (2025) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada; helisel akış kanallarına sahip bir kabuk-tüp yapıdaki ısı değiştiricide MnFe2O4-ZnFe2O4/su karışımının kullanılması ile ısı transfer katsayısının %16 oranında arttığını göstermişlerdir [12]. Bir başka çalışmada benzer şekilde yeni geliştirilen kabuk ve helisel borulu ısı değiştiricilerin termal verimliliğini artırmak amacıyla tekli (TiO_2/su) ve hibrit (CuO-TiO_2/su) nanoakışkanlar kullanmıştır. TiO_2/su nanoakışkanı kullanıldığında, kanatlı ve kanatsız ısı değiştiricilerde toplam ısı transfer katsayısı sırasıyla %8,6 ve %7,5 oranında artırılmıştır. CuO-TiO_2/su hibrit nanoakışkanı kullanıldığında ise, toplam ısı transfer katsayısı kanatlı ısı değiştiricilerde %10,8; kanatsız ısı değiştiricilerde ise %12 oranında yükselmiştir [13].

Metal oksitler nanoakışkan sistemlerinin etkinliğini arttırmakta kullanılırken FDM'lerin termal iletkenliğini arttırmada tercih edilmezler. Grafen nano plakalar (GNP) ve çok-duvarlı-karbon-nantüp (MWCNT) malzemelerinin parafinin ile kullanımı literatürde geniş yer tutmaktadır. Kumar ve diğerleri (2019); %2 oranındaki grafenin parafin ile birleştirilmesi sayesinde parafin-grafen kopozit yapısının termal iletkenliğinin parafine göre %66,15 oranında arttığını belirtmişlerdir [14]. Bir diğer çalışmada, parafin içerisine %1–5 oranında xGNP (genişletilmiş grafit nanoplatelet) eklendiğinde, kompozit FDM'in ısı iletim katsayısı 0.25 W/m·K'den yaklaşık 1,1 W/m·K'ye kadar yükselmiştir. Bu artış, grafen türevi katkıların FDM'in termal iletkenliğini yaklaşık 4 kat artırabildiğini ve bu etkinin katkı oranıyla doğrusal bir ilişki gösterdiğini ortaya koymuştur [15]. Benzer şekilde Temel ve

diğerleri (2018) çalışmalarında GNP katkılı GNP/parafin kompozitlerinde, %3, %5 ve %7 katkı oranlarında termal iletkenlik sırasıyla %105, %181 ve %253 oranında artış göstermiştir. Buna karşın, artan GNP içeriğiyle gizli ısı değerlerinde %2,2 ila %15,6 arasında azalma gözlemlenmiştir. %7 GNP katkısıyla, ısı kaynağına en yakın ve en uzak noktalar arasındaki sıcaklık farkı 10,6 °C azalmış, enerji depolama süresi ise 32 dakika uzamıştır. Ayrıca, 50 ısıtma/soğutma çevrimi sonunda termal performansın kararlılığını koruduğu belirlenmiştir [16]. Termal iletkenlik artışının mikro düzeydeki mekanizması nano grafenin parafin içerisinde rastgele ve katmanlar halinde dağılması ile açıklanmaktadır. Grafen iletkenliği arttırırken gizli ısıda bir miktar azalmaya sebep olmakta ve faz değişim başlangıç sıcaklığını da etkilemektedir. Ancak grafenin düşük maliyetli ve kolay üretilebilir olması, onu FDM'lerin termal iletkenliğini artırmak için etkili bir katkı malzemesi hâline getirmektedir. [17].



(a) 10000x büyütme (b) 50000x büyütme

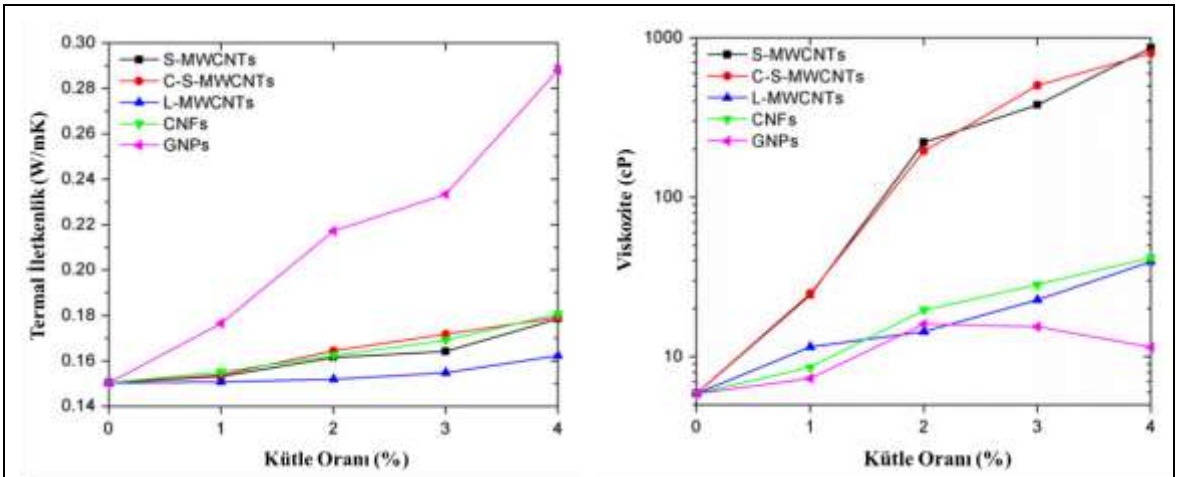
Şekil 2.1. Parafin/Grafen SEM görüntüsü (a) 10000x büyütme; (b) 50000x büyütme [17]

Mills ve diğerleri (2006) yaptıkları deneysel çalışmalar, grafit matris içine emdirilen parafin bazlı kompozitlerin termal yönetim açısından oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Artan matris yoğunluğu ile birlikte FDM'in kütle oranı azalmakta, ancak kompozit yapının termal iletkenliği saf FDM'ye kıyasla 20 ila 130 kat daha yüksek olmaktadır. Ayrıca, yüksek yoğunluktaki kompozit malzeme anizotropik iletkenlik göstermekte ve sıkıştırma yönüne dik doğrultuda daha yüksek iletkenlik sergilemektedir. Yazarlar; bu tür yapıların hem yüksek FDM içeriği hem de yüksek ısı iletim katsayısı sağlayarak, Lityum-İyon batarya paketlerinde

kullanılan pasif termal yönetim sistemleri için basit ve etkili bir çözüm olduğu belirtmiştir [18].

Grafen için verilen literatür çalışmalarında olduğu gibi karbon nano tüpler de benzer şekilde parafin ile birleştirilerek parafinin termo-fiziksel özellikleri değiştirilmiştir. MWCNT katkısının kütle oranı ve nanotüp çaplarının, FDM/MWCNT kompozitlerinin termal özellikleri üzerindeki etkisi olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda 5% kütle oranında katkı ile, dış çapı 50–80 nm olan kısa MWCNT'lerle %18,41, uzun MWCNT'lerle ise %42,54 oranında ısı iletim katsayısı artışı elde edilmiştir. Uzun MWCNT katkılarında dış çap arttıkça iletkenlikteki iyileşme sırasıyla %9,95 (çap <7 nm), %33,60 (çap 20–30 nm) ve %42,54 (çap 50–80 nm) olarak artmıştır. Ergime ve donma sıcaklıklarında belirgin değişiklik görülmezken, gizli ısı değerlerinde artan katkı oranıyla birlikte %10'a kadar azalma kaydedilmiştir [19, 20]. Bir diğer çalışmada, farklı konsantrasyonlardaki MWCNT katkıları parafin içerisine eklenerek FDM/MWCNT örnekleri hazırlanmıştır. DSC analizleriyle yapılan deneylerde, MWCNT katkısının parafinin ergime başlangıç sıcaklığını düşürdüğü, donma başlangıç sıcaklığını ise artırdığı belirlenmiştir. Bu durum, faz değişiminin daha geniş bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesini sağlamakta ve %3 MWCNT katkısında faz değişim ısısındaki azalma yalnızca %2 gibi düşük bir seviyede kalmaktadır. Sonuç olarak, MWCNT katkısı, parafinin daha dengeli ve geniş aralıkta termal enerji depolaması için gelecek vadeden bir çözüm olarak değerlendirilmiştir [21].

Yu ve diğerleri (2013) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada grafen ve karbon nanotüplerin parafin üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, grafen nanoplateletler (GNP) iki boyutlu düzlemsel yapıları sayesinde, karbon nanotüp (CNT) ve karbon nanofiber (CNF) gibi tel şeklindeki karbon nanomalzemelere kıyasla ısı iletimini artırmada daha yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. GNP katkısının ayrıca, yüksek katkı oranlarında bile viskoziteyi düşük seviyede tuttuğu veya azalttığı gözlemlenmiştir [22].



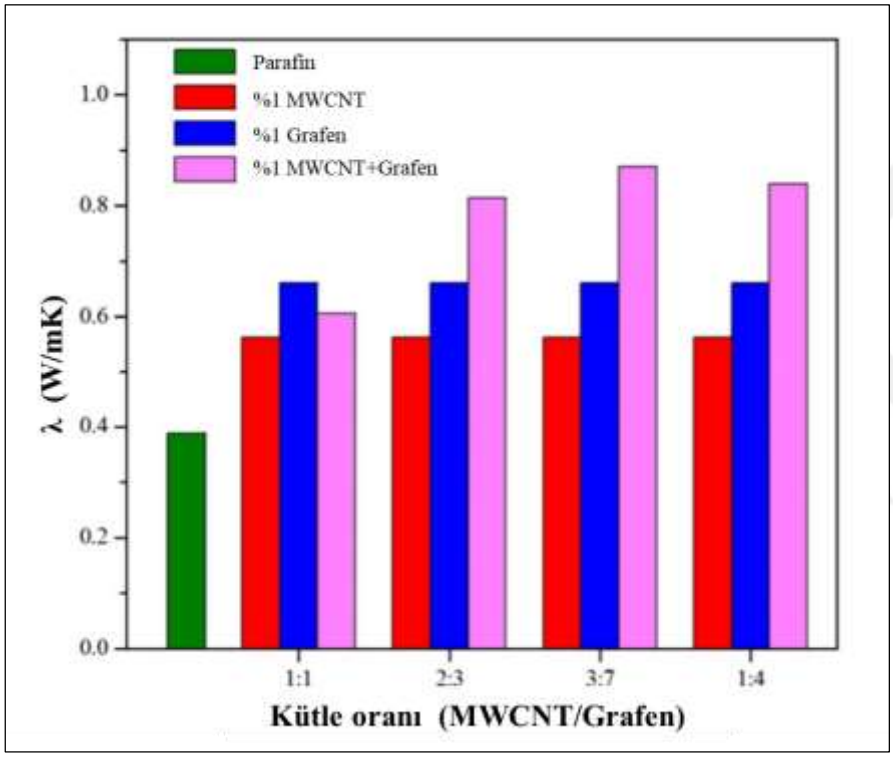
(a) Termal iletkenlik (b) Viskozite

Şekil 2.2. Nano partikülün yapısı ve kütle oranına bağlı olarak (a) termal iletkenlik; (b) viskozite değişimi [22].

Yukarıda özetlenen çalışmalara paralel olarak; parafin bazlı FDM'ye %0,3–0,9 oranlarında MWCNT katkısı yapılarak elde edilen kompozit yapının ergime ve donma davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak ağırlıkça %0,9 MWCNT katkısıyla katı halde %22, sıvı halde %29 oranında ısı iletim katsayısı artışı sağlandığını göstermiştir. Ayrıca, katkısız parafin yapısına kıyasla ergime süresi %29, donma süresi ise %42 oranında azalmış, böylece ısı transfer etkenliği önemli ölçüde arttırılmıştır. Elde edilen çıktılar ile, MWCNT katkısının FDM'lere hızlı enerji depolama/geri kazanımı sağlayarak özellikle güneş enerjisi destekli ısı depolama uygulamaları için büyük potansiyel taşıdığını vurgulanmıştır [23].

Lityum-iyon bataryaların termal yönetim performansını iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada, grafen ve MWCNT katkılı kompozit FDM hazırlanarak deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, %1 oranında karbon katkısı ile optimum termal iletkenlik sağlanabildiği ve bu katkıların sıvı FDM'de ani sıcaklık artışını da baskıladığı belirlenmiştir. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere en iyi sonuç, kütle oranı %30 MWCNT – %70 grafen olan kompozit FDM ile elde edilmiş; bu yapı, saf FDM'ye göre %124, yalnızca MWCNT ve yalnızca grafen katkılı FDM'lere göre sırasıyla %55,4 ve %31,8 daha yüksek ısı iletim katsayısı göstermiştir. Ayrıca, bu kompozit yapı sıcaklık artış/azalış sürelerini sırasıyla %63,3 ve %50 oranında kısaltarak; yalnızca yüksek iletkenlik değil, sıcaklık artışını baskılayan bir yapı sergilemiştir [24]. Babapoor, Azizi ve Karimi de karbon fiber kullanarak FDM'lerin ısı transfer etkenliğini arttırmayı ve böylece Lityum-İyon bataryaların kullanımında yaygınlaşmasını hedeflemişlerdir. Çalışmalar neticesinde en iyi

performans, %0,46 oranında ve 2 mm uzunluğundaki karbon fiberlerle elde edilmiş; bu durumda pil yüzeyindeki sıcaklık artışı %45 oranında azaltılmıştır. Sonuçlar hem karbon fiberin uzunluğunun hem de kütle oranının termal yönetim üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir [25]. Yazarların çalışmaları göstermiştir ki, MWCNT/grafen ve karbon-fiber tabanlı kompozit FDM'lerin, özellikle lityum-iyon batarya sistemlerinde etkili bir pasif termal yönetim malzemesi olarak yüksek potansiyele sahip olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 2.3. FDM/nano malzeme kompozitlerin termal iletkenlikleri [24]

Karaipekli, Biçer, Sarı ve Tyagi karbon nanotüp (CNT) kullanarak oluşturdukları parafin esaslı kompozit malzemenin termal karakterizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Kütlesel olarak %0,3 , %0,5 ve %1 oranlarında CNT katkısının termal iletkenliğe olan etkisini incelediklerinde %1 CNT ile yapılan çalışma sonucu %113 oranında termal iletkenlikte iyileşme görmüşlerdir. Ayrıca bu kompozitin uzun vadeli kimyasal ve termal kararlılığı, 1000 döngü boyunca yapılan testlerle doğrulanmıştır. Sonuçlar, geliştirilen kompozitin özellikle binalar ve seralar gibi pasif güneş enerjisi sistemlerinde etkili bir ısıl enerji depolama malzemesi olabileceğini göstermektedir [26].

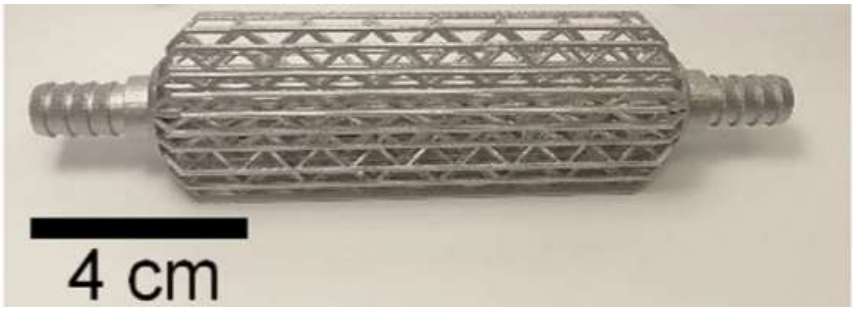
Yapılan literatür araştırmaları göstermektedir ki, parafin bazlı FDM'lerin termal iletkenliklerini artırmak amacıyla grafen türevleri (GNP, xGNP) ve MWCNT yaygın olarak kullanılmaktadır. GNP katkıları, iki boyutlu yapıları sayesinde hem ısı iletiminde önemli artışlar sağlamakta hem de düşük viskozite değişimi ile avantaj sunmaktadır. MWCNT katkıları ise, özellikle ısı iletim katsayısı artışı sağlamış, aynı zamanda ergime ve donma sürelerini önemli ölçüde azaltarak enerji transfer verimliliğini artırmıştır. Bu sonuçlar, karbon esaslı nano katkıların, FDM'lerin termal özelliklerini geliştirmede oldukça etkili olduğunu ve özellikle enerji verimliliği yüksek, hızlı tepkili ısı depolama sistemleri için büyük bir potansiyele sahip olduklarını ortaya koymaktadır.

2.2. FDM/Metal Yapıların Kullanımı

FDM'lerin termal iletkenliğini arttırmaya yönelik uygulamalardan bir diğeri de metal yapılar ile birlikte kullanılmasıdır. Talaşlı ya da eklemeli imalat yöntemi ile üretilen boşluklu veya kanatlı metal yapılar içerisine parafin dökülerek oluşturulan FDM/metal kompozitler ile iki malzemenin de termal açıdan üstün olduğu özellikler bir araya getirilir. Metaller yüksek ısı iletimi kabiliyetleri sayesinde FDM'lere ısıyı iletir; FMD'ler ise ısı depolayabilme kabiliyetleri sayesinde termal enerji depolama görevini üstlenir. Böylece FDM hacmi efektif olarak kullanılır, faz değişimi bütün yapıda eş zamanlı gerçekleşir ve yapı içerisinde sıcaklık farkları en aza indirgenir. Literatürde FMD/metal kompozitler ile alakalı farklı uygulamalar incelenmiştir. Bu bölüm içerisinde bu uygulamalar ile alakalı bilgilere yer verilecektir.

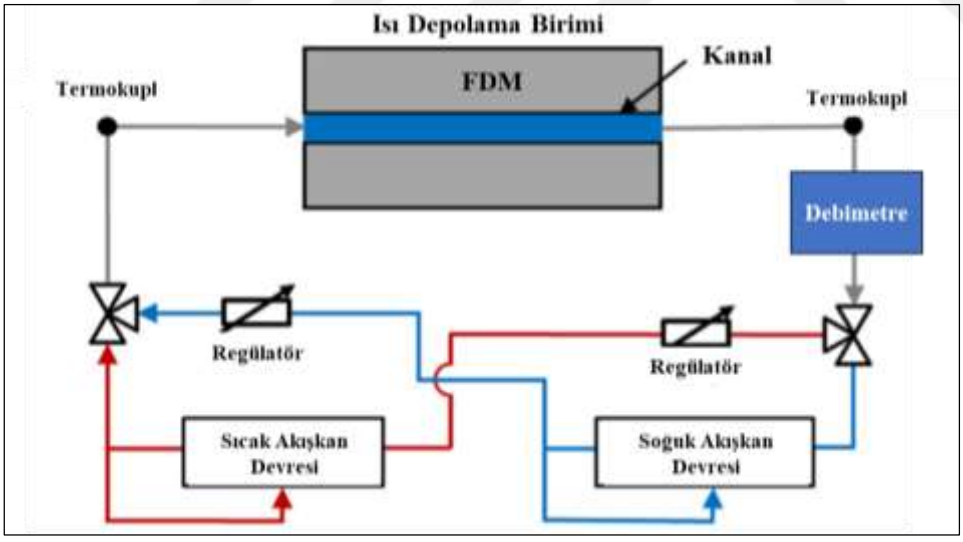
2.2.1. Eklemeli imalat ile üretilen metal yapıların kullanımı

Günümüzde eklemeli imalat yöntemleri endüstride kullanılabilir olgunluğa erişmiştir. Bu sayede geleneksel yöntemler ile üretilemeyen karmaşık metal yapılar üretilebilmektedir. FDM ve ısı iletim yolları optimize edilmiş eklemeli imalat yapıları sayesinde etkin olarak kullanılabilen FDM/metal kompozitler oluşturulur.



Şekil 2.4. Eklemeli imalat ile üretilmiş kanatlı boru [27].

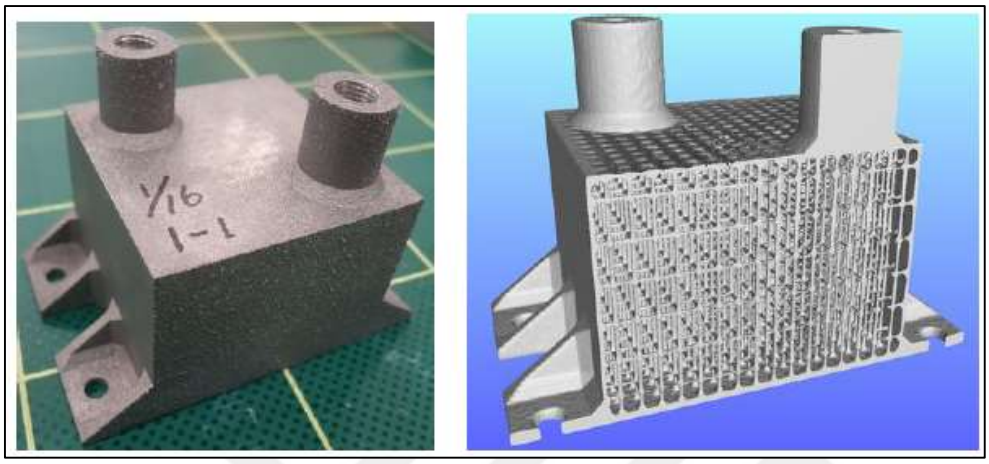
Şekil 2.4'te görüldüğü üzere eklemeli imalat ile üretilen kanatlı bir boru parafin ile birleştirilerek kompozit bir ısı değiştirici oluşturulmuştur. Isı değiştiricinin performansı kanatsız boru ile kıyaslanarak metal yapının parafin ile beraber ısı transferi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi amacı ile Şekil 2.5'te verilen düzenek kurulmuştur. Çalışma sonucunda kanatlı boruların parafin ile birlikte kullanılmasının iletim hızını arttırarak ısı iletim kapasitesini arttırdığı ve böylece daha düşük sıcaklıkların daha hızlı bir şekilde elde edildiği görülmüştür [27].



Şekil 2.5. Kanatlı boru/Parafin ısı değiştiricisi test düzeneği [27].

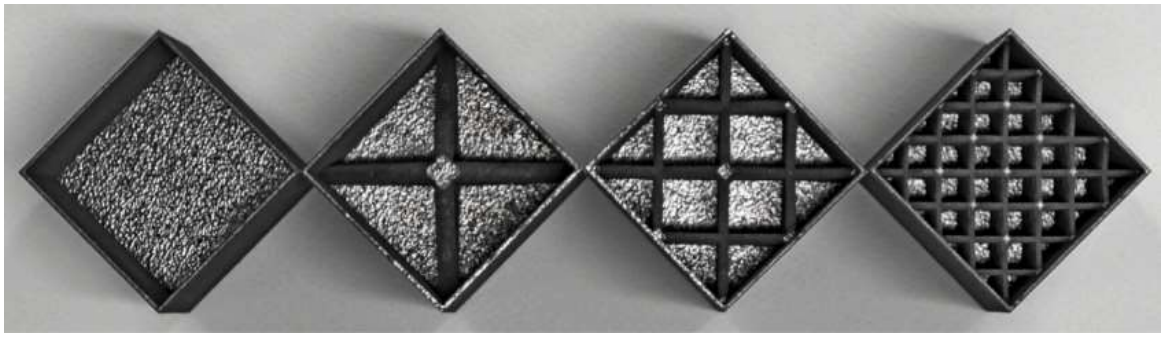
Benzer şekilde Hatakenaka ve diğerleri (2017) eklemeli imalat yöntemi kullanarak Şekil 2.6'te dış ve iç görünümü verilen ısı kuyusundan farklı parametrelerde üretmişlerdir. Yapıların içini parafin ile doldurduktan sonra taban kısmından sabit ısı akısı ile ısıtarak sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistem, %50'ye varan ısı depolama verimliliği ile dikkat çekmiştir. Toplam dikey termal iletkenliğe dayalı basit tahmin modeli,

tam ergime noktasındaki sıcaklık farkı açısından deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermektedir. Sistemin tasarım esnekliği ve kütle verimliliği gibi önemli avantajları olduğu belirtilmiş, ancak hava sızdırmazlığı, mekanik darbe dayanımı ve kalite kontrol gibi faktörlerin iyileştirilmesi gerekti̇ği vurgulanmıştır [28].



Şekil 2.6. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş parafin ısı kuyusu [28].

Bir diğer çalışmada %95 porozitede 3 farklı alüminyum 3D periyodik yapı içeren ısı depolama yapıları geliştirilmiştir. Bu ısı depolama yapıları Şekil 2.7.'da belirtilmiştir. Porozite oranları sabit tutularak yapılara ait gözenek büyüklükleri değiştirilmiştir. Çalışma neticesinde 10 mm gözenek boyutlu yapının; en düşük sıcaklık farkı, en kısa şarj süresi ve en düşük maksimum sıcaklık değerleriyle diğer örnekleri geride bırakmıştır. Bu bulgular, hücre boyutunun küçültülmesinin ve ince bağlantı elemanlarının arttırılmasının ısı transfer performansını daha da iyileştirebileceğini göstermektedir [29].



Şekil 2.7. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş farklı gözenek büyüklüklerine sahip FDM'li ısı depolama yapıları [29].

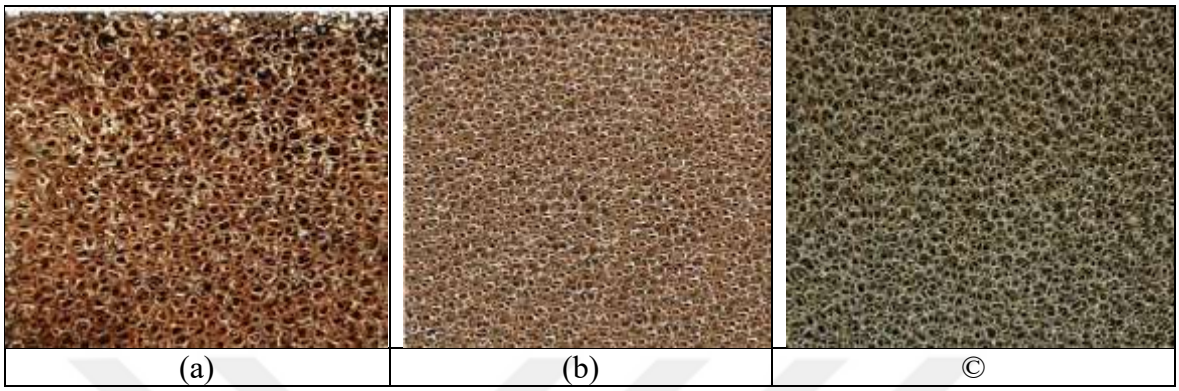
2.2.2. Metal köpüklerin kullanımı

Metal köpükler sürekli ağ yapıları, değiştirilebilir porozite miktarları ve gözenek yoğunlukları ile FDM içerisinde ısı iletim ağları oluşturur. Böylece metal köpükler ısının iletim yoluyla FDM içerisine dağılmasına olanak sağlar. Literatürdeki birçok deneysel ve nümerik çalışmada metal köpüklerin malzemesinin, porozite ve gözenek yoğunluğunun FDM üzerine etkisi incelenmiştir.

Düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle ısıl enerji depolamada kullanılan FDM'lerin performansları sınırlı kalmaktadır. Bu sorunun aşılması amacıyla Zheng ve diğerleri (2017); parafin içerisine bakır köpük yerleştirerek oluşturulan kompozit FDM'nin ısıl performansını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, farklı ısıtma yönlerinin ergime sürecine etkisi değerlendirilmiş ve bakır köpük eklenmesinin ergime süresini %20,5 oranında kısalttığı, ayrıca sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği gözlemlenmiştir. Doğal konveksiyonun etkisiyle ısıtma konumunun da önemli olduğu belirtilmiş ve en verimsiz ısıtma senaryosunun üstten ısıtma olduğu gösterilmiştir. Sayısal model sonuçları, deneysel verilerle yüksek uyum göstermiştir [30]. Gerçekleştirilen çalışmaya paralel olarak Qu, Li, Wang ve Tao (2012); parafin ile doldurulmuş bakır metal köpük içeren hibrit bir ısı alıcısı tasarlamış ve sistemin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma, metal köpük kullanımının yüzey sıcaklığını düşürdüğünü ve FDM'nin ergime noktasına ulaşma süresini kısalttığını göstermiştir. Özellikle düşük porozite ve gözenek yoğunluğu kombinasyonlarının ($\varepsilon = 0{,}90$, $\omega = 5$ PPI) daha düşük taban sıcaklıklarına olanak sağladığı belirlenmiştir. Isıl iletkenlikteki artış, sıvı parafinin doğal konveksiyonundaki zayıflamayı telafi ederek genel performansı artırmıştır. Bu çalışma, elektronik cihazlarda FDM destekli hibrit soğutucuların etkili bir pasif termal yönetim stratejisi olabileceğini ortaya koymuştur [31].

