

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**NANOAKIŞKANLARIN ISI İLETİM KATSAYISININ ÖLÇÜLMESİ İÇİN
TASARIM GELİŞTİRME**

Fatih ÇÖKMEZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARALIK 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**NANOAKIŞKANLARIN ISI İLETİM KATSAYISININ ÖLÇÜLMESİ İÇİN
TASARIM GELİŞTİRME**

Fatih ÇÖKMEZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARALIK 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOAKIŞKANLARIN ISI İLETİM KATSAYISININ ÖLÇÜLMESİ İÇİN
TASARIM GELİŞTİRME

Fatih ÇÖKMEZ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARALIK 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANOAKIŞKANLARIN ISI İLETİM KATSAYISININ ÖLÇÜLMESİ İÇİN TASARIM
GELİŞTİRME**

Fatih ÇÖKMEZ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 27/12/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR (Danışman)
Prof. Dr. İbrahim ATMACA
Prof. Dr. Arif Emre ÖZGÜR

ÖZET

NANOAKIŞKANLARIN ISI İLETİM KATSAYISININ ÖLÇÜLMESİ İÇİN TASARIM GELİŞTİRME

Fatih ÇÖKMEZ

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

Aralık 2024; 58 Sayfa

Enerji sorunu, günümüzde hem enerji kayıpları bakımından hem de elde edilen enerjinin verimliliği açısından önemli bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstri ve günlük yaşamda giderek artan önem kazanan ısı sistemler, ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaları teşvik etmektedir. Bu bağlamda, ısı transfer akışkanlarının geliştirilmesine büyük bir ilgi gösterilmektedir. Son yıllarda, geleneksel akışkanların yerine daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan nanoakışkanlar kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, nanoakışkanların kararlılığındaki belirsizlikler nedeniyle ısıl iletkenlik ölçümlerinde çeşitli hatalar ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma, nanoakışkanların ısıl iletkenliğini ölçmek için yeni bir tasarım geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu yeni tasarım silindirik bakır tüp tasarımıdır. Bu tasarımda ısıl iletkenlik ölçümü, bakır bir borunun etrafına sarılan bir rezistans tel ile ısıtılması sonucu borunun içindeki akışkanın sıcaklığında zamanla meydana gelen değişimin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Çalışmada, nanoakışkanların ısıl iletkenliklerinin ölçümünde yaygın olarak kullanılan Geçici Rejimde Sıcak Tel (THW: Transient Hot Wire) yöntemi ile bu tezde geliştirilen silindirik bakır tüp tasarımı karşılaştırılmıştır. İlk olarak, deney düzeneğinin kalibrasyonu deiyonize su kullanılarak yapılmıştır. Ardından, sentezlenen $Fe_3O_4@ZnO$ ve Al_2O_3 nanopartiküllerinden elde edilmiş nanoakışkanın ısıl iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, doğal konveksiyon ve ısı kayıplarından dolayı silindirik bakır tüp yönteminin, THW yöntemine göre hata payı daha yüksek çıkmıştır. Silindirik bakır tüp tasarımının tasarimsal iyileştirmeleri sonrasında daha güvenilir hale geleceği ve bu alandaki çalışmalara ve yatırımlara önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu bulgular, nanoakışkanların ısıl iletkenliğinin doğru ölçümü için daha etkili ve maliyet etkin yöntemlerin geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Isı Transferi, Isıl iletkenlik, Nanoakışkan, Silindirik Tüp Tasarımı, THW Yöntemi.

JÜRİ: Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Arif Emre ÖZGÜR

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A DESIGN FOR MEASURING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NANOFLUIDS

Fatih ÇÖKMEZ

MSc. Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

December 2024; 58 Pages

The energy problem is a significant engineering challenge today, both in terms of energy losses and the efficiency of energy obtained. Thermal systems, which are gaining increasing importance in industry and daily life, are encouraging efforts to improve heat transfer. In this context, there is great interest in the development of heat transfer fluids. In recent years, nanofluids with higher thermal conductivity have started to be used instead of traditional fluids. However, uncertainties in the stability of nanofluids lead to various errors in thermal conductivity measurements.

This study aims to develop a new design for measuring the thermal conductivity of nanofluids. The new design is the cylindrical copper tube design. In this design, thermal conductivity measurement is based on measuring the time-dependent changes in the temperature of the fluid inside the copper tube resulting from heating a resistance wire wrapped around the tube. The study compares the cylindrical copper tube design developed in this thesis with the widely used Transient Hot Wire (THW) method for measuring the thermal conductivity of nanofluids. First, the calibration of the experimental setup was performed using deionized water. Subsequently, thermal conductivity measurements of the nanofluid obtained from synthesized $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanoparticles were conducted.

The results show that due to natural convection and heat losses, the cylindrical copper tube design has a higher margin of error compared to the THW method. It is anticipated that after design improvements, the cylindrical copper tube design will become more reliable and will make significant contributions to further research and investments in this area. These findings shed light on the development of more effective and cost-efficient methods for accurately measuring the thermal conductivity of nanofluids.

KEYWORDS: Cylindrical tube design, Heat transfer, Nanofluids, Thermal conductivity, Transient hot wire method.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Arif Emre ÖZGÜR

ÖNSÖZ

Günümüzde en çok karşılaşılan problemlerden birisi olan enerji sorunu hem enerji kayıpları bakımından hem de elde edilen enerjinin verimliliği bakımından bir mühendislik problemi haline gelmiştir. Endüstride ve günlük yaşamımızda çokça karşılaştığımız ve gün geçtikçe ilerleme kaydeden ısı sistemler üzerine düşen pay her geçen gün hızla artmaktadır. Buna paralel olarak ısı transferini iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmalarda ısı transfer akışkanının ısı özelliklerinin geliştirilmesi üzerinde yoğun bir ilgi oluşmaktadır. Bilim insanları, geçtiğimiz 30 yıl içerisinde ısı transferindeki verimi arttırmak için transfer akışkanı olarak nanoakışkanlar üzerinde yoğun bir şekilde çalışmalar sergilemektedir. Bu çalışma, ısı iletkenliği ölçmek için yeni bir tasarım ortaya koyarak, öncelikle su üzerinde yapılan testlerle ısı iletkenlik ölçümündeki hata payını azaltmayı amaçlamaktadır. Ardından çekirdek-kabuk yöntemi ile daha kararlı yapıda elde edilmiş $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ ve ayrıca Al_2O_3 nanopartikül katkılı nanoakışkanlar ile test edilmiş ve hata oranı irdelenerek geliştirilen yeni ısı iletkenlik ölçüm cihazının nanoakışkanlar için kullanılabilirliği kontrol edilmiştir. Bu ölçümler için daha önceden yaygın olarak kullanılan ve en az hata payına sahip olan Geçici Rejimde Sıcak Tel (THW) yöntemi ile kendimizin geliştirmiş olduğu silindirik tüp tasarımı karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmanın ve ortaya koyulan yöntemlerin enerji verimliliğine ve uygulamalardaki maliyetlerin azaltılmasına yönelik bir sonraki yapılacak olan çalışmalara yol göstermesini temenni ediyorum.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını benden esirgemeyen, her koşulda bilgi birikimi ile bana yol gösteren, ölçümler için gerekli malzeme ve aletlerin temininde yardımcı olan değerli tez danışmanım ve hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR'a minnetlerimi sunar, ilgi ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Bu süreçte maddi ve manevi anlamda her daim yanımda olan ve büyük bir sabırla beni destekleyen AİLEM'e, ısı transferi konusunda bilgi ve tecrübesini paylaşan Sayın Prof. Dr. İbrahim ATMACA'ya ve nanoakışkanın hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Meltem Asiltürk ERSOY'a da çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Isı Enerjisi ve Isı Transferi.....	1
1.2. Termofiziksel Özellikler	2
1.2.1. Isıl iletkenlik	2
1.2.2. Isı taşınım katsayısı	2
1.2.3. Özgül ısı	2
1.2.4. Isıl yayınım katsayısı.....	2
1.2.5. Viskozite	2
1.3. Nanoakışkan.....	3
1.3.1. Nanoakışkanların kullanım alanları	4
1.3.2. Nanoakışkan türleri	4
1.4. Tezin İçeriği ve Amacı.....	5
2. KAYNAK TARAMASI	7
2.1. Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri	7
2.1.1. Durgun yöntemler	7
2.1.2. Konveksiyon akış yöntemleri.....	14
2.2. Kaynak Taraması	14
3. MATERYAL VE METOT	18
3.1. Silindirik Bakır Tüp Tasarımı	18
3.1.1. Test hücresi malzeme seçimi ve tasarımı.....	18
3.1.2. Rezistans seçimi ve güç hesabı	19
3.1.3. Test hücresi yalıtımı.....	21

3.1.4. Isı transfer verimi	22
3.1.5. Silindirik bakır tüp yönteminin test aşaması	23
3.2. Geçici Rejimde Sıcak Tel Yöntemi.....	24
3.2.1. Sıcak tel deney düzeneği	24
3.3. Nanoakışkanın Hazırlanması	26
3.3.1. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartiküllerinin sentezi-nanoakışkanlarının hazırlanması .	27
3.3.2. Kütlece %0,1'lik $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının hazırlanması.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Silindirik Bakır Tüp Tasarımı	30
4.1.1. Deiyonize suyun ısı iletkenlik ölçümü.....	30
4.1.2. Deneysel çalışmanın belirsizlik analizi.....	38
4.1.3. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO-H}_2\text{O}$ nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümü.....	39
4.1.4. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümü.....	42
4.2. Geçici Rejimde Sıcak Tel Yöntemi.....	46
4.2.1. Deiyonize suyun ısı iletkenlik ölçümü.....	46
4.2.2. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümü.....	49
4.3. Silindirik Bakır Tüp Yönteminin Diğer Yöntemlerle Kıyaslanması	54
5. SONUÇLAR	55
6. KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Nanoakışkanların Isı İletim Katsayısının Ölçülmesi İçin Tasarım Geliştirme” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

27/12/2024

Fatih Çökmez



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

λ	: Etkin Isıl İletkenlik Katsayısı
k	: Isıl İletkenlik
h	: Isı Taşınım Katsayısı
Nu	: Nusselt Sayısı
ε	: Yüzey Emisivitesi
c_p	: Sabit Basınçta Özgül Isı
ρ_e	: Elektrik Özdirenci
ΔT	: Isıl Çiftler Arasındaki Sıcaklık Farkı
Q	: Isı Enerjisi
q	: Isı Enerji Akısı
ρ	: Kütle Yoğunluğu
α	: Isıl Yayılım Katsayısı
ν	: Kinematik Viskozite
μ	: Dinamik Viskozite
η	: Verim
3ω	: 3 ω Yöntemi
Ra	: Rayleigh Sayısı
Pr	: Prandtl Sayısı
T_s	: Yüzey Sıcaklığı
T_φ	: Çevre Sıcaklığı
T_∞	: Çevre Sıcaklığı
Cu	: Bakır
O	: Oksijen
Zn	: Çinko
Fe	: Demir
Fe_3O_4	: Ferro-Ferrik Oksit
ZnO	: Çinko Oksit
P	: Elektrik Gücü
V	: Volt
I	: Amper
R	: Direnç

Kısaltmalar

EG	: Etilen Glikol
THW	: Geçici Rejimde Sıcak Tel
TPS	: Geçici Rejimde Düzlem Kaynak
SBT	: Silindirik Bakır Tüp



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bazı sıvıların ve katıların ısı iletkenliğinin karşılaştırılması	3
Şekil 1.2. 2005-2021 yılları arasında Sciencedirect veri tabanında yayınlanan bilimsel makalelerin sayısı.....	4
Şekil 1.3. Nanopartiküllerin sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.1. Nanoakışkanların ısı iletkenlik ölçüm yöntemleri.....	7
Şekil 2.2. THW yönteminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.3. TPS yönteminin şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.4. Sıcaklık Salınım yönteminin kavramsal tasarımı	10
Şekil 2.5. 3 ω kurulum şeması (Doğanay vd. 2019)	12
Şekil 3.1. Silindirik bakır test hücresi.....	19
Şekil 3.2. Sarmal rezistans	20
Şekil 3.3. Deney düzeneği	20
Şekil 3.4. Yalıtım amaçlı kullanılan elastomerik kauçuk köpük malzeme.....	21
Şekil 3.5. Test hücresi yalıtım kutusu.....	22
Şekil 3.6. Isıtılan deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği	23
Şekil 3.7. Silindirik Bakır Tüp yöntemi şematik göster.....	24
Şekil 3.8. Isıtıcı Platin Tel.....	25
Şekil 3.9. a) Test hücresi; b) Sıcak tel ve sensör sabitleme aparatı; c) Test düzeneği....	26
Şekil 3.10. Fe ₃ O ₄ @ZnO nanoakışkanı ve deiyonize su.....	29
Şekil 4.1. Deney 1: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği	30
Şekil 4.2. Deney 1: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği	31
Şekil 4.3. Deney 1: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	31
Şekil 4.4. Deney 2: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği	32
Şekil 4.5. Deney 2: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği	32

Şekil 4.6. Deney 2: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	33
Şekil 4.7. Deney 3: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği	33
Şekil 4.8. Deney 3: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği	34
Şekil 4.9. Deney 3: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	34
Şekil 4.10. Deney 4: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği	35
Şekil 4.11. Deney 4: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği	35
Şekil 4.12. Deney 4: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	36
Şekil 4.13. Deney 5: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği	36
Şekil 4.14. Deney 5: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği	37
Şekil 4.15. Deney 5: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	37
Şekil 4.16. Deney 1 - $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	40
Şekil 4.17. Deney 2 - $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	40
Şekil 4.18. Deney 3 - $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	41
Şekil 4.19. Deney 1 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	42
Şekil 4.20. Deney 2 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	43
Şekil 4.21. Deney 3 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi	44

Şekil 4.22. Deney 4 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	44
Şekil 4.23. Deney 5 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	45
Şekil 4.24. Deney 1 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	46
Şekil 4.25. Deney 2 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	47
Şekil 4.26. Deney 3 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	48
Şekil 4.27. Deney 4 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	48
Şekil 4.28. Deney 5 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	49
Şekil 4.29. Deney 1 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	50
Şekil 4.30. Deney 2 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	51
Şekil 4.31. Deney 3 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	52
Şekil 4.32. Deney 4 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....	52

Şekil 4.33. Deney 5 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi.....53



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Oda sıcaklığında bazı malzemelerin ısıl iletkenlik değerleri.....	18
Çizelge 3.2. Temel akışkan ve nanoakışkanın bazı termofiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 4.1. SBT yöntemi ile deiyonize suyun ısıl iletkenlik değerleri ve bağıl hataları.....	38
Çizelge 4.2. Deney 1'in Bağımsız Değerlerinin Belirsizliği	39
Çizelge 4.3. SBT yöntemi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikülünün ısıl iletkenlik değeri	41
Çizelge 4.4. SBT yöntemi Al_2O_3 ısıl iletkenlik değerleri ve bağıl hataları	45
Çizelge 4.5. THW yöntemi ile deiyonize suyun ısıl iletkenlik değerleri ve bağıl hataları.....	50
Çizelge 4.6. THW yöntemi ile Al_2O_3 ısıl iletkenlik değerleri ve bağıl hataları.....	53
Çizelge 4.7. Isıl iletkenlik ölçüm yöntemlerinin hata oranları.....	54

1. GİRİŞ

1.1. Isı Enerjisi ve Isı Transferi

Isı enerjisi; herhangi bir maddenin veya ortamın sıcaklık farkından transfer ettiği enerji türüdür. Isı enerjisinin transfer yönü her zaman sıcak ortamdaki soğuk ortama olacak şekilde belirlenir. Sıcak bir madde, kendisinden daha soğuk olan ortama ısı aktarmak mecburiyetindedir. Sıcak madde veya ortam ısı kaybederken, soğuk ortam ise ısı alarak sıcaklığını artırır. Isının bu şekilde hareket etmesinden dolayı ortaya çıkan enerji türüne ısı enerjisi denir.

Isı transferi, sıcaklık farkı nedeniyle gerçekleşen enerji transferi olup, kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon olarak üç farklı mekanizma ile gerçekleşir. Kondüksiyon ile ısı transferi gerçekleştirmek için durgun akışkan veya katı bir ortama, konveksiyon ile ısı transferi gerçekleştirmek için hareketli bir akışkan ortamına ihtiyaç duyulurken radyasyon ile ısı transferi gerçekleştirmek için herhangi bir ortama gerek duyulmamaktadır. Bu birbirinden farklı üç mekanizmanın ayrı ortamlardaki çalışma prensipleri, ısı transferinin belirlenmesi için oldukça önem taşımaktadır. Bu 3 mekanizmanın temel denklemleri aşağıda sıralanmıştır. Fourier Isı iletim Yasası Eşitlik (1.1)'de, Newton'un Soğuma Yasası Eşitlik (1.2)'de ve Stephan-Boltzmann Yasası Eşitlik (1.3)'te sunulmuştur.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.1)$$

$$Q = hA\Delta T \quad (1.2)$$

$$Q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_c^4) \quad (1.3)$$

Q	:	Isı enerjisi (W)
k	:	Isı iletim katsayısı ($\frac{W}{mK}$)
T	:	Sıcaklık (K)
h	:	Isı taşınım katsayısı ($\frac{W}{m^2K}$)
ε	:	Yüzey emisivitesi
σ	:	Stephan- Boltzman Sabiti $5.67 \times 10^{-8} (\frac{W}{m^2K^4})$
T_s	:	Yüzey sıcaklığı (K)
T_c	:	Çevre sıcaklığı (K)
A	:	Alan (m^2)
ΔT	:	Sıcaklık farkı (K)

Fourier ısı iletim yasası; katı içerisinde veya durgun akışkan ortamlarında kondüksiyon ile ısı transferinin tespit edilmesinde kullanılır. Newton'un soğuma yasası; hareketli akışkan ortamlarında konveksiyon ile ısı transferinin tespitinde kullanılır. Radyasyon ile ısı transferi formülü ise elektromanyetik dalga veya fotonlar vasıtasıyla transfer edilen ısı enerjisinin tespitinde kullanılır.

Gündelik hayatımızda ve endüstriyel ortamlarda sıkça karşılaştığımız sistemlerin çoğunda ısı transferi prensiplerinden faydalanılmaktadır. Bu geniş kullanım alanından dolayı ısı transferine yönelik yapılan çalışmalar her geçen gün hızla artmaktadır. Isı bir enerji türü olduğu için ısı transferindeki kayıplar sistemlerin ısı performansında ve veriminde oldukça önemli rol teşkil etmektedir. Daha önceden kullanılan ısı sistemlerde ısı transferini iyileştirmek, sistemin ısı performansını veya verimini arttırmak için bazı uygulamalar ortaya konulmuştur. Bu uygulamalardan bazıları şunlardır; tasarım ve geometri değişikliği, ısı transferi alanını artırma (kanatçık ekleme gibi), geleneksel ısı transfer akışkanlarının uygun kullanımı ve yalıtım uygulaması.

1.2. Termofiziksel Özellikler

1.2.1. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik; bir malzemenin veya ortamın, sıcaklık farkından dolayı meydana gelecek olan ısı enerjisini iletebilme kapasitesine denir. Her malzeme ve ortamın ısı iletkenliği birbirinden farklıdır. Isıl iletkenlik ne kadar büyük ise, malzemenin veya ortamın transfer ettiği ısı enerjisi de o kadar büyük olacaktır.

Isıl iletkenlik ‘k’ ile veya bazı literatürde ‘λ’ ile sembolize edilir ve birimi W/m°C veya W/m²K’dir.

1.2.2. Isı taşınım katsayısı

Taşınım ile ısı transferinin gerçekleştiği ortamlarda, transfer edilen ısı enerjisinin performansını belirlemek için kullanılan bir katsayıdır. Bir başka deyişle birim alana veya birim alandan, birim sıcaklık farkında transfer olan enerji miktarı olarak tanımlanır.

Isı taşınım katsayısı ‘h’ ile ifade edilir ve birimi W/m²°C veya W/m²K’dir.

1.2.3. Özgül ısı

Kütlesi 1 kg olan bir cismin, sıcaklığını 1 K arttırmak için sağlanması gereken ısı miktarıdır. Özgül ısı c_p ile ifade edilir ve birimi J/kgK’dir.

1.2.4. Isıl yayınım katsayısı

Isıl yayınım katsayısı; moleküllerin rastgele davranışlarından dolayı enerji aktarmasının bir ölçütüdür. Bir başka ifadeyle; aktarılan ısının, depolanan ısıya oranıdır (Eşitlik (1.4)):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{\text{iletken ısı}}{\text{Depolanan ısı}} \quad (1.4)$$

Isıl yayınım ne kadar büyük bir değere sahipse, ısının ortama yayılması o kadar hızlı olacaktır. Birimi m²/s’dir.

1.2.5. Viskozite

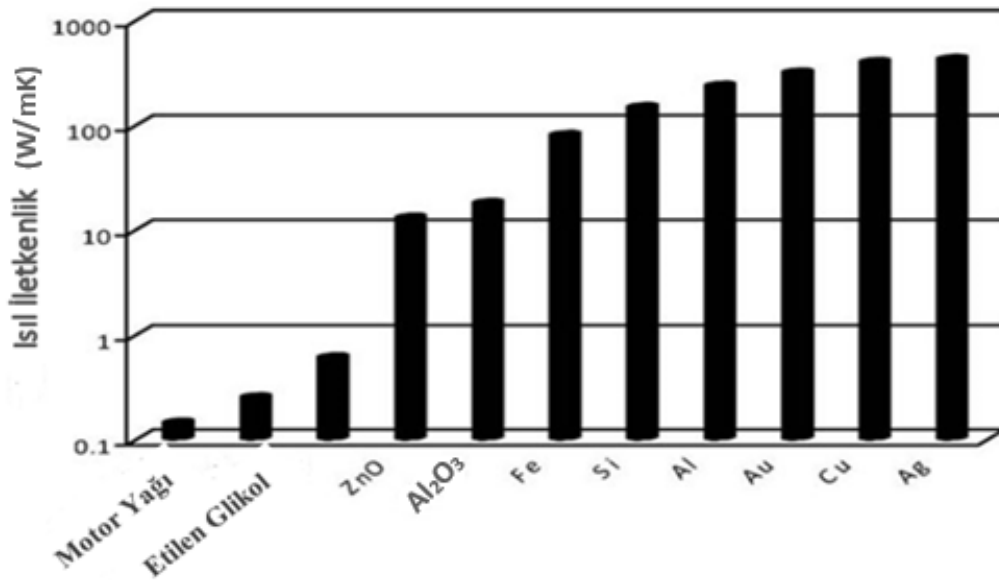
Viskozite; sıvı veya gaz olan bir akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Kendi içerisinde kinematik viskozite (ν) ve dinamik viskozite (μ) olarak ikiye ayrılır. Aralarındaki ilişki aşağıdaki Eşitlik (1.5)’de görüldüğü gibidir.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.5)$$

- ν : Kinematik viskozite (m^2/s)
 μ : Dinamik viskozite ($\text{kg}/\text{m s}$)
 ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

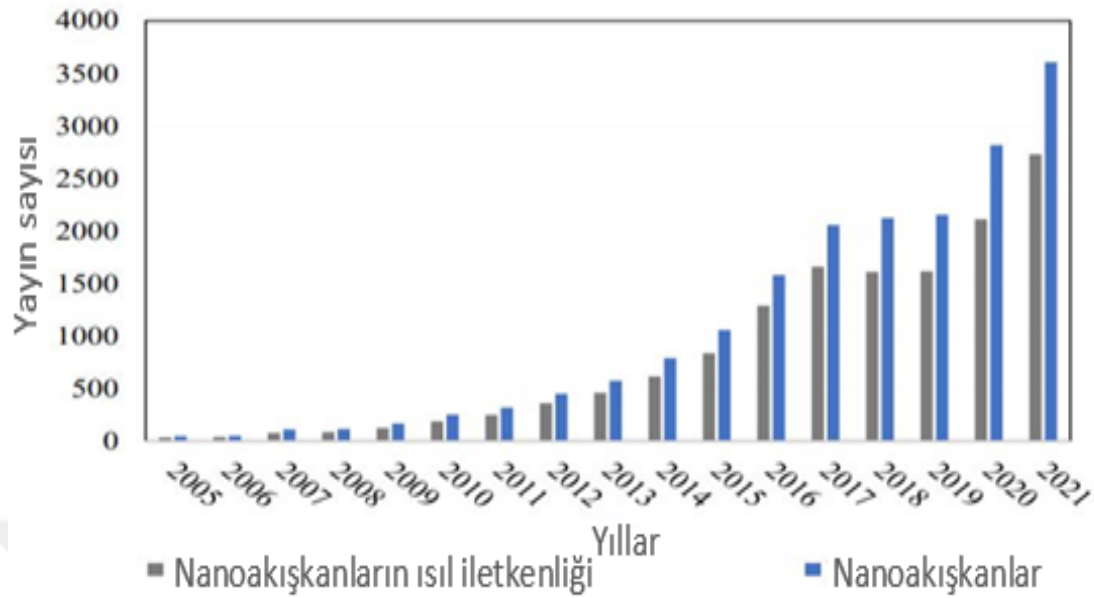
1.3. Nanoakışkan

Nanoakışkanlar; nanometrik boyutlardaki metal ve ametal katı parçacıklarının, temel akışkan (su, glikol etilen vb.) içerisinde oluşturduğu süspansiyona denir. Bu karışım, yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip yeni bir akışkan türü ortaya çıkarabilmektedir. Bu sayede ısı sistemler üzerinde gerçekleşen ısı transferinin verimi oldukça artmaktadır. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi farklı sıvı ve katıların ısı iletkenlik değerleri, nanoakışkan araştırmalarının verimi ve geleceği açısından önemli bir süreç olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.1. Bazı sıvıların ve katıların ısı iletkenliğinin karşılaştırılması (Paul vd. 2010)

Son zamanlarda ısı transferinin verimini arttırmak için geleneksel akışkan kullanımı yerine, ısı iletkenlik açısından çok daha iyi sonuçlar veren nanoakışkanların geliştirilmesi hız kazanmıştır. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi 2005-2021 yılları arasında nanoakışkanlar ve nanoakışkanların ısı iletkenliği adı altında yapılan yayın sayısı her geçen yıl artarak devam etmektedir. Bu artış aynı zamanda nanoakışkan çeşitliliği ile doğru orantılıdır. Bilim insanları çeşitli karışımlar ile en verimli süspansiyonları elde ederek, bu yeni akışkan türünün kullanım alanlarını genişletmeye devam etmektedir.



Şekil 1.2. 2005-2021 yılları arasında Science direct veri tabanında yayınlanan bilimsel makalelerin sayısı (Souza vd. 2022)

1.3.1. Nanoakışkanların kullanım alanları

Nanoakışkanlar, enerjinin verimini arttırmak için son zamanlarda en çok tercih edilen akışkanlar arasındadır. Günlük hayatta kullanılan enerjinin büyük bir kısmı ısı enerjisi olarak veya ısı enerjisinin dönüştürülmesinde kullanılmaktadır (Gündoğdu 2018). Bu sebeple nanoakışkanların kullanım alanları, çeşitli sistemlerin ısıtılması ve soğutulması üzerinde yoğunlaşmaktadır.

