

T. C.
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL, METALOKSİT VE KARBON TABANLI
NANOPARÇACIK KATKILI ORGANİK FAZ DEĞİŞKEN
MALZEMELERİN TERMAL ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL
OLARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETÜL YEŞİM ÇİFTÇİ
(201492181085)

Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd.Doç. Ümit Nazlı TEMEL

SİVAS
AĞUSTOS 2017

Betül Yeşim ÇİFTÇİ'nin hazırladığı “Metal, Metaloksit Ve Karbon Tabanlı Nanoparçacık Katkılı Organik Faz Değişken Malzemelerin Termal Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi”adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ENERJİ BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı :	Yrd.Doç. Ümit Nazlı TEMEL Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Yrd.Doç.Dr.Neşe K.ÇAKMAK Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr.Kerim YAPICI Süleyman Demirel Üniversitesi	

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İdris ZORLUTUNA
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-619 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© BETÜL YEŞİM ÇİFTÇİ, 2017



Çalışma sırasında bana destek olan aileme ve tüm arkadaşlarıma...

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

25.08.2017

İmza

Betül Yeşim ÇİFTÇİ

TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ümit Nazlı TEMEL'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren hocamız Doç. Dr.Kerim YAPICI'ya çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimin başlangıcından beri maddi ve manevi her zaman yanımda olan, yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-619 No' lu projeyle desteklenmiştir.

ÖZET

METAL, METALOKSİT VE KARBON TABANLI NANOPARÇACIK KATKILI ORGANİK FAZ DEĞİŞKEN MALZEMELERİN TERMAL ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Betül Yeşim ÇİFTÇİ

Yüksek Lisans Tezi

Enerji Bilimleri ve Teknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ümit Nazlı TEMEL

2017, 80+xvii sayfa

Faz değişken malzemeler (FDM), düşük sıcaklık değişimi göstererek katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçiş yapabilen yüksek oranda enerji depolama kabiliyetine sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır. FDM'lerin enerji depolama kabiliyeti esasen faz değişimi esnasında gerçekleşen gizli enerji depolama prosesine dayanmaktadır. Yüksek gizli ısıları sebebiyle FDM'ler hafif ağırlıklarına karşılık yüksek miktarda enerji depolama kabiliyetine sahiptirler. Yüksek oranda enerji depolama kabiliyeti FDM'lerin bir çok mühendislik alanında kullanılmasına imkan vermektedir. Bu mühendislik uygulamaları uzay, havacılık, askeri, tekstil, otomotiv ve inşaat olarak sıralanabilir. FDM'ler gerekli çalışma sıcaklığına göre faz değişimi gerçekleştirecek biçimde üretilmektedir. Uygulamada kullanılan katı-sıvı FDM'ler organik, inorganik ve ötektik olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunların arasından organik FDM'ler; yüksek gizli ısı ve düşük buhar basıncına sahip olma, yüksek enerji depolama kabiliyetine sahip olma, korozif olmama, katılaşma işlemi sırasında subcooling özellik (erime başlangıç-katılaşma sonlanma sıcaklığı, erime sonlanma-katılaşma başlangıç sıcaklığı arasındaki fark) göstermeme, kimyasal reaksiyona girmeme(kararlı olma) ve kolay ve ucuz temin edilebilme gibi özelliklerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir. Bütün bu olumlu özelliklerine karşılık organik FDM'lerin bilinen tek dezavantajları düşük ısı iletim katsayısına sahip olmalarıdır ($k < 0.4 \text{ W/mK}$). Düşük ısıl iletkenlik katsayısı organik FDM'lerin enerji depolama ve geri salıverme hızlarını önemli derecede yavaşlatmaktadır. Organik FDM'lerin düşük ısıl iletkenlik probleminin çözümü için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bunlar

FDM içerisine yüksek ısı iletkenliğe sahip metal kanatçıkların, köpüklerin ve matrislerin yerleştirilmesi gibi birtakım yöntemler uygulanmıştır. Bu geleneksel yöntemler, FDM'nin ısı iletkenliğini artırmasına rağmen ağırlık ve hacim artışı, zayıf kararlılık ve kristalleşme sorunları kullanılan FDM miktarının düşmesi ve emdirme problemleri gibi birtakım dezavantajlara sahiptir. Son yıllarda nanoteknoloji alanında meydana gelen gelişmelere paralel olarak sentezlenen nanoparçacıklar daha yenilikçi bir yöntemin kullanımını ön plana çıkarmıştır. Bu yöntem yüksek ısı iletkenliğe sahip nanoparçacıkların FDM içerisine katkılanması suretiyle yüksek ısı iletkenliğe sahip bir FDM/nanoparçacık kompozitinin elde edilmesini içermektedir. Bu yöntem metal/metal oksit veya karbon tabanlı nanoparçacıkların organik FDM içerisine belirli miktarlarda katkılanması suretiyle yeni bir nanoparçacık/FDM kompozitinin oluşturulması esasına dayanmaktadır.

Bu tez; faz değişken malzemelerin ısı iletkenliklerini iyileştirmek için kullanılabilecek farklı nanoparçacıkların gerek ısı iletkenlik katsayısı üzerindeki gerekse de diğer termal özellikler üzerindeki etkisinin sistematik olarak karşılaştırılmasını içermektedir. Bu amaçla tez kapsamında, herhangi bir arayüz maddesi (surfactans) kullanılmadan farklı metal/metaloksit, karbon tabanlı nanoparçacıklar kullanılarak hazırlanmış olan FDM/nanoparçacık kompozitlerinin termal özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Faz değişken malzeme, Isı iletkenlik, Gizli ısı, Çok duvarlı karbon nanotüp, Grafen.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES OF ORGANIC PHASE CHANGE MATERIALS DOPED NANOPARTICLES BASED CARBON AND METAL OXIDE, METAL

Betül Yeşim ÇİFTÇİ

Energy Science and Technology Engineering Department

Supervisor: Yrd.Doç. Ümit Nazlı TEMEL

2017, 80 pages

Phase change materials (PCM), showing the low temperature change can transit from solid to liquid or from liquid to solid and are defined as materials having a high energy storage capability. In fact, the enerji storage capability of PCMs is based on the actualization of the hidden enerji storage process during phase change. Due to its hidden high heat, PCMs have the ability to store large amounts of energy despite their light weight. The ability of high energy storage makes it possible to use PCMs in a wide range of engineering. Aerospace, aviation, military, textile, automotive and building can be mentioned. PCMs can be produced so as to perform according to the required operating temperature. The solid-fluid PCMs used in applications can be divided into three main groups: organic, inorganic and eutectic PCMs are preferred due to high latent heat, low vapor pressure, high energy storage capability, non-corrosive, not showing subcooling (difference between melting onset and solidification ending temperature or melting ending and solidification onset temperature.) features during the solidification process, not entering chemical reactions (be committed) and being easily accessible. The coefficient of low thermal conductivity ($k < 0.4 \text{ W/mK}$) is the only disadvantage of organic PCMs. The coefficient of low thermal conductivity slows significantly down the speed of energy storage and release. Many studies have been made in the literature to solve the problem of low thermal conductivity of organic PCMs. These PCMs replacing into the metal fins with high thermal conductivity, is applied through a number of methods, such as foams and the placement of the matrix. These conventional

methods, although PCM increase the weight and volume, increase the thermal conductivity has a number of disadvantages such as the decrease of the amount used PCM poor stability and crystallization problems and adsorption problems. The nanoparticles are synthesized in parallel with the developments occurring in the field of nanotechnology in recent years has brought to the fore the use of more innovative methods. This method has a high thermal conductivity by doping the nanoparticles with a high thermal conductivity into PCM PCM / nanoparticle comprises obtaining composite. This method of metal / metal oxide or carbon-based nanoparticles by a new doping into a certain amount of nanoparticles in organic PCM / PCM is based on the creation of the composite.

In this project, the effect on the thermal properties of the different nanoparticles can be used to improve the thermal conductivity of the phase change material, comprises a systematic comparison. For this purpose, various metal / metal oxide, carbon-based nanoparticles, PCM / nanoparticle involves determining the effect on the thermal properties of composites.

Key Words: Phase change materials, thermal conductivity, latent heat, multi-walled carbon nanotubes, graphene.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
SİMGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	3
2. MATERYAL VE METOD	14
2.1 Faz Değişken Malzemeler (FDM)/ Nanoparçacık Kompozitlerinin Hazırlanması ve Çevrimi	15
2.2 Nanoparçacık/FDM Kompozitlerin Isıl İletkenliklerinin Ölçülmesi	20
2.3 Nanoparçacık/FDM Kompozitlerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Özelliklerinin Belirlenmesi ve Çevrimi	23
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER	31
3.1 Katkılanmamış Organik Faz Değişken Malzemenin Isıl iletkenlik Değerleri	31
3.2 Metal/Metaloksit Nanoparçacıklarla Katkılanan Organik Faz Değişken Malzemenin Isıl iletkenlik Değerleri	33
3.3 Karbon Tabanlı Nanoparçacıklarla Katkılanan Organik Faz Değişken Malzemenin Isıl İletkenlik Değerleri	40
3.4 Katkılanmamış Faz Değişken Malzemelerin DTK Özellikleri	47
3.5 Metal/Metaloksit Nanoparçacıklar İle Katkılanan Faz Değişken Malzemelerin DTK Özellikleri	50
3.6 Karbon Tabanlı Nanoparçacıklar İle Katkılanan Faz Değişken Malzemelerin DTK Özellikleri	60
4. GENEL SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Nanoparçacık/FDM kompozitlerinin hazırlanışı.	16
Şekil 2.2	MO/A82 kompozitleri, (a) $Al_2O_3(80nm)/A82$, (b) $Al_2O_3(20nm)/A82$, (c) $TiO_2(10-25nm)/A82$, (d) $MgO(20nm)/A82$, (e) $A82/ZnO_2$ (Çinko oksit)- (18 nm)), (f) $CuO(<80 nm) /A82$ kompoziti, Metal/A82 kompoziti, (g) $Ag(50-80 nm)/A82$ kompoziti.	18
Şekil 2.3	MWCNTs/A82 kompozitleri ve GNP/A82 kompozitleri a) MWCNTs(50-80nm)/A82, b) MWCNTs(20-30nm/A82), c) GNP(6-8nm)/A82/GNP.	19
Şekil 2.4	KD2-Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı.	22
Şekil 2.5	JEIO TECH iklimlendirici.	23
Şekil 2.6	Shimadzu DTK-60 diferansiyel taramalı kalorimetre.	24
Şekil 2.7	DTK’de ısı analiz testi yapılacak malzeme numunesinin hazırlanmasında gerçekleştirilen ön hazırlık basamakları.	25
Şekil 2.8	DTK-60’ın yapısı.	27
Şekil 2.9	DTK’nin şematik gösterimi: 1. fırın, 2. örnek madde, 3. inert referans, 4. Isıtıcının kontrol birimi, 5. sıcaklık farkı göstergesi, 6. sıcaklık göstergesi. [4] ..	28
Şekil 2.10	Normal bir DTK eğrisi.	28
Şekil 2.11	DTK eğrileri: a) T_s : numunenin sıcaklık-zaman eğrisi, T_i : referansın sıcaklık-zaman eğrisi, b) sıcaklık farkı zamanlı eğrisi. [4] ..	29
Şekil 3.1	KD2-Pro cihazının doğrulanması.	32
Şekil 3.2	$Ag(50-80nm)/A82$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	34
Şekil 3.3	$Cu(<80nm)/A82$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	35
Şekil 3.4	$ZnO(18nm)/A82$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	36
Şekil 3.5	$TiO_2(10-25nm)/A82$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	37
Şekil 3.6	$MgO(20nm)/A82$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	38
Şekil 3.7	$Al_2O_3(20nm)/A82$ ve $Al_2O_3(80nm)/A82$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	39
Şekil 3.8	MWCNTs (20-30nm)/A82 ve MWCNTs (50-80nm)/A82 kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	42
Şekil 3.9	MWCNTs(50-80nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliğinin çevrim boyunca değişimi.	43
Şekil 3.10	GNP (6-8nm)/A82 kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları.	44
Şekil 3.11	GNP(6-8nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliğinin çevrim boyunca değişimi.	46
Şekil 3.12	Tüm nanoparçacık/FDM kompozitlerinin kütlece %5 kütle bölüntüsü için ısı iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması.	47
Şekil 3.13	Saf Indium metali için DTK’dan elde edilen termogram.	48
Şekil 3.14	A82 organik faz değişken malzemenin termogram eğrileri.	49

Şekil 3.15	CuO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri.	51
Şekil 3.16	CuO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi.	52
Şekil 3.17	ZnO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri.	53
Şekil 3.18	ZnO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi.	54
Şekil 3.19	TiO ₂ nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri.	55
Şekil 3.20	TiO ₂ nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi.	56
Şekil 3.21	MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri.	56
Şekil 3.22	MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi.	57
Şekil 3.23	MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri, a) Al ₂ O ₃ (20nm), b) Al ₂ O ₃ (80nm).	58
Şekil 3.24	Al ₂ O ₃ nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi.	59
Şekil 3.25	MWCNT nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri, a) MWCNTs (20-30nm), b) MWCNT(50-80nm).	60
Şekil 3.26	MWCNT nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi.	61
Şekil 3.27	MWCNTs nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının çevrimlere göre değişimi.	63
Şekil 3.28	GNP nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri.	63
Şekil 3.29	GNP nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi.	64
Şekil 3.30	GNP nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının çevrimlere göre değişimi.	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1	Faz değişim malzemeleri içine farklı boyutlarda metal, metaloksit katkılanmasıyla ortaya çıkan FDM/MO kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları.	4
Çizelge 1.2	Faz değişim malzemeleri içine farklı boyut ve türlerde çeşitli nanomalzemenin katkılanmasıyla oluşan FDM/nanomalzeme kompozitleri ve tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) nanomalzemelerinin kullanılmasıyla elde edilen FDM/KNT kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları.	4
Çizelge 1.3	Karbon nanofiber nanomalzemeleri katkılanarak elde edilen FDM/CNF kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları.	8
Çizelge 1.4	Grafen, grafen nanoyaprak, grafit nanofiber, grafit tozu, nanografit nanomalzemeleri katkılanarak elde edilen FDM/GnP, FDM/GFG, FDM/GNF, FDM/NG kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları.	10
Çizelge 2.1	A82 Organik FDM'nin katkılanmasında kullanılan metal/metaloksitler ve özellikleri.	14
Çizelge 2.2	A82 Organik FDM'nin katkılanmasında kullanılan MWCNT ve GNP'nin özellikleri.	15
Çizelge 2.3	DTK kalibrasyon standart değerleri.	26
Çizelge 2.4	Saf İndium metali için 2 °C/dk ısıtma hızı uygulanarak DTK'den elde edilen erime sıcaklığı ve gizli ısı değerleri.	26
Çizelge 3.1	Katkılanmamış A82 için KD2-Pro cihazından okunan sonuçlar ve ortalama değerleri.	32
Çizelge 3.2	Ag/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	33
Çizelge 3.3	CuO/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	34
Çizelge 3.4	ZnO/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	35
Çizelge 3.5	TiO ₂ (10-25nm)/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	37
Çizelge 3.6	MgO(20nm)/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	38
Çizelge 3.7	Al ₂ O ₃ (20nm)/A82 ve Al ₂ O ₃ (80nm)/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	39
Çizelge 3.8	MWCNTs(20-30nm)/A82 ve MWCNTs(50-80nm)/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	41
Çizelge 3.9	MWCNT(50-80nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliklerinin 20 ısıtma/soğutma çevrimi boyunca değişimi.	43
Çizelge 3.10	GNP(6-8nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri.	44
Çizelge 3.11	%5 GNP(6-8 nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliğinin çevrim boyunca değişimi.	45
Çizelge 3.12	İndium metali için DTK özellikleri.	48
Çizelge 3.13	Katkılanmamış A82'nin DTK Analizi sonuçları.	50
Çizelge 3.14	CuO(80 nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri.	51
Çizelge 3.15	ZnO(80 nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri.	52
Çizelge 3.16	TiO ₂ (10-25 nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri.	55

Çizelge 3.17	MgO(18nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri.....	57
Çizelge 3.18	Al ₂ O ₃ (20nm)/A82 ve Al ₂ O ₃ (80nm)/A82 kompozitlerinin %1, %3 ve %5 fraksiyon için ortalama değerleri.	58
Çizelge 3.19	Farklı boyutlardaki MWCNT/A82 kompozitlerinin DTK veri analizi.	60
Çizelge 3.20	%5 MWCNT(50-80nm)/A82 kompozitinin çevriminin DTK veri analizi.....	62
Çizelge 3.21	GNP(6-8nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri.....	64
Çizelge 3.22	%5 GNP (6-8 nm)/A82 kompozitinin çevriminin DTK veri analizi.....	65



KISALTMALAR DİZİNİ

FDM	: Faz değişken malzemeler
DTK	: Diferansiyel tarama kalorimetresi
DTA	: Diferansiyel termal analiz
PW	: Parafin-wax
PA	: Palmitik asit
PANI	: Polianilin
CNF	: Carbon nanofiber(karbon nanofiber)
CNT	: Carbon nanotube(karbon nanotüp)
GnP	: Graphene nanoplatelet(Grafen nanoyaprak)
GNs	: Graphite nanosheets(Grafen nanoyaprak)
GNF	: Graphite nanofibers
GFG	: Graphite powder(Grafit tozu)
NG	: Nano graphite(Nanografit)
ENG	: Expanded natural graphite
MWCNT	: Multi-walled carbon nanotubes (çoklu duvar karbon nanotüp)
L-MWCNT	: Long Multi-walled carbon nanotubes (Uzun çok duvarlı karbon nanotüp)
SWCNT	: Single-walled carbon nanotubes (tekli duvar karbon nanotüp)
S-MWCNT	: Short Multi-walled carbon nanotubes (Kısa çok duvarlı karbon nanotüp)
MO	: Metaloksit
Ag	: Gümüş
Cu	: Bakır
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
TiO₂	: Titanyum oksit
ZnO	: Çinkooksit
MgO	: Magnezyum oksit
CuO	: Bakıroksit

SİMGELER DİZİNİ

D	:	Ortalama çap
L	:	Uzunluk
H	:	Kalınlık
P	:	Saflık
A	:	Yüzey alan
ρ	:	Yoğunluk
k	:	Isıl iletkenlik (W/mK)
OD	:	Outside diameter (Dış çap)
ID	:	Inside diameter (İç çap)
ENS	:	Erime noktası sıcaklığı
KNS	:	Katılaşma noktası sıcaklığı
EGI	:	Erime gizli ısı
KGI	:	Katılaşma gizli ısı
T_{mo}	:	Erime başlangıç sıcaklığı
T_{mp}	:	Erime pik sıcaklığı
T_{me}	:	Erime sonlanma sıcaklığı
H_e	:	Erime gizli ısı
T_{so}	:	Katılaşma başlangıç sıcaklığı
T_{sp}	:	Katılaşma pik sıcaklığı
T_{se}	:	Katılaşma sonlanma sıcaklığı
H_s	:	Katılaşma gizli ısı

1. GİRİŞ

Faz değişken malzemeler (FDM), düşük sıcaklık değişimi göstererek katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçiş yapabilen enerji depolama malzemelerdir. Bu malzemeler bir fiziksel halden başka bir fiziksel hale geçerken ısınma sırasında ortaya çıkan enerjiyi absorbe ederler, diğer taraftan soğuma prosesi sırasında ise çevreye söz konusu bu enerjiyi geri bırakırlar. Termal enerji depolama da diyebileceğimiz bu olay esnasında düşük veya yüksek ısı enerjisinin daha sonra kullanılmak üzere geçici olarak depolanması sağlanır. Termal enerji depolama esasen duyulur ve gizli ısı olmak üzere iki biçimde gerçekleşmektedir. Duyulur ısı depolama; enerjinin maddenin ısı kapasitesinden yararlanılarak depolanmasına denir (sıvılar, katılar). Gizli ısı depolama ise enerjinin bir faz geçiş sıcaklığında “faz değişimi yoluyla depolanmasına”denir (katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz, sıvı-sıvı, sıvı-gaz). Gizli ısı depolama metodunun diğer metotlara göre üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Duyulur ısıya göre ısı depolama kapasitesi daha yüksektir ve kullanılan ısı deposu hacmi daha küçüktür.
- FDM’nin birim kütlesinin ısı depolama kabiliyeti daha yüksektir.
- FDM’nin faz değişim sıcaklığı, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanım için uygundur.

Yüksek oranda enerji depolama kabiliyeti yüzünden FDM’ler; uzay, havacılık, askeri, tekstil, otomotiv ve inşaat gibi birçok mühendislik alanında kullanılma potansiyeline sahiptir. FDM’lerin kullanım alanları aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

- Sıcak gıda ürünlerinin taşınmasında ve muhafazasında,
- Elektronik cihazların ısı termal korunumunda,
- Çeşitli tekstil ürünlerinde,
- Sağlık uygulamalarında kan numuneleri ve organ taşımacılığında,
- Ameliyat masalarında sıcak- soğuk terapilerde,
- Binaların ısıtılması ve soğutulması işlemlerinde,
- İnşaat sektöründe yalıtım amacıyla seraların iklimlendirilmesinde,
- Yapı malzemelerinde, binalarda zemin altı döşeme metaryelleri olarak,
- Binalarda ısıtma ve soğutma yükünün azaltılmasında,
- Fotovoltaik elementlerin soğutulmasında,

- Solar enerji depolamada,
- Tekstil sektöründe,
- Ev ısıtma ve sıcak su üretiminde,
- Sıcaklık değişimine duyarlı gıda ürünleri ve organ muhafazası ve transportunda,
- Medikal alanda (kan üniteleri),
- Taze gıdaların depolanmasında,
- Isıtma amaçlı yastık, kemer vb. kişisel bakım ürünlerinde,
- Sıcaklığa duyarlı cihazların soğutulmasında [1].

FDM'ler; organik (parafinler), inorganik (hidrat tuzlar) ve ötektik olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Farklı FDM'ler arasından organik FDM'ler yüksek gizli enerji ve düşük buhar basıncına sahip olması, kimyasal ve ısıl olarak kararlı olması, katılaşma işlemi sırasında subcooling özellik göstermemesi, kolay ve ekonomik elde edilebilir olması gibi avantajlarından dolayı en çok tercih edilen ve kullanılan faz değişken malzeme türüdür. Organik FDM'lerin yukarıda bahsedilen tüm olumlu özelliklerine rağmen bilinen en önemli dezavantajları ısıl iletkenliklerinin düşük olmasıdır. Düşük ısıl iletkenlik katsayısı organik FDM'lerin enerji depolama ve geri salıverme hızlarını önemli derecede yavaşlatmaktadır. Organik FDM'lerin düşük ısıl iletkenlik problemini çözmek için geçmişten günümüze FDM içerisine yüksek ısıl iletkenliğe sahip metal kanatçıların, köpüklerin ve matrislerin yerleştirilmesi gibi birtakım yöntemler uygulanmıştır. Bu yöntemler, organik FDM'lerin ısıl iletkenliklerini belirli derecede iyileştirmesine rağmen sistem ağırlık ve/veya hacminin artması, zayıf kararlılık, kristalleşme sorunları ve kullanılan FDM miktarının azalması gibi birtakım olumsuzluklara sahiptir. Son yıllarda nanoteknoloji alanında meydana gelen gelişmelere paralel olarak sentezlenen nanoparçacıklar daha yenilikçi bir yöntemin kullanımını ön plana çıkarmıştır. Bu yöntem, yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanoparçacıkların FDM içerisine katılanması suretiyle yüksek ısıl iletkenliğe sahip bir FDM/nanoparçacık kompozitinin elde edilmesini içermektedir.

1.1. Literatür Özeti

Literatürde düşük ısı iletkenliğe sahip organik FDM'lerin içerisine nanoparçacık katkılayarak ısı iletkenliğinin iyileştirilmesine yönelik birtakım çalışmalar bulunmaktadır. FDM'lerin ısı iletkenliklerinin iyileştirilmesine yönelik ilk çalışmalar metal ve metaloksit nanoparçacıkların FDM içerisine katkılanması suretiyle gerçekleştirilmiştir.(çizelge 1.1) Metal ve metaloksit nanoparçacıklar katkılanarak organik FDM'lerin ısı iletkenliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar detaylı olarak incelendiğinde ısı iletkenlikte %15-%30 aralığında bir iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Bu çalışmalar incelendiğinde metal ve metal oksit nanomalzemeler ile katkılanan FDM'lerin, katkılanmamış FDM'ye göre ısı iletkenliklerinden elde edilen en büyük artış oranı 25 nm çapa sahip Cu nanoparçacık ile katkılanan FDM kompozit (Wu vd.,2010) için elde edilmiştir. Wu vd, 2010 yapmış oldukları çalışmalarında kütlece %1 Cu nanoparçacıklarla katkılanan parafinin ısı iletkenliğindeki iyileşmenin %11 civarında olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte metal nanoparçacıkların FDM içerisine homojen olarak dağılmalarını bir aracı madde varlığında gerçekleştirmişlerdir. Wu vd. (2010) kütlece %1 Cu içeren FDM/Cu kompozitin farklı erime/katılaşma çevrimleri sonucunda kompozitin erime sıcaklığına, gizli ısısına olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Wu vd. (2010) gerçekleştirdikleri 20, 50 ve 100 ısı çevrim sonucunda kompozit erime sıcaklığının ve gizli ısısının başlangıç koşuluna göre sırası ile %1.6 ve %3 azaldığını belirlemişlerdir. Gerçekleştirilen bu deney sonucunda Wu vd., (2010) Cu nanoparçacık katkılanmış FDM'nin uzun çevrimler sonucunda bile kararlılığını koruduğunu göstermiştir. Wang vd. (2010) organik FDM içerisine kütlece %5 Al_2O_3 katkıladıkları çalışmalarında ısı iletkenlikteki iyileşmeyi %26 olarak belirlerken Ho ve Gao.(2009) Octadecane organik FDM içerisine kütlece %10 Al_2O_3 katkıladıkları çalışmalarında ısı iletkenlikteki iyileşmeyi %17 olarak belirlemişlerdir. Al_2O_3 nanoparçacık katkılanarak ısı iletkenlikte elde edilen bu farklı iyileştirme oranının kullanılan nanoparçacık boyutuyla veya farklı organik malzeme nedeniyle gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir. Farklı bir nanoparçacık ve FDM kullanması adına Liu vd.(2009) $BaCl_2$ faz değişken malzemesi içerisine hacimce %1.13 TiO_2 katkıladıkları çalışmalarında ısı iletkenlikteki iyileşmeyi %15.65 olarak belirlemişlerdir.

