

**NANOAKIŞKANLARIN ISIL İLETKENLİKLERİNİN
ÖLÇÜLMESİ**

**THE MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY
OF NANOFUIDS**

MURAT ARTUÇ

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

FİZİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2007

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
(Prof. Dr. Necdet Baştürk)

Üye :.....
(Prof. Dr. Hüseyin Zafer Durusoy)

Üye (Danışman) :.....
(Doç. Dr. Şadan Özcan)

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Erdem Yazgan
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

NANOAKIŞKANLARIN ISIL İLETKENLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Murat Artuç

ÖZ

Yıllardır ısı bilimi ve ısı mühendisleri, ısı transferini artırmak için büyük çaba harcamışlardır. Bunun temel nedeni mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanma ihtiyacıdır. Geçtiğimiz birkaç yüzyıldır ısı transferi konusundaki çalışmalar ısı transferini geliştirecek yeni metodlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Buna en iyi örnek akışkanların ısı iletkenliklerini artırmak için metalik parçacıkların katılmasıdır. Son yıllarda, nanoteknolojinin hızlı gelişimi ve yaygın uygulama alanı bulmasının bir sonucu olarak da ısı transferini iyileştirmek amacı ile akışkanların içerisine nano boyuttaki parçacıklar (nanoparçacıklar) katılmaktadır ve bu konuda yapılan çalışmaların sayısı şaşırtıcı bir hızla artmaktadır. İçerisine bu parçacıkların katıldığı akışkanlar nanoakışkanlar “ nanofluids” olarak adlandırılmaktadır. Katı bir metalin ısı iletkenliği, içine katıldığı temel akışkanınkinden daha yüksek olduğu için, metalik parçacıkların akışkan içerisine katılması karışımın ısı iletkenliğini arttırmaktadır.

Bu çalışmada, iki farklı metotla hazırlanan farklı boyutlardaki bakır (Cu) ve gümüş (Ag) nanoparçacıkların, nanoakışkanın ısı transferine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle sıcak tel yöntemini kullanarak nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısını ölçebilen bilgisayar kontrollü bir deney düzeneği hazırlandı. Cu ve Ag nanoparçacıklar hazırlanması için ise asal gaz ile yoğunlaştırma ve mekanik öğütme yöntemleri kullanıldı. Asal gaz ile yoğunlaştırma sistemi, mevcut ısı buharlaştırma sistemi yeniden düzenlenerek geliştirildi. Mekanik öğütme yöntemi için ise gezegensel öğütme metodunu kullanan Retch marka bilyeli değirmen kullanıldı.

Sıcak tel yöntemi temel alınarak kurulan ısı iletkenlik ölçüm sisteminin bilgisayar kontrolü için, LabVIEW tabanlı bir bilgisayar programı yazıldı. Saf su ve % 99.9 saflıkta 2-propanol alkolün oda sıcaklığında yapılan ısı iletkenlik ölçümleri sonucunda ısı iletkenlik katsayıları sırası ile $0,602 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve $0,139 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler literatürdeki değerlerle karşılaştırıldığında ölçüm sisteminin doğruluğu % 0,7 olarak, yapılan farklı ölçümler sonucunda ise tekrarlanabilirlik %1 olarak hesaplanmıştır. Nanoakışkanların ısı iletim

katsayılarının ölçümleri için farklı parçacık boyutunda Ag ve Cu nanoparçacıklar hazırlanmıştır. X-ışınları toz difraksiyonu ölçüm sonuçlarından, hazırlanan nanoparçacıkların parçacık boyutları hesaplanmıştır. Parçacık boyutunun hesaplanması için Williamson Hall bağıntısı kullanılmıştır. Mekanik öğütme yöntemi ile hazırlanan nanoparçacıkların parçacık dağılımının homojen olmadığı gözlenmiştir. % 99,9 saflıkta ve 1 Torr basınçlı Ar atmosferindeki ısısal buharlaştırma sisteminde, pota ile örnek toplanan yüzey arasındaki mesafe değiştirilerek $20,06 \pm 1,44$ nm ve $24,58 \pm 0,14$ nm boyutlarında Cu nanoparçacıklar, $18,23 \pm 1,16$ nm boyutlarında ise Ag nanoparçacıklar hazırlanmıştır.

% 99,9 saflıkta 80 ml 2-propanol alkol içerisine % 0,4, % 0,7 ve % 1,5 hacimsel oranlarında ve $18,23 \pm 1,16$ nm ortalama boyutlarında Ag nanoparçacıklar eklenmiştir. Akışkanın ısı iletim katsayısı 25 °C' de sırası ile $0,308 \pm 0,050$ $Wm^{-1}K^{-1}$, $0,350 \pm 0,050$ $Wm^{-1}K^{-1}$, $0,403 \pm 0,050$ $Wm^{-1}K^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Farklı olarak % 99,9 saflıkta 80 ml 2-propanol içerisine de % 0,3, % 0,7, % 1,4 ve % 1,5 hacimsel oranlarında $24,58 \pm 0,14$ nm ortalama boyutlarında Cu nanoparçacıklar eklenmiş ve akışkanın ısı iletim katsayısı 25 °C' de sırasıyla $0,275 \pm 0,050$ $Wm^{-1}K^{-1}$, $0,327 \pm 0,050$ $Wm^{-1}K^{-1}$, $0,398 \pm 0,050$ $Wm^{-1}K^{-1}$, $0,393 \pm 0,050$ $Wm^{-1}K^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Ag ve Cu nanoparçacıklar katılarak hazırlanan nanoakışkanların 25 °C' de yapılan ısı iletim katsayısı ölçümlerinde akışkanın ısı iletiminde artış olduğu gözlenmiştir. Bu artışın akışkana katılan nano-parçacıkların akışkan içerisindeki hacimsel oranlarına göre değiştiği ve küresel parçacıklar için geçerli olan Hamilton-Crosser ve Maxwell modelleri ile uyduğu belirlenmiştir. Ancak yaklaşık %1,5 ve üzeri hacimsel oranlarda yapılan ölçüm sonuçlarından modelden sapmalar ve ısı iletkenlik katsayısında artışın olmadığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanoparçacıklar, ısı iletkenlik, ısı iletkenlik ölçüm sistemi, nanoakışkanlar.

Danışman: Doç. Dr. Şadan ÖZCAN, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı.

THE MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF NANOFLUIDS

Murat Artuç

ABSTRACT

There have been lots of efforts for the enhancement of heat transfer for many years. The main reason of these trials stems from the necessity of using energy sources more efficiently. In the previous several decades, researchers have been concentrated on the new methods which develop the currently used heat transfer enhancement techniques. One of the best examples of these methods is the addition of metallic particles in fluids. As a result of the fast development and common application of nanotechnology, nanometer particles (nanoparticles) have been used in suspension in conventional heat transfer fluids for improving the thermal conductivity of fluids. The studies on this subject increase amazingly in the recent years. These solid particles suspended in fluids are called as “nanofluids”. Since a solid metal has a larger thermal conductivity than that of a base fluid, the suspension of fine metallic solid particles into the base fluid is expected to improve the thermal conductivity of the base fluid.

In this study, the variation of thermal conductivity of nanofluids by suspending copper (Cu) and silver (Ag) nanoparticles, which were prepared by two different methods, are investigated. For this purpose a thermal conductivity of nanofluids measurement system, which is computerized, was designed and constructed by developing from hot-wire technique. Inert-gas condensation and mechanical grinding method were used for preparing Cu and Ag nanoparticles. Inert-gas condensation system was used by developing the existing thermal evaporation system. For mechanical grinding method, centrifugal ball mill (Retsch, Germany), which consists of planet-like movement method, was used, too.

Software for computerizing the constructed thermal conductivity measurement system, which is the basis on hot-wire technique, was compiled and developed by LabVIEW. At room temperature, the thermal conductivity of pure water and 2-propanol alcohol, purity, which is better than 99.9%, is measured as $0.602 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ and $0.139 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, respectively. As these values were compared with literature values, it was concluded that system is 0.1% reproducible of and accuracy is 0.7%. Ag and Cu nanoparticles were produced different particle size to

measure enhancement of thermal conductivity of nanofluids. X-ray diffraction (XRD) methods were used to calculate the size of produced nanoparticles. For determining particle size, Williamson Hall equation was used. We observed that particle distribution of nanoparticles produced by mechanical grinding was nonhomogeneous. 20.06 ± 1.44 and 24.58 ± 0.14 nm diameter Cu nanoparticles and 18.23 ± 1.16 nm diameter Ag nanoparticles were produced by changing distance of difference between crucible and cold head.