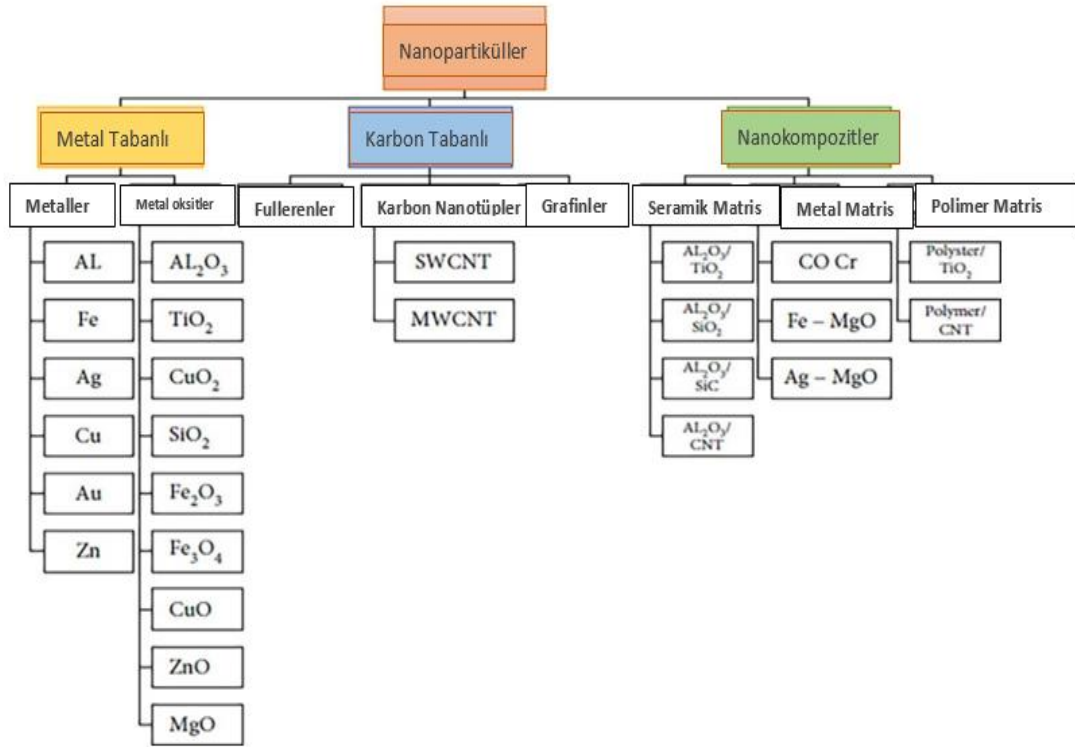
Nanoakışkanların enerji alanında kullanıldığı bazı sektörler şu şekildedir;

- Elektronik soğutma sistemleri
- İmalat Sanayi
- Uzay ve savunma sanayi
- Nükleer enerji sistemleri
- Güneş enerji sistemleri
- Isıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemleri
- Otomotiv sanayi

1.3.2. Nanoakışkan türleri

Nanopartikül ifadesi, boyutu genellikle 1 ila 100 nanometre arasında olan parçacıklar için kullanılmaktadır. Bu boyut aralığındaki parçacıklar, yüksek yüzey alanı, hacim oranı, üstün optik, manyetik ve termal özellikleri nedeniyle nanoteknoloji ve malzeme bilimi gibi birçok alanda ilgi görmektedir. Nanopartiküller, metal, metal oksit, karbon temelli, polimer temelli ya da kompozit yapılar gibi farklı türlerde sınıflandırılabilir.

Nanoakışkanlar, sıvıların içerisine homojen olarak dağıtılan bu nanopartiküllerin termofiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla hazırlanır. Nanopartiküller, bu akışkanlara üstün termal iletkenlik, viskozite kontrolü, ısı kapasitesi ve optik özellikler kazandırır. Nanoakışkan yapımında kullanılan nanopartiküllerin sınıflandırılması ise Şekil 1.3'te detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 1.3. Nanopartiküllerin sınıflandırılması (Gupta ve Dixit 2021)

1.4. Tezin İçeriği ve Amacı

Enerji, günlük yaşantımızın her anında karşılaştığımız bir ihtiyaç halini almıştır ve enerjinin her geçen gün öneminin daha da arttığı bir zaman diliminde yaşamaktayız. Enerjinin hem kayıplarının olduğu hem de belirli bir veriminin olduğu çok iyi bilinmektedir. Bu yüzden günden güne artan enerji sorunu ile mücadele edebilmek ve sistemleri daha verimli hale getirebilmek için sistemlerin veya kullanılan akışkanların verimlerinin elden geldiğince artırılması gerekmektedir.

Bilinildiği üzere ısı sistemlerle günümüzde oldukça sık karşılaşmaktayız. Bu ısı sistemlerin büyük çoğunluğunda, ısı transferi prensiplerinden faydalanmak için akışkanlar kullanılmaktadır. Akışkanlar, ısı iletkenlik katsayılarına göre veya diğer termofiziksel özellikleri sayesinde sistemlerin enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Son zamanlarda nanoakışkanlar üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar, enerjinin kullanılabilirliği ve sürdürülebilirliği açısından oldukça umut vericidir. Yeni bir akışkan tipi olarak ortaya çıkan nanoakışkanların, ısı iletkenliklerinin ölçülmesi hususunda yüksek doğrulukta ve düşük hata ile kesin sonuç veren bir yöntem halen tam olarak elde edilememiştir. Isı iletkenliğinin yanlış ölçülmesi, mühendislik hesaplarında

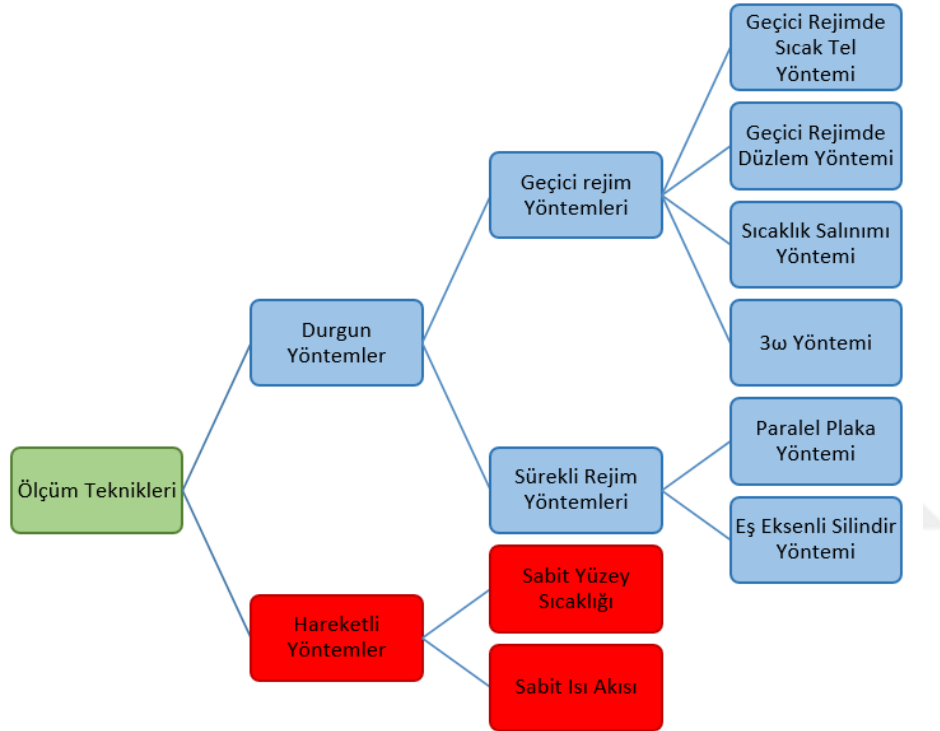
büyük hatalara yol açmasının yanı sıra büyük maliyet kayıplarına da sebebiyet verebilmektedir.

Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin ölçülmesinde sonuçları etkileyen birçok parametre ve etken mevcuttur. Bu etkenler arasında en olumsuz etkiye sahip olan etkenlerden birincisi akışkanın sürekli rejime gelene kadar geçen süre zarfında meydana gelen doğal konveksiyon etkisi, ikincisi ise nanoakışkanların karıştıkları baz akışkan içerisinde topaklanma ve çökelme sorunlarıdır. Bu tezde, deney sonuçlarını etkileyen bu olumsuz durumlar için çözümler getirilmeye çalışılmıştır. Doğal konveksiyon etkilerinden kaçınmak için, nanoakışkanın (veya suyun) durgun pozisyonda ve oldukça kısa süre içerisinde veya düşük sıcaklık farklarında ölçümü gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen ölçüm cihazı test edilirken numune olarak su kullanılmış ve ölçüm cihazı sudan elde edilen sonuçlara göre kalibre edilmiştir. Ardından $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ ve Al_2O_3 nanopartikül katkılı su bazlı iki farklı nanoakışkan üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneylerde ortaya çıkan hata payı, en çok tercih edilen Geçici Rejimde Sıcak Tel (THW) yöntemi sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmanın öncelikli amacı ısı iletkenliğin kesin ve doğru bir ölçüm yöntemi ile tespit edilmesidir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen test cihazının nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin ölçülmesinde en az hata payı ile kullanıma sunulmasını amaçlamaktadır.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri

Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin tespiti için birkaç yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler; kullanılan akışkanın türüne, istenilen termofiziksel koşullara, hassasiyete göre ve akışkanın hareketine göre kendi içerisinde sınıflandırılmışlardır. Ölçüm yapılacak olan nanoakışkanın öncelikle hareketli mi yoksa durgun pozisyonda mı olduğunun belirlenmesi, yapılacak hatalı ölçümlerin büyük ölçüde önüne geçmektedir. Şekil 2.1’de nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin ölçümünde kullanılan yöntemlerin isimleri ve sınıflandırması açıkça verilmiştir.



Şekil 2.1. Nanoakışkanların ısı iletkenlik ölçüm yöntemleri (Xu vd. 2019)

2.1.1. Durgun yöntemler

Akışkanın hareketsiz yani durgun pozisyonda olduğu sistemler için ısı iletkenliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan ölçümlerdir. Durgun pozisyondaki nanoakışkanların ısı iletkenliğinin ölçülmesi esnasında ortaya çıkan doğal konveksiyon etkileri, hareketli pozisyonlardaki akışkanlara nazaran daha az olduğu için ölçüm hassasiyetleri bu kısımda gerçek değerlere daha çok yaklaşmaktadır.

2.1.1.1. Geçici rejim yöntemleri

Geçici hal yöntemleri kendi içerisinde 4 farklı yönteme ayrılmaktadır;

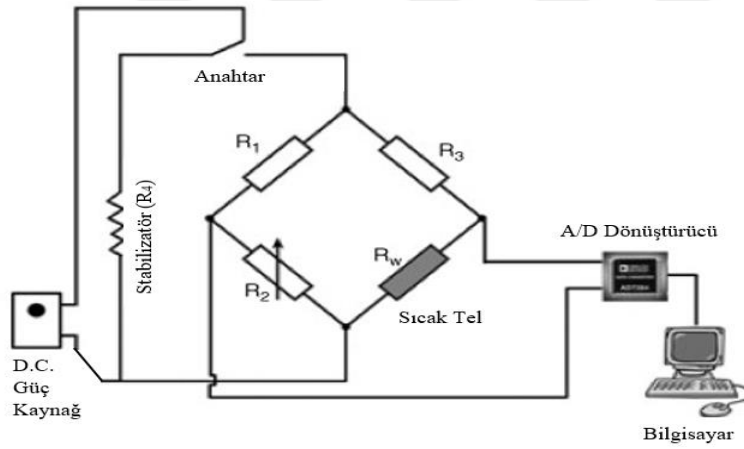
- i) Geçici Rejimde Sıcak Tel (THW - Transient Hot Wire) Yöntemi
- ii) Geçici Rejimde Düzlem Kaynak (TPS - Transient Plane Source) Yöntemi
- iii) Sıcaklık Salınımı (Temperature Oscillation) Yöntemi
- iv) 3ω Yöntemi

Geçici hal yöntemleri, nanoakışkanlarda meydana gelecek doğal konveksiyon etkilerini azaltmak ve ortadan kaldırmak için uygulanan yöntemlerdir. Geçici rejim yöntemlerinde nanoakışkanların, çok kısa zaman aralıklarında ölçümleri yapılır. Bu sayede akışkan sürekli rejime gelemediğinden dolayı doğal konveksiyon etkilerinden bir miktar kaçınılmış olur. Bu tezde geliştirilen Silindirik Bakır Tüp tasarımı da geçici hal yöntemi olduğundan mevcut yöntemlerin detayları aşağıda sırasıyla ele alınmıştır.

2.1.1.1.1. Geçici rejimde sıcak tel yöntemi (THW)

THW yöntemi ilk olarak Stalhane ve Pyk tarafından 1931 yılında tozların ısı iletkenliğini ölçmek için önerildi. Birçok bilim insanı ve araştırmacı bu yöntemi, yıllar içerisinde kendi çalışmaları doğrultusunda kullanmak için daha da geliştirdi. THW yönteminin birçok avantajı bulunmaktadır. Avantajların arasında en önemlisi doğal konveksiyondan kaynaklanan hataları deneysel yollar ile ortadan kaldırabilmesidir. Diğer avantajları ise yöntem olarak oldukça hızlıdır ve kavramsal tasarımı diğer yöntemlere kıyasla basittir (Paul vd. 2010).

THW yöntemi ile bir nanoakışkanın ısı iletkenliğini ölçmek için ince bir platin tel prob olarak kullanılır. Yöntem, platin tel vasıtasıyla ısıtılan akışkanın sıcaklığının ölçülmesi prensibine dayanır. Bu tel, verilen elektrik sayesinde hem ısıtıcı hem de akışkanın sıcaklığını ölçen termometre olarak kullanılır. Platin tel, Wheatstone Köprüsü yöntemi ile öz direncindeki değişime göre ölçümler yapmaktadır. Şekil 2.2’de THW yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2. THW yönteminin şematik gösterimi (Paul vd. 2010)

Eşitlik (2.1)'de görüldüğü gibi, THW yöntemi ile ısı iletkenlik şu şekilde hesaplanabilmektedir (Carslaw ve Jaeger 1959).

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi k} E_i\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) \quad 0 < t < t_1 \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)'de belirtilen k akışkanın ısı iletkenliğini temsil ederken, D akışkanın ısı yayılımını belirtmektedir. E_i ise üstel integraldir. Eşitlik (2.2)'de ise E_i 'nin nasıl belirlendiği gösterilmiştir (Carslaw ve Jaeger 1959).

$$E - E_i(-\alpha) = \int_{\alpha}^{\infty} \frac{1}{u} \exp(-u) du = -\beta - \ln \alpha + \frac{\alpha^2}{4} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte $\beta = 0.5772$, Euler sabitidir. $\alpha = \frac{r^2}{4Dt}$

Eğer E_i 'nin seri açılımında $\ln \alpha$ 'nın sağında kalan bölüm uzun süreler için özellikle r küçük olduğunda ve D geniş olduğunda ihmal edilebilir (Carslaw ve Jaeger 1959).

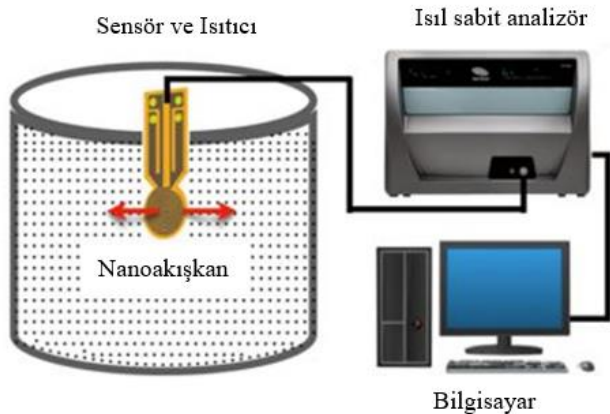
$$\Delta T \approx \frac{q}{4\pi k} \left[-\beta - \ln \left(\frac{r^2}{4Dt} \right) \right] = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln t - \ln \left(\frac{r^2}{4DCe} \right) \right] \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'te belirtilen $C_e = \exp \beta$ olarak ifade edilir. Böylece biraz gecikmeden sonra ΔT 'ye karşı $\ln t$ grafiği üzerinde eğim $\frac{q}{4\pi k}$ 'ye eşit olup lineer olur. Böylece Eşitlik 2.4'te görüleceği üzere k aşağıdaki gibi hesaplanır (Carslaw ve Jaeger 1959).

$$= \left[\frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \right] \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2.4)$$

2.1.1.1.2. Geçici rejimde düzlem kaynak yöntemi (TPS)

TPS yöntemi tek bir ölçüm ile ısı iletkenlik, ısı yayılım ve özgül ısı kapasitesi gibi termofiziksel özelliklerin, eş zamanlı olarak belirlenmesinde avantaj sağlamaktadır. Diğer tekniklere benzer olarak sıcak disk sensörü hem ısıtıcı hem de termometre olarak görev yapar. Bu yöntem için elektriği ileten nikelden yapılmış ve kapton ile yalıtılarak güçlendirilmiş bir sensör kullanılır. TPS yöntemini gerçekleştirmek için sensör, iki özdeş numune arasına yerleştirilir ve akım uygulanır (Souza vd. 2022). Şekil 2.3'te TPS yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3. TPS yönteminin şematik gösterimi (Souza vd. 2022)

TPS yönteminin avantajları; oldukça hızlıdır, deney yapmak kolaydır, ölçüm aralığı oldukça geniştir (0.02-200 W/mK), numune hazırlama gerekmez ve örnek büyüklüğü esnek olabilir. Dezavantaj olarak ise ölçümler esnasında doğal konveksiyon etkileri meydana gelmektedir (Das 2017).

TPS yönteminde, sıcaklığın zamana karşı tepkisi ile Eşitlik (2.7)'de ısıl iletkenlik değerinin hesaplanabilmesi mümkündür (Bouguerra ve Diop 2001).

$$\alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (2.6)$$

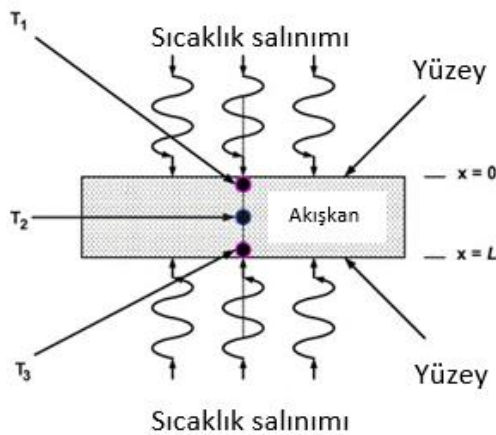
$$\Delta T(\phi) = \frac{Q}{\pi^{1.5} r k} D(\phi) \quad (2.7)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{t\alpha}{r^2}} \quad (2.8)$$

Bu eşitliklerde r sensör yarıçapı iken $D(\phi)$ zamanın boyutsuz ifadesidir.

2.1.1.1.3. Sıcaklık salınım yöntemi

Sıcaklık Salınım (Temperature Oscillation) tekniği akışkanların ısıl yayınımlarını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Isıl yayınımları tespit edilen akışkanın, ısıl iletkenliğine geçiş kolayca yapılabilir. Şekil 2.4'te görüleceği üzere Sıcaklık Salınım tekniğinde silindirik bir sıvı hacmine iki ucundan bir sıcaklık salınımı verilir. Sıcaklık salınımı sıvı silindir içerisinde ilerlerken genliği azalır ve faz gecikir ve merkezde genlik minimuma ulaşır ve faz çok gecikir. Bu genlik ve fazlar farklı noktalarda ölçülerek akışkanın ısıl yayınımları hesaplanabilir (Bhattacharya vd. 2006).



Şekil 2.4. Sıcaklık Salınım yönteminin kavramsal tasarımı (Bhattacharya vd. 2006)

Sıcaklık Salınım tekniğinin matematiksel alt yapısı için enerji denkleminde yola çıkarak ısı denkleme ulaşılır (Czarnetzki ve Roetzel 1995). Enerji denklemi Eşitlik (2.9)'da verilmiştir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.9)$$

Burada T sıcaklık, t zaman ve α ısı yayınıdır. Eşitlik (2.9)'da yer alan denklemin çözümü numune geometrisine ve sınır şartlarına bağlıdır. Numunenin adyabatik olmayan yüzeylerinde periyodik sıcaklık salınımları, periyot ve sabit açısal frekansları ile üretilir.

$$\omega = \frac{2\pi}{t_p} \quad (2.10)$$

Bir levha ($0 \leq x \leq L$) iki yüzeyi diatermik olarak dikkate alınır. Her bir tarafında periyodik yüzey sıcaklık salınımları farklı genlik ve aşamalarda, aynı sabit açısal frekans ile üretilir. Bu problemin matematiksel formülasyonu $x=L$ olacak şekilde verilir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.11)$$

$$T(\xi_0 = 0, \tau) = T_M + u_0 \cos(\tau + G_0) \quad (2.12)$$

$$T\left(\xi_L = L\left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^{1/2}, \tau\right) = T_M + u_L \cos(\tau + G_L) \quad (2.13)$$

$$\xi = x\left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^{1/2} \quad (2.14)$$

Laplace dönüşüm teknikleri denklemlerin sürekli periyodik çözümünü verir. Eşitlik (2.11) - (2.14) kolaylık sağlamak için karmaşık çözüm sunulmuştur (Czarnetzki ve Roetzel 1995).

$$T^*(\xi, \tau) = T_M + \frac{u_L e^{iG_L} \sinh(\xi \sqrt{i}) - u_0 e^{iG_0} \sinh(\sqrt{i}(\xi - \xi_L))}{\sinh(\xi_L \sqrt{i})} e^{i\tau} \quad (2.15)$$

$x = L/2$ ve $x = L$ arasındaki karmaşık genlik oranı B^* olur.

$$B^* = \frac{2u_L e^{iG_L}}{u_L e^{iG_L} + u_0 e^{iG_0}} \cosh \left[\frac{L}{2} \left(\frac{i\omega}{\alpha} \right)^{1/2} \right] \quad (2.16)$$

Gerçek faz farkı ve gerçek genlik oranı Eşitlik (2.18)'de görüldüğü gibi ifade edilir:

$$\Delta G = \arctan\left(\frac{\text{Im}[B^*]}{\text{Re}[B^*]}\right) \quad (2.17)$$

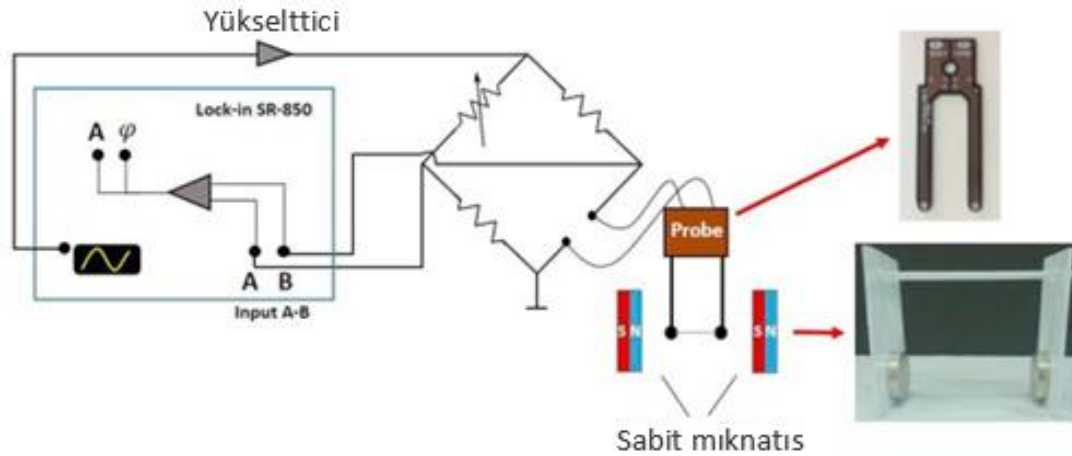
$$\frac{u_L}{u_{L/2}} = \{(\text{Re}[B^*])^2 + (\text{Im}[B^*])^2\}^{1/2} \quad (2.18)$$

Levhanın iki tarafındaki faz veya genlik ölçümünden, sırasıyla Eşitlik (2.12), (2.17) veya (2.14), (2.18) kullanılarak levhanın merkezindeki ısı yayılımı belirlenebilir (Czarnetzki ve Roetzel 1995).

2.1.1.1.4. 3ω yöntemi

3ω yönteminde hem termometre hem de ısıtıcı olarak kullanılan bir prob, bu özelliğiyle ve ısıyı radyal doğrultuda iletmesinden dolayı THW yöntemine benzemektedir. THW yönteminde zamana bağlı tepki prensibi kullanılırken, 3ω yönteminde sıcaklık salınım prensibinin kullanılması bu iki yöntem arasındaki en büyük farktır.

Şekil 2.5'te görüleceği üzere, 3ω yönteminde, ince bir metal ısıtıcı vasıtası ile açısal frekansı ω olan bir elektrik akımı geçirilir. Giriş akımındaki frekansın iki katı olan sinüzoidal ısıtmadan dolayı metal sıcaklığı açısal olarak 2ω frekansında salınır. Metal ısıtıcının elektrik direnci, sıcaklığın doğrusal bir fonksiyonu olduğu için sıcaklık salınımı dolaylı olarak metal tel boyunca ölçülen voltajın belirlenmesiyle hesaplanabilir. 3ω yönteminde yerçekimsel etkilerden dolayı meydana gelen doğal konveksiyonun etkilerinden kaçınmak için cihazın yönü değiştirilir. (Oh vd. 2008).



Şekil 2.5. 3ω kurulum şeması (Doğanay vd. 2019)

Cahill (1990)'e göre ince sonsuz bir ısı kaynağından, sonsuz yarım hacim üzerindeki herhangi bir $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ mesafesindeki sıcaklık için kesin çözüm Eşitlik (2.19)'da verilmiştir.

$$\Delta T(r) = \frac{P}{l\pi k} K_o(qr) \quad (2.19)$$

Bu eşitlikte; k ısı iletkenlik, P/l ısı kaynağında 2ω frekansında üretilen birim uzunluk başına güç genliğidir, K_0 sıfırcı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur.

$$\frac{1}{q} = \sqrt{\frac{D}{2i\omega}} \quad (2.20)$$

Burada $\alpha = k/\rho c_p$ ısı yayınıdır, ρ yoğunluk, c_p özgül ısıdır ve $1/q$ ise termal penetrasyon derinliğidir. Sıcaklık salınımı ve ısı üretim oranı arasındaki ilişki Eşitlik (2.19)'da verilmiştir.

$$\Delta T = \frac{P}{l\pi k} \int_0^\infty \frac{\sin^2(kb)}{(kb)^2(k^2 + q^2)^{1/2}} dk \quad (2.21)$$

Burada b ısı kaynağının yarım genişliğidir.

2.1.1.2. Sürekli rejim yöntemleri

Sürekli rejim yöntemleri kendi içerisinde 2 farklı yönteme ayrılmaktadır;

- i. Paralel Plaka Yöntemi (Parallel Plate)
- ii. Eş Eksenli Silindir Yöntemi (Coaxial Cylinders)

Sürekli rejim yöntemlerinde ölçüm yapılacak akışkanın kararlı hale gelmesi için bir zaman ayrılır. Ölçümler bu süre sonrasında yapılır. Akışkanlar sürekli rejime geçerken sarf ettikleri zaman içerisinde doğal konveksiyon etkilerine maruz kalabilmektedirler.

2.1.1.2.1. Paralel plaka yöntemi

Paralel Plaka yöntemi, sıvıların ısı iletkenliğini belirlemek için geliştirilmiştir. (Challoner ve Powell 1956). Isıtma plakası iki bakır diskten oluşur. Bu iki disk aynı oranda paylaştırılmış bir bobin ile sarılarak ısıtılır. Her bir plakanın dış yüzeyine yakın iki adet termokupl vardır (Das 2017). Bu yöntem ölçümü yapılacak test numunesine tek boyutlu ısıtma sağlamaktadır (Kostic ve Walleck 2010).

Paralel Plaka yöntemi ile ısı iletkenliğin hesaplanabilmesi için gerekli matematiksel formülasyon Eşitlik (2.22)'de verilmiştir.

$$\Delta K_L = \left(\frac{0.964 I_0 V_0 d}{t} - k_s A_s \right) / A_L \quad (2.22)$$

Burada I_0 ve V_0 sırasıyla akım ve voltajdır. Diğer değişkenler ise sırasıyla; k_s plakaların ısı iletkenliği, A_s mesafe parçalarının toplam kesit alanı, t sıcak ve soğuk plakalar arasındaki gözlemlenen sıcaklık farkıdır, d akışkanın kalınlığıdır, A_L sıvının temas ettiği alandır, A toplam test hücresi alanıdır ($A_L = A - A_s$) ve son olarak K_L ise hesaplanacak akışkanın ısı iletkenliğidir (Challoner A.R. ve Powell R.W. 1956).

2.1.1.2.2. Eş eksenli silindir yöntemi

Eş Eksenli Silindir yöntemi ile ısı iletkenlik hesaplamak için silindirik koordinatlarda Fourier Yasasından faydalanılır. Bu yöntem için silindir şeklinde eş merkezli olacak şekilde ayarlanmış iki adet elektrot görevi yapacak silindire ihtiyaç duyulmaktadır. Isı iletkenliği ölçülecek nanoakışkan bu iki silindirin arasında bulunan

boşluğa doldurularak akım verilir. Verilen akım vasıtasıyla akışkanın sıcaklığında meydana gelen değişim ölçülerek ısı iletkenlik hesaplanabilmektedir.