Çizelge 1.1 Faz değişim malzemeleri içine farklı boyutlarda metal, metaloksit katkılanmasıyla ortaya çıkan FDM/MO kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları

Referans	FDM ve erime-katılma sıcaklığı	Nanomalzeme ve ortalama boyutlar	Kütlece % bölüntü	Isıl iletkenlikte ölçülen maksimum artış miktarı	Erime ve katılma sıcaklık değişimi	Erime ve katılma gizli ısı değişimi
Ho vd. (2009)	Octadecane (Parafin) C ₁₈ H ₃₈ ENS:26.5 °C KNS:25.1 °C	Al ₂ O ₃ D:159.6-196nm, P:%99.9, ρ: ± 5×10 ⁻⁴ g/cm ³	%5-%10	%17	ENS: Artma KNS: Artma	ENGI: Azalma KNGI:-
Wang vd. (2010)	PW (Parafin-wax) ENS:52-54°C KNS:-	Al ₂ O ₃ D:20 nm ρ: 3.9 g/cm ³	%1-%5	%26	ENS: Azalma KNS:-	ENS: Azalma KNS:-
Liu vd. (2009)	BaCl ₂ ENS: - KNS: -8°C	TiO ₂ D: 20 nm	%0.167- %1.13 (hacimce)	%15	ENS:- KNS:-	ENGI:- KNGI:-
Zeng vd. (2007)	Tetradecanol ENS: 42 °C KNS: -	Ag D:500 nm P:%99.9	%1-%16	Artış	ENS: Azalma KNS:-	ENGI: Azalma KNGI: Azalma
Wu vd. (2010)	Parafin ENS:58-60 °C KNS: -	Cu Al D: 25 nm P: >%99.9	%1-%5	%30	ENS:- KNS:-	ENGI: %11.1 Azalma KNGI: %11.7 Azalma
Fan vd. (2012)	Sikloheksan ENS: 6.5 °C KNS:-5.2 °C	CuO D: 5-15 nm ρ:6310 kg/m ³	%1-%4	%24	ENS:- KNS:-	ENGI:- KNGI:-

Literatürde MWCNT ve SWCNT nanoparçacıklar katkılanarak organik FDM'lerin ısı iletkenliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2 Faz değişim malzemeleri içine farklı boyut ve türlerde çeşitli nanomalzemenin katkılanmasıyla oluşan FDM/nanomalzeme kompozitleri ve tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) nanomalzemelerinin kullanılmasıyla elde edilen FDM/KNT kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları

Referans	FDM ve erime-katılma sıcaklığı	Nanomalzeme ve ortalama boyutlar	Kütlece % bölüntü	Isıl iletkenlik katsayısında ölçülen maksimum artış miktarı	Erime ve katılma sıcaklık değişimi	Erime ve katılma gizli ısı değişimi
Zeng vd., (2008)	PANI/tetradecanol ENS:35°C KNS:-	MWCNT D: 10–30 nm L: 5–15 µm	%1-%5	%30	ENS: Azalma KNS: -	EGI: Azalma KGI: -

Shaikh vd., (2008)		Parafin wax ENS:- KNS:-	MWCNT D:10nm SWCNT D:1nm	%0.1-%1	%13	ENS: - KNS: -	EGI: %13 Artma KGI: -
Zeng (2009)	vd.,	PA ENS:59.48 °C KNS:58.78°C	MWCNT D:10-30 nm, L:5-15 µm	%1-%5	%26	ENS: Azalma KNS: Yok	EGI: Azalma KGI: -
Wang (2009)	vd.,	Parafin wax ENS:52-54 °C KNS:-	MWCNT D:30 nm, L:50 µm,P:%95 A:60 m ² /g	%0.2-%2	%40	ENS: Azalma KNS: -	EGI: Azalma KGI: -
Wang (2010)	vd.,	PA ENS: 62.4°C KNS:-	MWCNT D:30 nm, L:50 µm,P:%98 A:60 m ² /g	%1	%46	ENS: %13 Azalma KNS:-	ENGI: %24 Azalma KNGI:-
Wang (2010 b)	vd.,	PA ENS:62.5-64°C KNS:-	MWCNT D:30 nm, L:50 µm, A:60 m ² /g	%0.2-%1	%51.6	ENS: Artma KNS: -	EGI: - KGI: -
Cui (2011)	vd.,	Parafin wax ENS:52-54 °C KNS:-	MWCNT D:30nm, L:50µm,P:%95, A:60 m ² /g	%1-%10	%25	ENS: Azalma KNS: Artma	EGI: Yok KGI: -
Teng& Yu (2012)		Parafin ENS:54-60 °C KNS:60.3-60.7°C	MWCNT D:20-30 nm	%1-%3	Artma	ENS: Azalma KNS: Artma	EGI: Azalma KGI: Azalma
Kumaresan vd., (2012)		Parafin ENS:18-23°C KNS:19-22°C	MWCNT D:30-50 nm, L:10-20 µm, A:60 m ² /g	%0.15- %0.60 (hacimce)	%45	ENS: Yok KNS: Yok	EGI: Azalma KGI: -
Babaei vd., (2013)		Parafin ENS:- KNS:-	MWCNT SWCNT	%1-%4	%48	ENS:- KNS:-	EGI: - KGI: -
Yu vd., (2013)		Parafin ENS:58-60°C KNS:-	S-MWCNT/C- MWCNT-D:8-15 nm, L:0.5-2 µm,P:>95,	%1-%5	%20	ENS:- KNS:-	EGI:- KGI:-
Fan vd., (2013)		Parafin wax ENS:58.8°C KNS:-	L-MWCNT- D:<10 nm, L:5-15µm, P:>97 S-MWCNT D:8-15 nm, L:0.5-2 µm, P:>95 L-MWCNT D:30-50 nm, L:5-15 µm, P:>97	%1-%5	%30	ENS: Azalma KNS: Azalma	EGI: Azalma KGI: Azalma

Farklı erime sıcaklıklarına sahip organik FDM'ler içerisinde karbon nanotüp (CNTs) katkılanarak ısı özelliklerinin incelenmesine yönelik çalışmalarda, ısı iletkenlikteki iyileşmenin katkılanan CNT miktarına bağlı olarak arttığı ve bu artışın katkılanmamış FDM'ye göre %13-%51.6 aralığında olduğu belirlenmiştir. Isı iletkenlikteki iyileşmede gözlemlenen bu farklılıkların kullanılan karbon nanotüp oranından, farklı boyutlardaki karbon nanotüplerden, karbon nanotüplere uygulanan kimyasal ve fiziksel işlemlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Zeng vd (2008) 35°C erime sıcaklığına sahip PANI/tetradecanol faz değişken malzeme içerisine kütlece %1-%5 MWCNTs katkıladıkları çalışmalarında elde edilen kompozitin ısı iletkenliğinde %30'a varan bir artış gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte Zeng vd. (2008) elde edilen kompozitlerin erime sıcaklıklarının ve erime gizli ısılarının azaldığını belirlemişlerdir. Bir başka çalışmalarında Zeng vd. (2009) erime sıcaklığı 59°C olan palmitik asit (PA) içerisine kütlece %1-%5 MWCNTs katkılayarak elde ettikleri kompozitlerin termal özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. En yüksek katkılama oranı %5 için ısı iletkenlikteki iyileşmeyi % 26 olarak belirlemişlerdir. Bir önceki çalışmalarına benzer olarak erime sıcaklığı ve gizli ısılarının azaldığını bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada Cui vd.(2011) erime sıcaklığı 52-54°C'deki parafin wax içerisine kütlece %1-%10 oranlarında MWCNTs katkılamışlardır. Kütlece %10 MWCNTs katkılanan parafin wax organik FDM'nin ısı iletkenliğindeki artışı %25 olarak belirlemişlerdir. Cui vd (2011) diğer termal özelliklerdeki değişimleri de belirlemiş olup erime sıcaklığının azaldığını, katılma sıcaklığının arttığını erime gizli ısılarının ise değişmediğini bildirmişlerdir. Teng vd. (2012) 54-60°C erime sıcaklık aralığına sahip parafin içerisine kütlece %1-%3 MWCNTs katkıladıkları kompozitlerin termal özelliklerindeki değişimleri belirlemeyi amaçlamışlardır. %3 MWCNTs katkılanan FDM'nin erime sıcaklığının katkılanmamış FDM'ye göre %0.46 azaldığını belirlemişlerdir. Teng vd. (2012) özetle erime sıcaklığında, erime gizli ısılarında ve katılma gizli ısılarında azalma katılma sıcaklığında ise artış olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte ısı iletkenlikte artış meydana geldiğini bildirmişlerdir. Yu vd. (2013) erime sıcaklığı 58-60°C aralığında olana parafin wax içerisine kütlece %1-%5 MWCNTS katkıladıkları çalışmalarında en yüksek katkılama oranını için ısı iletkenlikteki artışı %20 olarak belirlemişlerdir. Yu vd. (2013) erime ve katılma sıcaklıkları ve gizli ısılar için ölçüm yapmamışlardır. Benzer bir çalışmada Fan vd. (2013) erime sıcaklığı 58.8°C olan parafin wax organik FDM içerisine kütlece %1-%5 MWCNTs

katkılayarak elde ettikleri kompozitlerin ısı iletkenliklerindeki artışı %30 olarak ölçmüşlerdir. Buna ek olarak, Fan vd. (2013) erime-katılma sıcaklıkları ve gizli ısılarında azalma olduğunu bildirmişlerdir. Kumerasan vd. (2012) 18-23°C erime sıcaklık aralığına sahip sıvı parafin wax'a hacimce düşük oranlarda MWCNTs katkılayarak ısı iletkenlikte %30-%45 artış sağlamışlardır. Kumerasan vd. (2012) artan MWCNTs hacim oranına bağılı olarak ısı iletkenliğinin artmasına rağmen erime/katılma sıcaklıklarının bu durumdan etkilenmediğini bildirmişlerdir. Literatürde herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın kullanılan karbon nanotüp(CNT) nanomalzemeler katkılanarak organik FDM'lerin ısı iletkenliğinde elde edilen en büyük iyileşme Babaei vd.(2013) tarafından gerçekleştirilmiştir. Babaei vd.(2013) parafinin içerisine kütlece %1-%4 oranlarında CNT katkılanmasıyla ısı iletkenlikte %48 oranında bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Buna karşın erime ve katılma sıcaklığı ve gizli ısılar için herhangi bir ölçüm gerçekleştirmemişlerdir. Literatürde katkılanacak CNT'ün katkılanmadan önce bir takım fiziksel ve/veya kimyasal işlemlere tabi tutularak kullanılmasına yönelik çalışmalar incelendiğinde ısı iletkenlikte daha fazla iyileşmeler sağlanabileceği gösterilmiştir. Wang vd. (2010b) yaptıkları çalışmada, erime sıcaklığı 62.5-64°C aralığında değişen bir organik FDM olan palmitik asidin kütlece %0.2-1 bölüntü aralığında çoklu duvar karbon nanotüp (MWCNTs) ile katkılanması sonucu elde edilen kompozit FDM'nin ısı iletkenliği ile enerji depolama özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Wang vd.(2010b) FDM MWCNTs'leri doğrudan katkılamadan önce FDM içerisindeki MWCNTs parçacıkların kararlılığını ve yüzey alanını artırmak için kimyasal (asit ve alkali ile muamele etmek) ve mekanik (bilyeli öğütme) olmak üzere iki farklı ön işleme tabi tutmuşlar ve elde edilen sonuçları kendi aralarında ve ayrıca hiç işleme tabi tutulmamış MWCNTs ile hazırlanmış FDM/MWCNTs kompozitiyle karşılaştırmışlardır. T=25°C için ön işleme tabi tutulmamış FDM/MWCNTs kompozitler ile asit, alkali ve bilyeli öğütme ile işleme tutulmuş FDM/MWCNTs kompozitlerin kütlece %1'lik bölüntüleri için ısı iletkenlik artış oranlarının katkılanmamış FDM'ye göre sırası ile %29.6, %37.1, %51.6 ve %31.1 olarak değiştiğini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, fiziksel ve kimyasal ön işleme tabi tutulmuş olan MWCNTs nanomalzemeler ile üretilen FDM/MWCNTs kompozitlerinden elde edilen ısı iletkenlik miktarındaki artış oranının hiç muamele edilmemiş kompozite göre daha yüksek çıktığı ve ayrıca en yüksek artış oranının alkali (KHO) ile ön işleme tabi tutulmuş kompozit için

elde edildiğini vurgulamışlardır. Wang vd. (2010b) asit ve alkali ile ön işleme tabi tutulmuş MWCNTs nanomalzemeler ile katkılanarak elde edilen FDM/MWCNTs kompozitlerin, ön işleme tabi tutulmamış FDM/MWCNTs kompozitlerine göre daha yüksek ısı iletkenlik değeri vermelerini şu şekilde açıklamışlardır; karbon nanotüp katkılanmış FDM kompozitin ısı iletkenliği, MWCNTs yüzeyindeki ısı dirence bağlıdır. MWCNTs yüzeyinde oluşan ısı direnç ise kimyasal bağ ile ilişkilidir. Asit ve alkali ile muamele edilmiş MWCNT yüzeyinde oluşan kimyasal bağlar, işlem görmemiş MWCNTs'e göre daha güçlü olduğundan ısı direnci azaltırlar. Bu sebep ile kimyasal işlem görmüş FDM/MWCNTs kompozitinden elde edilen ısı iletkenlik değeri, işlem görmemiş FDM/MWCNTs kompozitinden daha yüksektir. Yukarıda bahsedilen çalışmaların tamamında katkılanan CNT kütle bölüntüsüne bağlı olarak ısı iletkenliklerde iyileşmeler sağlandığı açık biçimde görülmektedir. Bununla birlikte bu çalışmalarda, erime/katılma sıcaklıkları ve gizli ısılarının genel olarak azaldığı veya değişmediği bildirilmiştir. Buna ters bir söylem olarak Shaikh vd.(2008) parafin içerisine tek duvarlı karbon nanotüp (SMWCNTs) ve MWCNTs katkıladıkları çalışmalarında erime gizli ısısında sırasıyla %13 ve %10 iyileşme elde edildiğini bildirmişlerdir. Gizli ısıdaki bu iyileşmenin katkılanan nanoparçacıkların FDM molekülleri arasındaki bağ kuvvetlerini arttırmasıyla ilişkili olduğunu söylemişlerdir.

Karbon nanofiber (CNF) nanomalzemeler katkılanarak elde edilen FDM/CNF kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları detaylı olarak çizelge 1.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 Karbon nanofiber nanomalzemeleri katkılanarak elde edilen FDM/CNF kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları

Referans	FDMve erime- katılma sıcaklığı	Nanomalze me ve ortalama boyutlar	Kütlece % bölüntü	Isıl iletkenlik katsayısında ölçülen maksimum artış miktarı	Erime ve katılma sıcaklık değişimi	Erime ve katılma gizli ısı değişimi
Elgafy vd., (2005)	Parafin wax	CNF	%1-%4	%38	ENS: -	EGI:-
	ENS:67°C	D:100 nm			KNS: -	KGI: -
Shaikh vd., (2008)	KNS: Parafin wax ENS:- KNS:-	L: 20 µm CNF D:100nm	%0.1-%1	%7	ENS: - KNS: -	EGI: %13 artma KGI: -

Cui vd., (2011)	Parafin wax ENS:52-54 °C KNS:-	CNF D:200nm	%1-%10	%45	ENS: Azalma KNS: Artma	EGI: Yok KGI: -
Yu vd., (2013)	Parafin ENS:58-60 °C KNS: -	CNF D:15- 200nm, L:10-30 µm, P:>95	%1-%4	%20	ENS:- KNS:-	EGI:- KGI: -
Fan vd., (2013)	Parafin wax ENS:58.8°C KNS:-	CNF D:150-200 nm, L:10-30 µm, P:>95	%1-%5	%15	ENS: Azalma KNS: Azalma	EGI: Azalma KGI: Azalma

Literatürde FDM'lerin içerisine nanoparçacık katkılanarak ısı özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik 2005 yılında yapılan ilk çalışmada katkı malzemesi olarak CNF kullanılmıştır. Elgafy ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada 67°C erime sıcaklığına sahip parafin wax içerisine kütlece % 1-4 CNF katkılayarak ısı iletkenlikteki değişimi incelemişlerdir. Katkılanan CNF kütle miktarının artmasına bağlı olarak elde edilen CNF/FDM kompozitinin ısı iletkenliğinin önemli derecede arttığını ve bunun sonucu olarak soğuma hızının arttığını vurgulamışlardır. Isı iletkenlikteki en fazla iyileştirme en yüksek katkılama bölüntüsünde %38 olarak sağlanmıştır. Elgafy vd. (2005) erime/katılma sıcaklıkları ve gizli ısılarıyla ilgili herhangi bir ölçüm yapmamışlardır. Shaikh vd.(2008) ise Elgafy gibi parafin wax'a aynı ortalama çapa sahip fakat kütlece daha düşük bölüntülerde (%0,1-%1) CNF katkılayarak ısı iletkenlikte %7 civarında bir iyileştirme sağlamışlardır. Benzer biçimde Shaikh vd.(2008) erime ve katılma sıcaklıklarıyla ilgili ölçüm yapmamışlardır. Fan vd. (2013) erime sıcaklığı 58.8°C olan parafin wax'a %1-%5 bölüntülerde CNF katkıladıkları çalışmalarında en yüksek katkılama bölüntüsü için ısı iletkenlikte %15 iyileştirme elde etmişlerdir. Yu vd.(2013) sadece ısı iletkenliği iyileştirmek için yaptıkları çalışmalarında 58-60°C erime sıcaklığına sahip parafin içerisine %1-%5 bölüntüde CNF katkılayarak ısı iletkenliği %20 artırmışlardır. Cui vd.(2011) erime sıcaklığı 52-54°C olan parafin wax'a hem CNT hemde CNF nanoparçacıkları kütlece %1-%10 bölüntülerde katkılayarak termal özelliklerdeki değişimleri karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar ışığında kompozit FDM'lerin ısı iletkenliklerinin CNF ve CNT yükleme içeriklerine bağlı olarak arttığını ortaya koymuşlardır. Katkı maddesi olarak CNT ve CNF kullanılması durumunda ısı iletkenlikte elde edilen iyileştirmeler sırasıyla %25 ve %45 olarak belirlenmiştir. Isı iletkenlikteki iyileştirmelerdeki bu farklılığın

CNF'nin CNT'ye göre parafin içerisinde daha homojen olarak dağılmasıyla ilişkili olduğunu söylemişlerdir.

Literatürde grafen, grafen nanoyaprak, grafit nanofiber, grafit tozu, nanografit nanomalzemeleri katkılanarak elde edilen kompozitlerinin termal özelliklerinin değişimi çizelge 1.4'de verilmiştir.

Çizelge 1.4. Grafen, grafen nanoyaprak, grafit nanofiber, grafit tozu, nanografit nanomalzemeleri katkılanarak elde edilen FDM/GnP, FDM/GFG, FDM/GNF, FDM/NG kompozitlerinin termal özelliklerinin incelendiği literatür çalışmaları ve sonuçları

Referans	FDM ve erime-katılma sıcaklığı	Nanomalzeme ve ortalama boyutlar	Kütlece % bölüntü	Isıl iletkenlik katsayısında ölçülen maksimum artış miktarı	Erime ve katılma sıcaklık değişimi	Erime ve katılma gizli ısı değişimi
Pincemi vd., (2008)	-	NG,ENG,GFG NG:D:400 μm ENG: ρ : 3 kgm^{-3} GFG:D:50 ve 500 μm	%1-%8	Artış	ENS: Azalma KNS:-	EGI: Azalma KGI: Azalma
Kim vd., Drzal (2009)	Parafin wax (n-docosane) ENS:51.1 $^{\circ}\text{C}$ KNS:55.2 $^{\circ}\text{C}$	GnP D: 15 μm , H:<10nm	%1-%7	3 kat	ENS: Azalma KNS: Artma	EGI: Yok KGI: Yok
Sanusi vd., (2011)	Parafin ENS:56+2 $^{\circ}\text{C}$	GnF D:2-100nm L:100 μm	%10	%48	ENS:- KNS:-	EGI:- KGI:-
Xiang vd.,Drza l (2011)	Parafin wax (n-docosane) ENS:53-57 $^{\circ}\text{C}$ KNS:-	GnP (GnP-15,GnP-1) GnP-15: D:15 μm ,H:10nm,A: 20-40 m^2/g GnP-1: D:1 μm ,A:100-130 m^2/g	%1- %10	10 kat	ENS: Yok KNS: Yok	EGI: Artma KGI: Artma
Yavari vd., (2011)	Octadecanol ENS: 66 $^{\circ}\text{C}$ KNS:-	Grafen ρ : 0.812 g/cm^3	%1-%4	2.5 kat	ENS: Artma KNS: Azalma	EGI: %15.4 Azalma KGI: -
Chen vd., (2013)	Parafin ENS:53.52 $^{\circ}\text{C}$ KNS:60.99 $^{\circ}\text{C}$	GnP H:30-100nm, P:%99.9	%1- %10	4 kat	ENS: Artma KNS: Azalma	EGI: %18 Azalma KGI:-
Shi vd., (2013)	Parafin (n-Eicosane) ENS:61.6 $^{\circ}\text{C}$ KNS:-	GnP D:700 μm ,P:%99.99 A:Grafen:876.2 m^2/g ,A:GnP:13. m^2/g , ρ :2.25 g/cm^3	%1- %10	10 kat	ENS:- KNS:-	ENGI:- KNGI:-

Li,(2013)	Parafin ENS:28.8- 30.4 °C KNS:-	NG D:35 nm P:%99.95	%1- %10	7,5 kat	ENS: Azalma KNS: -	EGI: Azalma KGI:-
Fang vd., (2013)	Parafin (n-Eicosane) ENS:37°C KNS:-	GNP D:5-10 µm H:4-20nm P:%99.5	%1- %10	4 kat	ENS: Azalma KNS: -	EGI: %19 Azalma KGI: -
Yu vd., (2013)	Parafin ENS: 58-60 °C KNS: -	GNP D:5-10 µm, H:4-20 nm P:>99	%1-%4	2 kat	ENS:- KNS:-	EGI:- KGI:-
Fan vd., (2013)	Parafin wax ENS:59°C KNS:-	GNP D:5-10 µm, H:4-20 nm, P:>99	%1-%5	1,66 kat	ENS: Azalma KNS: Azalma	EGI:- KGI:-

Literatürde FDM'lerin ısı iletkenliklerinin artırılması için karbon tabanlı nanoparçacık katkılarına yönelik birtakım çalışmalar bulunmaktadır. Bu bölümde FDM içerisine grafit nanofiber(GNF), grafit nanoyaprak(GnP) gibi malzemeler belirli miktarlarda katkılanarak FDM'lerin ısı özellikleri incelenmiştir.

Organik FDM içerisine katkı malzemesi olarak Grafit nanoyaprak (GnP) (Kim vd. 2009, Xiang vd. 2011, Li vd. 2011) ve Grafen nanoyaprak (GNP) (Yu vd 2013, Yavari vd. 2011) katkılanması durumunda ısı iletkenlikteki iyileşme MWCNTs ve CNF'e göre oldukça yüksektir. Bununla birlikte MWCNTs ve GNP katkılanan kompozitlerin ısı iletkenlikleri arasında gözlemlenen bu farkın altında yatan fiziksel mekanizma şimdiye kadar tam olarak açıklanamamıştır. Yaklaşık olarak yığın ısı iletkenlik değerleri aynı olan karbon tabanlı nanoparçacıkların katkılandıkları FDM'lerin ısı iletkenliklerini farklı oranda artırmasına ilişkin genel kabul; Gnp ve GNP'nin MWCNTs'e göre iki boyutlu düzlemsel bir yapıya sahip olması nedeniyle nanoparçacık-FDM arayüzeyindeki ısı direncin daha düşük olması şeklindedir (Shi vd. 2013). Kim vd. (2009) 51-55°C erime sıcaklığına sahip parafin içerisine kütlece %1-%7 bölüntülerde GnP katkılanmışlardır. Kim vd. (2009) taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen morfolojiden GnP'nin parafin içerisinde homojen dağılım gösterdiğini belirlemişlerdir. Katkılanan en büyük kütle bölüntüsü için ısı iletkenlikte 3 kat artış olduğunu buna ilaveten erime sıcaklığında azalma, katılma sıcaklığında artma, gizli ısılarda ise herhangi bir değişiklik olmadığını bildirmişlerdir. Xiang

vd.(2011) 53-57°C erime sıcaklığına sahip parafin wax içerisine farklı yüzey alanlarına (100-130m²/g ve 20-40m²/g) sahip iki tip GnP'yi kütlece %2-%8 bölüntülerde katılamışlardır. Isıl iletkenlikte 10 kata varan bir iyileşme olduğunu ve termal kararlılığın oldukça kararlı olduğunu bildirmişlerdir. Katkılanan GnP bölüntüsüne bağlı olarak erime/katılaşma sıcaklığında önemli bir değişiklik olmadığını buna karşın erime/katılaşma gizli ısılarının arttığını belirlemişlerdir. Sanusi vd. (2011) erime sıcaklığı 56±2°C olan parafin içerisine %10 GnP katkıladıkları çalışmalarında ısıl iletkenliğin %48 arttığını bildirmişler diğer termal özellikler için herhangi bir ölçüm yapmamışlardır. Yavari vd.(2011) erime sıcaklığı 66°C olan octadecanol faz değişken malzeme içerisine %4 Grafen katkılayarak ısıl iletkenliği 2.5 kat artırmışlardır. Buna karşın %4 Grafen katkılanan octadecanolün erime gizli ısısının %15.4 azaldığını belirlemişlerdir. Buna ilave olarak erime sıcaklığının arttığını, katılaşma sıcaklığının ise azaldığını bildirmişlerdir. Octadecanol faz değişken malzeme içerisine Grafen katkılanması durumunda ısıl iletkenlikte elde edilen iyileşmenin literatürde daha önce gümüş nanotel ve CNT katkılanarak elde edilen iyileştirmelerden belirgin bir biçimde daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Fang vd. (2013) 37°C erime sıcaklığı 37°C olan parafin içerisine kütlece %1-%10 bölüntülerde GNP katkılayarak ısıl iletkenlikte 4 kat artış sağlamışlardır. Fang vd. (2013) aynı bölüntü için erime gizli ısısının %19 azaldığını bildirmişlerdir. Yu vd. (2013) benzer şekilde parafine (erime sıcaklığı 58-60°C) kütlece %1-%4 bölüntülerde GNP katkılanmasıyla ısıl iletkenlikte 2 kat artış gerçekleştirmişlerdir. Yu vd. (2013) erime/katılaşma sıcaklığı ve gizli ısılar için ölçüm yapmamışlardır. Chen vd.(2013) yapmış oldukları çalışmada 3.5°C erime sıcaklığına sahip parafin içerisine kütlece 1-10% GnP katkılayarak ısıl performans özelliklerini incelemişlerdir. Parafin içerisine kütlece %10 GnP katkılanması durumunda ısıl iletkenlikte 4 kata varan bir iyileşme, enerji depolama kapasitesinde ise %16 civarında azalış olduğunu belirlemişlerdir. Fan vd.(2013) yapmış oldukları çalışmada 59°C erime sıcaklığına sahip parafin içerisine kütlece %1-%5 bölüntülerde GNP katkılayarak ısıl iletkenliğin 1.66 kat arttığını bildirmişlerdir. Fan vd.(2013) ısıl iletkenliğindeki bu artışa karşın erime sıcaklığı ve katılaşma sıcaklığının azaldığını belirlemişlerdir. Li vd.(2013), 28.8-30.4°C erime sıcaklığı olan parafine kütlece %1-%10 bölüntülerde NG eklenmesiyle ısıl iletkenlikte 7.5 kat artış sağlamışlar buna karşın erime sıcaklığı ve gizli ısısında azalma meydana

geldiğini bildirmişlerdir. Pincemin vd. (2008) farklı tipte katkı maddelerini FDM içerisine katkılacakları çalışmalarında ısı iletkenlikte iyileşme diğer termal özelliklerde ise azalma olduğunu göstermişlerdir.

Nanoparçacık katkılanarak ısı iletkenliğinin artırılması istenilen bir durum olmasına rağmen diğer termal özelliklerin (erime-katılma sıcaklıkları, gizli ısı değerleri vb) çok fazla değişmemesi gerekmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların birçoğunda bu özellikler ile ilgili ayrıntılı bir çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bununla birlikte mevcut bazı çalışmalarda erime/katılma sıcaklığı, erime/katılma gizli ısı gibi diğer termal özelliklerin katkılanan nanoparçacık bölüntüsüne göre değişimi ile ilgili bazı çelişkili bilgiler verilmiştir. Bazı çalışmalar bu özelliklerin azaldığını, bazı çalışmalar değişmediğini ve bazı çalışmalar ise arttığını belirtmektedir. Buna ek olarak mevcut çalışmaların birçoğunun sistematik bir incelemeden uzak olarak; *farklı organik FDM'ler kullanılarak, farklı nanoparçacıklar kullanılarak, farklı nanoparçacık bölüntüleri* katkılanarak gerçekleştirildiği sonucuna varılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, çeşitli metal/metaloksit nanoparçacıklar ve karbon tabanlı nanoparçacıkların organik bir FDM'nin termal özellikleri üzerindeki etkisinin ayrıntılı olarak araştırılmasıdır. Bu amaçla, boyutu 10-80 nm arasında değişen CuO, TiO₂, Al₂O₃, ZnO, MgO gibi metaloksit nanoparçacıkları ve MWCNT, Grafen gibi karbon tabanlı nanoparçacıkları herhangi bir arayüz malzemesi kullanmadan bir organik FDM içerisine belirli bölüntülerde katkılanarak termal iletkenlikteki artış oranları ve diğer termal özelliklerdeki değişimler ayrıntılı olarak araştırılacaktır. Bu sayede literatürde henüz yapılmamış bir çalışma olarak gerek metal/metaloksit nanoparçacıkların gerek ise karbon tabanlı nanoparçacıkların FDM/nanoparçacık kompozitinin termal özelliklerine etkisi sistematik olarak karşılaştırılmış olacaktır. Ayrıca bu çalışma birçok mühendislik alanında uygulanma potansiyeli bulunan faz değişken malzemelerin düşük ısı iletkenliklerinin nanoteknoloji kullanılarak artırılması ve bu iyileşme sağlanırken asıl önemli özelliklerin (erime sıcaklığı, gizli ısı değerlerinin) nasıl değiştiğinin belirlenmesine çalışılacaktır. Bu sayede FDM'lerin uygulamalarda kullanılabilirlikleri araştırılacaktır. FDM'lerin daha verimli bir biçimde kullanılabilmeleri; yer kısıtlamaları, güvenilirlik, ekonomik gibi kısıtların önemli olduğu uygulamalarda alternatif çözüm olarak ön plana çıkmasına neden olacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde sırası ile A82 organik FDM içerisine kütlece farklı bölüntülerde gerek metal/metaloksit gerekse de karbon tabanlı nanomalzemelerin katkılanmasında izlenen yöntem ve elde edilen Nanoparçacık/FDM kompozitlerin ısı özelliklerinin DTK ve ısı iletkenliklerinin KD2 Pro ile belirlenmesinde izlenen yöntem detaylandırılmıştır. Erime sıcaklığı 82°C olan parafin wax organik FDM (A82), ticari olarak Phase Change Material Products Limited (United Kingdom)’ten tedarik edilmiş olup herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak kullanılan; Ag, Al₂O₃, TiO₂, MgO, ZnO, CuO, MWCNTs US Research Nanomaterials (USA) şirketinden, 6-8 nm kalınlığa ve 150 m²/g yüzey alanına sahip GNP ise ticari olarak Skyspring Nanomaterials Inc (USA) şirketinden tedarik edilmiş olup herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Kullanılan nanoparçacık boyutları genellikle 20 nm civarında birbirine yakın olarak seçilmiştir. Bununla birlikte Al₂O₃ ve MWCNTs için iki farklı boyutta nanoparçacık boyutu kullanılarak aynı zamanda boyut etkisinin termal özellikler üzerindeki etkisi de belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada kullanılan metal/metaloksit nanoparçacıklar küresel biçimli olup özellikleri çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. A82 Organik FDM’nin katkılanmasında kullanılan metal/metaloksitler ve özellikleri

Nanoparçacık	Boyut (nm)	Saflık (%)	Yüzey Alanı (m ² /g)
Ag	OD:50-80	-	-
Al ₂ O ₃	OD:20	%99	15
Al ₂ O ₃	OD:80	%99	15
TiO ₂	OD:10-25	%99,5	60
MgO	OD:20	%99	60
ZnO	OD:18	%99,95	40-70
CuO	OD:<80	%99	18

Çalışmada karbon tabanlı nanoparçacık olarak MWCNTs ve GNP olmak üzere iki farklı nanoparçacık tipi kullanılmıştır. MWCNTs ve GNP’nin her ikisinde karbon tabanlı olmalarına rağmen şekilsel olarak birbirinden oldukça farklıdırlar.