Rehman ve Ali, farklı poroziteye sahip metalik köpüklerle emdirilmiş FDM'lerin termal performansını deneysel olarak incelemiştir. RT-35HC tipi FDM kullanılan çalışmada, Şekil 2.8'de gösterilen %95 ve %97 poroziteli bakır köpükler ile %97 poroziteli nikel köpük karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, daha düşük poroziteli (ε = %95) bakır köpük, taban sıcaklığını %17 oranında azaltmış ve FDM'nin ergime süresini hızlandırmıştır. Ayrıca, bu konfigürasyonda FDM'nin ısıl iletkenliği 34 kat artarken, gizli ısı kapasitesi %37 azalmıştır. %95 poroziteli bakır köpük ve %0,8 hacim oranında FDM içeren yapı, çalışma süresini

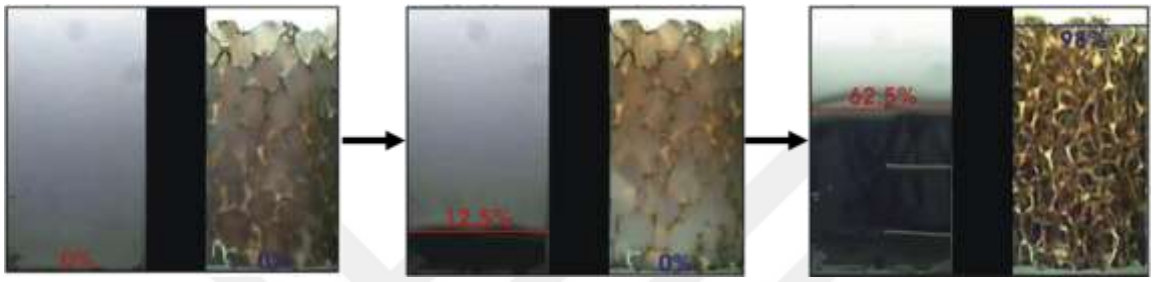
yaklaşık 7,9 kat artırarak en yüksek performansı göstermiştir. Bu çalışma, FDM tabanlı ısı alıcılarının performansının, köpük malzeme seçimi ve gözeneklilik düzeyi ile optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır [32].



Şekil 2.8. Bakır ve Nikel köpük malzemeler. ε = %95 Bakır köpük (a), ε = %97 Bakır köpük, (b), ε = %97 Nikel köpük

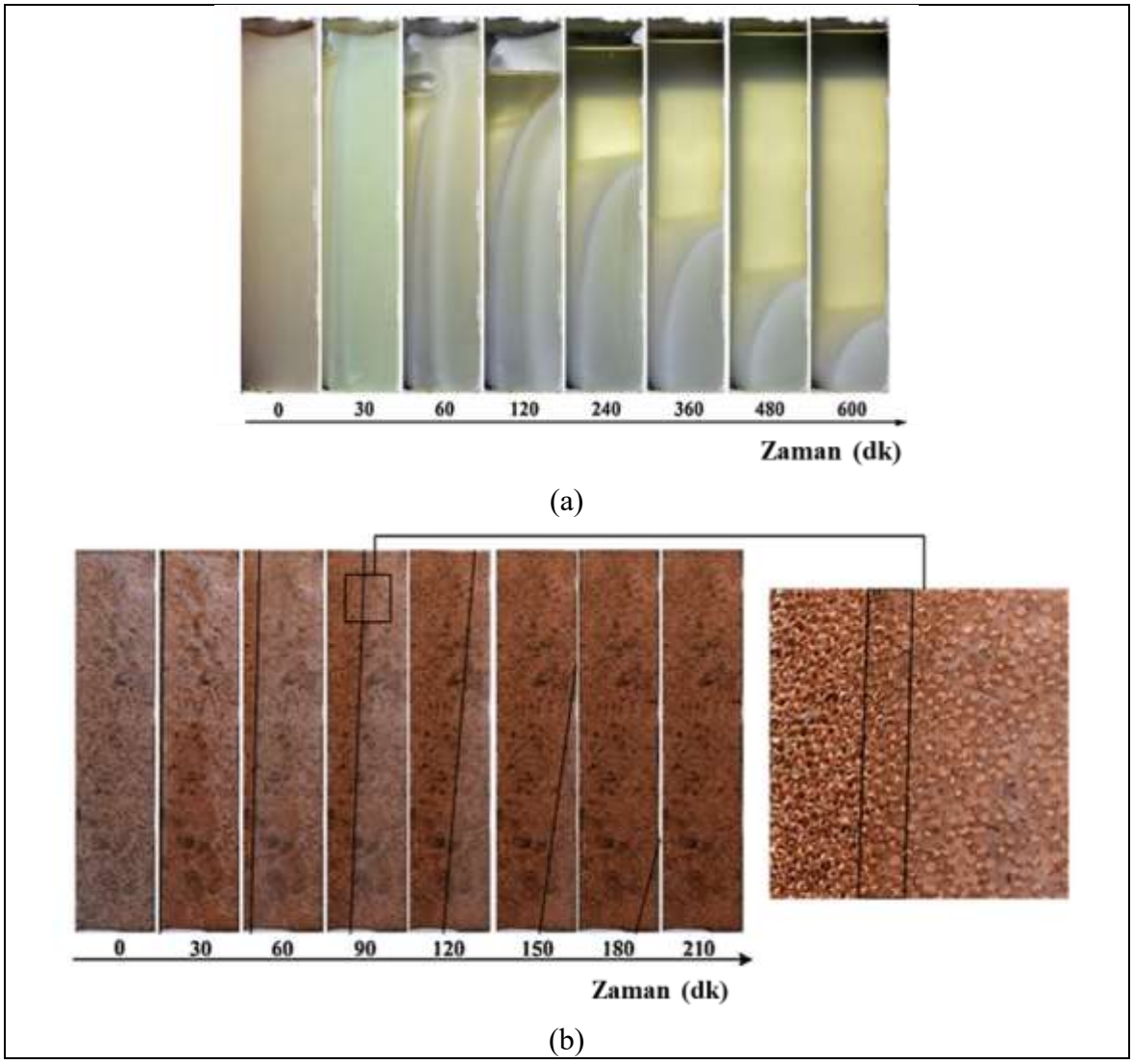
Benzer şekildeki başka bir çalışmada %90–98 arası poroziteye ve 10–40 PPI gözenek yoğunluğuna sahip bakır metal köpüklerle emdirilmiş parafinin ergime sürecini deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizleriyle FDM'nin faz değişim sıcaklık aralığı ve gizli ısı değeri belirlenmiştir. Çalışma, düşük gözenekliliğin daha hızlı ergime sağladığını ve düşük gözenek yoğunluğunun doğal konveksiyonu destekleyerek iç sıcaklık dağılımında daha homojen bir yapı oluşturduğunu göstermiştir. Çalışmanın ikinci kısmında gözenekli ortam içerisinde ısı iletimi ve doğal konveksiyonu çözebilen sayısal bir modelleme gerçekleştirmişlerdir. İzledikleri modelleme yaklaşımı deneysel veriler ile yüksek uyum göstermiştir. [33]. Mancin ve diğerleri (2015) ise üç farklı parafin esaslı FDM ile, her birinin porozitesi %94 olan 5, 10 ve 40 PPI bakır metal köpükleri birleştirmişlerdir. Bakır köpüklerin katı-sıvı faz değişim süreçlerine etkisini 6,25, 12,5 ve 18,75 kW/m² ısı akıları altında deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, köpüklerin varlığının maksimum yüzey sıcaklıklarını ciddi oranda düşürdüğünü ve ısı transferini yayarak sıcaklık dağılımını homojenleştirdiğini göstermiştir. Örneğin, köpüksüz durumda 6,25 kW/m² ısı akısı altında parafinin ergimesi sırasında yüzey sıcaklığı 80 °C'ye kadar yükselirken, 5 PPI köpükle bu sıcaklık yaklaşık 70 °C'ye düşmüş ve metal/FDM içerisindeki sıcaklık farkı 45 °C'den 6–8 °C seviyelerine kadar azalmıştır. Şekil 2.9'te sadece parafin ve metal/FDM yapısının ergime hızları görsel olarak karşılaştırılmıştır. Bu görsellerden de anlaşılacağı üzere, metal köpük kullanımının ergime sürecini daha düşük sıcaklıklarla daha kısa sürede tamamlamaktadır. Ayrıca, metal köpüklerin FDM'ler ile

birleştirilmesinin köpüksüz sistemlerde karşılaşılan hacim daralmasına bağlı boşluk oluşumunun da önüne geçtiği belirtilmiştir. Yapılan çıkarımlara ek olarak; 5, 10 ve 40 PPI gözenek yoğunlukları arasında belirgin performans farkı gözlemlenmemiştir; bu durum, köpük liflerinin iletim katkısının parafinin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle sınırlanmasıyla açıklanmıştır. Çalışma, bakır köpüklerin FDM uygulamalarında sadece iletkenlik artırıcı değil, aynı zamanda döngüsel güvenilirlik sağlayıcı bir yapı malzemesi olarak da kritik rol oynayabileceğini ortaya koymuştur [34].



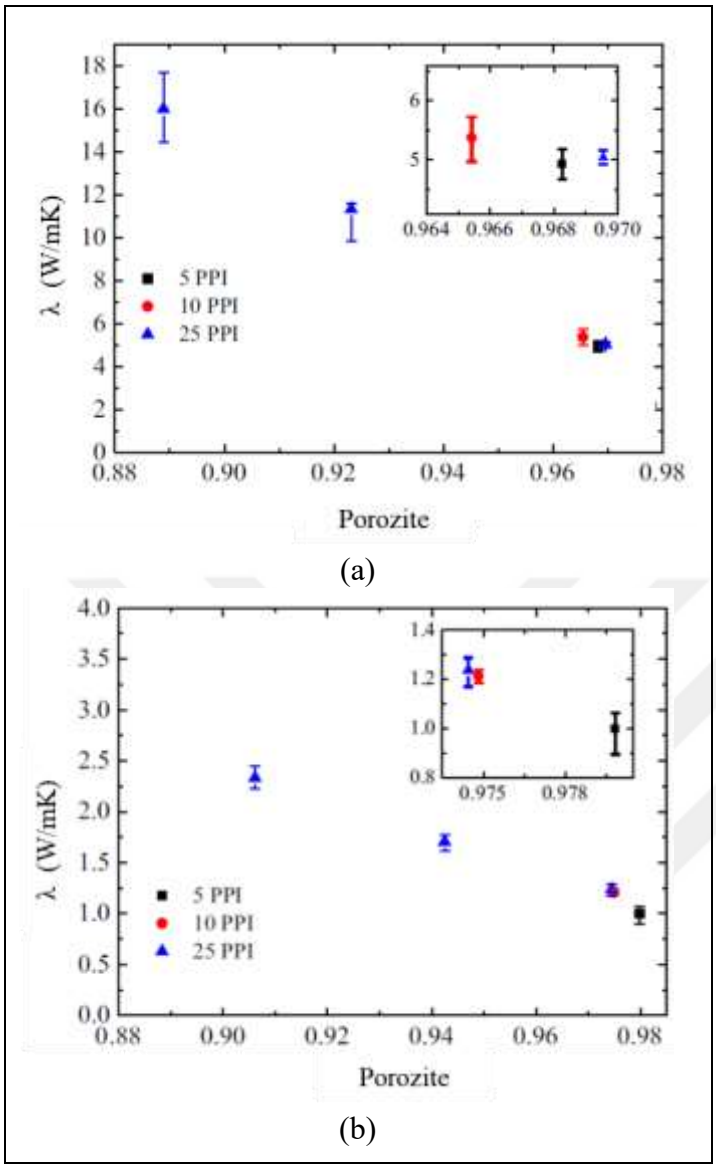
Şekil 2.9. Aynı sürede sadece parafin ve parafin/metal köpük yapıdaki ergime miktarları [34]

Bir diğer açık gözenekli bakır köpük ile yapılan çalışmada farklı porozite ve gözenek yoğunluğun parafinin ergime davranışını üzerindeki etkisi deneysel olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, metal köpük ilavesi ergime süresini %27'ye kadar azaltırken, bu hızlandırıcı etkinin büyük kısmı ergimenin ilk evrelerinde (katıdan sıvıya geçişin başladığı dönemde) gözlemlenmiştir. Özellikle, düşük gözeneklilik ve düşük PPI değerinde, ergime süresi yaklaşık 980 saniyeye düşmüş; buna karşın yüksek porozite oranında bu süre 1260 saniyeye kadar uzamıştır. Bu durum Şekil 2.10'da verilen katı-sıvı arayüzlerinin takip edildiği görselden de anlaşılmaktadır. Aynı zaman dilimlerinde çekilen fotoğraflarda kompozit yapının ergimeyi daha erken tamamladığı görülmektedir. Ayrıca, doğal konveksiyonun metal köpük içinde kısmen bastırıldığı, ancak ergime öncesinde önemli olan ısı iletiminin kuvvetlendiği belirtilmiştir. Çalışma, metal köpük kullanımının yalnızca toplam ergime süresini azaltmakla kalmayıp, sıcaklık gradyanlarını dengeleyerek sistemin termal tepkisini iyileştirdiğini göstermiştir [35].



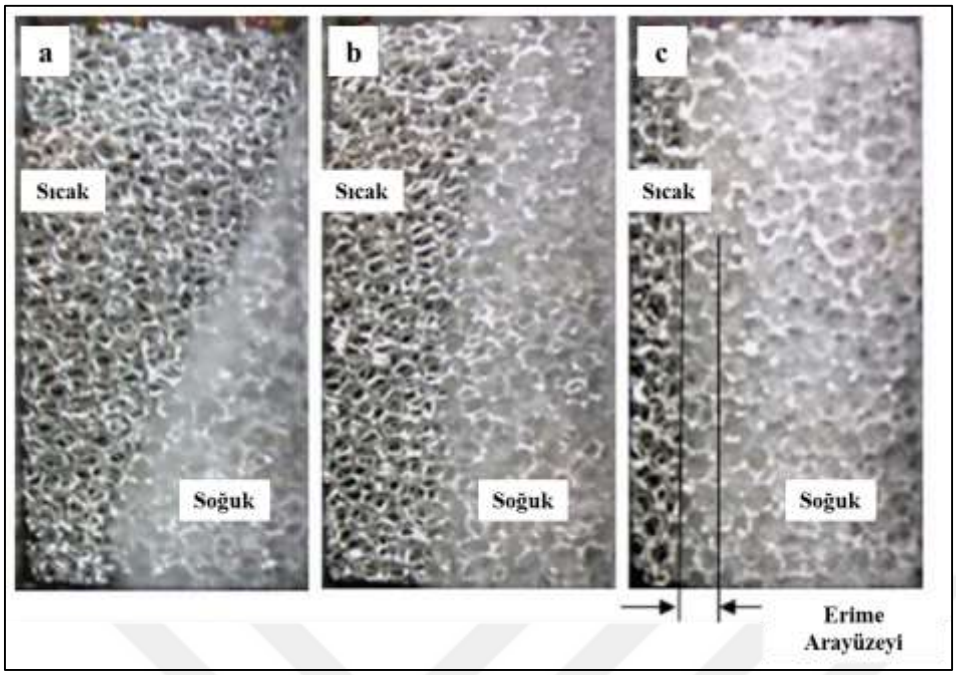
Şekil 2.10. Aynı zaman dilimlerinde (a) sadece parafin ve (b) bakır köpük/parafin kompozit katı-sıvı arayüzlerinin ergime sürecindeki görüntüsü [35]

Benzer bir çalışma da porozite, gözenek yoğunluğuna ek olarak bakır ve nikel köpüklerin parafinin termal iletkenliği üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 2.11'da verilen sonuçlarda görüldüğü üzere, gözeneklilik azaldıkça etkin ısıl iletkenliğin arttığını; örneğin, %96,95, %92,31 ve %88,89 poroziteye sahip bakır köpükler ile hazırlanan kompozitlerin iletkenliklerinin saf parafine göre sırasıyla 13, 31 ve 44 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Aynı porozitede farklı gözenek boyutlarının ise iletkenlik üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı belirtilmiştir [36].



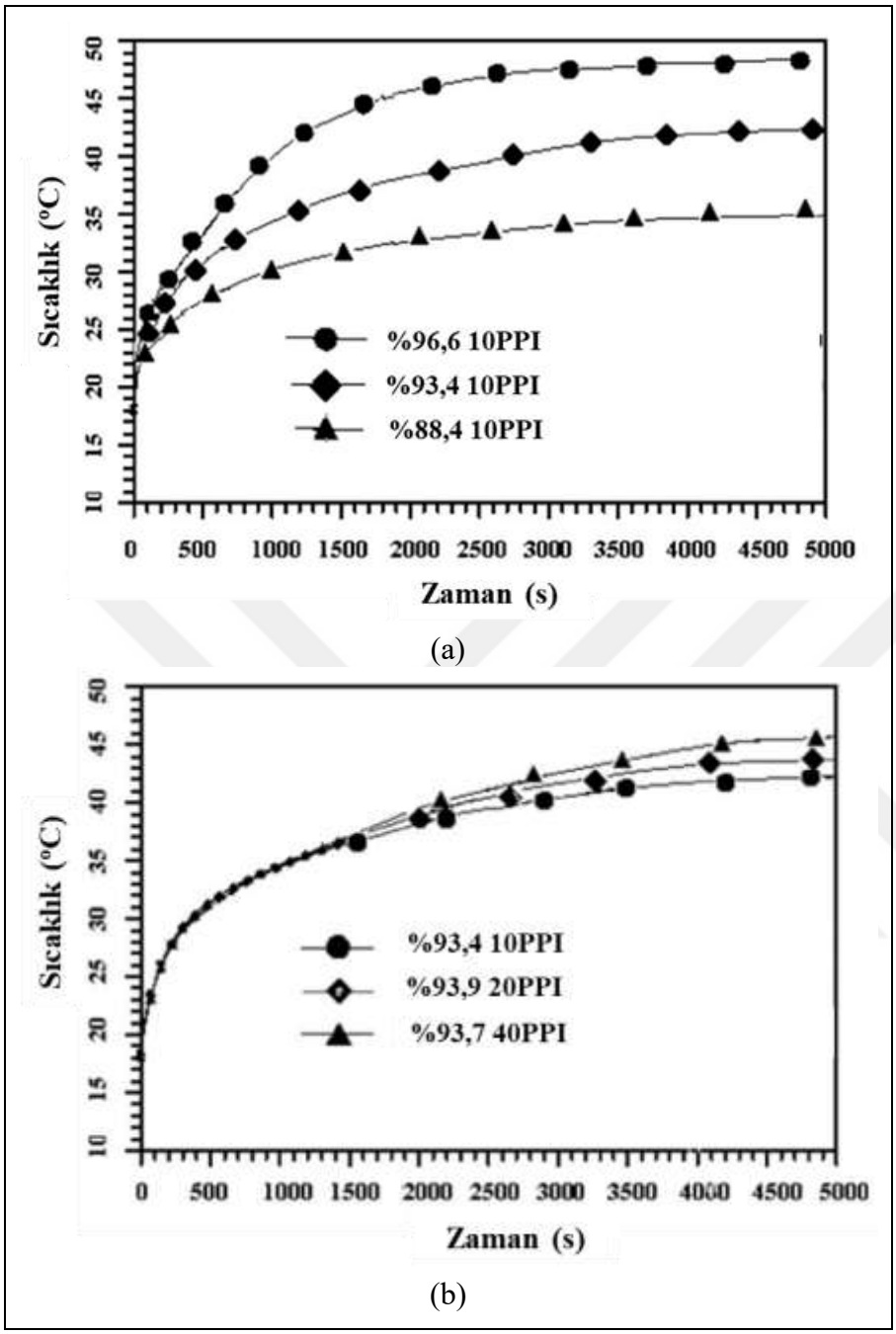
Şekil 2.11. Efektif termal iletkenlik (a) Bakır köpük/parafin kompozit, (b) Nikel köpük/parafin kompozit [36].

Yapılan çalışmalara paralel olarak Lafdi, Mesalhy ve Shaikh; parafinin ısıl performansını artırmak amacıyla, farklı porozite ve gözenek boyutlarına sahip alüminyum köpükler içerisine emdirilerek oluşturulan kompozit FDM/metal köpük kompozitlerin ergime davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel düzende, şeffaf pleksiglas bir hazne içerisine yerleştirilen parafin emdirilmiş köpükler, bir tarafı ısıtıcı ve diğer tarafı soğutucu plaka ile sınırlandırılmıştır. Şekil 2.12'de gösterildiği üzere ısıtma işlemi başladıktan 75 dk sonra farklı porozitedeki FDM/köpük yapılarının katı-sıvı ara yüzleri kıyaslanmıştır. Bu görselden düşük poroziteli yapının daha homojen şekilde ısıyı yaydığı anlaşılmaktadır [37].



Şekil 2.12. Faz değişim arayüzleri. (a) %96,9 10PPI, (b) %93,4 10PPI, (c) %88,4 10PPI [37]

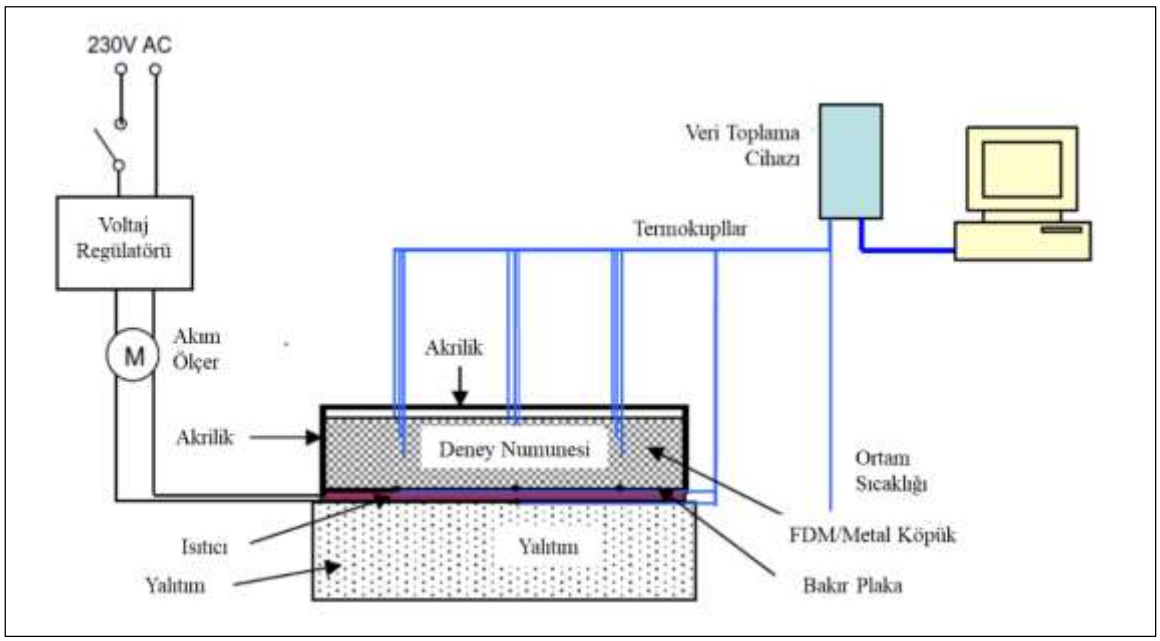
Elde edilen sonuçlara göre, yüksek poroziteli ve büyük gözenekli köpükler sayesinde ergime süreci daha hızlı tamamlanmakta ve ısıl dengeye daha kısa sürede ulaşılmaktadır; çünkü bu yapılar sıvı halindeki FDM'de doğal taşınımı teşvik etmektedir. Öte yandan, düşük poroziteli köpükler daha yüksek ısıl iletkenlik sağladığından, ısı iletimi köpük malzeme üzerinden daha etkili gerçekleşmekte ve ısıtıcının sıcaklığı daha düşük kalmaktadır. Büyük gözenekli yani düşük PPI değerine sahip köpük malzemeler de taşınım etkisini olumlu etkilemektedir. Şekil 2.13'te porozite değeri ve gözenek büyüklüğünün ısıtıcı yüzey sıcaklığını nasıl etkiledi gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere en düşük sıcaklıklar düşük porozite ve düşük PPI değerlerinde görülmüştür. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında hem iletim hem de doğal taşınım etkilerini optimize edebilmek için, köpük porozitesi ve gözenek boyutunun dikkatli şekilde seçilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışma, elektronik cihazların ısıl yönetimi ve enerji depolama sistemleri gibi uygulamalarda bu tür kompozit FDM'lerin etkinliğini göstermektedir [37].



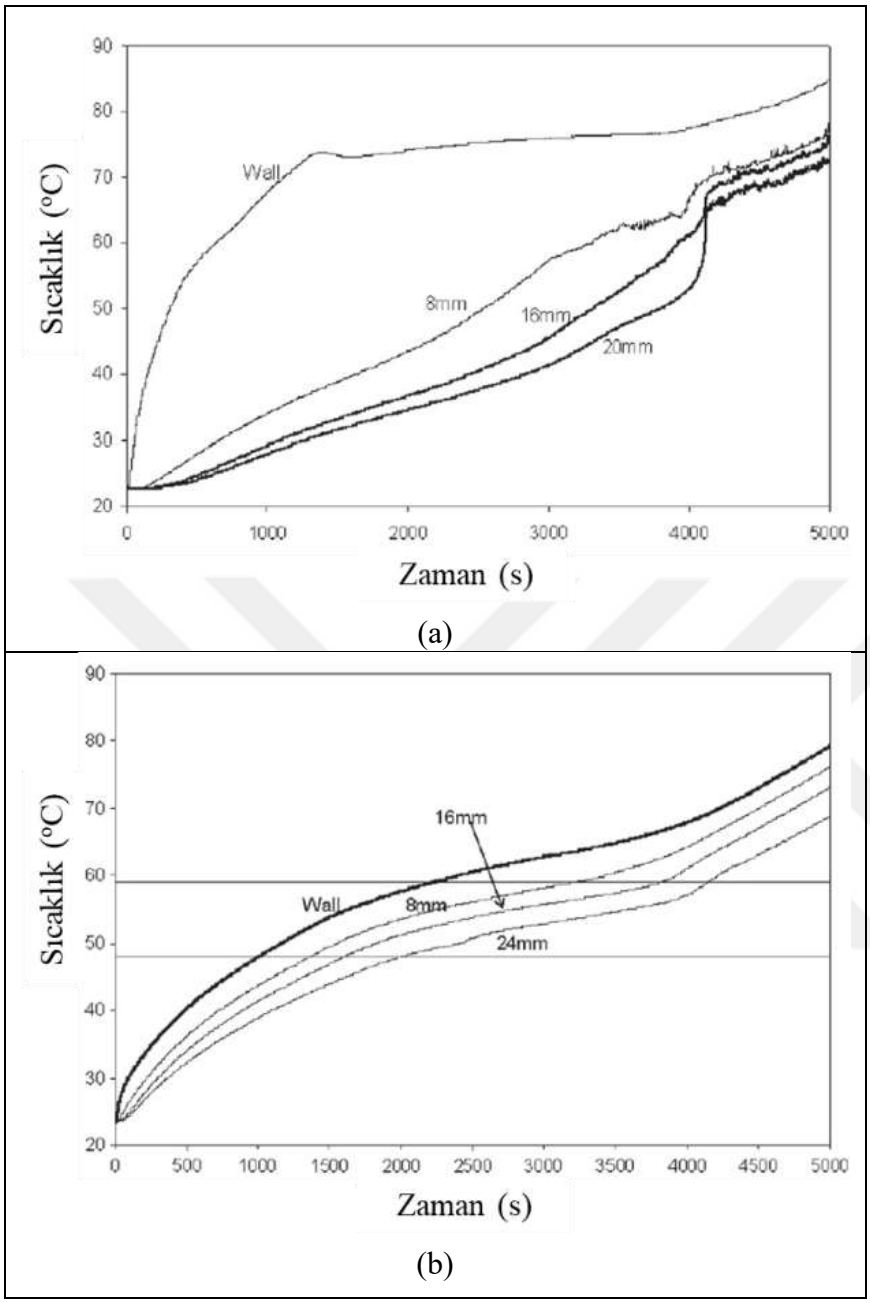
Şekil 2.13. Porozite oranı (a) ve gözenek boyutunun (b) taban sıcaklığına etkisi [37]

Metal köpüklerin FDM'lerin termal iletkenliğine olan etkisini inceleyen başka bir çalışma Zhao, Lu ve Tian tarafından yapılmıştır. Uyguladıkları deneysel çalışma için kurmuş oldukları düzenek Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Çalışmada parafin/bakır köpük örnekleri alttan sabit ısı akısı ile ısıtılarak ergime süreci incelenmiş, gözenek yapısı ve poroziteye bağlı köpük parametrelerinin ısı transferi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 2.15'te sadece parafin ve parafin/bakır köpük numuneleri içerisindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Farklı konumlardan alınan sıcaklık verileri karşılaştırıldığında saf parafine

kıyasla kompozit yapının daha homojen sıcaklık dağılımı sağladığı anlaşılır. Deney sonuçları değerlendirildiğine, saf parafine kıyasla, metal köpük kullanımı özellikle katı fazda ısı iletimini büyük ölçüde artırmış, ergime sürecinde doğal konveksiyonla birlikte toplam ısı transfer oranı 3–10 kat arasında iyileştirilmiştir. Ayrıca, farklı soğutma koşulları altında yapılan donma (katılaşma) deneylerinde, metal köpük içeren örneklerin daha kısa sürede katılaştığı gözlemlenmiştir [38].