18.23 ± 1.16 nm diameter Ag nanoparticles were suspended in 80 ml 2-propanol alcohol, 99.9% purity as 0.4%, 0.7% and 1.5% volume fraction. The fluids of thermal conductivity was measured $0.308 \pm 0.050 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $0.350 \pm 0.050 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $0.403 \pm 0.050 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, respectively. On the other hand, 24.58 ± 0.14 nm diameter Cu nanoparticles were suspended in 80ml 2-propanol alcohol, 99.9% purity as 0.3%, 0.7%, 1.4% and 1.5% volume fraction and the fluids of thermal conductivity was measured $0.275 \pm 0.050 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $0.327 \pm 0.050 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $0.398 \pm 0.050 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $0.393 \pm 0.050 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ at 25 °C, respectively. Improving the thermal conductivity of that fluid by suspended Ag and Cu nanoparticles was observed by measuring thermal conductivity at 25 °C.

Enhancing heat transfer performance of base fluid was dependent on volume fraction of particles and this result can be predicted accurately by the model equation of Hamilton and Crosser for the spherical nanoparticles. But the effective thermal conductivities of the nanofluids show no anomalous enhancements and do not harmonize with these models nearly over 1.5% of volume fraction.

Keywords: Nanoparticles, thermal conductivity, thermal conductivity measurement system, nanofluids.

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Şadan ÖZCAN, Hacettepe University, Department of Physics Engineering, Physics Engineering Section.

TEŞEKKÜR

Bu tezin her aşamasında değerli yardımlarını, önerilerini, bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Şadan Özcan' a ve aynı zamanda Prof. Dr. Tezer Fırat' a,

bu çalışma kapsamında yapılan XRD ölçümlerinde bana yardımcı olan Abdullah Ceylan' a,

tez dönemi süresince emeği geçen Hacettepe Üniversitesi Fizik Bölümü Elektronik Araştırma Laboratuvarı ve Mekanik Atölye tüm çalışanlarına,

dostluğundan yararlandığım Burak Kaynar, Esin Uçar' a,

maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve,

Sayın Erol Çetinakdoğan ve Nedim Tuç' a,

bu tezin oluşumunda emeği geçen ismini saymadığım bütün dostlarıma,

sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZ | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR | v |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ | vi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | x |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. TEMEL BİLGİLER | 6 |
| 2.1. Isı İletimine Giriş | 6 |
| 2.1.1. Isıl iletkenlik | 6 |
| 2.1.2. Katıların Isıl İletkenliği | 8 |
| 2.1.3 Sıvı ve Gazların Isıl İletkenliği | 9 |
| 2.1.4 Nanoakışkanların Isıl İletkenliği | 10 |
| 2.2. Isı Yayılım Denklemi | 12 |
| 2.3. Isıl İletkenlik Ölçüm Teknikleri | 16 |
| 2.3.1. Searle Yöntemi | 16 |
| 2.3.2. Lee Disk Yöntemi | 17 |
| 2.3.3. Sıcak Tel Yöntemi | 19 |
| 3. DENEYSEL | 22 |
| 3.1. Isıl İletkenlik Ölçümü | 22 |
| 3.1.1. Yöntem | 23 |
| 3.2. Sistem | 24 |
| a. Deney Düzeneği | 24 |
| b. Elektronik Ölçüm Sistemi ve Veri Toplama | 26 |
| 3.3. Deney Akışı | 27 |
| 3.4. Ölçüm Sistemi Özellikleri ve Hataların Analizi | 28 |
| a. Tekrarlanabilirlik | 30 |
| b. Deneysel Hatalar | 30 |
| 3.5. Isıl Çiftler Arasındaki Mesafe Tayini | 30 |
| 3.6. Uygulanan Güç | 31 |
| 3.7. Yazılım | 31 |
| 3.8. Örnek Hazırlama Yöntemleri | 32 |
| 3.8.1. Mekanik Öğütme Yöntemi | 32 |
| 3.8.2. Asal Gaz ile Yoğunlaştırma Yöntemi | 34 |

| | |
|--|----|
| 3.9. X-Işınları Toz Kırınımı | 36 |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 38 |
| 4.1. Mekanik Öğütme Yöntemi ile Hazırlanan Örnekler | 38 |
| 4.1.1. Cu Nanoparçacıkların X-Işınları Toz Kırınım Ölçüm Sonuçları..... | 38 |
| 4.2. Asal Gaz ile Yoğunlaştırma Yöntemiyle Hazırlanan Örnekler | 43 |
| 4.2.1. Cu Nanoparçacıkların X-Işınları Toz Kırınım Ölçüm Sonuçları..... | 43 |
| 4.2.2. Ag Nanoparçacıkların X-Işınları Toz Kırınım Ölçüm Sonuçları | 46 |
| 4.3. Bakır Nanoakışkanların Etkin Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçları | 48 |
| 4.3.1. Mekanik Öğütme Yöntemi ile Hazırlanan Bakır Nanoparçacıklar | 48 |
| 4.3.2. Asal Gaz ile Yoğunlaştırma Yöntemiyle ile Hazırlanan Bakır Nanoparçacıklar | 51 |
| 4.4. Gümüş Nanoakışkanların Etkin Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçları..... | 54 |
| 5. SONUÇLAR..... | 57 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ | 61 |
| EKLER | 63 |
| ÖZGEÇMİŞ | 78 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|---------------|---|
| λ | Etkin ısı iletkenlik katsayısı |
| λ_p | Parçacıkların ısı iletkenliği |
| λ_e | Parçacık/sıvı nanoakışkanın etkin ısı iletkenliği |
| λ_f | Esas akışkanın ısı iletkenliği |
| Φ | Nanoakışkanın parçacık hacmine oranı |
| n | Parçacık şekil faktörü |
| C | Fonon ısı sığası |
| v | Fonon hızı |
| l | Fonon ortalama serbest yolu |
| τ | Çarpışmalar arasındaki ortalama zaman aralığı |
| ρ_e | Elektrik özdirenci |
| c_p | Sabit basınçta özgül ısı |
| ΔT | Isıl çiftler arasındaki sıcaklık farkı |
| q | Isı enerji akısı |
| \dot{q} | Birim hacimdeki ısı üretimi |
| ρ | Kütle yoğunluğu |
| α | Isıl yayılım katsayısı |
| ξ | Yapısal genişleme |
| ε | Yapıda oluşan gerilme (strain) |
| ψ | Parçacık boyutu |

KISALTMALAR

| | |
|-------------|--|
| λ_e | Isıl iletkenlik katsayısının elektronik bileşeni |
| λ_l | Isıl iletkenlik katsayısının kristal örgü bileşeni |
| E_g | Enerji (ısı) üretimi |
| E_{st} | Kontrol hacminde birim zamanda depolanan enerji |
| H-C | Hamilton-Crosser |
| TEM | Geçirmeli elektron mikroskobu |
| MEMS | Mikroelektromekanik sistemler |
| Å | Angstrom |
| nm | nanometre |
| Cu | Bakır |
| Ag | Gümüş |
| V | Volt |
| I | Akım |
| A | Amper |
| mg | miligram |
| ml | mililitre |
| °C | Santigrad derece |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.1. Brownian hareketi yapan nanoparçacığın hareketi | 11 |
| 2.2. Searle yönteminin şematik gösterimi | 16 |
| 2.3. Lee Disk yönteminin şematik gösterimi | 17 |
| 2.4. Bakır diskin soğuma eğrisi..... | 18 |
| 2.5. Sıcak tel yöntemi deney düzeneği | 19 |
| 3.1. Deney düzeneği | 25 |
| 3.2. Elektronik Ölçüm Sistemi Şematik Gösterimi | 26 |
| 3.4. 2-propanol alkol için yapılan ısı iletkenlik ölçümünde ısı çiftler arasındaki sıcaklık farkının zamana bağlı değişimi | 29 |
| 3.5. Saf su için yapılan ısı iletkenlik ölçümünde ısı çiftler arasındaki sıcaklık farkının zamana bağlı değişimi | 29 |
| 3.6. Havan içerisindeki top ve malzeme | 32 |
| 3.7. Mekanik öğütmede kullanılan havan ve bilyeler | 33 |
| 3.8. Isısal buharlaştırma sistemi | 36 |
| 4.1. Farklı sürelerde öğütülen bakır örneğin x-ışınları toz kırınım deseni (JCPDS, PDF# 040836 0.205). | 40 |
| 4.2. Parçacık büyüklüğü ve gerilme hesabında kullanılan en iyi doğru denklemleri..... | 41 |
| 4.3. Bakır için öğütme süresine bağlı olarak ortalama parçacık büyüklüğünün değişimi (çizgiler görünüş içindir) | 42 |
| 4.4. Farklı mesafelerde elde edilen bakır örneğin x-ışınları toz kırınım deseni (JCPDS, PDF# 040836 0.205) | 44 |
| 4.5. Ag ait x-ışını kırınım deseninde (111), (200), (220) pikleri için Williamson Hall eşitliği kullanılarak uyarlanan grafikler | 45 |
| 4.6. 8.0 ± 0.5 cm mesafede elde edilen Ag örneğin x-ışınları toz kırınım deseni (JCPDS, PDF# 870597 0.088)..... | 46 |
| 4.7. Ag ait x-ışını kırınım deseninde (111), (200), (220) ve (311) pikleri için Williamson Hall eşitliği kullanılarak uyarlanan grafik. | 47 |
| 4.8. Bakır nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanlar için ısı çiftler arasındaki sıcaklık – zaman grafiği..... | 48 |
| 4.9. 2-propanol alkol ile hazırlanan nanoakışkandaki bakır nanoparçacık miktarının etkin ısı iletkenlik ile değişimi..... | 50 |
| 4.10. 24.58 ± 0.14 nm boyutundaki bakır nanoparçacık katkılama miktarlarına göre ısı çiftler arasındaki sıcaklık – zaman grafiği..... | 51 |