MWCNTs tüp biçiminde iken GNP iki boyutlu plaka biçimindedir. Katkı maddesi olarak kullanılan karbon tabanlı nanoparçacıkların fiziksel özellikleri çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 A82 Organik FDM’nin katkılanmasıda kullanılan MWCNT ve GNP’nin özellikleri

Ticari olarak tedarik edilen FDM’ler	FDM’lerin boyutları(nm)	FDM’lerin Saflığı(%)	FDM’lerin Yüzey Alanı(m ² /g)
MWCNT	OD:50-80 ID:5-15 nm L:10-20 µm	%95	40
MWCNT	OD:20-30 ID:5-10 nm L:10-20 µm	%99	110
GNP	6-8	%99,5	120-150

2.1. Faz Değişken Malzemeler (FDM)/ Nanoparçacık Kompozitlerinin Hazırlanması ve Çevrimi

Ticari olarak temin edilen A82 FDM’ye kütlece %1-%5 bölüntü aralığında çeşitli metal/metaloksit ve karbon tabanlı nanoparçacıkların katkılanmasıda, aşağıda maddeler halinde açıklanan yöntem takip edilmiştir:

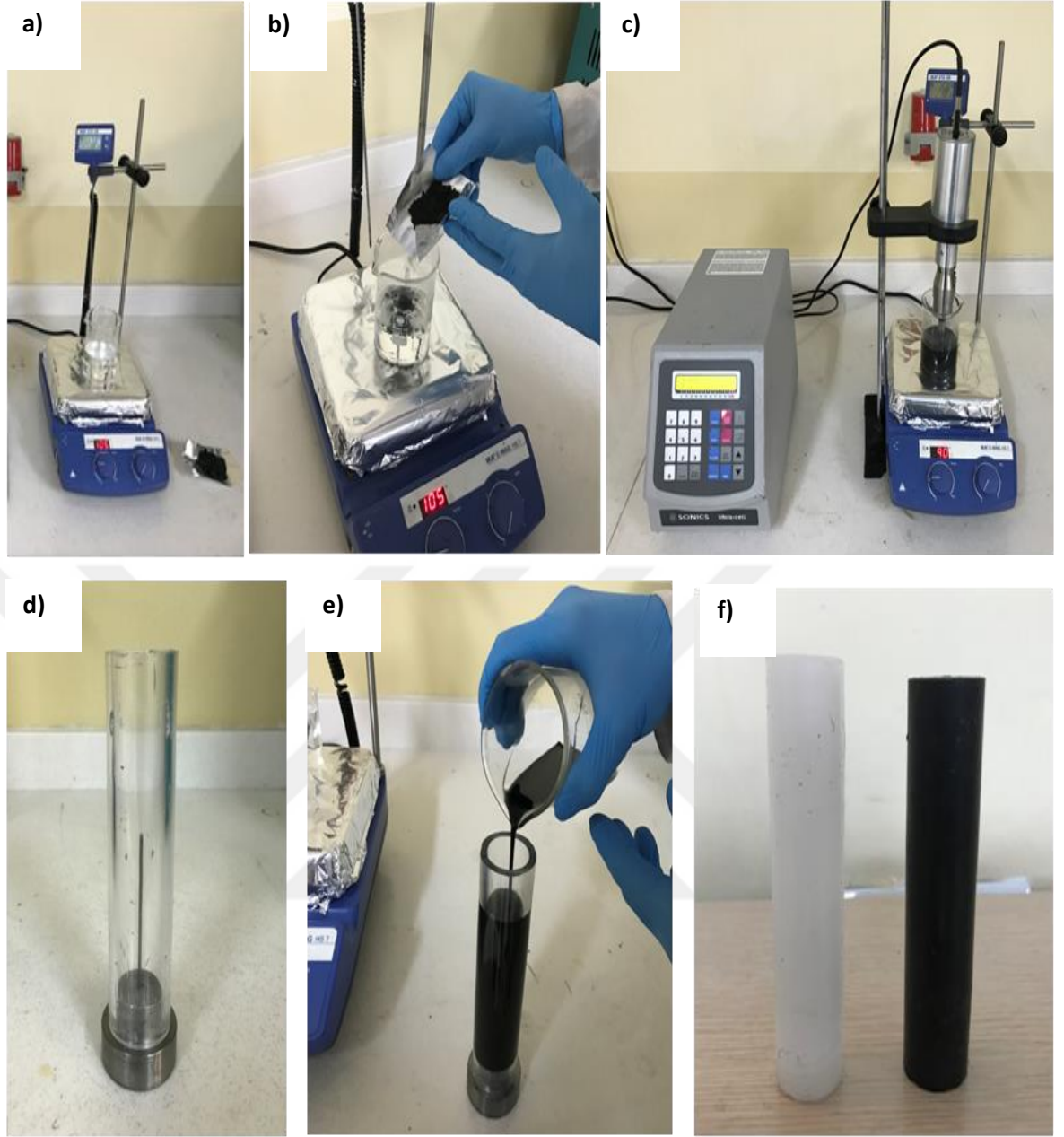
- Katkılanan kütlece nanoparçacık bölüntüsünün Nanoparçacık/FDM kompozitinin ısı iletkenliğini doğrudan etkilediği çok iyi bilinen bir gerçektir. Bu nedenle kompozitin ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi işleminde katkılanacak nanoparçacık miktarının belirlenmesi önemli bir adımdır. FDM içerisine katkılanacak nanoparçacık kütle bölüntüsü Eşitlik 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{x}{100} = \frac{m_{KNT}}{m_{KNT} + (m_{FDM})} \quad (2.1)$$

x: istenilen kütlece % bölüntü,

m_{nanoparçacık} : nanoparçacık kütlesi (g),

m_{FDM}: faz değişken malzeme kütlesi(g)



Şekil 2.1 Nanoparçacık/FDM kompozitlerinin hazırlanışı

- İlk olarak, şekil 2.1(a)'da gösterilen 85 gram A82 FDM, bir beher içerisine konularak ısıtıcı plaka üzerinde erime sıcaklığına getirilerek tamamen eritilmiştir.
- Eşitlik 2.1'den hesaplanan nanoparçacık miktarları sırasıyla kütlece bölüntü %1, %3 ve %5 olacak biçimde eriyik halde bulunan A82 FDM üzerine eklenmiştir (şekil 2.1(b)).
- Katkılanan nanoparçacıkların eriyik FDM içerisinde uniform olarak dağılmasını sağlamak amacıyla 750 W gücünde ultrasonik bir karıştırıcı (Sonics&Materials INC,USA) kullanılarak 30 dakikalık bir karıştırma işlemi

gerçekleştirilmiştir (şekil 2.1(c)). Karıştırma işlemi sırasında karışımın katılaşmaması için sıcaklık FDM erime sıcaklığının üzerinde tutulmuştur.

- Elde edilen eriyik kompozitler özel olarak tasarlanmış numune kalıbına dökülerek oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır (şekil 2.1(d-e)). Isıl iletkenlik ölçümlerinin yapılabilmesi için numunelerin belirli bir standarda göre hazırlanması gerekmektedir. Numune kalıbı Şekil 2.1(d)'de gösterildiği gibi 30 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde akrilik bir silindir ve silindir merkezine yerleştirilmiş yaklaşık 2 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde bir çubuktan oluşmaktadır. Oda sıcaklığında soğuyan numuneler daha sonra kalıptan çıkarılmakta ve merkezindeki delik bir matkap ucu kullanılarak 2.4 mm'ye genişletilmektedir. Bu sayede numuneler şekil 2.1(f)'de gösterildiği gibi merkezinde 2.4 mm çapında ve 100 m uzunluğunda bir delik bulunacak biçimde ısı iletkenlik ölçmeye hazır hale getirilmiştir.

Metal nanoparçacık katkılanarak elde edilen Nanoparçacık/FDM kompozitlerinin ölçüm numuneleri şekil 2.2'de MWCNTs ve GNP katkılanarak elde edilen kompozitlerin ölçüm numuneleri ise şekil 2.3'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 2.2 MO/A82 kompozitleri, **(a)** $\text{Al}_2\text{O}_3(80\text{nm})/\text{A82}$, **(b)** $\text{Al}_2\text{O}_3(20\text{nm})/\text{A82}$, **(c)** $\text{TiO}_2(10-25\text{nm})/\text{A82}$, **(d)** $\text{MgO}(20\text{nm})/\text{A82}$, **(e)** $\text{A82}/\text{ZnO}_2$ (Çinko oksit)-(18 nm)), **(f)** $\text{CuO}(<80 \text{ nm}) / \text{A82}$ kompoziti, Metal/A82 kompoziti, **(g)** $\text{Ag}(50-80 \text{ nm})/\text{A82}$ kompoziti



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.3 MWCNTs/A82 kompozitleri ve GNP/A82 kompozitleri **a)** MWCNTs(50-80nm)/A82, **b)** MWCNTs(20-30nm)/A82, **c)** GNP(6-8nm)/A82/GNP

2.2. Nanoparçacık/FDM Kompozitlerin Isıl İletkenliklerinin Ölçülmesi

Kütlece %1-%5 bölüntülerde nanoparçacık katkılanarak elde edilen kompozit numunelerin katı haldeki ısı iletkenlikleri şekil 2.4’de gösterilen KD2-Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı (Decagon Devices Inc, USA) kullanılarak ölçülmüştür. KD2-Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı katı numunelerin ısı iletkenliklerini TR-1 sensörü ile akışkanların ısı iletkenliklerini ise KS1 sensörü ile ölçebilen bir cihazdır. KD2- Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı hem sıvı hem de katı haldeki malzemelerin ısı iletkenliklerini 0.2-4 W/mK aralığında ölçmek için kullanılmaktadır. Tipik haliyle, bu ölçüm için prob, sıcaklık sensörü içinde bir ısıtıcı ile iğne içerir. İki iğne boyutu kullanılır:

1. 1.2 mm çapında ve 60 mm uzunluğunda KS-1,
2. 2.4 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda TR-1.[2]

KD2-Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı akışkan ve/veya katı formdaki malzemelerin ısı iletkenliklerinin belirlenmesinde kısa süreli sıcak tel yöntemini kullanmaktadır. Kısa süreli sıcak tel yöntemi özetle, uç etkilerini minimize etmek üzere uzunluk/çap oranı (L/D) çok yüksek seçilen bir tel’e uygulanan doğrusal ısı kaynağı sonucu telde meydana gelen sıcaklık değişiminin zamana göre ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Fourier yasasına göre testi gerçekleştirilecek akışkanın ve/veya katı malzemenin ısı iletkenliği yüksek ise, ısı verilen telde meydana gelecek sıcaklık değişimi düşük olacaktır. Buna karşın test akışkanının ve/veya katı malzemenin ısı iletkenliği düşük ise telde ölçülen sıcaklık değişimi yüksek olacaktır. Bu durumda akışkanın ısı iletkenliği ile telin sıcaklık değişimi arasındaki matematiksel ilişki, L/D oranı çok yüksek olan tel için silindirik koordinat düzleminde yazılacak enerji eşitliği ile aşağıdaki gibi verilir:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2) aşağıda, eşitlik (2.3) ve (2.4)’de tanımlanan sınır koşulları kullanılarak çözümlenir ise eşitlik (2.5)’de verilen sıcaklığın zamana göre değişim ifadesi elde edilir. Eşitlik (2.5) içerisindeki yüksek dereceden terimler ihmal edilir ve ısı iletkenlik ifadesi (k) yalnız bırakılır ise eşitlik (2.6)’da ısı iletkenliğinin analitik ifadesi elde edilir. [3]

$$T(t=0)=T_0 \quad (2.3)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\infty} = 0 \text{ ve } \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = \frac{q}{2\pi k} \quad (2.4)$$

$$T(r,t)=T_0+\frac{q}{4\pi k_{nf}}\left\{-\gamma+\ln\left(\frac{4\alpha_{nf}t}{r^2}\right)+\left[\frac{\left(\frac{r^2}{4\alpha_{nf}t}\right)}{1.1}-\frac{\left(\frac{r^2}{4\alpha_{nf}t}\right)^2}{2.2}+\dots\right]\right\} \quad (2.5)$$

$\gamma=0.5772$ Euler's sabiti

$$k=\frac{q}{4\pi}\frac{\ln(t_1/t_2)}{T_1-T_2} \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6) içerisinde tanımlanan her bir terim sırası ile;

k: testi yapılacak akışkanın ve/veya katı malzemenin ısı iletkenlik katsayısını,

q: tele verilen ısı yükünü,

T_1 : t_1 anında ölçülen sıcaklık değerini,

T_2 : t_2 anında ölçülen sıcaklık değerini göstermektedir.

Bu yaklaşım bir çok avantaja sahiptir. Birincisi, temas direnci etkilerinin esas olarak bu erken zamanlı verilerde görünür olmasıdır. Bu nedenle sadece zaman verileri analiz edilerek, numunenin termal iletkenliği daha iyi ölçülmüş olur. Diğer bir avantajı kesin sonuç veren, lineer en küçük kareler yöntemiyle çözülebilir olmasıdır. Doğrusal olmayan en küçük kareler analizine tabi tutulan aynı veriler, tek iğne problemi yerel minimuma karşı duyarlı olduğundan iterasyonda başlangıç noktasına bağlı olarak sonuçları geniş bir yelpazede verebilir fakat doğrusal küçük kareler yöntemiyle hesaplamak çok daha hızlıdır.

Bu çalışmada, katı halde elde edilen ölçüm numunelerin ısı iletkenlik ölçümleri şekil 2.4'te gösterildiği gibi 2.4 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda TR-1 sensörü ve KD2-Pro cihazı kullanılarak gerek katkılanmamış gerekse de katkılanmış FDM'ler için elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerin KD2-Pro cihazında ısı iletkenliklerinin ölçülmesinden önce tedarikçi firma tarafından verilmiş olan ve ısı iletkenlik değeri bilinen test numunesinin ısı iletkenliği ölçülerek KD2-Pro doğrulanmıştır.



Şekil 2.4 KD2-Pro ısı iletkenlik ölçüm cihazı

Bütün numuneler için ölçümler şekil 2.5'te gösterilen iklimlendirme cihazı (JEIO TECH) kullanılarak 20°C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Ölçümlere başlamadan önce numunelerin çevresi ile termal dengeye gelmesi beklenmiştir. Her bir numune için en az beş ölçüm gerçekleştirilmiş olup % 0.5 standart sapmaya sahip ortalama değerler sonuç olarak verilmiştir. Ölçümlerin doğruluğu 0.2-4 W/mK aralığı için $\pm 10\%$ 'dur.



Şekil 2.5 JEIO TECH iklimlendirici

2.3. Nanoparçacık/FDM Kompozitlerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Özelliklerinin Belirlenmesi ve Çevrimi

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) sıvı ve/veya katı haldeki numunelerin ısı kapasite değerlerinin sıcaklık ile değişiminin belirlenmesi için kullanılan bir termal analiz metodudur. DTK ile test numunesinin; erime/katılaşma sıcaklıkları ve erime/katılaşma gizli ısıları ölçülebilmektedir. Bu çalışmada, farklı nanoparçacıklar ile katılanan A82 FDM'lerin erime/katılaşma sıcaklıkları ve erime/katılaşma gizli ısıları şekil 2.6'da gösterilen Shimadzu (DTK, Shimadzu Corporation, Japan) marka diferansiyel taramalı kalorimetre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6 Shimadzu DTK-60 diferansiyel taramalı kalorimetre

DTK özelliklerinin belirlenmesi için öncelikle Nanoparçacık/FDM kompozitlerini içeren numunelerin DTK cihazında ölçüm yapmaya uygun biçimde hazırlanması gerekmektedir. Bunun için istenilen miktarda nanoparçacık/FDM kompozitinin bir kap içine hapsedilmesi gerekmektedir. DTK numunesi hazırlanma aşamaları aşağıda özetlenmiştir:

- i)** Öncelikle kompozitlerden alınan parçacıklar toz haline getirilmiştir,
- ii)** Toz haline getirilen nanoparçacık/FDM kompoziti 0.01 mg hassasiyete sahip bir elektronik terazi (Shimadzu Corporation, Japan) ile yaklaşık olarak 5 mg civarında tartılarak pan adı verilen özel bir alüminyum kap içerisine konulmuştur,
- iii)** Son olarak alüminyum kap, kapağı ile kapatılarak özel bir press makinesi ile sıkıştırılmak suretiyle numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler şekil 2.7’de gösterilen DTK’deki bölüme yerleştirildikten sonra uygun sıcaklık programının girilmesiyle analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.7 DTK’de ısı analiz testi yapılacak malzeme numunesinin hazırlanmasında gerçekleştirilen ön hazırlık basamakları

Nanoparçacık katkılanan tüm kompozitlerin DTK özelliklerinin ölçülmesine başlanmadan önce Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazının doğruluğunun test edilmesi gerekmektedir. Ölçümlere başlamadan önce DTK cihazının kalibrasyonu erime başlangıç sıcaklığı ve erime gizli ısısı bilinen yüksek saflığa sahip standart indium numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DTK ölçümleri 2°C/dk ısıtma/soğutma hızında ve 20°C-180°C aralığında yapılmıştır. DTK cihazının kalorimetrik hassasiyet ve sıcaklık doğruluğu sırasıyla $\pm 1\%$ ve $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 'dir. Literatürde, herhangi bir malzemenin DTK'den elde edilen erime başlangıç sıcaklığı, o malzemenin erime sıcaklığı olarak kabul edilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada, DTK analizi yapılan malzemelerin erime başlangıç sıcaklığı "erime sıcaklığı" olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 2.3 DTK kalibrasyon standart değerleri

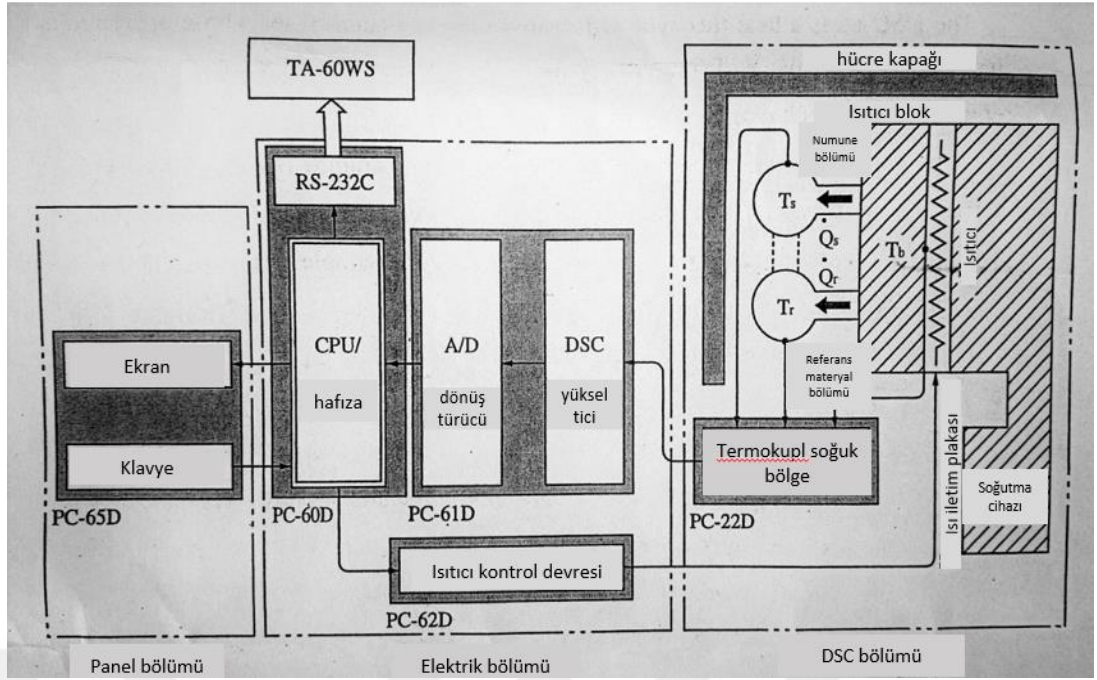
Standart	Teb ($^\circ\text{C}$)	Gizli ısı (H) (J/g)
Indium	156,60	28.45

Çizelge 2.4 Saf Indium metali için 2 $^\circ\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızı uygulanarak DTK'den elde edilen erime sıcaklığı ve gizli ısı değerleri

Isıtma hızı ($^\circ\text{C}/\text{dk}$)	Teb ($^\circ\text{C}$)	Tep ($^\circ\text{C}$)	Gizli ısı (H) (J/g)
2	156,405	156,49	28,09

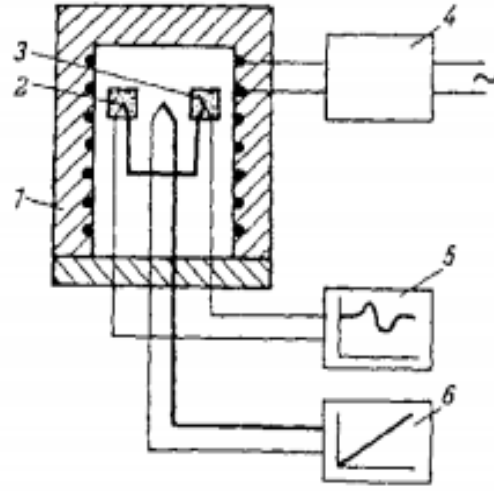
Karşılaştırma sonuçları $<\pm 1$ hassasiyetinde ise sonuçların doğru olduğu aksi takdirde cihaza kalibrasyon yapılması gerektiği sonucu çıkarılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan DTK cihazının kalibrasyonu gerçekleştirilmiş olmakla birlikte termal analizi yapılan kompozitlerin DTK analizinden elde edilen sonuçlarının doğru olduğunu söylemek mümkündür. Buna ek olarak, her ölçümden sonra DTK kalibrasyonu, saf indium metali kullanılarak tekrar gerçekleştirilmiştir. Literatürde saf indiumun erime sıcaklığı 156,60°C, gizli ısısı 28,45 J/g iken ölçülen saf indiumun erime sıcaklığı 156,405 $^\circ\text{C}$, gizli ısısı 28,09 J/g'dır.

DTK-60 ısı akışı tipi bir diferansiyel tarama kalorimetresi olup çalışma prensibi diferansiyel termal analiz (DTA) ile aynıdır. DTK-60'ın yapısı şematik olarak şekil 2.8'de gösterilmiştir:



Şekil 2.8 DTK-60'ın yapısı

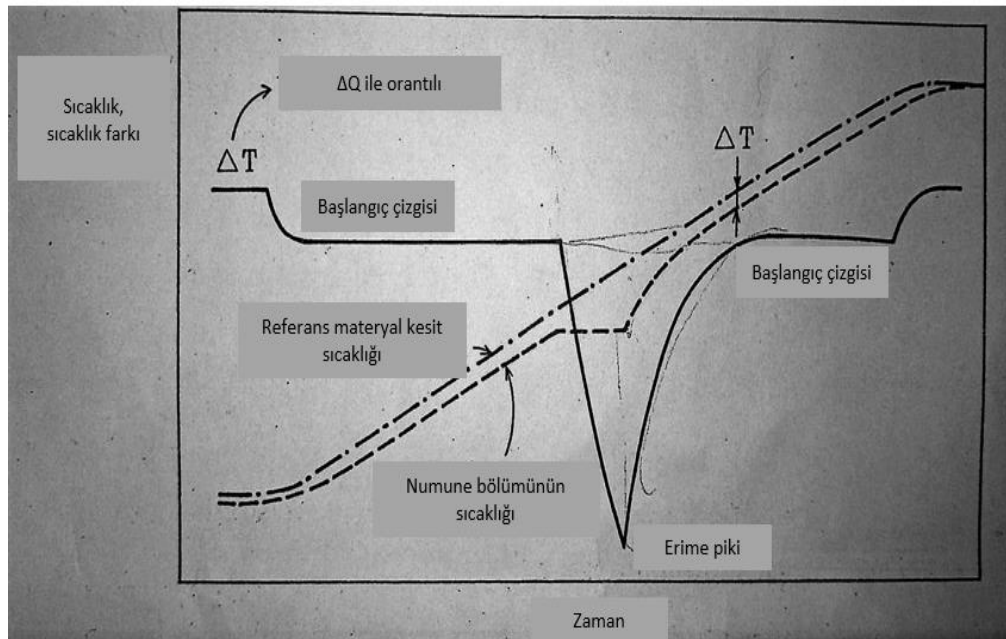
Isıtıcıya güç sağlanması durumunda ısıtıcı blok sıcaklığı (T_b) kontrollü biçimde belirlenen programa göre yükselir veya düşer. Buna paralel olarak bir ısı rezistansı aracılığıyla ısıtılan ısıtıcı bloktan birim zamanda numune bölümüne ve referans numune bölümüne transfer edilen sırasıyla Q_r ve Q_s ısıları sayesinde numune sıcaklığı (T_s) ve referans numune sıcaklığı (T_r) programa uygun biçimde artar veya azalır. Bu esnada numune bölümünün sıcaklığı ve numune bölümünün sıcaklığının referans numunenin sıcaklığından olan sapması $\Delta T = T_s - T_r$ biçiminde belirlenir. Genellikle referans olarak seçilen malzeme, üzerinde çalışılan bir sıcaklık aralığında termal olarak inerttir. Ayrıca numunede termal olarak inert olduğu zaman geçici sıcaklık artışı veya düşüşünden sonra ısı kapasiteleri arasındaki fark yüzünden numune sıcaklığı uygun bir sıcaklık değerinde stabil hale gelir. ΔT sinyallerinin zamana göre veya numune sıcaklığına (T_s) göre çizdirilmesiyle elde edilen eğrilere temel çizgisi olarak adlandırılır. Şekil 2.9'da, DTK'nin şematik gösterimi daha yakından gösterilmektedir. İncelenen madde ve inert bir referans madde bir fırın içerisinde eş zamanlı olarak, aynı şartlar altında ısıtılmaktadır. Fırın içindeki sıcaklık artışı doğrusal olarak gerçekleşmektedir. Numune ve referansın her ikisi de termokupllara bağlıdır. Sıcaklıkların farklarına eşit olan gerilimler arasındaki fark ölçülür. [2]



Şekil 2.9 DTK'nin şematik gösterimi: 1. fırın, 2. örnek madde, 3. inert referans, 4.

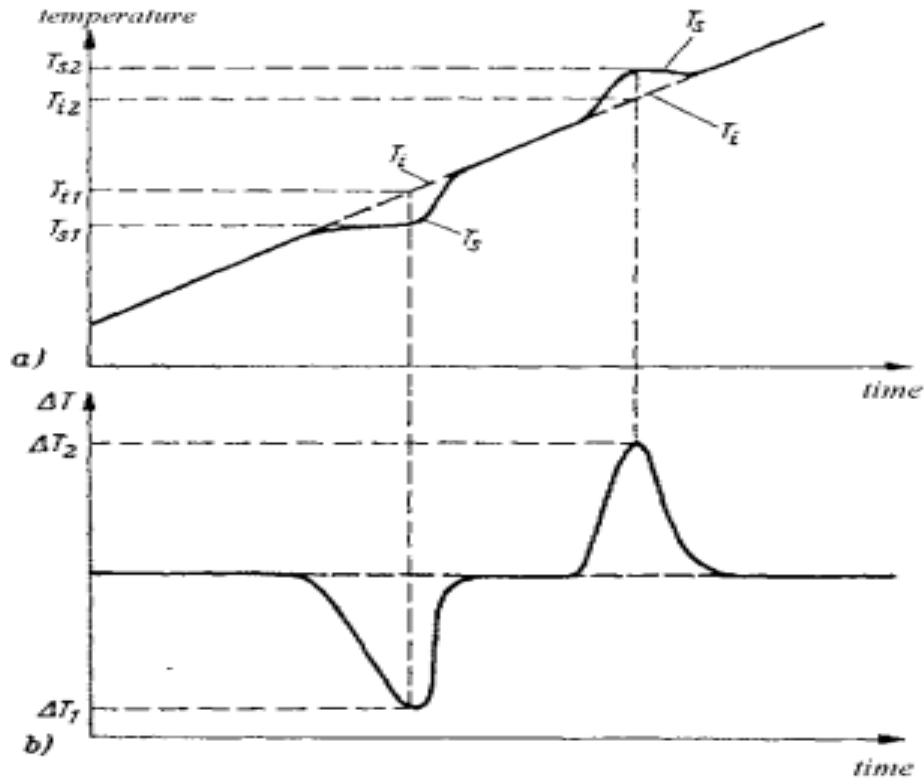
Isıtıcının kontrol birimi, 5. sıcaklık farkı göstergesi, 6. sıcaklık göstergesi[4]

Erime sırasında numune sıcaklığı sabit kalırken referans malzeme sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Bunun sonucunda ΔT , erime başlangıcından önce elde edilen değerlerden sapmaya başlar. Erime sonlandığında numune sıcaklığı (T_s), referans numune sıcaklığına (T_r) kıyasla ısıtıcı bloktan oldukça farklıdır. Bu durumda ısıtıcı bloktan numune bölümüne büyük miktarda ısı akışı gerçekleşmekte ve hızlı bir biçimde denge konumuna ulaşılmaktadır. Başka bir deyişle ΔT tekrar temel çizgiye dönmektedir.



Şekil 2.10 Normal bir DTK eğrisi

DTK eğrisi; şekil 2.10'da gösterildiği gibi ΔT sinyallerinin zamana göre veya numune sıcaklığına göre çizdirilmesiyle elde edilen denge durumundaki temel çizgi, erime sırasındaki pik eğrisi ve erime sonrasında pik eğrisini takip eden temel çizginin birleştirilmesinden oluşmaktadır. Teorik olarak pik eğrisi altında kalan alan erime için gerekli ısıyı (erime gizli ısısı x numune miktarı) vermektedir. DTK-60, ΔT 'nin belirlenmesi için Chromel-Constantan, T_b ve T_s belirlenmesi için Chromel-Alumel thermocouple (ısıl çift) kullanmaktadır.



Şekil 2.11 DTK eğrileri: **a)** T_s : numunenin sıcaklık-zaman eğrisi, T_i : referansın sıcaklık-zaman eğrisi, **b)** sıcaklık farkı zamanlı eğrisi [4]

Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, tüketilen veya salınan ısı olmadığından kontrol ünitesinde termovoltaj göstermez. Çünkü referans ve numunenin sıcaklığı aynıdır ($T_s = T_i$) ve dolayısıyla $\Delta T = 0$ 'dır. Numune içindeki bir endotermik reaksiyon olduğunda, numune sıcaklığı referans sıcaklığına göre daha yavaş artar ($T_{s1} < T_{i1}$) ve $\Delta T_1 = T_{s1} - T_{i1}$ negatifse, sıcaklık farkına göre termovoltajı gösterir. Numunede egzotermik bir reaksiyon olması durumunda, numune sıcaklığı referans sıcaklığından daha hızlı bir şekilde artar. ($T_{s2} > T_{i2}$) $\Delta T_2 = T_{s2} - T_{i2}$ pozitifse, sıcaklık farkına göre uygun bir termovoltaj göstermektedir. DTK eğrisi, T_s ve T_i eğrisinin çıkarılmasıyla elde edilebilir. (şekil 2.11.(b))

Bu çalışmada, gerek metal/metaloksit gerekse de karbon tabanlı nanoparçacıklarla katkılanan nanoparçacık/FDM kompozitlerin erime/katılaşma sıcaklıkları ve erime/katılaşma gizli ısıları gibi termal özellikleri 2.6’da gösterilen Shimadzu (DTK, Shimadzu Corporation, Japan) marka DTK-60 diferansiyel taramalı kalorimetre ile analiz edilmiştir. DTK ölçümleri 2°C/dk ısıtma/soğutma hızında ve 30°C-120°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çevrim etkisinin erime/katılaşma sıcaklıkları ve erime/katılaşma gizli ısıları gibi termal özellikler üzerindeki etkilerini belirlemek için kütlece %5 MWCNTs/A82 ve %5 GNP/A82 kompozitlerinin başlangıç, 5, 10, 15 ve 20 çevrim için DTK ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde öncelikle katkılanmamış A82 organik faz değişken malzemenin ve gerek metal/metaloksit gerekse de karbon tabanlı nanoparçacıklarla katkılanan kompozit malzemelerin ısı iletkenlikleri ve DTK özellikleri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Ayrıca elde edilen yüksek ısı iletkenliğe sahip kompozitlerin termal kararlılığının belirlenebilmesi açısından erime/katılaşma çevrim etkisinin termal özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

3.1. Katkılanmamış Organik Faz Değişken Malzemenin Isı iletkenlik Değerleri

Bu bölümde; katkılanmamış organik FDM'nin ısı iletkenlikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Daha önce de tartışıldığı üzere organik FDM'lerin mühendislik uygulamalarında etkin olarak kullanılabilmesinin önündeki engel ısı iletkenliklerinin düşük (0.3-0.4 W/mK) olmalarıdır. FDM'lerin mühendislik uygulamalarında etkin olarak kullanılabilmesi için ısı iletkenliklerinin 1 W/mK civarına çıkarılması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, organik FDM'lerin ısı iletkenliklerinin arttırılmasına yönelik günümüze kadar literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ayrıntılı olarak verilmiş ve tartışılmıştır. Giriş bölümünde verilen literatür özetinden anlaşılacağı üzere organik FDM'lerin ısı iletkenliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan yenilikçi yöntemlerden birisi FDM içerisine nanoparçacık katkılayarak ısı iletkenlik değerlerinin arttırılmasıdır.