Şekil 2.14. Test düzeneği [38]



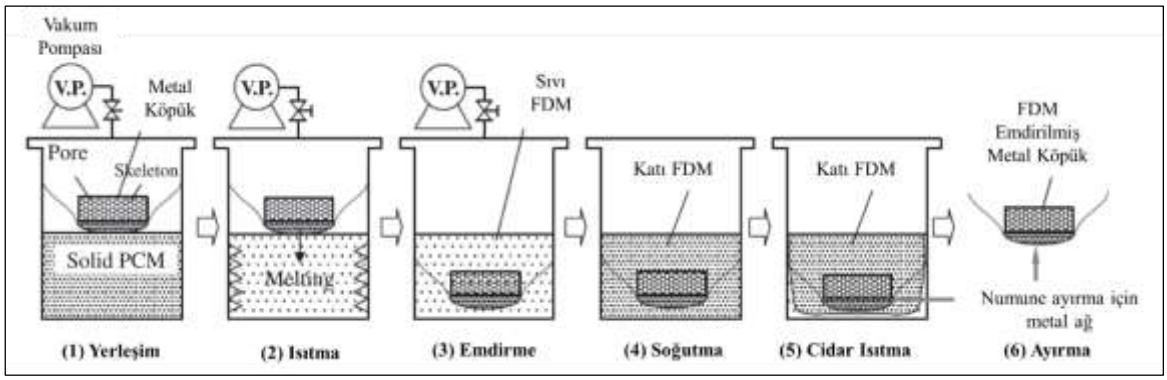
Şekil 2.15. (a) Sadece parafin olduğunda ve (b) parafin/bakır köpük olduğu durumda kompozit içerisindeki sıcaklık dağılımı [38]

Çalışmada ayrıca iki boyutlu sayısal bir modelleme yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Sayısal analizde doğal konveksiyon etkisi göz ardı edilerek yalnızca iletimle ısı transferi dikkate alınmış, metal köpük ve FDM arasındaki ısı etkileşimi iki sıcaklık modeliyle tanımlanmıştır. Sonuçlar, metal köpüklerin yüksek yüzey alanı ve iletkenliği sayesinde FDM sistemlerinin ısı transfer performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu bağlamda, metal köpük

destekli FDM kompozitleri, düşük sıcaklıklı termal enerji depolama uygulamalarında etkin bir çözüm sunmaktadır [38].

Marri ve Balaji, yazmış oldukları makalede metal köpük/FDM kompozitler ile ısı kuyuları oluşturmuşlardır. Bu çalışma literatürdeki muadil çalışmalardan farklı olarak sabit porozite ve sabit PPI değerine sahip köpükler yerine kendi içerisinde değişiklik gösteren farklı konfigürasyonları incelemişlerdir. Çalışmada ham deneysel hem de sayısal yöntemler kullanılmıştır. Sonuçlar, alt kısımdan üste doğru azalan porozite veya artan PPI yoğunluğuna sahip metal köpük düzenlemelerinin, homojen yapılara kıyasla FDM'nin ergime süresini önemli ölçüde kısalttığını ve termal performansı sırasıyla %28 ve %45 oranında artırdığını göstermiştir. Ancak bu termal iyileştirmelerin, soğuma sürecine anlamlı bir katkı sağlamadığı belirtilmiştir [39].

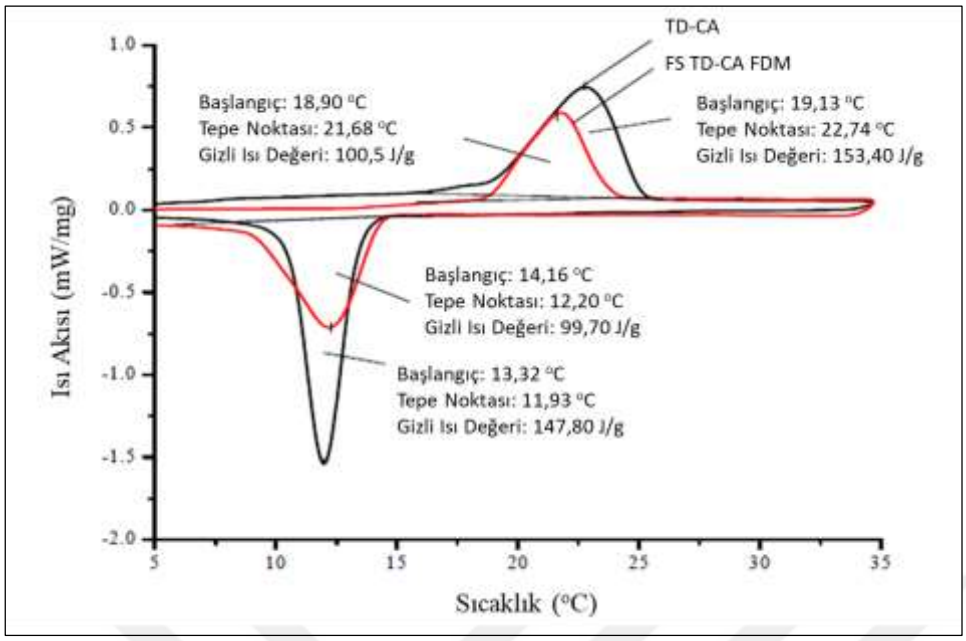
Xiao, Zhang ve Li; FDM/metal köpüklerin hazırlanışı ve termal karakterizasyonuna yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, düşük ısıl iletkenliği nedeniyle kullanım alanı sınırlı olan parafinin, gözenekli metal köpüklerle kompozit hale getirilerek termal özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Parafin/nikel köpük ve parafin/bakır köpük kompozit FDM'ler Şekil 2.16'de gösterilen sıra uygulanarak vakum destekli emprenye yöntemiyle hazırlanmış ve yapısal ile termofiziksel özellikleri incelenmiştir. Vakum desteğiyle hazırlanan örneklerde, daha yüksek emprenye oranları (%96–98,6) elde edilmiştir. Kompozit FDM'lerin ısıl iletkenlikleri, saf parafine göre nikel köpükle yaklaşık 3 kat, bakır köpükle yaklaşık 15 kat artırılmıştır. Ayrıca, faz değişim sıcaklıklarında küçük kaymalar (ergime sıcaklığında artış, donma sıcaklığında azalma) gözlemlenmiştir. Kompozitlerin gizli ısı değerleri toplam kütleye göre %22–30, sadece parafin kütlesine göre %2–8 oranında düşmüştür. Bu sonuçlar, metal köpüklerin FDM'lerde ısı transferini artırıcı etkisini doğrularken, enerji depolama sistemlerinin tasarımında dikkate alınması gereken yeni termal karakteristikler sunduğunu göstermektedir [40].



Şekil 2.16. Vakum emprenye yöntemi [40]

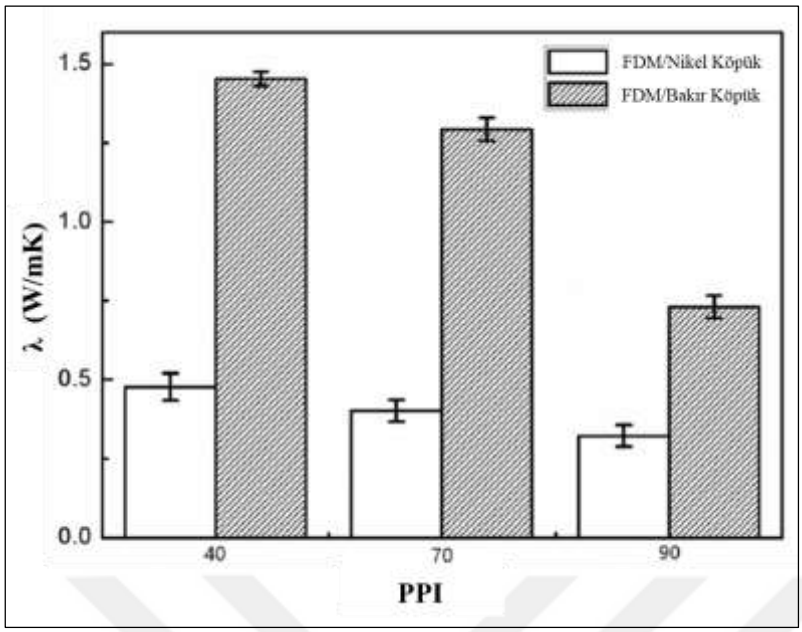
Jiang ve arkadaşları, metal köpük/FDM kompozitlerin hazırlama sürecine yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir. FDM olarak parafin ve stearik asit kullanılmıştır. FDM'ler vakum altında alüminyum köpüklere emdirilmiştir. Parafin/Al köpük kompozitlerin doluluk oranı %88,5 olarak ölçülmüş ve bu değer stearik asit/Al köpükler için %85 olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kompozit yapıların mekanik dayanımları da incelenmiştir. Sonuç olarak; stearik asit/Al-köpük yapıların dayanımının parafin/Al-köpük kompozitlerden %27 daha fazla olduğu saptanmıştır [41].

Faz değiştiren malzemelerin termofiziksel özelliklerini incelemek amacı ile kullanılan en önemli yöntem diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizidir. Bu yöntem uygulanışı sırasında bir numune ve bir referans malzemeyi aynı anda, kontrollü bir sıcaklık programı altında ısıtarak veya soğutarak analiz eder. Numune ve referans, birbirine simetrik olarak yerleştirilmiş iki ayrı hazneye konur. Cihaz, bu iki hazneye aynı sıcaklık artış hızını uygularken, numunenin geçirdiği fiziksel veya kimyasal dolayı oluşan ısı akısı farkını algılar. Eğer numune bir faz değişimi geçiriyorsa, bu değişim sırasında ya ısı emer ya da ısı açığa çıkarır. Cihaz, bu ısı farklarını µW cinsinden ölçer ve sonuçları ısı akısı– sıcaklık grafiği şeklinde verir. Bu grafik üzerinde gözlenen tepe noktaları ve alanlar, ilgili olayın sıcaklığı ve entalpisi hakkında nicel bilgiler sunar. DSC analizleri genellikle inert bir atmosfer altında gerçekleştirilir. Bu yöntemle malzemelerin ergime noktası, cam geçiş sıcaklığı, kristallenme sıcaklığı gibi faz değişim sıcaklıkları tespit edilirken; aynı zamanda gizli ısı, özgül ısı kapasitesi ve saflık gibi önemli termal özellikler de belirlenebilir [42 - 44].



Şekil 2.17. Faz değiştiren malzemeler için tipik bir DSC grafiği [45]

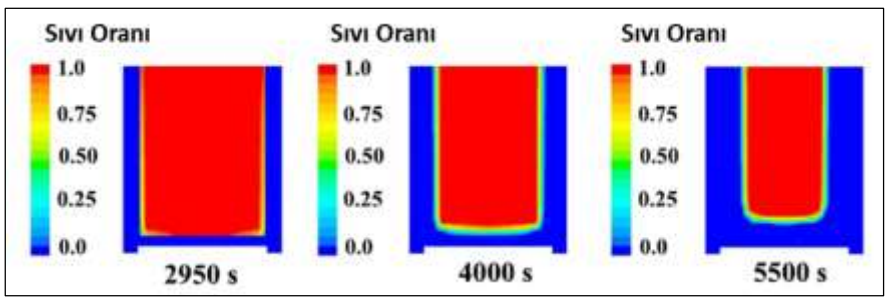
Huang, Lin, Alva ve Fan gerçekleştirdikleri çalışmada DSC analiz yöntemini kullanarak güneş ışınından termal enerji depolama sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirdikleri miristil alkol ile metal köpüklerin oluşturduğu kompozit FDM'leri incelemişlerdir. Miristil alkol, yüksek gizli ısı kapasitesi ve uygun faz değişim sıcaklıkları nedeniyle faz değiştiren malzeme olarak seçilirken, nikel ve bakır köpükler ise termal iletkenliği artırmak amacıyla kullanılmıştır. Kompozitler vakumla emrepasyon yöntemiyle hazırlanmış ve farklı gözenek boyutlarına (40, 70, 90 PPI) sahip köpükler denenmiştir. DSC analiz sonuçları, kompozitlerin gizli ısısının saf miristil alkole göre %3–29 oranında azaldığını, ancak termal kararlılıklarının korunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Şekil 2.18'da görüldüğü üzere termal iletkenlik ölçümleri FDM/metal kompozitlerin, özellikle büyük gözenekli ve yüksek metal/FDM oranına (düşük porozite) sahip olanların, önemli derecede geliştirilmiş iletkenlik sergilediğini göstermiştir. Örneğin, 40 PPI bakır köpükle elde edilen kompozitin termal iletkenliği 7,5 kat artarak 1,452 W/mK'ye ulaşmıştır. Bu bulgular, metal köpük destekli FDM/metal kompozitlerinin hem termal iletkenliği artırmaları hem de yapısal kararlılık sağlamaları açısından güneş enerjisi temelli ısı depolama uygulamaları için umut vadettiğini ortaya koymaktadır [46].



Şekil 2.18. FDM/Metal köpük yapıların PPI değerine göre termal iletkenlikleri [46]

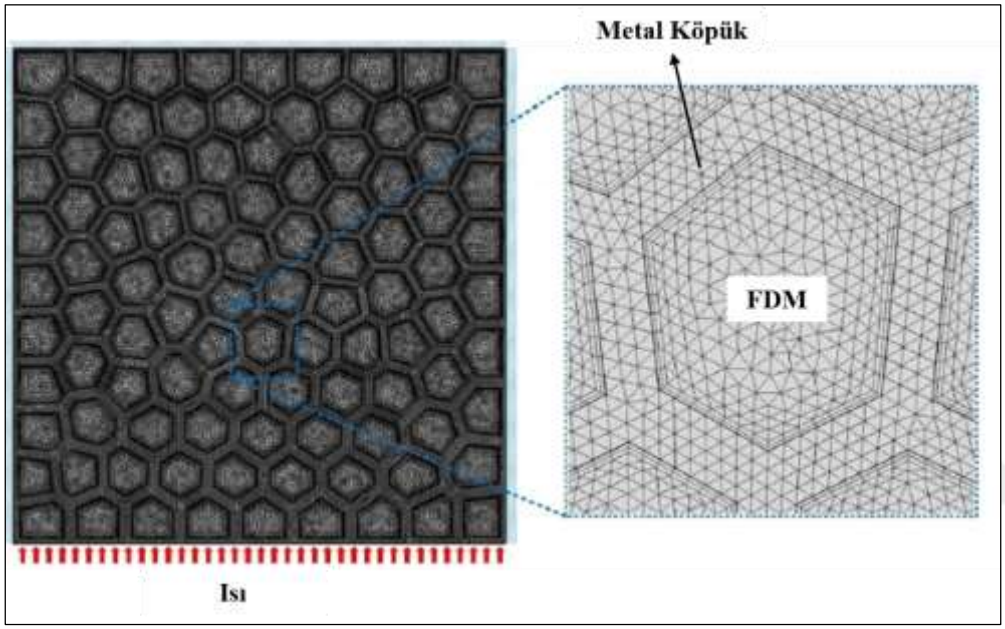
2.2.3. Termal hesaplamalarda sayısal yöntemlerin kullanımı

Yukarıda belirtilen deneysel çalışmalar gibi FDM/metal köpük yapılarının termal özelliklerini incelemek üzere sayısal çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi ile sonlu hacimler yöntemleri kullanılarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri ayrıklaştırılmıştır. Sonlu hacimler yönteminin kullanıldığı çalışmalarda 2-sıcaklık enerji modeli ile akışkan ile katı metal yüzeyler arasında ısı transferi çözülmüş ve faz değişimi için entalpi-gözeneklilik modeli kullanılmıştır. Kullanılan transport modelleri sayesinde metal köpüklerin çözüm modeli içerine ayrı bir yapı olarak dahil edilmesi gerekmemiştir. [47-49]. Örnek olarak Şekil 2.19'de gösterilen analiz çıktılarında farklı zamanlar için katı-sıvı dağılımları belirtilmiştir. Bu analiz çıktılarında metal köpük ayrıca modellenerek katı yapı içerisinde ısı iletimi çözülmemiştir [39].



Şekil 2.19. Farklı zamanlar için verilen sıvı katı-sıvı dağılımı [39]

Yayımlanan bazı çalışmalarda ise FDM ve metal köpükler analiz modeli içerisine ayrı fazlar olarak modellenmiş, aralarındaki ısı alışverişi detaylı şekilde incelenmiştir. Şekil 2.20'te görüldüğü üzere FDM ve metal köpük ayrı olarak model içerisine eklenerek çözüm ağları oluşturulmuştur. Özellikle sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilen analizlerde belirtilen modelleme tekniği kullanılmaktadır. Isı iletimi tabanlı çözüm yapan SEY'de taşınım etkisi sayısal ya da deneysel yolla elde edilen efektif termal iletkenlik tanımı ile hesaba dahil edilir [50-52].

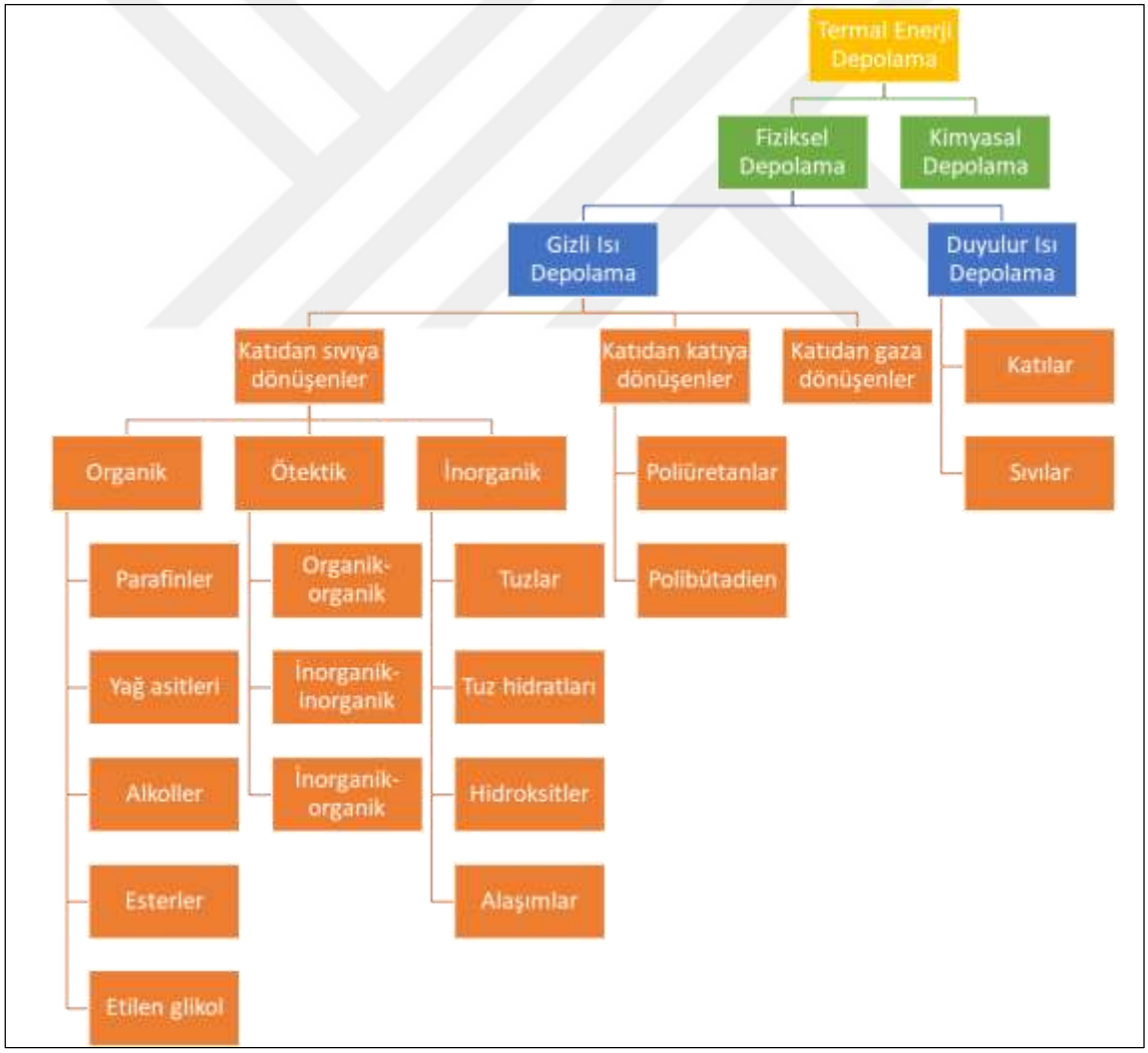


Şekil 2.20. FDM ve metal köpüklerin ayrı olarak modellenmesi [51]

3.TEMEL KAVRAMLAR VE TANIMLAR

3.1.Termal Enerji Depolama Sistemleri

Termal enerji depolama (TED) sistemleri, enerjinin daha sonra kullanılmak üzere ısı formunda depolanmasını sağlayan teknolojilerdir. Bu sistemler özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğini dengelemek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılır. TED sistemleri üç ana gruba ayrılırlar. Bunlardan ilki duyulur ısı depolama sistemleri, ikincisi gizli ısı depolama sistemleri ve sonuncusu ise termokimyasal ısı depolama sistemleridir. Şekil 3.1'de TED sistemlerinin türleri detaylı olarak belirtilmiştir [53, 54].



Şekil 3.1. Termal enerji depolama sistemleri [54]

3.1.1. Duyulur ısı depolama sistemleri

Duyulur ısı depolama sistemlerinde, enerji bir malzemenin sıcaklığının artırılması ya da azaltılması yoluyla depolanır ve bu süreçte herhangi bir faz değişimi gerçekleşmez. Duyulur ısı depolama miktarı Eş 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$Q = mc_p \Delta T \tag{3.1}$$

3.1.2. Gizli ısı depolama sistemleri

Gizli ısı depolama sistemlerinde enerji, bir maddenin faz değiştirmesi sırasında (örneğin katıdan sıvıya veya sıvıdan buhara) depolanır. Bu süreçte sıcaklık sabit kalırken, maddeye gizli ısı enerjisi aktarılır. Bu sistemlerde en yaygın kullanılan malzemeler, faz değiştiren malzeme olarak bilinen parafinlerdir. Gizli ısı depolama sistemine ait kapasite hesaplanırken Eş 3.2'de belirtildiği üzere katı ve sıvı fazların duyulur ısılarına hal değiştirme ısısı eklenir.

$$Q = mc_{ps}(T_m - T_i) + f\Delta H + mc_{pl}(T_f - T_m) \tag{3.2}$$



Şekil 3.2. Isı depolama tankı [55]



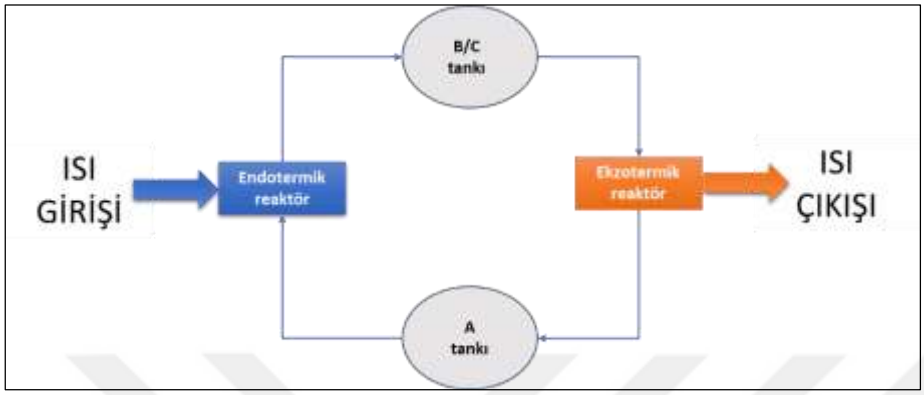
Şekil 3.3. FDM katkılı kanatlı-boru ısı değiştirici [56]

Şekil 3.2'de bir binanın iklimlendirme sisteminde enerji tasarrufu sağlamak adına yerleştirilen ısı depolama tankı görülmektedir. Şekil 3.3'de belirtilen ısı değiştirici ise kanatlı-boru (İng. fin and tube) yapısına sahip bir ısı depolama sistemidir. Şekillerde belirtilen bütün gizli ısı depolama sistemlerinde Şekil 3.1'de tasniflenen farklı türdeki katıdan sıvıya dönüşen FDM'ler kullanılmıştır.

3.1.3. Termokimyasal ısı depolama sistemleri

Termokimyasal ısı depolama sistemleri, ısının tersinir kimyasal reaksiyonlar yoluyla depolanıp geri kazanılmasına dayanır. Bu sistemlerde ısı, bir kimyasal reaksiyonu başlatarak depolanır; daha sonra ters reaksiyon gerçekleştirilerek bu enerji tekrar açığa çıkarılır. Anlatılan kimyasal döngü Şekil 3.4'de basitleştirilerek gösterilmiştir. Enerji yoğunlukları oldukça yüksektir ve uzun süreli depolama için uygundurlar, çünkü enerji kaybı çok düşüktür. Bu tür sistemler, özellikle mevsimsel ısı depolama veya güneş enerjisi uygulamaları için büyük potansiyele sahiptir. Örneğin, $Mg(OH)_2$ bazlı sistemlerin enerji

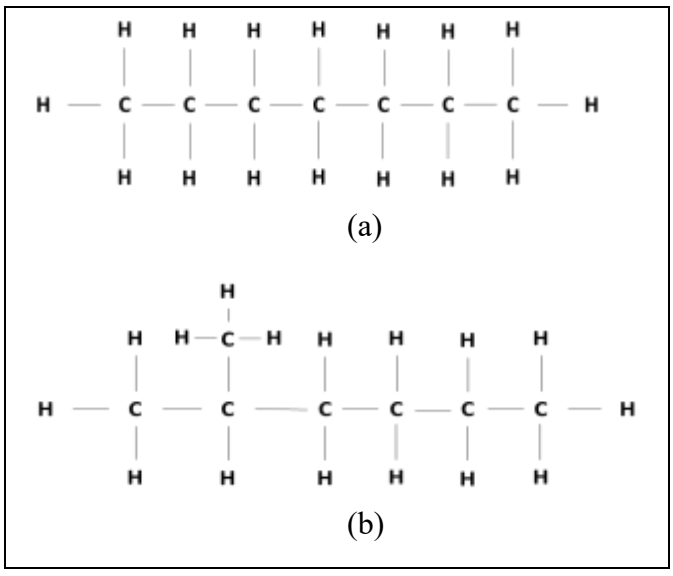
yoğunluğunun 1.2 GJ/m^3'e kadar ulaşabildiği belirtilmiştir [57]. Ayrıca, $Ca(OH)_2$ ile yapılan deneysel çalışmalar, bu tür malzemelerin hem geri dönüşümlü hem de yüksek performanslı olduğunu göstermektedir [58].