| | |
|---|----|
| 4.11. Cu nanoparçacık miktarına bağlı olarak nanoakışkanın etkin ısı iletkenlik katsayısının değişim grafiği..... | 53 |
| 4.12. Ag nanoparçacık katkılama miktarlarına bağlı olarak ısı çiftler arasındaki sıcaklık – zaman grafiği..... | 55 |
| 4.13. Ag nanoparçacık miktarına bağlı olarak nanoakışkanın etkin ısı iletkenlik katsayısının değişim grafiği..... | 56 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Çizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 1.1. Nanoakışkanlar için etkin ısı iletkenlik modelleri (Eastman J.A. vd., 2001)..... | 5 |
| 3.1. Isıl çiftler arasındaki mesafeye göre saf suyun ve 2-propanol alkolün ısı iletim katsayısı..... | 31 |
| 4.1. Öğütme süresine bağlı olarak ortalama parçacık büyüklüğü ve malzeme üzerinde oluşan gerilme..... | 41 |
| 4.2. Asalgaz ile yoğunlaştırma yöntemiyle hazırlanan Cu nanoparçacık toz numunelerinin ortalama parçacık büyüklüğü ve yapıdaki gerilme..... | 45 |
| 4.3. Cu nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanların etkin ısı iletkenlikleri..... | 49 |
| 4.4. Cu nanoparçacıklardan oluşan nanoakışkanların etkin ısı iletkenlikleri..... | 52 |
| 4.5. Ag nanoparçacıklardan oluşan nanoakışkanın etkin ısı iletkenliği..... | 55 |

1. GİRİŞ

Günümüzde mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olduğu için enerjinin verimli ve etkili bir şekilde kullanılması önem kazanmaktadır. Bu kapsamda endüstrinin her alanında kullanılan ısı değiştiriciler de, ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar da, enerji ekonomisi açısından dikkate değer bir literatür oluşturmaktadır. Isı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar genel olarak “aktif”, “pasif” ve “karma” yöntemler olarak gruplandırılmaktadır. Aktif yöntemler olarak adlandırığımız yöntemler, dış güç kaynağının kullanılmasını gerektiren yöntemlerdir. Akışkan titreşimi, yüzey titreşimi, elektrostatik alanlar gibi yöntemler aktif yöntemler arasında sayılabilir. Pasif yöntemler, dış güç kullanılmasını gerektirmeyen yöntemlerdir. Pürüzlü yüzeyler, dönmeli akış cihazları, soğutma borularının içine yerleştirilen iyileştirme elemanları ve benzeri yöntemler pasif yöntemlere örnek olarak verilebilir. Karma yöntemlerde ise aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası birlikte kullanılmaktadır (Bergles, A., E., 1998).

Pasif yöntemler uygulandığında ısı transferinde önemli miktarda iyileşmeler gözlenirken, basınç düşümünden dolayı akışkanı pompalamak için gerekli enerji miktarında büyük bir artış meydana gelmektedir. Bunun yanında, pasif iyileştirme yöntemlerinin kullanılması, sistemde çözümlenmesi gereken çeşitli problemler oluşturmaktadır. Örneğin, nükleer santrallerde, boru içerisine yerleştirilen türbülatorler nedeniyle ortaya çıkan akış kaynaklı titreşimler boru sistemlerinde yorulmalara, hatta rezonans durumunda sistemde yorulma kaynaklı kırılma ve çatlamalara neden olmaktadır. Kimyasal işlemlerde ise akışkanın özelliklerine bağlı olarak çökelme, kirlenme gibi problemler meydana gelmekte bu ise belli bir süre sonra ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir (Şahin, B. vd., 2004).

Su, motor yağı ve etilen glikoz (antifriz) gibi akışkanlar ısı değiştiricilerde kullanılan geleneksel ısı transferi akışkanlarıdır. Isı transferini iyileştirmek amacıyla bahsedilen yöntemler kullanılmasına rağmen, bu geleneksel akışkanların ısı transferi performanslarının düşük olması iyileşme veriminin az olmasına neden olmakta ve ayrıca ısı değiştiricinin küçük boyutlarda ve az yer kaplayan geometride olmasını sınırlamaktadır.

Isı değiştiricideki temel akışkan içerisine katı parçacıkların süspansiyon şeklinde katılması pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem geleneksel

akışkanın ısı iletkenliğini artırarak akışkanın ısı transferi karakteristiklerini iyileştirmektedir. Bir katı metalin ısı iletkenliği temel akışkanınkinden yüksek olduğu için temel akışkan içerisine süspansiyon olarak katılan ince katı metaller, akışkanın ısı iletkenliğini artırmaktadır.

Akışkan içerisine milimetre veya mikrometre boyutlarındaki katı parçacıkların katılması ile akışkanın ısı iletkenliğinin artırılması 100 yıldan fazla bir süredir bilinen bir yöntemdir (Lee, S. vd., 1999). Ancak boru/kanal içerisindeki büyük basınç düşümleri, çökme, tortulaşma, aşınma gibi problemlerden dolayı bu uygulamalar endüstriyel işlemlerde cazip bulunmamıştır. Ayrıca bu boyuttaki parçacıklarla hazırlanan süspansiyonların daha az kararlı bir yapı göstermeleri nedeniyle mikro kanallarda tıkanmalara neden olduğu bildirilmiştir (Wen, D., Ding, Y., 2004). Son yıllarda malzeme bilimindeki gelişmelere paralel olarak, nano boyutlu parçacıkların üretilmesiyle bu problemlerin giderilme olanağı doğmuştur. Isı iletkenlikleri yüksek olan bakır, alüminyum, altın, gümüş vb. nano boyutlu katı parçacıklar geleneksel ısı transferi akışkanlarına katılarak yeni bir ısı transferi akışkanı tipi üretilmiştir. Nano boyutlu katı parçacıkların katıldığı bu yeni ısı transferi akışkanlarına “nanoakışkan (nanofluid)” denmektedir. Nanoakışkanlar üzerine ilk kez Argonne National Laboratory’de 11 yıl önce çalışılmaya başlanmıştır (Wen, D., Ding, Y., 2004). Akışkan içerisinde nanoparçacıkların mikro parçacıklar ile karşılaştırılması yapılırsa; mikro parçacıkların atomlarının çoğu çökme yapar ve çeperlerden ısıyı alamaz. Fakat nanoparçacıklar yapısı gereği ısıyı daha etkili bir şekilde soğurmaktadır (Şahin, B vd., 2004).

Nanoparçacıkların katılması ile akışkanın ısı transferi performansının önemli derecede iyileşmesine neden olan temel fiziksel olaylar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Xuan, Y., Li, Q., 2000; Şahin, B. vd., 2004):

- Akışkan içerisine katılan nanoparçacıklar akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini büyütür.
- Nanoparçacıklar akışkanın ısı iletimini artırır.
- Nanoparçacıklar arasındaki etkileşim ve çarpışmalar akışkanın ve akış geçidinin yüzeyinin artmasına neden olur.

- Nanoparçacıkların saçılması akışkanın enine sıcaklık eğiminin düzleşmesine neden olur.

Nanoakışkanların mühendislik sistemlerinde kullanımıyla ilgili literatür çok zengin değildir. Son yıllarda özellikle ısı transferi akışkanı olarak kullanılan yeni nanoakışkanların taşınım karakteristiklerinin ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesi üzerine modeller geliştirmeye yönelik çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

Wen ve Ding (Wen, D., Ding, Y., 2004), alümina (Al_2O_3) ve saf su kullanarak nanoakışkanların taşınımıyla ısı transferini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmışlar, ısı transferinde dikkate değer bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Isı transferi davranışlarını karakterize etmede literatürde bilinen klasik Shah denkleminin başarısız olduğu, bunun nedeninin ise parçacıkların taşınımı nedeniyle sınır tabakasının bozulması olduğu iddia edilmiştir.