Hazırlanan nanoparçacık/FDM kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin ölçülmesine başlamadan önce kullanılan ısı iletkenlik ölçüm cihazının ölçüm hassasiyetinin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla şekil 3.1'de gösterildiği üzere ısı iletkenliği bilinen bir numunenin ısı iletkenliği bir kaç kez ölçülerek ölçülen ısı iletkenlik değerinin kabul edilebilir hassasiyet aralığında olup olmadığı belirlenmiştir. Gerçekleştirilen beş ölçüm ortalaması olarak ısı iletkenlik değeri 1.111 W/mK olarak belirlenmiş olup elde edilen değerin verilen hassasiyet aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1 KD2-Pro cihazının doğrulanması

Katkılanmamış FDM'nin ısı iletkenlik değeri belirlenmesi için gerçekleştirilen beş ölçüm sonuçları aşağıda çizelge 3.1'de verilmiştir. Burada öncelikle şunu belirtmek gerekir ki üretici firma, elde edilen ölçüm değerlerinin hata oranının (ϵ) 0.01 olması durumunda ölçülen değerlerin güvenilir olduğunu söylemektedir. Herhangi bir nanoparçacık ile katkılanmamış FDM'nin ısı iletkenlik değeri gerçekleştirilen beş ölçümün ortalaması olarak 0.308 W/mK olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.1 Katkılanmamış A82 için KD2-Pro cihazından okunan sonuçlar ve ortalama değerleri

ÖLÇÜM	K(W/mK)	T(°C)	ϵ
1.ÖLÇÜM	0,306	20,00	0,0024
2.ÖLÇÜM	0,310	20,24	0,0026
3.ÖLÇÜM	0,308	20,29	0,0021
4.ÖLÇÜM	0,310	20,32	0,0025
5.ÖLÇÜM	0,309	20,33	0,0023
ORTALAMA	0,308	20,24	0,0024

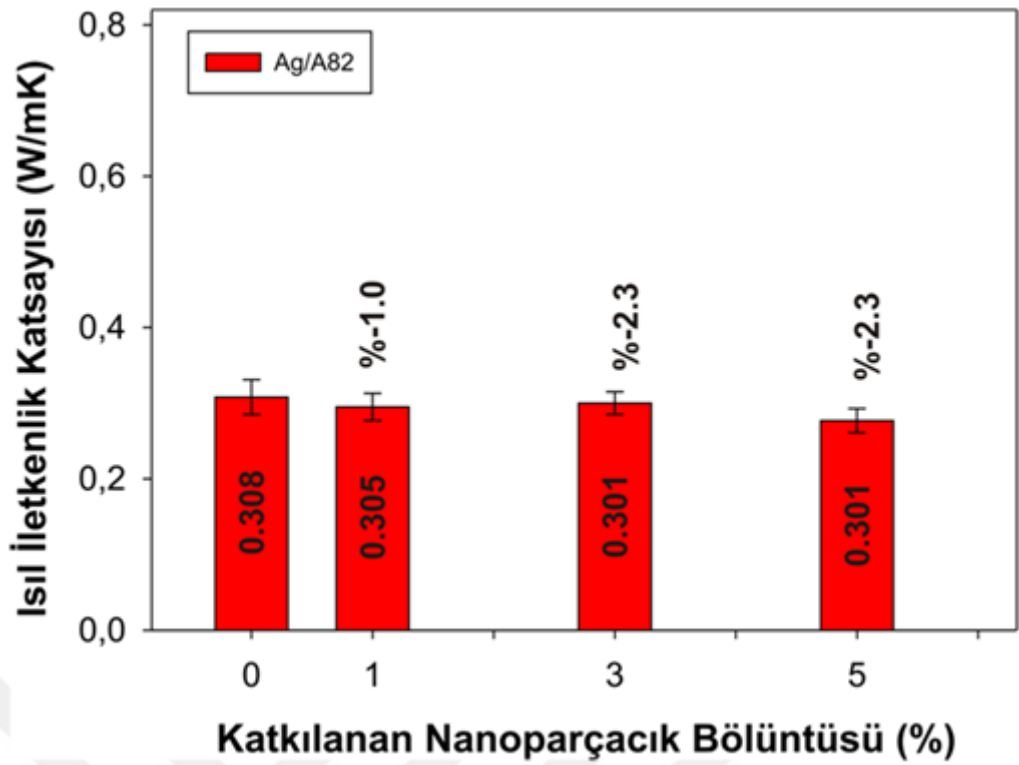
3.2. Metal/Metaloksit Nanoparçacıklarla Katkılanan Organik Faz Değişken Malzemenin Isıl İletkenlik Değerleri

Bu bölümde; 50-80 nm dış çapında Ag, 80nm'den düşük dış çaplarda CuO, 18nm dış çapında ZnO, 10-25nm dış çapa sahip TiO₂, 20nm dış çapa sahip MgO, 20nm dış çapa sahip Al₂O₃, 80nm dış çapa sahip Al₂O₃ ile kütlece %1, %3 ve %5 katkılanmış FDM kompozitlerin ısı iletkenlikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Metal nanoparçacık olarak 50-80 nm dış çapa sahip küresel nanoparçacıklar ile katkılanan FDM kompozitlerin ısı iletkenlik ölçüm değerleri çizelge 3.2'de ortalama ısı iletkenlik değerlerinin nanoparçacık bölüntüsüne göre değişimi şekil 3.2'de verilmiştir. Kütlece %1-%5 Ag/A82 kompozitlerinin ısı iletkenliklerinde katkılanan Ag nanoparçacık bölüntüsüne herhangi bir iyileşme olmadığı belirlenmiştir. Aksine katkılanan Ag nanoparçacık bölüntüsüne bağlı olarak kompozit ısı iletkenliklerinin daha da kötüleştiği tespit edilmiştir. Örneğin kütlece %5 Ag nanoparçacık katkılanan A82 FDM'nin ısı iletkenliğindeki kötüleşme yaklaşık %2.3 civarındadır. Bu durumun, Ag metal nanoparçacıkların FDM içerisinde homojen dağılmamaları ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Doğal konveksiyonla soğutmanın uzun sürmesi nedeniyle Ag nanoparçacıkların kompozit içerisinde çökmesi nedeniyle homojen dağılım sağlanamadığı söylenebilir. Buna bağlı olarak nanoparçacık/FDM arayüzeyindeki rezistansın artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik azalmaktadır. Bu durumda herhangi bir yüzey aktif malzemesi olmaksızın organik A82 FDM içerisine katkılanan Ag nanoparçacıkların hiçbir işe yaramadığı sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 3.2 Ag/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri

Ag(50-80 nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	HataOranı(ε)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0,305	20,34	0,0017
%3	0,301	20,38	0,0014
%5	0,301	20,87	0,0016



Şekil 3.2. Ag (50-80nm)/A82 kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değ erleri ve organik A82 FDM'ye göre yüzdelik değ iş im oranları

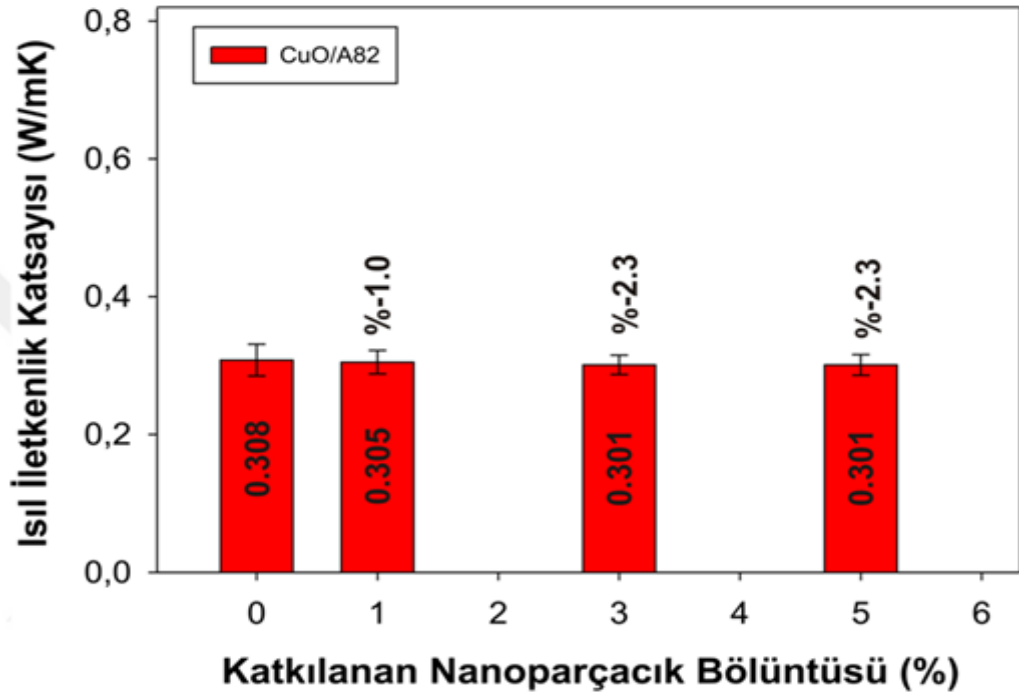
Genel olarak yapılan deneyler sırasında metaloksit nanoparçacıkların metal nanoparçacıklara göre FDM içerisine daha iyi dağıldığı (CuO hariç) gözlemlenmiştir. CuO/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değ erleri çizelge 3.3'de ısı iletkenliklerin katkılanan CuO nanoparçacık kütle bölüntüsüne göre değ iş imi şek il 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 CuO/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değ erleri

CuO(<80 nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	HataOranı(ε)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0.305	20.34	0.0017
%3	0,301	20,38	0,0014
%5	0,301	20,87	0,0016

Kütlece %1 CuO nanoparçacık katkılanan A82 FDM'nin ısı iletkenlik değ erleri 0,305 W/mK olarak ölçülürken, %3 ve %5 kütle bölüntüsünde katkılanan kompozitlerin ısı iletkenlikleri 0,301 W/mK olarak ölçülmüştür. Ag nanoparçacıklara benzer olarak CuO nanoparçacıklarında FDM içerisine iyi

dağılmadıkları numunelerin genel görünümünden anlaşılmaktadır. Benzer bir mekanizmayla CuO nanoparçacıklarının da soğuma sırasında çökmelerinin bu duruma neden olduğu söylenebilir. Bu durumda etkin bir network yapısının oluşmaması nedeniyle CuO/FDM kompozitinin de ısı iletkenliğinin katkılanan kütle bölüntüsüne göre kötüleştiği görülmüştür. Isıl iletkenlikte görülen kötüleşme %1 CuO nanoparçacık katkılanan kompozit için yaklaşık %1 iken %3 ve %5 CuO nanoparçacık katkılanan kompozit için yaklaşık %2.3 olarak belirlenmiştir.

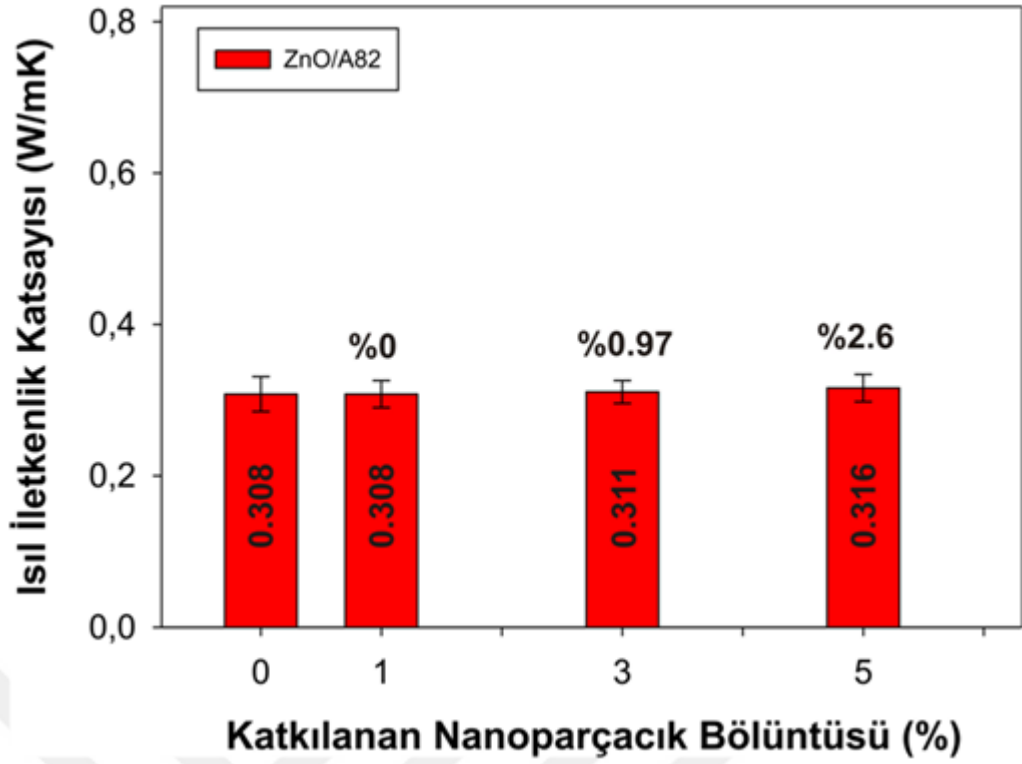


Şekil 3.3 Cu(<80nm)/A82 kompozitinin ortalama ısıl iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM'ye göre yüzdelik değişim oranları

18nm dış çapa sahip küresel ZnO nanoparçacıklarla %1, %3 ve %5 bölüntülerde katkılanan A82 FDM kompozitlerin ısıl iletkenlik ölçüm değerleri çizelge 3.4'te, ısıl iletkenliğin katkılanan kütle bölüntüsüne göre değişimi şekil 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 ZnO/A82 kompozitlerinin ısıl iletkenlik ölçüm değerleri

ZnO(18nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	HataOranı(ε)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0.308	20.21	0.0018
%3	0,311	20,29	0,0015
%5	0,316	20,23	0,0018



Şekil 3.4 ZnO(18nm)/A82 kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değeri ve organik A82 FDM'ye göre yüzdelik değışim oranları

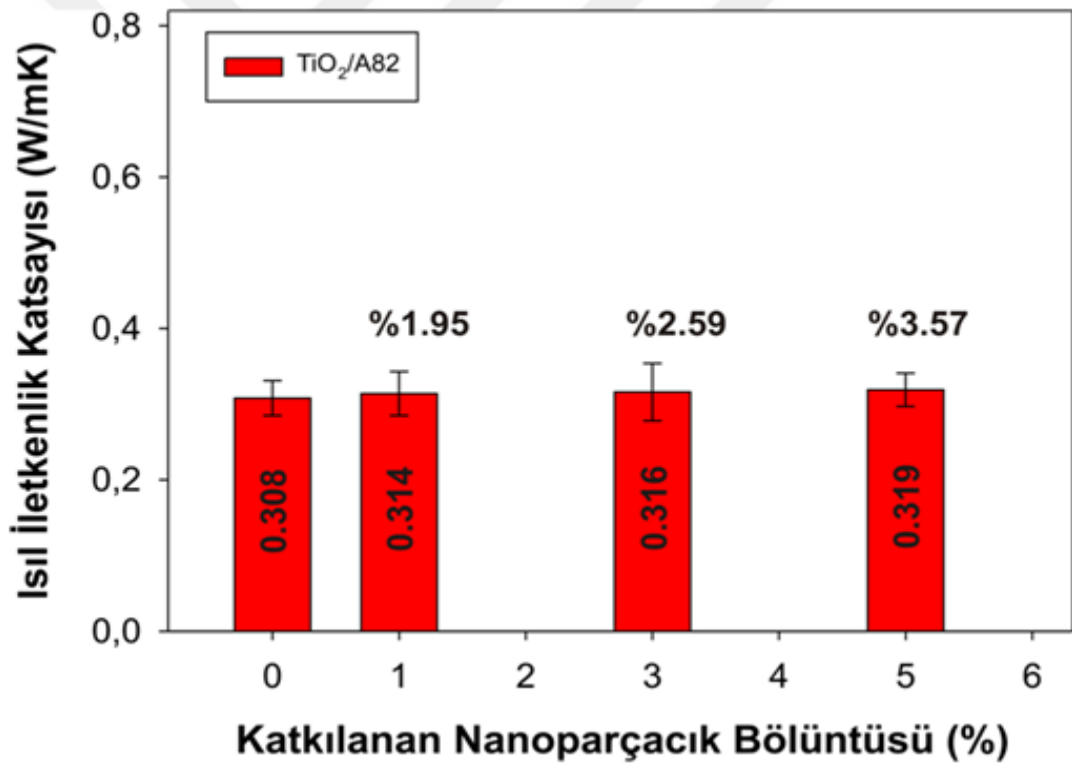
Genel görünüşten nanoparçacıkların FDM içersine homojen olarak dağıldığı izlenimine varılmasına rağmen ısı iletkenlik katsayısında kayda değeri bir iyileşme olmadığı görölmektedir. Örneğin %5 ZnO/A82 kompoziti için ısı iletkenlikteki iyileşme yaklaşık %2.6'dır. Bu durum katkılanan ZnO nanoparçacıkların FDM içersinde etkin bir network ağı oluşturmaması ile ilişkilendirilebilir.

Çalışmada kullanılan bir diğeri metaloksit nanoparçacık titanyumdioksit (TiO_2) olup sistematik bir karşılaştırma açısından ZnO nanoparçacıklar ile yakın boyutta olmasına dikkat edilmiştir. Bu anlamda 10-25 nm dış çapa sahip küresel TiO_2 nanoparçacıklarla %1, %3 ve %5 bölüntülerde katkılanan A82 FDM kompozitlerin ısı iletkenlik ölçüm değeri çizelge 3.5'te, ısı iletkenliğinin katkılanan kütle bölüntüsüne göre değışimi şekil 3.5'te verilmiştir. Katkılanan nanoparçacık kütle bölüntüsünün artmasına bağılı olarak ısı iletkenlikte doğrusal bir artış olduğundan bahsedilebilir. Bununla birlikte ısı iletkenlikteki doğrusal artış eğiminin oldukça düşük olduğu görölmektedir. A82 FDM içersine TiO_2 nanoparçacık katkılanması durumunda, ZnO nanoparçacık katkılanmasına benzer olarak ısı iletkenlikte kayda değeri bir iyileşmenin olmadığı söylenebilir. Öyle ki kütlece %5 TiO_2 katkılanan TiO_2 /A82 kompozitinin ısı iletkenlik değeriindeki iyileşme %3.57 civarındadır. Her

ne kadar gözle anlaşılamamasına rağmen TiO_2 nanoparçacıkların A82 FDM içerisine homojen olarak karışmaması nedeniyle etkin bir network ağının oluşamaması nedeniyle ısı iletkenlikte çok fazla bir iyileşme elde edilemediği düşünülmektedir.

Çizelge 3.5 $\text{TiO}_2(10-25\text{nm})/\text{A82}$ kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri

$\text{TiO}_2(10-25\text{nm})/\text{A82}$			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) ($^{\circ}\text{C}$)	HataOranı(ϵ)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0.314	20.21	0.0029
%3	0,316	20,26	0,0026
%5	0,319	20,28	0,0028

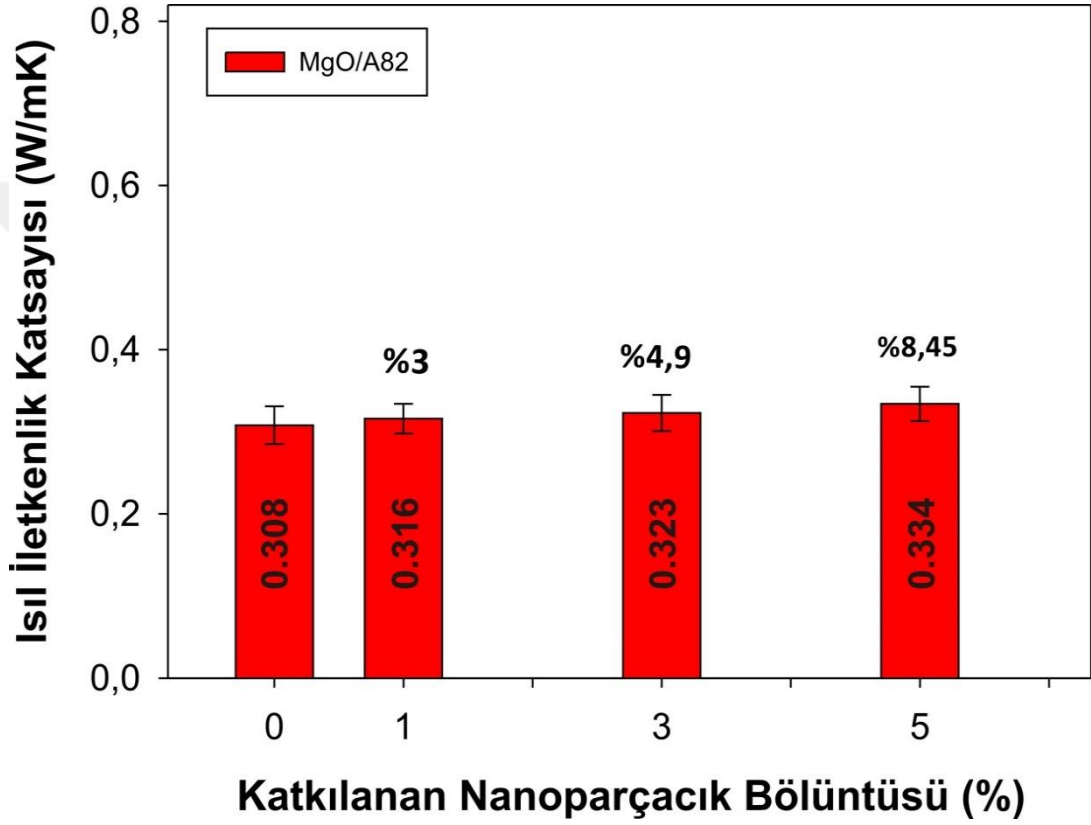


Şekil 3.5 $\text{TiO}_2(10-25\text{nm})/\text{A82}$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM'ye göre yüzdelik değişim oranları

20 nm dış çapa sahip küresel MgO nanoparçacıklarla %1, %3 ve %5 bölüntülerde katkılanan A82 FDM kompozitlerin ısı iletkenlik ölçüm değerleri çizelge 3.6'da, ısı iletkenliğinin katkılanan kütle bölüntüsüne göre değişimi şekil 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 MgO(20nm)/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değeri

MgO(20nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	HataOranı(ε)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0.316	20.37	0.0018
%3	0,323	20,27	0,0022
%5	0,334	20,24	0,0021



Şekil 3.6 MgO(20nm)/A82 kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değeri ve organik A82 FDM'ye göre yüzdelik değişim oranları

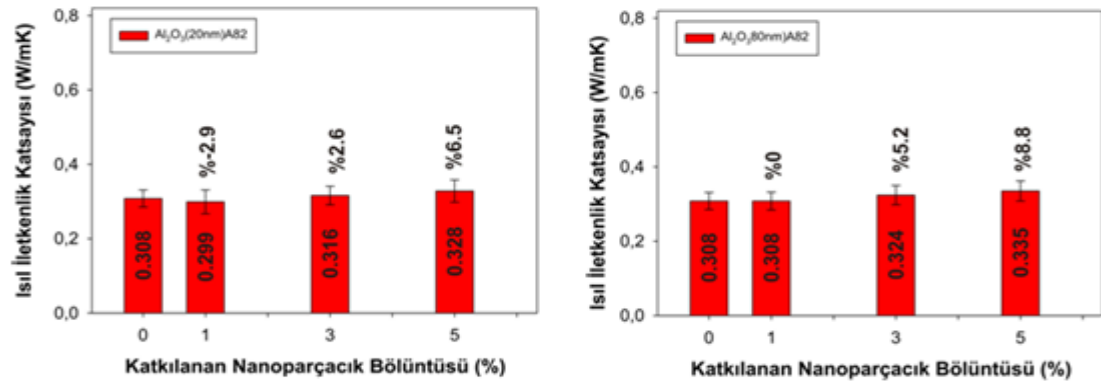
Yaklaşık olarak aynı boyutta (20nm) MgO nanoparçacığının katkı maddesi olarak kullanılması durumunda gerek ZnO gerekse de TiO₂ nanoparçacıklara göre ısı iletkenlikte daha fazla iyileştirme elde edilmiştir. %1, %3 ve %5 MgO nanoparçacıklarla katkılanan A82 FDM'lerin ısı iletkenliklerindeki iyileşmeler yaklaşık olarak sırasıyla % 3, % 4.9 ve % 8.45 olarak belirlenmiştir. Bu durumda herhangi bir arayüz madde kullanılmaması durumunda MgO nanoparçacıkların ZnO ve TiO₂ nanoparçacıklara göre A82 FDM içerisinde daha iyi bir dağılım

gerçekleştirdikleri ve buna bağlı olarak daha iyi bir ısı iletim network ağı oluşturdıkları söylenebilir.

Bu çalışmada organik FDM içerisine katkılanan son metaloksit nanoparçacıklar Al_2O_3 nanoparçacıklarıdır. Burada katkılayıcı madde olarak iki farklı dış çapa sahip Al_2O_3 nanoparçacık kullanılmıştır. Dış çapı 20 nm olan Al_2O_3 nanoparçacıkları, yukarıda kullanılan aynı çap civarındaki metaloksitlerle kıyaslama açısından, dış çapı 80 nm olan Al_2O_3 nanoparçacıkları ise alüminyumoksit nanoparçacıklar için çap etkisinin araştırılması açısından kullanılmıştır. Çapları sırasıyla 20 nm ve 80 nm olan Al_2O_3 nanoparçacıklarla kütlece %1, %3 ve %5 bölüntülerde katkılanan A82 FDM kompozitlerin ısı iletkenlik ölçüm değerleri çizelge 3.7’de, ısı iletkenliklerin katkılanan kütle bölüntüsüne göre değişimi şekil 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 $Al_2O_3(20nm)/A82$ ve $Al_2O_3(80nm)/A82$ kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri

$Al_2O_3(20nm)/A82$			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) ($^{\circ}C$)	HataOranı(ϵ)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0,299	20,19	0,0042
%3	0,316	20,42	0,0025
%5	0,328	20,27	0,0047
$Al_2O_3(80nm)/A82$			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) ($^{\circ}C$)	HataOranı(ϵ)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0,308	20,24	0,0024
%3	0,324	20,26	0,0026
%5	0,335	20,43	0,0027



Şekil 3.7. $Al_2O_3(20nm)/A82$ ve $Al_2O_3(80nm)/A82$ kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM’ye göre yüzdelik değişim oranları

Her iki tip Al_2O_3 nanoparçacığın kütlece %1 katkılanması durumunda elde edilen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{A82}$ kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin azaldığı veya değışmediğı görölmektedir. Isı iletkenlik değeriinde gözlemlenen bu düşüşün kütlece düşük bölüntülerde sürekli ve etkin bir network yapısının oluşamamasından kaynaklanabileceğı düşünölmektedir. %1 kütle bölüntüsünün üzerinde olmak kaydıyla kütle bölüntüsünün artmasına bağılı olarak ısı iletkenliğinin doğrusal olarak arttığı her iki boyuta sahip Al_2O_3 nanoparçacıklar için görölmektedir. Bununla birlikte çapın artmasının ısı iletkenlikteki iyileşmeyi olumlu yönde etkilediğı gözlemlenmiştir. Öyleki kütlece %5, 20nm dış çapa sahip $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FDM}$ kompozitinin ısı iletkenliğindeki iyileşme yaklaşık olarak %6.5 iken kütlece %5, 80nm dış çapa sahip $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FDM}$ kompozitinin ısı iletkenliğindeki iyileşme yaklaşık olarak % 8.8 olarak ölçölmüştür. Buna neden olarak FDM içeriisine katkılanan nanoparçacıkların FDM tarafından kaplanması çapın artmasına bağılı olarak zorlaşması nedeniyle daha etkin bir ısı iletim ağıının oluşması gösterilebilir. Katkılanan tüm metal/metaloksit nanoparçacıklar karşılaştırıldığında ısı iletkenlikteki iyileşmenin 80nm dış çapa sahip Al_2O_3 nanoparçacıklarla katkılanan A82 kompozitleri için en büyük olduğı görölmektedir. Bununla birlikte yaklaşık aynı çaptaki nanoparçacıkların karşılaştırılmasından en iyi ısı iletkenlik iyileşmesinin 20 nm dış çapa sahip MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozit için elde edildiğı sonucuna varılmıştır. Bu durum metal/metaloksit nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin ısı iletkenliklerindeki artışın küresel nanoparçacıkların iletkenlikleri yanı sıra nanoparçacık yüzey alanı ile de ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

3.3. Karbon Tabanlı Nanoparçacıklarla Katkılanan Organik Faz Değışken Malzemenin Isı İletkenlik Değerleri

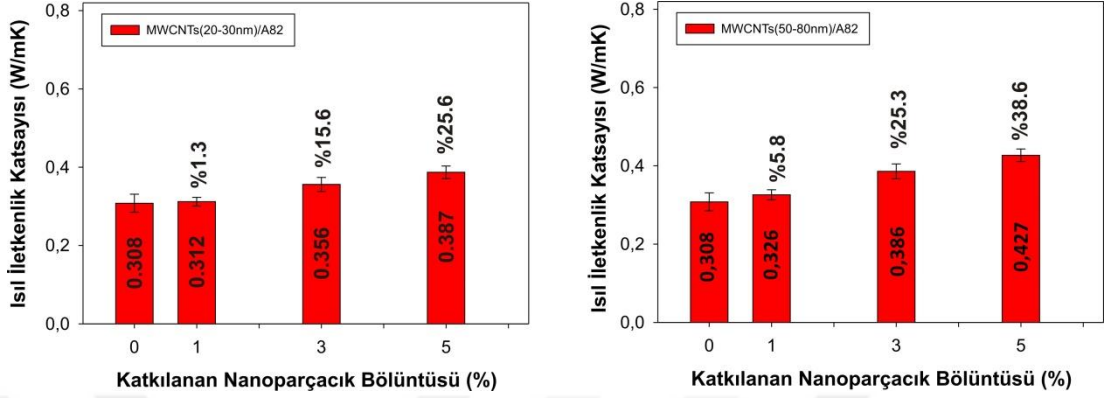
Bu bölümde; 20-30 nm ve 50-80 nm dış çaplarına sahip iki farklı MWCNTs ve 6-8 nm kalınlığa sahip GNP ile kütlece %1, %3 ve %5 katkılanmış A82 kompozitlerin ısı iletkenlikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu sayede öncelikle MWCNTs nanoparçacıklar için boyut etkisinin ısı iletkenlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna ilave olarak MWCNTs ve GNP ile katkılanan kompozitlerin ısı iletkenlikleri karşılaştırılarak karbon tabanlı nanoparçacıkların şekil etkisinin de ısı iletkenlik üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 3.8 MWCNTs(20-30nm)/A82 ve MWCNTs(50-80nm)/A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik ölçüm değ erleri

MWCNT(20-30 nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İ letkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	HataOranı(ε)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0,312	20,34	0,0011
%3	0,356	20,12	0,0018
%5	0,387	20,23	0,0016
MWCNT(50-80nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İ letkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	HataOranı(ε)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0,326	0,0013	20,42
%3	0,386	0,0019	20,36
%5	0,427	0,0016	20,25

Çizelge 3.8’de iki farklı boyutta ve kütlece %1, %3 ve %5 bölüntülerde MWCNTs ile katkılanan organik A82 kompozitlerinin ısı iletkenlik değ erleri, şek il 3.8’de ise ısı iletkenlik değ erlerinin kütle bölüntüsüne göre değ iş imi verilmiştir. 20-30 nm dı ş çapa sahip MWCNTs/A82 kompozitler için ısı iletkenliğ in katkılanan MWCNTs kütle bölüntüsüne bağ lı olarak doğrusal olarak arttığ ı belirlenmiştir. %5 MWCNTs (20-30nm)/A82 kompoziti için ısı iletkenlikte elde edilen iyileş me katkılanmamış A82 FDM’ye göre % 25.6 olarak belirlenmiştir. Bu durumda metal/metaloksitlere kıyasla ısı iletkenlikte belirgin bir iyileş me sağ landığ ı söylenebilir. Esasen ısı iletkenlikte elde edilen iyileş menin karbon tabanlı nanoparçacıkların yüksek ısı iletkenliğ e sahip olmalarının yanı sıra yüzey alanlarının da daha büyük olması nedeniyle gerç ekleş tiğ i söylenebilir. Tüp biçimindeki MWCNTs nanoparçacıklar küresel metal/metaloksit nanoparçacıklara göre hem daha yüksek ısı iletkenliğ e hem de daha büyük yüzey alanına sahiptir. 50-80nm dı ş çapa sahip MWCNTs ile katkılanan A82 kompoziti için ısı iletkenlikte elde edilen iyileş tirmeler göz önüne alındığ ında 20-30nm dı ş çapa göre ısı iletkenlikte daha fazla iyileş tirmeye elde edildiğ i görölmektedir. Öyleki kütlece 50-80nm dı ş çapa sahip %5 MWCNTs/A82 kompoziti için ısı iletkenlikteki iyileş me % 38.6 olarak belirlenmiştir. Tedarik edilen firmanın sağ lamış olduğ u bilgilere göre 20-30nm dı ş çapa sahip MWCNTs 110m²/g, 50-80nm dı ş çapa sahip MWCNTs ise 40m²/g yüzey alanına sahiptir. Bu

durumda daha düşük yüzey alanına sahip (ancak daha büyük dış çapa sahip) MWCNTs nanoparçacıklarının ısı iletkenliği daha fazla arttırmasının nedeni olarak t p-tüp arayüzündeki ve t p-FDM arayüzündeki temas direncinin azalmasına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir.