Bu yöntemin matematiksel eşitliği, Eşitlik (2.23)'te verilmiştir. Silindirik koordinatlarda Fourier Yasasını kullanılırken T_i sıcaklığı dıştaki silindirin iç yüzey sıcaklığını temsil ederken, T_0 sıcaklığı içteki silindirin dış yüzey sıcaklığını temsil etmektedir.

$$k = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L[(\Delta T/\dot{Q}_e) - (\ln(r_3/r_2)/2\pi L k_c)]} \quad (2.23)$$

Burada $\dot{Q}_e$ (W) ısıtıcıya verilen ısı enerjisi, k_c silindir malzemesinin ısı iletkenlik değeri, ΔT T_i ve T_0 arasındaki sıcaklık farkı, L silindirin uzunluğu, r_1 içteki ısıtıcının dış çapı, r_2 ve r_3 sırasıyla dıştaki silindirin iç ve dış çaplarıdır (Paul vd. 2010).

2.1.2. Konveksiyon akış yöntemleri

Akışkanın dinamik yani hareketli olduğu sistemler için ısı iletkenliğinin belirlenmesi maksadıyla yapılan ölçümlerdir. Bu yöntemlerde, hareket eden akışkanın temas ettiği yüzeyler ile arasında bir ısı transferi meydana gelir. Burada ısının iletim performansı, sabit ısı akısı veya sabit duvar sıcaklığı yöntemleri ile ısı iletkenlik katsayısı yerine taşınım katsayısı olarak belirlenmektedir.

2.2. Kaynak Taraması

Dünya genelinde son zamanlarda aşırı artan enerji tüketimi, gelecek yıllar için önemli derecede sorun teşkil etmektedir. Artan enerji tüketimi beraberinde enerji kayıplarını, maliyetlerini ve ulaşılabilirlik sorunlarını da getirmektedir. İnsanlar bu sorunlarla mücadele edebilmek için çeşitli teknolojiler ve yöntemler üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Genellikle enerjinin verimliliğini arttırmak üzere yapılan bu çalışmalarda birçok farklı yöntem üzerinde durulmaktadır. Bu yöntemler enerji kayıplarını azaltmak üzere alınan bazı önlemler, enerji verimliliğini arttırmak için yapılan bazı geometrik-tasarımsal değişiklikler veya performansı arttırmak için yapılan bazı yenilikçi buluşlar ile çeşitlilik kazanmaktadır. Nanoakışkanların geliştirilmesi de bu yöntemler arasında oldukça önemli bir yer kaplamaktadır.

Nanoakışkanların geliştirilmesindeki en büyük sebeplerden bir tanesi, geleneksel olarak kullanılan akışkanlardan daha iyi termofiziksel özellikler elde etmeye çalışmaktır. Bu sebeple nanoakışkanlar üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Isı iletkenlik katsayısı yüksek olan nanopartiküllerin çeşitli baz akışkanlara veya akışkan karışımlarına eklenmesi ile elde edilen nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerinin, geleneksel akışkanlara göre daha yüksek değerlere çıkmasından dolayı nanoakışkanlar ısı sistemler için önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında, elde edilen farklı nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin yeni bir tasarım olan Silindirik Bakır Tüp Yöntemi ile yüksek doğrulukta ölçülmesini hedeflenmiştir. Geliştirilen bu yöntemin, literatürde bu alanda yapılmış ve en az hata payına sahip olan diğer yöntemler ile karşılaştırması yapılacaktır.

Nanoakışkanların ısı iletkenliklerini ölçülmesi üzerine birçok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Minakov vd. (2015) yürüttükleri çalışmalar sonucunda, sıcak tel yöntemi temelinde, akışkan ortamlarının ısı iletkenlik katsayısı değerlerini kabul

edilebilir bir doğruluk derecesiyle belirlemeyi mümkün kılan bir deney düzeneği oluşturmuş ve test etmişlerdir. Telin kararsız ısınması sırasında meydana gelen süreçleri açıklamak için doğal konveksiyonu dikkate alan iki boyutlu bir ısı transfer matematik modeli oluşturmuşlardır. Bu modeli kullanarak, deney düzeneğinin parametrelerini ve sıvıların ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesinde sıcak tel yönteminde kullanılan asimptotik çözümün doğru uygulanabilirlik aralıklarını belirlemişlerdir. Deney prosedürünü, su ve etilen glikolün ısı iletkenlik katsayısının ölçümü sırasında test etmişlerdir. Ölçümler ile referans veriler arasındaki uyumsuzluk %3'ü aşmamıştır. Yazarlar, prosedürün nanoakışkanların ısı iletkenliğinin ölçümüne uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Alüminyum oksit nanopartiküllerine dayalı bir nanoakışkanın ısı iletkenliğini ölçmeyi başarmışlardır. Guo vd. (2018) yürüttükleri çalışmalar sonucunda, geçici rejimde sıcak tel yöntemine dayanan bir nanopartikül ısı iletkenlik ölçüm sistemi kurmuşlar ve deiyonize su ve etilen glikol baz sıvıları için ölçüm hatası ile ilgili kapsamlı bir analiz yapmışlardır. Ölçüm hatasını azaltmak için uygun sıcak tel çalışma akımı ve ölçüm süresi belirlemişlerdir. Yapılan ölçümler sonucunda, 0,5 vol.% SiO₂-EG nanopartikülünün ısı iletkenliğinde %3,2 ve 1,0 vol.% SiO₂-EG nanopartikülünde ise için %9,6 artış gözlemlenmiştir. Buna karşın, deiyonize su bazlı aynı konsantrasyonlardaki nanopartiküllerin ısı iletkenlik değerlerindeki artışları sırasıyla %1,0 ve %3,4 olarak belirlemişlerdir. Deney sonuçlarındaki toplam hatayı belirlemek için düzenekteki model kaynaklı hatalar ile ölçüm ve cihaz hatalarının toplamı hesaplamışlardır. Toplam hatayı, deiyonize su için %1,24 ve etilen glikol için %1,17 olarak bulmuşlardır. Aparna vd. (2018) yürüttükleri çalışmalar sonucunda, THW (Geçici Rejimde Sıcak Tel) yöntemi ile Lazer Flaş yöntemi arasında bir karşılaştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, su bazlı Al₂O₃ ve Ag nanopartiküllerinin eşit konsantrasyonları kullanılarak, yöntemlerin karşılaştırılmasını yapmışlardır. Karşılaştırmalar sonucunda, metalik (Ag) nanopartiküllerinin, metal-oksit (Al₂O₃) nanopartiküllerine kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı hacim fraksiyonuna, boyut dağılımına ve şekil dağılımına sahip olan nanopartiküllerin ısı iletkenlik ölçüm sonuçlarında, THM yöntemi ile elde edilen değerlerin, Lazer Flaş yöntemi ile ölçülen değerlere göre oldukça yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Kullanılan ısı iletkenlik ölçme yöntemleri, 25°C'deki su ve etilen glikol ile kalibre edilmiştir. Su ve etilen glikolün ısı iletkenlik değerlerinin literatür değerlerine göre gösterdiği farklılıkları, THM yöntemi için sırasıyla %3,9 ve %1,2 olarak tespit etmişlerdir. Lazer flaş yönteminin ölçüm sonuçlarını ise %2,1 ve %6,6 olarak belirlemişlerdir. Yapılan bir başka çalışmada ise Hong vd. (2011), geçici rejimde sıcak tel yöntemi (THW) ile nanopartiküllerin etkili ısı iletkenliğini ölçerken, yayınlanan sonuçlar arasında önemli sapmalar gözlemlenmiştir. Bu sapmalar, sıcaklık veri aralığının yetersiz bir şekilde seçilmesine atfedilmiştir. Uygun veri aralığı belirlenirken, başlangıç zamanının iletken ısı akışındaki gecikme süresinden sonra, bitiş zamanının ise doğal konveksiyonun belirgin hale gelmeden önceki bir noktada seçilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Örneğin, etilen glikol (EG) bazlı 1,06 vol.% ZnO nanopartikülü için yapılan ölçümlerde, ısı iletkenliğinin baz sıvısının değerine göre %5,4 oranında arttığını belirlemişlerdir. 25°C'deki Deiyonize su ve etilen glikol ile yapılan deneylerin sonuçları literatür değerleri ile karşılaştırıldığında sırasıyla %0,5 ve %1'lik hatalar elde etmişlerdir. THW yöntemi ile yapılan hemen hemen tüm çalışmalarda, ısıtıcı prob olarak tercih edilen tel, 20-50 µm çapında değişiklik gösteren platin telidir. Ancak, Azarfar vd. (2016) yaptıkları bir çalışmada, sıvının ısı iletkenliğini ölçmek için düşük maliyetli bir geçici sıcak tel cihazı inşa etmişler ve değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, geçici rejimde sıcak tel olarak bakır malzemesi

seçilerek, ısı iletkenliğin geleneksel yöntemlerle aynı doğrulukta ölçülebilmesi için cihazı yeniden tasarlamışlardır. 80 μm çapında bir bakır mikro-teli, platin tel kullanan geleneksel geçici rejim sıcak tel cihazlarının aksine tercih etmişlerdir. Geçici rejimde sıcak telde bakır tel, hem ısı kaynağı hem de sıcaklık dedektörü olarak görev yapmaktadır. Teli ısıtmak ve Wheatstone köprüsünü dengesiz hale getirmek için sırasıyla doğrudan ve alternatif elektrik akımlarıyla iki teşvik akımı uygulamışlardır. Bu şekilde, elektrik gücü nedeniyle ısınmayan Wheatstone köprüsünün bilinen ve ucuz dirençlerini kullanmışlardır. Isıtma kaynağı olan bakır teli, Wheatstone köprüsünün uyarım kaynağından ayırdılar. Ölçümleri, deiyonize su ve etilen glikol için 5°C'den 50°C'ye kadar olan sıcaklık aralıklarında gerçekleştirmişlerdir. Deiyonize su için ölçümün ortalama belirsizliğini $\pm\%1,2$, etilen glikol için ise $\pm\%0,9$ olarak belirlemişlerdir.

Isıl iletkenlik için kullanılan bir diğer yöntem olan TPS (Geçici Rejimde Düzlem Kaynak) üzerine yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Boumaza ve Redgrove (2003) yaptıkları çalışmada 0,03 ila 28 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ısı iletkenlik aralığında ekstrüde polistiren ve NPL referans malzemeleri kullanarak ısı iletkenliği katı malzemeler için doğrulamışlardır. Değerler %5 içinde tekrarlanabilirlik gösterirken, NPL'nin korumalı sıcak plaka ve eksenel ısı akış teknikleriyle %4 içinde iyi karşılaşmışlardır. Sıvılar üzerinde yapılan ölçümler, sensör boyutunun ve doğal konveksiyonun etkilerini göstermiştir. Sıvılar üzerinde yaptıkları deneylerde, silikon yağı ve su için diğer tekniklerle karşılaştırıldığında %15'lik bir uyumsuzluk elde etmişlerdir. Bu nedenle sıvılarda daha iyi doğruluk elde etmek için sensör veya ölçüm tekniğinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. Ai vd. (2017) yaptıkları çalışmada doğal konveksiyonun başlangıcının sıvıların ısı iletkenlik ölçümleri üzerinde önemli etkilerinden kaçınmak için geçici sıcak disk tekniğine dayalı tek taraflı yatay bir yöntem önermişlerdir. Su, glikol ve metanolü, hem geleneksel dikey yöntem hem de tek taraflı yatay yöntem kullanılarak sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda su için %13,9 ve glikol için %7,1 hata oranları elde etmişlerdir. Bu hata oranları doğal konveksiyonun etkisinin önemini göstermektedir. Jiang vd. (2016) yaptıkları bir çalışmada CNT nanorefrigrantlarının (karbon nanotüp içeren soğutucu akışkanların) ısı iletkenlik özelliklerini test etmek ve tahmin etmek için bir TPS modeli geliştirmişlerdir. Deneylerde CNT çaplarının ve boy-en oranlarının ilgili akışkanın ısı iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiş ve deneylerin kolaylığı için R113'ü ana soğutucu olarak kullanmışlardır. Deney sonuçları, CNT nanorefrigrantlarının ısı iletkenliklerinin, CNT-su nanoakışkanları veya küresel nanopartikül-R113 nanorefrigrantlarına kıyasla çok daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Deneyler ayrıca, CNT çapı küçüldükçe veya CNT'nin boy-en oranı arttıkça, CNT nanorefrigrantının ısı iletkenlik artışının daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Yapılan bu çalışmada TPS cihazını test etmek amacıyla farklı sıcaklıklardaki saf R113'ün ısı iletkenliklerini literatür değerleriyle karşılaştırmışlardır. Ölçülen verilerin, kullanılan TPS (REFPROP 8.0) cihazı tarafından hesaplanan verilerden sapması %3'ten az olduğunu tespit etmişlerdir. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini ölçmek için kullanılan geleneksel yöntemler, nanoakışkanların ısı transfer performansını etkileyen kritik özelliklerin incelenmesine olanak tanımaz. Örneğin, ısı iletkenlik ölçümleri sırasında, nanoakışkanların ısı özellikleri, nanoparçacıkların çökmesi, birikmesi ve yüzeye yapışması gibi çeşitli kritik özelliklere maruz kalabilir. Ayrıca, ölçüm hücresi, tasarım, geometrik ve malzeme sınırlamaları nedeniyle tam temizlik yapılması ve doğrudan görselleştirme açısından ciddi işlevsel sınırlamalara sahiptir. Souza vd. (2023) yaptıkları bir çalışmada TPS düzeneğine, polidimetilsiloksani ısı iletkenliği ve mükemmel optik şeffaflık gibi benzersiz özellikleri sayesinde, duvarlarda

biriken nanoparçacıkların daha kolay ve verimli bir şekilde temizlenmesini ve dolayısıyla olası numune kontaminasyonlarının önlenmesini sağlayan yenilikçi ve basit bir hücre üretmek için kullanmışlardır. Yaptıkları bu hücre ile cihazın kalibrasyonunu yaparken deiyonize su, etilen glikol ve gliserin kullanmışlardır. Bu kalibrasyon sonucunda sırasıyla %0,18, %0,29 ve %0,13'lük bir hata elde etmişlerdir.

Isıl iletkenlik ölçümü için kullanılan bir diğer yöntem olan 3ω yöntemi üzerine yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Doğanay vd. (2019) yaptıkları bir çalışmada harici manyetik alan etkisi altında $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-H}_2\text{O}$ manyetik nanopartiküllerinin ısı iletkenliğini araştırmayı amaçlamışlardır. %4,8 hacimsel konsantrasyona sahip $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-H}_2\text{O}$ manyetik nanopartikül örneği satın almışlar ve dört farklı hacimsel konsantrasyona (%1, %2, %3, %4) seyreltmışlerdir. 0-400 G aralığında harici bir manyetik alanı, ısı iletkenlik ölçüm sensörünün oluşturduğu sıcaklık gradyanına paralel ve dik yönlerde uygulamışlardır. Isıl iletkenlik ölçümlerinden önce, kalıcı mıknatıslar arasındaki hava boşluğunda üretilen harici manyetik alanı hem sayısal hem de deneysel olarak analiz etmişlerdir. Sonrasında, ölçüm bölgesindeki manyetik alanın nanopartiküllerin zincir halinde toplanması ile ilişkisini kurmak için bir düzensizlik parametresi tanımlamışlardır. Isıl iletkenlik ölçümlerini 3ω yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, manyetik alan kuvvetinin artmasıyla ısı iletkenliğinin belirli bir noktaya kadar arttığını, ardından bu artışın azaldığını göstermişlerdir. Hazırlanmış olan 3ω test düzeneği su, etilen glikol ve etanol gibi saf sıvılar ile doğrulanmış ve %2 doğruluk oranında ısı iletkenlik değerleri elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Oh vd. (2008), deiyonize su ve etilen glikol ile bir ısıtıcı cihazının 3ω yanıtı için teorik modelini, deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak doğrulamışlardır. Bu doğrulamanın ardından, deiyonize su ve etilen glikol içindeki Al_2O_3 nanopartiküllerinin etkin ısı iletkenliğini oda sıcaklığında ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. 3ω yöntemi ile hazırlanan test düzeneğinin toplam belirsizliğini %2 olarak hesaplamışlardır.

Sahamifar vd. (2024), yaptıkları bir çalışmada, nanoakışkanların ısı iletkenliğini ölçmek için yeni bir karşılaştırmalı interferometrik yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının ısı iletkenliğini, Mach-Zehnder Interferometresi kullanılarak iletken bir bariyerle ayrılmış iki sıvıdaki sürekli rejimde sıcaklık alanlarının karşılaştırılmasıyla deiyonize suya göre ölçmüşlerdir. Yöntem yalnızca nanoakışkanlar ile sınırlı olmayıp, herhangi bir şeffaf sıvının ısı iletkenliğini ölçmek için potansiyel olarak kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntem, termokupl sıcaklık ölçüm doğruluğuna neredeyse bağımsız olup, ölçüm belirsizliğinin ana kaynağı olarak saçak gradyanlarındaki optik hatalar öne çıkmaktadır. Göreceli ısı iletkenlik ölçümlerindeki belirsizliği $\pm 6\%$ olarak tahmin etmişlerdir. Karşılaştırma amacıyla, bu teknikle elde edilen ısı iletkenlik değerleri geçici rejimde sıcak tel yöntemi ile kıyaslamışlardır. Ayrıca, yöntemin güvenilirliğini, deiyonize suyun ısı iletkenliğinin ölçülmesiyle de göstermişlerdir. Daha sonra, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanlarının %0.02, %0.05, %0.08 ve %0.11 ağırlık konsantrasyonlarında göreceli ısı iletkenliklerini, her iki yöntemle oda sıcaklığında elde etmişlerdir. Bu konsantrasyon aralığı, önceki interferometrik çalışmalarda anormal derecede yüksek ısı iletkenlik rapor edildiği için ilgi çekicidir. Sonuçların, karşılaştırmalı interferometrik yöntemle elde edilen ısı iletkenliğinin, geçici sıcak tel yöntemiyle elde edilen sonuçlarla %2,3'ten daha iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, ağırlık konsantrasyonu %0.11'den düşük olan $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ bazlı nanoakışkanların ısı iletkenliğini, ölçüm yöntemlerinin belirsizliği dahilinde, deiyonize su ile aynı olduğunu belirtmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Silindirik Bakır Tüp Tasarımı

3.1.1. Test hücresi malzeme seçimi ve tasarımı

Önerilen geçici rejimde Silindirik Bakır Tüp tasarımında, THW yönteminden farklı olarak dışardan içeriye doğru bir ısı transferi gerçekleştirilmiştir. THW yönteminde içeriden dışarıya doğru olan ısıtmanın, dışarıdan içeriye doğru olacak şekilde ısıtılmasındaki farklılıklar gözlemlenmiştir. Aynı bilimsel temelden yola çıkılarak formül üzerinde bazı parametrelerde değişiklikler yapılmıştır. THW yönteminde ısıtıcı platin telin uzunluğuna karşılık gelen l uzunluğu, silindirik tüp yönteminde sarılan rezistansın bakır boruya olan temas yüzeyi uzunluğuna karşılık gelmektedir. Silindirik bir hücre içerisine doldurulan akışkana, silindire dıştan sarılı elektrik rezistansı yardımıyla ısı verilerek sıcaklığındaki değişimin ölçülmesi suretiyle ısı iletkenlik belirlendiği için burada dış ortama olan ısı kayıplarının minimum seviyede olması beklenirken, akışkana olan ısı transferinin iyi bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmalıdır. Bu sebeple test hücresinin malzeme seçimi oldukça önem teşkil etmektedir.

Silindirik bir hücre olarak kullanılacak olan test hücresinin, ısıtıcıdan aldığı ısı enerjisini mümkün olduğu kadar hücrenin içerisine iletmesi gerekmektedir. Bu sebeple malzemenin, yüksek ısı iletkenliğe sahip olması gerekirken aynı zamanda da bulunabilir olması ve kolay işlenebilme özelliğinin olması gerekmektedir. Çizelge 3.1’de bazı katı malzemelerin ısı iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Oda sıcaklığında bazı malzemelerin ısı iletkenlik değerleri (Çengel 2012)

Malzeme	K, W/m.°C
Elmas	2300
Gümüş	429
Bakır	401
.altın	317
Alüminyum	237
Demir	80,2
Cıva (s)	8,54
Cam	0,78
Tuğla	0,72
Su (s)	0,607
İnsan derisi	0,37
Hava	0,026
Katı köpük	0,026

Bu malzemeler arasından ısı iletkenlik değeri, talaşlı işlenebilme özelliği, maliyet ve yüksek sıcaklıklara dayanım kriterleri göz önünde bulundurularak bakır tercih edilmiştir. Ek olarak hücre içerisinde kullanılan doğal konveksiyon ektilerinden kaçınmak için akışkanın ısıtma süresini veya sıcaklık değişimini en aza indirmek için akışkan hacminin küçük tutulması gerekmektedir. Aynı zamanda üzerine sarılacak olan rezistans için ise ihtiyaç duyulan minimum çap göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple test hücresinin hacminin olabildiğince küçük tutulması anlık ölçümler için faydalı

olacaktır. Bu kriterler göz önüne alınarak Şekil 3.1’de görüleceği üzere test hücresi için $\varnothing 28 \times 130$ mm boyutlarında 1 mm et kalınlığında bir silindirik bakır boru tercih edilmiştir. (Test hücresi için yapılan kapağın yüksekliği 1 cm ve test hacminin yüksekliği ise 9 cm olacak şekilde imal edilmiştir.)



Şekil 3.1. Silindirik bakır test hücresi

Seçilen bakır borunun sızdırmazlığı için alt kısmı tamamen kapatılırken, üst kısmına ise akışkan takviyesi yapılabilmesi için dişli bir kapak tasarlanmıştır. Dişli kapağın tam orta noktasından sensör boşluğu bırakılmış ve sensörün sıcaklıktan dolayı deforme olması önlenmiştir.

3.1.2. Rezistans seçimi ve güç hesabı

Bu tez çalışmasında test hücresi bakırdan olduğu için tercih edilecek rezistans oldukça önem taşımaktadır. Endüstride kullanım alanlarına göre birçok rezistans türü bulunmaktadır. Rezistans, bakır borunun üzerine sarılacağı için elektriksel olarak yalıtılmış olması ve bakır borunun geometrik şekline göre imal edilebilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, Şekil 3.2’de görüleceği üzere boru tipli ve elektriksel olarak yalıtımlı bir rezistans tercih edilmiştir. Tercih edilen rezistansın uzunluğu $l=1,64$ m, Nikel-Krom ısıtıcı rezistans telinin çapı 3 mm, kesit alanı $S=7,07 \text{ mm}^2$ ve Nikel-Krom telin öz direnç değeri (ρ) $=1,1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Telin direnci Eşitlik (3.1) ile hesaplanmıştır.

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (3.1)$$

Isıtıcı tel olarak kullanılan Nikel-Krom rezistans telin direnci $R=0,255 \Omega$

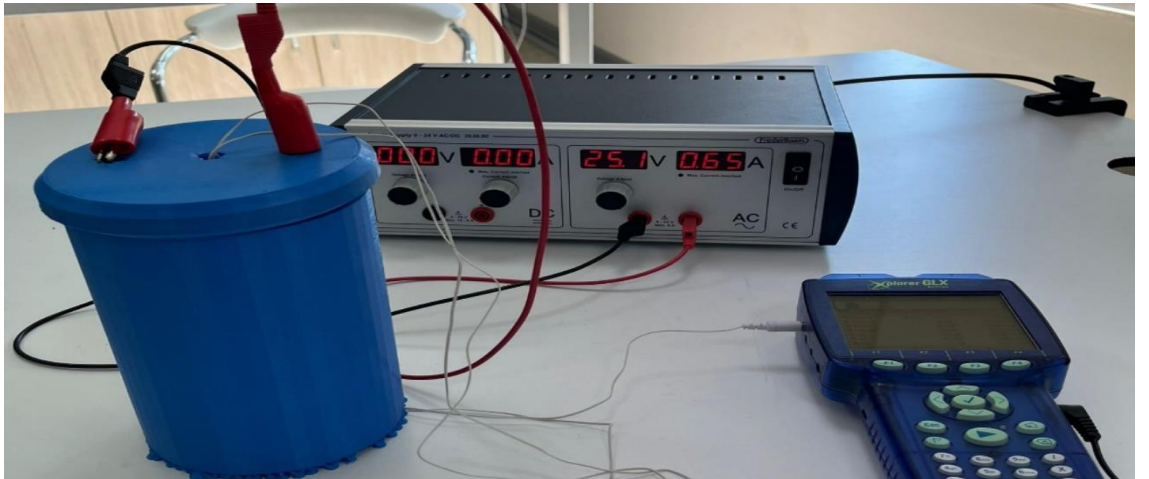


Şekil 3.2. Sarmal rezistans

Rezistansın gücünü hesaplamak için Eşitlik (3.2) kullanılır. Sarmal rezistans normal şehir şebekesine bağlandığında yaklaşık gücü 1 kW olacak şekilde imal edilmiştir. Fakat bu çalışmada, 25 voltluk bir gerilim ve 0,65 amperlik bir akım ile deneyler gerçekleştirildi. Bu amaçla kullanılan güç kaynağı, silindirik tüpe verilen akım ve gerilim değerleri ve Ø100x140 mm boyutlarındaki deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 3.3'te verilmektedir.

$$P = V \times I \text{ (W)} \quad (3.2)$$

$$P = 25 \times 0,65 = 16,25 \text{ W}$$



Şekil 3.3. Deney düzeneği

3.1.3. Test hücresi yalıtımı

Tercih edilen rezistans, bakır borunun dışına sarıldığı için eğer yalıtılmazsa elde edilecek ısıнын büyük bir çoğunluğu atmosfere salınacaktır. Bu ısı kaybı deneylerde büyük bir hataya sebebiyet vereceği için sistemin ısı kaybının minimum seviyede olması için yalıtılması gerekmektedir.

Deneylerde kullanılan yalıtım malzemesinin ismi elastomerik kauçuk köpüğü olup ısıl iletkenlik değeri $k=0,035 \text{ W/mK}$ 'dir. Şekil 3.4'te deneylerde kullanılan yalıtım malzemesinden bir numune görülmektedir.



Şekil 3.4. Yalıtım amaçlı kullanılan elastomerik kauçuk köpük malzeme

Yüksek sıcaklıklara çıkan rezistans, yalıtım malzemesini yakmaktadır. Bu sebeple yalıtım malzemesi, şartlar göz önünde bulundurularak üç katmanlı olacak şekilde hazırlanmıştır. En dış katmanda ısı yalıtım malzemesi olarak Elastomerik Yalıtım köpüğü ($k \leq 0,035 \text{ W/mK}$) kullanılmıştır. Bir sonraki katmanda ısı ve elektriksel yalıtım özelliği bulunan cam elyaf keçe tercih edilmiştir. Rezistansa yakın olması sebebiyle bir sonraki katmanda oluşacak yangınları ortadan kaldırmak için şerit cam elyaf (Amyant) tercih edilmiştir. Silindirik bakır tüp ve tüm yalıtımlar Şekil 3.5'te görüldüğü gibi bir rijit plastik bir kap (hazne) içine yerleştirilmiştir.

Rezistansın dışa sarılmasından dolayı ortaya çıkacak kayıpları minimuma indirmek için ek bir önlem daha alınmıştır. Burada sistemin en dış kısmını oluşturan plastik silindir haznenin iç kısmında bir boşluk bırakılarak ve bu boşluğu akışkan ile doldurarak, ara boşluktaki akışkana olan ısı transferi miktarı sayesinde sistemden dışarıya kaybolan enerji miktarı tespit edilebilecektir. Bu boşluk yalıtımdan olan ısı kayıp miktarını vereceği için sisteme verilecek enerjiden çıkarıldığında daha hassas bir sonuç edilecektir.