Choi ve diğerleri (Choi, S. U. S., 2001), katı/sıvı nanoakışkanlar için etkin ısı iletkenliği veren konvansiyonel modelleri bir çizelge halinde vermişlerdir. Çizelge 1.1' de verilen modellerde, λ_p parçacığın ısı iletkenliği, λ_e parçacık/sıvı nanoakışkanın ısı iletkenliği, λ_f esas akışkanın ısı iletkenliği, Φ (phi) nanoparçacıkların akışkan içerisindeki hacimsel oranı, α (alfa) ısı iletkenlikler oranı ($\alpha = \lambda_p / \lambda_f$), β (beta) = $(\alpha - 1) / (\alpha + 2)$ ve n parçacık şekil faktörü olarak tanımlanır.

Putra ve diğerleri (Putra, N. vd., 2003), farklı iki (Al_2O_3 -CuO) nanoparçacık-su bazlı nanoakışkanın bir ucundan ısıtılan ve diğer ucundan soğutulan yatay bir boru içindeki doğal taşınım karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Parçacık konsantrasyonu, parçacığın malzemesi ve akışkanın aktığı silindirin geometrik özellikleri gibi parametrelerin değişimlerini ve birbirleri ile ilişkisini araştırmışlardır. Parçacık konsantrasyonunun artması ile ısı transferi miktarının azaldığını belirtmişlerdir.

Özellikle nanoakışkanların doğal taşınımıyla ilgili deneysel verilerinin az olması nedeniyle Khanafer ve diğerleri (Khanafer, K. vd., 2003), analitik bir model geliştirmiştir. Modelde nanoakışkanın tek fazda olduğu, yani akışkan ve parçacıkların ısı olarak dengede olduğu ve aynı hızda aktığı kabul edilmiştir. Yine Kim ve diğerleri (Kang, Kim, Y.T. vd., 2004), nanoakışkanın etkin ısı iletkenliğinin,

yoğunluğunun ve ısı kapasitesinin temel akışkanın ısı iletkenliği, yoğunluğu ve ısı kapasitesine oranı, şekil faktörü ve hacimsel oran gibi etkenleri içeren yeni bir faktör (f) tanımlamış ve analitik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İki çalışmada da parçacıkların hacimsel oranı arttıkça ısı transferi miktarının arttığı görülmüştür. Putra ve diğerleri (Putra, N. vd., 2003) tarafından yapılan deneysel çalışma ile bu iki analitik çalışmanın sonuçları arasında bir uyumsuzluk söz konusudur. Trisaksri ve Wongwises 2005 tarihli araştırma çalışmasında (Trisaksri, V. vd., 2005) bu uyumsuzluğa dikkat çekmiştir.

Geleneksel akışkanların ısı transferi performanslarını iyileştirmek amacıyla nanoparçacıkların akışkan içerisine katılması, başka bir deyişle nanoakışkanların hazırlanması, özen gösterilmesi gereken önemli bir işlemdir. Zira nanoakışkan kavramı basit bir şekilde sıvı-katı karışımı anlamına gelmemektedir. Hazırlanan akışkanın tam, kararlı ve uzun ömürlü bir süspansiyon olması için, parçacıkların çok küçük miktarda topaklanması ve akışkanın kimyasal özelliklerinin değişmemesi gerekmektedir. Nanoakışkanları hazırlama yönteminin uygulamaya göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamak gerekir. Yukarıda sayılan nedenlerden dolayı bu çalışmada öncelikle doğruluğu ve tekrarlanabilirliği yüksek genel amaçlı bir ısı iletkenlik ölçüm sistemi tasarlanıp kurulmuştur. Asal gaz ile yoğunlaştırma ve mekanik aşındırma yöntemleri kullanılarak farklı parçacık boyutlarında üretilen metal nanoparçacıkların, hazırlanan nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısına etkileri irdelenmiştir ve elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

| Model | İfade | Açıklama |
|------------------|--|--|
| Maxwell | $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)\Phi}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\Phi}$ | Küresel parçacıklar için geçerlidir. |
| Hamilton-Crosser | $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \frac{\alpha + (n - 1) - (n - 1)(1 - \alpha)\Phi}{\alpha + (n - 1) + (1 - \alpha)\Phi}$ | Küresel ve küresel olmayan parçacıklar dikkate alınmıştır. Küresel parçacıklar için n=3, silindirik parçacıklar için n=6 |
| Jeffrey | $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1 + 3\beta\Phi + (3\beta^2 + \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3}{16} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + \frac{3\beta^4}{2^6} + \dots)\Phi^2$ | Yüksek dereceli terimler gelişigüzel dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir. |
| Davis | $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)\Phi}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\Phi} [\Phi + f(\alpha)\Phi^2 + f(\alpha)\Phi^3]$ | Yüksek dereceli terimler gelişigüzel dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir. f(10)=2.5 f(∞)=0.5 |
| Lu-Lin | $\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = 1 + a\Phi + b\Phi^2$ | Küresel ve küresel olmayan parçacıklar için geçerlidir. Küresel parçacıklarda a=10 için, a=2.25, b=2.27 ve a=∞ için, a=3.00, b=4.5 Yakın ve uzak olan çiftlerin etkileşimleri dikkate alınır. |
| Bonnecaze-Brady | Sayısal simülasyon | İki veya daha fazla parçacık arasındaki yakın ve uzak olan etkileşimleri dikkate alınır. |

Çizelge 1.1. Nanoakışkanlar için etkin ısıl iletkenlik modelleri (Eastman, J.A. vd., 2001).

2. TEMEL BİLGİLER

Bu kesimde, deneysel ve deneysel sonuçlar bölümlerinde verilen bilgileri tamamlamak amaçlanmıştır. Öncelikle ısı iletiminin genel tanımı yapılarak, katı, sıvı, gaz ve nanoparçacıkların ısı iletkenliklerinin bileşenleri incelenecektir.

2.1. Isı İletimine Giriş

2.1.1. Isıl İletkenlik

Bir katının ısı iletkenlik katsayısı uzun bir çubukta dT/dx sıcaklık gradienti altında kararlı ısı akışı için (1) ,

$$q = \lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

ifadesi verilir. Burada λ ısı iletkenlik katsayısı, q ısı enerji akısı, yani birim kesitten birim zamanda iletilen enerjidir (Kittel C., 1986).

Bu denklem ısı enerji transferinin gelişigüzel bir süreç olduğunu ifade eder. Enerji cismin bir ucundan girip doğrudan diğer uçtan çıkmaz; cisim için de saçılmalar yoluyla difüzyona uğrar. Eğer enerji hiçbir etkileşme olmadan doğrudan diğer uca gitmiş olsaydı, ısı akısı ifadesi sıcaklık gradientine değil, uzunluk ne olursa olsun, sadece iki uç arasındaki ΔT sıcaklık farkına bağlı olurdu. Fakat iletkenlik olayının sahip olduğu gelişigüzellik, sıcaklık gradientini ve ortalama serbest yolu için içine katar (Kittel C., 1986).

Gazların kinetik teorisinde yaklaşık olarak, ısı iletkenlik katsayısı (2),

$$\lambda = \frac{1}{3} Cvl \quad (2)$$

olarak ele alınır. Burada C birim hacim için ısı sığası, v ortalama parçacık hızı ve l çarpışmalar arasında parçacığın ortalama serbest yoludur. Debye tarafından dielektrik katıların ısı iletkenliği hesabında ise, C için fonon ısı sığası, v için fonon hızı ve l için fonon ortalama serbest yol olarak ifade edilir (Kittel C., 2006).

Parçacığın yoğunluğu n olan bir ortamda x yönünde ilerleyen parçacık akısı $\frac{1}{2} n \langle |v_x| \rangle$ olur. “ $\langle \rangle$ ” ortalama değeri ifade eder. Denge durumunda aynı büyüklükte fakat ters yönde bir akı daha vardır.

Isı sığası c olan bir parçacık, sıcaklığı $T+\Delta T$ olan bir yerden sıcaklığı T olan diğer bir yere geçtiğinde $c\Delta T$ kadar bir enerji bırakır. Parçacığın ortalama serbest yolunun iki ucu arasındaki sıcaklık farkı (3),

$$\Delta T = \frac{dT}{dx} l_x = \frac{dT}{dx} v_x \tau \quad (3)$$

olup τ çarpışmalar arasındaki ortalama zaman aralığını gösterir.