şekil 3.8 MWCNTs (20-30nm)/A82 ve MWCNTs (50-80nm)/A82 kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM'ye göre yüzdelik değişim oranları

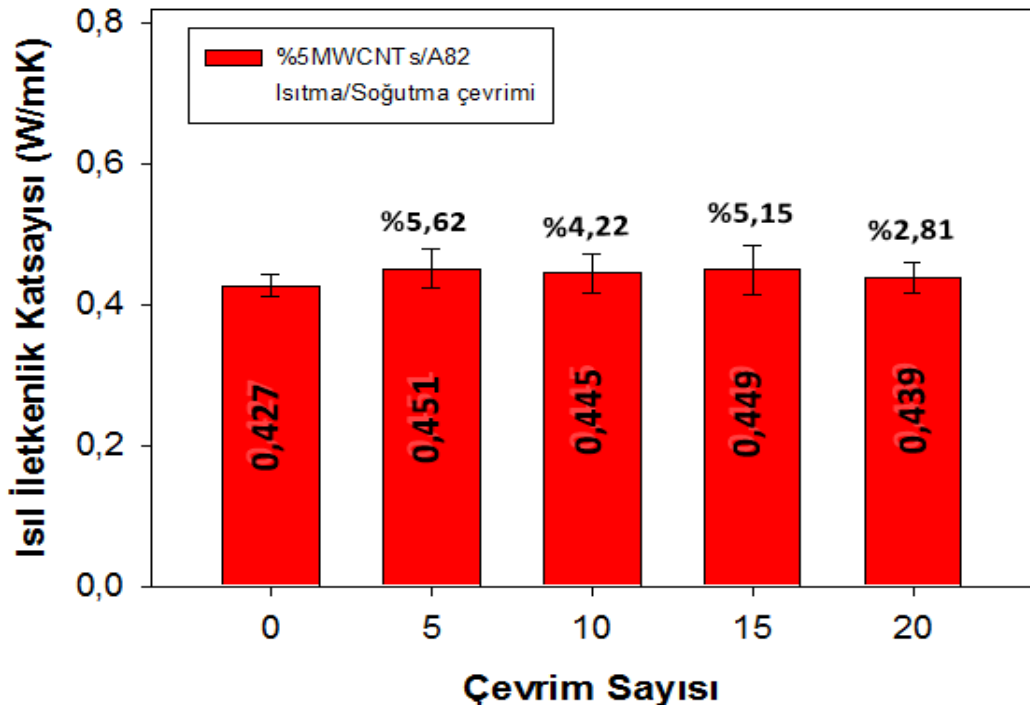
Özetle ısı iletkenliği arttırmak için katkılanan nanoparçacıkların kendine ait ısı iletkenliklerinin yanı sıra diğer fiziksel özelliklerinin de performans artırımı üzerinde etkileri olduğu sonucuna varılabilir. Daha önce metaloksit nanoparçacık bölümünde iki farklı d ş çapa sahip küresel Al₂O₃ nanoparçacıklarından çapının daha büyük olanın ısı iletkenliği daha iyi arttırdığı belirlenmişti. Benzer bir sonuç t p biçimindeki MWCNTs içinde elde edilmiştir. Bu durumda katkılanan nanoparçacık boyutunun artmasının ısı iletkenliği arttırdığı net olarak söylenebilir.

Isı iletkenlikleri iyileştirilmiş FDM kompozitlerin uygulamada kullanılabilmeleri için güvenilirliğinin test edilmesi gerekmektedir. Kompozitlerin güvenilirliği ısı iletkenliklerinin kararlı olmasının gösterilmesi ile belirlenebilir. Kompozitlerin ısı iletkenliklerinin kararlı olduğunu göstermek için ise ısı iletkenliğin ısıtma/s ğutma işlemlerinden oluşan çevrimler boyunca değişmemesi gerekmektedir. Çizelge 3.9'da 50-80 nm d ş çapa sahip MWCNTs katkılanarak elde edilen FDM kompozitlerinin ısıtma/s ğutma çevrimlerine göre ısı iletkenlik değerleri, şekil 3.9'da ise ısı iletkenlik değerlerinin katkılanan kütle bölüntüsüne göre değişimi verilmiştir. %5 MWCNT (50-80nm)/A82 kompozitinin başlangıçtaki ( evrime girmeden önceki) ısı iletkenlik değerleri 0,427 W/mK'dir. 5,10,15 ve 20 ısıtma/s ğutma çevrimi sonunda ölçülen ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0,451

W/mK, 0,445 W/mK, 0,449 W/mK ve 0,439 W/mK olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre ısı iletkenliğinin ısıtma/soğutma çevrimi sırasında kötüleşmediği aksine daha da iyileştiği söylenebilir. İyileşmenin MWCNTs nanoparçacıklarının ısıtma/soğutma çevrimleri boyunca kümeleşmesi sonucunda daha efektif ve sürekli bir ısı iletim ağının oluşmasına bağlı olarak gerçekleştiği söylenebilir.

Çizelge 3.9 MWCNT(50-80nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliklerinin 20 ısıtma/soğutma çevrimi boyunca değişimi

MWCNT(50-80nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik(K) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	Hata Oranı(ε)
BAŞLANGIÇ	0,427	20,25	0,0016
5. ÇEVİRİM	0,451	20,22	0,0027
10. ÇEVİRİM	0,445	20,24	0,0028
15. ÇEVİRİM	0,449	20,32	0,0035
20. ÇEVİRİM	0,439	20,32	0,0022



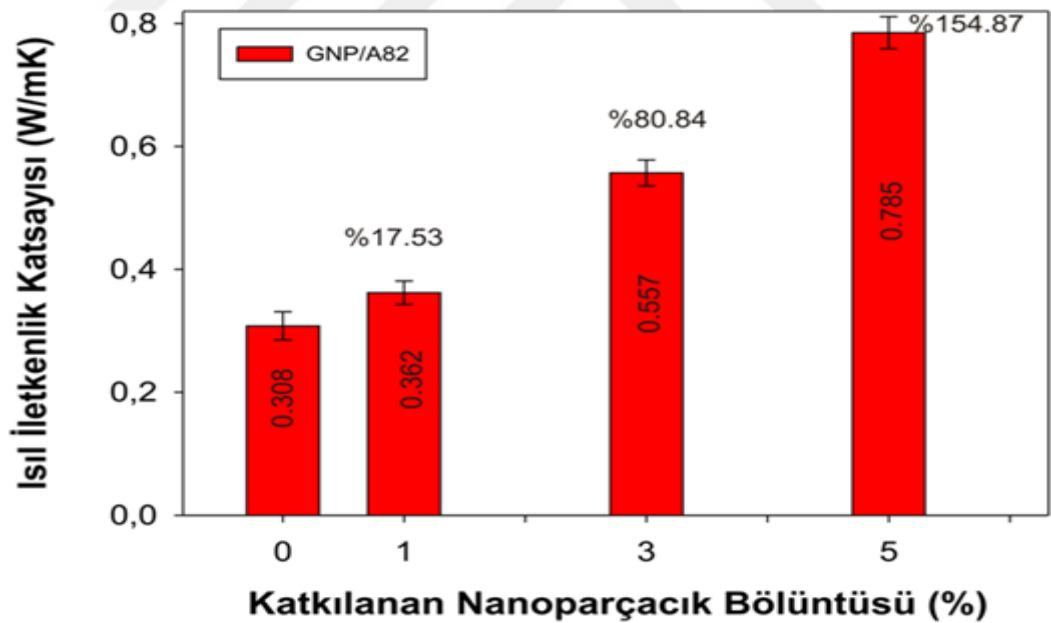
Şekil 3. 9 MWCNTs(50-80nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliğinin çevrim boyunca değişimi

Bir diğer karbon tabanlı nanoparçacık olarak 6-8 nm kalınlığa sahip GNP nanoparçacıkların kütlece %1, %3 ve %5 bölüntülerde organik A82 FDM içerisine katkılanması durumunda elde edilen ısı iletkenlik değerleri çizelge 3.10'da ısı iletkenlik değerlerinin kütle bölüntüsüne göre değişimi şekil 3.10'da verilmiştir.

Yukarıda bahsedilen nanoparçacık/FDM kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin değişimlerine benzer olarak kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik doğrusala yakın bir artış göstermektedir. Buna ek olarak FDM içerisine GNP katkılanması durumunda ısı iletkenlikteki iyileşmenin daha önce kullanılan metal/metaloksit ve MWCNTs nanoparçacıklara göre oldukça yüksek olduğu görölmektedir. Örneğin kütlege %5 GNP/A82 kompozitinin ısı iletkenliğindeki iyileşme yaklaşık %155 olarak ölçölmüştür. Başka bir ifadeyle katkılanmamış FDM'ye göre ısı iletkenlik yaklaşık 2.6 kat artırılmıştır.

Çizelge 3.10 GNP(6-8nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenlik ölçüm değerleri

GNP(6-8 nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	HataOranı(ε)
%0	0,308	20,24	0,0024
%1	0,362	20,17	0,0019
%3	0,557	20,37	0,0021
%5	0,785	20,34	0,0026



Şekil 3.10 GNP (6-8nm)/A82 kompozitinin ortalama ısı iletkenlik değerleri ve organik A82 FDM'ye göre yüzdelik değişim oranları

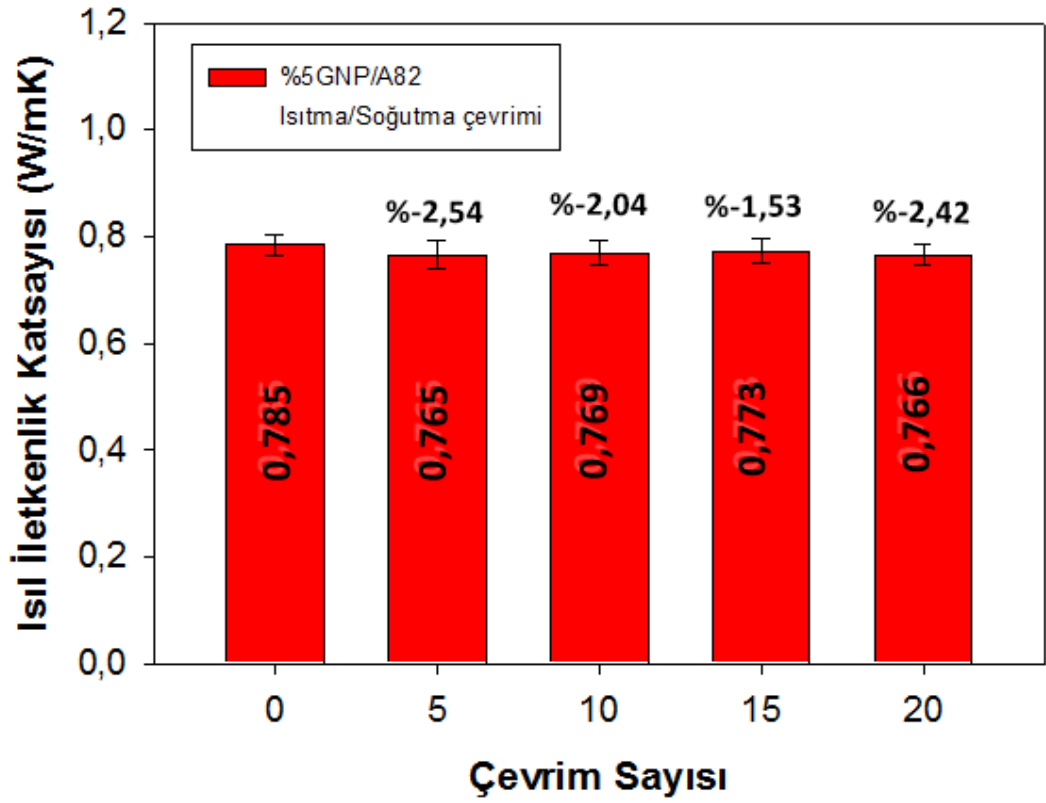
Bu durumda, MWCNTs ve GNP karbon tabanlı nanoparçacıkların A82 organik FDM içerisinde oldukça farklı termal iyileşme sağladıkları görölmektedir. Karbon

tabanlı nanoparçacık olarak gerek MWCNTs gerekse de GNP'nin aynı ısı iletkenlik katsayısına (3000 W/mK) sahip olmasına rağmen ısı iletkenlikte görülen bu derece farklı iyileşmenin nedeninin MWCNTs ve GNP nanoparçacıklarının şekil yapısı ve dolayısıyla yüzey alanı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi MWCNTs çok katmanlı bir tüp şeklinde iken GNP iki boyutlu düzlemsel bir yapıya sahiptir. GNP nanoparçacıklar düzlemsel yapısı gereği MWCNTs'e göre daha büyük yüzey alanına sahiptirler. Bununla birlikte ısı iletkenlik fonon saçılım mekanizmasına dayanmakta olup, yüksek fonon frekans saçılımına sahip malzemelerin ısı iletkenlik değerleri de yüksek çıkmaktadır. Isı iletkenlik değerleri düşük olan FDM içerisine katılan nanomalzemeler ile üretilen kompozitlerin ısı iletkenliklerinin yüksek çıkmasının nedeni olarak düşük olan fonon saçılım frekansının artırılması gösterilmektedir. Bu kapsamda düşük ısı iletkenliğe sahip olan FDM içerisine katılacak olan nanomalzemelerin, FDM içerisine çok iyi karışması ve yüksek yüzey alanına sahip olması fonon saçılım frekansını artırmakta ve bu sayede ısı iletkenliği daha iyi artırmaktadır. Bu anlamda GNP iki boyutlu ve düzlemsel yapıya sahip olması hem fonon saçılım frekansını artırmakta hem de FDM içerisine daha iyi karışmasını sağlayarak daha efektif bir ısı iletim network ağı oluşturmaktadır.

Çizelge 3.11 %5 GNP(6-8 nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliğinin çevrim boyunca değişimi

GNP(6-8nm)/A82			
Yüzde Oranı (%)	Isıl İletkenlik(K) (W/mK)	Sıcaklık (T) (°C)	Hata Oranı(ε)
BAŞLANGIÇ	0,785	20,17	0,0019
5. ÇEVİRİM	0,765	20,19	0,0026
10. ÇEVİRİM	0,769	20,28	0,0023
15. ÇEVİRİM	0,773	20,12	0,0022
20. ÇEVİRİM	0,766	20,24	0,0019

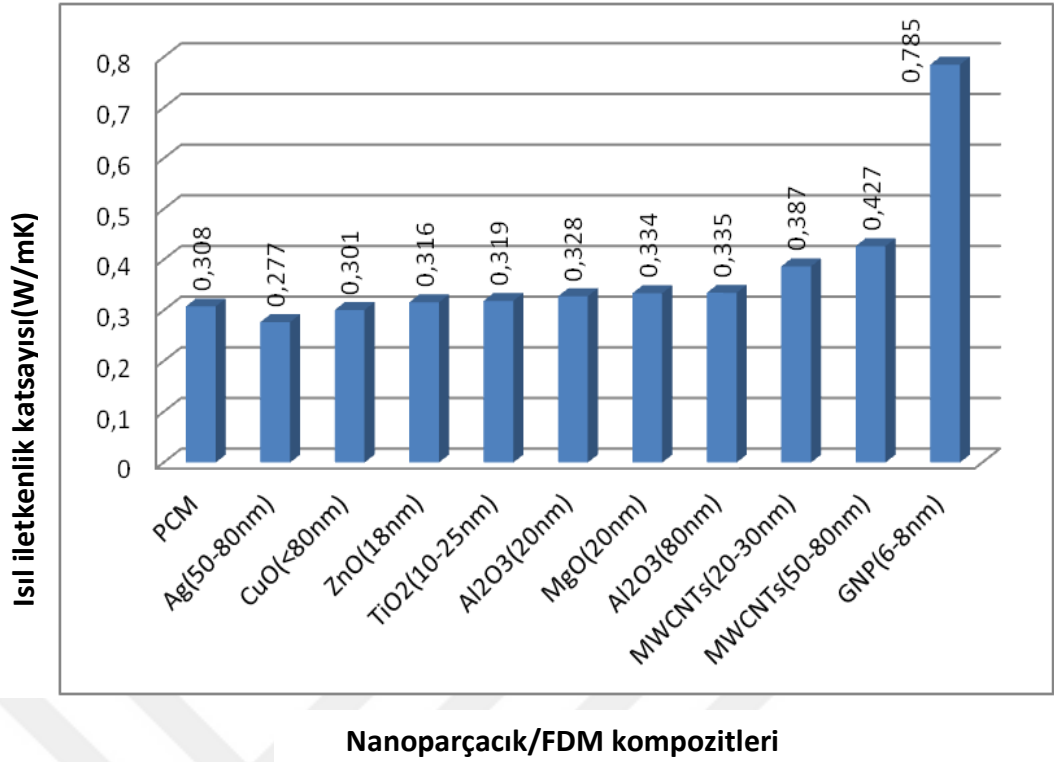
Isı iletkenlikleri önemli derecede arttırılmış olan GNP/A82 kompozitlerinin uygulamada kullanılabilirliğini veya güvenilirliğini belirlemek için ısıtma/soğutma çevrimleri boyunca ısı iletkenliklerinin kötüleşmediğinin gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaçla %5 GNP/A82 kompozitinin ısı iletkenlikleri başlangıç, 5, 10, 15 ve 20 ısıtma/soğutma çevrimi için elde edilerek termal kararlılığı belirlenmiştir.



Şekil 3.11 GNP(6-8nm)/A82 kompozitinin ısı iletkenliğinin çevrim boyunca değışimi

Şekil 3.11, 6-8nm kalınlığa sahip GNP katkılanarak elde edilen FDM kompozitlerinin ısıtma/soğutma çevrimlerine göre ısı iletkenliklerinin değışimini vermektedir. Şekil 3.11’den görüleceğı üzere ısı iletkenlik değeri 20 çevrim boyunca hafif bir azalış gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte ısı iletkenlikteki azalışın yaklaşık %2.5’den daha az olduğı belirlenmiştir. Isıtma soğutma çevrimleri boyunca ısı iletkenlikteki bu kötüleşmenin GNP katkılı kompozitin ısı iletkenliğindeki büyük artışın yanında ihmal edilebilir olduğı görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen GNP/FDM kompozitin güvenilir olduğı ve uzun süreli kullanıma elverişli olduğı belirlenmiştir.

Organik A82 FDM içersine katkılanan tüm nanoparçacıkların %5 kütle bölüntüsü ile elde edilen kompozitlerin ısı iletkenlik değeri karşılaştırılması aşağıdaki şekilde verilmiştir. Şekil 3.12’den görüleceğı üzere Ag nanoparçacıklarla katkılanan kompozit haricindeki tüm nanoparçacıklarda ısı iletkenlikte iyileşme elde edilmiştir. Buna ek olarak GNP katkılanan kompozitin ısı iletkenliğindeki iyileşmenin derece olarak çok daha yüksek olduğı görülmektedir.



Şekil 3.12. Tüm nanoparçacık/FDM kompozitlerinin kütlece %5 kütle bölüntüsü için ısıl iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması

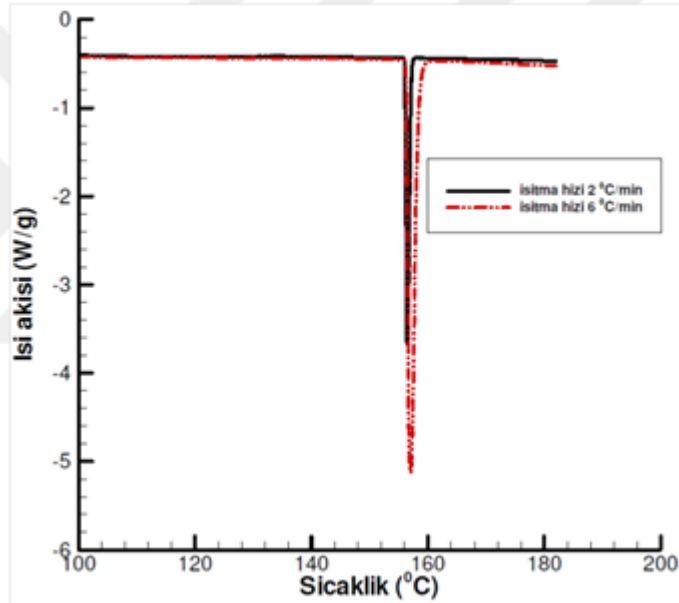
3.4. Katkılanmamış Faz Değişken Malzemelerin DTK Özellikleri

Bu bölümde; katkılanmamış organik FDM'nin erime/katılaşma sıcaklıkları, erime/katılaşma gizli ısıları gibi termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı kullanılarak ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Ölçümlere başlanmadan önce Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazının doğruluğunun test edilmesi gerekmektedir. Doğrulama işlemi için erime başlangıç sıcaklığı ve erime gizli ısısı bilinen saf indium metalinin DTK özellikleri ölçülerek bilinen değerleriyle karşılaştırılmaktadır. Saf indium metali için erime başlangıç sıcaklığının ve erime gizli ısısının bilinen değerleri sırasıyla 156.6°C ve 28.45 J/g olarak verilmektedir. Şayet karşılaştırma sonuçları $\leq \pm 1$ hassasiyetinde ise sonuçların doğru olduğu aksi takdirde cihaza kalibrasyon yapılması gerektiği sonucu çıkarılmaktadır. İndium için iki farklı ısıtma hızında (2 ve 6°C/dk) yapılan ölçümlerin termogramı şekil 3.13'deki eğrilerin analiz edilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar ise çizelge 3.12'de verilmiştir. Şekil 3.13'de saf indiumun ısıtma işlemi sırasındaki termogram eğrileri verilmiştir. Termogram eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda elde edilen erime sıcaklığı ve erime gizli ısısı değerleri

indiumun yukarıda verilen literatür değerleriyle karşılaştırılmıştır. Literatürde, herhangi bir malzemenin DTK cihazından elde edilen erime başlangıç sıcaklığı, o malzemenin erime sıcaklığını, termogram eğrisinin yapmış olduğu pikin altında kalan alan ise gizli ısısını vermektedir. Yapılan karşılaştırma sonucunda her iki ısıtma hızı için de DTK cihazının kalibrasyonun sonuçları gereken hassasiyette doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.12 İndium metali için DTK özellikleri

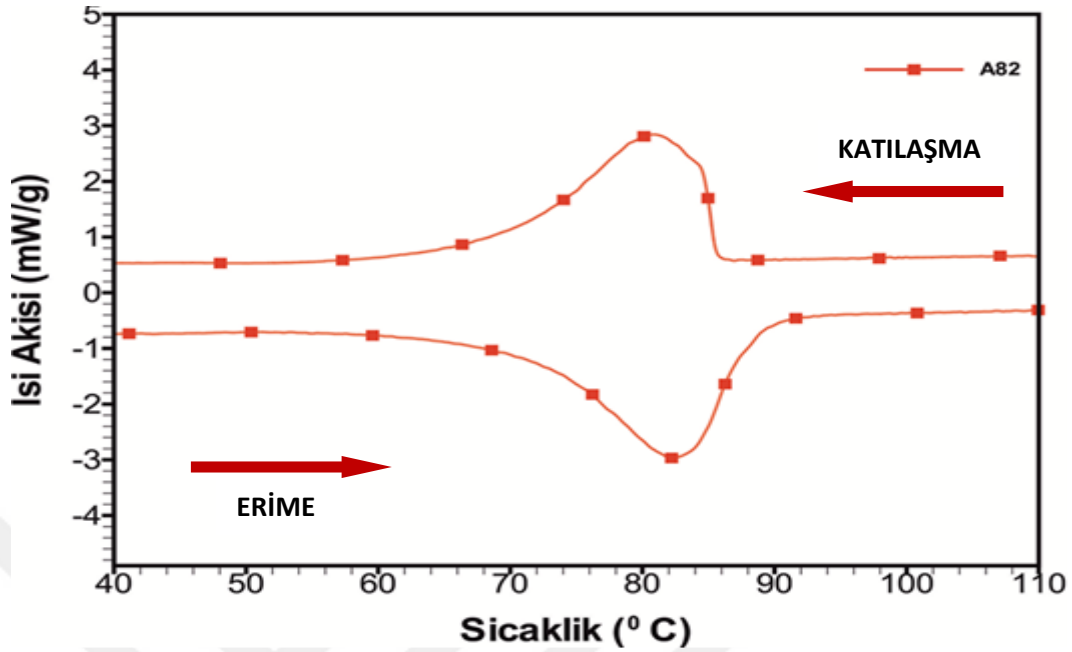
Isıtma hızı $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$	Teb ($^{\circ}\text{C}$)	Tep ($^{\circ}\text{C}$)	Gizli ısı (H) J/g
2	156.405	156.49	28.09
6	156.07	156.49	28.16



Şekil 3.13 Saf İndium metali için DTK'dan elde edilen termogram

Organik faz değişken malzeme A82 için yapılan erime ve katılaşmayı içeren DTK analizi ($2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızı için) sonucu elde edilen termogram eğrileri şekil 3.14'te verilmiştir. Burada erime işlemi sırasında elde edilen eğriye ekzoterm, katılaşma sırasında elde edilen eğriye ise endoterm adı verilmektedir. Ekzoterm ve endoterm eğrilerinin oluşturmuş oldukları pikler faz değişimi ile ilgili kısmı göstermektedir. Ekzoterm eğrisinin analiz edilmesinden sırasıyla erime başlangıç (T_{eb}), erime tepe (T_{ep}) ve erime sonlanma sıcaklıkları (T_{es}) ve ayrıca erime gizli ısısı (H_e) elde edilmektedir. Benzer biçimde endoterm eğrisinin analiz edilmesinden sırasıyla

katılaşma başlangıç (T_{kb}), katılaşma tepe (T_{kt}) ve katılaşma sonlanma sıcaklıkları (T_{ks}) ve ayrıca katılaşma gizli ısı (H_k) elde edilmektedir.



Şekil 3.14 A82 organik faz değişken malzemenin termogram eğrileri

A82 organik FDM için ekzoterm ve endoterm eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda elde edilen değerler çizelge 3.13’de verilmiştir. A82 organik FDM için erime başlangıç sıcaklığı 70.78°C iken erime sonlanma sıcaklığı 88.72°C olarak ölçülmüştür. Kısacası organik FDM erimeye başladıktan sonra tamamen sıvı faz geçinceye kadar yaklaşık olarak 18.72°C ’lik sıcaklık artışına maruz kalmaktadır. Benzer şekilde katılaşma başlangıç sıcaklığı 86.28°C iken katılaşma sonlanma sıcaklığı 68.96°C olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi karşılıklı sıcaklıklar (erime başlangıç-katılaşma sonlanma sıcaklığı, erime sonlanma-katılaşma başlangıç sıcaklıkları gibi) arasında birkaç derecelik fark bulunmaktadır. Karşılıklı sıcaklıklar arasındaki bu fark faz değişken malzemelerin önemli dezavantajlarından biri olan subcooling etkisidir. Literatürde erime tepe ve katılaşma tepe sıcaklıkları arasındaki fark subcooling etkisi olarak tanımlanmaktadır. A82 organik FDM için erime tepe sıcaklığı 82.35°C , katılaşma tepe sıcaklığı 80.79°C olup subcooling etkisi 1.56°C civarındadır. Endoterm pikinin altında kalan alan erime gizli ısını vermektedir olup yapılan analiz sonucuna A82 organik faz değişken malzemenin erime gizli ısı (H_e) 175.64 J/g olarak belirlenmiştir. Yani erime sırasında A82 organik faz değişken malzemesi gram başına 175.64 J enerji absorblama kapasitesine sahiptir. Katılaşma gizli ısı ise ekzoterm pikinin altında kalan alandan 159.42 J/g olarak ölçülmüştür.