Şekil 3.4. Basitleştirilmiş bir kimyasal ısı depolama çevrimi

3.2.Parafin Esaslı Faz Değiştiren Malzemeler

Parafinlerin kimyasal formülleri C_nH_{2n+2} şeklindedir ve genellikle düz zincirli (n-parafin) veya dallanmış yapıda (izoparafin) olan doymuş hidrokarbonlardır. Şekil 3.5'te düz yapıdaki Heptan (C_7H_{16}) ve dallanmış zincire sahip 2-Metilheksan (C_7H_{16}) ayrı olarak gösterilmiştir. Belirtilen iki bileşik aynı kimyasal formüle sahip olmalarına rağmen farklı dizilişlere sahiptir. Bu bileşikler izomer olarak adlandırılır [59].



Şekil 3.5. (a) Düz ve (b) dallanmış yapıdaki parafin zinciri

Parafinler; renksiz, kokusuz, kimyasal olarak inert, toksik olmayan ve suya karşı hidrofobik özellikte bir maddedir.

3.2.1. Kimyasal ve fiziksel özellikleri

Parafinlerin karbon zinciri uzunluğuna bağlı olarak fiziksel özellikleri değişkenlik gösterir. Oda sıcaklığında genellikle katı formda olup, mum benzeri bir yapıya sahiptirler. Ergime noktaları yaklaşık 40°C ile 70°C arasında değişir [60]. Ergime noktalarındaki farklılık ya da normal koşullardaki fiziksel halleri, kimyasal formüllerindeki "n" değeri ile doğrudan ilişkilidir. $n < 5$ (örneğin metan, etan, propan ve bütan) olduğunda parafinler normal sıcaklık ve basınç koşullarında gaz halinde bulunur. $n = 5$ ila 15 arasında (örneğin pentan, hekzan, heptan, vb.) parafinler sıvı halde olur. Eğer $n > 15$ ise parafinler viskoz sıvılardan katı mumlara kadar değişen yapıda bulunur. Bu nedenle, n değeri arttıkça parafinlerin molekül ağırlığı ve buna bağlı olarak fiziksel halleri de gazdan sıvıya ve sonrasında katıya doğru evrilir [61].

Çizelge 3.1. Karbon sayısına bağlı olarak bazı parafinlerin ergime noktaları ve gizli ısı değerleri.

n-Parafin	Karbon Sayısı	Ergime Noktası (°C)	Gizli Isı Değeri (kJ/kg)
n-Dekan	10	6	220
n-Dodekan	12	12	216
n-Tetradekan	14	23	214
n-Heksadekan	16	35	210
n-Oktadekan	18	59	205
n-Eikosan	20	64	200
n-Dokosan	22	70	195
n-Tetrakosan	24	78	190
n-Heksakosan	26	85	185

Çizelge 3.1'de belirtildiği üzere parafin zincirindeki karbon sayısı arttıkça ergime sıcaklıkları yükselmekte ve gizli ısı değerleri ise düşmektedir [2,62,63].

Parafinlerin termal iletkenlikleri de zincir uzunluklarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Parafin bileşiğinde karbon atom sayısı arttıkça termal iletkenlikte azalma görülür. Bu durum molekül hareketinin zorlaşması ile açıklanmaktadır. Bunun aksine zincir uzunluğu arttıkça

parafin yoğunluğu da artmaktadır. Oda koşullarında kata halde bulunan parafinlerin termal iletim katsayıları 0,2-0,3 W/mK ; yoğunlukları ise 0,85-0,90 g/cm^3 mertebesindedir [60].

3.2.2. Parafinlerin termofiziksel analizi

Parafinlerin termofiziksel özelliklerini belirlemek amacı ile yoğunluk, viskozite ölçümleri, DSC, termogravimetrik (TGA), Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizleri gerçekleştirilmektedir.

Yoğunluk ölçümü

Parafin ya da diğer FDM'lerin farklı haller ya da sıcaklıklarda yoğunluklarını belirlemek için yapılır. Ağırlığın hacme oranı yoğunluğu ifade eder.

Viskozite ölçümü

Erimiş parafinin akışkanlık özelliklerini değerlendirmek için rotasyonel viskozimetreler ile yapılan ölçümler, sıcaklığa bağlı viskozite değişimlerini ortaya koyar. Bu tipteki viskozite ölçüm cihazlarında Eş 3.3'te gösterildiği gibi tork (T), açısal hız (ω) ve cihaza bağlı kalibrasyon değeri (k) viskozite ile ilişkilendirilir [64].

$$\mu = \frac{T}{k\omega} \tag{3.3}$$

Diferansiye taramalı kalorimetre (DSC) analizi

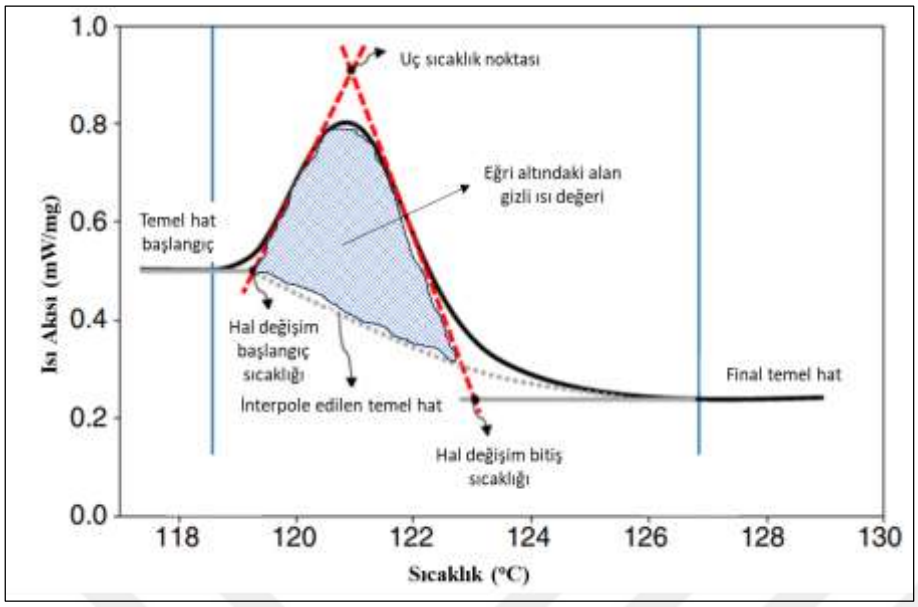
Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), bir numunenin ısı akısı değişimini sıcaklığa veya zamana bağlı olarak ölçen termal analiz yöntemidir. DSC cihazı, bir referans malzeme ile test numunesini aynı sıcaklık programına tabi tutar. Isıtma veya soğutma sırasında, numunede herhangi bir hal değişimi gerçekleşirse, numune daha fazla ya da daha az ısı çeker. Bu fark, sensörler aracılığıyla ısı akısı farkı olarak ölçülür [65, 66].



Şekil 3.6. Hitachi DSC7000 serisi DSC cihazı

Parafin esaslı FDM'ler için gerçekleştirilen DSC analizleri sonucunda tipik olarak Şekil 3.7'de gösterilen grafik elde edilir. Grafikte belirtilen siyah eğri, cihazdan elde edilen ısı akısı verisini, mavi taralı alan ise ergimeye karşılık gelen gizli ısıyı temsil eder. Analiz, eğrinin başlangıç ve bitiş noktalarına dayalı olarak tanımlanan temel hatların çizilmesiyle başlar. Bu hatlar arasında doğrusal interpolasyon yapılarak interpolasyon temel hattı oluşturulur [67].

Şekil 3.7'deki kırmızı kesikli çizgiler, ergime başlangıç ve bitiş sıcaklıklarının grafiksel olarak belirlenmesinde kullanılır. Başlangıç sıcaklığı, eğrinin yükselen kenarına teğet olarak çizilen yardımcı çizginin, temel hat ile kesiştiği noktada tanımlanır. Benzer şekilde, bitiş sıcaklığı da pikin düşen kenarına çizilen teğet çizginin interpolasyon baz hattı ile kesişim noktasında belirlenir ve faz geçişinin tamamlandığı sıcaklığı temsil eder. Sonuç olarak, grafik üzerindeki bu yapıların tümü, malzemenin faz geçiş sıcaklıkları ve ergime entalpisi gibi termal özelliklerinin doğru ve tekrarlanabilir biçimde hesaplanmasına olanak tanır [67, 68].

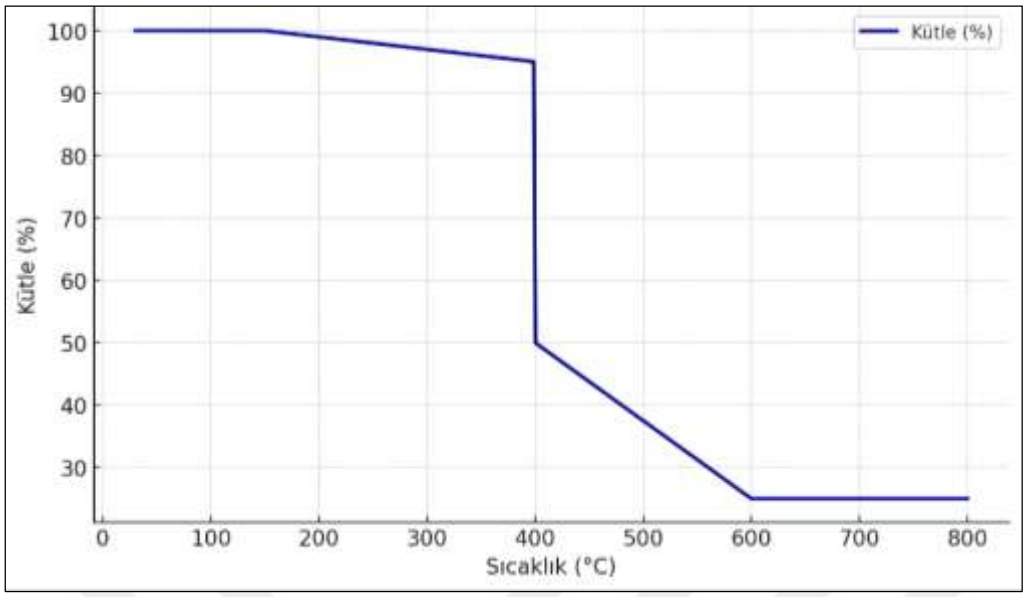


Şekil 3.7. DSC grafiği ve yorumlanması [68]

Termogravimetrik (TGA) analiz

TGA, bir numunenin kontrollü ısıtma kütlesindeki değişimleri ölçer. Ölçüm, genellikle bir hassas teraziye yerleştirilen numunenin, inert (ör. azot) veya reaktif (ör. hava, oksijen) atmosferde ısıtılması ile gerçekleştirilir [69].

Şekil 3.8'te gösterilen temsili TGA grafiği, bir malzemenin sıcaklıkla birlikte gösterdiği kütle değişimini üç aşamalı bir süreçle ortaya koymaktadır. İlk olarak 30–150 °C arasında kütle sabit kalmakta, bu da malzemenin higroskopik nem veya uçucu madde içermediğini ya da henüz buharlaşmadığını gösterir. 150–400 °C aralığında yaklaşık %5'lik bir kütle kaybı meydana gelir; bu, genellikle fiziksel olarak tutulan suyun veya düşük molekül ağırlıklı uçucuların uzaklaşmasıyla ilişkilidir. 400–600 °C arasında belirgin bir kütle kaybı gözlenir ve bu bölge, malzemedeki organik bileşiklerin termal bozunmasıyla ilişkilidir. 600 °C sonrasında ise kütle sabitlenerek yaklaşık %25 seviyesinde kalır; bu artık kısım, genellikle inorganik kalıntılar veya kül olarak değerlendirilir.



Şekil 3.8. Örnek bir TGA grafiği

Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi

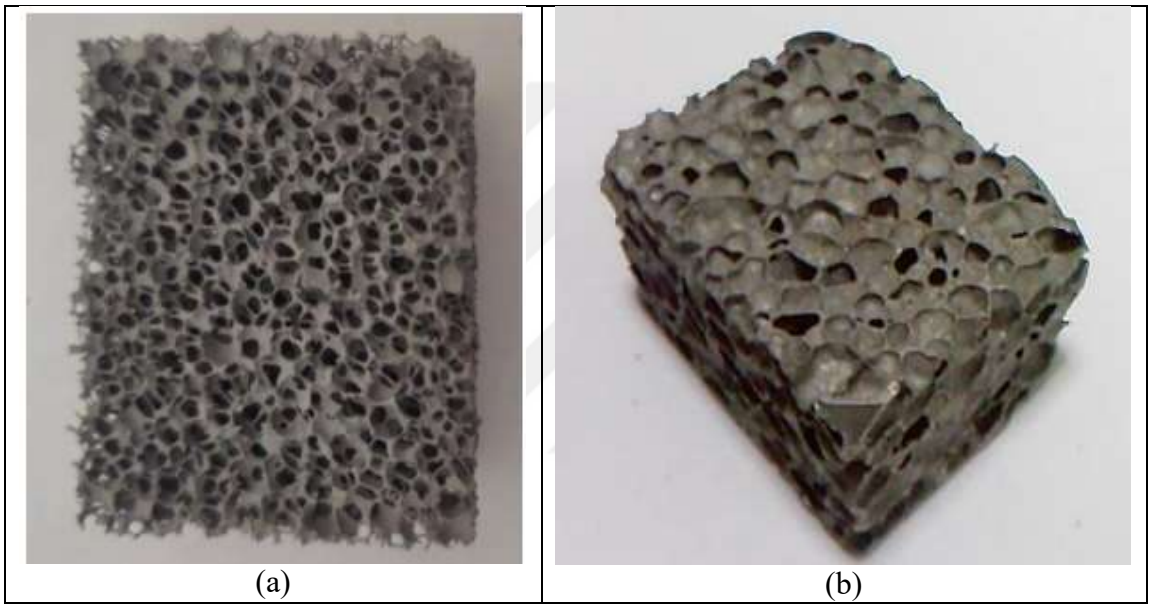
FTIR spektroskopisi, bir maddenin kimyasal yapısındaki fonksiyonel grupları ve bağ türlerini belirlemek amacıyla kullanılan bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, kızılötesi ışığın madde tarafından absorplanma şeklini ölçerek, moleküler titreşimlere karşılık gelen özgün dalga sayılarında (cm^{-1}) karakteristik sinyaller üretir. Özellikle organik bileşiklerde, polimerlerde ve kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan FTIR analizi ile hidroksil (–OH), karbonil (C=O), amin ($–NH_2$) gibi fonksiyonel gruplar tespit edilebilir. Ayrıca sentez sonrası kimyasal yapı doğrulaması, bozunma ya da oksidasyon gibi yapısal değişimlerin izlenmesi ve malzemeler arası etkileşimlerin anlaşılması gibi amaçlarla da kullanılır [70]. FTIR spektrumu, her maddenin kimyasal yapısına özgü bir "parmak izi" sunar ve bu sayede nitel kimyasal analizde güçlü bir araç olarak değerlendirilir. Bu sebeple FDM'lerin bileşiminin tayin edilmesinde, saflıklarının belirlenmesinde kullanılan önemli bir analiz yöntemidir.

3.3. Metal Köpükler

Metal köpükler, düşük yoğunluklu ve gözenekli yapıya sahip yeni nesil mühendislik malzemeleridir. Genellikle alüminyum ve nikel gibi metallerden üretilirler; ancak titanyum,

çelik, bakır gibi metallerle de köpük üretimi mümkündür. Bu malzemeler, mekanik, termal, elektriksel ve akustik özellikleriyle dikkat çeker.

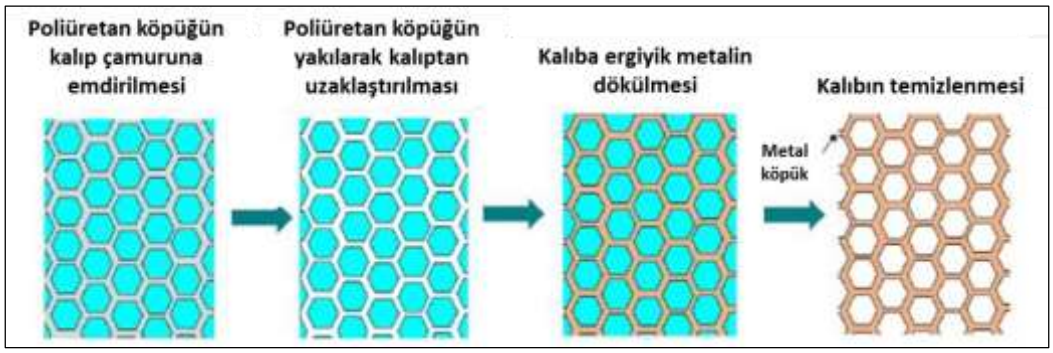
Metal köpükler Şekil 3.9'da gösterildiği gibi açık ve kapalı gözenekli olmak üzere 2 sınıfa ayrılır. Kapalı gözenekli metal köpükler mekanik enerji sönümleme özellikleri ile öne çıkar [71]. FMD/metal kompozitlerin oluşturulması için açık gözenekli metal köpükler kullanılmaktadır. Metal köpük gözeneklerinin açık olması sayesinde FDM metal yapı içerisine emdirilebilir.



Şekil 3.9. (a) Açık ve (b) kapalı gözenekli metal köpük [71]

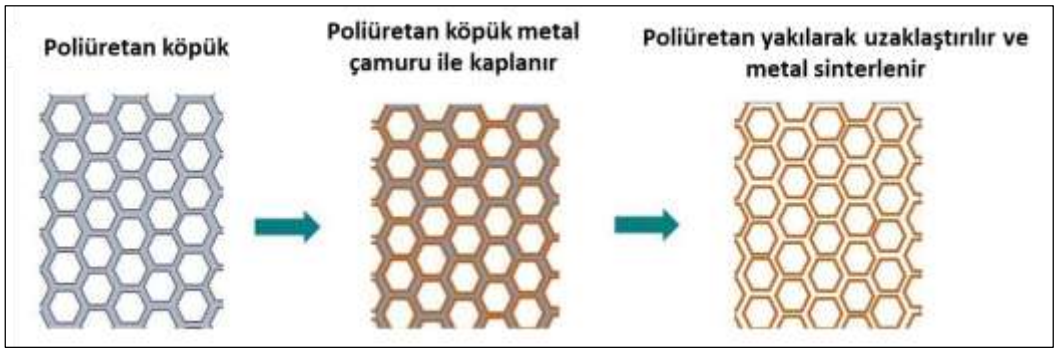
3.3.1. Açık gözenekli metal köpüklerin üretim yöntemleri

Açık gözenekli köpükler hassas döküm ya da replika yöntemi olarak adlandırılan prosesler ile üretilir. Hassas döküm yönteminde, gözenekli yapıya sahip poliüretan köpük, seramik veya alçı bazlı bir kalıp çamuru ile kaplanır. Kurutma sonrası poliüretan köpük yakılarak uzaklaştırılır ve oluşan boşluklara ergimiş metal dökülerek köpük yapısı elde edilir. Son olarak, kalıp malzemesi yüksek basınçlı su veya kimyasal çözücülerle uzaklaştırılır. Bu yöntem, farklı metallerle çalışabilme ve istenilen gözenek yapısının elde edilebilmesi gibi avantajlar sunsa da kalıbın homojen doldurulması ve kalıbın çıkarılması gibi zorluklar içerebilir [72, 73].



Şekil 3.10. Hassas döküm yöntemi ile açık gözenekli köpük üretimi [72]

Açık gözenekli köpük üretimde uygulanan replika yönteminde ise ilk olarak, açık hücreli poliüretan sünger, metal tozları ve bağlayıcı içeren sulu bir süspansiyona daldırılır ve kaplanır. Ardından, bu kaplanan sünger kurutulup ısıtılarak hem poliüretan sünger hem de bağlayıcı uzaklaştırılır. Son olarak, geriye kalan toz yapısı sinterlenerek (ısı ile pekiştirilerek) açık gözenekli metal köpük elde edilir. Bu yöntemle elde edilen köpüklerin gözenek boyutu, başlangıçtaki sünger yapısına bağlıdır. Sünger replikasyon tekniği, özellikle yüksek yüzey alanı gerektiren kimyasal uygulamalar (katalizör taşıyıcılar, filtreler vb.) için uygundur. Ancak metal tozlarının oksitlenme eğilimi, sinterleme sırasında yapısal kusurlara ve düşük mekanik ile iletkenlik özelliklerine yol açabilir. Bu nedenle sinterleme atmosferi ve sıcaklığı gibi parametrelerin dikkatli seçilmesi önemlidir [74, 75].



Şekil 3.11. Replika yöntemi ile açık gözenekli köpük üretimi [74]

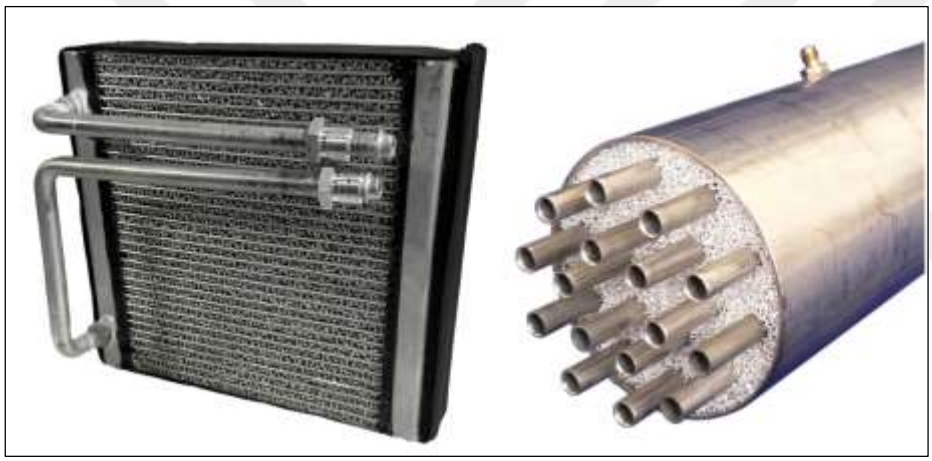
3.3.2. Termal özellikleri

Metal köpüklerin özellikleri; üretildikleri metale, porozite değerlerine, hücre topolojilerine ve yapısal kusurlarına bağlıdır. Bir metal köpüğün porozite değeri Eş 3.4 ile hesaplanır.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \tag{3.4}$$

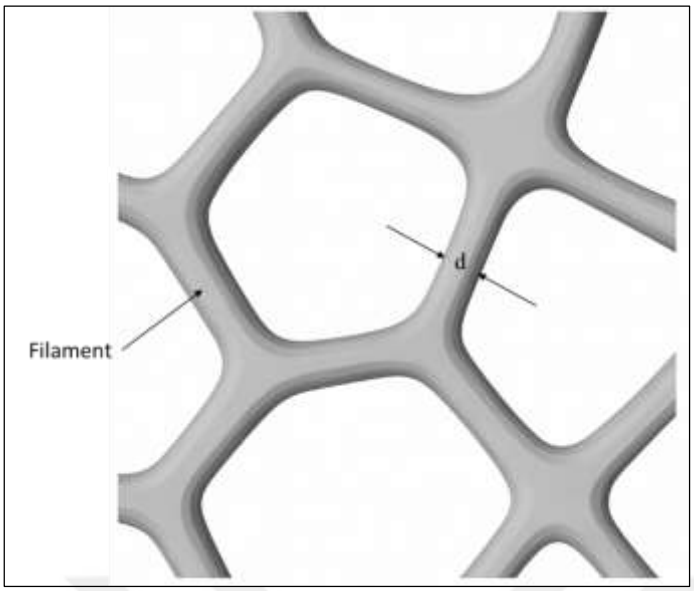
Eş 3.4'te verilen ρ/ρ_s ifadesi ise rölatif yoğunluk ifadesi olarak tanımlanmaktadır. Köpük malzemelerin termal iletkenlikleri rölatif yoğunluğun yaklaşık 1,65–1,8 kuvvetiyle azalır. Ergime noktası, özgül ısı ve genleşme katsayısı ise kullanılan metal ile aynıdır [76].

Açık hücreli metal köpükler, yüksek yüzey alanları ve ısı iletkenlikleri sayesinde ısı transferinin kritik olduğu uygulamalarda oldukça değerlidir. Bu tür uygulamalar arasında elektronik bileşen soğutucuları, hava soğutmalı kondenser kuleleri, rejeneratörler ve Şekil 3.12'de gösterildiği gibi ısı eşanjörleri yer almaktadır.



Şekil 3.12. Metal köpüklü hava soğutmalı ısı değiştiriciler [77]

Şekil 3.13'te açık gözenekli bir köpüğe ait hücre yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu bağlamda açık gözenekli köpüklerde ısı transferinin etkin olabilmesi için köpükte kullanılan filamentlerin yüksek iletkenliğe sahip metallerden (örneğin bakır veya alüminyum) olması, akışkanın mümkün olduğunca türbülanslı hareket etmesi ve akış sırasında giriş-çıkış arasında düşük basınç kaybı yaşanması gereklidir [76].



Şekil 3.13. Açık gözenekli köpük şematik hücre yapısı

Metal köpük içerisinde ısı transferi, filament çapı azaldıkça ve rölatif yoğunluk arttıkça yükselir; çünkü iç yüzey alanı artar. Ancak yüzey-alan/hacim oranındaki bu artış, aynı zamanda akışkanın köpük içinden geçmesi için gereken basıncı da artırır [76].

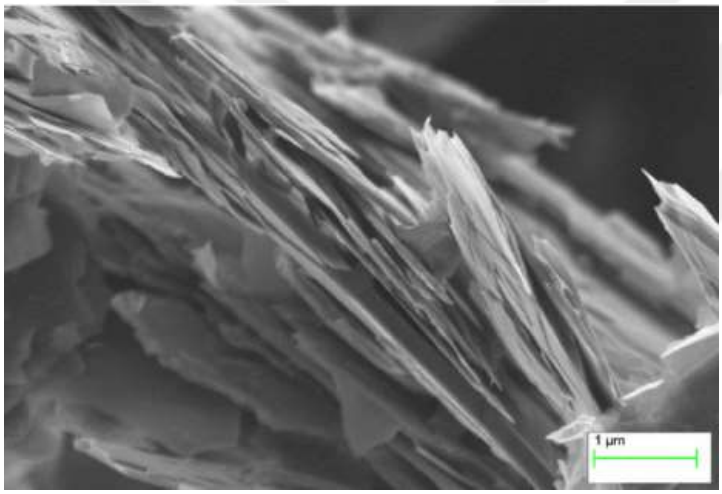
3.4. Grafen Nanoplatelet

Grafen nanoplateletler (GNP'ler), grafitin tabakalı yapısından eksfoliasyon yöntemleriyle elde edilen, birkaç nanometre kalınlığında ve mikrometre ölçeğinde genişliğe sahip iki boyutlu karbon nanomalzemelerdir. Yüksek özgül yüzey alanı, üstün mekanik dayanım, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik gibi özellikleri sayesinde polimer kompozitlerden enerji depolama sistemlerine kadar birçok alanda performans artırıcı katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

3.4.1. Termofiziksel özellikleri

Grafen nanoplateletler (GNP), birkaç katmandan oluşan (genellikle 10–30 arası) grafen yapraklarının bir araya gelmesiyle oluşan iki boyutlu karbon nanomalzemelerdir. Kalınlıkları yaklaşık 0,7 nm ile 100 nm arasında değişebilirken, uzunlukları mikrometre mertebesindedir. GNP'ler, yüksek yüzey alanına sahip petek yapılı sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarından oluşur. Saf grafen ile kıyaslandığında daha ekonomik ve büyük ölçekli üretime

daha uygundur. Ayrıca hafiflik, yüksek özgül yüzey alanı, elektriksel ve termal iletkenlik gibi üstün fiziksel özellikler sunar [78]. Grafen nano plateletlere ait SEM görüntüsü Şekil 3.14'te verilmiştir. Bu grafen nanoplateletlerin tipik tabakalı yapısını ortaya koymaktadır. Görüntüde, birbirine yığılmış yaprak benzeri ince plakalar açıkça seçilebilmekte ve bu tabakaların kenarları keskin, düzensiz ve pul benzeri bir morfoloji sergilemektedir. Ölçek çubuğu 1 µm olduğundan, her bir tabakanın nanometre mertebesinde kalınlığa sahip olduğu, ancak bir araya gelerek mikrometre ölçeğinde kümeler oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu çok katmanlı ve lameller yapı, grafen nanoplateletlere yüksek özel yüzey alanı kazandırmakta ve ısı iletkenliği, elektriksel iletkenlik ile mekanik dayanım gibi özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır [79].