Her iki yön için net enerji akısı (4),

$$j_u = -n \langle v_x^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} = -\frac{1}{3} n \langle v^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

olur. Fononlar için v sabit olduğundan, $\langle v^2 \rangle = v^2$ alınır, $l \equiv v\tau$ ve $C \equiv nc$ yazılırsa

$$j_u = -\frac{1}{3} C v l \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

olur. Buradan ısı iletkenlik katsayısı (6),

$$\lambda = \frac{1}{3} C v l \quad (6)$$

olarak bulunur (Kittel C., 1986).

2.1.2. Katıların Isıl İletkenliği

Katıhal malzemelere modern bakış açısına göre, katı fazındaki serbest elektron ve atomlar kristal örgü sınırları içinde kalırlar. Buna göre, ısı enerjinin geçişi iki olgudan kaynaklanır; serbest elektronların yer değiştirmesi ve örgü titreşim dalgaları olan ses kuvantalarıdır (fonon). Bu etkiler sonucunda, ısı iletim katsayısı λ , elektronik bileşen λ_e ve kristal örgü bileşeni λ_l 'nin toplamı olacak biçimde yazılabilir (7).

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_l \quad (7)$$

λ_e , elektrik özdirenci ρ_e ile yaklaşık olarak ters orantılıdır. Saf metaller düşük ρ_e 'ye sahip olup bunlar için λ_e , λ_l 'den çok daha büyüktür. Buna karşı, büyük ρ_e 'ye sahip alaşımlar için λ_l 'nin λ 'ya katkısı önemlidir. Metal olmayan katılar için, λ öncelikle örgü atomları arasındaki etkileşimin frekansına dayanan λ_l ile belirlenir. Örgü dizilişindeki düzenliliğin λ_l üzerinde önemli bir etkisi vardır. Kuvartz gibi kristal (iyi sıralanmış) malzemeler cam gibi amorf malzemelerden daha yüksek bir ısı iletim katsayısına sahiptir. Gerçekte, elmas ve berilyum oksit gibi metal olmayan kristal katılar için λ_l , alüminyum gibi iyi iletkenler ile ilgili λ değerlerini aşacak kadar büyük olabilir (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981).

2.1.3. Sıvı ve Gazların Isıl İletkenliği

Katıhale oranla akışkan haldeki moleküller arası mesafe daha büyük ve moleküllerin hareketleri daha gelişigüzel olduğundan ısı enerji geçişi daha azdır. Bu nedenle, gazların ve sıvıların ısı iletim katsayıları genellikle katılarınkinden küçüktür (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981).

Sıcaklık, basınç ve kimyasal türünün bir gazın ısı iletim katsayısına olan etkisi, gazların kinetik teorisi ile açıklanabilir. Bu teoride ısı iletim katsayısının birim hacimdeki parçacık sayısı n , ortalama moleküler hız c ve bir molekülün bir çarpışmadan önce kat ettiği ortalama mesafe olan ortalama serbest yol l ile doğrudan orantılıdır. Bu nedenle ısı iletkenlik katsayısı (8),

$$\lambda \propto n\bar{c}l \quad (8)$$

ile orantılıdır. \bar{c} , sıcaklığın artışı ve moleküler kütlelerin azalması ile arttığı için, bir gazın iletim katsayısı sıcaklık artışı ve moleküler ağırlığın azalması ile artmaktadır. Bununla beraber, n ve l gaz basıncı ile sırasıyla doğru ve ters orantılı olduğundan ısı iletim katsayısı basınçtan bağımsızdır (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981; Cengel, Yunus A., 2003).

Sıvı hal ile ilgili moleküler koşullar daha zor tanımlanır. Bu nedenle sıvılar için ısı iletim katsayısını açıklayan fiziksel mekanizma iyi bilinmemektedir. Metal olmayan sıvıların ısı iletim katsayıları su ve gliserin dışında sıcaklık artışı ile genellikle azalmaktadır. Bu özellik kritik nokta çevresi dışında basınca duyarsızdır. Ayrıca, moleküler ağırlığın artışı ile ısı taşınım katsayısı azalır. Doymuş sıvıların ısı iletim katsayısı değerleri genellikle sıcaklığın fonksiyonu ile değişir.

Sıvı metaller, nükleer güç tesislerinde olduğu gibi yüksek akı uygulamalarında kullanılır. Bu tür sıvıların ısı iletim katsayıları, metal olmayan sıvılarınkine oranla çok daha büyüktür (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981).

2.1.4. Nanoakışkanların Isıl İletkenliği

Daha önce de belirtildiği gibi, bir katı metalin ısı iletkenliği temel akışkanınkinden yüksek olduğu için temel akışkan içerisine katılan küçük katı metaller, akışkanın ısı iletkenliğini arttırmaktadır. Nanoakışkan içerisine katılan bu parçacıkların çapı 0.1 μm ' nin altında olması nedeniyle hareketleri düzensizdir. Bununla beraber nanoparçacıklar, akışkan içerisindeki moleküller ile çarpıştıklarında rastgele yönde hareket ederler. Kattetikleri yolun cebirsel toplamı da sıfırdır. Bu tip bir hareket Brownian hareketi olarak tanımlanır. Parçacık boyutu küçüldükçe Brownian hareketi ve hareket etkinliği artar. Bu hareketin yarattığı kuvvet akışkan içerisinde etki eden toplam net kuvvetin (yerçekimi ve akışkanın kaldırma kuvvetler) büyüklüğüne hemen hemen eşittir. Bu nedenle nanoparçacıklar sıvı içerisinde ortam sıcaklığına da bağlı olarak yüzerler. Nanoparçacıkların sıvı içerisindeki hacimsel oranlarının küçük olduğu durumlarda akışkanın ısı iletiminin iyileştirilmesinde Brownian hareketinin rolü büyüktür. Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı (9);

$$\lambda = \lambda_{durgun} + \lambda_{Brownian} \quad (9)$$

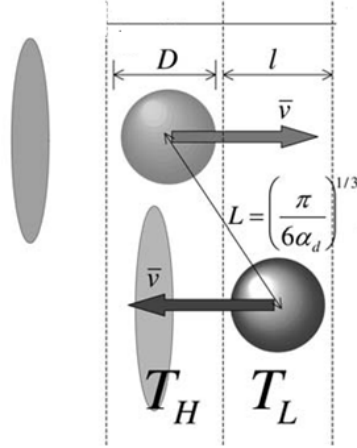
ifadesi ile verilir. λ_{durgun} , durgun nanoakışkanın ısı iletkenliği olup Maxwell eşitliği ile verilmektedir (Koo, Junemoo vd., 2004). Bu ifade (10),

$$\lambda_{durgun} = \lambda_f \left(1 + \frac{3 \left(\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right) - 1 \right) \Phi}{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} + 2 \right) - \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_f} - 1 \right) \Phi} \right) \quad (10)$$

Eşitlikte, λ_p , nanoparçacığın ısı iletkenlik katsayısı; λ_f , akışkanın ısı iletkenlik katsayısı; Φ , nanoakışkanın parçacık hacmine oranı olarak verilmektedir. $\lambda_{Brownian}$ ifadesini türetmek için Şekil 2.1' deki gibi, l mesafesinin, sıcaklık gradientinin ve parçacıkların tek boyutlu hareketlerinin değişmediği farz edilir. Bu durumda parçacıklar \bar{v} ortalama hızı ile l mesafesini $\Delta t = l/\bar{v}$ kadar sürede alır. \bar{v} ortalama hızı ise (11),

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{18\kappa T}{\pi\rho_d D^3}} \quad (11)$$

ile verilmektedir (Probstein, 2003; Koo, Junemoo vd., 2004). κ , Boltzman sabiti; ρ_d parçacık yoğunluğu; D , parçacığın çapı ve T ise akışkanın sıcaklığıdır.



Şekil 2.1. Brownian hareketi yapan nanoparçacığın hareketi.

Sıcaklık gradienti altında parçacıkların herhangi bir yönde hareket etme olasılığı ρ ise, parçacıkların taşıyacakları net enerji miktarı (12),

$$q_{net} = \frac{\Delta Q}{A\Delta t} \approx \frac{(\rho N m_d) c_v (T_L - T_H)}{A\Delta t} = -\frac{(\rho N m_d) c_v \frac{\Delta T}{l}}{A\bar{v}dt} \quad (12)$$

ile verilir. $\frac{\Delta T}{l} \rightarrow \nabla T$; N , ilgilenilen bölge içerisindeki parçacık sayısı; m_d , nanoparçacık kütlesi; ρ_d , nanoparçacığın yoğunluğu; c_v , parçacığın özgül ısısı ve A , bölgenin kesit alanı olarak ifade edilmiştir. Nanoparçacığın kütlesi m_d ve hacmi V_d olarak verilirse kütlesi, $m_d = \rho_d V_d$ şeklinde yazılır. $A\bar{v}dt$ eşitliği ise bölgenin hacmine eşittir ve V ile ifade edilirse eşitlik (12),

$$q_{net} \approx -\rho \frac{NV_d}{V} \rho_d c_v \bar{v} D \nabla T \quad (13)$$

$$q_{net} = -\lambda_{Brownian} \nabla T \quad (14)$$

dönüşür (14). Bu durumda nanoparçacıkların akışkan içerisindeki hareketlerinden dolayı akışkanın ısı iletimine etkisi olmaktadır. Bu durumda nanoparçacıkların etkin ısıl iletkenlik katsayılarından söz edilir.