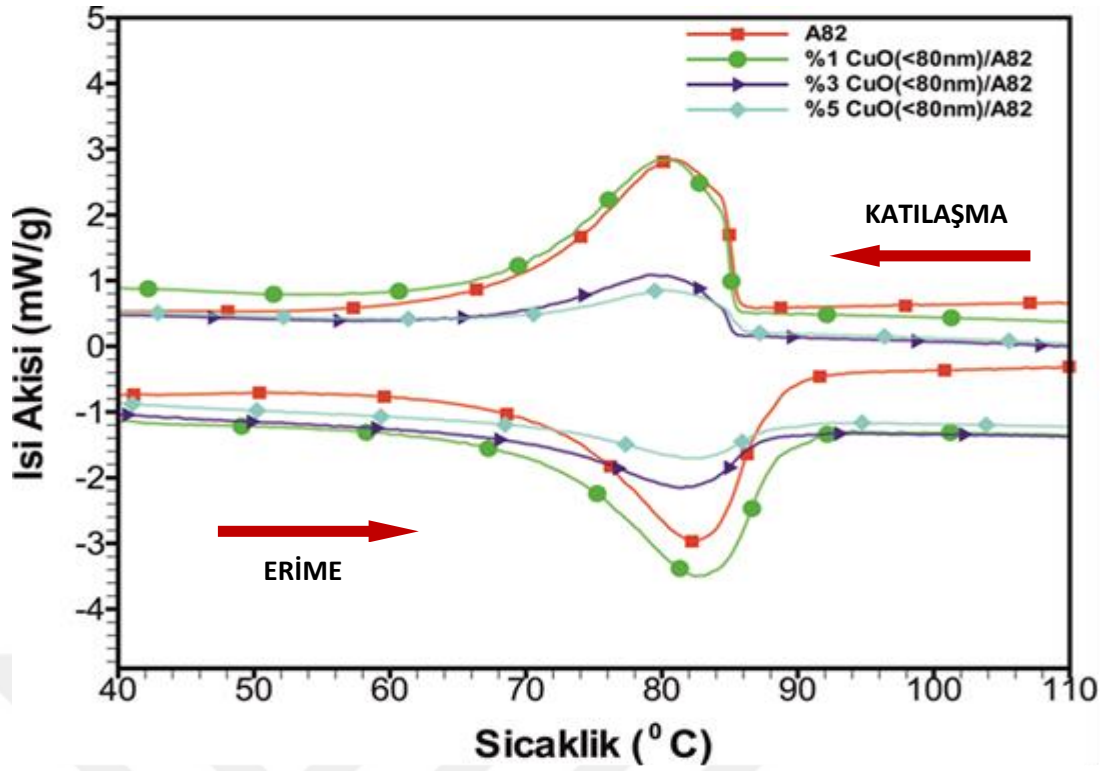
Çizelge 3.13 Katkılanmamış A82'nin DTK Analizi sonuçları

A82	T _{mo}	T _{mp}	T _{me}	H _e	T _{so}	T _{sp}	T _{se}	H _s
1.ÖLÇÜM	70,45	82,35	88,77	176,26	86,28	80,79	68,87	159,62
2.ÖLÇÜM	70,46	82,35	88,71	177,06	86,28	80,79	69,28	159,12
3.ÖLÇÜM	71,43	82,35	88,67	173,61	86,28	80,79	68,73	159,51
ORTALAMA	70,78	82,35	88,72	175,64	86,28	80,79	68,96	159,42

3.5. Metal/Metaloksit Nanoparçacıklar İle Katkılanan Faz Değişken Malzemelerin DTK Özellikleri

Bu bölümde; 50-80 nm dış çapında Ag, 80 nm dış çapında CuO, 18 nm dış çapında ZnO, 10-25 nm dış çapa sahip TiO₂, 20 nm dış çapa sahip MgO, 20 nm dış çapa sahip Al₂O₃, 80 nm dış çapa sahip Al₂O₃ ile kütlece %1, %3 ve %5 bölüntülerde katkılanmış FDM kompozitlerin erime/katılaşma sıcaklıkları, erime/katılaşma gizli ısıları gibi termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı kullanılarak ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir.

Sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılama oranlarında CuO(<80nm) metaloksit nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin DTK analizi sonucunda elde edilen termogram eğrileri şekil 3.15'te verilmiştir. Karşılaştırma açısından organik A82 FDM malzemesinin de DTK eğrileri şekil 3.15'e eklenmiştir. Şekil 3.15'in incelenmesinden ekzoterm ve endoterm eğrilerinin değişiminin organik A82 FDM'nin DTK eğrilerinin değişimine benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ekzoterm ve endoterm piklerinin genliklerinin kütle bölüntüsünün artmasına (özellikle %3-%5) bağlı olarak önemli derecede azaldığı belirlenmiştir. Bu piklerin altında kalan alanın gizli ısılarla ilişkili olduğu bilgisinden yola çıkarak kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak gizli ısıların azalmasının bekleneceği söylenebilir.



Şekil 3.15 CuO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri

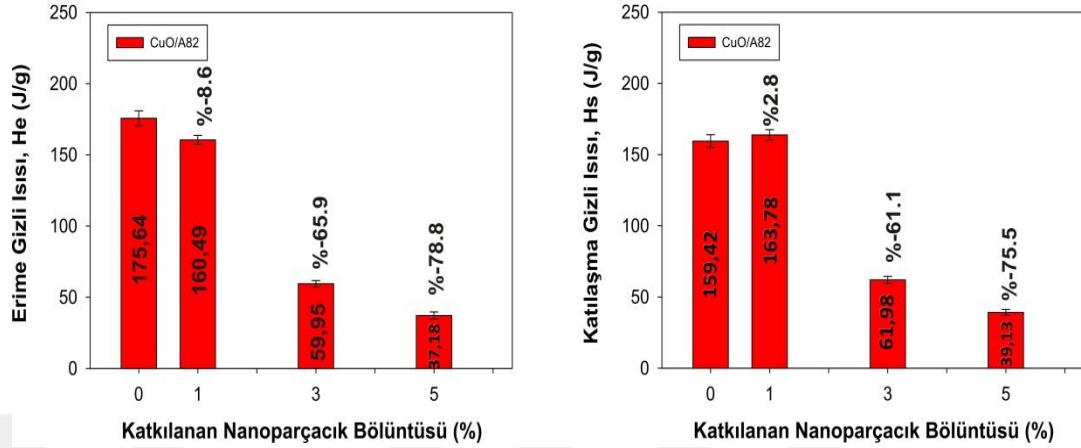
CuO/A82 kompozitlerin DTK analizleri sonucunda elde edilen termel özellik verileri çizelge 3.15'te verilmiştir. A82 içerisine değişik kütle bölüntülerinde CuO nanoparçacık katkılanması durumunda erime ve katılaşma sıcaklıklarının değişmediği belirlenmiştir. Buna karşılık erime gizli ısı ve katılaşma gizli ısısının yaklaşık 5 kat azaldığı görülmektedir.

Çizelge 3. 14 CuO(80 nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri

CuO/A82	T _{mo}	T _{mp}	T _{me}	H _e	T _{so}	T _{sp}	T _{se}	H _s
%0	70.78	82.35	88.72	175.64	86.28	80.79	68.96	159.42
%1	70.87	82.70	89.01	160.49	85.83	80.25	68.38	163.78
%3	70.59	82.52	88.63	59.95	85.71	79.65	68.80	61.98
%5	70.23	82.25	88.45	37.18	86.42	80.22	68.22	39.13

Şekil 3.16'da erime ve katılaşma gizli ısılarının katkılanan kütle bölüntüsüne göre değişimi verilmiştir. Esasen karışım fiziğine göre enerji depolama yeteneği yüksek bir madde içerisine enerji depolayamayan bir madde karıştırılması durumunda bir azalış olması beklenen bir durumdur. Ancak CuO nanoparçacık katkılanan A82 kompozitler için bu azalmanın oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Değişik kütle

bölüntülerinde CuO nanoparçacık katkılanan kompozitlerin ısı iletkenlik üzerinde de bir artış sağlamadığı göz önüne alındığında A82 organik FDM içerisinde değişik kütle bölüntülerde CuO katkılanması durumunun işe yaramadığı belirlenmiştir.

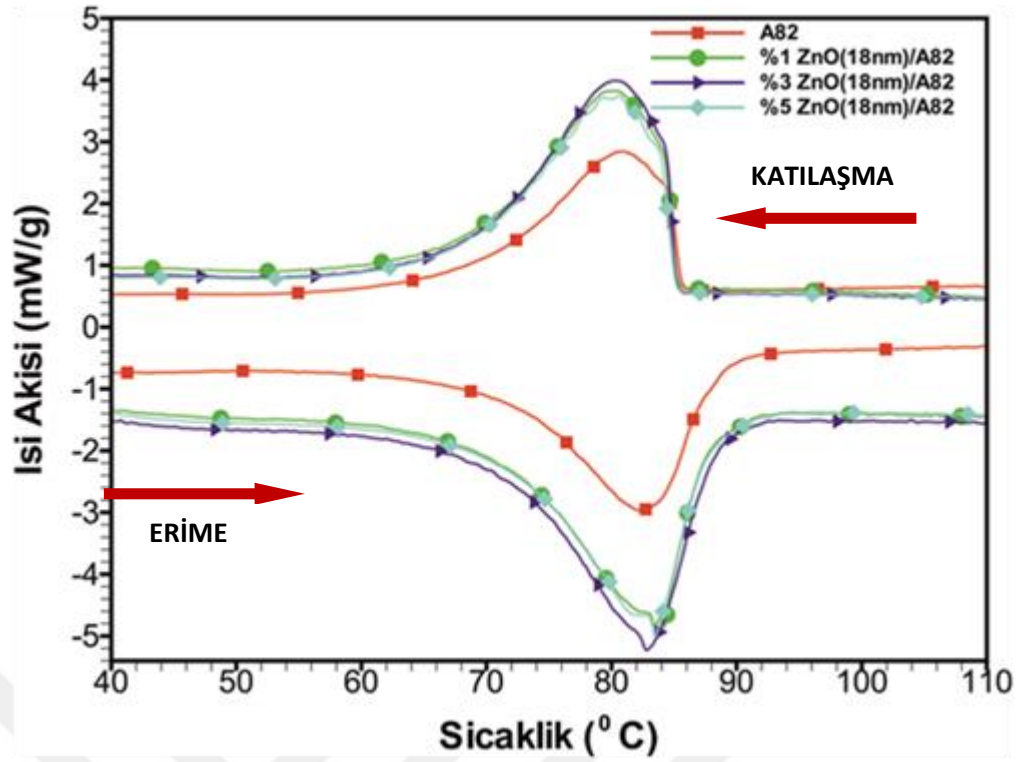


Şekil 3.16 CuO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi

ZnO(18nm) metal nanoparçacıklarla katkılanan A82 organik FDM kompozitinin termogram eğrileri şekil 3.17’de termogram eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda elde edilen DTK özellikleri ise çizelge 3.15’de verilmiştir.

Çizelge 3.15 ZnO(80 nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri

ZnO/A82	T_{mo}	T_{mp}	T_{me}	H_e	T_{so}	T_{sp}	T_{se}	H_s
%0	70.78	82.35	88.72	175.64	86.28	80.79	68.96	159.42
%1	70,04	83,17	88,24	238,18	85,88	80,04	67,98	234,44
%3	70,56	82,66	88,7	250,39	85,86	80,26	68,05	245,34
%5	70,63	82,77	88,28	234,8	85,72	80,02	67,92	229,05

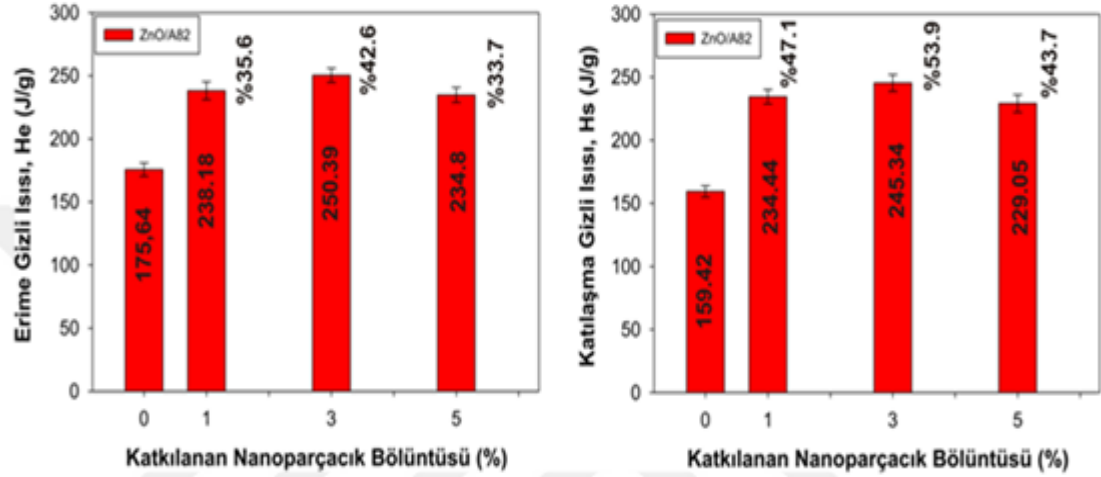


Şekil 3.17 ZnO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri

%1-%5 ZnO nanoparçacıklarla katkılan FDM kompozitlerin ekzoterm ve endoterm eğrilerinin katkılanmamış FDM'ye benzer bir değişim geçirdiği görülmektedir. Bununla birlikte bundan önceki metaloksit nanoparçacık katkı kompozitlerin aksine ekzoterm ve endoterm genliklerinin nanoparçacık katkı kompozitler için daha büyük olduğu görülmektedir. Ekzoterm ve endoterm eğrilerinin altında kalan alanların sırasıyla erime gizli ısı ve katılaşma gizli ısılarıyla ilişkili olduğu gözönüne alındığında, organik FDM içerisine ZnO katkılamanın gizli ısıları iyileştirdiği sonucuna varılabilir. Bu durum DTK eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda elde edilen verilerden açıkça görülmektedir. Organik FDM'nin erime gizli ısı 175.64 J/g iken %1 ZnO katkıli kompozitin erime gizli ısı % 35.6 artarak 238.18J/g olmaktadır. Erime gizli ısıdaki artışa bağlı maksimum iyileşme %3 ZnO /A82 kompoziti için % 42.6 olarak ölçülmüştür.

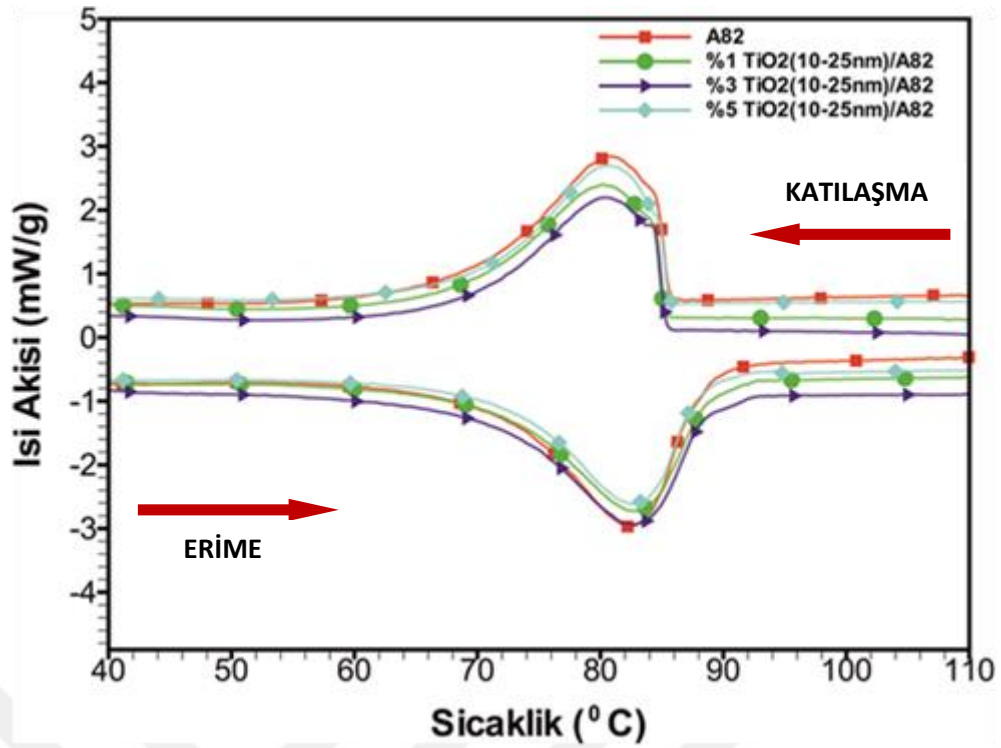
Katkılama oranının %5'e çıkarılması durumunda ise iyileşme oranı biraz düşerek %33.7 olarak belirlenmiştir. Benzer biçimde katkılanan ZnO kütle bölüntüsüne göre katılaşma gizli ısıda da yaklaşık olarak %44-%54 aralığında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu durumun ZnO nanoparçacıkların FDM molekülleri arasındaki bağları kuvvetlendirmesi nedeniyle sağlandığı düşünülmektedir. Malzemelerin ısı depolama özelliği doğrudan kimyasal potansiyel enerji ile kimyasal

potansiyel enerji ise zayıf Van der Waals çekme kuvvetleri ile moleküller arası güçlü iyonik ve kovalent bağlar ile ilişkilidir. Sonuç olarak, moleküller arası çekme kuvvetleri ne kadar güçlü ise kimyasal potansiyel enerji de o kadar yüksek olmakta ve FDM'nin birim kütle başına ısı depolama kapasitesi artmaktadır. FDM'lerin birim kütle başına ısı depolama kapasitesi, moleküller arası çekme kuvvetleri ile değişmektedir. Sonuç olarak ZnO nanoparçacıkların A82 FDM'nin ısı iletkenliğini önemli miktarda artırmamasına rağmen enerji depolama kapasitesi üzerinde olumlu etkide bulunduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.18 ZnO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi

TiO₂ (10-25nm) nanoparçacıklarla sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri şekil 3.19'da termogram eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda elde edilen DTK özellikleri ise çizelge 3.16'da verilmiştir. Daha önceki termogram eğrilerine benzer olarak ekzoterm ve endoterm eğrilerinin değişiminin organik A82 FDM'nin eğrileriyle oldukça benzer olduğu görülmektedir.

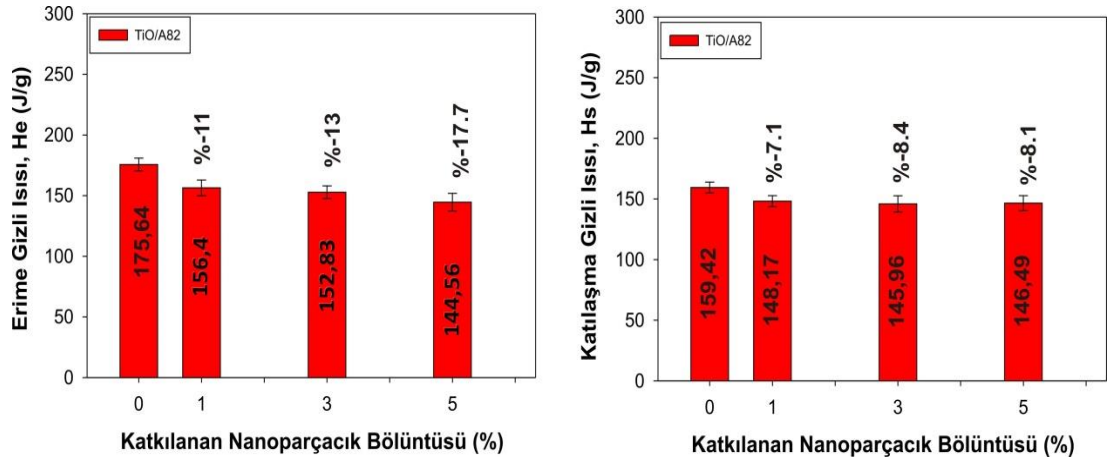


Şekil 3. 19 TiO₂ nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri

Çizelge 3.16 TiO₂(10-25 nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri

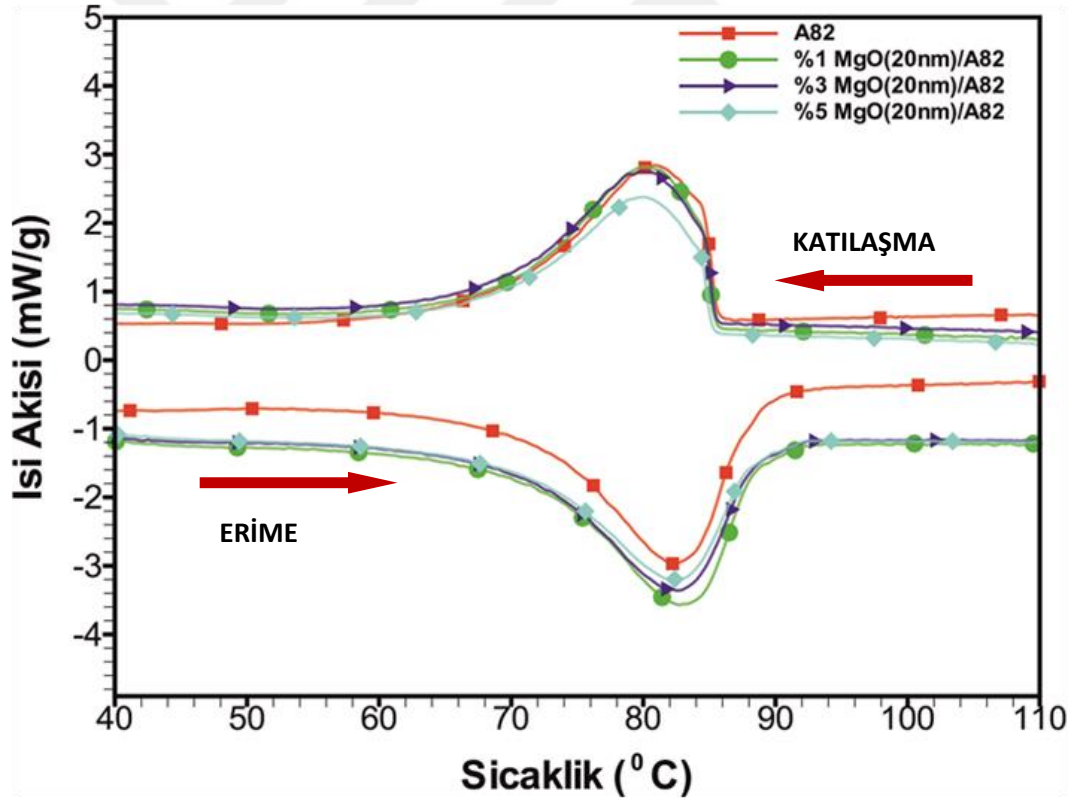
TiO ₂ /A82	T _{mo}	T _{mp}	T _{me}	H _e	T _{so}	T _{sp}	T _{se}	H _s
%0	70.78	82.35	88.72	175.64	86.28	80.79	68.96	159,42
%1	70,52	82,64	89,25	156,4	85,9	80,23	68,58	148,17
%3	70,67	82,63	89,07	152,83	86,13	80,55	69,02	145,96
%5	71,04	82,55	88,66	144,56	86,27	80,65	69,74	146,49

Benzer biçimde katkılanan TiO₂ nanoparçacık kütle bölüntüsüne bağlı olarak erime ve katılaşma sıcaklıklarında değişim olmadığı buna karşın gizli ısı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Şekil 3.20’de görüleceği üzere %1 kütle bölüntüsünde TiO₂ nanoparçacık katkılanan A82 kompozitlerin erime ve katılaşma gizli ısıları sırasıyla %11 ve % 7.1 azalmaktadır. Katkılanan kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak erime ve katılaşma gizli ısılarındaki azalış oranı azalmaktadır. Bununla birlikte %5 TiO₂ katkılanan A82 FDM kompozitinin erime ve katılaşma gizli ısılarındaki azalış oranları sırasıyla %17.7 ve %8.1 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.20 TiO_2 nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi

MgO(20nm) nanoparçacıklarla sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılanan kompozitlerin DTK analizi sonucunda elde edilen termogram eğrileri Şekil 3.21’de, analiz sonucu elde edilen termal özellik verileri ise Çizelge 3.17’de verilmiştir.

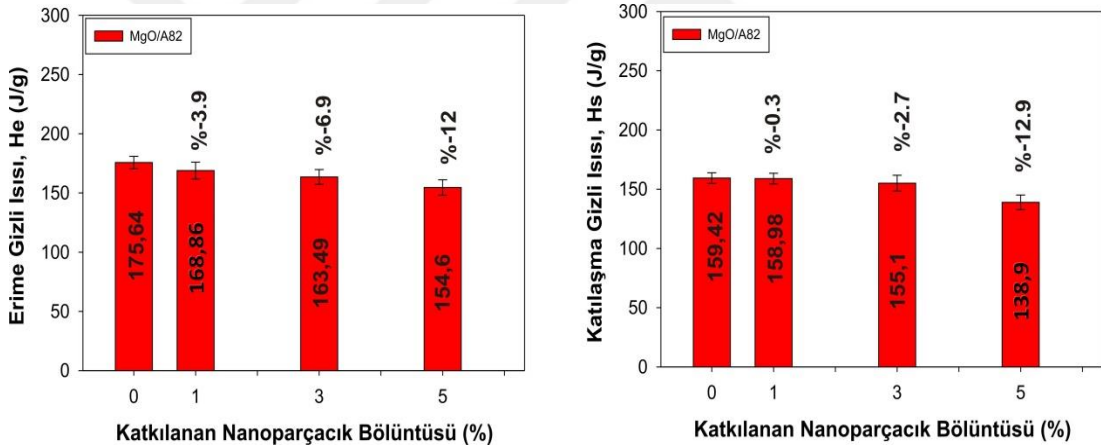


Şekil 3.21 MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri

Çizelge 3.17 MgO(18nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri

MgO/A82	T _{mo}	T _{mp}	T _{me}	H _e	T _{so}	T _{sp}	T _{se}	H _s
%0	70.78	82.35	88.72	175,64	86.28	80.79	68.96	159,42
%1	70,74	82,83	88,93	168,86	86,07	80,27	69,33	158,98
%3	69,72	82,34	88,97	163,49	86,1	79,94	68,41	155,1
%5	69,99	82,31	88,79	154,6	85,89	79,84	68,21	138,9

Katkılanan bölüntüsünün artmasına bağlı olarak erime ve katılaşma sıcaklıklarının önemli derecede değişmediği söylenebilir. Buna ilave olarak katkılanan nanoparçacık bölüntüsüne bağlı olarak erime/katılaşma gizli ısılarındaki azalma MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitler içinde gerçekleşmektedir. Şekil 3.22’de görüldüğü üzere %1 MgO/A82 ve %3 MgO/A82 için azalma oranı küçük iken %5 MgO/A82 kompoziti için azalma oranı belirgin biçimde artmaktadır. %5 MgO katkılanan A82 kompozit malzemesi için erime ve katılaşma gizli ısılarındaki azalma oranları sırasıyla %12 ve %12.9 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.22 MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılaşma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi

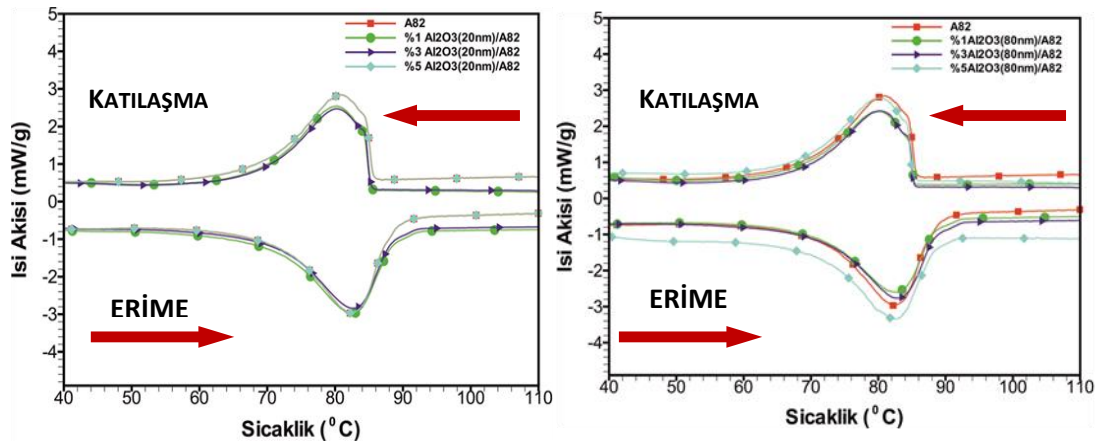
Al₂O₃(20nm) nanoparçacıklarla sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılanan kompozitlerin DTK analizi sonucunda elde edilen termogram eğrileri şekil 3.23’te verilmiştir. Karşılaştırma açısından organik A82 FDM’sinin de DTK eğrileri şekil 3.23’de gösterilmiştir. Ekzoterm ve endoterm eğrilerinin değişiminin katkılanmamış A82 organik FDM’ye oldukça benzer olduğu görülmektedir. CuO/A82 kompozitlerinin aksine DTK eğrilerinin pik genliklerinde çok fazla bir değişim olmadığı görülmektedir. Endoterm eğrisinin ekzoterm eğrisine göre hafifçe sola kayması

subcooling etkisinin varlığını göstermektedir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{A82}$ kompozitlerinin DTK analizleri sonucunda elde edilen termal özellik verileri Çizelge 3.18’de verilmiştir.

Çizelge 3.18 $\text{Al}_2\text{O}_3(20\text{nm})/\text{A82}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3(80\text{nm})/\text{A82}$ kompozitlerinin %1, %3 ve %5 fraksiyon için ortalama değerleri

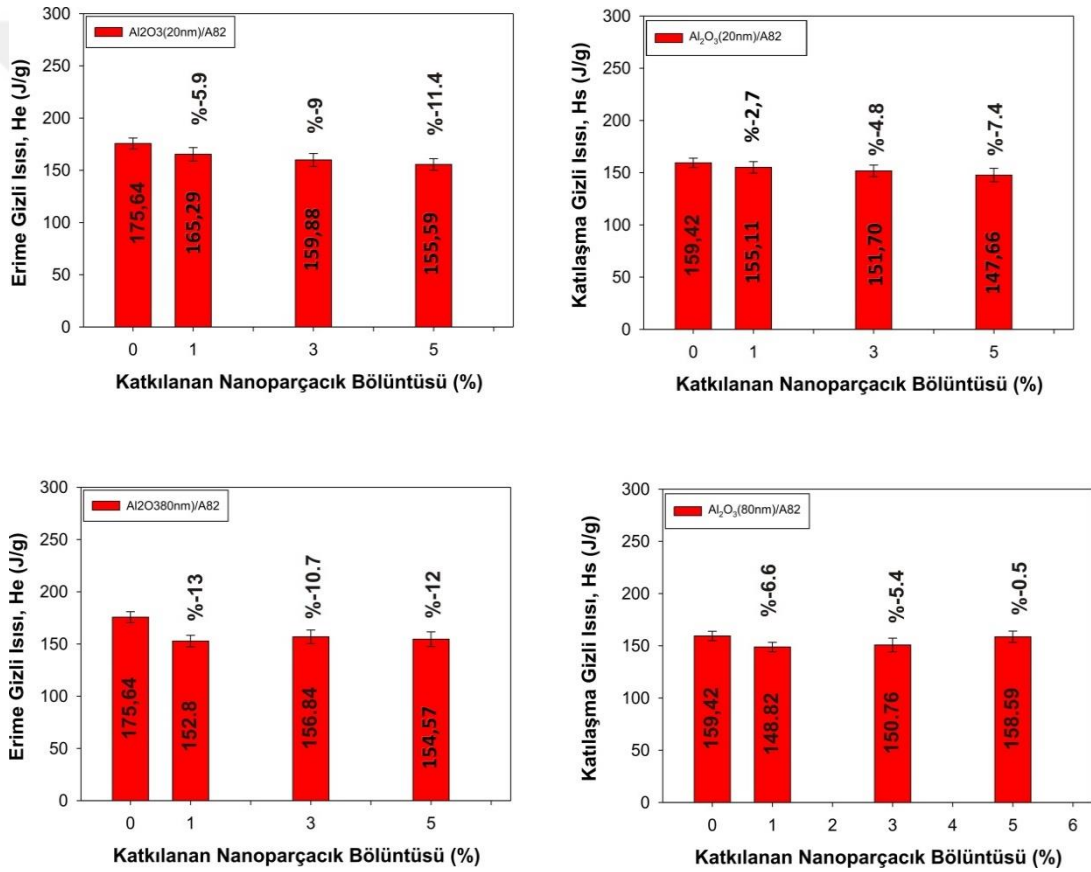
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{A82}$								
$\text{Al}_2\text{O}_3(20\text{nm})/\text{A82}$	T_{mo}	T_{mp}	T_{me}	H_e	T_{so}	T_{sp}	T_{se}	H_s
%0	70.78	82.35	88.72	175.64	86.28	80.79	68.96	159,42
%1	70,15	82,4	89,1	165,29	85,91	80,12	68,59	155,11
%3	70,33	82,55	88,96	159,88	86,03	80,22	68,76	151,70
%5	70,48	82,7	89,12	155,59	86,08	80,06	68,54	147,66
$\text{Al}_2\text{O}_3(80\text{nm})/\text{A82}$	T_{mo}	T_{mp}	T_{me}	H_e	T_{so}	T_{sp}	T_{se}	H_s
%0	70.78	82.35	88.72	175.64	86.28	80.79	68.96	159,42
%1	70,16	82,36	88,95	152,8	86,02	79,94	67,69	148,82
%3	70,66	82,73	89,21	156,84	86,02	80,17	68,32	150,76
%5	70,67	82,33	88,85	154,57	85,92	80,13	68,37	158,59

Çizelge 3.18’in incelenmesinden değişik kütle bölüntülerinde $\text{Al}_2\text{O}_3(20\text{nm})$ nanoparçacık katkılanmasına bağlı olarak erime ve katılma sıcaklıklarında önemli bir değişiklik olmamasına rağmen erime (H_e) ve katılma (H_k) gizli ısılarında sırasıyla %11.4 ve %7.4’e varan bir azalma gerçekleşmektedir. Erime tepe sıcaklığı (T_{ep}) ve katılma tepe sıcaklığı (T_{kp}) arasındaki fark (subcooling etkisi) 2.64°C (%5 katkılama kütle bölüntüsü için) olarak ölçülmüş olup A82’ye göre çok az artmıştır.