Şekil 3.5. Test hücresi yalıtım kutusu

3.1.4. Isı transfer verimi

Rezistans, bakır borunun dış yüzeyine sarıldığı için üretilen ısı enerjisinin birçoğu yalıtım malzemesine ve yalıtım kutusunun iç bölümüne salınmaktadır. Yapılan deney düzeneğine verilen ısı enerjisinin, ne kadarlık bir kısmının akışkana aktarıldığını hesaplamak oldukça önemlidir. Isı enerjisinin ne kadarlık bir kısmının akışkana geçtiğini hesaplayabilmek için akışkanın, geçen süre içerisinde ne kadarlık bir enerji depoladığını tespit etmek gerekmektedir. Bu hesaplama için aşağıdaki Eşitlik (3.3) kullanılırsa (Çengel 2012):

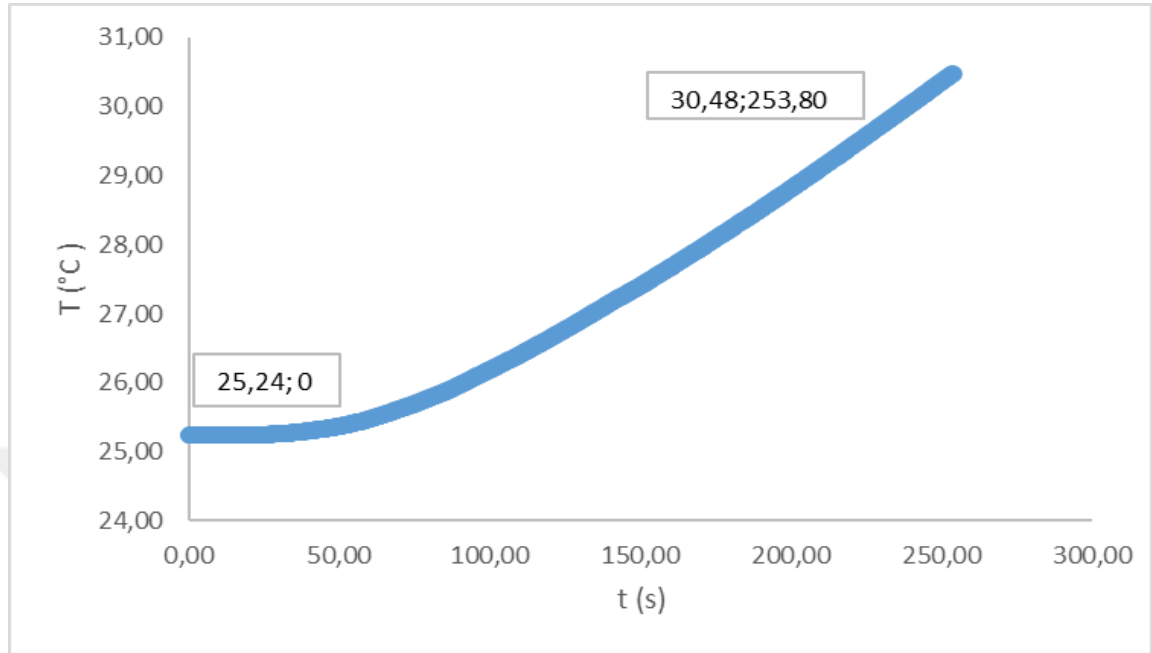
$$Q = mc_p \Delta T \text{ [J]} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{test hücresi}} &= 4,78 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \\ \rho &= 997 \text{ kg/m}^3 \text{ (25}^\circ\text{C'de suyun yoğunluğu)} \\ m &= \rho \cdot V_{\text{test hücresi}} = 0,0476 \text{ kg} \\ c_p &= 4180 \text{ J/kgK (25}^\circ\text{C'de suyun özgül ısısı)} \\ Q &= 0,0476 \times 4180 \times (30,48 - 25,24) \\ Q &= 1042,59 \text{ Joule bulunacaktır.} \end{aligned}$$

Geçen süre (253.8 s) dikkate alarak birim zamanda suya aktarılan ısı enerjisini (ısı transfer miktarını) aşağıdaki bağıntı yardımıyla:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \text{ [W]} \quad (3.4)$$

$\dot{Q} = 1042,59 / 253,80 = 4,108$ W olarak hesaplamak mümkündür. Bu ölçüm sırasında suyun sıcaklığındaki zamanla değişim Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Isıtılan deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği

Isı transferinin verimi; sistemden alınan enerjinin, sisteme verilen enerjiye oranıdır. Verimi hesaplamak için aşağıdaki Eşitlik (3.5) kullanılırsa;

$$\eta = \frac{\text{Sisteme alınan enerji}}{\text{Sisteme verilen enerji}} \quad (3.5)$$

$$\eta = \frac{4,108}{16,25} = 0,2528$$

$$\eta \cong \%25$$

Silindirik tüp yönteminde rezistansa verilen elektrik gücü 16,25 Voltttur. Tüp içerisindeki deiyonize suyun sıcaklığının zaman içerisindeki değişimi Şekil 3.6’da verilmiştir. Yapılan verim hesaplamasında, güç kaynağından çıkan elektrik gücünün %25’lik bir kısmının suya aktarıldığı hesaplanmıştır. %25’lik verim deiyonize suya göre hesaplanmıştır. Farklı türdeki akışkanların özgül ısı (c_p) değerlerindeki farklılıklar, verim üzerinde değişikliklere yol açabilir. Test düzeneği deiyonize suya göre kalibre edilmiş olduğundan, gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı akışkanların c_p değerlerine göre yeniden kalibrasyon işlemi yapılması gerekmektedir.

3.1.5. Silindirik bakır tüp yönteminin test aşaması

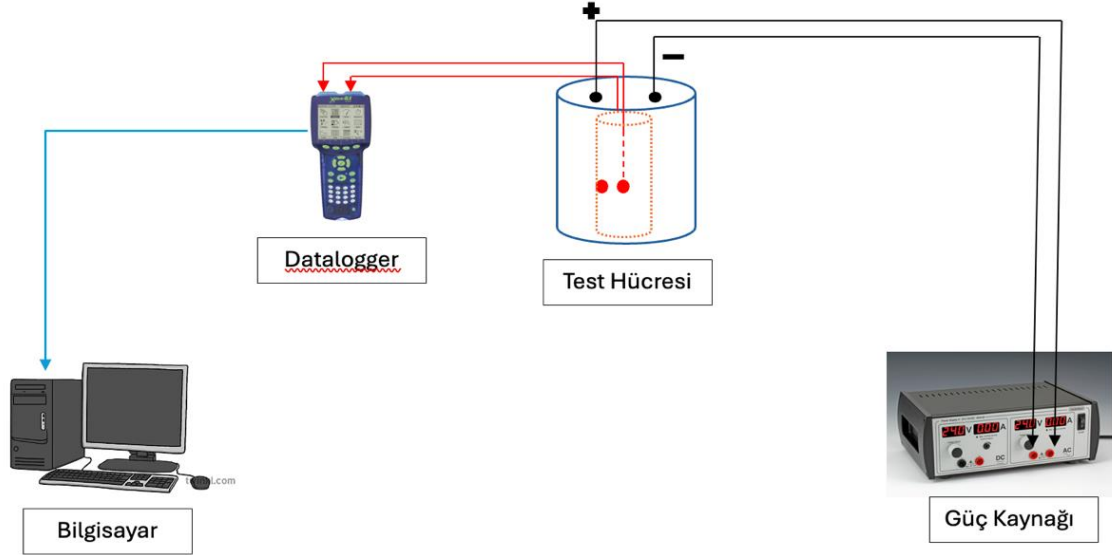
Deney düzeneği Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Sistem, 2 adet hızlı yanıt sıcaklık probu (PS-2135), 1 adet Xplorer GLX datalogger, 1 adet Federiksen 24 V AC/DC 0-10

A güç kaynağı, 1 adet 1 kW gücünde Nikel-Krom sarmal boru tipli ısıtıcı rezistans ve bakır borudan imal edilmiş deney hücresinden oluşmaktadır.

İki sıcaklık sensöründen biri, bakır borunun iç yan yüzeyine kapton bir bant ile yapıştırılmış, diğeri ise bakır borunun merkezine konumlandırılmıştır. Akışkan, test hücresinin içerisine doldurulduktan sonra sensörler yerleştirilmiştir. Ardından düzeneğin sabitlenmesi ve ısı yalıtımının sağlanması için 3 boyutlu yazıcıda imal edilen silindirik bir kutuya yerleştirilmiştir.

Deney öncesinde sensörlerin kontrolü yapılmış ve güç kaynağından 25 V gerilim ve 0,65 A akım sağlanmıştır. Deney tamamlandıktan sonra sistem tekrar açılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

Her deney tekrarı öncesinde bakır borunun ve akışkanın aynı başlangıç koşullarında olması büyük önem taşır. Bunun nedeni, dışarıdan içeriye doğru ilerleyen ısıнын öncelikle bakır borudan geçmesidir. Bakır borunun ısı depolama süresi verimi etkileyebileceğinden, deneylerin aynı başlangıç koşullarında başlatılması, sonuçların tutarlılığı ve sistemin güvenilirliği açısından kritik bir gerekliliktir.



Şekil 3.7. Silindirik bakır tüp yöntemi şematik gösterimi

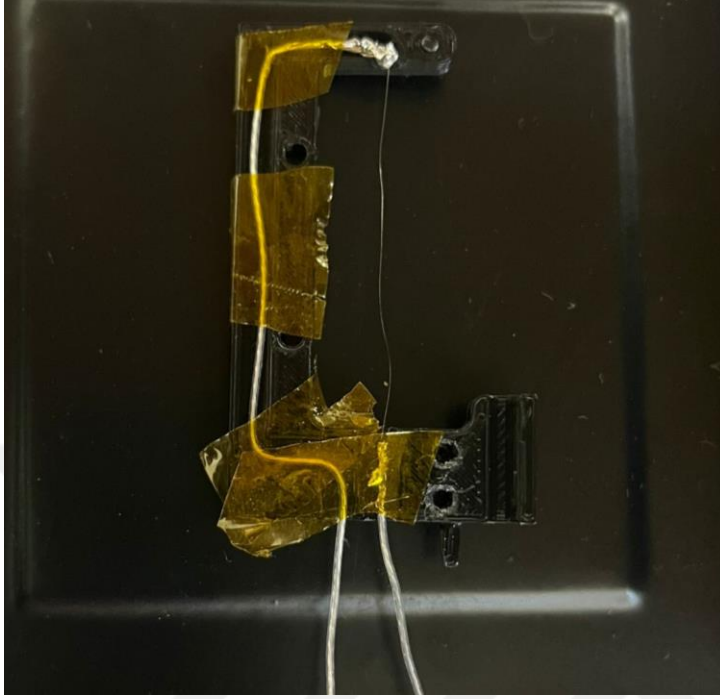
3.2. Geçici Rejimde Sıcak Tel Yöntemi

Silindirik Bakır Tüp yönteminden dışarıdan içeriye doğru bir ısıtma işlemi uygulanırken, THW yönteminde içeriden dışarıya doğru bir ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Bu yöntem literatürde en yaygın olarak kullanılan bir ısı iletkenlik ölçüm yöntemidir. Bu çalışmada THW yönteminde bazı tasarımsal değişiklikler yapılarak deney sonuçlarındaki farklılıklar karşılaştırılmıştır.

3.2.1. Sıcak tel deney düzeneği

THW yönteminde ısıtma işlemi merkez boyunca aksel olarak uzanan bir tel vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada ısıtıcı tel olarak 30 μm çapında, 4 cm

uzunluğunda ince bir platin tel tercih edilmiştir. Şekil 3.8’de görüleceği üzere platin tel, direnci çok düşük olan iletken bağlantı kabloları ile uç kısımlarından lehimlenmiştir.



Şekil 3.8. Isıtıcı platin tel

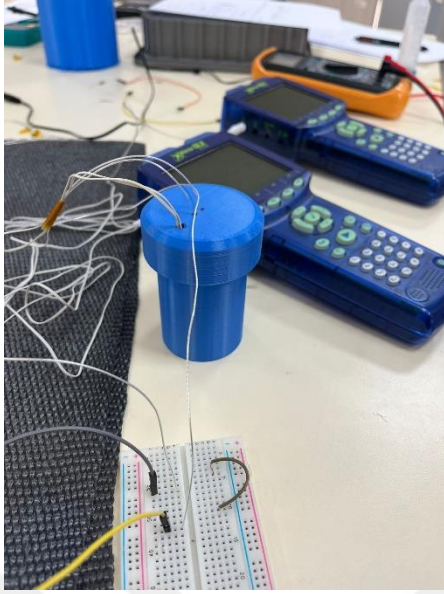
3 boyutlu yazıcı ile 60 ml’lik bir hacme sahip test hücresi ve sensör aparatı basılmıştır. Aparat sıcak tel ve sensörlerin sabitlenmesi için tasarlanmıştır. Şekil 3.9’da görüleceği üzere tasarlanan sıcak tel yönteminde hücrenin tam merkezinde sıcak tel bulunmaktadır. Aynı zamanda 2 farklı noktadan sıcaklık ölçümü alabilmek için 2 adet hızlı yanıt sıcaklık probu (PS-2135) kullanılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.9. a) Test hücresi; b) Sıcak tel ve sensör sabitleme aparatı; c) Test düzeneği

THW yöntemi için, literatürde platin tel, hem ısıtıcı hem de termokupl olarak kullanılmaktadır. Bu özelliğini wheatstone devresi sayesinde yapabilmektedir. Isınan telin direncindeki değişim, voltaj düşüşüne sebep olacağı için sıcaklık değişimi devre üzerinden voltaj sayesinde okunabilmektedir. Bu çalışmada, wheatstone devresi kullanılmamıştır. Platin tel doğrudan seri bir devre ile sadece ısıtıcı olarak kullanılmıştır.

Platin tele 6,4 V değerinde bir gerilim, 0,56A akım uygulanmıştır. Telden yayılan ısı enerjisi radyal doğrultuda ilerleyerek akışkanın sıcaklığında değişimine yol açmıştır. Kullanılan sıcaklık sensörleri sayesinde, ısının bir sensörden diğerine ulaşma süresi ve sensörlerin yerleştirildikleri konumlardaki zamana bağlı sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Ölçülen veriler Xplorer GLX datalogger sayesinde bilgisayar ortamına aktarılıp, Eşitlik (2.4) kullanılarak akışkanların ısı iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.

3.3. Nanoakışkanın Hazırlanması

Sıvıların ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla azaldığı (gliserin ve su dışında), katıların ise sıcaklıkla arttığı bilinmektedir. Ancak sıvı-katı karışımı olan nanoakışkanların ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla nasıl değiştiğine dair yapılan bilimsel çalışmalarda çelişkiler mevcuttur. Bunun temel nedeni nanoakışkanın yapısındaki kararsızlıktır. Yapısal kararsızlık problemi çözüldüğünde bu çelişkilerin de büyük oranda ortadan kalkacağı düşünülmektedir. Bu kısımda bu konuya çözüm getirilmeye çalışılmış ve kararlı bir nanoakışkanın elde edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır.

Nanoakışkan geliştirmede karşılaşılan en önemli teknik zorluğun durgun ve akış halinde kararlı özelliklere sahip bir nanoakışkan elde etmek olduğu iyi bilinmektedir. Bu nedenle, literatürde nanoakışkan dispersiyonlarının kararlılığını artırmak üzere surfaktan kullanımı öne çıkmaktadır. Surfaktanlar ile yüzey yükleri artırılan nanopartiküllerin kararlı dispersiyonları sağlanmaktadır. Partikül yüzey yüklerini artırmak için kullanılan diğer bir strateji ise yüzey modifikasyonudur. Polar uç gruplara sahip bileşikler (organik

veya inorganik yapıda) ile yüzeyi kaplanan nanopartiküllerden kararlı dispersiyonlar elde edilmekte ve pek çok alan için bu şekliyle uygulanmaktadır. Bu çalışmadaki temel amaç, $-NH_2$ uç grubuna sahip dallanmış polimerik yapı ile yüzeyi kaplanmış, çekirdek-kabuk yapılı nanopartiküllerin yüzey yüklerini artırarak kararlı dispersiyon oluşmasını sağlamaktır. Çalışmada, hem çekirdek hem de kabuk yapıda ısı iletim katsayısı yüksek metal oksitler kullanmanın sonuç nanopartikülün ısı iletim davranışına sinerjik bir etki yapacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada, kararlı bir nanoakışkan geliştirebilmek için PEI kaplı $Fe_3O_4@ZnO$ ve Al_2O_3 nanopartiküllerini içeren su temel (baz) akışkanlı iki farklı nanoakışkanlar kullanılmıştır. Literatürde Fe_3O_4 ve ZnO inorganik bileşiklerine ait ısı iletim katsayıları sırasıyla 17.65, 30 W/mK olarak bildirilmiştir. Fe_3O_4 , ZnO metal oksitleri Ag, Cu ve karbonik yapılardan (SWCNT, MWCNT, grafen) sonra yüksek ısı iletim katsayısına sahip bileşikler olması nedeniyle sık çalışılan nanoakışkan grubundadır. Bu bileşiklerin tek başına ya da kompozitlerine ait termal performanslarının değerlendirildiği çalışmalar literatürde mevcuttur. Özellikle $Fe_3O_4@ZnO$ çekirdek-kabuk yapılı nanopartiküllerin ısı iletim performanslarının değerlendirildiği çalışmalara rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında, kapsamında geliştirilmiş olan yüzeyi polietilenimin kaplı $Fe_3O_4@ZnO$ çekirdek-kabuk yapılı nanopartiküller ile yalnız Fe_3O_4 ve ZnO yapılarının kullanıldığı nanoakışkanların ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. Ne oranda bir sinerjik etki oluşturduğu da ortaya konulabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, daha doğru ısı iletim katsayısı belirlemesi için yeni bir ölçüm sistemi geliştirmek esas olmakla birlikte yeni bir nanoakışkan hazırlamak da hedeflenmiştir. Bu kapsamda, tasarlanan ölçüm sisteminin doğru çalışıp-chalışmadığını tespit etmek amacıyla öncelikle önceki çalışmalarda üretilen (Atmaca vd. 2022) fiziksel/kimyasal ve termo-fiziksel özellikleri belirlenmiş olan ve ısı iletim katsayısını C-Therm, TCi Termal İletkenlik cihazında ölçülmüş $Fe_3O_4@SiO_2-H_2O$ ve $ZnO@SiO_2-H_2O$ nanoakışkanları hazırlanmıştır. Kütlece %2'lik çekirdek-kabuk yapılı nanopartikül içeren $Fe_3O_4@SiO_2-H_2O$ ve $ZnO@SiO_2-H_2O$ nanoakışkanlarının termal iletim katsayıları 25 °C'de, sırasıyla, 0.6320 ve 0.6185 W/mK olarak ölçülmüştür. C-Therm, TCi cihazı akışkanların ısı iletim katsayısının belirlemesi amacıyla geliştirilmiş, sonuçları yüksek doğruluğa ve güvenilirliğe sahip bir cihazdır. Bu çalışma kapsamında öncelikle Atmaca vd. (2022) araştırma makalesinde sentez detayları verilen $Fe_3O_4@SiO_2$ ve $ZnO@SiO_2$ çekirdek-kabuk yapılı nanopartiküller sentezlenmiş ve su temel akışkanı içerisinde kütlece %2'lik nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Geliştirilmiş ısı iletim katsayısı ölçüm sisteminin doğruluğu test edilmiştir. Daha sonra aşağıda sentez detayları sunulan Fe_3O_4 , ZnO ve $Fe_3O_4@ZnO$ nanopartikülleri üretilerek kütlece %0,5-2 konsantrasyon aralığında nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Sentezlenecek tüm nanopartiküllerin kristal yapısı X-ışınları kırınımı (XRD), boyut, kabuk çapı ve parçacık şekilleri Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), parçacık yüzey yükü ve hidrodinamik boyut dağılımları Dinamik Işık Saçılımı (DLS), yüzey fonksiyonel gruplar infrared spektroskopisi (FTIR), termal özellikleri Termal Analiz (TGA/DSC/DTA), manyetik özellikleri ise VSM teknikleri ile belirlenmiştir. Farklı kütle oranlarında hazırlanmış nanoakışkanlarda ise yoğunluk, viskozite ve ısı iletim katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. $Fe_3O_4@ZnO$ nanopartiküllerinin sentezi-nanoakışkanlarının hazırlanması

Çekirdek-kabuk yapılı $Fe_3O_4@ZnO$ nanopartiküllerinin sentezinde Hong vd. (2008) tarafından yayınlanan çalışma modifiye edilerek kullanılmıştır. Dört aşamalı

gerçekleştirilmiş sentez ve akışkan hazırlama prosedürünün detayları aşağıda sunulmuştur.

3.3.1.1. Fe₃O₄ nanopartiküllerinin sentezi ve yüzey modifikasyonu

Geri soğutucu takılmış üç boyunlu bir balon içerisindeki 9,2 g (0.034 mol) FeCl₃·6H₂O ve 3,31 g FeCl₂·4H₂O (0.0163 mol) ve 1 g PEI 184 g saf sudan oluşan çözelti 80 °C sıcaklıkta, N₂(g) varlığında 1.2 M NaOH çözeltisi ile hidroliz edilmiş ve 120 °C sıcaklıkta 1,5 saat ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Çöktürülen partiküller santrifüj ile çözelti ortamından ayrıldıktan sonra 50 °C’de vakum etüvünde kurutulmuştur. Kurutulmuş 4 g Fe₃O₄ nanopartikülleri 200 ml 0.5 M sodyum sitrat çözeltisi ile iki boyunlu bir balon içinde karıştırılmış ve dispersiyon oluşuncaya kadar ultrasonik işleme tabi tutulmuştur (30 dk.). Kararlı dispersiyon sağlandıktan sonra geri soğutucu altında N₂(g) varlığında 60°C’de 12 saat karıştırılmış ve sonrasında santrifüjlenmiştir. Partiküller aseton ile 2-3 kez yıkandıktan sonra vakum etüvünde 40°C’de kurutulmuştur.

3.3.1.2. ZnO nanopartiküllerinin sentezi

10 g (0.0734 mol) Zn(CH₃COO)₂ ve 1 g PEI 200 ml 2-propanol (İPA) içerisinde çözüldükten sonra üzerine 5 g NH₃-15 ml İPA çözeltisi ilave edilerek hidroliz edilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleşen reaksiyonu takiben hidrotermal reaktöre yerleştirilen karışım 225 °C’de 6 saat ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Oda sıcaklığına soğuyan karışımdan partiküller santrifüjlenerek alınacak ve saf su ile yıkandıktan sonra vakum etüvünde 50 °C’de kurutulmuştur.

3.3.1.3. Fe₃O₄@ZnO nanopartiküllerinin sentezi

Yüzeyi sitrik asit ile kaplanmış Fe₃O₄ nanopartikülleri iki boyunlu balon içerisinde 100 ml suda dağıtıldıktan sonra üzerine istenilen miktarda ZnO nanopartikülü ilave edilmiş ve geri soğutucu altında 60 °C’de ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Farklı zaman aralıklarında (30-60-120-180-240-300 dk.) alınan karışım örneklerinde karboksilik grup-amin grup bağlanması FTIR spektrometresi ile izlenmiş ve gerçekleştiği anda ısıtılma işlemi durdurulmuştur. Zıt yüklü iki kimyasal grubun elektrostatik etkileşimler aracılığıyla kimyasal bağlanması oldukça kolay gerçekleşmektedir. Ancak, net ısıtılma işlem süresinin tespiti için bu izleme işlemi gerçekleştirilmek istenmektedir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra örnekler santrifüjlenerek ve 2-3 kez etanol-su ile yıkamadan sonra vakum etüvünde kurutulmuştur. Proje kapsamında kabuk ZnO yapısının ısı iletim katsayısına etkisinin değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle, ZnO/Fe₃O₄: 5, 10, 20 ve 30 mol oranlarında çalışılmış ve elde edilen çekirdek-kabuk yapılı nanopartiküllerden nanoakışkanlar hazırlanmıştır.

3.3.1.4. Nanoakışkanın hazırlanması

Sentezlenen hem saf hem de çekirdek-kabuk yapılı nanopartiküllerden belirlenen kütle oranlarında olacak şekilde alınmış ve temel akışkan su içerisinde dağıtılmıştır. Kararlı dispersiyon oluşumu için ultrasonik işleme tabi tutulmuştur. Su polar bir bileşiktir, Karboksil ve amin grupları da polarite sağlayan kimyasal gruplardır. Sentezlenen Fe₃O₄ nanopartiküllerinin sodyum sitrat ile kaplanması yüzeyinde karboksil gruplarının yer alması anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, ZnO ve Fe₃O₄@ZnO nanopartiküllerinin yüzeyi ise PEI kaplıdır, PEI ise yoğun amin gruplarına sahiptir. Dolayısıyla, sentezlenen tüm nanopartiküllerin suda dağılmaları (yüksek yüzey

yüklerinden dolayı) kolaylıkla gerçekleşmiştir. Bu durum partiküllerin yüzey yüklerinin (zeta potansiyeli) ölçümü ile kontrol edilmiştir. Burada kararlılığı etkileyecek tek parametre partikül boyutu olmuştur. Bu çalışmada yüksek yüzey yüküne sahip (± 50 mV) ve 40 nm altında partiküllerin sentezlenmesi başarı ölçütü olmuştur.



Şekil 3.10. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanoakışkanı ve deiyonize su

3.3.2. Kütlece %0,1'lik $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının hazırlanması

Termal iletkenlik katsayısı ölçümü için, tüm özellikleri tanımlanmış olan kütlece %0,1'lik $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan Al_2O_3 nanopartikülleri yarı kararlı γ , δ ve θ fazlarının karışımından oluşan bir kristal yapıya sahip Aerioxide Alu 130 (Evonik Industries) ticari ismine sahiptir. Yüzeyi pozitif elektriksel yüke sahip olan ve 4-70 nm aralığında boyuta sahip partiküllerin yüzey alanı 130 ± 20 m²/g'dır. Temel akışkan olarak ultra saf su kullanılmış olup iletkenliği 25°C'de 0.055 mS/cm'dir.

50 ml kütlece % 0.1'lik $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı hazırlanışı: 49.5 g ultra saf su ve 0.5 g Al_2O_3 nanopartikülleri hassas şekilde tartılarak (Mettler Toledo marka, TLE204 model) kapaklı şişe içerisine konulmuş ve 1 saat ultrasonik işleme (Elma marka, S100H model) tabi tutulmuştur. Temel akışkan ve hazırlanan nanoakışkana ait özellikler Çizelge 3.2'de sunulmuş olup, nanoakışkan hazırlanırken herhangi bir surfaktan kullanılmamıştır.

Çizelge 3.2. Temel akışkan ve nanoakışkanın bazı termofiziksel özellikleri

Akışkan	Yoğunluk (ρ , 25°C'de) (gr/cm ³)	Viskozite (μ , 25°C'de) (kg/m.s)	Termal iletim katsayısı (k) (W/m.K)	Spesifik ısı (C_p) (kJ/kg.K)
H ₂ O	0.9984	0.00098	0.5962	4182.8
(k/k) %0,1 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$	0.9986	0.00134	0.5973	4181.8

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Silindirik Bakır Tüp Tasarımı

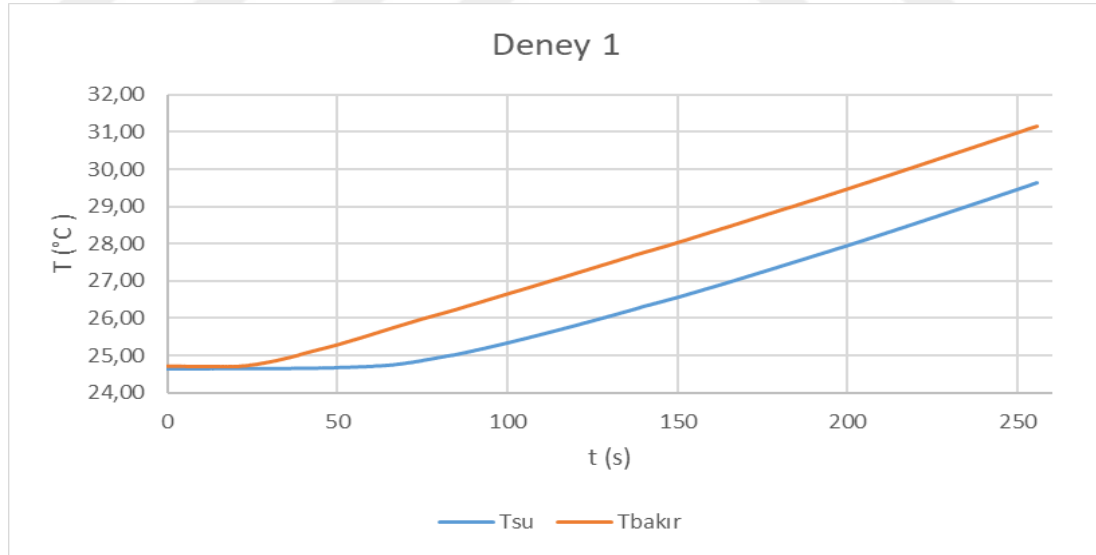
4.1.1. Deiyonize suyun ısı iletkenlik ölçümü

Bu kısımda, deiyonize suyun ısı iletkenlik değeri yeni geliştirilen silindirik tüp tasarımı ile ölçülerek 25 °C’deki literatür değeri ile karşılaştırılmıştır. Deiyonize su, iyonlarından arındırılmış bir saf su türü olduğu için deneylerde referans akışkan olarak tercih edilmiştir.