2.2. Isı Yayılım Denklemi

Isı iletim denkleminin çözümlenmesinde asıl amaç, verilen sınır koşulları için bir ortamda sıcaklık dağılımını belirlemektir. Başka bir ifadeyle, ortamda sıcaklığın yerel olarak nasıl değiştiğini bulmaktır. Bu dağılım bilindiğinde, ortam içinde veya yüzeyinde herhangi bir noktadaki iletimle ısı akısı Fourier yasasından hesaplanabilir. Bir katı için sıcaklık dağılımı bilgisi, ısı gerilmeler, genleşme ve yer değiştirmelerin belirlenmesi ile yapısal bütünlüğün araştırılmasında kullanılabilir. Sıcaklık dağılımı ayrıca bir yalıtım malzemesinin kalınlığının optimize edilmesinde, malzeme ile kullanılan yapıştırıcı veya kaplamanın uyumunun belirlenmesinde de kullanılabilir (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981).

Bu aşamada sıcaklık dağılımı, ortamdaki sıcaklık dağılımını sağlayan bir diferansiyel denklem ile verilir. Bunun için verilen sınır koşullarında, enerji korunum ilkesi uygulanır.

İçinde kütle hareket olmayan ve $T(x,y,z)$ sıcaklık dağılımının kartezyen koordinatlarda gösterilen homojen bir ortam ele alalım. Enerji korunumu uygulanarak önce sonsuz küçük bir kontrol hacmi $dx \cdot dy \cdot dz$ tanımlanır. İkinci adım bu kontrol hacmi ile ilgili enerji etkileşimlerini ele almaktır. Sıcaklık gradientleri varsa kontrol yüzeylerinin her biri üzerinde iletimle ısı geçişi olacaktır. x , y ve z eksenleri üzerindeki kontrol yüzeylerinin her birine dik ısı iletimi sırasıyla q_x (15), q_y (16) ve q_z (17) terimleri ile gösterilir. Karşı yüzeylerdeki ısı iletimi ise yüksek mertebeden terimlerin atıldığı bir Taylor seri açılımı ile ifade edilir.

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (15)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (16)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (17)$$

Denklem 15, $x+dx$ 'teki ısı iletimini, x 'tekideğer ile dx uzunluğundaki değişiminin toplamı olarak vermektedir (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981).

Ortam içinde ısı enerji üretimi ile ilgili olarak bir enerji kaynağı terimi de bulunabilir. Bunun için zaman aralığına bağlı olarak, ısı geçiş çözümlenmeleri için uygun olan termodinamiğin birinci yasa tanımlaması aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

- t anında, bir kontrol hacmine birim zamanda giren ısı ve mekanik enerji ve buna ek olarak birim zamanda üretilen ısı enerji, dt birim zamanda depolanan enerjiye ve açığa çıkan ısı ve mekanik enerjiye eşittir (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981; Cengel, Yunus A., 2003).

Buradan, giren ve üretilen enerjilerin toplamı, çıkan enerjiden fazla olursa, kontrol hacmi içinde depolanan enerjinin miktarında bir artış olur; eğer tersi olursa depolanan enerjide bir azalma olur. Giren ve üretilen enerjilerin toplamı, çıkan enerjiye eşit olursa, kontrol hacmi içinde depolanan enerji miktarı zamanla değişmez ve sürekli rejim oluşturur. Ortam içinde ısı enerji üretimi ile ilgili olarak enerji kaynağı terimi (18),

$$\dot{E}_s = \dot{q} dx dy dz \quad (18)$$

olarak gösterilir. Burada \dot{q} , ortamın birim hacminde, birim zamanda üretilen ısı enerjidir, (W/m^3). Ayrıca, kontrol hacminde malzeme tarafından depolanan ısı iç enerjide değişimler olabilir. Malzemede bir faz değişimi olmuyorsa gizli ısı yoktur ve enerji depolama terimi (19),

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (19)$$

olarak yazılır. Burada, $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ ortamın ısı enerjisinin birim hacminde, birim zamanda değişimidir (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981).

Enerji üretim terimi (\dot{E}_g) bir tarafta ısı enerji diğer tarafta kimyasal, elektrik veya nükleer enerji içeren bazı enerji dönüşümlerini yansıtmaktadır. Malzemedeki ısı enerji diğer bazı enerji türlerinin tüketimi sonucunda üretiliyorsa terim pozitifdir (kaynak); ısı enerji tüketiliyorsa bu terim negatiftir (kuyu). Buna karşı depolanan enerji terimi (\dot{E}_{st}) madde tarafından depolanan ısı enerjinin değişimini gösterir.

Herhangi bir anda, kontrol yüzeyi üzerinden birim zamanda giren ve çıkan ısı ve mekanik enerjiler (20) sırası ile, \dot{E}_1 ve \dot{E}_0 olmak üzere,

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_g - \dot{E}_0 = \dot{E}_{st} \quad (20)$$

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q}dxdydz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (21)$$

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q}dxdydz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (22)$$

elde edilir (22). Isı iletimi Fourier yasası ile yazılabilir,

$$q_x = -\lambda dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (23)$$

$$q_y = -\lambda dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (24)$$

$$q_z = -\lambda dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (25)$$

dir, Denklem 23, 24 ve 25, Denklem 22 yerine konulursa,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (26)$$

elde edilir (26). Denklem 26 ısı yayılım denkleminin kartezyen koordinatlarda genel biçimidir. Genellikle ısı denklemi olarak bilinen bu denklem ısı iletimi çözümlemesinin temel aracıdır. Bu ifade karmaşık gibi görünse de önemli bir fiziksel olguyu, enerjinin korunumunu ortaya koymaktadır. Denklemde eğer ısı iletkenlik katsayısı sabitse, ısı denklemi,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (27)$$

biçiminde ifade edilir (27), burada $\alpha = \lambda/\rho c_p$ ısı yayılım katsayısıdır.

Isı akısı için Fourier yasası, ısı akısının yöne bağlı bir büyüklük olduğunu ifade eder. Genel olarak ısı akısı izotermal (eş sıcaklık) yüzey denilen sabit sıcaklık yüzeyine diktir. Bu durumda, iletim denkleminin (Fourier yasası) daha genel bir ifadesi,

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T = -\lambda \left(\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (28)$$

şeklinde verilir (28). Fourier yasası iletimle ısı geçişinin temel taşıdır. Bu yasa temel ilkelerden çıkartılabilecek bir yasa değildir; bunun yerine deneysel gözlemlere dayanan bir genelleştirmedir. Bu yasa ayrıca malzemenin önemli bir özelliği olan ısı iletkenlik katsayısını tanımlayan bir ifadedir. Ek olarak, Fourier yasası ısı akısının bir izoterme dik ve azalan sıcaklık yönünde olduğunu gösteren bir vektör denklemdir. Fourier yasasının katı, sıvı veya gaz fazındaki bütün maddelere uygulanabileceği bilinmelidir (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981; Cengel, Yunus A., 2003).

a- Silindirik Koordinatlarda Isı Yayılım Denklemi

Denklem 26' daki ∇ operatörü, silindirik koordinatlarda yazılırsa,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29)$$

ifadesi (29) elde edilir.

b- Küresel Koordinatlarda Isı Yayılım Denklemi

Denklem 26' daki ∇ operatörü, silindirik koordinatlarda yazılırsa,

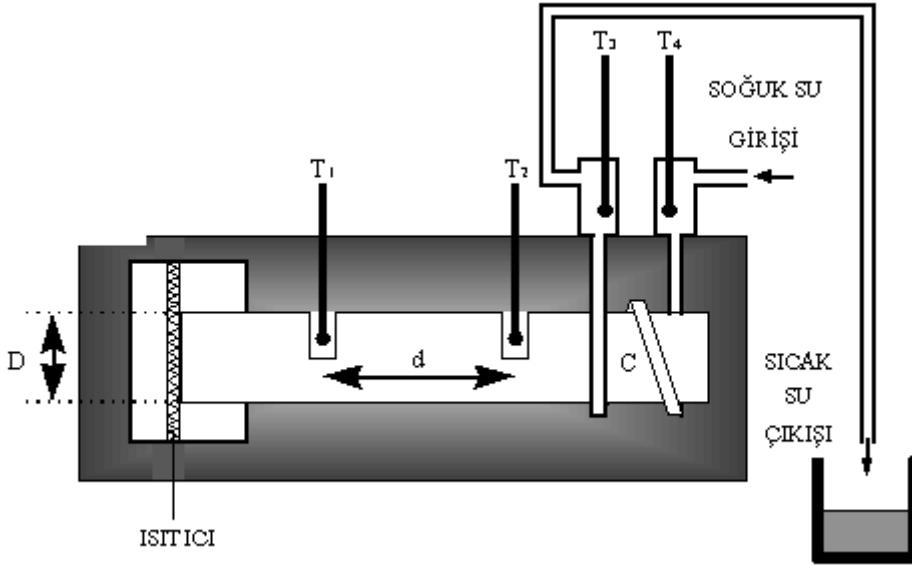
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (30)$$

ifadesi (30) elde edilir.