Şekil 3.14. GNP'ye ait SEM görüntüsü [79]

Grafen nanoplatelet Şekil 3.15'te görüldüğü gibi oda sıcaklığında katı halde bulunur ve tipik olarak siyah veya koyu gri renkte, toz veya pul benzeri bir görünüm sergiler. Karbon temelli yapısı sayesinde oldukça kararlı olup havada kendiliğinden bozulma ya da buharlaşma göstermez. Düşük yoğunluklu fakat yüksek özgül yüzey alanına sahip bu malzeme, genellikle gevşek yığınlar veya topaklanmış kümeler halinde bulunur. Kimyasal olarak inert yapısı sayesinde çoğu ortamda kararlıdır. Ayrıca yanıcıdır ve yüksek sıcaklıklarda oksijen varlığında karbon esaslı malzemeler gibi yanarak CO veya CO_2'ye dönüşebilir [80].



Şekil 3.15. Grafen nanoplatelet makro görüntüsü

GNP'ler, yüksek termal iletkenlikleri sayesinde ısı yönetimi gerektiren birçok uygulama için son derece cazip nanomalzemelerdir. GNP'lerin bu termal performansı, onların yapısal düzeni, kristallik derecesi, kalınlığı ve matris içinde dağılma şekli gibi birçok faktöre bağlıdır.

GNP'lerin termal iletkenliği, düzlemsel yapıdaki sp^2 hibritleşmiş karbon bağlarından kaynaklanır. Literatürde saf grafen için termal iletkenlik değerleri 3000–5000 W/mK arasında raporlanırken, GNP'ler için bu değerler daha düşüktür ama yine de çoğu metal ve polimerden büyüktür. GNP'lerin termal iletkenliği tipik olarak 150–500 W/mK aralığındadır [81]. Ayrıca, GNP'ler polimer matrislere eklendiğinde, termal iletkenliği artırma potansiyeline sahiptir [82]. Örneğin, polietilen glikol (PEG) gibi faz değişimli malzemelere düşük oranlarda (%1–5) GNP ilavesiyle, termal iletkenliğin 2–5 kat artırıldığı gösterilmiştir [83]. Bu özellikleri sayesinde FDM'lerin termal iletkenliklerini arttırma amaçlı da kullanılırlar.

3.4.2. Üretim yöntemleri

Grafen nanoplateletlerin hazırlanması için eksfoliasyon yöntemleri kullanılır. Eksfoliasyon, grafitin tabakalı yapısından tek veya az katmanlı grafen tabakalarının ayrılması işlemidir. Grafit, birbirine zayıf Van der Waals kuvvetleriyle bağlanmış çok sayıda grafen katmanından oluşur. Bu zayıf bağlar, uygun yöntemler kullanılarak aşılabilir ve grafit, grafen tabakalarına ayrıştırılabilir. Eksfoliasyon yöntemleri, hem laboratuvar ölçeğinde saf grafen üretmek hem de endüstriyel ölçekte grafen nanoplateletler hazırlamak için uygulanabilir bir prosestir.

Eksfoliasyon yöntemi mekanik, sıvı, kimyasal ve elektrokimyasal olarak 4 farklı gruba ayrılır. Bu farklı yöntemlere ait özet bilgi Çizelge 3.2'de verilmiştir [84, 85].

Çizelge 3.2. Eksfoliasyon yöntemleri

Yöntem	Prensip	Avantajları	Dezavantajları
Mekanik Eksfoliasyon (Scotch tape yöntemi)	Grafit tabakaları yapışkan bant veya mekanik kuvvetlerle soyularak tek katmanlı grafen elde edilir.	Yüksek kalite, düşük kusur yoğunluğu, tek katmanlı grafen üretimi.	Çok düşük verim, endüstriyel ölçek için uygun değil.
Sıvı Faz Eksfoliasyon	Grafit çözücü içerisinde ultrasonikasyon veya kesme kuvvetleriyle tabakalarına ayrılır.	Düşük maliyet, ölçeklenebilirlik, çözelti içinde stabil dağılım.	Tabakaların boyut kontrolü zor, genellikle çok katmanlı grafen oluşur.
Kimyasal Eksfoliasyon	Grafit oksit hazırlanır, tabakalar arasındaki mesafe açılır; sonrasında ultrasonik veya kimyasal yollarla ayrıştırılır.	Büyük miktarda üretim imkânı, çözeltilerde iyi dağılım.	Kusurlar ve oksijen grupları nedeniyle elektriksel/termal özellikler azalır.
Elektrokimyasal Eksfoliasyon	Grafit elektrotlara elektrolit ortamda voltaj uygulanarak tabakalar ayrıştırılır.	Yüksek verim, hızlı işlem, çevre dostu yöntem.	Ürün saflığı elektrolit ve işlem parametrelerine bağlıdır.

4. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu tez kapsamında parafin esaslı faz değiştiren malzemenin termal iletkenliği etkileyen faktörler deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Alüminyum metal köpükler ve grafen nano-plakalar, parafin ile karıştırılarak kontrollü ısıtma süreçlerinden geçirilmiş ve sıcaklık ölçümleriyle belirtilen faktörlerin etkisi analiz edilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışma adımları

Şekil 4.1'de tez süresince izlenen çalışmanın metodolojisi belirtilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma parafin, grafen ve metal köpüklerin ayrı olarak analiz edilmesi ile başlamaktadır. Bu süreçte malzeme tedarikçilerinden alınan veriler de kullanılmıştır. Parça bazlı karakterizasyon sürecini numune hazırlama adımı izlemektedir. Deneylerde kullanılacak numuneler, hazırlık sürecinden geçirilerek gerekli enstrümantasyon ve sensör yerleşimleri ile hazır edilir. Ardından kontrollü ısıtma deney düzeneğinde ölçümler yapılarak metal köpük ve nanomalzemenin parafin üzerindeki ısıl etkileri değerlendirilmiştir.

4.1.Materyaller

Metal köpüklerin FDM'ler üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile çalışma kapsamında kullanılan malzeme ve materyaller bu bölüm içerisinde belirtilmektedir.

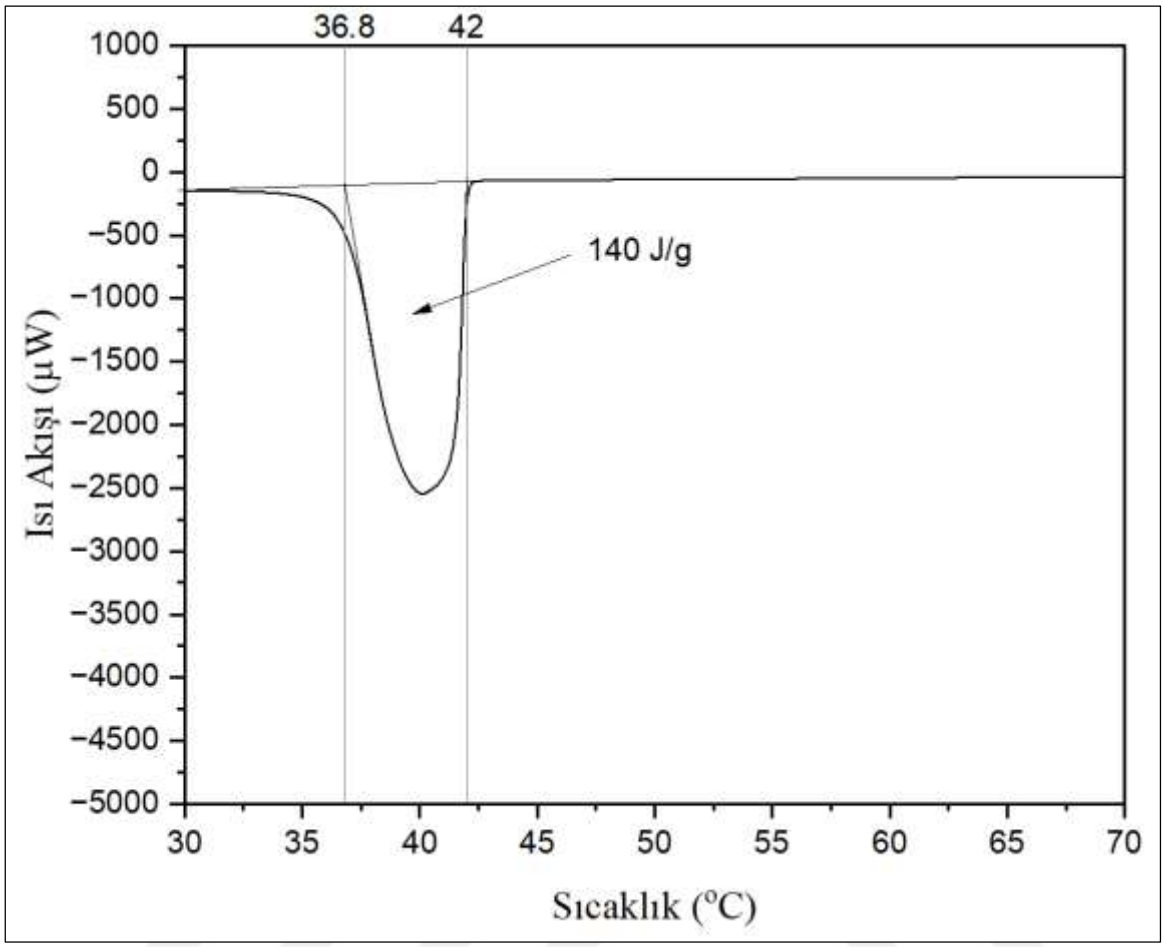
4.1.1. FDM Parafin: RUBITHERM42

Yapılan deneysel çalışma kapsamında FDM olarak Rubitherm markasına ait RUBITHERM42 (RT42) parafin malzemesi kullanılmıştır. RT42'ye ait üretici tarafından belirtilen özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Üreticinin belirttiği bilgilere göre RT42, 38–43 °C arasında ergime ve 43–37 °C arasında donma özelliğine sahiptir. Isı depolama kapasitesi ±%7,5 belirsizlikle 145 kJ/kg olup, özgül ısı kapasitesi 2 kJ/(kgK) değerindedir. Katı halde 15 °C'deki yoğunluğu 0,88 kg/l, sıvı halde 80 °C'de ise 0,76 kg/l'dir. Her iki fazda da termal iletkenliği 0,2 W/(m·K) seviyesindedir. Hacimsel genleşmesi %12,5 olan malzemenin parlama noktası 186 °C, maksimum çalışma sıcaklığı ise 72 °C'dir.

Çizelge 4.1. RT42'ye ait özellikler [86]

Özellikler	Değerler
Ergime sıcaklığı aralığı	38–43 °C
Donma sıcaklığı aralığı	43–37 °C
Isı depolama kapasitesi ±%7,5	145 kJ/kg
Özgül ısı kapasitesi	2 kJ/(kgK)
Katı yoğunluğu (15°C'de)	0,88 kg/l
Sıvı yoğunluğu (80°C'de)	0,76 kg/l
Termal iletkenliği (katı ve sıvı fazda)	0,2 W/(mK)
Hacimsel genleşme	%12,5
Parlama noktası	186 °C
Maksimum çalışma sıcaklığı	72 °C

Şekil 4.2'de RT42 için yapılan DSC analizine ait sonuç gösterilmektedir. Yaklaşık 36,8 °C'de başlayan ve 42 °C civarında sona eren belirgin bir endotermik pik mevcuttur. Bu pik, numunenin bu sıcaklık aralığında faz değişimine uğrayarak sıvılaşma sürecinde ısı absorbe ettiğini göstermektedir. Tepe noktası altındaki alana göre gizli ısı değeri 140 J/g olarak hesaplanmıştır. Bu değer, üreticinin belirtmiş olduğu gizli ısı değeri ile uyumludur.



Şekil 4.2. RT42 DSC grafiği

4.1.2. Açık gözenekli Aluminyum metal köpükler

Deneysel çalışmalarda açık gözenekli Alüminyum köpükler kullanılmıştır. Metal köpükler Beihai Composite Materials firmasından tedarik edilmiştir. Kullanılan köpük malzemeleri 10x10x3 cm boyutlarında olup Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Metal köpüklere ait porozite ölçümleri yapılarak Çizelge 4.3'de belirtilmiştir. Metal köpüklerin porozite değerlerinin %94,5±0,4 olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Al köpük numunelere ait porozite PPI değerleri

Numune	Porozite	PPI
Köpük-1	%94,6	10
Köpük-2	%94,8	20
Köpük-3	%94,1	30



(a) (b) ©

Şekil 4.3. Al köpük (a)10 PPI, (b)20 PPI ve (c)30 PPI

4.1.3. Nano partikül: Grafen nanoplatelet

FDM'lerin termal iletkenliğini arttırması amacı ile kullanılan nano partiküller grafen nano platelet olup Nanografi firmasından NG01GNP0109 üretici numaralı ürünü tedarik edilmiştir. Ürüne ait teknik bilgiler Çizelge 4.3'te belirtildiği üzere Grafen nanoplateletler %99,9 saflığa sahip olup yaklaşık 3 nm kalınlığında, 1,5 µm çapında ve 800 m^2/g gibi oldukça yüksek bir özgül yüzey alanına sahiptir [87].

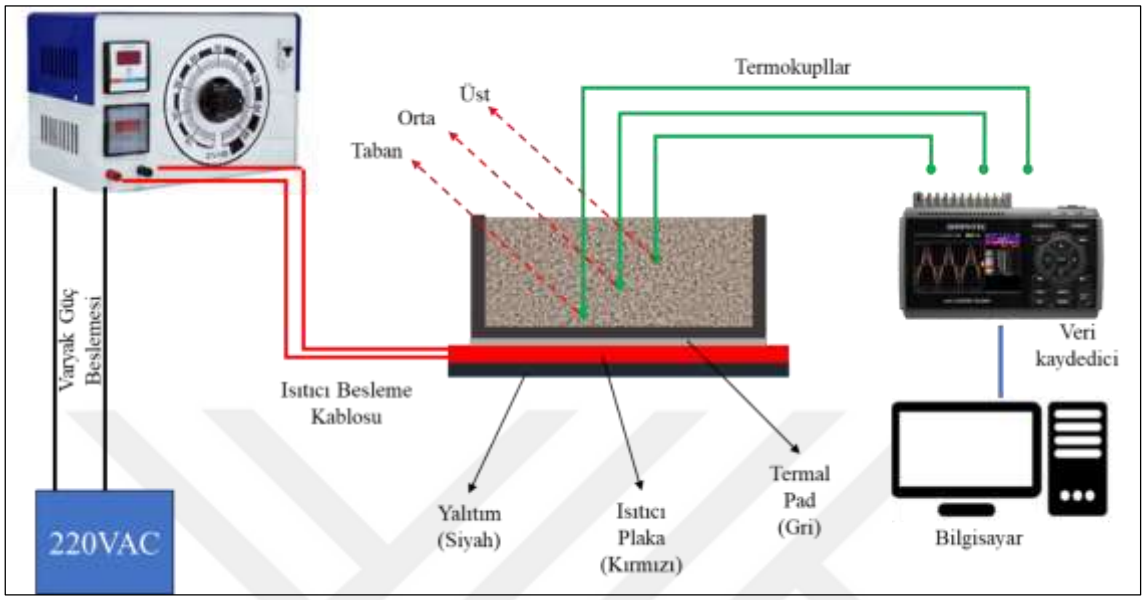
Çizelge 4.3. Nano platelet özellikleri

Saflık	%99,9
Kalınlık (nm)	3
Çap (µm)	1,5
Belirli yüzey alanı (m^2/g)	800

4.2. Deney Düzeneği

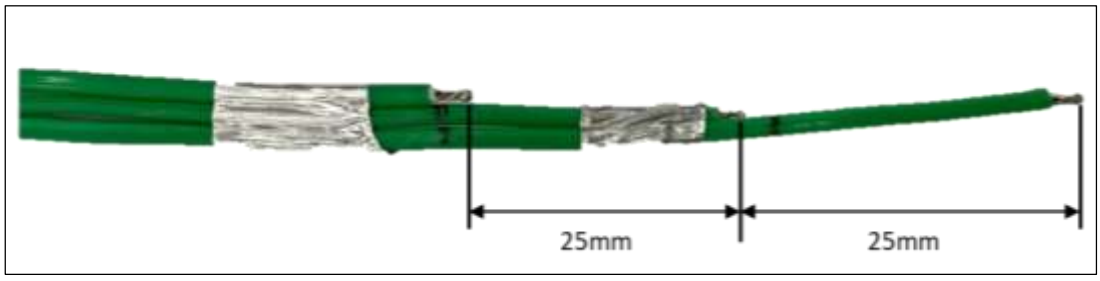
Isı girdisinin kontrol edilebilmesi amacı ile Şekil 4.4'te şematik görünümü verilen deney düzeneği kurulmuştur. Gösterilen deney düzeneğinde, 220 VAC şebeke gerilimi ile çalışan bir varyak kullanılarak numune üzerine yerleştirilmiş ısıtıcıya enerji sağlanmaktadır. Isıtıcı, test numunesinin kontrollü şekilde ısıtılmasını sağlar. Numune içerisinde farklı noktalara yerleştirilen termokupllar sıcaklık değişimlerini eşzamanlı olarak ölçer. Bu sensörlerden gelen sinyaller, çok kanallı bir veri kaydediciye iletilir. Sıcaklık verileri, 5 saniyelik örnekleme hızı ile GRAPHTEC GL840 veri toplama sistemi kullanılarak toplanır. Veri

kaydedici, sıcaklık zaman grafikleri şeklinde ölçümleri kaydeder ve bu veriler bilgisayar aracılığıyla izlenip analiz edilir.



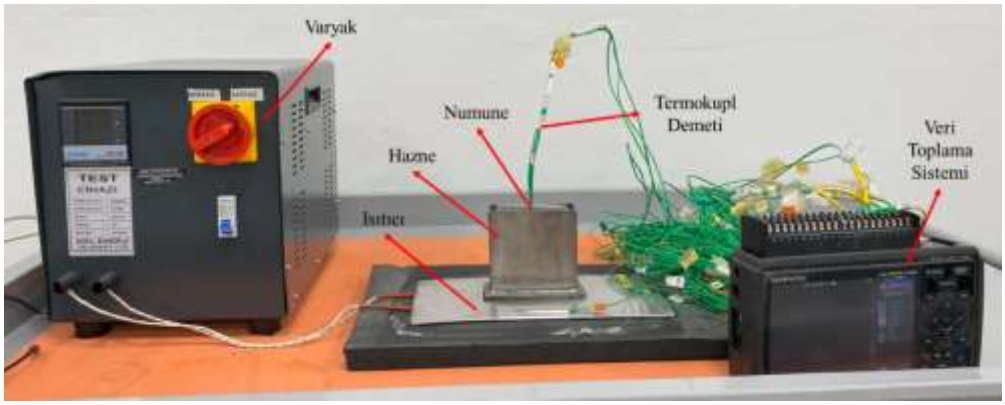
Şekil 4.4. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü

Paslanmaz çelik bir kap, FDM ve Al köpük–parafin kompozit numuneleri depolamak için kullanılmıştır. Kap, 5 mm kalınlığında ve 2,4 W/mK ısıl iletkenliğe sahip 3M marka ısıl iletken bir ped üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 4.5'teki gibi bir demet haline getirilen farklı konumlardaki termokupllar, hazne tabanından sırasıyla 3 mm, 28 mm ve 53 mm yükseklikte olacak şekilde numune içerisine yerleştirilmiştir. Kullanılan termokupllar K tipi olup ±1,1 ^{o}C hassasiyete sahiptir.

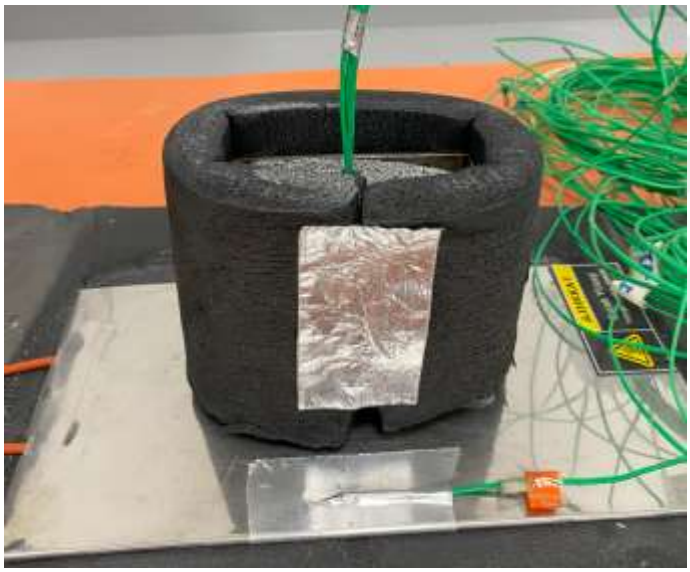


Şekil 4.5. Termokupl demeti

Deney düzeneğine ait gerçek görünüm Şekil 4.6'da belirtilmiştir. Deneyler esnasında hazne Şekil 4.7'de gösterildiği gibi EPDM yalıtım ile sarılarak çevreye olan ısı kayıpları azaltılmıştır.



Şekil 4.6. Deney düzeneği



Şekil 4.7. Hazne yalıtımı

4.3. Ölçüm Belirsizlikleri

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda sıcaklık, uzunluk, akım ve amper ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlere ait belirsizlikler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Ölçüm belirsizlikleri

Ölçüm	Ölçüm Cihazı	Belirsizlik Değeri
Sıcaklık	K tipi termokupl	±1,1 ºC
Akım	Ampermetre	±%2
Voltaj	Voltmetre	±%0,5
Uzunluk	Kumpas	±0,01 mm

Deney düzeneğindeki ısı girdisi ölçülen voltaj ve amper değerlerine bağlı olarak Eş 4.1'e göre hesaplanmıştır.

$$Q = V * I \tag{4.1}$$

Böylece ısı değerindeki belirsizlik Eş 4.2 ve Eş 4.3'e göre hesaplanarak %2,06 olarak belirlenmiştir.

$$\sigma_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\sigma_V\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial I}\sigma_I\right)^2} \tag{4.2}$$

$$\frac{\sigma_Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} = \sqrt{(0{,}005)^2 + (0{,}02)^2} = 0{,}0206 \tag{4.3}$$

Ölçülen sıcaklık, uzunluk ve ısı değerleri üzerinden 1 boyutlu ısı iletim denklemi kullanılarak termal iletim katsayısı hesaplanmıştır. Termal iletim katsayısına ait matematiksel ifade Eş 4.4'te verilmiştir.

$$\lambda = \frac{QL}{\Delta T A} \tag{4.4}$$

Termal iletim katsayısına bütünleşik ait belirsizlik Eş 4.5'deki ifadeye göre hesaplanmıştır. Eş 4.4'deki alan ifadesine ilişkin belirsizlik uzunluk ölçümünden gelmektedir. Isı transferi alanı olarak Şekil 4.6'da gösterilen deney haznesinin iç ölçüleri (a=100mm ve b=30mm) alınmıştır. Bu ölçülere göre ısı transfer alanındaki ölçüm belirsizliği Eş 4.6(4.6'da hesaplanarak %0,0348 olarak bulunmuştur. Sıcaklık farkındaki göreceli belirsizlik ise Eş 4.7 referans alınarak sıcaklık farkına göre hesaplanmıştır.

$$\frac{\sigma_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \tag{4.5}$$

$$\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0{,}01}{100}\right)^2 + \left(\frac{0{,}01}{30}\right)^2} = 0{,}000348 \tag{4.6}$$

$$\frac{\sigma_{\Delta T}}{\Delta T} = \sqrt{2\left(\frac{\sigma_T}{\Delta T}\right)^2} = \sqrt{2\left(\frac{1{,}1}{\Delta T}\right)^2} = \frac{1{,}556}{\Delta T} \tag{4.7}$$

Böylece, termal iletkenliğin belirlenmesinde kullanılacak L=25mm mesafe için termal iletim katsayısının belirsizlik denklemi Eş.4.8'e indirgenir.

$$\frac{\sigma_\lambda}{\lambda} = \sqrt{(0{,}0206)^2 + \left(\frac{0{,}01}{25}\right)^2 + (0{,}000348)^2 + \left(\frac{1{,}556}{\Delta T}\right)^2}$$

$$= \sqrt{0{,}000424641 + \left(\frac{1{,}556}{\Delta T}\right)^2} \qquad (4.8)$$

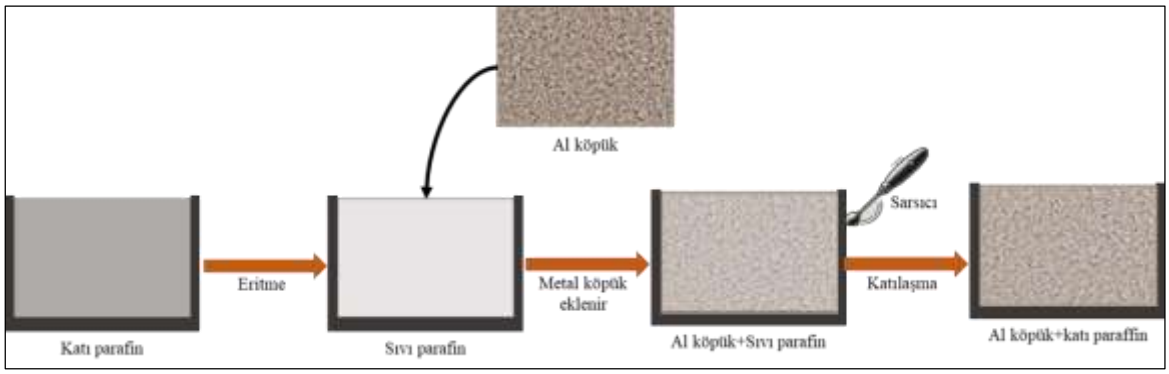
Hesaplanan termal iletim katsayısına ait sonuçlar verilirken ölçülen sıcaklık farkları kullanılarak termal iletkenliğe ait hata oranları belirlenmiştir.

4.4. Numune Hazırlığı

Numunelerin hazırlanması için temel olarak eritme-ekleme-katılaştırma işlemleri uygulanır. Ekleme işleminde numunenin türüne göre Al köpük, grafen nanoplatelet ya da her iki malzeme birlikte kullanılmaktadır.

4.4.1. Parafin-Al köpük numune hazırlığı

Parafin-Al köpük hazırlığına yönelik süreç Şekil 4.8'de aşamalı olarak belirtilmiştir. İlk olarak katı parafin çelik kap içerisine doldurularak ergitilir. Daha sonra parafin viskozitesini düşürmek amacı ile 70 ^{o}C'ye ısıtılır. Ergitilmiş parafin içerisine alüminyum köpük daldırılır ve parafinin gözeneklere tamamen nüfuz etmesi sağlanır. Ardından, gözenekler içinde hapsolmuş hava kabarcıklarını gidermek amacıyla köpüğün bulunduğu kap dışarıdan mekanik olarak titreştirilir. Son aşamada, parafinle dolmuş alüminyum köpük oda sıcaklığında bekletilerek parafinin katılaşması sağlanır ve kompozit malzeme elde edilir.

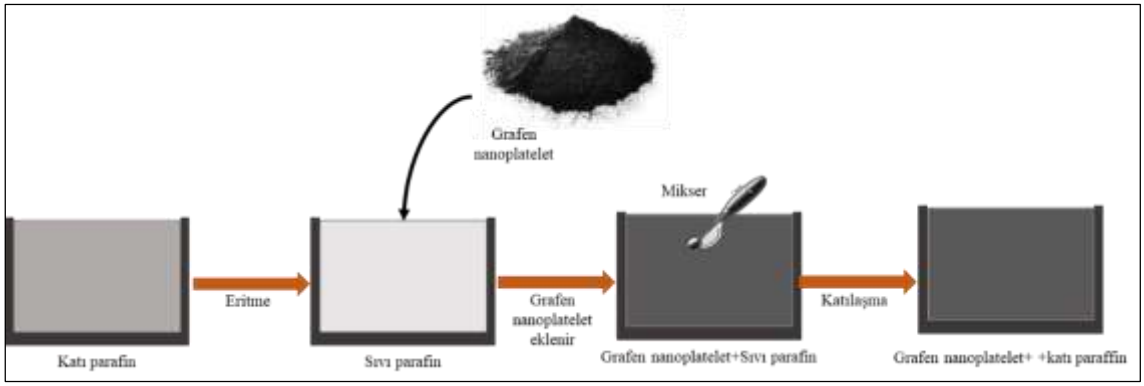


Şekil 4.8. Parafin-Al köpük hazırlığı

Katılaşmanın tamamlanmasının ardından numune içerisine matkap ile Şekil 4.5'teki termokupl demetlerinin gireceği delik açılır ve termokupllar numune içerisine yerleştirilir.