Deneyler sırasında, deiyonize suya yaklaşık 25 °C sıcaklıkta 25 voltluk bir gerilim uygulanmıştır. Akım, sabit olarak 0,65 amper düzeyinde sabit tutuldu. Ölçümler, her biri yaklaşık 150 ila 250 saniye arasında süren zaman dilimlerinde gerçekleştirildi.

Elde edilen ölçümler Eşitlik (2.4)’e göre $(k = \left[\frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \right] \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right))$ analiz edilmiştir ve THW yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Rezistans olarak ince platin tel yerine daha kalın bir rezistans kullanıldığı için, doğal konveksiyon etkilerini azaltmak amacıyla THW yönteminden farklı bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu bağlamda, ölçüm süresi uzatılmış ve sıcaklık artış miktarı azaltılmıştır.

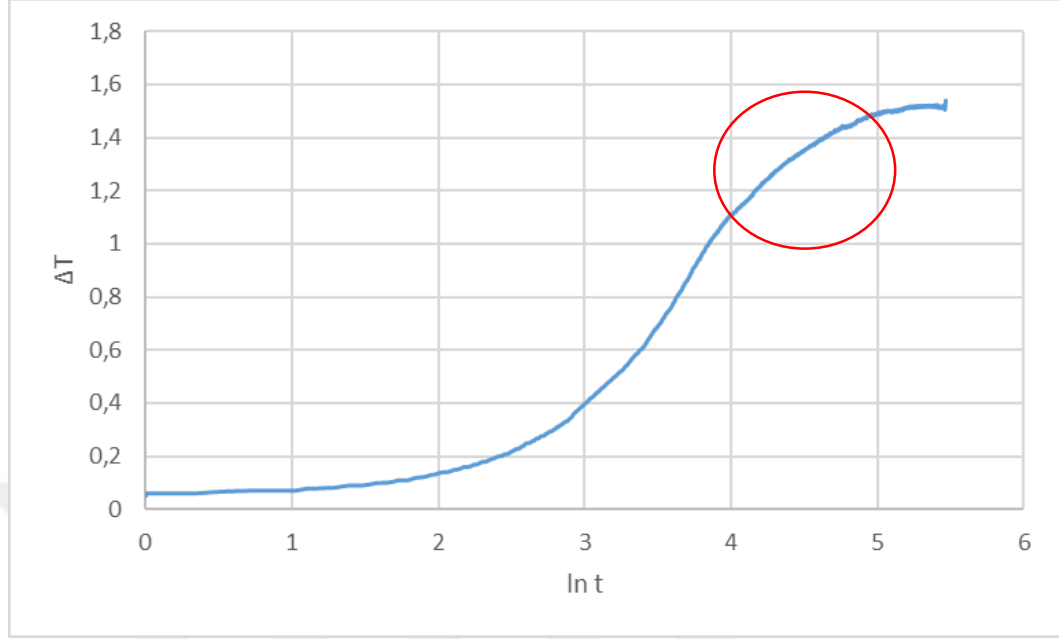
Şekil 4.1’de su ve bakırın iç yüzeyinin sıcaklığının zamana göre değişimi görülmektedir. Isı iletkenlik hesabı için gerekli olan $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer bölgesi bu grafik sayesinde daha net belirlenmiştir. Görüleceği üzere su, bakırdan daha geç ısınmaya başladığı için suyun sıcaklığının yükselişe geçtiği zamandan sonrası dikkate alınarak lineer bölge belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Deney 1: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği

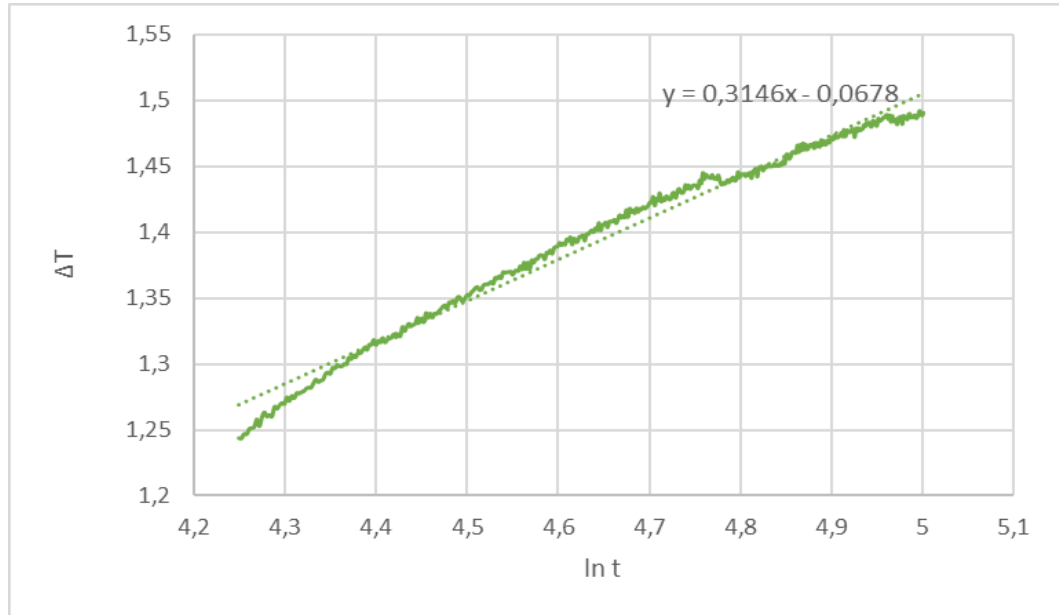
Şekil 4.2’de ise Şekil 4.1’de bulunan grafiğin verileri kullanılmıştır. Önceki grafikte, lineer bölgenin zamanı belirlendikten sonra ilgili zaman diliminin doğal logaritmasına karşılık gelen aralıkta, $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin eğimi tespit edilmiştir. $k = \left[\frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \right] \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$ denkleminde görüleceği üzere $(\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln(t_2/t_1)$ eğime karşılık

gelmektedir. (Bu grafikte, zamanın doğal logaritması $\ln(t)$ alınarak elde edilen değerler kullanılmıştır.)



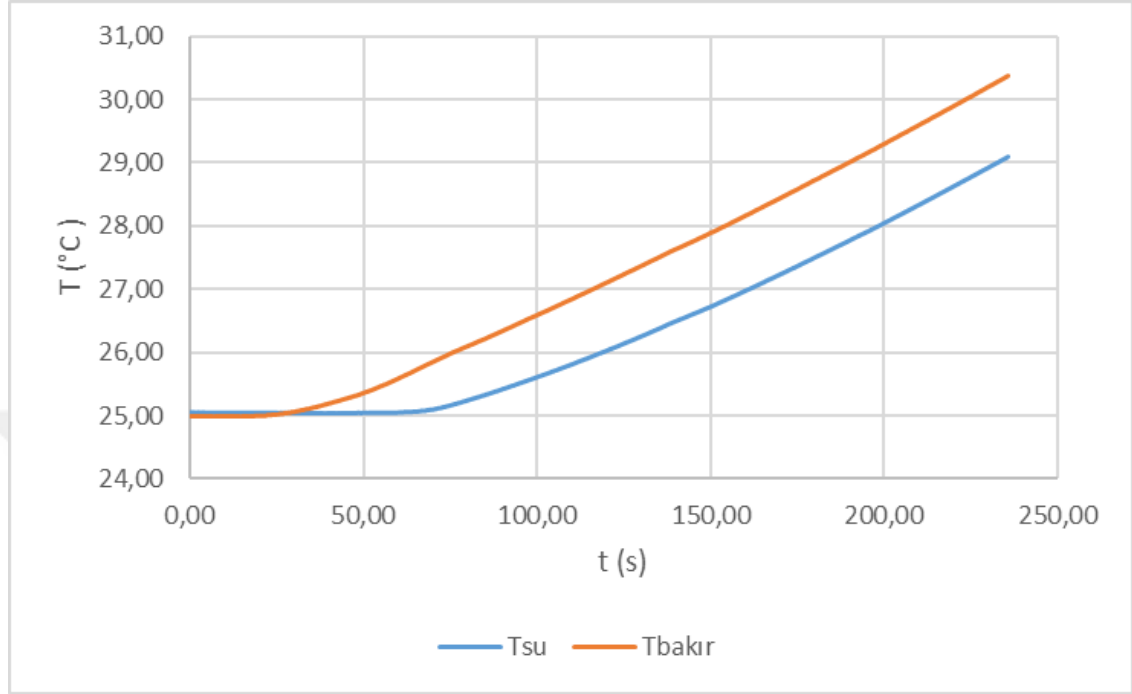
Şekil 4.2. Deney 1: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği

Şekil 4.3'te ise, Şekil 4.2'de kırmızı ile belirtilen bölgenin grafiği çizdirilmiştir. Bu grafik, Eşitlik (2.4)'te kullanacak olduğumuz eğim değeri için gerek duyulmuştur. Grafik üzerinden de görüleceği üzere denklem için ihtiyaç duyulan eğim ($m=0,3146$) olarak elde edilmiştir. Elde edilen eğim, Eşitlik (2.4)'te yerine koyulmuş ve deney 1 için ısıl iletkenlik değeri $k = 0,627 \text{ W/mK}$ olarak hesaplanmıştır.

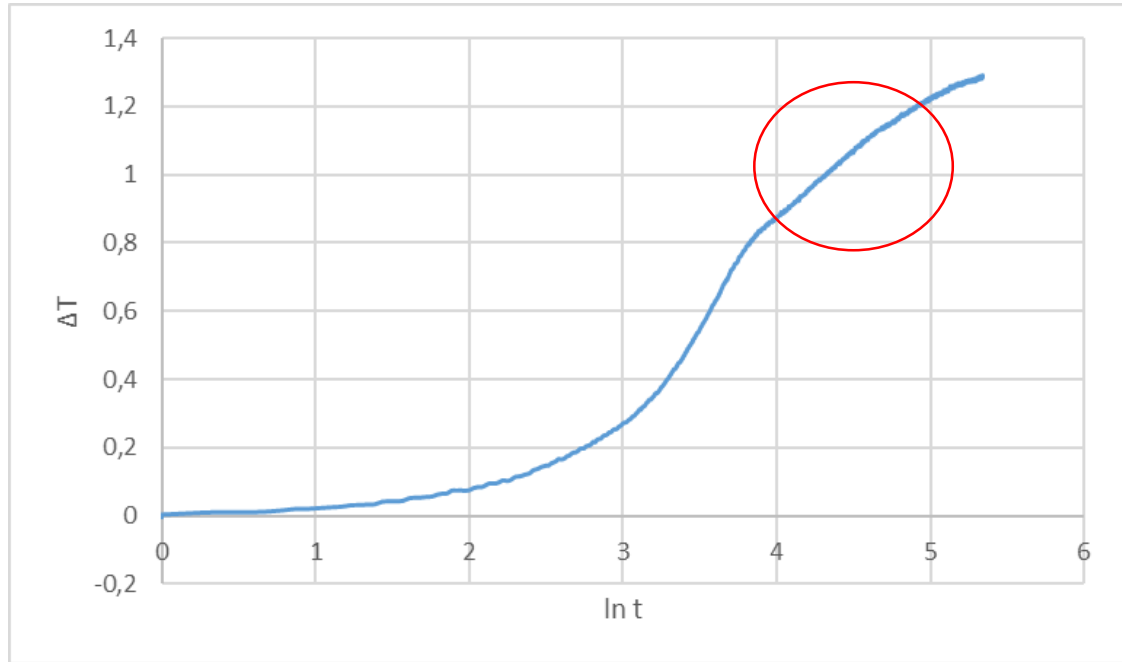


Şekil 4.3. Deney 1: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi

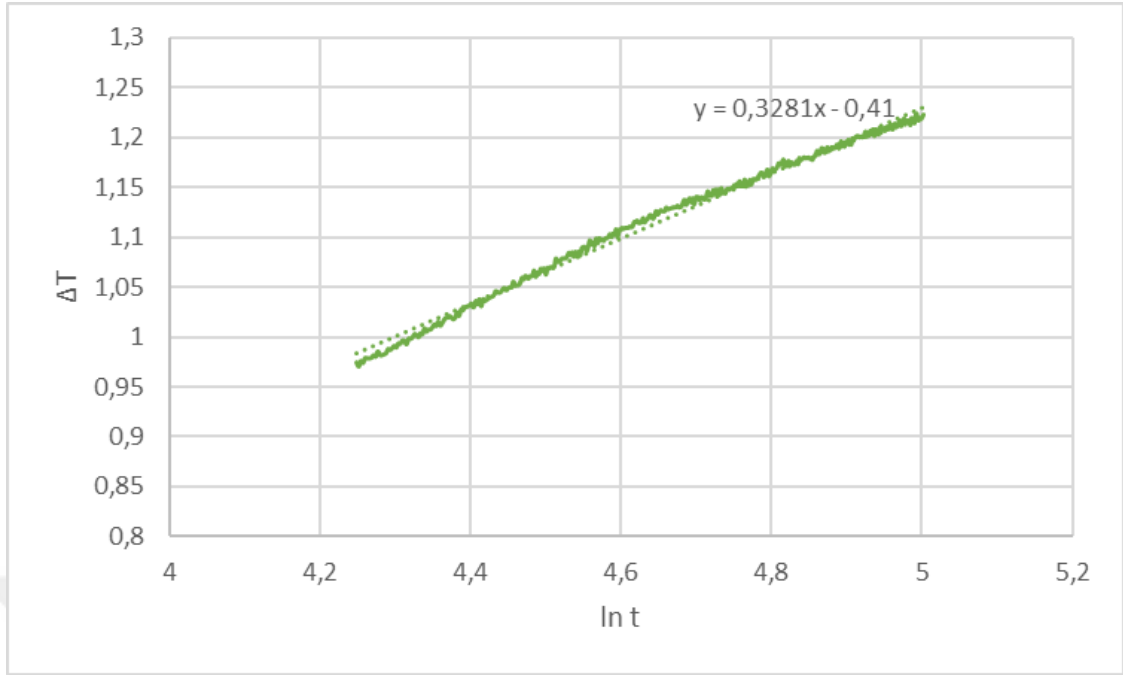
Aşağıdaki Şekil 4.4 -Şekil 4.15 arasındaki şekiller, deiyonize su için yapılan diğer 4 deneyin sonuçlarıdır. Aynı parametrelerle ve hesaplama yöntemleri ile ısı iletkenlik değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.



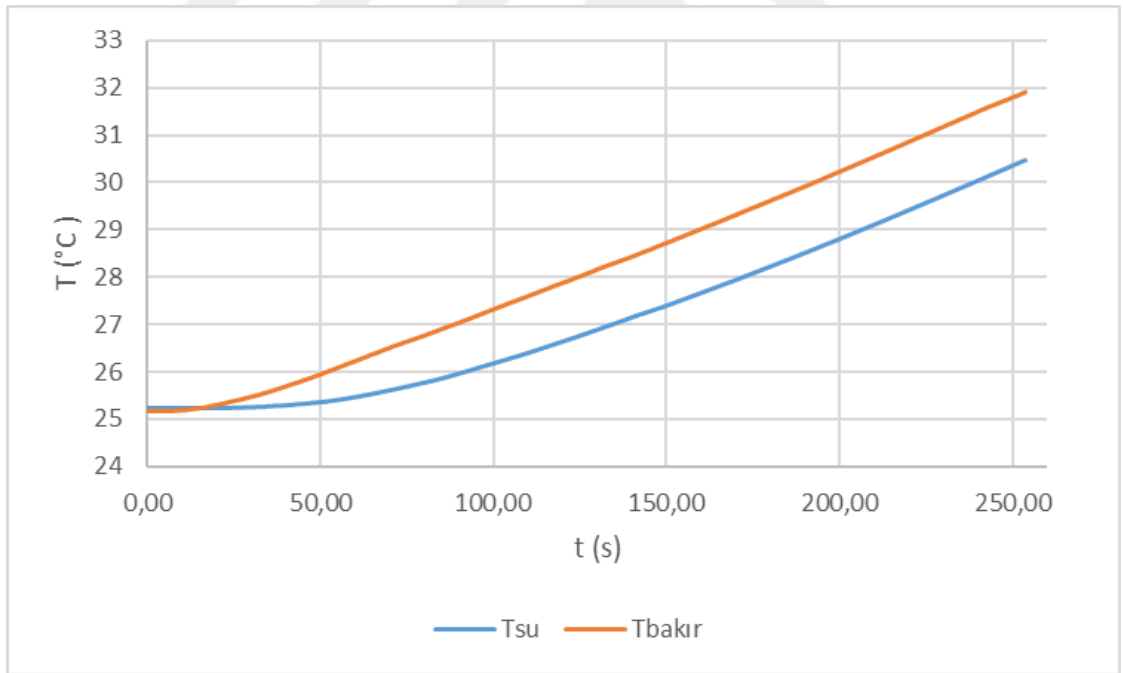
Şekil 4.4. Deney 2: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği



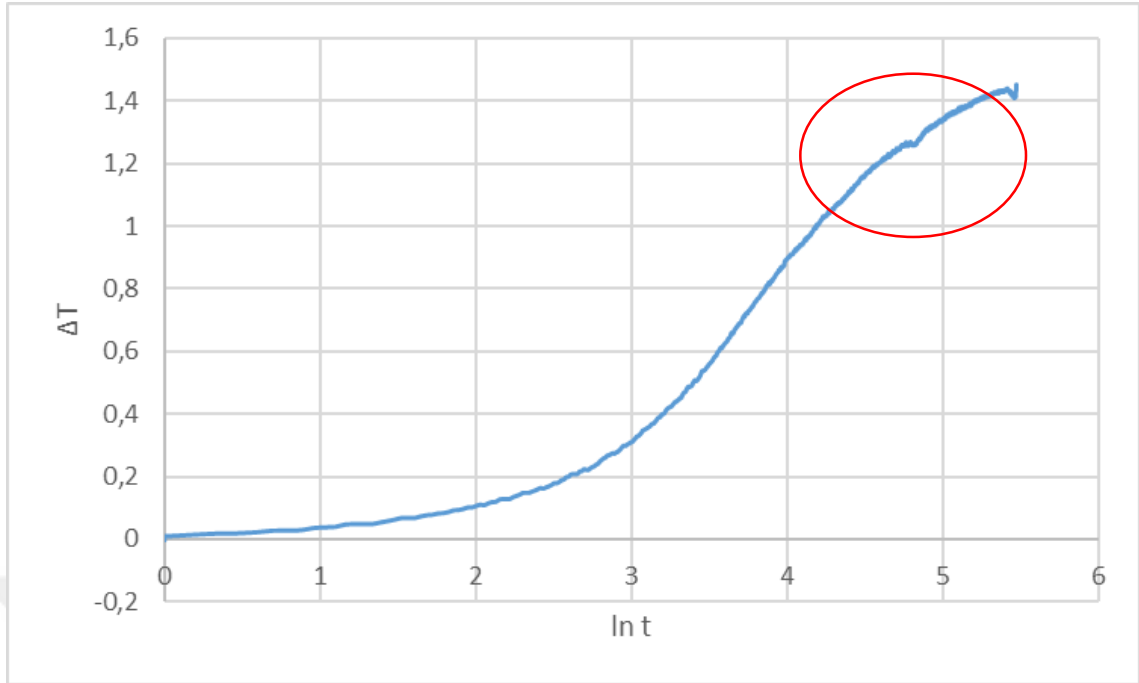
Şekil 4.5. Deney 2: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği



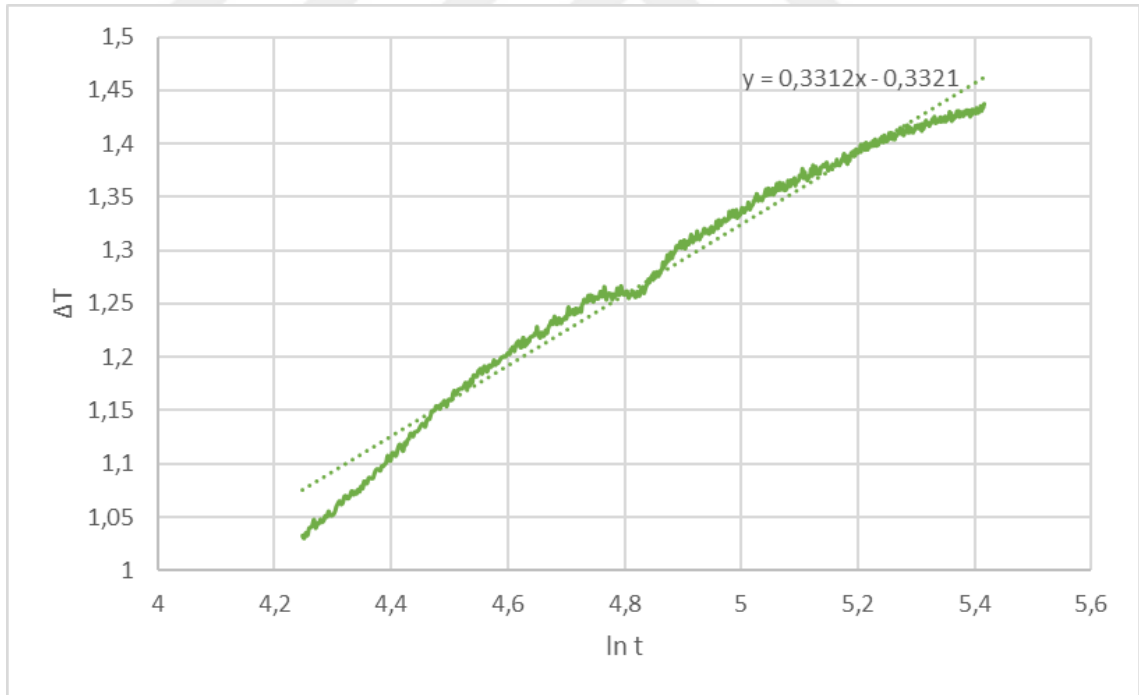
Şekil 4.6. Deney 2: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



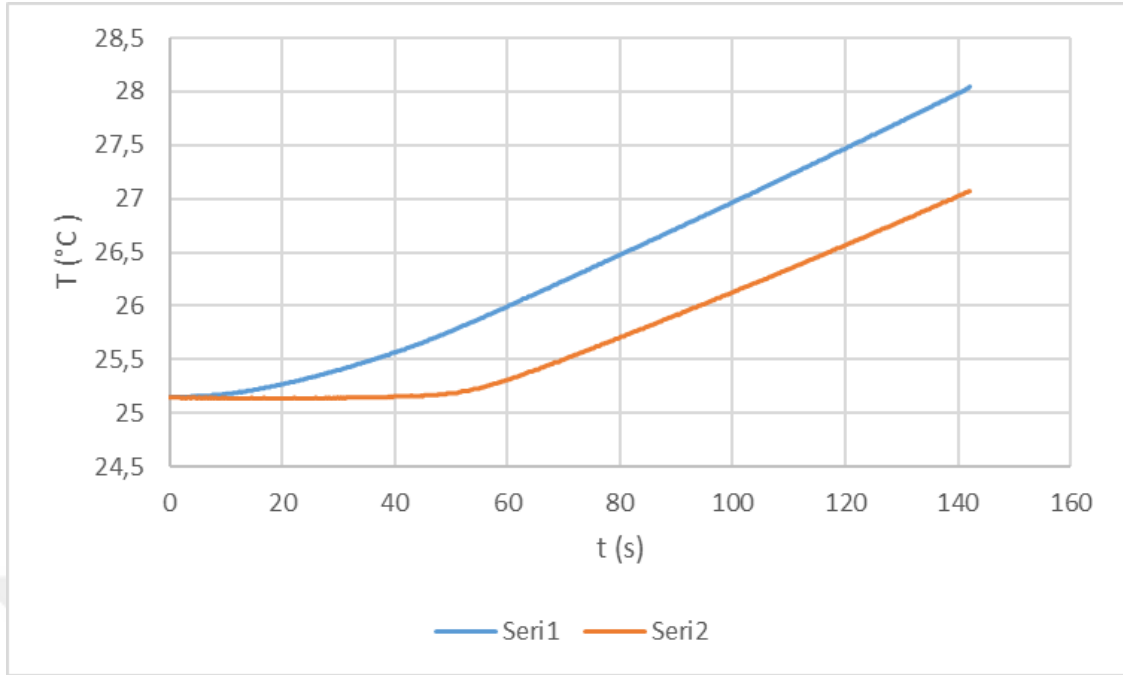
Şekil 4.7. Deney 3: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği



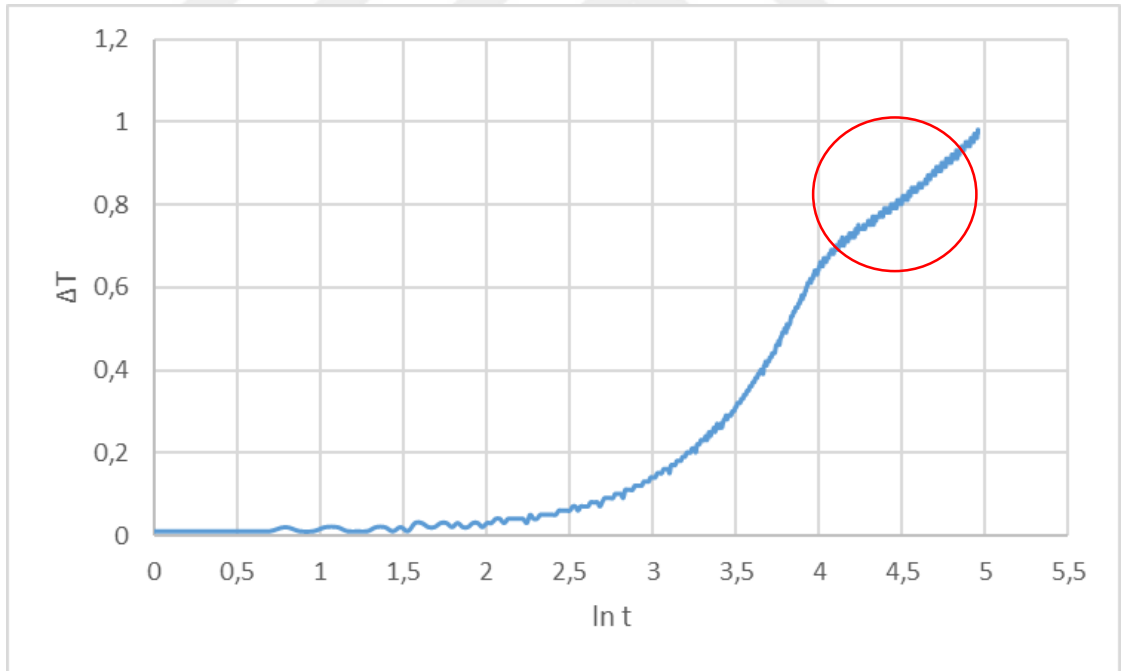
şekil 4.8. Deney 3: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği



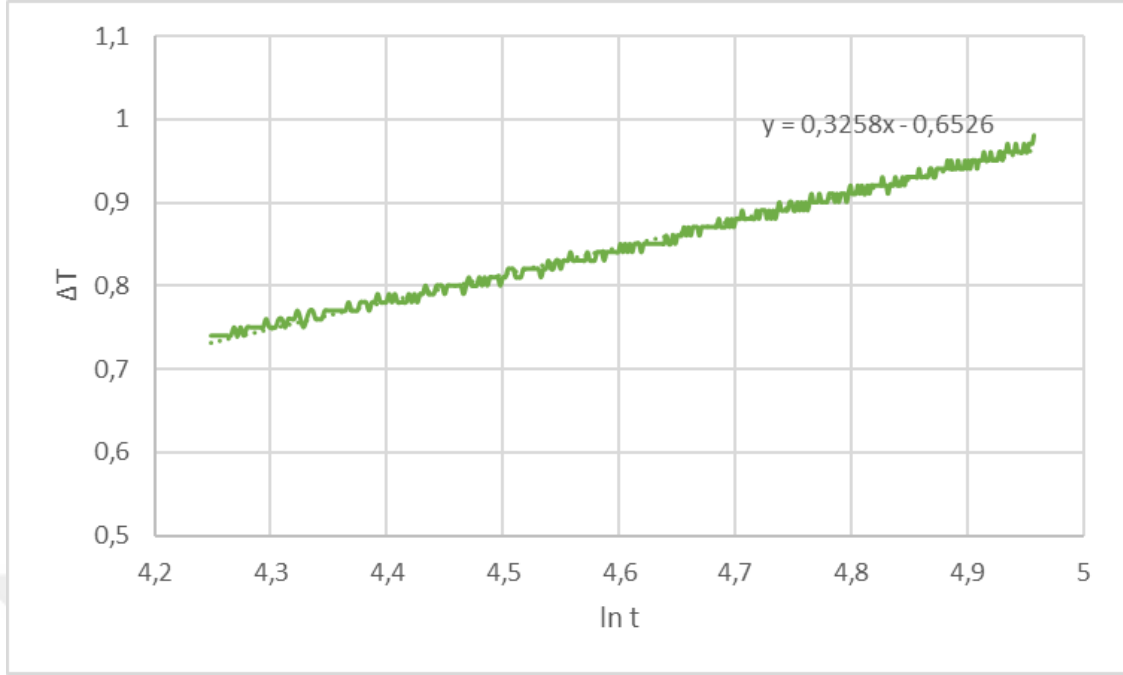
şekil 4.9. Deney 3: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



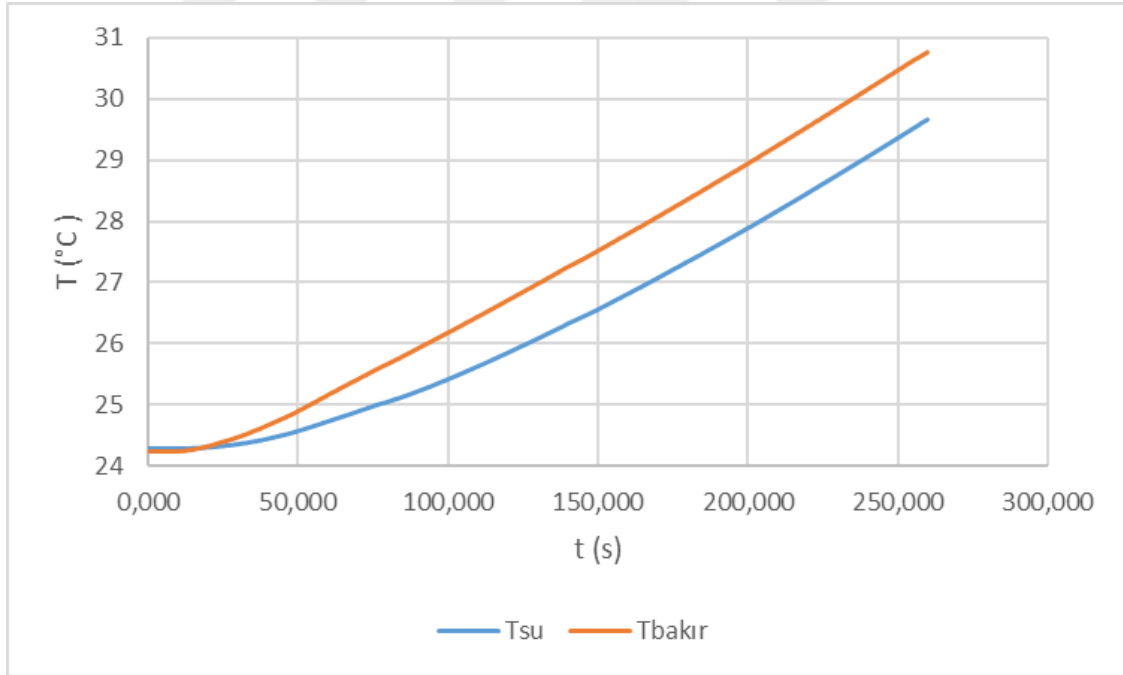
Şekil 4.10. Deney 4: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği



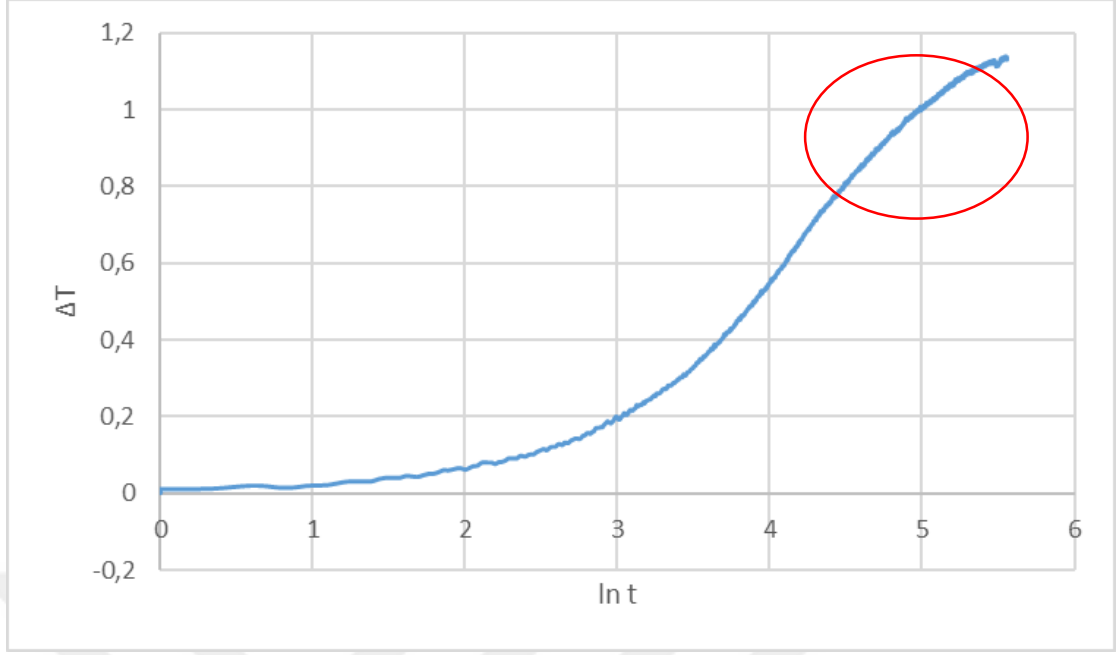
Şekil 4.11. Deney 4: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği



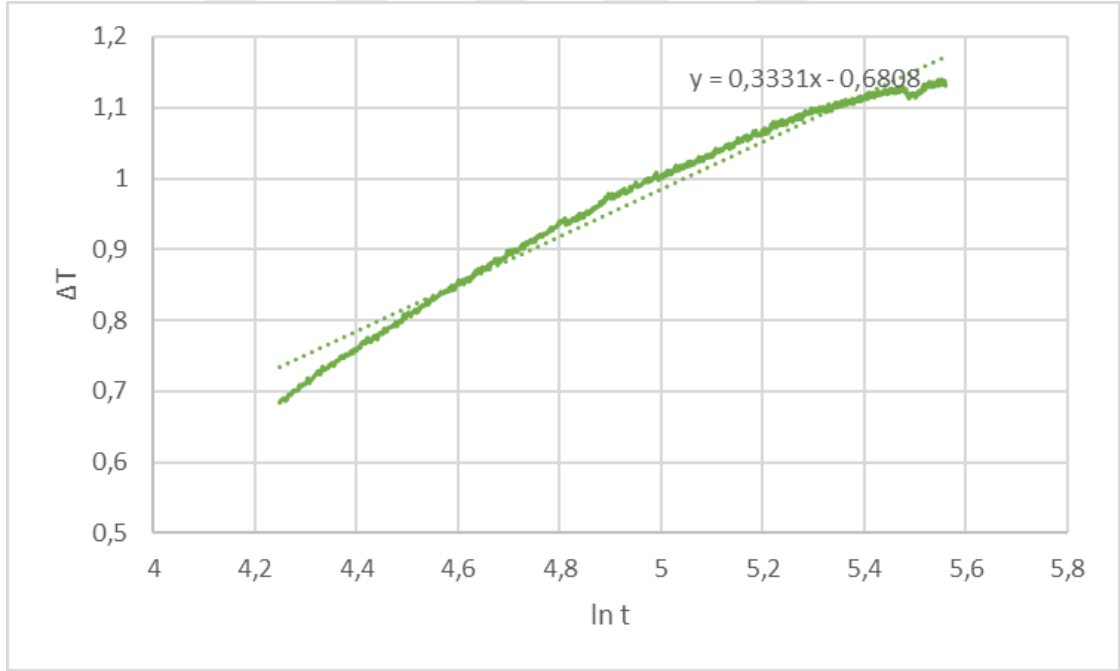
Şekil 4.12. Deney 4: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



Şekil 4.13. Deney 5: Bakır iç yüzeyi ile deiyonize suyun sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 4.14. Deney 5: $\Delta T - \ln(t)$ grafiği



Şekil 4.15. Deney 5: $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi

Deiyonize su ile gerçekleştirilen beş tekrar sonrasında, ısı iletkenlik değerleri ve hata payını hesaplamak amacıyla Çizelge 4.1 oluşturulmuştur. Bu hesaplamada ısı iletkenlik değeri, $k = \left[\frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \right] \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$ eşitliği kullanılarak bulunmuştur. Grafiklerde

belirtilmiş olan eğim değerleri $m = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$ eşitliğine denk geldiği için Eşitlik (2.4) $k = \left(\frac{q}{4\pi m}\right)$ bu şekilde türetilir.

- k : Isıl iletkenlik (W/mK)
 l : Isıtıcı rezistansın temas çizgisi (m)
 q : Isıtıcı telin temas uzunluk başına ısı enerjisi (W/m)
 ΔT_2 : t_2 zamanında bakır boru ve akışkanın arasındaki sıcaklık farkı (°C)
 ΔT_1 : t_1 zamanında bakır boru ve akışkanın arasındaki sıcaklık farkı (°C)
 t_2 : Eğim için belirlenen bitiş zamanı (s)
 t_1 : Eğim için belirlenen başlangıç zamanı (s)
 η : Verim

Çizelge 4.1. SBT yöntemi ile deiyonize suyun ısı iletkenlik değerleri ve bağlı hataları

Deney No	Gerilim (V)	I (A)	Q (W)	L (m)	Verim (η)	q (W/m)	Eğim (m)	k (W/mK)	Hata %
1	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3146	0,627	1,7
2	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3281	0,601	2,5
3	25	0,65	16,26	1,64	0,25	2,4771	0,3312	0,595	3,4
4	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3258	0,605	1,8
5	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3331	0,592	3,9
							k_{gerçek} k_{ort,hata}	0,616 %2,66	W/mK W/mK

4.1.2. Deneysel çalışmanın belirsizlik analizi

Deiyonize su ile yapılan deneylerde, bağımsız değişkenlerden dolayı ortaya çıkan hatalarını bulmak için, bağımsız değişkenleri olan bir R fonksiyonu Eşitlik (4.1)'de tanımlanmıştır.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

Isıl iletkenliğin tayini için Eşitlik (2.4)'te verilen $k = \left[\frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \right] \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$ fonksiyon, Eşitlik (4.1)'de yerine yazılırsa;

$$\frac{W_R}{k} = \left[\left(\frac{w_q}{q} \right)^2 + \left(-\frac{w_{\Delta T_2}}{\Delta T_2 - \Delta T_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta T_1}}{\Delta T_2 - \Delta T_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{t_2}}{t_2 \ln \frac{t_2}{t_1}} \right)^2 + \left(-\frac{w_{t_1}}{t_1 \ln \frac{t_2}{t_1}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

Çizelge 4.2. Deney 1'in bağımsız değerlerinin belirsizliği

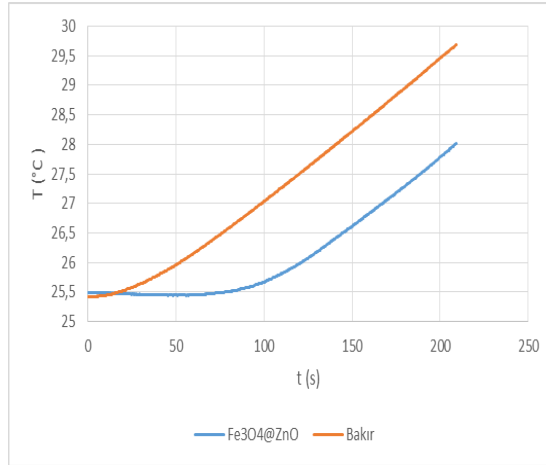
q (W/m)	ΔT_2 (°C)	ΔT_1 (°C)	t_2 (s)	t_1 (s)
$2,4771 \pm 0,1640$	$1,3 \pm 0,5$	$0,87 \pm 0,5$	$148,6 \pm 0,001$	$70 \pm 0,001$

$$\frac{W_R}{k} = 0,03372 = \%3,37$$

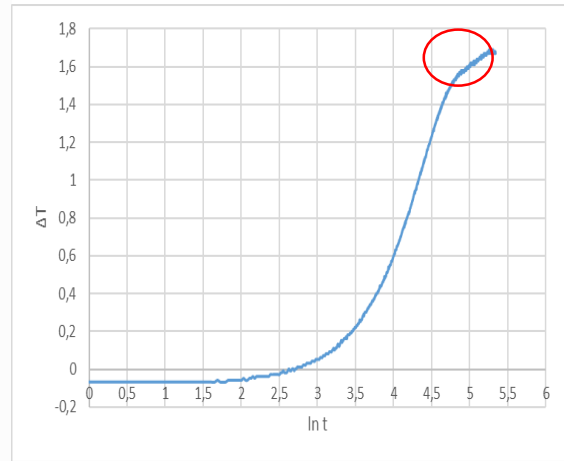
4.1.3. Fe₃O₄@ZnO-H₂O nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümü

Deney düzeneğinin, deiyonize su kullanarak elde edilen ısı iletim katsayısı sonuçlarını literatürdeki değerleriyle karşılaştırdıktan sonra, Fe₃O₄@ZnO nanopartiküllerinin ısı iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Ölçüm sırasında nanopartiküllerin çökme ve topaklanma sorunları, sonuçların güvenilirliğini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu problemler nedeniyle art arda gerçekleştirilen deneylerde birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sorunun ortadan kaldırılması adına deney öncesinde nanopartiküller karıştırıldıktan belirli bir süre sonrasında dikkatli bir şekilde gözlemlenerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler arasında birbirine en yakın sonuçları veren deneylerle ısı iletkenlik hesaplanmıştır.

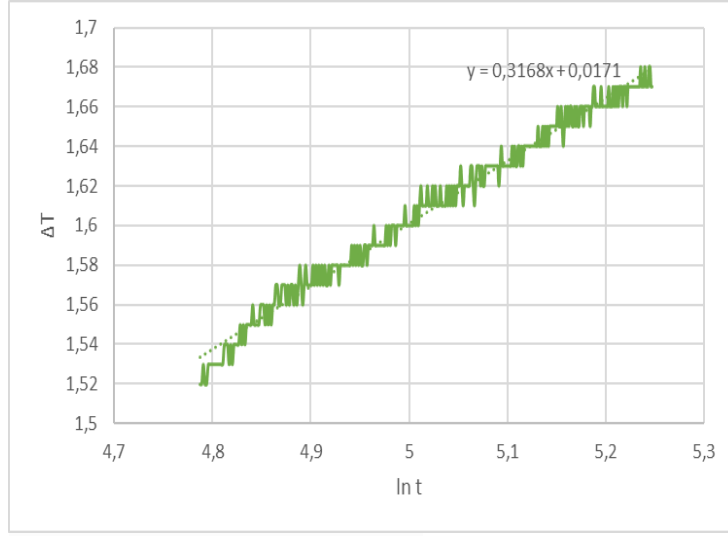
Aşağıda, nanoakışkan ölçüm sonuçlarından elde edilen bakırın iç yüzey sıcaklığı ile nanoakışkanın zamana bağlı sıcaklık değişimini gösteren (T-t) grafiği, bakırın iç yüzey sıcaklığı ile nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkının, zamanın doğal fonksiyonu olarak değişimini gösteren (ΔT -ln t) grafiği ve bu grafiğin lineer kısmının eğim değerini veren (ΔT -ln t) grafikleri verilmiştir. Tekrarlanan 3 farklı deneyin grafikleri sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de sunulmuştur.



(a)

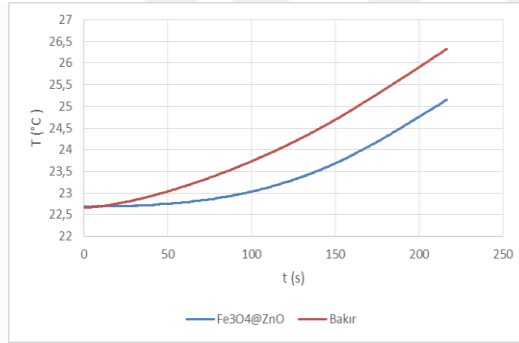


(b)

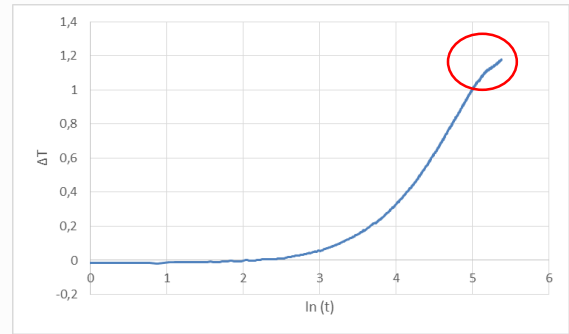


(c)

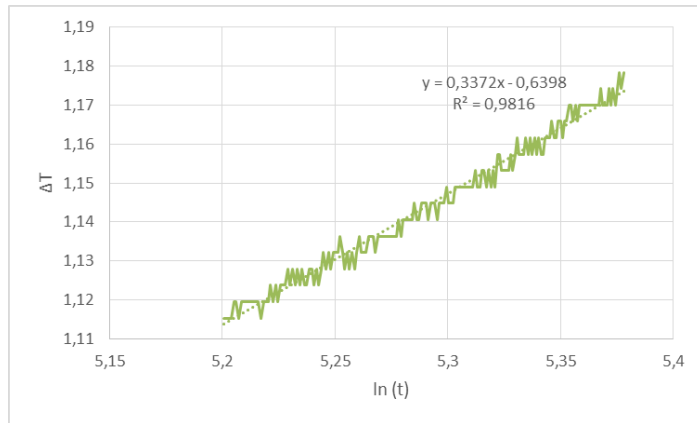
Şekil 4.16. Deney 1 - Fe₃O₄@ZnO grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Fe₃O₄@ZnO sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Fe₃O₄@ZnO nanopartikülünün ΔT – ln(t) grafiği; c) ΔT – ln(t) grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

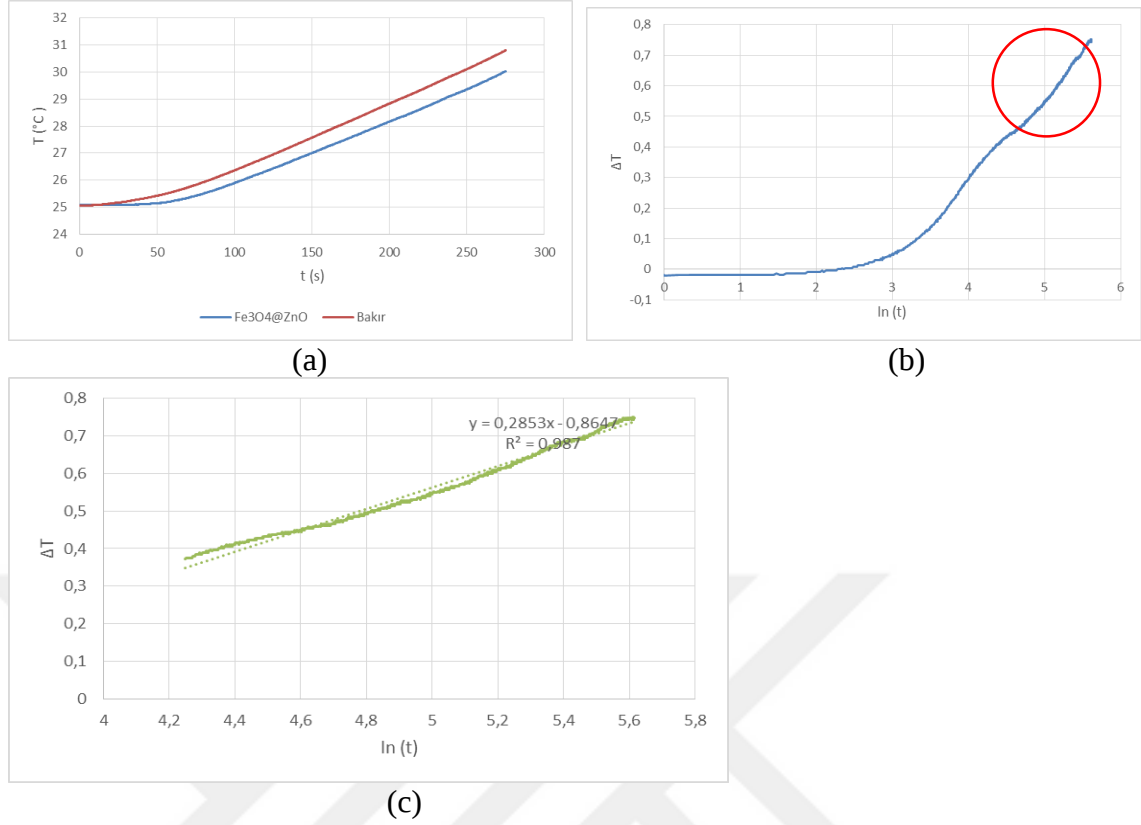


(b)



(c)

Şekil 4.17. Deney 2 - Fe₃O₄@ZnO grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Fe₃O₄@ZnO sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Fe₃O₄@ZnO nanopartikülünün ΔT – ln(t) grafiği; c) ΔT – ln(t) grafiğinin lineer kısmının eğimi



Şekil 4.18. Deney 3 - $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi

Çizelge 4.3'te, Tekrarlanan 3 farklı deneyden elde edilen eğimlerin değeri kullanılarak, Eşitlik (2.4)'te yerine yerleştirilmiş ve nanoakışkanın ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. SBT yöntemi ile $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikülünün ısı iletkenlik değeri

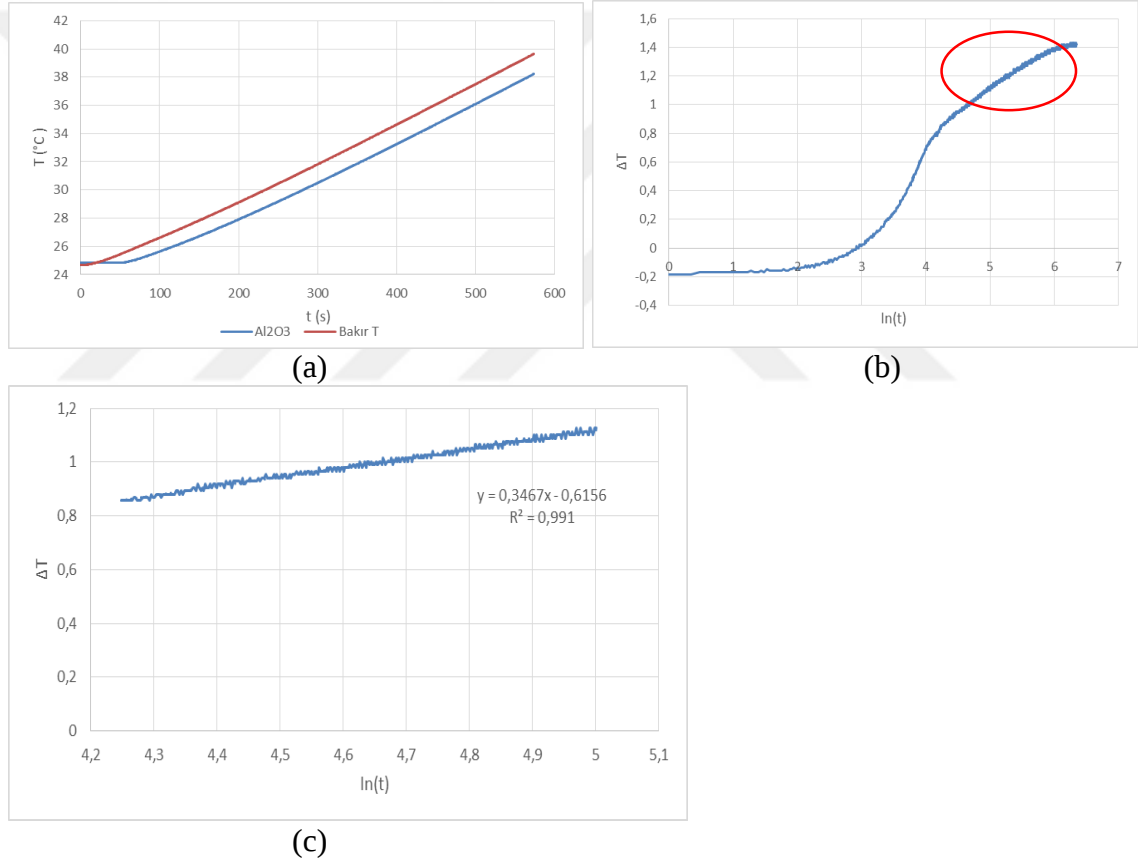
Gerilim (V)	I (A)	Q (W)	L (m)	Verim (η)	q (W/m)	Eğim	k (W/mK)	Hata %
25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3168	0,622	1,58
25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3372	0,585	7,44
25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,2853	0,691	9,34
						k_{THW} k_{ort,hata}	0,632 %6,12	W/mK W/mK

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ - H_2O nanoakışkanının ısı iletkenlik değeri, önceden THW yöntemi ile ölçümü gerçekleştirilmiş ısı iletkenlik değeri ile karşılaştırıldı ve yapılan deneylerde ortalama hata THW'ye göre %6,12 olarak ölçülmüştür. Deiyonize suyu referans olarak yapılan ölçümlerde tespit edilen ortalama bağıl hata %2,66'dır.

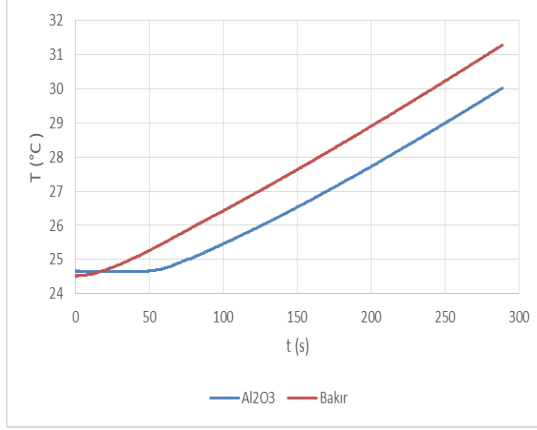
4.1.4. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümü

Silindirik bakır tüp yöntemi kullanılarak, aynı parametreler altında Al_2O_3 nanopartikül katkılı bir nanoakışkanın ısı iletkenlik özellikleri incelenmiştir. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO-H}_2\text{O}$ nanoakışkanına kıyasla daha kararlı bir yapıda sentezlendiği gözlemlenmiştir. Ölçümlerde, başlangıç ve bitiş parametrelerinin mümkün olduğunca aynı şartlarda tutulması ve deneylerin ardışık bir şekilde gerçekleştirilmesi, sonuçların güvenilirliğini artıran önemli faktörler arasında yer almaktadır.