2.3. Isıl İletkenlik Ölçüm Teknikleri

2.3.1. Searle Yöntemi

Isı iletim katsayısı yüksek olan malzemelerin ısı iletkenliklerinin ölçümünde kullanılan bir yöntemdir. Bir malzemenin sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri incelenirken ısı yalıtımı önem kazanır. Bu nedenle ısı iletimi ölçümlerinde örneğin ısı olarak çevreden yalıtılması gerekir. Searle yönteminde, malzeme adyabatik bir ortama yerleştirilir. Malzeme bir ısıtıcı kullanılarak bir ucundan ısıtılır. Bu yöntemde Şekil 2.2' de görüldüğü gibi iki adet ısı çifti ile belirli bir d mesafesinde yerleştirilir ve bu yöntemde sıcaklık gradientini belirlemek için T_1 ve T_2 ölçümleri alınır (Collieu , Antony McB., Powney, Derek J., 1973).



Şekil 2.2. Searle yönteminin şematik gösterimi (Thermal Conductivity of a good conductor, 2006).

Yöntemde malzemenin diğer ucu soğutma suyu ile soğutulur. Şekilde belirtien T_3 ve T_4 soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları kaydedilir. Sıcak su miktarı zamana bağlı olarak ölçülür. Bu yöntemde geometriye bağlı olarak ısı iletkenlik katsayısını veren ifade,

$$\lambda = -Q \left(A \frac{dT}{dx} t \right)^{-1} \quad (31)$$

şeklindedir.

Q, t zamanda malzeme üzerine aktarılan enerji miktarı,

A, malzemenin kesit alanı,

$\frac{dT}{dx}$, sıcaklık gradientidir.

Malzemeye verilen enerji miktarı, $Q = mc(T_3 - T_4)$ ' dir. Burada suyun ısı kapasitesi, $c = 4190 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ' dir.

$-dT = T_1 - T_2$, $dx = d$ ve $A = \frac{\pi D^2}{4}$ olmak üzere,

$$mc(T_3 - T_4) = \lambda \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{T_1 - T_2}{d} \right) t \quad (32)$$

$$\lambda = \frac{4mcd (T_3 - T_4)}{\pi D^2 (T_1 - T_2) t} \text{ (Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} \quad (33)$$

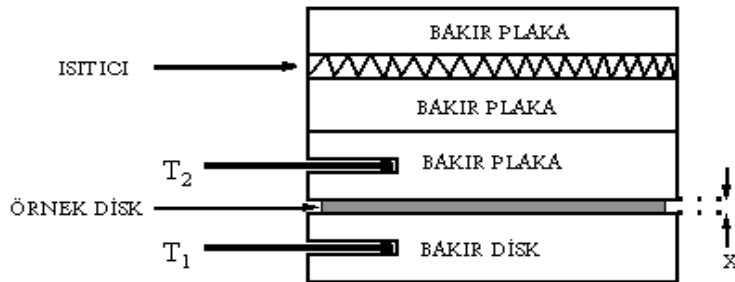
denklemini (33) elde edilir. Sıcaklık değişimleri belirlenerek ve diğer sabit parametreler de kullanılarak ısı iletkenlik katsayısı hesaplanır. Bu yöntemde ısı iletkenlik katsayısındaki belirsizlik ise;

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta T_3 + \Delta T_4}{T_3 - T_4} + \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{T_1 - T_2} + \frac{\Delta t}{t} \quad (34)$$

ifadesi hesaplanır (33).

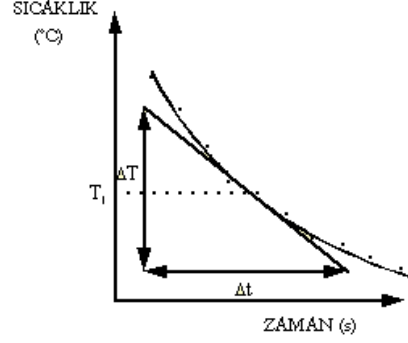
2.3.2. Lee Disk Yöntemi

Isıl iletkenliği kötü olan malzemelerin ısı iletkenliklerinin ölçümünde kullanılan bir tekniktir. Şekil 2.3' de Lee Disk yönteminin şematik bir şekli verilmiştir. Bu yöntemde örnek disk şeklindedir ve x kalınlığındaki örnek disk, bakır disk ile plaka arasına yerleştirilir. Bakır disk ile plakanın sıcaklıkları ısı çiftleri yardımı ile ölçülür. Örneği ısıtmak için bakır plakaya ısıtıcı tel yerleştirilir. Örnek belli bir T_2 sıcaklığına kadar ısıtılır. T_2 ve T_1 sıcaklıkları ölçülür (Collieu, Antony McB., Powney, Derek J., 1973).



Şekil 2.3. Lee Disk yönteminin şematik gösterimi (Collieu, Antony McB., Powney, Derek J., 1973).

İkinci aşamada T_1 sıcaklık ölçümleri alınan bakır disk üzerine ısıtıcı plaka yerleştirilir ve doğrudan ısıtılır. Isıtıcı plaka alınır ve ısıtılan disk üzerine ısı yalıtkanlığı iyi olan bir malzeme yerleştirilir ve zamana bağlı Şekil 2.4' de belirtilen soğuma eğrisi elde edilir.



Şekil 2.4. Bakır diskin soğuma eğrisi (Measurement of thermal conductivity of a poor conductor by Lee's Disk method, 2006).

Elde edilen eğriden, T_1 noktasındaki eğim (dT/dt) hesaplanır. Bakır diskin soğuması ile kaybettiği enerji (35),

$$Q = mc \frac{dT}{dt} \quad (35)$$

şeklinindedir. Denklemden, c bakırın ısı kapasitesi, $385 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ($300 \text{ K}'$ de); m , bakır diskin kütlesidir.

Örneğin yarıçapı d olmak üzere, kesit alanı $A = \frac{\pi d^2}{4}$ dir.

Isıl iletkenlik katsayısı denklemini (36),

$$\lambda = Q \left(A \frac{T_2 - T_1}{x} \right)^{-1} \quad (36)$$

ile verilir ve yeniden düzenlenirse,

$$\lambda = \left(mc \frac{dT}{dt} \right) \left(\frac{\pi d^2}{4} \frac{T_2 - T_1}{x} \right)^{-1} \quad (37)$$

İfadesine dönüşür (37) ve ısıl iletkenlik katsayısı hesaplanır.

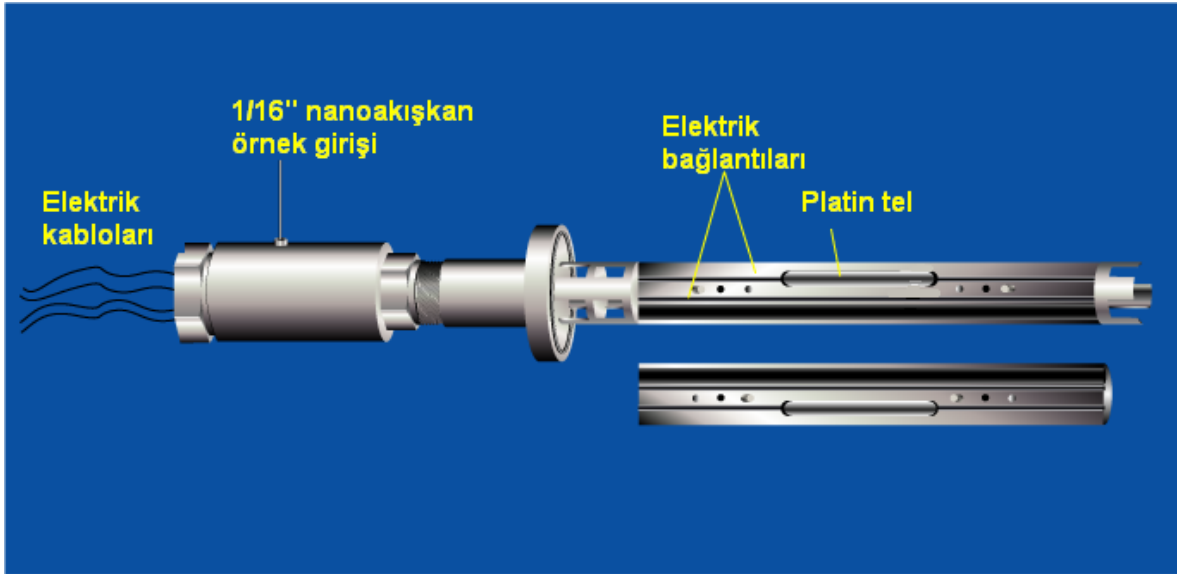
Bu yöntem ile ilgili ısı iletkenlik katsayısı ölçümlerindeki belirsizlik ise,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\left(\frac{dT}{dt}\right)}{\frac{dT}{dt}} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta T_2 + \Delta T_1}{T_2 - T_1} \quad (38)$$

ile belirlenir.