4.4.2. Parafin-Grafen nanoplatelet karışımının hazırlanması

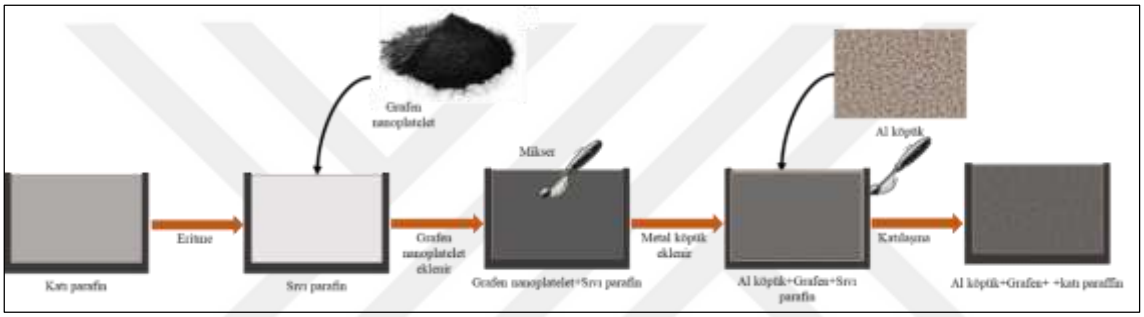
Grafen nanoplatelet katkılı parafin karışımı hazırlanırken Şekil 4.9'daki süreç izlenir. Öncelikle eriyik ve 70 ºC'deki parafin içerisine kütlece %1 oranında grafen tozları eklenir. Karışım içerisine eser miktarda polisorbat (Tween 80) sürfaktan katılarak grafenin yüzey gerilimi arttırılır ve parafin içerisine tutunması sağlanır. Grafenin parafin içerisinde çökelmemesi için karışım sıcaklığı 40 ºC'ye soğuyana kadar mikser ile karıştırılır. Ardından oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak parafin-grafen nanoplatelet numunesinin katılaşması sağlanır. Katı numune içerisine açılan deliğe Şekil 4.5'teki termokupl demeti yerleştirilerek süreç tamamlanır.



Şekil 4.9. Parafin-Grafen nanoplatelet hazırlığı

4.4.3. Parafin-Al köpük-Grafen nanoplatelet numune hazırlığı

Grafen nanoplatelet katkılı parafin-Al köpük kompozit numuneleri oluşturulurken Şekil 4.10'da verilen adımlar izlenir. Grafen ergiyik parafin içerisine eklenip karıştırılır. Bu sefer karıştırma işlemi sürfaktan ile birlikte sıcaklık 45 ºC'ye gelene kadar yapılır. Bu adımda parafinin katılaşmaması önemlidir. Ardından Al köpük parafin-grafen nanoplatelet karışımına daldırılır ve sarsıcı ile kap titreştirilerek hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Ardından numuneler oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılır ve açılan deliğe Şekil 4.5'te gösterilen termokupl demeti yerleştirilir.



Şekil 4.10. Parafin-Al köpük-Grafen nanoplatelet hazırlığı

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait sonuçlar ve sonuçlara yönelik açıklamalar bu bölüm kapsamında verilmiştir. Grafiklerde belirtilen sıcaklık değerleri normalize edilerek sunulmuştur. Böylece, deney başlangıçlarındaki sıcaklık farklılıklarının yapılacak karşılaştırmalar üzerindeki etkisi kaldırılmıştır. Normalizasyon için Qu, Wang ve Tao'nun uygulamış oldukları ergime noktasına başlama süresi kavramı esas alınmıştır [31].

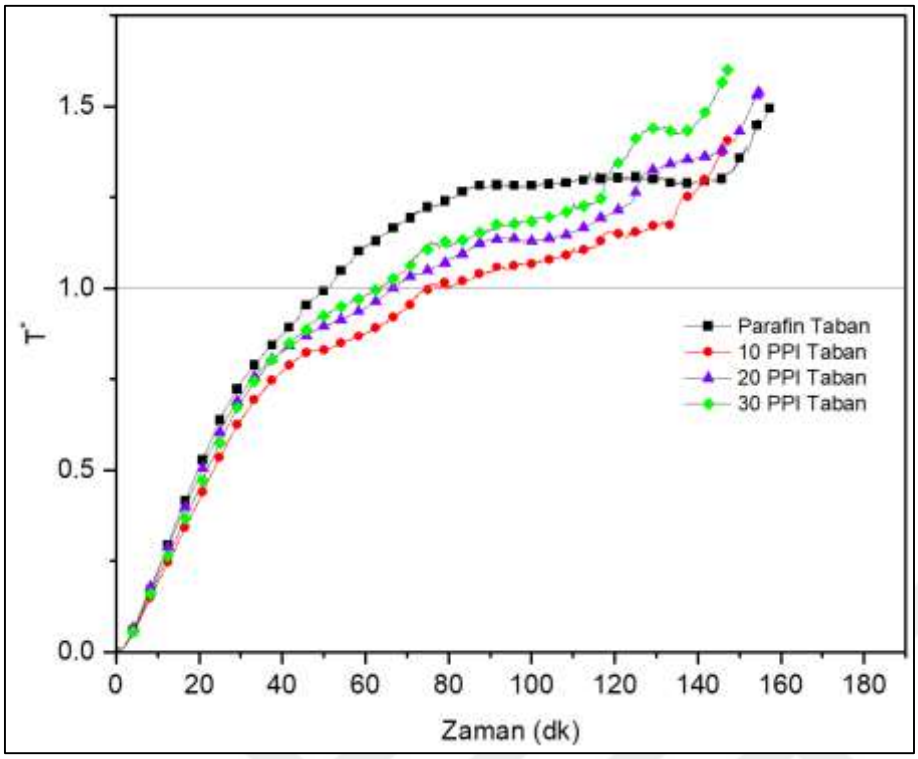
Deneysel ölçümler sonucu elde edilen sıcaklık verileri ise Eş 5.1'de verilen ifadeye göre normalize edilmiştir. Eşitlikte belirtilen T_{erime} değeri kullanılan parafin için 42 ^{o}C'dir.

$$T^* = 1 - \frac{T - T_{erime}}{T_0 - T_{erime}} \tag{5.1}$$

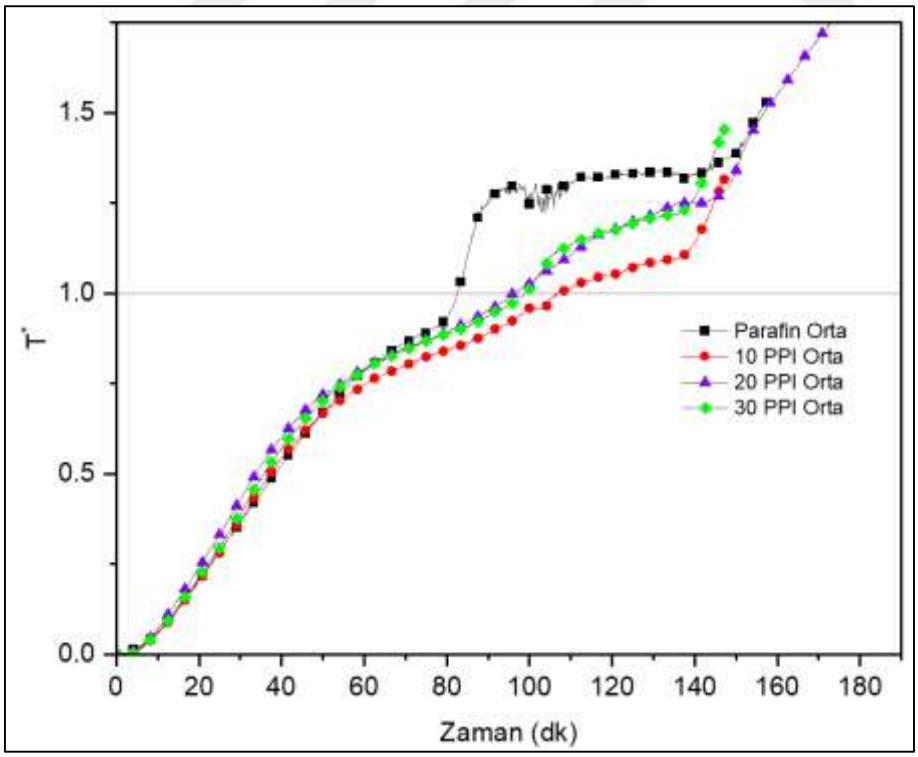
5.1. Parafin-Alüminyum Köpük Kompozitlerin Deneysel Sonuçları

10 PPI, 20 PPI ve 30 PPI gözenek yoğunluklarına sahip Al köpüklerin sadece parafine kıyasla 3W ısı girdisinde Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilen farklı konumlardaki sensörlerden okunan sıcaklık değişimleri Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te belirtilmiştir.

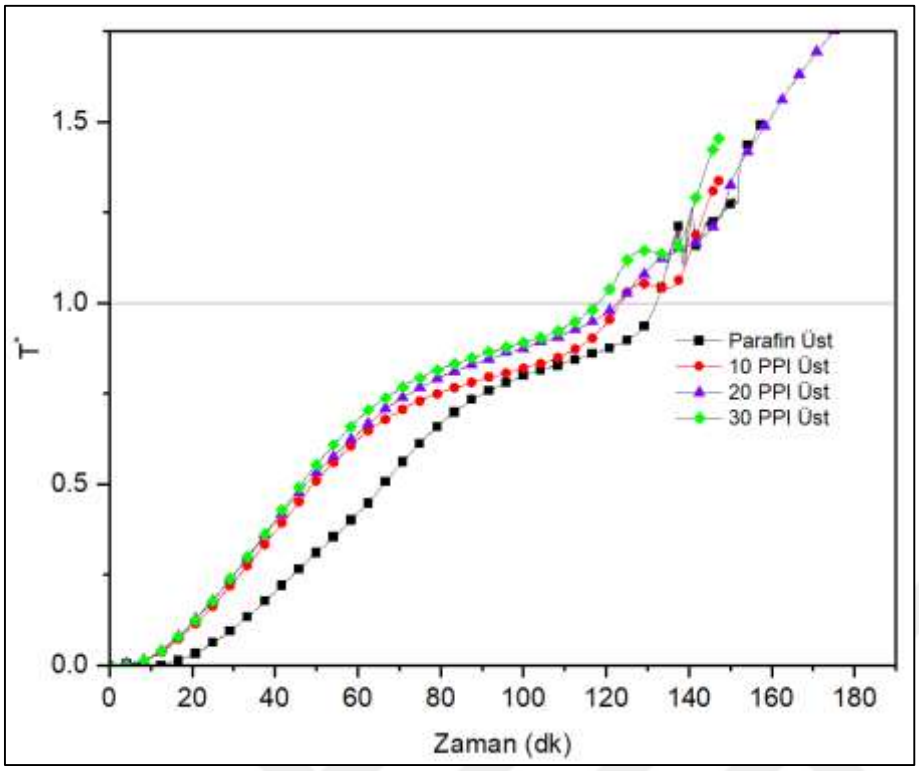
Şekil 5.1'de gösterilen taban konumunda, saf parafin başlangıçta daha hızlı ısınarak daha yüksek T* değerlerine ulaşmaktadır. Ancak ergime ilerledikçe, 10, 20 ve 30 PPI köpük takviyeli örnekler ısının daha dengeli yayılmasını sağlamaktadır. Üst konumunda ise saf parafinin ısınması köpük katkılı numunelere göre daha geç başlamaktadır. Özellikle 10, 20 ve 30 PPI örneklerinde sıcaklık artışı daha hızlıdır ve ergime süreci daha erken tamamlanmaktadır. Burada yüksek PPI değerinin etkisi açıkça görülmekte; 30 PPI köpük, üst bölgeye ısı iletimini hızlandırarak daha yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Ancak en düşük taban sıcaklığının ise 10 PPI köpükle elde edildiği de Şekil 5.1'den seçilebilmektedir.



Şekil 5.1. 3W ısı girdisinde taban konumu sıcaklık değişimi

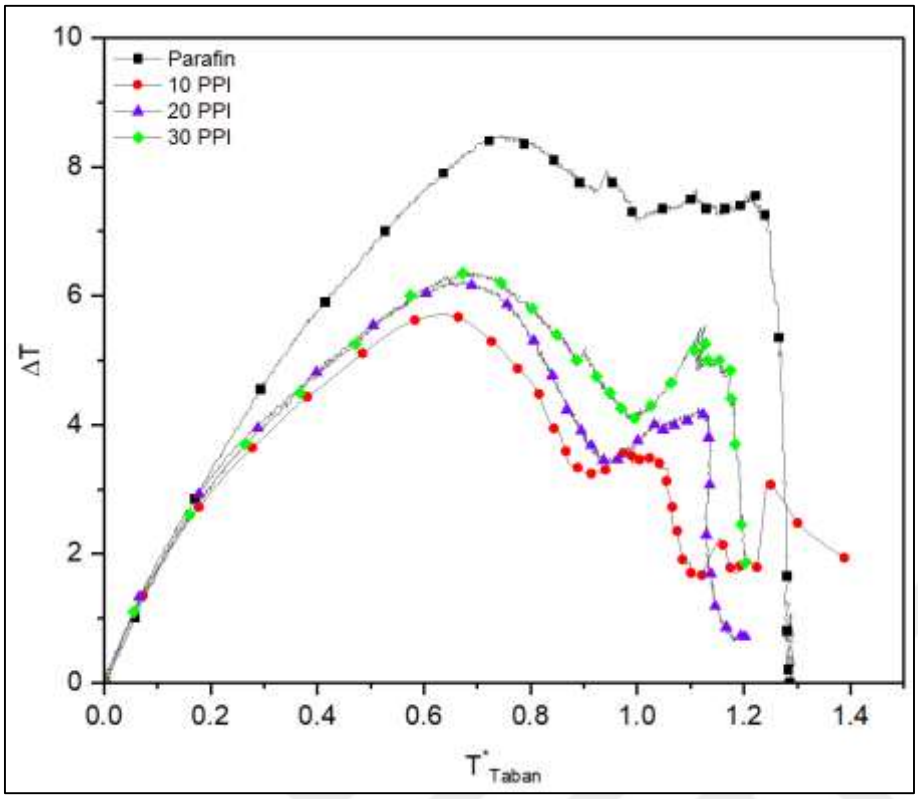


Şekil 5.2. 3W ısı girdisinde orta konumu sıcaklık değişimi



Şekil 5.3. 3W ısı girdisinde üst konumu sıcaklık değişimi

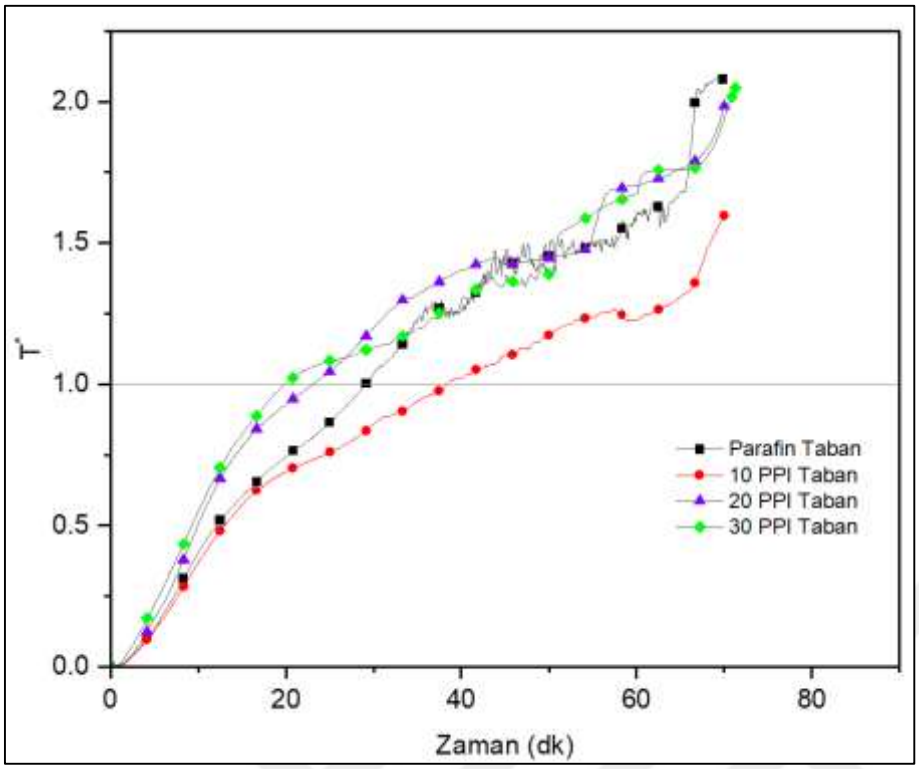
Şekil 5.4'te numunelere 3W ısı girdisi sağlandığında taban ve orta konumdaki sıcaklık farklarının boyutsuz taban sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Grafikte verilen sıcaklıklar ergimenin başladığı zamana kadar (~0.8 T^*_{Taban}) doğrusal olarak artar. Taban kısım ergimeye başladığında sıcaklık farkı ergime tamamlanana kadar (1.0 T^*_{Taban}) kadar azalır. Tabanda ergimenin tamamlanması ile birlikte tekrardan sıcaklık artmaya devam eder ve bütün numune ergimesi ile sıcaklık farkı tekrardan düşer.



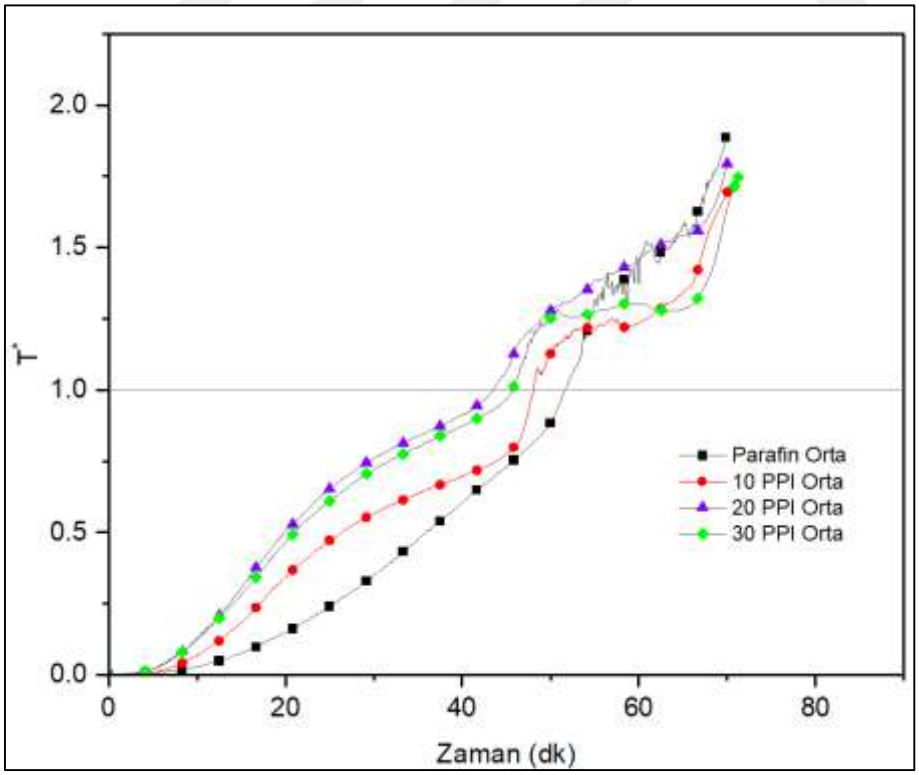
Şekil 5.4. 3W ısı girdisinde sıcaklık farkları

Şekil 5.4 incelendiğinde, saf parafinde taban ve orta sensörler arasındaki sıcaklık farkının oldukça yüksek olduğu ve yaklaşık 8-9 °C'ye ulaştığı görülmektedir; bu durum parafinin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle ergime sürecinde homojen olmayan sıcaklık dağılımına işaret etmektedir. Alüminyum köpük ilavesiyle bu fark belirgin şekilde azalmış, 10 PPI köpükte ΔT değerleri yaklaşık 5-6 °C'ye düşerek en düşük seviyeye ulaşmıştır. 20 ve 30 PPI numunelerde ise ΔT biraz daha yüksek seyretse de saf parafine kıyasla çok daha dengeli bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Dolayısıyla, köpük takviyesi ısıl iletkenliği artırarak düşey yöndeki sıcaklık gradyanını azaltmış, PPI değerinin artışı ise ısı transferini hızlandırmakla birlikte ergime sürecinde bölgesel sıcaklık dalgalanmalarına yol açmıştır. Bu durum literatürde belirtilen sonuçlar ile uyum göstermektedir [38].

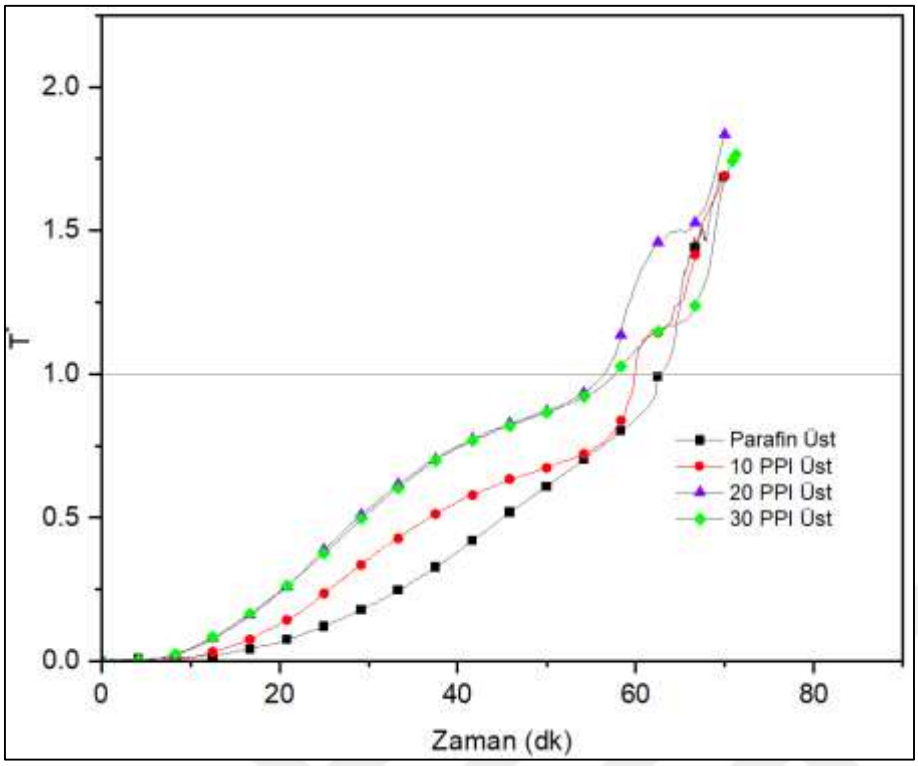
Isı girdisi 5W olacak şekilde arttırıldığında ortaya çıkan sıcaklık-zaman grafikleri ise Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de belirtilmektedir.



Şekil 5.5. 5W ısı girdisinde taban konumu sıcaklık değişimi



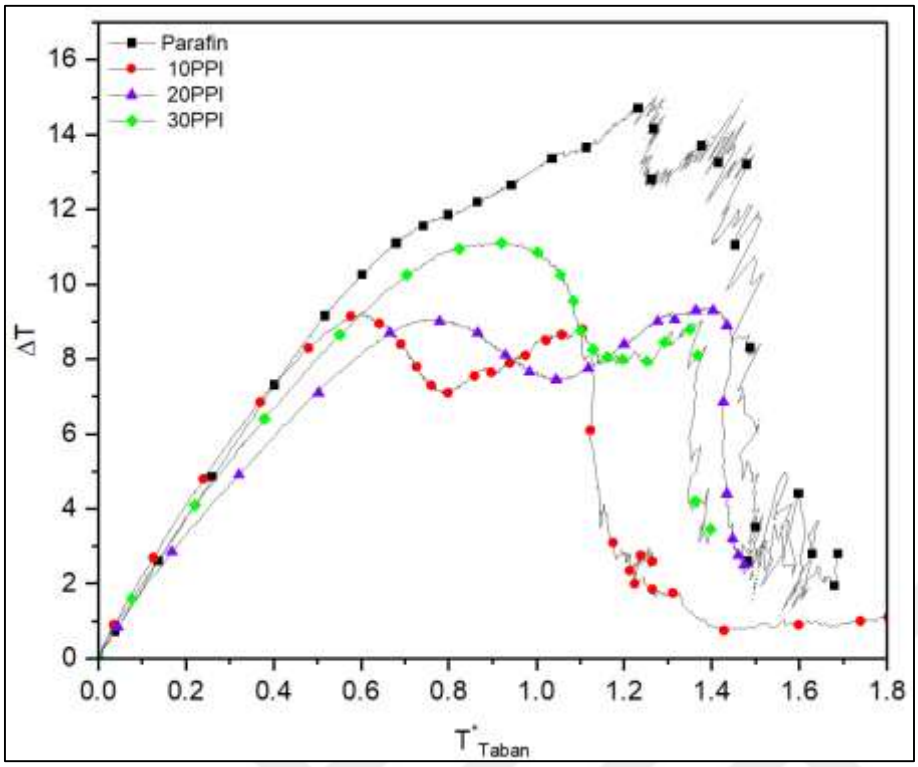
Şekil 5.6. 5W ısı girdisinde orta konumu sıcaklık değişimi



Şekil 5.7. 5W ısı girdisinde üst konumu sıcaklık değişimi

Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de fark edilen en büyük değişiklik ısı girdisinin artması sebebi ile ergime sürecinin daha hızlı gerçekleşmiş olmasıdır. Aynı şekilde, saf parafin tüm konumlarda daha geç tepki verirken, alüminyum köpük katkısı özellikle 20 ve 30 PPI numunelerde ısının hızlı iletilmesi sağlamış ve daha homojen bir dağılım oluşturmuştur; buna karşın 10 PPI köpük daha düşük T^* değerlerinde kalmıştır. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilen grafiklerde ergime fazında plato bölgeleri daha belirgin iken, bu grafiklerde yüksek ısıtma hızının etkisiyle ergime süreci kısalmış ve plato davranışı zayıflamıştır.

Şekil 5.4'te verilen grafiğe benzer olarak Şekil 5.8'te de 5W ısı girdisi için sıcaklık farkı boyutsuz taban sıcaklığına göre gösterilmiştir. Benzer şekilde saf parafinin ΔT değerleri 15 ^oC'ye kadar çıkarak düşük ısıl iletkenlik nedeniyle taban–üst arasında büyük sıcaklık gradyanı oluşturduğu, Al köpük katkılı örneklerde ise ΔT'nin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. 10 PPI köpükte farklar yaklaşık 7 ^oC'ye kadar düşerken, 20 ve 30 PPI köpüklerde ΔT 9-11 ^oC seviyelerinde olup daha sonra hızla düşmektedir. Şekil 5.4 ile benzer şekilde köpük takviyesi ΔT'yi düşürerek sıcaklık dağılımını iyileştirmiştir.