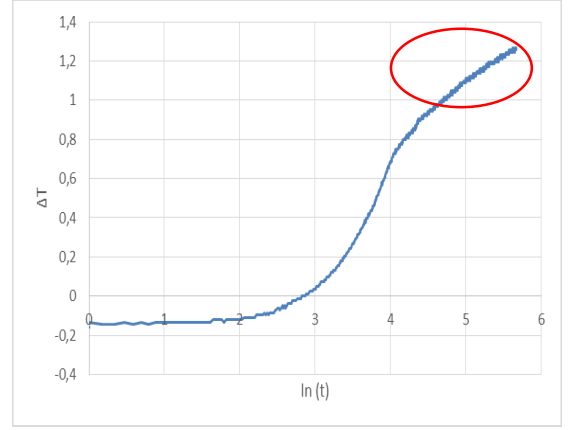
Aşağıda, nanoakışkan ölçüm sonuçlarından elde edilen bakırın iç yüzey sıcaklığı ile nanoakışkanın zamana bağlı sıcaklık değişimini gösteren (T-t) grafiği, bakırın iç yüzey sıcaklığı ile nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkının zamanın doğal fonksiyonu olarak değişimini gösteren ($\Delta T\text{-ln } t$) grafiği ve bu grafiğin lineer kısmının eğim değerini veren ($\Delta T\text{-ln } t$) grafikleri verilmiştir. Tekrarlanan 5 farklı deneyin grafikleri sırasıyla Şekil 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23'te sunulmuştur.



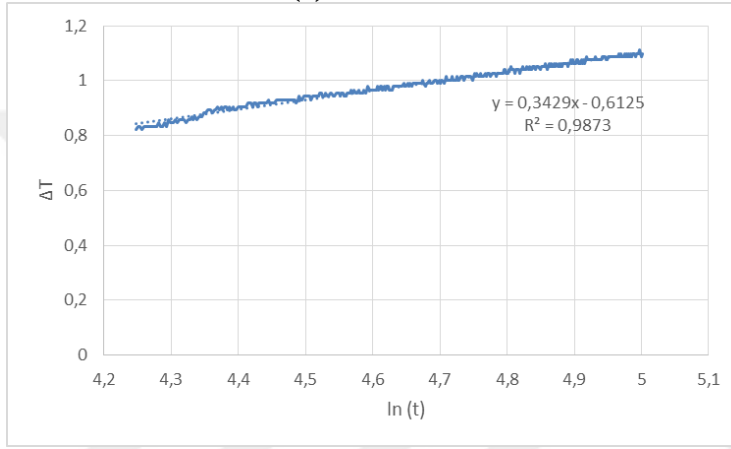
Şekil 4.19. Deney 1 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

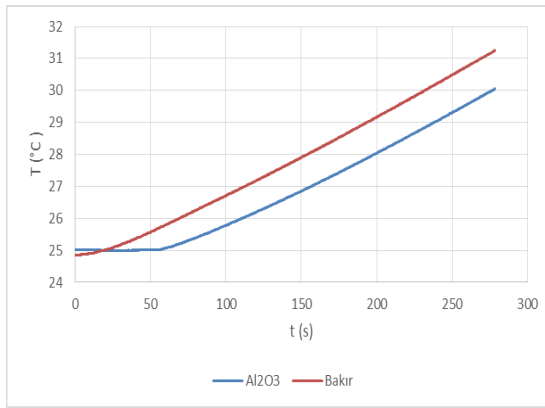


(b)

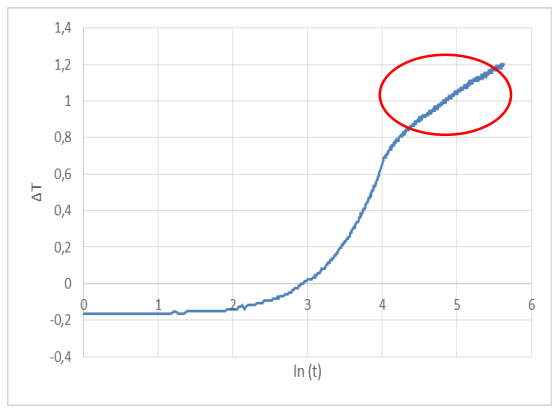


(c)

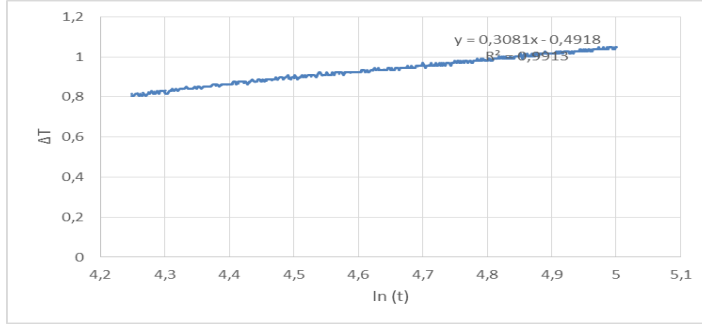
Şekil 4.20. Deney 2 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

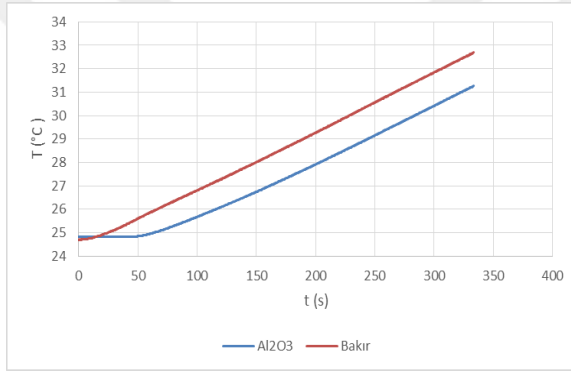


(b)

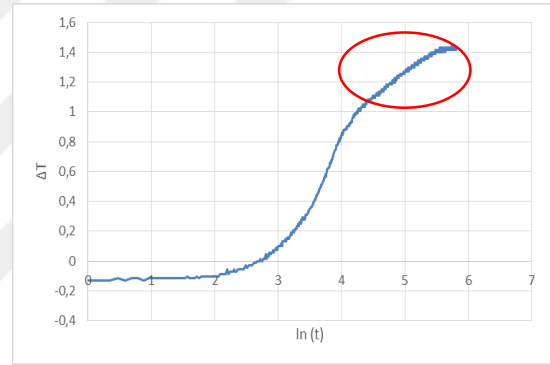


(c)

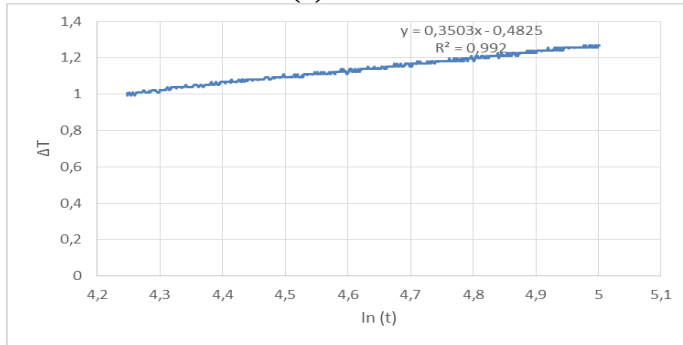
Şekil 4.21. Deney 3 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

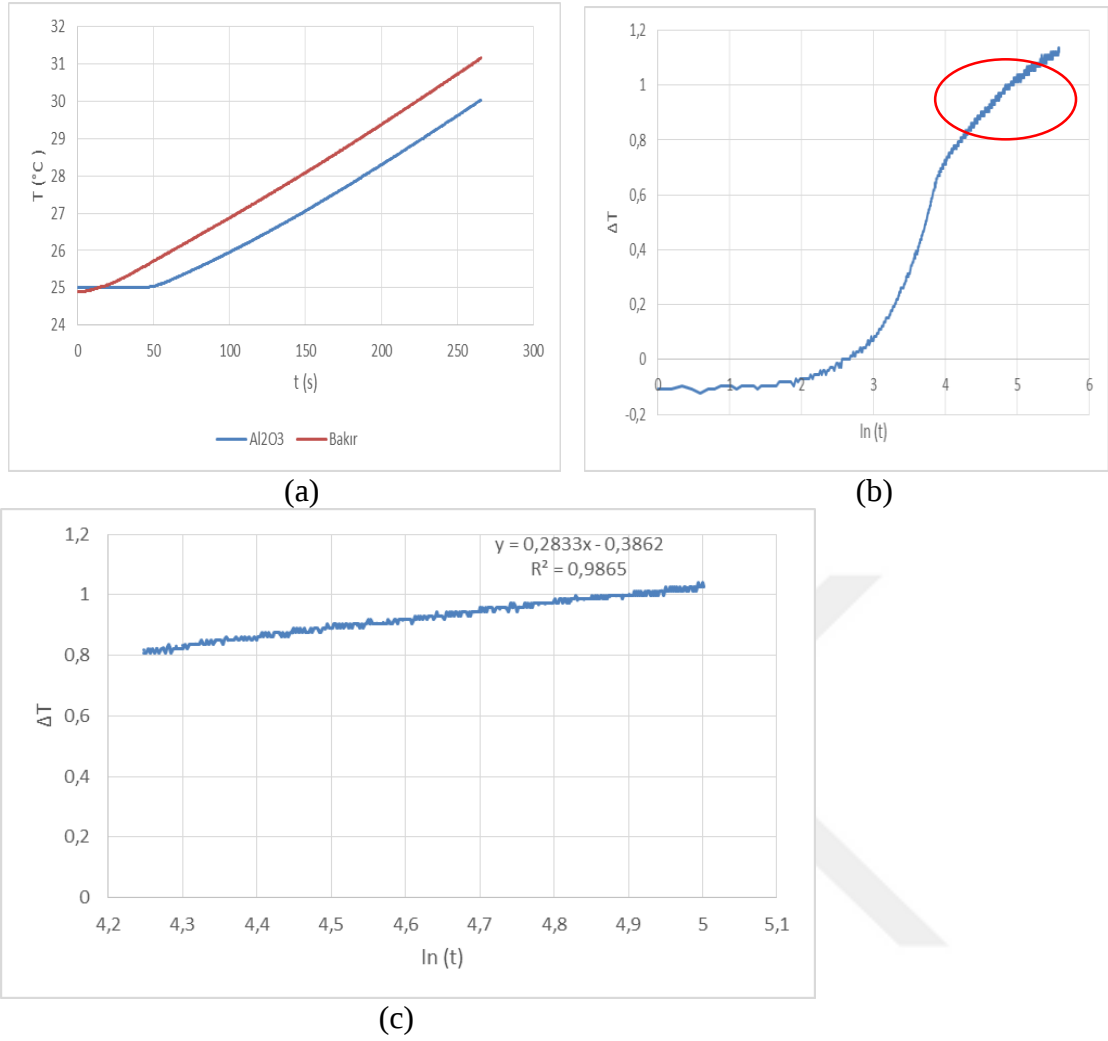


(b)



(c)

Şekil 4.22. Deney 4 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



Şekil 4.23. Deney 5 – Al_2O_3 grafikleri: a) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 sıcaklık-zaman grafiği; b) Bakır iç yüzeyi ile Al_2O_3 nanopartikülünün $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi

Çizelge 4.4. SBT yöntemi Al_2O_3 ısı iletkenlik değerleri ve bağıl hataları

Deney No	Gerilim (V)	I (A)	Q (W)	L (m)	Verim (η)	q (W/m)	Eğim	k (W/mK)	Hata %
1	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3467	0,569	4,75
2	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3429	0,575	3,73
3	25	0,65	16,26	1,64	0,25	2,4771	0,3081	0,640	7,32
4	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,3503	0,563	5,74
5	25	0,65	16,25	1,64	0,25	2,4771	0,2833	0,696	16,52
							k_{THW} $k_{ort,hata}$	0,5973 %7,61	W/mK

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının ısı iletkenlik değeri, önceden THW yöntemi ile ölçümü gerçekleştirilmiş ısı iletkenlik değeri ile karşılaştırıldı ve yapılan deneylerde

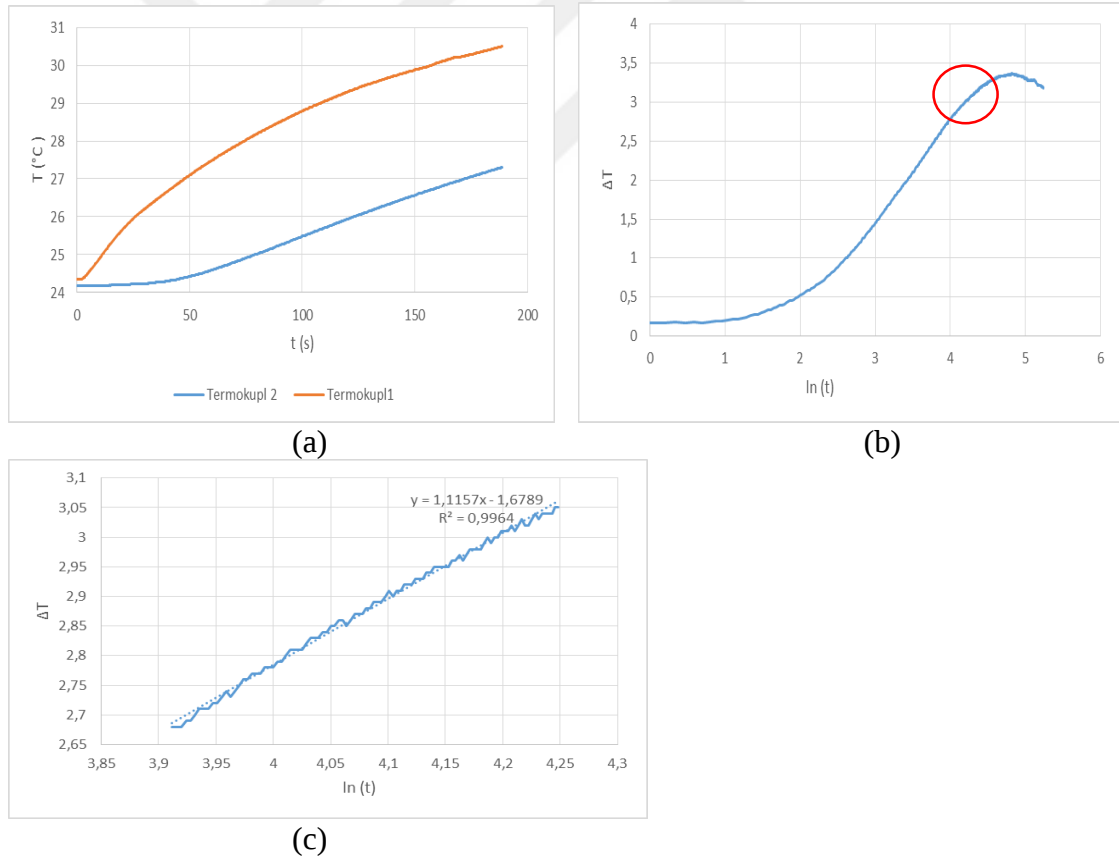
ortalama hata THW'ye göre %7,61 olarak ölçülmüştür. Deiyonize suyu referans alarak yapılan ölçümlerde tespit edilen ortalama bağıl hata %2,66'dır.

4.2. Geçici Rejimde Sıcak Tel Yöntemi

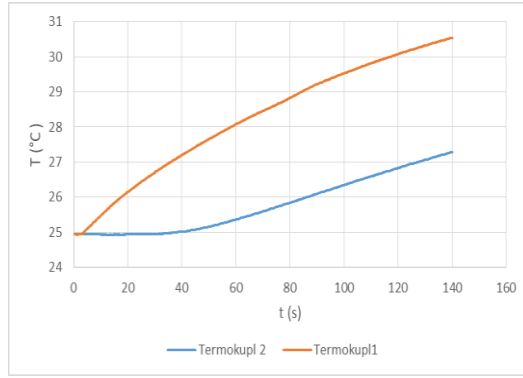
4.2.1. Deiyonize suyun ısı iletkenlik ölçümü

Tasarlanan sıcak tel yöntemi ile hem deiyonize su hem de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının ısı iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında tele 6,4 V gerilim, 0,56 A akım uygulanmıştır. Deiyonize suyun ısı iletkenlik değeri sıcak tel yöntemi ile ölçülerek 25 °C'deki literatür değeri ile karşılaştırılmıştır. Deiyonize su, iyonlarından arındırılmış bir saf su türü olduğu için deneylerde referans akışkan olarak tercih edilmiştir.

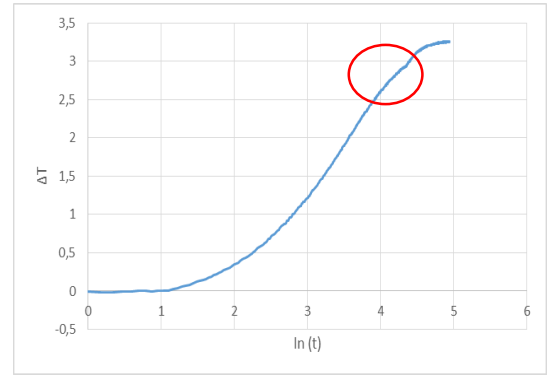
Aşağıda, deiyonize su ölçüm sonuçlarından elde edilen, sensör aparatı üzerine yerleştirilmiş farklı konumlardaki 2 sensörün zamana bağlı sıcaklık değişimini gösteren (T-t) grafiği, sensörler arasındaki sıcaklık farkının, zamanın doğal fonksiyonu olarak değişimini gösteren ($\Delta T\text{-ln } t$) grafiği ve bu grafiğin lineer kısmının eğim değerini veren ($\Delta T\text{-ln } t$) grafikleri verilmiştir. Tekrarlanan 5 farklı deneyin grafikleri sırasıyla Şekil 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28'te sunulmuştur.



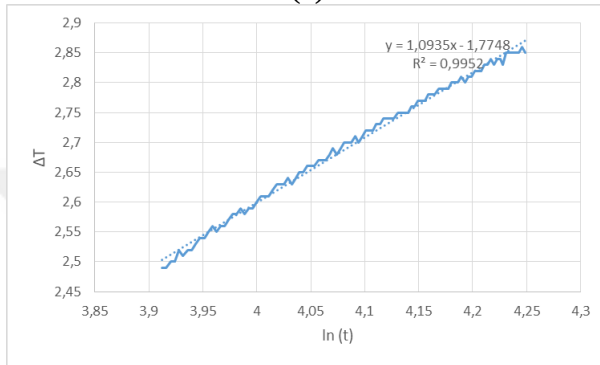
Şekil 4.24. Deney 1 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

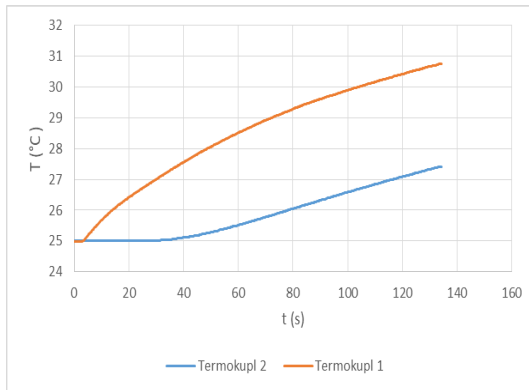


(b)

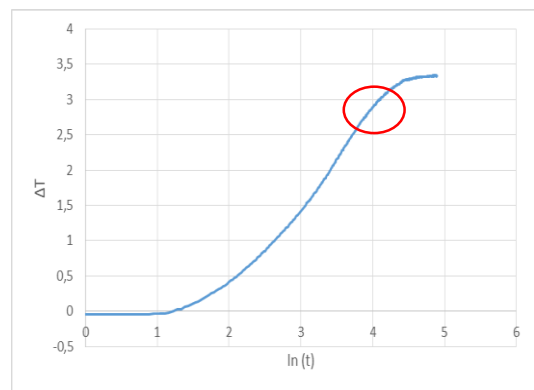


(c)

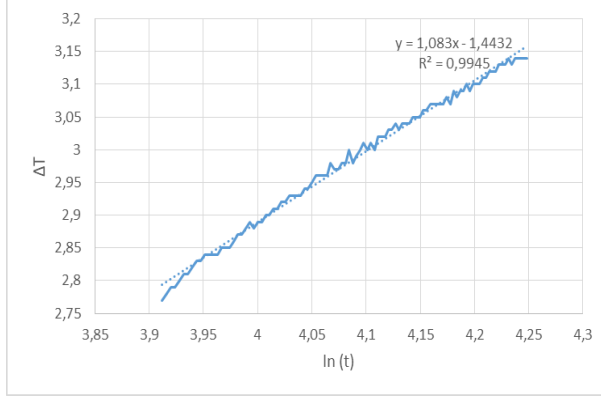
Şekil 4.25. Deney 2 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

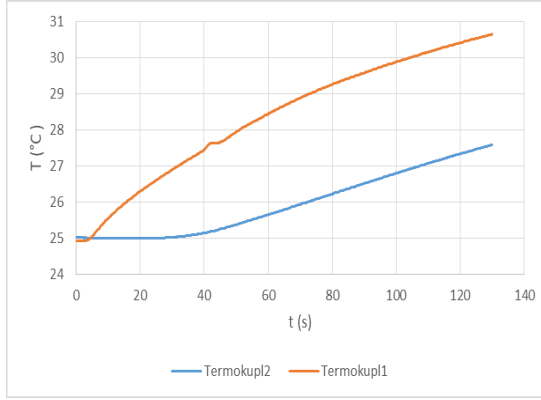


(b)

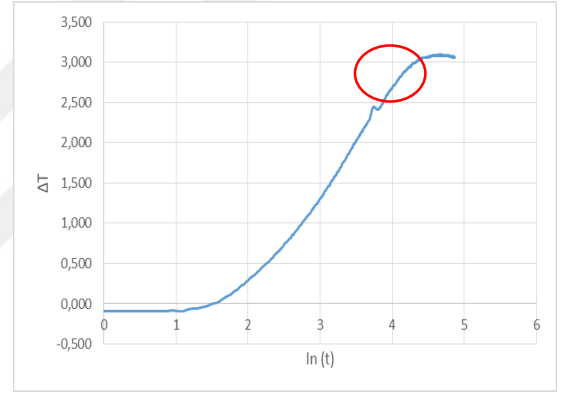


(c)

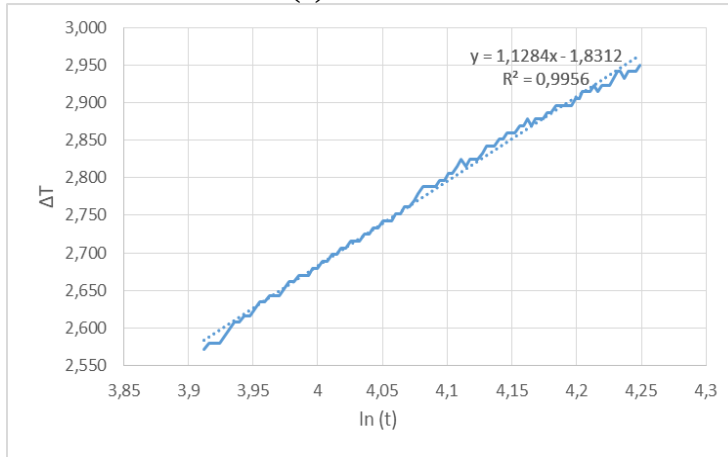
Şekil 4.26. Deney 3 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

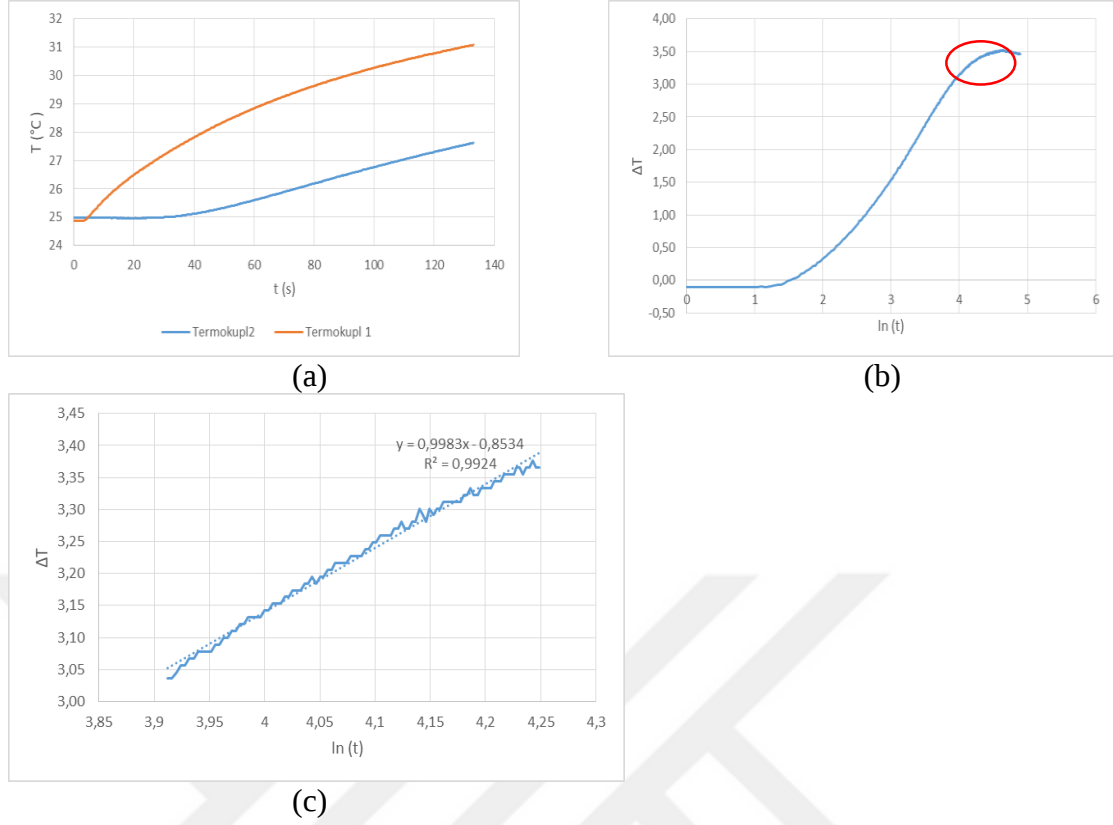


(b)



(c)

Şekil 4.27. Deney 4 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



Şekil 4.28. Deney 5 – Deiyonize Su grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi

Elde edilen sonuçlar ile ısı iletkenlik değeri, $k = \left[\frac{qx}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \right] \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$ eşitliği kullanılarak bulunmuştur.

- k : Isıl iletkenlik (W/mK)
- x : Kalibrasyon katsayısı
- q : Isıtıcı telin temas uzunluk başına ısı enerjisi (W/m)
- ΔT_2 : t_2 zamanında bakır boru ve akışkanın arasındaki sıcaklık farkı (°C)
- ΔT_1 : t_1 zamanında bakır boru ve akışkanın arasındaki sıcaklık farkı (°C)
- t_2 : Eğim için belirlenen bitiş zamanı (s)
- t_1 : Eğim için belirlenen başlangıç zamanı (s)

Deiyonize suyun ısı iletkenlik değeri, literatürdeki değeri ile karşılaştırıldı ve yapılan deneylerde ortalama hata literatüre göre %3,64 olarak ölçülmüştür.