Şekil 3.23 MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri, **a)** $\text{Al}_2\text{O}_3(20\text{nm})$, **b)** $\text{Al}_2\text{O}_3(80\text{nm})$

Metal Al_2O_3 nanoparçacıklar için çap etkisini incelemek için 20 nm nanoparçacıklara ek olarak 80 nm Al_2O_3 nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin DTK analizleri gerçekleştirilmiş olup ekzoterm ve endoterm eğrileri şekil 3.24'te verilmiştir. DTK eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda elde edilen termal özellik verileri çizelge 3.18'te verilmiştir. 20 nm boyuta sahip Al_2O_3 nanoparçacıklarla katkılı kompozitlerin erime ve katılma gizli ısıları katkılanan kütle bölüntüsüyle orantılı olarak azalmasına rağmen nanoparçacık boyutunun 80 nm olması durumunda %1 kütle bölüntüsünde erime ve katılma gizli ısılarındaki azalışlar sırasıyla % 13 ve % 6.6 olarak belirlenmiştir. Kütle bölüntüsünün % 3 ve % 5 olması durumunda erime ve katılma gizli ısılarında çok fazla bir değişim olmamaktadır.

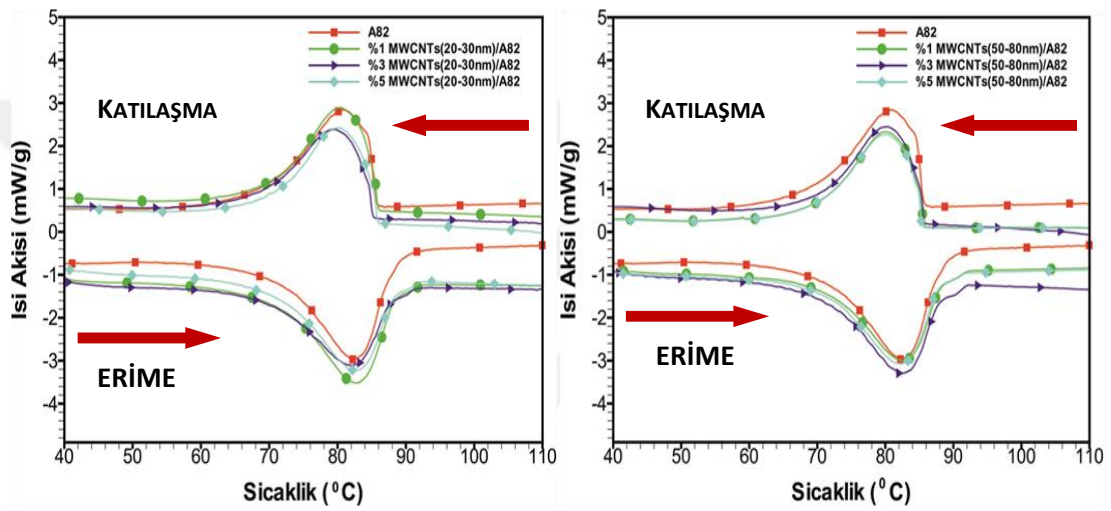


Şekil 3.24 Al_2O_3 nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi

3.6. Karbon Tabanlı Nanoparçacıklar İle Katkılanan Faz Değişken Malzemelerin DTK Özellikleri

Bu bölümde; 20-30 nm ve 50-80 nm dış çaplarına sahip iki farklı MWCNTs ve 6-8nm kalınlığa sahip GNP ile kütlece %1, %3 ve %5 katkılanmış A82 kompozitlerin ısı erime/katılaşma sıcaklıkları ve gizli ısıları gibi termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı yardımıyla ölçülmüştür.

20-30nm dış çapa sahip MWCNTs ile katkılanan kompozitler için elde edilen termogram eğrileri şekil 3.25’de, termogram eğrilerinin analizi sonucu elde edilen termal özellik verileri çizelge 3.19’de verilmiştir.

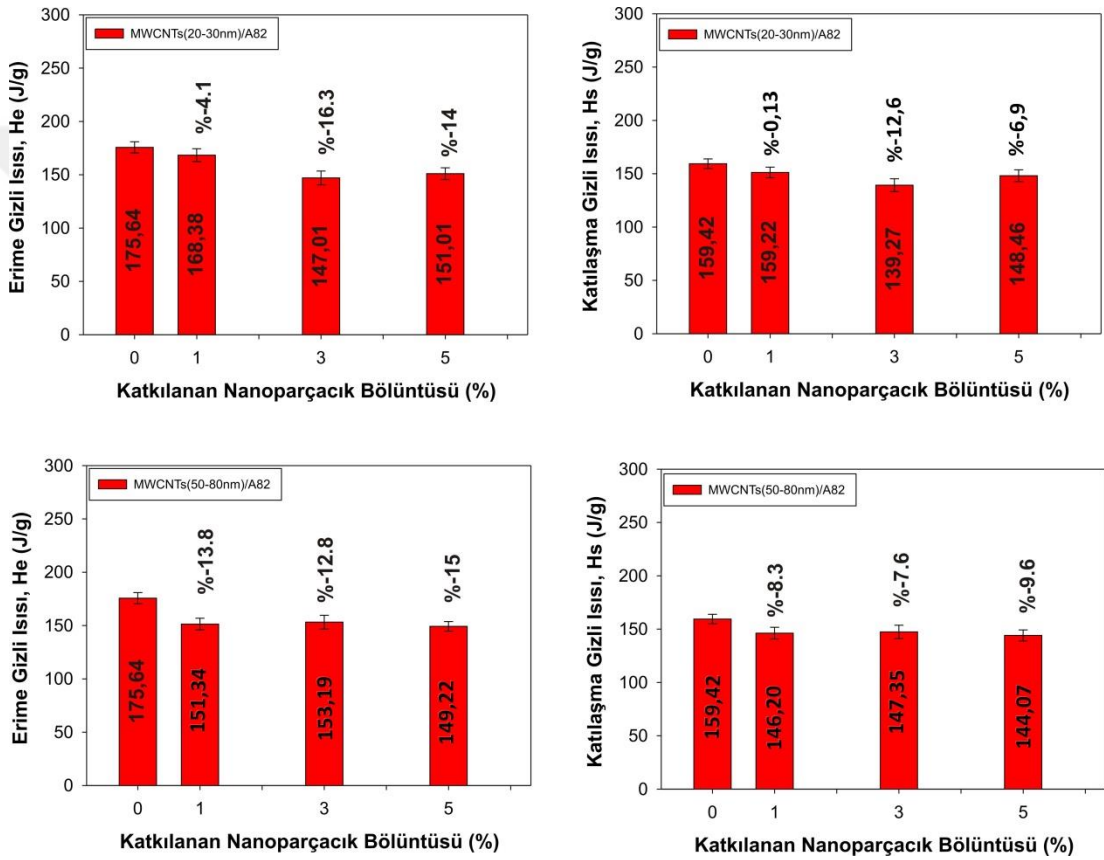


Şekil 3.25. MWCNT nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri, a) MWCNTs (20-30nm), b) MWCNT(50-80nm).

Çizelge 3.19 Farklı boyutlardaki MWCNT/A82 kompozitlerinin DTK veri analizi

MWCNT (20-30nm)/A82								
%	T _{mo}	T _{mp}	T _{me}	H _e	T _{so}	T _{sp}	T _{se}	H _s
%0	70,78	82,35	88,72	175,64	86,28	80,79	68,96	159,42
%1	70,39	82,58	88,95	168,38	86,32	80,32	69,9	159,22
%3	69,54	82,43	89,1	147,01	86,3	80,33	69,75	139,27
%5	70,31	82,53	88,96	151,01	86,3	80,03	69,64	148,46
MWCNT (50-80nm)/A82								
%	T _{mo}	T _{mp}	T _{me}	H _e	T _{so}	T _{sp}	T _{se}	H _s
%0	70,78	82,35	88,72	175,64	86,28	80,79	68,96	159,42
%1	70,27	82,49	88,87	151,34	86,06	80,09	69,74	146,2
%3	70,16	82,55	88,78	153,19	86,1	80,12	70,25	147,35
%5	70,69	82,08	88,39	149,22	85,79	79,96	69,68	144,07

Metal oksit nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlere benzer olarak 20-30 nm dış çapa sahip MWCNT/A82 kompozitlerin erime/katılma sıcaklıklarının katkılanan nanoparçacık bölüntüsüne bağlı olarak değişmediği söylenebilir. Buna ek olarak katkılanan nanoparçacık kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak erime/katılma gizli ısılarının azaldığı belirlenmiştir. %5 MWCNT/A82 kompoziti için erime gizli ısındaki azalma (kötüleşme) yaklaşık olarak %14 iken katılma gizli ısındaki azalma (kötüleşme) % 6.9 civarındadır. 20-30 nm dış çapa sahip MWCNT ile katkılanan kompozitler için subcooling etkisi katılanmamış organik FDM'ye göre çok az artarak 2.83°C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.26 MWCNT nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi

MWCNT katkılı kompozitler için çap etkisinin DTK termal özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için 50-80nm dış çapa sahip MWCNT ile katkılanan kompozitler içinde DTK ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 50-80 nm dış çapa sahip MWCNT ile katkılanan kompozitler için elde edilen termogram eğrileri şekil 3.26'de, eğrilerin analiz sonucu elde edilen termal özellik verileri çizelge 3.19'da verilmiştir. Benzer şekilde erime/katılma gizli ısılarının katkılanan MWCNT

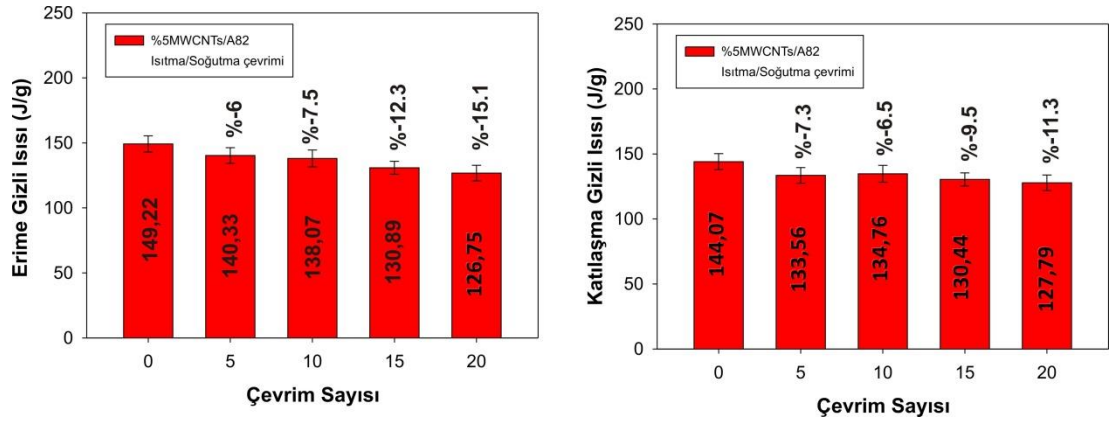
oranına göre değişmemekle birlikte bir değişim gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çapın artmasına bağlı olarak gerek erime gerekse de katılma gizli ısılarında düşük kütle bölüntüsü (%1) için ani bir azalma söz konusudur. Buna ilave olarak %3 ve %5 oranlarında katılan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının %1 katılan kompozite göre belirgin bir değişim göstermediği belirlenmiştir.

Çizelge 3.20’de %5 MWCNT(50-80 nm)/A82 kompozitinin başlangıç, 5, 10, 15, 20 ısıtma çevriminin DTK analizi sonucunda elde edilen veriler, şekil 3.27’de ise çevrim etkisinin erime ve katılma gizli ısı değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. (MWCNT(50-80 nm)/A82 kompozitinin çevrime girmeden önceki ölçülen erime ve katılma gizli ısı değerleri başlangıç olarak ifade edilmiştir.)

Çizelge 3.20 %5 MWCNT(50-80nm)/A82 kompozitinin çevriminin DTK veri analizi

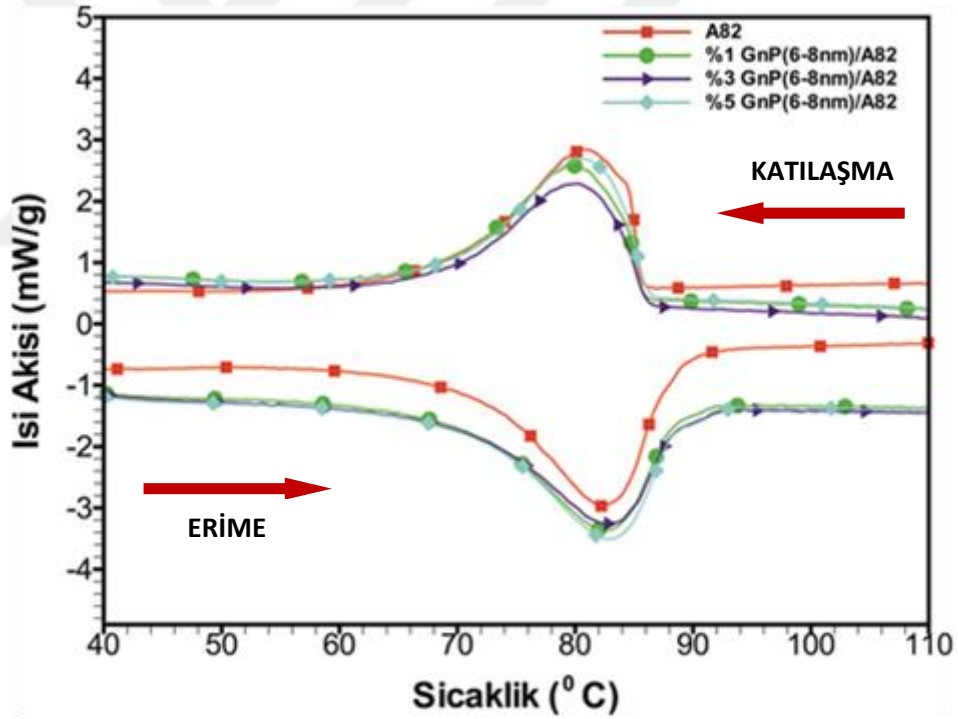
%5 MWCNT(50-80nm)/A82								
%	T _m	T _{mp}	T _{me}	He	T _s	T _{sp}	T _{se}	H _s
BAŞLANGIÇ	70,69	82,08	88,39	149,22	85,79	79,96	69,67	144,07
5.ÇEVİRİM	68,81	81,71	88,39	140,33	86,05	79,6	69,14	133,56
10.ÇEVİRİM	69,93	81,62	88,42	138,07	86,01	79,36	68,48	134,76
15.ÇEVİRİM	69,39	81,45	88,11	130,89	85,63	79,22	68,66	130,44
20.ÇEVİRİM	68,52	80,89	87,65	126,75	85,33	78,76	67,63	127,79

MWCNT(50-80nm)/A82 kompozitinin başlangıç, yani çevrime girmeden önce ölçülen erime gizli ısı 149,22, katılma gizli ısı 144,07’dir. Erime gizli ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 için sırasıyla 140.33, 138.07, 130.89 ve 126.75’dir. Başlangıç erime gizli ısına kıyasla erime gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla yaklaşık olarak %6, %7.5, %12.3 ve %15.1 olarak belirlenmiştir. Buradan da anlaşılabacağı üzere erime gizli ısı, ısıtma/soğutma çevrimleri süresince kötüleşmektedir. Katılma gizli ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 çevrim için sırasıyla 133.56, 134.76, 130.44 ve 127.79’dur. Başlangıç katılma gizli ısına kıyasla katılma gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla yaklaşık olarak %7.3, %6.5, %9.5 ve %11.3’dir. Buradan da anlaşılabacağı üzere katılma gizli ısı, ısıtma/soğutma çevrimleri süresince kötüleşmektedir. Sonuç olarak erime/katılma gizli ısılarının ısıtma/soğutma çevrimi süresince kararlılığını koruyamadığı ve stabilitesinin bozulduğu söylenebilir.



Şekil 3.27 MWCNTs nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının çevrimlere göre değişimi

6-8nm kalınlığa sahip GNP katkılanan kompozitler için elde edilen termogram eğrileri şekil 3.28, eğrilerin analiz sonucu elde edilen termal özellik verileri çizelge 3.21’de verilmiştir.

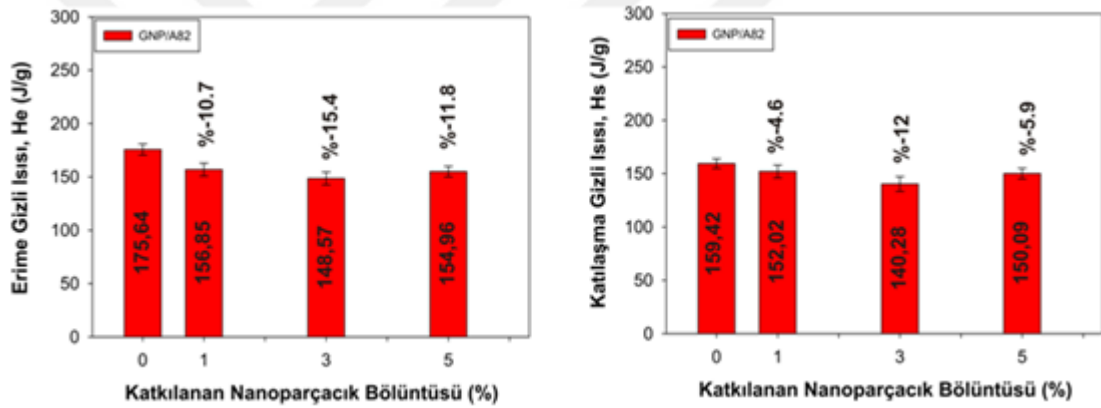


Şekil 3.28 GNP nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin termogram eğrileri

Çizelge 3.21 GNP(6-8nm)/A82 kompoziti için DTK değerleri

GNP/A82	T _{mo}	T _{mp}	T _{me}	H _e	T _{so}	T _{sp}	T _{se}	H _s
%0	70,78	82,35	88,72	175,64	86,28	80,79	68,96	159,42
%1	69,77	82,49	88,8	156,85	86,2	79,87	69,05	152,02
%3	69,76	82,72	89,15	148,57	86,34	79,86	68,88	140,28
%5	70,92	82,77	89,08	154,96	86,44	80,49	70,00	150,09

Şekil 3.29’da da görüleceği gibi katkılanan GNP oranına bağlı olarak erime ve katılaşma gizli ısılarında belirli bir azalış meydana gelmektedir. %5 GnP/A82 kompoziti için erime gizli ısısındaki kötüleşme %11.8 iken katılaşma gizli ısısındaki kötüleşme %5.9 civarındadır. Bu kompozitte erime ve katılaşma gizli ısılarında en fazla kötüleşme oranı sırasıyla %15.4 ve %12 olarak gözlemlenmiştir.

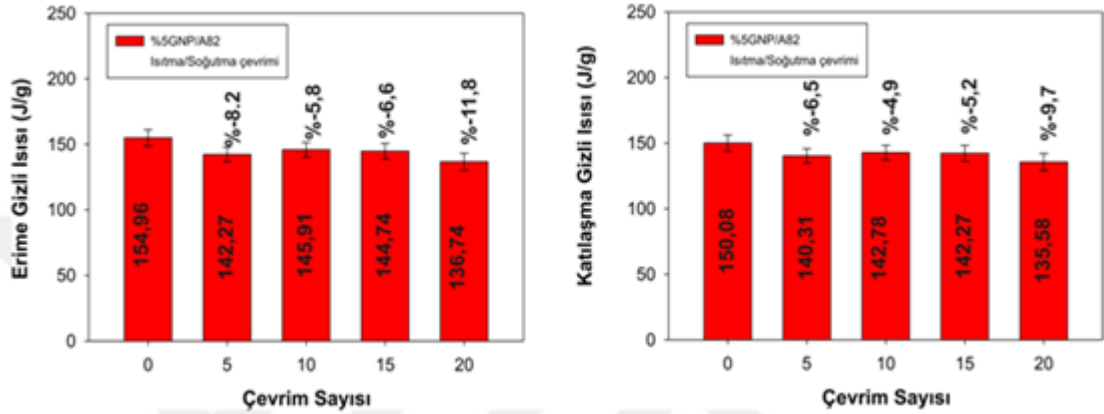


Şekil 3.29 GNP nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılaşma gizli ısılarının kütle bölüntüsüne göre değişimi

Çizelge 3.22’de %5 GNP (6-8 nm)/A82 kompozitinin başlangıç, 5, 10, 15, 20 ısıtma çevriminin DTK analizi sonucunda elde edilen veriler, şekil 3.30’da ise çevrim etkisinin erime ve katılaşma gizli ısı değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. (GNP(6-8nm)/A82 kompozitinin çevrime girmeden önceki ölçülen erime ve katılaşma gizli ısı değerleri başlangıç olarak ifade edilmiştir.)

Çizelge 3.22 %5 GNP (6-8 nm)/A82 kompozitinin çevriminin DTK veri analizi

	% 5 GNP(6-8 nm)/A82							
	Tm	Tmp	Tme	He	Ts	Tsp	Tse	Hs
BAŞLANGIÇ	70,92	82,77	89,08	154,96	86,44	80,49	69,99	150,08
5.ÇEVİRİM	71,76	82,52	88,92	142,27	86,76	80,46	70,27	140,31
10.ÇEVİRİM	71,88	82,46	88,73	145,91	86,76	80,64	70,58	142,78
15.ÇEVİRİM	71,29	82,23	88,76	144,74	86,79	80,54	69,76	142,27
20.ÇEVİRİM	69,63	81,91	88,65	136,74	86,19	79,84	68,92	135,58



Şekil 3.30 GNP nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin erime/katılma gizli ısılarının çevrimlere göre değişimi

GNP(6-8 nm)/A82 kompozitinin başlangıç, yani çevrime girmeden önce ölçülen erime gizli ısısı 154,96, katılma gizli ısısı 150,08'dir. Erime gizli ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 için sırasıyla 142,27, 145,91, 144,74 ve 136,74'dür. Başlangıç erime gizli ısısına kıyasla erime gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla yaklaşık olarak %8,2, %5,8, %6,6 ve %11,8 olarak belirlenmiştir. Katılma gizli ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 çevrim için sırasıyla 140,31, 142,78, 142,27 ve 135,58'dir. Başlangıç katılma gizli ısısına kıyasla erime gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla yaklaşık olarak %6,5, %4,9, %5,2 ve %9,7'dir. Buradan GNP/A82 kompozitlerinin erime/katılma gizli ısılarının çevrime göre azaldığı ancak MWCNTs nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlere göre daha kararlı oldukları söylenebilir.

4. GENEL SONUÇLAR

Bu tez; FDM'lerin (ısıl iletkenliklerini iyileştirmek için kullanılabilecek farklı nanoparçacıkların gerek ısıl iletkenlik katsayısı üzerindeki gerekse de diğer termal özellikler üzerindeki etkisinin sistematik olarak karşılaştırılmasını içermektedir. Bu amaçla tez kapsamında, herhangi bir arayüz maddesi (surfactants) kullanılmadan farklı metal/metaloksit ve karbon tabanlı nanoparçacıklar kullanılarak hazırlanacak olan FDM/nanoparçacık kompozitlerinin termal özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan bu araştırmalardan elde edilen sonuçlar özet olarak sunulmuştur.

İlk olarak farklı metal/metaloksit ve karbon tabanlı nanoparçacıkların kütlece %1, %3 ve %5 fraksiyonlarda katkılanmasıyla oluşan FDM/nanoparçacık kompozitlerinin ısıl iletkenliklerindeki değişim incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Herhangi bir nanoparçacık ile katkılanmamış saf A82 organik FDM'sinin ısıl iletkenliği 0.308 W/mK olarak ölçülmüştür.
- Kütlece %1-%5 Ag/A82 kompozitinin ısıl iletkenliğinde katkılanan Ag nanoparçacık kütle bölüntüsüne göre herhangi bir iyileşme olmadığı belirlenmiştir. Aksine katkılanan Ag nanoparçacık bölüntüsüne bağlı olarak kompozit ısıl iletkenliklerinin daha da kötüleştiği tespit edilmiştir. Bu durumun, Ag metal nanoparçacıkların FDM içerisinde homojen dağılmamaları ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.
- Ag nanoparçacıklara benzer olarak CuO nanoparçacıkların da FDM içerisinde iyi dağılmadıkları numunelerin genel görünümünden anlaşılmaktadır. Benzer bir mekanizmayla CuO nanoparçacıklarının da soğuma sırasında çökmelerinin bu duruma neden olduğu söylenebilir. Bu durumda etkin bir network yapısının oluşmaması nedeniyle CuO/FDM kompozitinin de ısıl iletkenliğinin katkılanan kütle bölüntüsüne göre kötüleştiği görülmüştür.
- ZnO/A82 kompozitinde genel görünüşten nanoparçacıkların FDM içerisine homojen olarak dağıldığı izlenimine varılmasına rağmen ısıl iletkenlik katsayısında kayda değer bir iyileşme olmadığı görülmektedir. Bu durum katkılanan ZnO nanoparçacıkların FDM içerisinde etkin bir network ağı oluşturamaması ile ilişkilendirilebilir.

- Çalışmada kullanılan bir diğer metaloksit nanoparçacık da TiO_2 olup sistematik bir karşılaştırma açısından ZnO nanoparçacıklar ile yakın boyutta olmasına dikkat edilmiştir. Katkılanan nanoparçacık kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak ısı iletkenlikte doğrusal bir artış olduğundan bahsedilebilir. Bununla birlikte ısı iletkenlikteki doğrusal artış eğiminin oldukça düşük olduğu görülmektedir. A82 FDM içerisine TiO_2 nanoparçacık katkılanması durumunda, ZnO nanoparçacık katkılanmasına benzer olarak ısı iletkenlikte kayda değer bir iyileşmenin olmadığı söylenebilir. Her ne kadar gözle anlaşılamamasına rağmen TiO_2 nanoparçacıkların A82 FDM içerisine homojen olarak karışmamasından dolayı etkin bir network ağının oluşamaması nedeniyle ısı iletkenlikte çok fazla bir iyileşme elde edilemediği düşünülmektedir.
- Yaklaşık olarak aynı boyutta (20nm) MgO nanoparçacığının katkı maddesi olarak kullanılması durumunda ise gerek ZnO gerekse de TiO_2 nanoparçacıklara göre ısı iletkenlikte daha fazla iyileştirme elde edilmiştir. Bu durumda herhangi bir arayüz madde kullanılmaması halinde MgO nanoparçacıkların ZnO ve TiO_2 nanoparçacıklara göre A82 FDM içerisinde daha iyi bir dağılım gerçekleştirdikleri ve buna bağlı olarak da daha iyi bir ısı iletim network ağı oluşturdıkları söylenebilir.
- Bu çalışmada organik FDM içerisine katkılanan son metaloksit nanoparçacıklar Al_2O_3 nanoparçacıklarıdır. İki farklı boyutta kullanılan Al_2O_3 ile katkılanmasıyla oluşan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{A82}$ kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin değişimine bakarsak;
Her iki tip Al_2O_3 nanoparçacığının kütlece %1 katkılanması durumunda elde edilen $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{A82}$ kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin azaldığı veya değişmediği görülmektedir. Isı iletkenlik değerinde gözlemlenen bu düşüşün kütlece düşük bölüntülerde sürekli ve etkin bir network yapısının oluşamamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. %1 0,387-0,30kütle bölüntüsünün üzerinde olmak kaydıyla kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak ısı iletkenliğinin doğrusal olarak arttığı her iki boyuta sahip Al_2O_3 nanoparçacıklar için görülmektedir. Bununla birlikte çapın artmasının ısı iletkenlikteki iyileşmeyi olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Buna neden olarak FDM içerisine katkılanan nanoparçacıkların FDM tarafından

kaplanmasının çapın artmasına bağlı olarak zorlaşması nedeniyle daha etkin bir ısı iletim ağıının oluşması gösterilebilir.

- Katkılanan tüm metal/metaloksit nanoparçacıklar karşılaştırıldığında, ısı iletkenlikteki iyileşmenin 80 nm dış çapa sahip Al_2O_3 nanoparçacıklarla katkılanan A82 kompozitleri için en büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte yaklaşık aynı çaptaki nanoparçacıkların karşılaştırılmasından en iyi ısı iletkenlik iyileşmesinin 20 nm dış çapa sahip MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozit için elde edildiği sonucuna varılmıştır. Bu durum metal/metaloksit nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin ısı iletkenliklerindeki artışın küresel nanoparçacıkların iletkenlikleri yanı sıra nanoparçacık yüzey alanı ile de ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Saf A82 içerisine katkılama yapılan metal/metaloksit nanoparçacıklara ek olarak 20-30nm ve 50-80nm dış çaplarına sahip iki farklı MWCNTs ve 6-8nm kalınlığa sahip GNP ile kütlece %1, %3 ve %5 katkılanmış A82 kompozitlerin ısı iletkenlikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu sayede öncelikle MWCNTs nanoparçacıklar için boyut etkisinin ısı iletkenlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna ilave olarak MWCNTs ve GNP ile katkılanan kompozitlerin ısı iletkenlikleri karşılaştırılarak karbon tabanlı nanoparçacıkların şekil etkisinin de ısı iletkenlik üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İki farklı boyutta ve kütlece %1, %3 ve %5 bölüntülerde MWCNTs ile katkılanan organik A82 kompozitlerine bakacak olursak;

- 20-30nm dış çapa sahip MWCNTs/A82 kompozitler için ısı iletkenliğinin katkılanan MWCNTs kütle bölüntüsüne bağlı olarak doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir. En yüksek yüklemde ısı iletkenlikte elde edilen iyileşme katkılanmamış A82 FDM'ye göre % 25.6 olarak belirlenmiştir. Bu durumda metal/metaloksitlere kıyasla ısı iletkenlikte belirgin bir iyileşme sağlandığı söylenebilir. Esasen ısı iletkenlikte elde edilen iyileşmenin karbon tabanlı nanoparçacıkların yüksek ısı iletkenliğe sahip olmalarının yanı sıra yüzey alanlarının da daha büyük olması nedeniyle gerçekleştiği söylenebilir. Tüp biçimindeki MWCNTs nanoparçacıklar küresel metal/metaloksit nanoparçacıklara göre hem daha yüksek ısı iletkenliğe hem de daha büyük yüzey alanına sahiptir.