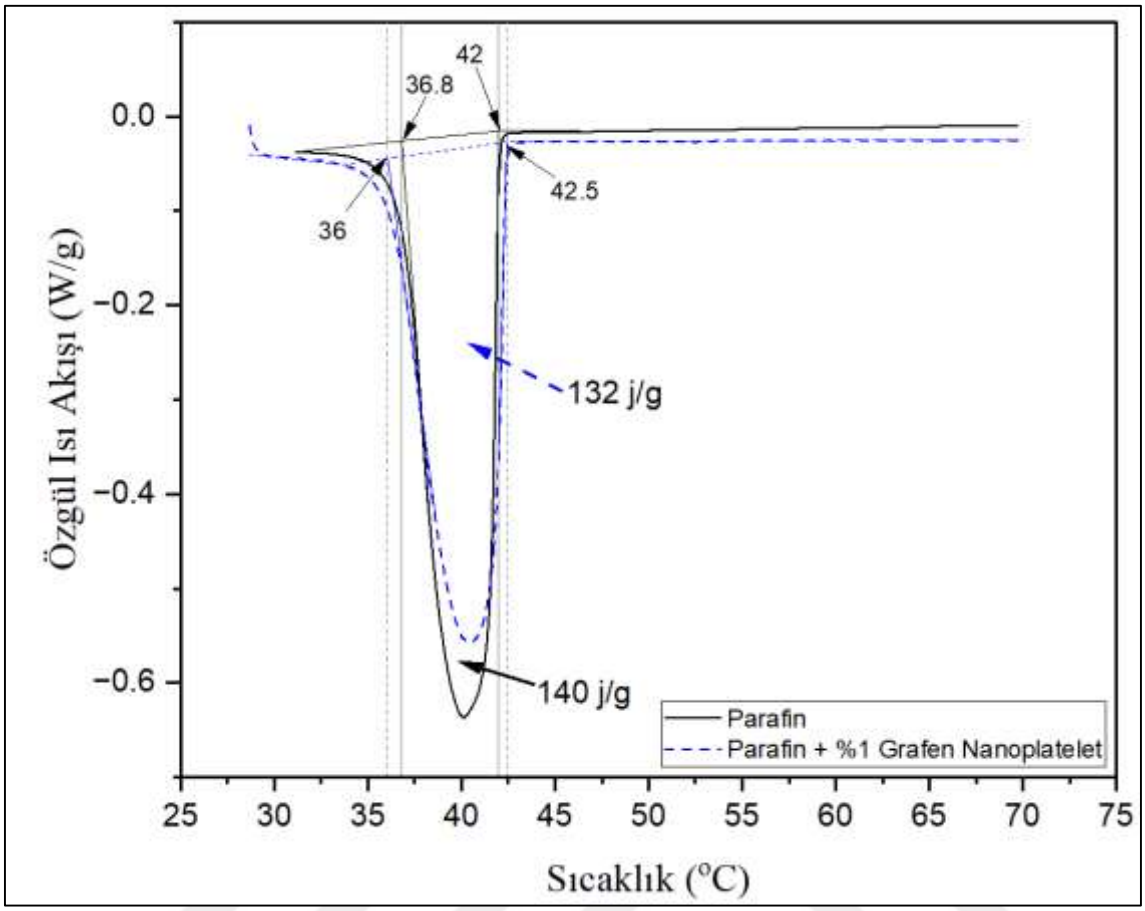


Şekil 5.8. 5W ısı girdisinde sıcaklık farkları

5.2. Parafin-Grafen Nanoplatelet Karışımın Deneysel Sonuçları

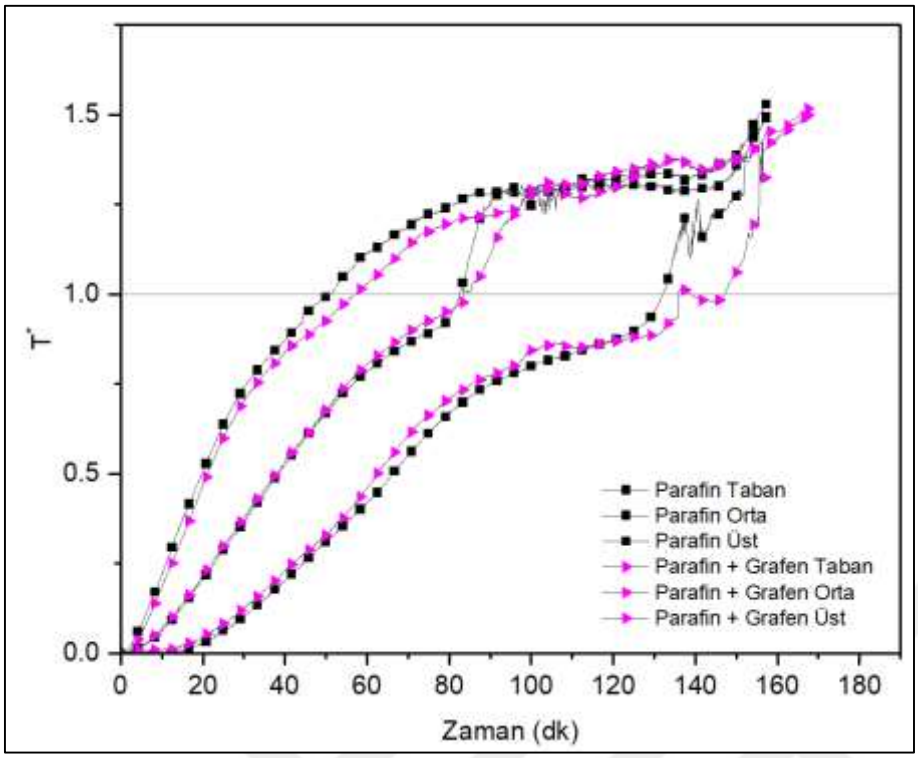
Parafin içerisine grafen nanoplatelet eklendiği zaman elde edilen karışıma ait deneysel çalışma bu başlık altında verilmiştir. Çalışma kapsamında parafine kütlece %1 oranında grafen eklenerek termal iletkenliğindeki değişim araştırılmıştır.

Parafin-grafen nanoplatelet karışımına (PGNK) ait DSC sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.9'da verilmiştir. Grafikten anlaşıldığı üzere saf parafin numunesinde ergime başlangıcı 36,8 °C, bitişi 42°C civarında olup gizli ısı değeri 140 J/g'dir. Grafen nanoplatelet katkılı parafin ise ergimeye daha erken, yaklaşık 36 °C'de başlamakta ve yaklaşık 42 °C civarında tamamlanmaktadır; fakat tepe alanı küçülerek gizli ısı değeri 132 J/g olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, grafen katkısının ergime başlangıcını biraz öne çektiğini, yani faz geçişini daha erken başlattığını; ancak depolanan gizli ısı miktarını azalttığını göstermektedir. Ayrıca katkılı numunede pik daha basık ve geniştir, bu da grafenin parafinin kristallenme düzenini bozarak ergimenin daha yayvan bir sıcaklık aralığına dağılmasına yol açtığını düşündürmektedir. Genel olarak %1 grafen katkısı, saf parafinin ergime sıcaklık aralığını çok değiştirmemiş, fakat enerji depolama kapasitesini bir miktar düşürmüştür.

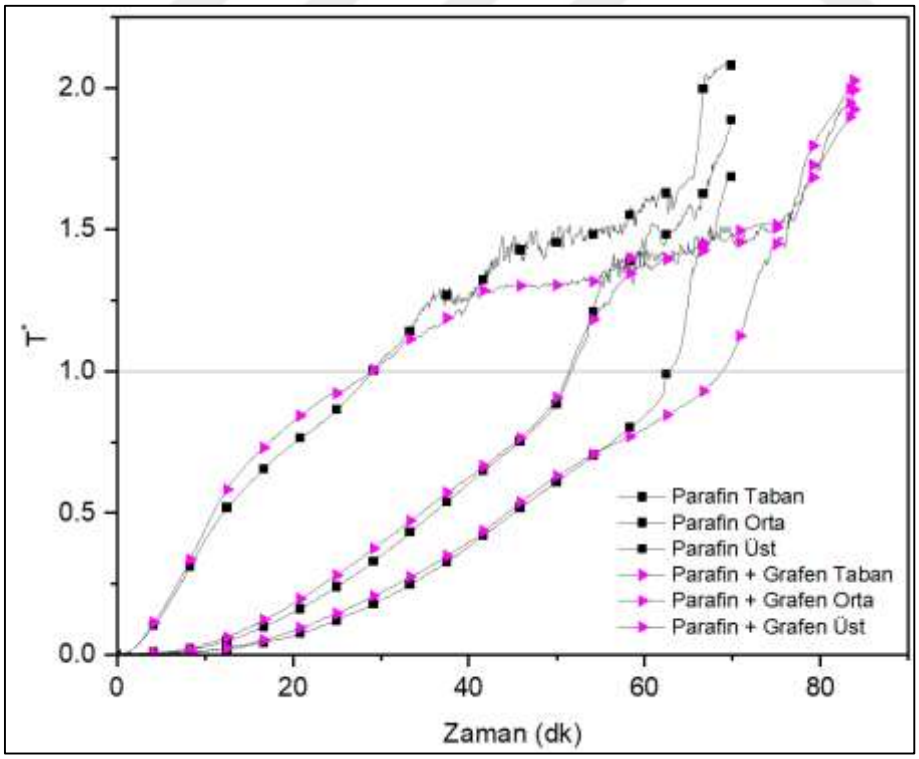


Şekil 5.9. Parafin ve parafin-grafen nanoplatelet DSC grafiği

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de PGNK'nın sıcaklık değişimi sadece parafin ile karşılaştırılmıştır. Düşük ısı girdisinde parafinin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle ölçüm konumları arasında büyük sıcaklık farkları oluşurken, grafen katkısı bu farkı azaltmış ve ergime sürecini hızlandırmıştır. Yüksek ısı girdisinde ise farklar daha da belirginleşmiş, fakat grafen katkısı yine homojen ısı dağılımını sağlayarak üst bölgelerin daha hızlı ergimesine katkıda bulunmuştur. Böylece grafen takviyesinin farklı ısı seviyelerinde de ısı transferini iyileştirdiği görülmüştür.

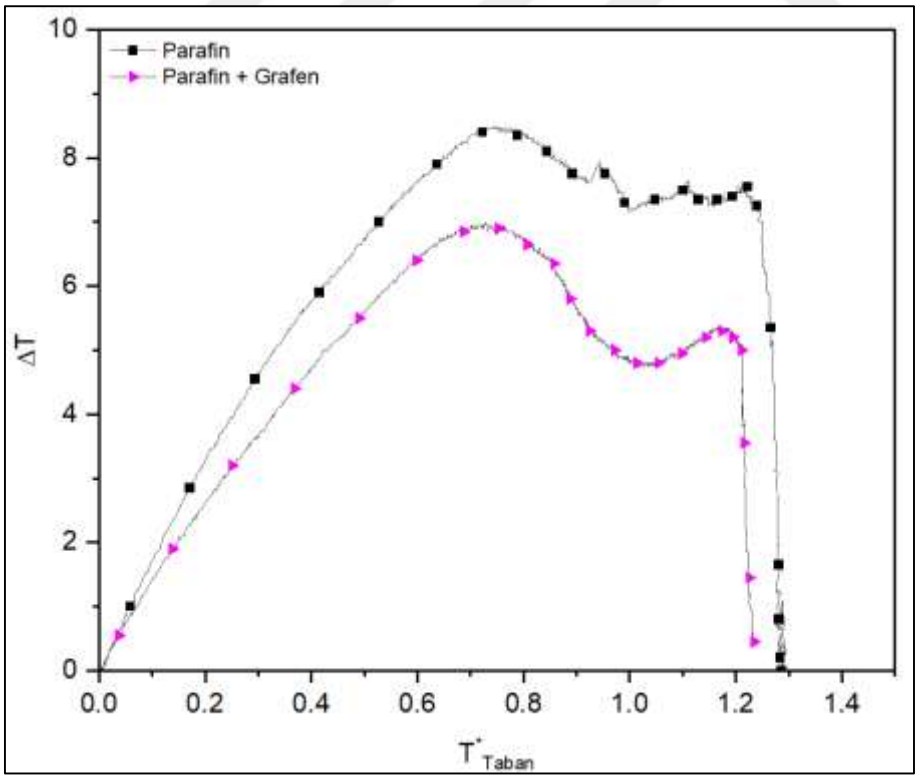


Şekil 5.10. 3W ısı girdisinde sadece parafin ve parafin-grafen nanoplatelet karışımının sıcaklık değişimi

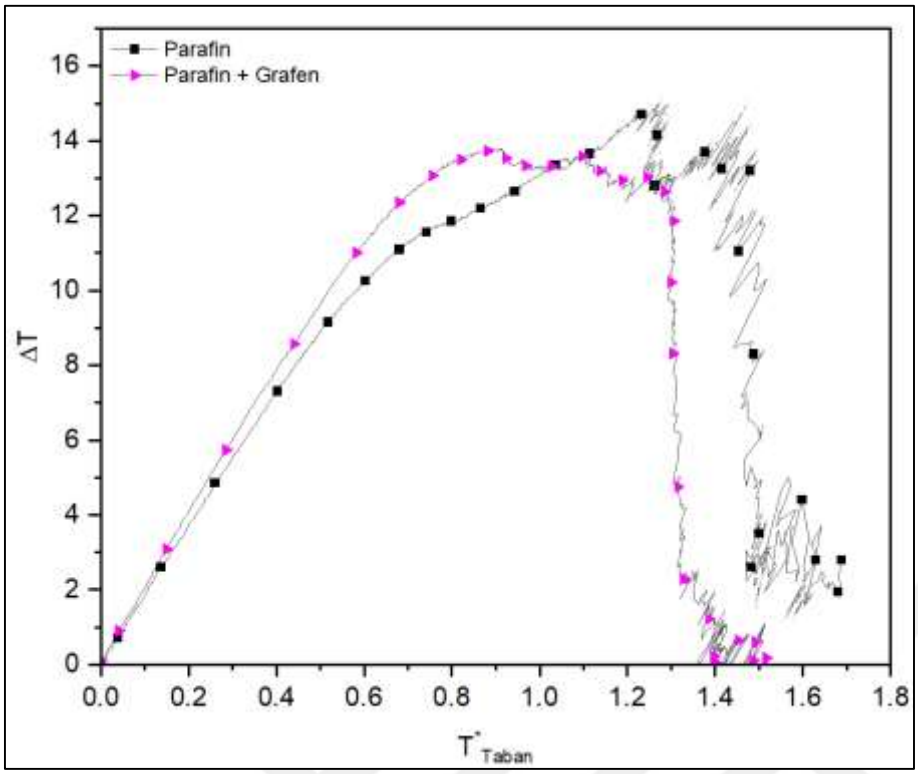


Şekil 5.11 5W ısı girdisinde sadece parafin ve parafin-grafen nanoplatelet karışımının sıcaklık değişimi

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te sadece parafin ve PGNK'nın taban ve orta konumlardaki sıcaklık farkları boyutsuz taban sıcaklığına göre gösterilmiştir. Düşük ısı girdisinde her iki malzeme de benzer davranış sergilese de grafen katkısı ısı iletimini hızlandırdığı için taban–orta arasındaki sıcaklık farkı saf parafine göre belirgin biçimde daha düşük seyretmiştir. Yüksek ısıda ise ergime süreci daha dinamik hale gelmiş, özellikle saf parafinde tabanda hızlı ısınmaya bağlı olarak erken ergime başlamış ve yoğunluk farklarından doğan doğal taşınım hücreleri güçlü biçimde devreye girmiştir. Bu taşınım, orta bölgeye ısının daha hızlı taşınmasına neden olarak belirli bir T^*_{Taban} aralığında saf parafinde grafen katkılı örneğe kıyasla daha düşük ΔT değerleri gözlenmesine yol açmıştır. Ayrıca, saf parafinin gizli ısısının (140 J/g) grafen katkılı parafine (132 J/g) göre daha yüksek olması nedeniyle faz geçişi süresince tabanda sıcaklık yükselişi gecikmiş, bu da taban–orta farkını geçici olarak küçültmüştür. Dolayısıyla, 5 W koşulunda görülen bu tersine eğilim aslında doğal taşınımın ani güçlenmesi ve ergime gizli ısısındaki farkların birleşik etkisinden kaynaklanmaktadır; genel eğilimde ise grafen katkısı ısı iletimini artırarak daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağlamaktadır.



Şekil 5.12. 3W ısı girdisinde sadece parafin ve PGNK'nın sıcaklık farkları



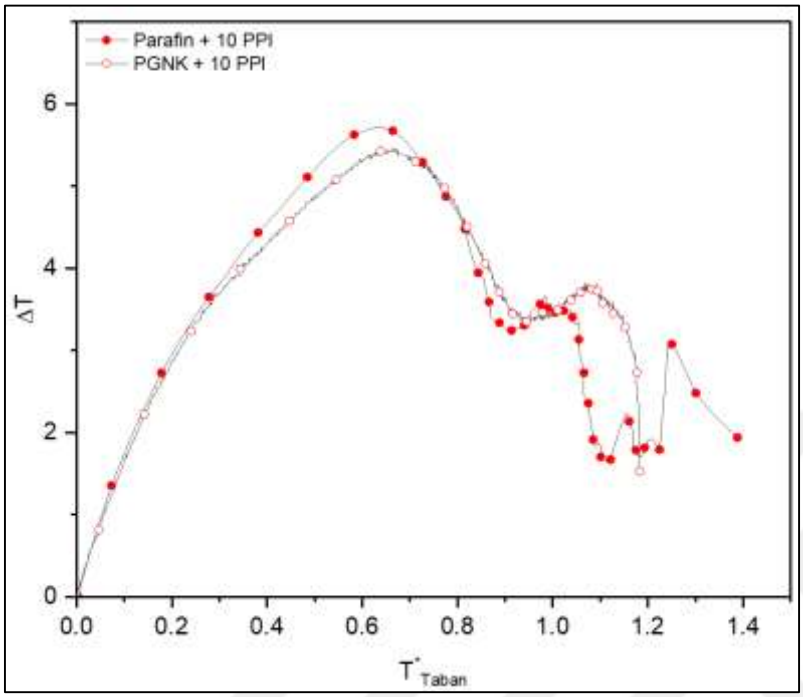
Şekil 5.13. 5W ısı girdisinde sadece parafin ve PGNK'nın sıcaklık farkları

5.3. PGNK – Al Köpük Kompozitlerin Deneysel Sonuçları

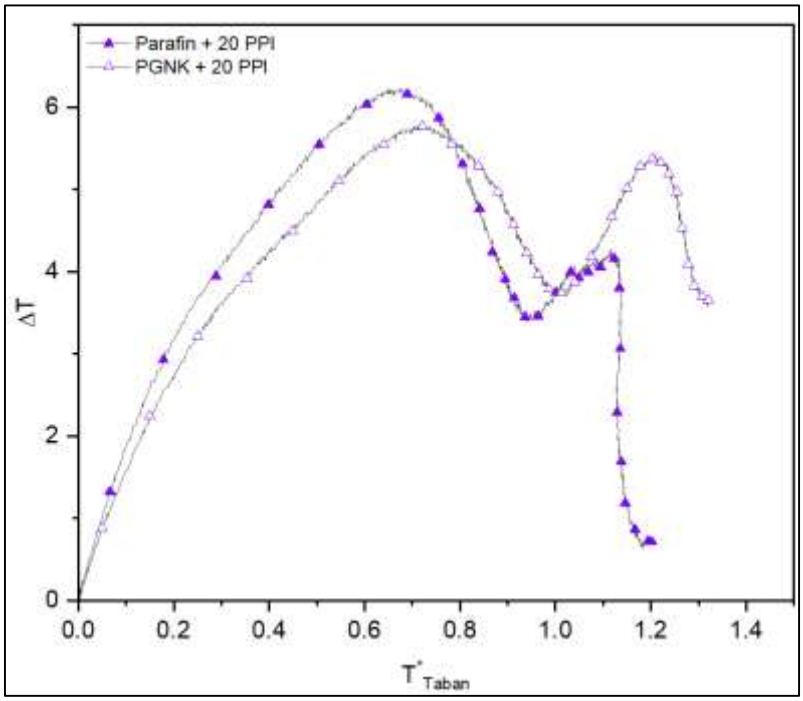
Al köpük ve grafen nanoplateletin parafin üzerindeki termal etkisi önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu bölüm içerisinde sadece parafin-Al köpük kompozitler ile PGNK-Al köpük kompozitlerin arasındaki farklar tartışılacaktır.

Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da PGNK-Al köpük kompozitlerin sıcaklık farkları sadece parafin-Al köpük kompozitler ile kıyaslanmıştır. Grafikler incelendiğinde, tüm PPI değerlerinde PGNK kompozitlerin saf parafine göre daha düşük sıcaklık farkı sergilediği görülmektedir. Bu durum, grafen nanoplateletlerin ısıl iletkenliğini artırarak taban ve orta bölgeler arasındaki sıcaklık gradyanını azalttığını ve ısı dağılımını daha homojen hale getirdiğini göstermektedir. 10 PPI köpükte katkının etkisi sınırlı kalırken, 20 ve 30 PPI köpüklerde fark daha belirginleşmiş ve PGNK numuneleri saf parafine kıyasla belirgin şekilde daha düşük ΔT değerleri vermiştir. Ayrıca ergime sürecinde saf parafinde görülen keskin sıcaklık farkının dalgalanmaları PGNK numunelerinde daha yumuşak ilerlemiş, bu da katkının doğal taşınımın ani etkilerini baskılayarak daha dengeli bir faz geçişi sağladığını ortaya koymuştur. Genel olarak grafen nanoplatelet takviyesi, özellikle yüksek PPI

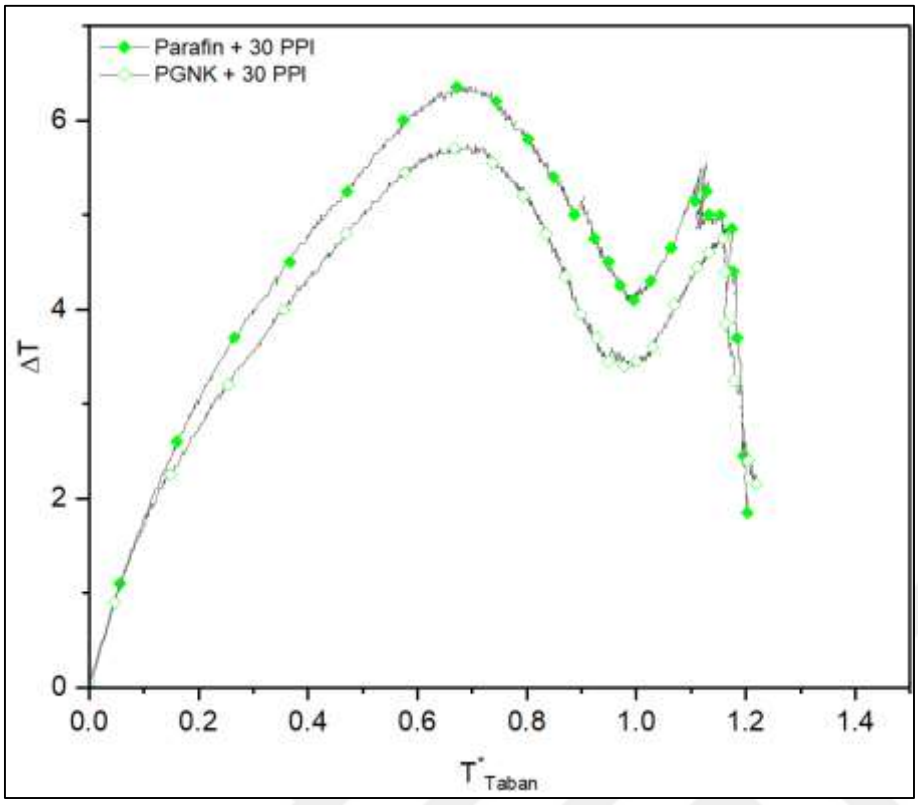
köpüklerle birlikte kullanıldığında, ısıl performansı iyileştirerek daha hızlı ve homojen ergime davranışı sağlamaktadır.



Şekil 5.14. 3W ısı girdisinde parafin-10 PPI Al köpük ve PGNK-10 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları

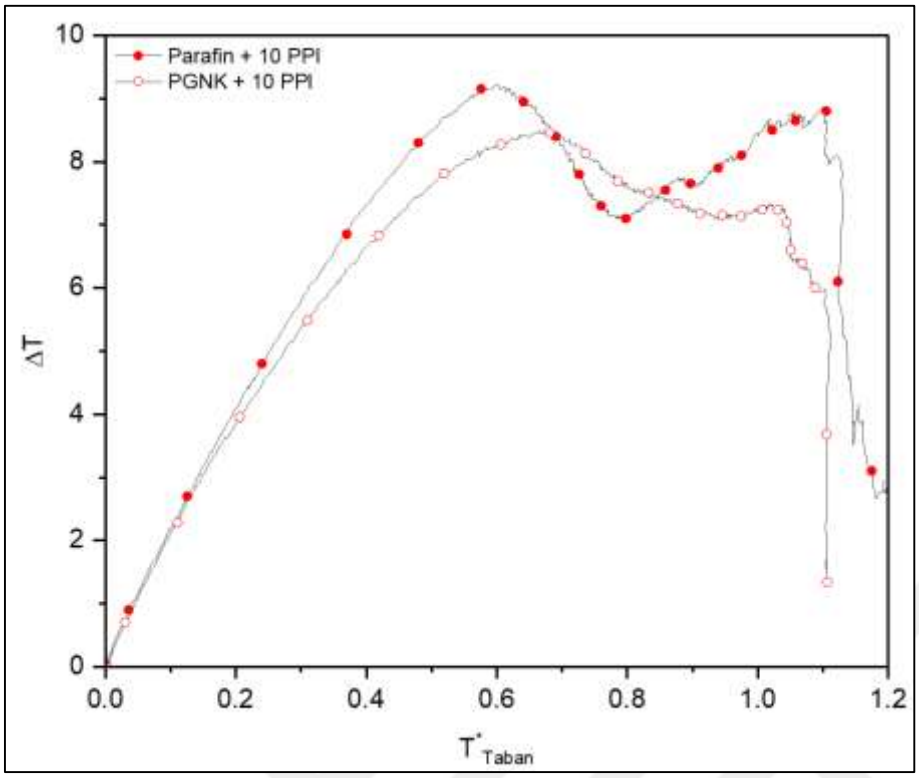


Şekil 5.15. 3W ısı girdisinde parafin-20 PPI Al köpük ve PGNK-20 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları

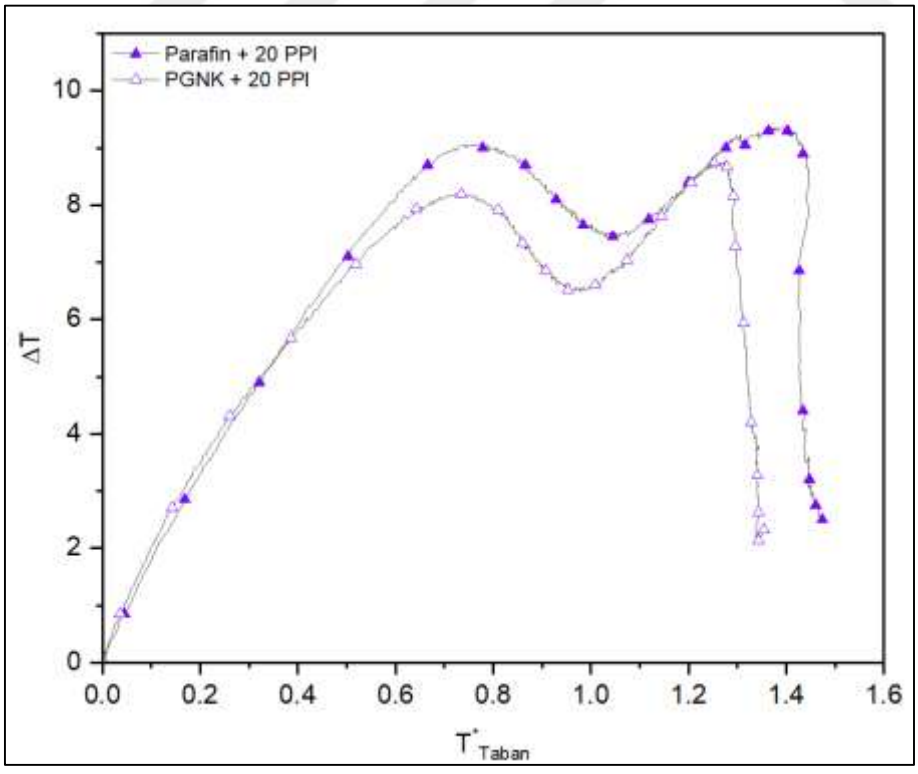


Şekil 5.16. 3W ısı girdisinde parafin-30 PPI Al köpük ve PGNK-30 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları