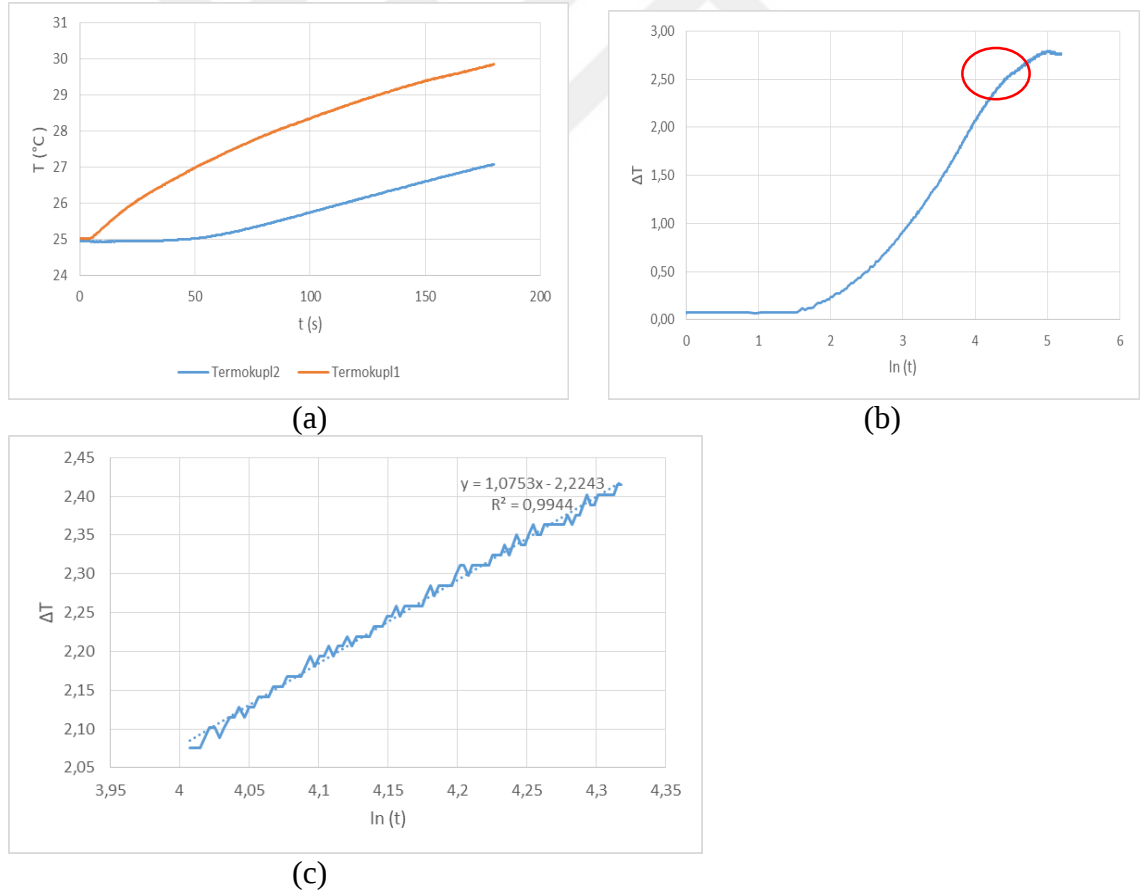
4.2.2. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümü

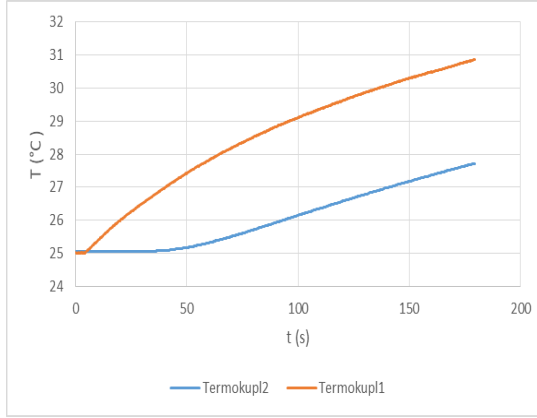
Su bazlı Al_2O_3 nanopartikül katkılı nanoakışkanın THW yöntemi kullanılarak ısı iletkenlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler esnasında platin tele 6,4 V gerilim, 0,56 A akım uygulanmıştır.

Çizelge 4.5. THW yöntemi ile deiyonize suyun ısı iletkenlik değeri ve bağıl hataları

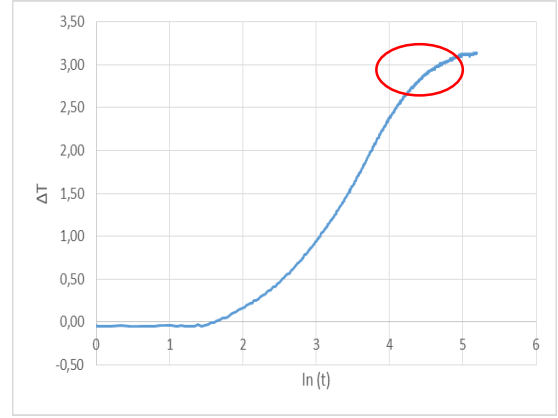
Deney No	Gerilim (V)	I (A)	Q (W)	L (m)	Katsayı (x)	q (W/m)	Eğim	k (W/mK)	Hata %
1	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,1157	0,594	3,54
2	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,0935	0,606	1,58
3	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,0830	0,612	0,63
4	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,1284	0,587	4,63
5	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	0,9983	0,664	7,80
							k_{literatür} k_{ort,hata}	0,616 %3,64	W/mK

Aşağıda, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanın ölçüm sonuçlarından elde edilen, sensör aparatı üzerine yerleştirilmiş farklı konumlardaki 2 sensörün zamana bağlı sıcaklık değişimini gösteren (T-t) grafiği, sensörler arasındaki sıcaklık farkının, zamanın doğal fonksiyonu olarak değişimini gösteren ($\Delta T\text{-ln } t$) grafiği ve bu grafiğin lineer kısmının eğim değerini veren ($\Delta T\text{-ln } t$) grafikleri verilmiştir. Tekrarlanan 5 farklı deneyin grafikleri sırasıyla Şekil 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33'te sunulmuştur.

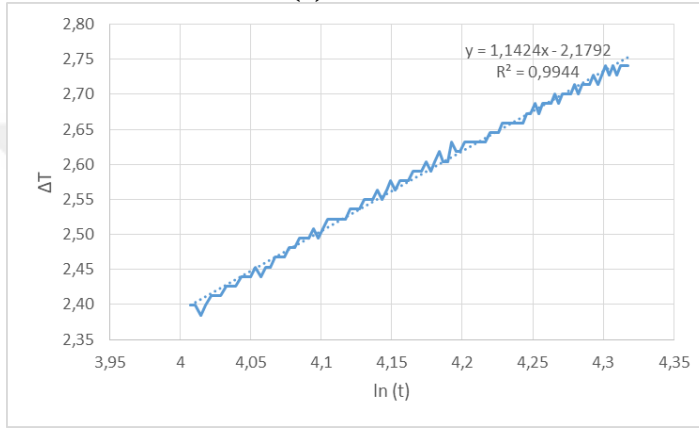
**Şekil 4.29.** Deney 1 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

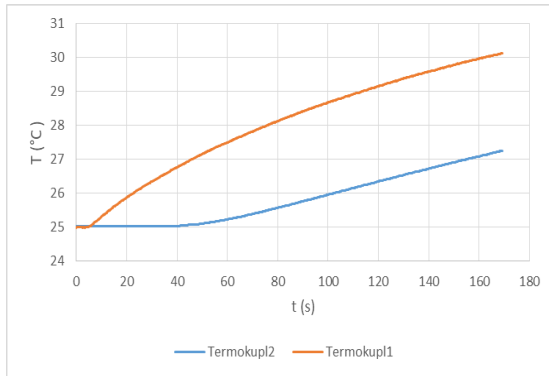


(b)

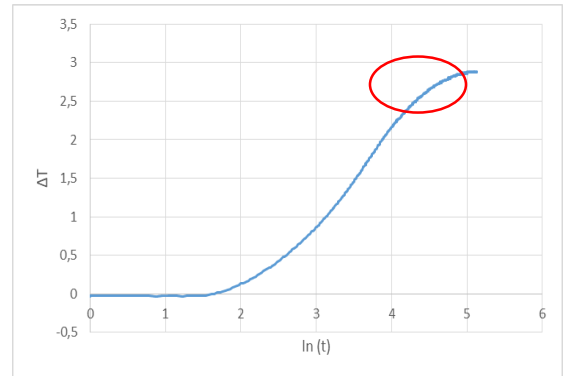


(c)

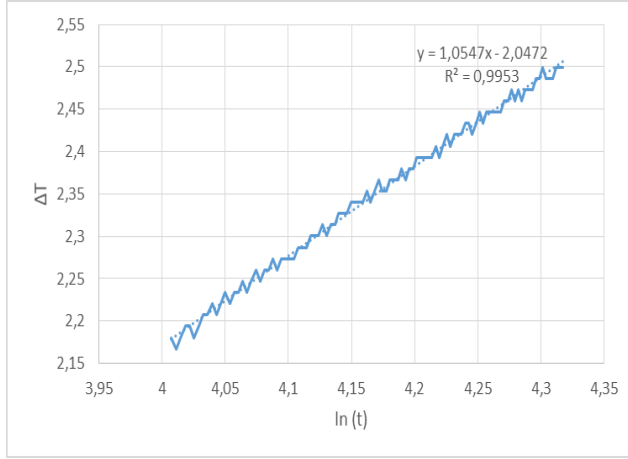
Şekil 4.30. Deney 2 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

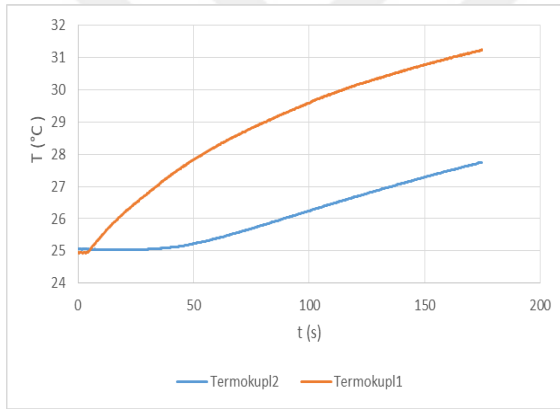


(b)

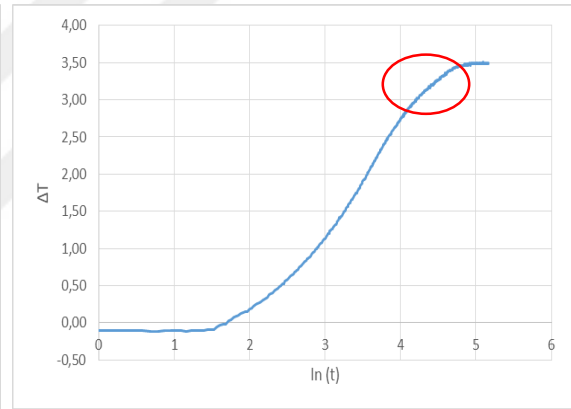


(c)

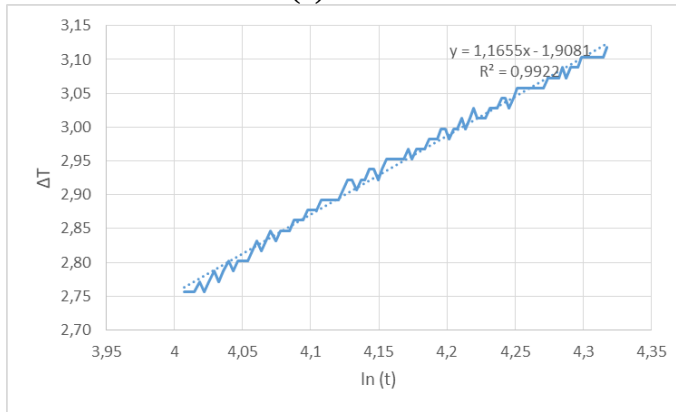
Şekil 4.31. Deney 3 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



(a)

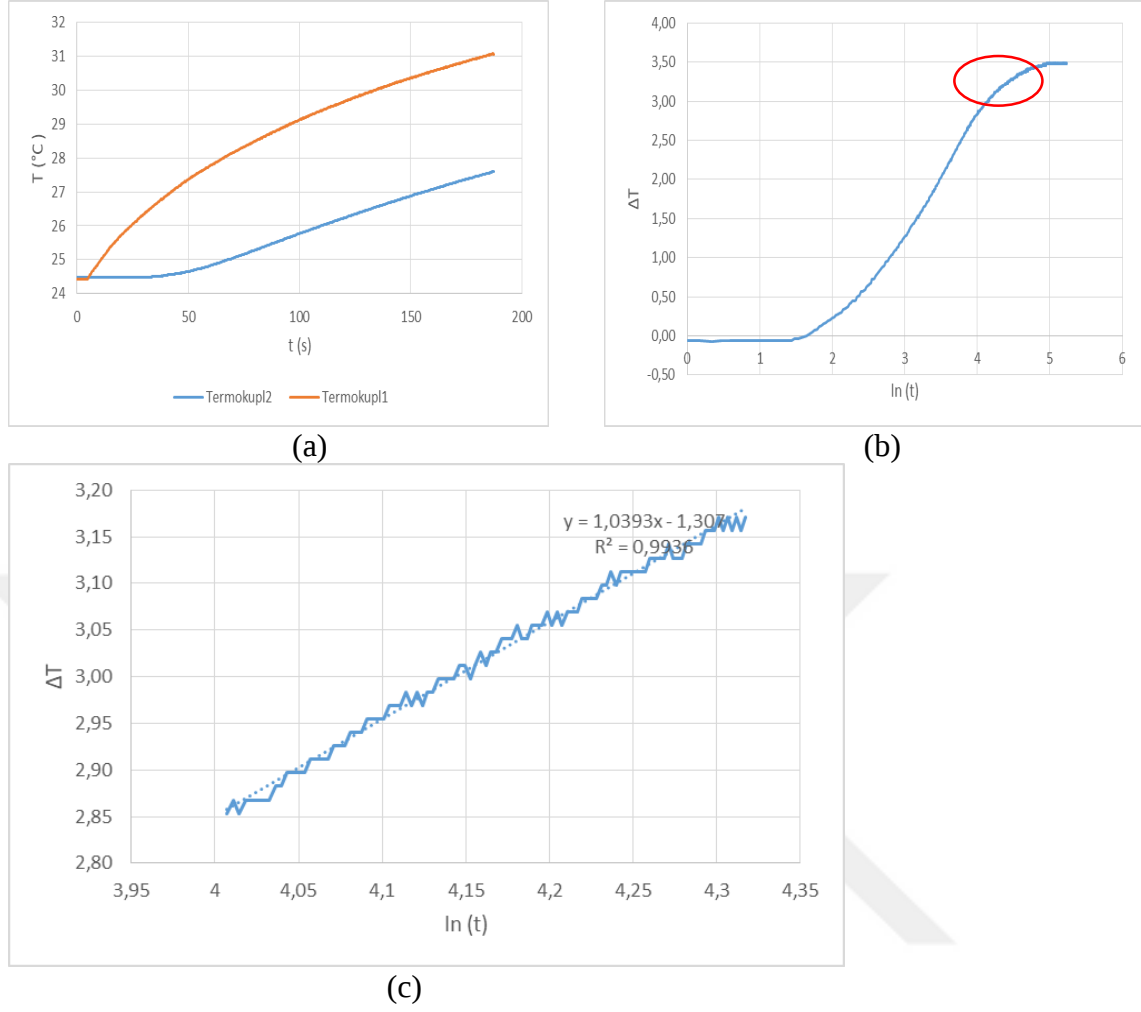


(b)



(c)

Şekil 4.32. Deney 4 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi



Şekil 4.33. Deney 5 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ grafikleri: a) İç ve dış termokuplların sıcaklık zaman grafiği; b) Termokuplların $\Delta T - \ln(t)$ grafiği; c) $\Delta T - \ln(t)$ grafiğinin lineer kısmının eğimi

Çizelge 4.6. THW yöntemi ile Al_2O_3 ısı iletkenlik değerleri ve bağlı hataları

Deney No	Gerilim (V)	I (A)	Q (W)	L (m)	Katsayı (x)	q (W/m)	Eğim	k (W/mK)	Hata %
1	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,0753	0,616	3,13
2	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,1424	0,580	2,99
3	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,0547	0,628	5,14
4	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,1665	0,568	4,91
5	6,4	0,56	3,58	0,04	0,093	89,6	1,0393	0,638	6,81
							$k_{\text{literatür}}$ $k_{\text{ort,hata}}$	0,5973 %4,60	W/mK

Deiyonize suyun ısı iletkenlik değeri, literatürdeki değeri ile karşılaştırıldı ve yapılan deneylerde ortalama hata literatüre göre %3,64 olarak ölçülmüştür. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı ile yapılan deneylerde ortalama hata %4,60 olarak belirlenmiştir.

4.3. Silindirik Bakır Tüp Yönteminin Diğer Yöntemlerle Kıyaslanması

Silindirik Bakır Tüp yöntemi ile Şekil 2.1’de gösterilen ısı iletkenlik ölçüm yöntemleri arasındaki en sık kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin hata oranları Çizelge 4.4’te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.7. Isıl iletkenlik ölçüm yöntemlerinin hata oranları

Yöntem	k_{ref} değerleri	Hata %	Referans
THW	S_u (26.8 °C) $k_{su}=0,609$ (W/mK)	3,9	(Aparna vd. 2018)
THW	S_u (20 °C) $k_{su}=0,597$ (W/mK)	1,2	(Guo vd. 2018b)
THW	S_u (25 °C) $k_{su}=0,609$ (W/mK)	0,5	(Hong vd. 2011)
THW	S_u (25 °C) $k_{su}=0,609$ (W/mK)	3	(Minakov vd. 2015b)
TPS	S_u (18 °C) $k_{su}=0,596$ (W/mK)	13,9	(Ai vd. 2017b)
3ω	S_u (25 °C) $k_{su}=0,600$ (W/mK)	1,5	(Oh vd. 2008b)
SBT	S_u (25 °C) $k_{su}=0,616$ (W/mK)	2,66	Bu çalışma
THW	S_u (25 °C) $k_{su}=0,616$ (W/mK)	3,64	Bu çalışma

Çizelge 4.7’de görüldüğü üzere, silindirik bakır tüp tasarımı kullanılarak elde edilen hata payı, diğer yöntemlere oldukça yakın bir seviyeye ulaşmıştır fakat doğal konveksiyon etkilerinden dolayı deneyler esnasında eğimlerin değerlerinde oldukça farklılıklar meydana gelmiştir. Bir başka sebep ise deney düzeneğinin aynı başlangıç şartlarında başlayamaması ve bakır borunun üniform olarak ısınmaması ısı iletkenlik sonuçlarını etkilemiştir. Bu sonuç, silindirik tüp tasarımının kontrollü bir şekilde her deney esnasında aynı başlangıç şartlarında test edilmesinin önemini ortaya koymuştur. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, silindirik bakır tüp tasarımı hem güvenilirlik hem de tutarlılık açısından, gerekli kontroller sağlandığında ve test akışkanının ısı kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda iyi bir performans sergilemiştir, bu da onun deneysel çalışmalarda tercih edilmesinin nedenlerinden biri olmaya adaydır.

THW yöntemi, literatürde yer alan diğer yöntemlere kıyasla en düşük hata oranına sahip yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, silindirik bakır tüp tasarımı, THW yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Tasarladığımız THW deney düzeneği, diğerlerinden farklı bir şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan tel yalnızca ısıtıcı olarak görev yapmıştır. İki farklı sıcaklık probu sayesinde akışkanın sıcaklığındaki değişiklikler, iki farklı noktadan gözlemlenmiştir. Bu tasarımda, sıcaklık farkı küçük tutulmuş olsa da ölçüm süresi uzun olduğu için meydana gelen doğal konveksiyon etkilerinden dolayı bazı sapmalar gözlemlenmiştir. Ancak tasarlanan THW yöntemi, literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslandığında oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kullanılan sarmal rezistans, maksimum 1 kW güç kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu özellik, güç kaynağının ve gerilimin kontrol edilmesine olanak tanıyarak, akışkanın yüksek sıcaklıklarda test edilmesini sağlayabilmektedir. Aynı zamanda akışkanın kısa süre aralığında yüksek sıcaklıklara çıkarabilmektedir.
- Önerilen yöntem ucuz ve pratiktir. Gerekli kontroller göz önünde bulundurulduğunda kullanılabilir.
- Test hücresinin hacmi 47,9 ml'dir. Bu sayede, testler için yalnızca bu miktarda akışkan kullanılması yeterli olmaktadır.
- Yalıtım katmanları ve yan çeperlerde üç boyutlu yazıcı ile tasarlanan yalıtım boşluğu sayesinde ısı kayıpları önemli derecede azaltılmıştır.
- Her ne kadar çekirdek-kabuk bir yapı kullanarak $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikül katkılı nanoakışkanın daha kararlı bir şekilde üretilmesi planlanmış olsa da muhtemelen üretim aşamasındaki bazı problemler sebebiyle nanoakışkandan beklenen kararlılık performansı elde edilememiş ve belirli bir zamandan sonra topaklanma ve çökme sorunları meydana gelmiştir. Bu sorunlar, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanopartikülünde ısı iletkenlik ölçümlerinde ortalama %6,12'lik bir hataya sahip olurken, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının ısı iletkenlik ölçümünde ortalama %7,61'lik bir hata ortaya koymuştur. Bu sonuçlara bakıldığında $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının hata oranı hata yüksek görünebilir fakat $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}$ nanoakışkanın sonuçları arasında büyük farklar meydana gelmiştir. . Bunu önlemek için deney düzeneğinin uygun ısıtma gücü ve zaman aralığı iyi belirlenmelidir. Birçok kez alınan tekrarlarla birbirine en yakın olan sonuçlar kullanılmıştır. Fakat sentezlenen $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanın daha kararlı bir yapıda sentezlenmiştir. Sonuçlar arasında tutarlılık oldukça yakındır.
- Deneyler esnasında önceden kalibrasyon yapmak önemlidir. Deiyonize su ile art arda tekrarlanan en az 3, en fazla 10 tekrarlanan test işlemlerinin ardından bulunan sonuçların birbirine en yakın olanlarını, suyun kanıtlanmış ısı iletkenlik değerine göre kalibre edildikten sonra nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümünü yapmak daha güvenilir sonuçlar vermektedir.
- Silindirik bakır tüp tasarımında %25'lik verim deiyonize suya göre hesaplanmıştır. Farklı türdeki akışkanların özgül ısı (c_p) değerlerindeki farklılıklar, verim üzerinde değişikliklere yol açabilir. Test düzeneği deiyonize suya göre kalibre edilmiş olduğundan, gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı akışkanların c_p değerlerine göre yeniden kalibrasyon işlemi yapılması gerekmektedir.
- Her deney tekrarı öncesinde bakır borunun ve akışkanın aynı başlangıç koşullarında olması büyük önem taşır. Bunun nedeni, dışarıdan içeriye doğru ilerleyen ısının öncelikle bakır borudan geçmesidir. Bakır borunun ısı depolama süresi verimi etkileyebileceğinden, deneylerin aynı başlangıç koşullarında başlatılması, sonuçların tutarlılığı ve sistemin güvenilirliği açısından kritik bir gerekliliktir.
- Eşitlik (2.4)'te kullanılan q (W/m), THW yönteminde ısıtıcı telin birim uzunluk başına sağladığı ısı enerjisini ifade etmektedir. Silindirik bakır tüp yönteminde ise bu değer, sarmal rezistansın bakır boruya temas ettiği uzunluğu ifade etmektedir.

- Deneylerin art arda yapılma süresi soğutma sistemi olmadığı için uzun sürmektedir. Bunun önüne geçmek için küçük bir fan kullanılabilir.
- Tasarlanan THW yönteminde farklılık olarak, platin tel sadece ısıtıcı olarak kullanılmıştır. Ölçüm süresi uzatılmış ve sıcaklık farkı düşürülmüştür. Bu koşullar altında doğal konveksiyon etkileri görülmüştür.
- Tasarlanan THW düzeneğinin, Silindirik Bakır Tüp düzeneğine kıyasla daha pratik ve daha tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.
- Deiyonize su için yapılan belirsizlik analizi sonucunda, deney düzeneğinin toplam belirsizliği %3,37 olarak hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan sıcaklık sensörlerinin belirsizliği $\pm 0,5$ °C olarak belirlenmiştir. Daha hassas ölçüm yapan direnç termometreleri (PT100, PT1000 vb.), gibi sıcaklık sensörlerinin kullanılması durumunda deneysel sonuçların doğruluğu artırılacak ve hata payı daha da azaltılabilecektir.

6. KAYNAKLAR

- Ai, Q., Hu, Z.W., Wu, L.L., Sun, F.X., Xie, M. 2017. A single-sided method based on transient plane source technique for thermal conductivity measurement of liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 1181-1190.
- Aparna, Z., Michael, M.M., Pabi, S.K., Ghosh, S. 2018. Diversity in thermal conductivity of aqueous Al₂O₃- and Ag-nanofluids measured by transient hot-wire and laser flash methods. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 94, 231-245.
- Azarfar, Sh., Movahedirad, S., Sarbanha, A.A., Norouzbeigi, R., Beigzadeh, B. 2016. Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids. *Applied Thermal Engineering*, 105, 142-150.
- Bhattacharya, P., Nara, S., Vijayan, P., Tang, T., Lai, W., Phelan, P.E., Prasher, R.S., Song, D.W., Wang, J. 2006. Characterization of the temperature oscillation technique to measure the thermal conductivity of fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 2950-2956.
- Bouguerra, A., Diop, M.B. 2001. Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 28, 8.
- Boumaza, S.A.T., Redgrove, J. 2003. Use of the Transient Plane Source Technique for Rapid Multiple Thermal Property Measurements. *International Journal of Thermophysics*, 24, 2.
- Cahill, D.G. 1990. Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K the 3 ω method. *Review of Scientific Instruments*, 61, 802-808.
- Carslaw H.S., Jaeger J.C. 1959. *Conduction of Heat In Solids*. Oxford University Press, London, 517s.
- Challoner A.R., Powell R.W. 1956. Thermal conductivities of liquids: new determinations for seven liquids and appraisal of existing values. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 238(1212), 90-106.
- Czarnetzki -, W., Roetzel, W. 1995. Thermal Conductivity. Temperature Oscillation Techniques for Simultaneous Measurement of Thermal Diffusivity and Conductivity. 2.
- Çengel Y.A. 2012. *Isı ve Kütle Transferi*. Güven Yayıncılık. S,3.
- Das, P.K. 2017. A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 420-446.
- Doğanay, S., Turgut, A., Çetin, L. 2019. Magnetic field dependent thermal conductivity measurements of magnetic nanofluids by 3 ω method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 474, 199-206.
- Guo, W., Li, G., Zheng, Y., Dong, C. 2018. Measurement of the thermal conductivity of SiO₂ nanofluids with an optimized transient hot wire method. *Thermochimica Acta*, 661, 84-97.

- Gupta, S.K., Dixit, S. 2021. Progress and application of nanofluids in solar collectors: An overview of recent advances. *Materials Today: Proceedings*, 44, 250-259.
- Gündoğdu, F.E. 2018. Nanoakışkanların Önemi. <https://www.muhendisol.com/2018/06/07/nanoakiskanlarin-onemi>. [Son erişim tarihi: 30.12.2024].
- Hong, S. W., Kang, Y.T., Kleinstreuer, C., Koo, J. 2011. Impact analysis of natural convection on thermal conductivity measurements of nanofluids using the transient hot-wire method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(15-16), 3448-3456.
- Jiang, W., Ding, G., Peng, H. 2009. Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 1108-1115.
- Kostic, M.M., Walleck, C.J. 2010. Design of a steady-state, parallel-plate thermal conductivity apparatus for nanofluids and comparative measurements with transient. ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. ss. 8, 12-18 November, Canada.
- Minakov, A.V., Rudyak, V.Y., Guzei, D.V., Pryazhnikov, M.I., Lobasov, A.S. 2015. Measurement of the thermal-conductivity coefficient of nanofluids by the hot-wire method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88(1), 149-162.
- Oh, D.W., Jain, A., Eaton, J.K., Goodson, K.E., Lee, J.S. 2008. Thermal conductivity measurement and sedimentation detection of aluminum oxide nanofluids by using the 3ω method. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(5), 1456-1461.
- Paul, G., Chopkar, M., Manna, I., Das, P.K. 2010. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 7, 1913-1924.
- Sahamifar, S., Naylor, D., Yousefi, T., Friedman, J. 2024. Measurement of thermal conductivity of nanofluids using a comparative interferometric method. *International Journal of Thermal Sciences*, 199, 108890.
- Souza, R.R., Barbosa, Fm. Sa., Nobrega, G., Cardoso, Em., Teixeira, Jcf., Moita, As., Lima, R. 2023. An innovative PDMS cell to improve the thermal conductivity measurements of nanofluids. *Thermal Science and Engineering Progress*, 42, 101926.
- Souza, R.R., Faustino, V., Gonçalves, I.M., Moita, A.S., Bañobre-López, M., Lima, R. 2022. A Review of the Advances and Challenges in Measuring the Thermal Conductivity of Nanofluids. *Nanomaterials*, 12, 15.
- Xu, G., Fu, J., Dong, B., Quan, Y., Song, G. 2019. A novel method to measure thermal conductivity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 978-988.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih ÇÖKMEZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2022-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi
2016-2020	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi	Antalya Bilim Üniversitesi
2023-	Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Anabilim Dalı, Antalya