- 50-80nm dış çapa sahip MWCNTs ile katkılanan A82 kompoziti için ısı iletkenlikte elde edilen iyileştirmeler göz önüne alındığında 20-30nm dış çapa göre ısı iletkenlikte daha fazla iyileştirme elde edildiği görülmektedir. %5 MWCNTs/A82 kompoziti için ısı iletkenlikteki iyileşme % 38.6 olarak belirlenmiştir. Tedarik edilen firmanın sağlamış olduğu bilgilere göre 20-30 nm dış çapa sahip MWCNTs 110 m²/g, 50-80nm dış çapa sahip MWCNTs ise 40 m²/g yüzey alanına sahiptir. Bu durumda daha düşük yüzey alanına sahip (ancak daha büyük dış çapa sahip) MWCNTs nanoparçacıklarının ısı iletkenliği daha fazla arttırmasının nedeni olarak tüp-tüp arayüzündeki ve tüp-FDM arayüzündeki temas direncinin azalmasına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir.
- Özetle ısı iletkenliği arttırmak için katkılanan nanoparçacıkların kendine ait ısı iletkenliklerinin yanı sıra diğer fiziksel özelliklerinin de performans artırımı üzerinde etkileri olduğu sonucuna varılabilir. Daha önce metaloksit nanoparçacık bölümünde iki farklı dış çapa sahip küresel Al₂O₃ nanoparçacıklarından çapının daha büyük olanın ısı iletkenliği daha iyi arttırdığı belirlenmişti. Benzer bir sonuç tüp biçimindeki MWCNTs için de elde edilmiştir. Bu durumda katkılanan nanoparçacık boyutunun artmasının ısı iletkenliği arttırdığı net olarak söylenebilir.

Isı iletkenlikleri iyileştirilmiş FDM kompozitlerin uygulamada kullanılabilmesi için güvenilirliğinin test edilmesi gerekmektedir. Kompozitlerin güvenilirliği ısı iletkenliklerinin kararlı olmasının gösterilmesi ile belirlenebilir. Kompozitlerin ısı iletkenliklerinin kararlı olduğunu göstermek için ise ısı iletkenliğin ısıtma/soğutma işlemlerinden oluşan çevrimler boyunca değişmemesi gerekmektedir.

- 50-80nm dış çapa sahip MWCNTs katkılanarak elde edilen FDM kompozitlerinin ısıtma/soğutma çevrimlerine göre ısı iletkenlik değerlerini incelediğimizde, %5 MWCNT (50-80nm)/A82 kompozitinin başlangıçtaki ısı iletkenlik değeri 0,427 W/mK'dir. 5,10,15 ve 20 ısıtma/soğutma çevrimi sonunda ölçülen ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0,451 W/mK, 0,445 W/mK, 0,449 W/mK ve 0,439 W/mK olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre ısı iletkenliğin ısıtma/soğutma çevrimi sırasında kötüleşmediği aksine daha da iyileştiği söylenebilir. İyileşmenin MWCNTs nanoparçacıklarının ısıtma/soğutma çevrimleri boyunca kümeleşmesi

sonucunda daha efektif ve sürekli bir ısı iletim ağının oluşmasına bağlı olarak gerçekleştiği söylenebilir.

Bir diğer karbon tabanlı nanoparçacık olarak 6-8nm kalınlığa sahip GNP nanoparçacıkların kütlece %1, %3 ve %5 bölüntülerde organik A82 FDM içerisine katkılanması durumunda elde edilen ısı iletkenlik değerlerine bakacak olursak;

- Nanoparçacık/FDM kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin değişimlerine benzer olarak kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik doğrusala yakın bir artış göstermektedir. Buna ek olarak FDM içerisine GNP katkılanması durumunda ısı iletkenlikteki iyileşmenin daha önce kullanılan metal/metaloksit ve MWCNTs nanoparçacıklara göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Kütlece %5 GNP/A82 kompozitinin ısı iletkenliğindeki iyileşme % 155 olarak ölçülmüştür. Başka bir ifadeyle katkılanmamış FDM'ye göre ısı iletkenlik 2.6 kat artırılmıştır.
- Özetle MWCNTs ve GNP karbon tabanlı nanoparçacıkların A82 organik FDM içerisinde oldukça farklı termal iyileşme sağladıkları görülmektedir. Karbon tabanlı nanoparçacık olarak gerek MWCNTs gerekse de GNP'nin aynı ısı iletkenlik katsayısına (3000W/mK) sahip olmasına rağmen ısı iletkenlikte görülen bu derece farklı iyileşmenin nedeninin MWCNTs ve GNP nanoparçacıklarının şekil yapısı ve dolayısıyla yüzey alanı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi MWCNTs çok katmanlı bir tüp şeklinde iken GNP iki boyutlu düzlemsel bir yapıya sahiptir. GNP nanoparçacıklar düzlemsel yapısı gereği MWCNTs'e göre daha büyük yüzey alanına sahiptirler. Bununla birlikte ısı iletkenlik, fonon saçılım mekanizmasına dayanmakta olup, yüksek fonon frekans saçılımına sahip malzemelerin ısı iletkenlik değerleri de yüksek çıkmaktadır. Isı iletkenlik değerleri düşük olan FDM içerisine katkılanan nanomalzemeler ile üretilen kompozitlerin ısı iletkenliklerinin yüksek çıkmasının nedeni olarak düşük olan fonon saçılım frekansının artırılması gösterilmektedir. Bu kapsamda düşük ısı iletkenliğe sahip olan FDM içerisine katkılanacak olan nanomalzemelerin, FDM içerisine çok iyi karışması ve yüksek yüzey alanına sahip olması fonon saçılım frekansını artırmakta ve bu sayede ısı iletkenliği daha iyi artırmaktadır. Bu anlamda GNP iki boyutlu ve düzlemsel

yapıya sahip olması hem fonon saçılım frekansını artırmakta hem de FDM içerisinde daha iyi karışmasını sağlayarak daha efektif bir ısı iletim network ağı oluşturmaktadır.

Isı iletkenlikleri önemli derecede arttırılmış olan GNP/A82 kompozitlerinin uygulamada kullanılabilirliğini veya güvenilirliğini belirlemek için ısıtma/soğutma çevrimleri boyunca ısı iletkenliklerinin kötüleşmediğinin gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaçla %5 GNP/A82 kompozitinin ısı iletkenlikleri başlangıç, 5, 10, 15 ve 20 ısıtma/soğutma çevrimi için elde edilerek termal kararlılığı belirlenmiştir. 6-8 nm kalınlığa sahip GNP katkılanarak elde edilen FDM kompozitlerinin ısıtma/soğutma çevrimlerine göre ısı iletkenliklerinin değişimine bakacak olursak;

- Isı iletkenlik değeri 20 çevrim boyunca hafif bir azalış gösterdiği görülmektedir. Isıtma soğutma çevrimleri boyunca ısı iletkenlikteki bu kötüleşmenin GNP katkılı kompozitin ısı iletkenliğindeki büyük artışın yanında ihmal edilebilir olduğu görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen GNP/FDM kompozitin güvenilir olduğu ve uzun süreli kullanıma elverişli olduğu belirlenmiştir.

Organik A82 FDM içerisinde katkılanan tüm nanoparçacıkların %5 kütle bölüntüsü ile elde edilen kompozitlerin ısı iletkenlik değeri 1erinin karşılaştırılmasına bakacak olursak;

- Isı iletkenlik artışı azdan çoğa sıralandığında, 0,277 ile Ag, 0,301 ile CuO, 0,316 ile ZnO, 0,319 ile TiO₂, 0,328 ile Al₂O₃(20 nm), 0,334 ile MgO, 0,335 ile Al₂O₃(80 nm), 0,387 ile MWCNT(20-30 nm), 0,427 ile MWCNT(50-80nm) ve 0,785 ile GNP şeklindedir. Buradan da anlaşılacağı gibi GNP/FDM kompozitinin ısı iletkenliğindeki iyileşme diğer nanoparçacıklara göre kıyaslanamayacak derecede yüksektir. Bunu boyutları arttıkça ısı iletkenlikte artış gösteren MWCNTs takip etmektedir.

Bu çalışmada farklı metal/metaloksit, karbon tabanlı nanoparçacıklar ile yapılan katkılama sonucunda elde edilen veriler yukarıda ayrıntılı olarak incelendiğinde, Ag nanoparçacıklarla katkılanan kompozit haricindeki tüm nanoparçacıklarda ısı iletkenlikte iyileşme elde edilmiştir. Buna ek olarak GNP

katkılanan kompozitin ısı iletkenliğindeki iyileşmenin derece olarak çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

Farklı metal/metaloksit, karbon tabanlı nanoparçacıkların kütlece %1, %3 ve %5 fraksiyonlarda katkılanmasıyla oluşan FDM/nanoparçacık kompozitlerinin ısı iletkenliklerindeki değişimin incelenmesinin ardından DTK analizleri sonucunda elde edilen termal özellik verileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Herhangi bir nanoparçacık ile katkılanmamış saf A82 organik FDM'nin ekzoterm ve endoterm eğrilerinin analiz edilmesi sonucunda erime başlangıç sıcaklığı 70.78°C iken erime sonlanma sıcaklığı 88.72°C olarak ölçülmüştür. A82 organik FDM için erime tepe sıcaklığı 82.35°C, katılaşma tepe sıcaklığı 80.79°C olup subcooling etkisi 1.56°C civarındadır. Endoterm pikinin altında kalan alan erime gizli ısını vermekte olup yapılan analiz sonucuna A82 organik faz değişken malzemenin erime gizli ısı (He) 175.64 J/g olarak belirlenmiştir. Yani erime sırasında A82 organik faz değişken malzemesi gram başına 175.64 J enerji absorblama kapasitesine sahiptir. Katılaşma gizli ısı ise ekzoterm pikinin altında kalan alandan 159.42 J/g olarak ölçülmüştür.
- A82 içerisine değişik kütle bölüntülerinde CuO nanoparçacık katkılanması durumunda erime ve katılaşma sıcaklıklarının değişmediği belirlenmiştir. Buna karşılık erime gizli ısı ve erime katılaşma gizli ısılarının yaklaşık 5 kat azaldığı görülmektedir. CuO nanoparçacık katkılanan A82 kompozitler için bu azalmanın oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Değişik kütle bölüntülerinde CuO nanoparçacık katkılanan kompozitlerin ısı iletkenlik üzerinde de bir artış sağlamadığı göz önüne alındığında A82 organik FDM içerisine değişik kütle bölüntülerde CuO katkılanması durumunun işe yaramadığı belirlenmiştir.
- %1, %3 ve %5 ZnO nanoparçacıklarla katkılanan FDM kompozitlerin ekzoterm ve endoterm eğrilerinin katkılanmamış FDM'ye benzer bir değişim geçirdiği görülmektedir. Bununla birlikte bundan önceki metaloksit nanoparçacık katkılı kompozitlerin aksine ekzoterm ve endoterm genliklerinin nanoparçacık katkılı kompozitler için daha büyük olduğu görülmektedir. Ekzoterm ve endoterm eğrilerinin altında kalan alanların

sırasıyla erime gizli ısı ve katılma gizli ısılarıyla ilişkili olduğu gözönüne alındığında, organik FDM içerisine ZnO katkılanmanın gizli ısıları iyileştirdiği sonucuna varılabilir. Erime gizli ısısındaki artışa bağlı maksimum iyileşme %3 ZnO /A82 kompoziti için % 42.6 olarak ölçülmüştür. Bu kompozitinkütle bölüntüsüne göre katılma gizli ısısında da %44-%54 aralığında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu durumun ZnO nanoparçacıkların FDM molekülleri arasındaki bağları kuvvetlendirmesi nedeniyle sağlandığı düşünülmektedir. Malzemelerin ısı enerji depolama özelliği doğrudan kimyasal potansiyel enerji ile kimyasal potansiyel enerji ise zayıf Van der Waals çekme kuvvetleri ile moleküller arası güçlü iyonik ve kovalent bağlar ile ilişkilidir. Sonuç olarak, moleküller arası çekme kuvvetleri ne kadar güçlü ise kimyasal potansiyel enerji de o kadar yüksek olmakta ve FDM'nin birim kütle başına ısı enerji depolama kapasitesi artmaktadır. FDM'lerin birim kütle başına ısı depolama kapasitesi, moleküller arası çekme kuvvetleri ile değişmektedir. Sonuç olarak ZnO nanoparçacıkların A82 FDM'nin ısı iletkenliğini önemli miktarda artırmamasına rağmen enerji depolama kapasitesi üzerinde olumlu etkide bulunduğu tespit edilmiştir.

Benzer biçimde katkılanan TiO₂ nanoparçacık kütle bölüntüsüne bağlı olarak erime ve katılma sıcaklıklarında değişim olmadığı buna karşın gizli ısı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.%1 kütle bölüntüsünde TiO₂ nanoparçacık katkılanan A82 kompozitlerin erime ve katılma gizli ısıları sırasıyla %11 ve % 7.1 azalmaktadır. Bununla birlikte %5 TiO₂ katkılanan A82 FDM kompozitinin erime ve katılma gizli ısılarındaki azalış oranları sırasıyla %17.7 ve %8.1 olarak ölçülmüştür. Böylece katkılanan kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak erime ve katılma gizli ısılarındaki azalış oranının arttığı sonucuna varılmaktadır.

- MgO(20nm) nanoparçacıklarla sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılanan kompozitlerin DTK analizi sonucunda elde edilen termogram eğrilerinin analizi sonucunda katkılanan kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak erime ve katılma sıcaklıklarının önemli derecede değişmediği söylenebilir. Buna ilave olarak katkılanan nanoparçacık bölüntüsüne bağlı olarak erime/katılma gizli ısılarındaki azalma MgO nanoparçacıklarla katkılanan kompozitler içinde gerçekleşmektedir. %1 MgO/A82 ve %3

MgO/A82 için azalma oranı küçük iken %5 MgO/A82 kompoziti için azalma oranı belirgin biçimde artmaktadır. %5 MgO katkılanan A82 kompozit malzemesi için erime ve katılma gizli ısılarındaki azalma oranları sırasıyla %12 ve %12.9 olarak belirlenmiştir.

- $\text{Al}_2\text{O}_3(20\text{nm})$ nanoparçacıklarla sırasıyla %1, %3 ve %5 katkılanan kompozitlerin DTK analizi sonucunda elde edilen termogram eğrilerinin analizi sonucunda, ekzoterm ve endoterm eğrilerinin değişiminin katılanmamış A82 organik FDM'ye oldukça benzer olduğu görülmektedir. CuO/A82 kompozitlerinin aksine DTK eğrilerinin pik genliklerinde çok fazla bir değişim olmadığı görülmektedir. Endoterm eğrisinin ekzoterm eğrisine göre hafifçe sola kayması subcooling etkisinin varlığını göstermektedir. Değişik kütle bölüntülerinde $\text{Al}_2\text{O}_3(20\text{nm})$ nanoparçacık katılanmasına bağlı olarak erime ve katılma sıcaklıklarında önemli bir değişiklik olmamasına rağmen erime (H_e) ve katılma (H_k) gizli ısılarında sırasıyla %11.4 ve %7.4'e varan bir azalma gerçekleşmektedir. Erime tepe sıcaklığı (T_p) ve katılma tepe sıcaklığı (T_{kp}) arasındaki fark (subcooling etkisi) 2.64°C (%5 katılma kütle bölüntüsü için) olarak ölçülmüş olup A82 'ye göre çok az artmıştır.
- Metal Al_2O_3 nanoparçacıklar için çap etkisini incelemek için 20 nm nanoparçacıklara ek olarak 80 nm Al_2O_3 nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlerin DTK analizleri 20 nm boyuta sahip Al_2O_3 nanoparçacıklarla katkılı kompozitlerin erime ve katılma gizli ısıları katkılanan kütle bölüntüsüyle orantılı olarak azalmasına rağmen nanoparçacık boyutunun 80 nm olması durumunda %1 kütle bölüntüsünde erime ve katılma gizli ısılarındaki azalışlar sırasıyla % 13 ve % 6.6 olarak belirlenmiştir. Kütle bölüntüsünün % 3 ve % 5 olması durumunda erime ve katılma gizli ısılarında çok fazla bir değişim olmamaktadır.
- Metal oksit nanoparçacıklarla katkılanan kompozitlere benzer olarak 20-30 nm dış çapa sahip MWCNTs/A82 kompozitlerin erime/katılma sıcaklıklarının katkılanan nanoparçacık bölüntüsüne bağlı olarak değişmediği söylenebilir. Buna ek olarak katkılanan nanoparçacık kütle bölüntüsünün artmasına bağlı olarak erime/katılma gizli ısılarının azaldığı belirlenmiştir. %5 MWCNTs/A82 kompoziti için erime gizli ısısındaki azalma (kötüleşme) yaklaşık olarak %14 iken katılma gizli ısısındaki

azalma (kötüleşme) yaklaşık % 6.9 civarındadır. 20-30 nm dış çapa sahip MWCNTs ile katkılanan kompozitler için subcooling etkisi katkılanmamış organik FDM'ye göre çok az artarak 2.83°C olarak ölçülmüştür.

- MWCNTs katkılı kompozitler için çap etkisinin DTK termal özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için 50-80 nm dış çapa sahip MWCNTs / katkılanan kompozitler içinde DTK ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde erime/katılama gizli ısılarının katkılanan MWCNTs oranına göre değişmediği ancak erime/katılama gizli ısılarının değiştiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte çapın artmasına bağlı olarak gerek erime gereksede katılama gizli ısılarında düşük kütle bölüntüsü (%1) için ani bir azalma söz konusudur. Buna ilave olarak %3 ve %5 oranlarında katkılanan kompozitlerin erime/katılama gizli ısılarının %1 katkılanan kompozite göre belirgin bir değişim göstermediği belirlenmiştir.
- MWCNT(50-80nm)/A82 kompozitinin çevrimine bakıldığında, kompozitin başlangıç, yani çevrime girmeden önce ölçülen erime gizli ısı 149,22, katılama gizli ısı 144,07'dir. Erime gizli ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 için sırasıyla 140.33, 138.07, 130.89 ve 126.75'dir. Başlangıç erime gizli ısına kıyasla erime gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla % 6, %7.5, %12.3 ve %15.1 olarak belirlenmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere erime gizli ısı, ısıtma/soğutma çevrimleri süresince kötüleşmektedir. Katılama gizli ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 çevrim için sırasıyla 133.56, 134.76, 130.44 ve 127.79'dur. . Başlangıç katılama gizli ısına kıyasla katılama gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla yaklaşık olarak %7.3, %6,5, %9.5 ve %11.3'dir. Buradan da anlaşılacağı üzere katılama gizli ısı, ısıtma/soğutma çevrimleri süresince kötüleşmektedir. Sonuç olarak erime/katılama gizli ısılarının ısıtma/soğutma çevrimi süresince kararlılığını koruyamadığı ve stabilitesinin bozulduğu söylenebilir.
- Katkılanan GNP oranına bağlı olarak erime ve katılama gizli ısılarında belirli bir azalış meydana gelmektedir. %5 GnP/A82 kompoziti için erime gizli ısısındaki kötüleşme %11.8 iken katılama gizli ısısındaki kötüleşme %5.9 civarındadır.
- GNP(6-8 nm)/A82 kompozitinin başlangıç, yani çevrime girmeden önce ölçülen erime gizli ısı 154,96, katılama gizli ısı 150,08'dir. Erime gizli

ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 için sırasıyla 142.27, 145.91, 144.74 ve 136.74'dür. Başlangıç erime gizli ısısına kıyasla erime gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla yaklaşık olarak %8.2, %5.8, %6.6 ve %11.8 olarak belirlenmiştir. Katılma gizli ısılarının ölçülen değerleri 5, 10, 15 ve 20 çevrim için sırasıyla 140.31, 142.78, 142.27 ve 135.58'dir. Başlangıç katılma gizli ısısına kıyasla erime gizli ısısındaki azalma oranları sırasıyla yaklaşık olarak %6.5, %4.9, %5.2 ve %9.7'dir. Buradan GNP/A82 kompozitlerinin erime/katılma gizli ısılarının çevrime göre azaldığı ancak MWCNTs nanoparçacıklarla katılan kompozitlere göre daha kararlı oldukları söylenebilir.

- Bu proje kapsamında düşük ısı iletkenliğe sahip organik A82 FDM'nin ısı iletkenliğinin artırılması ve bu yapılırken FDM'nin enerji depolama yeteneğinin kötüleşmemesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında yapılan çalışmalarda GNP ile yapılan katkıda ısı iletkenlikte çok fazla bir artış (%155) olurken gizli ısısında ise kabul edilebilir ölçüde (%15'in altında) bir azalma gözlemlenmiştir.
- Aynı boyuttaki metaloksitlere kıyasla ısı iletkenlikte çok fazla bir artış (%8.45) göstermemekle birlikte en iyi artışı gösteren MgO'nin gizli ısısında kabul edilebilir ölçüde (%15'in altında) bir azalma gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, farklı boyutta Al_2O_3 ile yapılan katkı sonucunda ise ısı iletkenlikte çok fazla artış (%8.8) olmamasına rağmen MgO'ye benzer bir şekilde gizli ısısında kabul edilebilir ölçüde (%15'in altında) bir azalma gözlemlenmiştir.
- Ayrıca ZnO nanoparçacıkların A82 FDM'nin ısı iletkenliğini çok fazla artırmamasına rağmen (%2.6) gizli ısılarını önemli miktarda artırmıştır. (En yüksek artış ise %3 fraksiyonda erime gizli ısısında %42.6, katılma gizli ısısında %53.9 olarak tespit edilmiştir.)
- Bu bilgilere dayanarak bundan sonraki gerçekleştirilecek çalışmalarda en iyi iletkenliğe sahip GNP ile yüksek gizli ısıya sahip ZnO nanoparçacıkların optimum oranlarda GNP/ZnO/A82 kompoziti oluşturularak kullanılabilir. Böylece yüksek ısı iletkenliğe ve yüksek gizli ısıya sahip kompozit elde edilmiş olur.

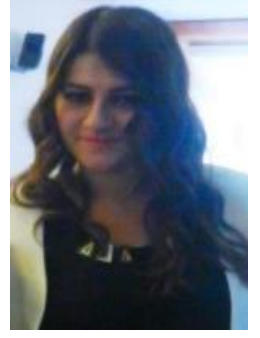
KAYNAKLAR

- [1] **Sarı, A.** (2011). FAZ DEĞİŞİMİ YOLUYLA ISIL ENERJİNİN DEPOLANMASI VE BU ALANDA YAPILAN ÇALIŞMALAR. KİMYA LİSANS ÖĞRENCİLERİ (KİMYAGERLİK, KİMYA ÖĞRETMENLİĞİ VE KİMYA MÜHENDİSLİĞİ) ARAŞTIRMA PROJESİ EĞİTİMİ ÇALIŞTAYI, Kimya-2.
- (http://maycalistaylari.comu.edu.tr/kimya2/sunumlar/danisman/Ahmet_Sari_Danisman.pdf).
- Erişim Tarihi: 20-28.07.2011-Çanakkale
- [2] **KD2-Pro Thermal Properties Analyzer Operator's Manual** Decagon Devices, Inc. Version: February 29, 2016 — 11:29:20
- (http://manuals.decagon.com/Manuals/13351_KD2%20Pro_Web.pdf).
- [3] **B.Merckx, P.Dudoignon, J.P.Garnier ve D.Marchand**, (2012). 'Simplified Transient Hot-Wire Method for Effective Thermal Conductivity Measurement in Geo Materials Microstructive and Saturation Effect.', *Advances in Civil Engineering*.
- [4] **Cau**, (2011). Differential&Thermal& Analysis, M110,Kimya-2 Basic&Laboratory Materials&Science&and&Engineering, CAU.Christian Albrechts Universität Zu Kiel, Technische Fakultät.
- (<http://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/anleitungen/m110.pdf>).
- Erişim Tarihi: 05.09.2011-Almanya
- [5] **Robert F. Speyer**, *Thermal Analysis Of Materials*, school of materials science and engineering georgia institute of technology Atlanta, Georgia, Marcel Dekker, Inc., New York*Basel*Hong Kong (1994)
- ([http://science.fire.usc.edu.cn/download/download1/book/chemistry%20engineering/thermal_20analysis_20of_20materials_201994-speyer-marcelkker\(1\)/thermal_20analysis_20of_20materials_201994-speyer-marcelkker\(1\).pdf](http://science.fire.usc.edu.cn/download/download1/book/chemistry%20engineering/thermal_20analysis_20of_20materials_201994-speyer-marcelkker(1)/thermal_20analysis_20of_20materials_201994-speyer-marcelkker(1).pdf))
- [6] **Babaei H, Keblinski P, Khodadadi J.M.** (2012). Thermal conductivity enhancement of paraffins by increasing the alignment of molecules through adding CNT/graphene, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 58 (2013) 209-216
- [7] **Chen Y-J, Nguyen D-D., Shen M-Y., Yip M-C., Tai N-H.** (2013). Thermal characterization of the graphite nanosheets reinforced parafin phase-change composites, *Composites: Part A*, 44, 40-46,.
- [8] **Cui Y., Liu C., Hu S., Yu X.** (2011). The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 1208-1212.

- [9] **Elgafy A., Lafdi K.** (2005). Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials, *Carbon*, 43,3067-3074.
- [10] **Fan L., Khodadadi JM.** (2012). An experimental investigation of enhanced thermal conductivity and expedited unidirectional freezing of cyclohexane-based nanoparticle suspensions utilized as nanoenhanced phase change materials (NeFDM), *International Journal of Thermal Science*, 62, 120-126.
- [11] **Fan L-W., Fang X., Wang X., Zeng Y., Xiao Y-Q., Yu Z-T., Xu X., Hu Y-C., Cen K-F.** (2013). Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of parafin based nanocomposite phase change materials, *Applied Energy*, 100, 163-172.
- [12] **Ho C.J., Gao J.Y.** (2009). Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 36, 467-470.
- [13] **Kim S, Drzal T.L.**(2009). High latent heat storage and high thermal conductivity phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, 136-142.
- [14] **Kumaresan V., Velraj R., Das S.K.,** (2012). The effect of carbon nanotubes in enhancing the thermal transport properties of FDM during solidification, *Heat Mass Transfer*, 48, 1345-1355.
- [15] **Liu Y-D, Zhou Y-G, Tong M-W, Zhou X-S.,** (2009). Experimental study of thermal conductivity and phase change performance of nanofluids FDMs, *Microfluid Nanofluid* 7:579-584.
- [16] **Pincemin S., Olives R., py X., Christ M.,** (2008). Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 603-613.
- [17] **Sanusi O., Warzoha R., Fleischer AS.,** (2011). Energy storage and solidification of parafin phase change material embedded with graphite nanobibers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4429-4436.
- [18] **Shaikh S., Lafdi K., Hallinan K.,** (2008). Carbon nanoadditives latent energy storage of phase change materials, *Journal of Applied Physics*, 103, 094302.
- [19] **Shi J-N., Ger M-D., Liu Y-M., Fan Y-C., Wen N-T., Lin C-K., Pu N-W.,** (2013). Improving the thermal conductivity and shape-stabilization of phase change materials using nanographite additives, *Carbon*, 51, 365-372.
- [20] **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.

- [21] **Wang J., Xie H., Xin Z.,** (2009). Thermal properties of parafin based composites containing multi-walled carbon nanotubes, *Thermochimica Acta* 488, 39-42.
- [22] **Wang J., Xie H., Xin Z., Li Y., Chen L.,** (2010). Enhancing thermal conductivity of palmitic acid based phase change materials with carbon nanotubes as fillers, *Solar Energy*, 84, 339-344.
- [23] **Wang J., Xie H., Xin Z., Li Y.,** (2010b). Increasing the thermal conductivity of palmitic acid by the addition of carbon nanotubes, *Carbon*, 48, 3979-3986.
- [24] **Wu S., Zhu D., Zhang X., Huang J.,** (2010). Preparation and melting/freezing characteristic of Cu/Parafin nanofluid as phase change material (FDM), *Energy Fuels*, 24, 1894-1898.
- [25] **Xiang J., Drzal L.T.,** (2011). Investigation of exfoliated graphite nanoplatelets (xGnP) in improving thermal conductivity of parafin wax based phase change material, *Solar Energy Material & Soalar Cells*, 95, 1811-1818.
- [26] **Yavari F., Fard H.R., Pashayi K., Rafiee MA., Zamiri A., Yu Z., Ozisik R., Borca-Tasciuc T., Koratkar N.,** (2011). Enhanced thermal conductivity in nanostructured phase change composite due to low concentration graphene additives, *The Journal of Physical Chemistry*, 115, 8753-8758.
- [27] **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 parafin-based suspensions in the presence of carbon nano-additives of various size and shapes, *Carbon*, 53, 277-285.
- [28] **Zeng J.L., Sun L.X., Xu F., Tan ZC., Zhang ZH., Zhang J., Zhang T.,** (2007). Study of FDM based energy storage sysyem containing Ag nanoparticles, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 87, 369-373.
- [29] **Zeng J.L., Liu Y.Y., Cao Z.X., Zhang J., Zhang Z.H., Sun L.X., Xu F.,** (2008). Thermal conductitivity enhancement of MWCNTs on the Pani/Tetradecanol form-stable FDM, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91, 443-446.
- [30] **Zeng J.L., Cao Z.X., Yang D.W., Xu F., Sun L.X., Zhang X.F., Zhang L.,** (2009). Effects of MWCNTs on phase change enthalpy and thermal conductivity of a solid-liquid organic FDM, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 95, 507-512.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı Betül Yeşim ÇİFTÇİ

Doğum Yeri ve Tarihi Sivas, 01.01.1991

Medeni Hali Bekar

Yabancı Dil İngilizce

İletişim Adresi Cumhuriyet Üniversitesi Enerji Bilimleri ve
Teknolojileri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
58140 Sivas

E-posta Adresi byesimciftci@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise Özel Bilgi Lisesi, 2007

Lisans Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, 2014

Yüksek Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, 2016

İş Tecrübesi

Kocaeli Büyükşehir Belediyesi İSU Genel Müdürlüğü, Enerji
Sistemleri Mühendisi, 2016