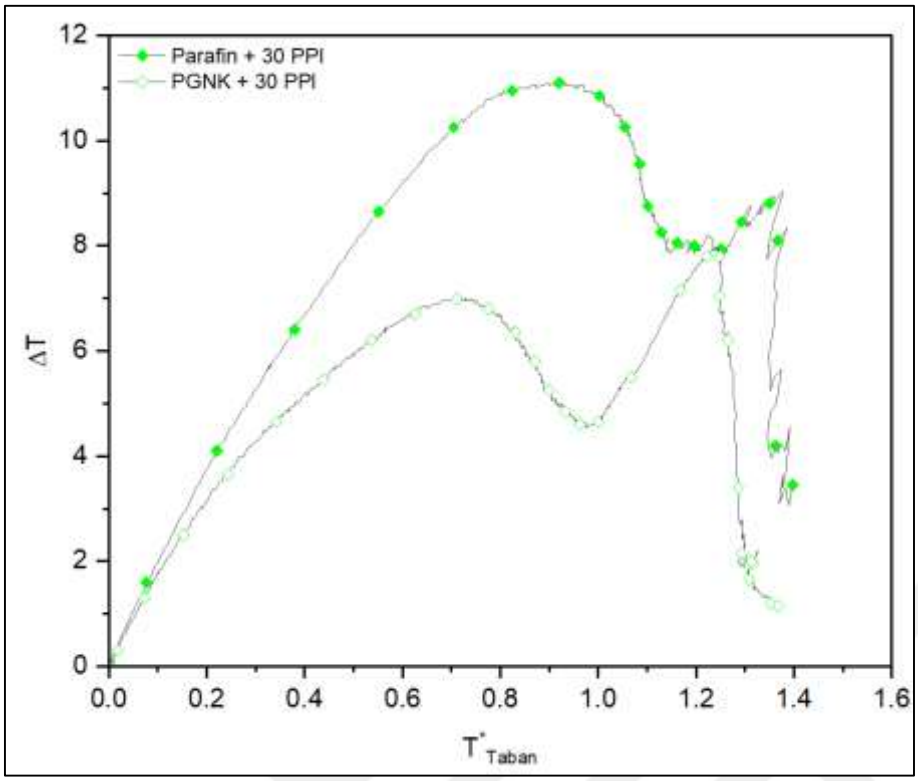
Isı girdisinin 5W'a çıkarıldığı durumda yapılan deneysel sonuçlara ait sıcaklık farkı grafikleri Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmiştir. Isı girdisinin artması ile sıcaklık farkları belirgin biçimde artmış ve maksimum ΔT seviyeleri yükselmiştir. Bu durum, daha yüksek ısı girdisinin tabanda hızlı ısınmaya ve üst kısımlara geç ısı aktarımına neden olarak sıcaklık farkını artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte PGNK katkısı her PPI değerinde saf parafine göre ΔT'yi düşürmüş, özellikle 20 ve 30 PPI köpüklerde bu etki daha güçlü şekilde ortaya çıkmıştır. Ayrıca, gözenek yoğunluğunun artması ile sıcaklık farkının kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.17. 5W ısı girdisinde parafin-10 PPI Al köpük ve PGNK-10 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları



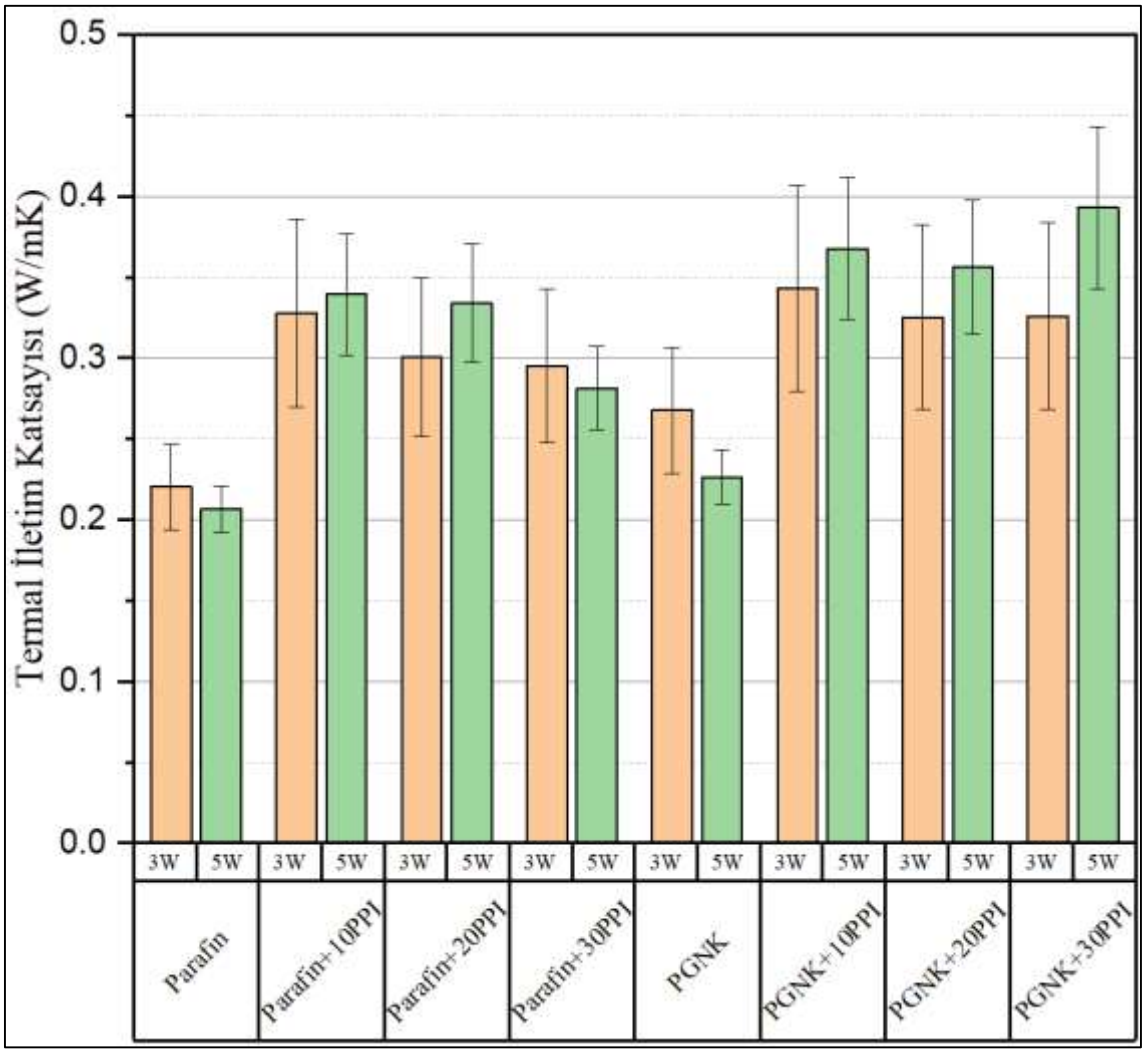
Şekil 5.18. 5W ısı girdisinde parafin-20 PPI Al köpük ve PGNK-20 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları



Şekil 5.19. 5W ısı girdisinde parafin-30 PPI Al köpük ve PGNK-30 PPI Al köpük kompozitlerinin sıcaklık farkları

5.4. Termal İletkenliklerin karşılaştırılması

Sadece parafin, parafin-Al köpük ve PGNK-Al köpük kompozitlerine ait termal iletkenlik değerleri Şekil 5.20'de verilmiştir. Öncelikle saf parafinin en düşük iletkenliğe sahip olduğu (0.21 W/mK) açıkça görülmektedir. Parafin+10 PPI köpük yapısında termal iletkenlik yaklaşık 0.32–0.33 W/mK seviyesine çıkmakta, 20 PPI köpükte bu değer benzer veya hafifçe yüksek (0.33–0.34 W/mK), 30 PPI köpükte ise 0.28–0.30 W/mK civarında seyretmektedir. Burada 10 ve 20 PPI köpüklerin katkısı belirgin olurken, 30 PPI'da değer bir miktar düşmüş; bu durum yüksek PPI'da porozite artışıyla birlikte doğal taşınımın baskılanması ile açıklanabilir.



Şekil 5.20. Termal iletim katsayılarının karşılaştırması

PGNK katkısı tek başına parafine kıyasla iletkenliği artırsa da (0.26 W/mK), asıl fark köpükle birleştirildiğinde ortaya çıkmaktadır. PGNK+10 PPI köpük yapısında iletkenlik 0.36 W/mK'ye, 20 PPI'da 0.37–0.38 W/mK'ye, 30 PPI'da ise 0.39 W/mK'ye kadar çıkmıştır. Yani PGNK ile birlikte köpüklerin etkisi daha düzenli artış göstermiştir. Bu durum, grafen nanoplateletlerin köpük iskeletiyle birlikte ısı iletim yollarını güçlendirdiğini göstermektedir. Isı girdisinin 3 W'tan 5 W'a çıkarılması her yapıda termal iletim katsayısını hafifçe yükseltmiş, ancak PPI etkisi özellikle PGNK katkılı sistemlerde daha belirgin olmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, FDM olarak kullanılan parafinin termal karakterizasyonu gerçekleştirilmiş; termal iletkenlik probleminin iyileştirilmesi amacıyla alüminyum köpük yapılar ve grafen nanoplatelet katkılarının etkisi incelenmiştir. Çalışmada hem tek başına parafinin hem de farklı PPI değerlerine sahip metal köpükler ile birleştirilmiş kompozitlerin, ayrıca grafen nanoplatelet katkılı karışımların deneysel sonuçları ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Saf parafinin ergime sıcaklığı, entalpi değerleri ve termal iletkenliği literatürle uyumlu bulunmuş; düşük ısıl iletkenlik nedeniyle ergime ve katılaşma süreçlerinde belirgin zaman gecikmeleri gözlemlenmiştir.
- Açık gözenekli alüminyum köpüklerle oluşturulan kompozitler, saf parafine kıyasla çok daha hızlı ısı transferi sağlamıştır. PPI değerinin azalması ile birlikte sıcaklık dağılımı daha homojen hale gelmiştir. Ancak yüksek PPI değerlerinde gözeneklerin küçülmesi, FDM tutma kapasitesini sınırlamıştır
- Parafine eklenen grafen nanoplateletler, düşük ısı girdilerinde termal iletkenliği anlamlı şekilde iyileştirmiştir. Grafen katkısı, özellikle başlangıç ısınma evresinde ısı akışını kolaylaştırarak ergime süresini azaltmıştır.
- Parafin, alüminyum köpük ve grafen nanoplateletlerin birlikte kullanılmasıyla hibrit kompozitler elde edilmiştir. Bu yapılar, hem metal köpüğün sağladığı ısıl iletkenlik artışını hem de grafenin yüzey etkilerini bir araya getirerek en yüksek performansı göstermiştir. Hibrit kompozitlerde sıcaklık farkı daha düşük, ergime süresi daha kısa ve faz değişim süreci daha dengeli olmuştur. Gözenek yoğunluğunun artması ile termal iletkenliğin iyileştiği görülmüştür.
- Çalışmada 3 W ve 5 W gibi farklı ısı girdileri incelenmiştir. Isı girdisinin artışıyla birlikte, tüm sistemlerde ergime süresinin kısaldığı gözlenmiş; ancak bu etkinin en belirgin olduğu durum hibrit kompozitler olmuştur. Yüksek ısı girdisi altında saf parafinin performansı sınırlı kalırken, metal köpük ve grafen katkılı yapılar ısı girdisini etkin biçimde iletebilmiştir.
- PPI değeri azaldıkça sıcaklık farkının azaldığı, ergime süresinin kısaldığı ve sistemin termal yanıt hızının arttığı belirlenmiştir. PGNK+Al köpük yapılarında bu etki daha da

kuvvetlenmiş; yüksek PPI değerlerinde bile saf parafine kıyasla ciddi performans kazanımları sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmanın daha ileri bir seviyeye ulaşması ve FDM termal iletkenliğini arttıracak farklı etmenlerin belirlenmesi için aşağıdaki araştırmaların yapılması önerilmektedir:

- Grafen nanoplateletlere ek olarak, karbon nanotüp, bor nitrür veya metal oksit nanopartiküllerinin de parafin-metal köpük sistemlerine eklenmesi ile farklı katkı türlerinin etkileri ortaya konabilir.
- Bakır ve Nikel köpükler ile parafin kompozitler oluşturularak farklı köpük malzemelerin termal iletkenlik üzerine etkileri incelenebilir.
- Deneysel verilerin desteklenmesi amacıyla nümerik çalışmalarda kullanılan entalpi-porozite yöntemi PGNK+köpük kompozitleri için geliştirilmelidir. Böylece farklı geometri, PPI ve katkı oranları simülasyon ortamında test edilerek deney maliyetleri azaltılabilir.
- Farklı gözenek yoğunluğu ile birlikte farklı porozite değerleri de incelenmelidir. Böylece gözenek büyüklüğü ile birlikte boşluk miktarının etkileri birlikte araştırılabilir.
- Faz değiştiren malzemelerin ticari uygulamalardaki en önemli kriterlerinden biri çevrimsel kararlılıktır. Bu nedenle, ileri çalışmalarda yüksek sayısal ergime/donma döngüsünde kompozitlerin performansı test edilerek yapısal bozulma, entalpi kaybı ve termal iletkenlik değişimleri analiz edilmelidir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması faz değiştiren malzemelerin ısıl performansını artırmak için metal köpük ve grafen nanoplatelet katkılarının ayrı ayrı ve birlikte kullanıldığında ortaya çıkan etkileri kapsamlı biçimde ortaya koymuştur. Saf parafine kıyasla, metal köpük ve PGNK katkılı kompozitler hem daha yüksek ısı iletim katsayısı hem de daha hızlı faz değişim süresi sunarak enerji depolama sistemlerinde önemli avantajlar sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Aravindhan, M., Ayyasamy, R. (2016). Experimental investigation on phase change material. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, 4(6),57-83.

2. Sharma, A., 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.

3. Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., Liu, H. (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy.* 220, 242-273.

4. Zhao, L., Xing, Y., Wang, Z., Liu, X. (2017). The passive thermal management system for electronic device using low-melting-point alloy as phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 125, 317–327.

5. Fixler, S.Z. (1966). Satellite thermal control using phase-change materials. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 3(9), 1362–1368.

6. Grodzka, P.G. (19 Ocak 1970). *Thermal control of spacecraft by using solid-liquid phase-change materials*. Proceedings of The AIAA 8th Aerospace Sciences Meeting, Berlin. 176-181.

7. Agwu, D.D., Opara, F., Dike, D., Daberechi, A.D., Opara, D.D. (9 Mart 2017). *Review of comparative battery energy storage systems (BESS) for energy storage applications in tropical environments.* Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development, Nigeria. 1000-1005.

8. Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., Rahman, S. M. A. (2019). Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. *Energies*, 12(16), 3167.

9. Chen, Z., Gao, D., Shi, J. (2014). Experimental and numerical study on melting of phase change materials in metal foams at pore scale. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 646–655.

10. Lamotte-Dawaghreh, J., Herring, J., Bhandari, R., Lakshminarayana, A., Suthar, R., Bansode, P., Agonafer, D., Ramos, N., Teufel, N., Silvers, T., Wilson, M., Eifert, D., Martorana, D. (2024). Characterization and modeling of density as a function of temperature for paraffin wax phase change materials. *Heat Transfer Research*, 55(5), 59–79.

11. Erkal, Z. (2011). *Experimental Investigation of Phase Change Materials Used in Prototype Military Shelters*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 189.

12. Bacak, Y., Khanlari, A., Tuncer, A. D., Sözen, A., Variyenli, H. İ., Vafai, K. (2025). A Comprehensive Numerical and Experimental Study on Improving the Thermal Performance of a Shell and Helically Coiled Heat Exchanger Utilizing Hybrid Magnetic Nanofluids and Porous Spiral-Type Fins. *Fluids*, 10(6), 141.

13. Tuncer, D., Khanlari, A., Sözen, A., Gürbüz, E. Y., Variyenli, H. İ. (2023). Upgrading the performance of shell and helically coiled heat exchangers with new flow path by using TiO2/water and CuO–TiO2/water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 183, 107831.

14. Kumar, K., Sharma, K., Verma, S., Upadhyay, N. (2019). Experimental Investigation of Graphene-Paraffin Wax Nanocomposites for Thermal Energy Storage. *Materials Today: Proceedings*, 18(7), 5158–5163.

15. Kim, S., Drzal, L. T. (2009). High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), 136–142.

16. Temel, U. N., Somek, K., Parlak, M., Yapıcı, K. (2018). Transient thermal response of phase change material embedded with graphene nanoplatelets in an energy storage unit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(2), 907–918.

17. Li, M. (2013). A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity, *Applied Energy*, 106, 25–30.

18. Mills, A., Farid, M., Selman, J. R., Al-Hallaj, S. (2006). Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1652–1661.

19. Temel, U. N., Kurtuluş, S., Parlak, M., Yapıcı, K. (2018). Size-dependent thermal properties of multi-walled carbon nanotubes embedded in phase change materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132(1), 631–641.

20. Parlak, M., Temel, U. N., Kurtuluş, S., Yapıcı, K. (3 Haziran 2016). *Thermal property investigation of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) embedded phase change materials (PCMs).* Proceedings of the 15th IEEE ITHERM Conference, Las Vegas. 1087.

21. Teng, T.-P., Yu, C.-C. (2012). The effect on heating rate for phase change materials containing MWCNTs. *International Journal of Chemical Engineering and Applications,* 3, 340–342.

22. Yu, Z.-T., Fang, X., Fan, L.-W., Wang, X., Xiao, Y.-Q., Zeng, Y., Xu, X., Hu, Y.-C., Cen, K.-F. (2013). Increased thermal conductivity of liquid paraffin-based suspensions in the presence of carbon nano-additives of various sizes and shapes. *Carbon*, 53, 277–285.

23. Lokesh, S., Murugan, P., Sathishkumar, A., Kumaresan, V., Velraj, R. (2017). Melting/solidification characteristics of paraffin-based nanocomposite for thermal energy storage applications. *Thermal Science*, 21(6A), 2517–2524.

24. Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., Hu, Y. (2018). Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCMs) using graphene and carbon nanotubes as additives for potential application in lithium-ion power batteries. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 33–41.

25. Babapoor, A., Azizi, M., Karimi, G. (2015). Thermal management of a Li-ion battery using carbon fiber–PCM composites. *Applied Thermal Engineering*, 82, 281–290.

26. Karaipekli, A., Biçer, A., Sarı, A.,Tyagi, V.V. (2017). Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes. *Energy Conversion and Management*, 134, 373–381.

27. Moon, H., Miljkovic, N., King, W. P. (2020). High power density thermal energy storage using additively manufactured heat exchangers and phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153

28. Hatakenaka, R., Sugita, H., Kinjo, T., Saitoh, M., Yamamoto, T. (16 Temmuz 2017). *Heat-transfer characteristics of a light-weight, fin-integrated PCM unit manufactured by additive manufacturing.* The 47th International Conference on Environmental Systems was held in South, Carolina. 978-983.

29. Righetti, G., Savio, G., Meneghello, R., Doretti, L., Mancin, S. (2020). Experimental study of phase change material (PCM) embedded in 3D periodic structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Thermal Sciences*. 153,106376.

30. Zheng, H., Wang, C., Liu, Q., Tian, Z., Fan, X. (2018). Thermal performance of copper foam/paraffin composite phase change material. *Energy Conversion and Management*, 157, 372–381.

31. Qu, Z. G., Li, W. Q., Wang, J. L., Tao, W. Q. (2012). Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(10), 1546–1549.

32. Rehman, T., Ali, H. M. (2020). Experimental study on the thermal behavior of RT-35HC paraffin within copper and iron–nickel open-cell foams: Energy storage for thermal management of electronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

33. Li, W. Q., Qu, Z. G., He, Y. L., Tao, W. Q. (2012). Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin. *Applied Thermal Engineering*, 37, 1–9.

34. Mancin, S., Diani, A., Doretti, L., Hooman, K., Rossetto, L. (2015). Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams. *International Journal of Thermal Sciences*, 90, 79–89.

35. Yang, J., Yang, L., Xu, C., Du, X. (2016). Experimental study on enhancement of thermal energy storage with phase-change material. *Applied Energy*, 169, 164–176.

36. Xiao, X., Zhang, P., Li, M. (2014). Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 81(1), 94–105.

37. Lafdi, K., Mesalhy, O., Shaikh, S. (2007). Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials. *Journal of Applied Physics*, 102(8).

38. Zhao, C. Y., Lu, W., Tian, Y. (2010). Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs). *Solar Energy*, 84(8), 1402–1412.

39. Marri, G. K., Balaji, C. (2021). Experimental and numerical investigations on the effect of porosity and PPI gradients of metal foams on the thermal performance of a composite phase change material heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 164,120454.

40. Xiao, X., Zhang, P., Li, M. (2013). Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material. *Applied Energy*, 112, 1357–1366.

41. Jiang, J., Zhu, Y., Ma, A., Yang, D., Lu, F., Chen, J., Shi, J., Song, D. (2012). Preparation and performances of bulk porous Al foams impregnated with phase-change materials for thermal storage. *Progress in Natural Science: Materials International*, 22(5), 440–444.

42. İnternet: Unlocking material insights through differential scanning calorimetry (DSC) analysis. URL-1: https://www.intertek.com. Son Erişim Tarihi: 11.09.2025.

43. İnternet: DSC family—A beginner's guide. URL-2: https://www.scribd.com/document/246811365/DSC-Beginners-Guide. Son Erişim Tarihi: 17.09.2025.

44. İnternet: Interpreting DSC curves Part 1: Dynamic measurements. URL-3: https://www.mt.com. Son Erişim Tarihi: 18.09.2025.

45. JHuang, J., Lu, S., Kong, X., Liu, S., Li, Y. (2013). Form-stable phase change materials based on eutectic mixture of tetradecanol and fatty acids for building energy storage: Preparation and performance analysis. *Materials*, 6(10), 4758–4775.

46. Huang, X., Lin, Y., Alva, G., Fang, G. (2017). Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials using myristyl alcohol/metal foam for solar thermal storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 170, 68–76.

47. Zhao, C. Y. (2012). Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13–14), 3618–3632.

48. Chen, X., Xia, X. L., Wang, F. Q., Sun, C., Liu, R. Q. (21-24 Temmuz 2019). *Analysis of a latent heat thermal energy storage unit with metal foam insert in both the HTF and PCM sides.* Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Macao, 354.

49. Arumugam, B., Buonomo, B., Nardini, S., Plomitallo, R. E., Manca, O. (19 Haziran 2025). *Numerical investigation on geometrical parameter effects of metal foams in liquid cooling efficiency of battery thermal management within phase change materials.* 41st UIT International Heat Transfer Conference, Napoli, 2940.

50. Siddiqui, M. O. R., Sun, D. (2015). Computational analysis of effective thermal conductivity of microencapsulated phase change material coated composite fabrics. *Journal of Composite Materials*, 49(19), 2337–2348.

51. Bian, Z., Hou, F., Chen, J., Wang, H. (2024). Numerical analysis on the effect of graded porosity in closed-cell metal foams/PCM composites. *Case Studies in Thermal Engineering*. 55,104145.

52. Özçatalbaş, M., Sözen, A. (2024). A finite element approach for phase-change analysis of paraffin. *Politeknik Dergisi*, 27(5), 1837–1842.

53. Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., Zeraouli, Y. (2014). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120, 59–80.

54. Khan, M. M. A., Saidur, R., Al-Sulaiman, F. A. (2017). A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 105–137.

55. Jokiel, M. (2016). Development and performance analysis of an object-oriented model for phase change material thermal storage. *Energy Research,* 6(9),96-121.

56. İnternet: Applications of thermal energy storage in the energy transition: Benchmarks and developments. URL-4: https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/Applications-of-Thermal-Energy-Storage-in-the-Energy-Trenasition-Annex-30_Public-Report.pdf. Son Erişim Tarihi: 14.11.2025.

57. Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M., Cognet, P. (2014). A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 591–610.

58. N'Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2385–2396.

59. Goldberg, D.E. (2006). *Fundamentals of chemistry*. (5th Edition). Boston: McGraw-Hill. 715.

60. Kumar, V., Pallapa, M., Rezai, P., Selvaganapathy, P. R. (2016). Reference module in materials science and materials engineering. *Elsevier,* 3,75-105.

61. Selley, R. C., Sonnenberg, S. A. (2022). *Elements of petroleum geology* (4. Baskı). Colorado: Academic Press. 542.

62. Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.

63. Lane, G. A., Shamsundar, N. (1983). Solar heat storage: Latent heat materials, Vol. I: Background and scientific principles. *Journal of Solar Energy Engineering*, 105(4), 467–467.

64. İnternet: Viscosity measurement. URL-5: https://www.thermopedia.com/. Son Erişim Tarihi: 3.11.2025.

65. Kemp, R.B. (1999). *Handbook of thermal analysis and calorimetry* (4. Baskı). Amsterdam: Elsevier Science, 1061.

66. Höhne, G. W. H., Hemminger, W. F., Flammersheim, H.-J. (2003). *Differential scanning calorimetry*. (2. Edition). Berlin: Springer, 276.

67. İnternet: Standard test method for melting and crystallization temperatures by thermal analysis. URL-6: https://store.astm.org/e0794-06r18.html. Son Erişim Tarihi: 16.11.2025.

68. Ghanbari, E., Picken, S. J., van Esch, J. H. (2023). Analysis of differential scanning calorimetry (DSC): Determining the transition temperatures, and enthalpy and heat capacity changes in multicomponent systems by analytical model fitting. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(22), 12393–12409.

69. Brown, M. E. (2001). *Introduction to thermal analysis: techniques and applications*. (2. Baskı). Bostob: Springer. 264.

70. Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., Vyvyan, J. R. (2014). *Introduction to spectroscopy* (5. Baskı). Canada: Cengage Learning. 784.

71. Türker, M. (2024). Toz metal Al köpükler: Üretimi, çeşitleri ve kullanım alanları. *Politeknik Dergisi*, 27(6), 2335–2356.

72. Sutygina, U., Betke, G., Hasemann, G., Scheffler, M. (20-22 Aralık 2019). *Manufacturing of open-cell metal foams by the sponge replication technique.* International Conference on Energy, Power and Mechanical Engineering, Guangzhou, 793.

73. Akbaba, B. (2016). *Alüminyum Köpüklerde İki Boyutlu Sıcaklık Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. 141.

74. Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 559–632.

75. Menç, B., Özçatalbaş, Y. (2024). Manufacturing and characterization of open-cell aluminum foam by powder metallurgy. *Materials Science and Technology*. 42(1),72-91.

76. Ashby, M.F., Evans, T., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G. (2000). Metal foams: A design guide. *Materials & Design.* 23(1),119.

77. İnternet: Heat exchangers. URL-7: https://ergaerospace.com/heat-exchangers/. Son Erişim Tarihi: 16.10.2025.

78. González, S., Jiménez S.A. (2020). Graphene Nanoplatelets. *Applied Sciences.* 10(5),17-53.

79. Dybowska-Sarapuk, L., Kielbasinski, K., Arazna, A., Futera, K., Skalski, A., Janczak, D., Sloma, M., Jakubowska, M. (2018). Efficient inkjet printing of graphene-based elements: Influence of dispersing agent on ink viscosity. *Nanomaterials*, 8(8),159-173.

80. İnternet: ACS Materıal. URL-8: https://www.acsmaterial.com/. Son Erişim Tarihi: 21.10.2025.

81. Bahiraei, M., Heshmatian, S. (2019). Graphene family nanofluids: A critical review and future research directions. *Energy Convers Management*, 196, 1222–1256.

82. Cataldi, P., Athanassiou, A., Bayer, I.S. (2018). Graphene nanoplatelets-based advanced materials and recent progress in sustainable applications. *Applied Sciences*, 8(9), 235-249.

83. He, L., Wang, H., Zhu, H., Gu, Y., Li, X., Mao, X. (2018). Thermal properties of PEG/graphene nanoplatelets (GNPs) composite phase change materials with enhanced thermal conductivity and photo-thermal performance. *Applied Sciences*, 8(12), 25-41.

84. Moosa, A., Abed, M. S. (2021). Graphene preparation and graphite exfoliation. *Turkish Journal of Chemistry*, 45(3), 493-519.

85. Dong, L.-X., Chen, Q. (2010). Properties, synthesis, and characterization of graphene. *Frontiers of Materials Science in China*, 4(1), 45–51

86. İnternet: RUBITHERM42 Technical Specifications. URL-9: https://www.rubitherm.eu/. Son Erişim Tarihi: 27.10.2025.

87. İnternet: Graphene Nanoplatelet. URL-10: https://nanografi.com/. Son Erişim Tarihi: 21.10.2025.



Gazili olmak ayrıcalıktır