2.3.3. Sıcak Tel Yöntemi

Akışkanların ve nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısı ölçümlerinde sıcak tel yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.5' de görüldüğü gibi sıcak tel yönteminde genellikle çapı mikro boyutlarında olan platin tel kullanılır. Yöntemde temel olarak telin, radyal doğrultuda sonsuz olarak öngürülen çok uzun bir silindirik örneğin eksenine yerleştirildiği varsayılır. Başlangıçta izotermal örnek, ısıtıcı tel tarafından üretilen Joule ısı ile ısı enerji verilmektedir. Eğer tel ihmal edilebilir çapta ve sonsuz uzunlukta olduğu koşulda, ısı aktarımı radyal doğrultudadır.



Şekil 2.5. Sıcak tel yöntemi deney düzeneği (Thermal Conductivity of Liquids and Gases, 2006).

Carslaw ve Jaegar teorisine göre ısıtıcı tel üzerinden sürülen sabit akım için örnek ekseninden belli bir r mesafede t süre sonra ısının varyasyonu (Frusteri, F., 2005; Carslaw, H.S., 1959),

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\alpha} \int_{r^2/4\pi\alpha}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\frac{Q}{4\pi\alpha} E_i\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (39)$$

ile ifade edilir. α ısı yayılım katsayısı, Q ise ısıtıcı tarafından aktarılan enerjidir.

E_i exponansiyel integral (40) olarak,

$$-E_i\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = -E_i(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^u}{u} du \quad (40)$$

ile verilir ve küçük x değerleri için,

$$E_i(-x) = \gamma + \ln(x) - x + \frac{1}{4}x^2 + Q(x^3) \quad (41)$$

güç serisine açılımı yapılır. $Q(x^3)$ güç serisinin düzeltme faktörü olarak ifade edilir.

Genişletilmiş zaman aralığında $x = \frac{r^2}{4\alpha t} \ll 1$ koşulu ile üçüncü ve dördüncü terimler ihmal edilebilir ve bu durumda eşitlik(39),

$$T(r, t) = -\frac{Q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - \gamma \frac{Q'}{4\pi\lambda} \quad (42)$$

ifadesine dönüşür. ρ , örneğin yoğunluğu ve c_p , sabit basınçta örneğin özgül ısı olmak üzere,

$Q = \frac{Q'}{\rho c_p}$ ve $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ parametreleri için Denklem (42),

$$T(r_0, t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{cr_0^2}\right) \right) \quad (43)$$

denkleme dönüşür. Denklem 43' de $c = e^\gamma$ Euler sabiti olmak üzere ısı iletkenlik katsayısı, λ çekilirse,

$$\lambda = (Q'/4\pi)/(dT/(d(\ln(t))) \quad (44)$$

eşitliği elde edilir.

Denklem 44' de $Q'=VI$ ısıtıcıya uygulanan güçtür ve denklemde yerine konulursa,

$$\lambda = \frac{VI}{4\pi L} dT/d(\ln(t)) \quad (45)$$

elde edilir (Franco, Alessandro, 2007; Frusteri, F., 2005).

Sıcak tel yönteminde, ısı iletkenlik ölçümlerindeki duyarlılık tel üzerindeki sıcaklığın ölçüm duyarlılığına bağlıdır. Isıl iletkenliğin ölçümlerindeki sistematik hataların temel kaynağı bu duyarlılığın belirlenmesindeki güçlüktür (Nandy Putra, 2003). Bu yöntemde sıcaklık algılayıcısı olarak kullanılan platin tel aynı zamanda termometre olarak da kullanılır. Platin direnç termometresinin dR/dT duyarlılığının sıcaklıkla değişimi ölçülür. Platin direnç elektriksel direnç ölçüm sistemi kullanılarak $R(T)$ fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyon kullanılarak, sıcak tel üzerideki ısının soğurulma hızı hesaplanarak akışkanın ısı iletkenliği ölçülür.

3. DENEYSEL

Deneysel başlığı altında bu çalışma kapsamında nanoakışkanların ısı iletkenlik ölçümü için kullanılan sıcak tel yöntemi ve geliştirilen bilgisayar kontrollü ısı iletkenlik ölçüm sisteminden söz edilecektir. Akışkan olarak kullanılan 2-propanol alkol ve saf suya iki farklı yöntemle farklı boyutlarda hazırlanan bakır ve gümüş nanoparçacıklar değişik miktarlarda katılarak ısı iletkenliğe etkileri bu ölçüm düzeneği kullanılarak irdelenmiştir. Nanoparçacıkları hazırlamakta kullanılan mekanik öğütme ve asal gaz ile yoğunlaştırma yöntemi ile ilgili geniş bilgide bu başlık altında verilecektir

3.1. Isıl İletkenlik Ölçümü

Malzemelerin ısı iletimlerinin belirlenmesinde maddenin genellikle termofiziksel özelliklerini kullanmak gerekir. Termofiziksel özellikler ise aktarım ve termodinamik özellikler olarak iki ayrı kategoriye ayrılır. Aktarım özellikleri, ısı geçişi için λ ısı iletim katsayısı ve momentum geçişi için ν kinematik viskoziteyi kapsamaktadır. Yoğunluk (ρ) ve özgül ısı (c_p) iki özellik olup termodinamik çözümlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle hacimsel ısı kapasitesi olarak adlandırılan ρc_p (J/m^3K) malzemenin ısı enerji depolama kapasitesini ölçer. Yüksek yoğunluklu maddeler genellikle küçük özgül ısılarına sahip olduklarından, çok iyi enerji depolayabilen bir çok katı ve sıvının ısı kapasiteleri birbirine yakındır ($\rho c_p > 1 MJ/m^3K$). Buna karşın çok küçük yoğunlukları nedeniyle gazlar ısı enerji depolama için uygun değildir ($\rho c_p \approx 1 kJ/m^3K$) (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981).

Isı iletim çözümlemelerinde, ısı iletim katsayısının ısı kapasitesine oranı önemli bir özellik olup, α ısı yayılım katsayısı olarak verilir ve m^2/s birimindedir. Isı yayılım katsayısı (46) daha önce de belirtildiği gibi,

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (46)$$

ifadesi ile verilir. α değeri malzemenin ısı enerjiyi iletme yeteneğinin ısı enerji depolama yeteneğine oranıdır. Bu eşitlik kullanılarak ısı iletim katsayıları ölçümlerinden bir malzemenin ısı yayılım katsayıları hakkında bilgi elde edilebilir.

Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada ısı iletkenlik ölçüm sistemi kurularak, nanoakışkanların ısı iletim katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Isı iletim ölçüm yöntemi olarak literatürde genellikle nanoakışkan sıvılar için sıcak tel yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm yönteminde kurulan ölçüm sistemi için ilgilenilen sıcaklık aralığı, örneğin boyutları, örneğin fiziksel hali ve incelenecek fiziksel nicelikler etkin olacaktır. Bu parametreler göz önüne alınarak, bu çalışma kapsamında sıcak tel yöntemi sadeleştirilerek genel ve bilgisayar kontrollü ısı iletkenlik ölçüm sistemi kurulmuştur.

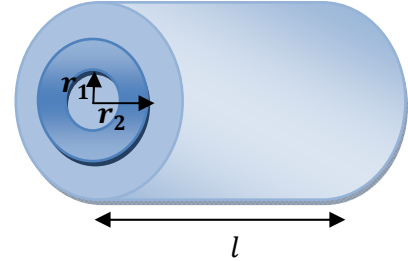
3.1.1. Yöntem

Temel olarak, tek radyal boyutta düzgün dağılımlı hacimsel ısı üretimi

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda 2\pi r l \frac{dT}{dr} \quad (48)$$

ifadesi ile verilir. Burada dQ/dt birim zamanda uygulanan enerjidir. Kullanılan yöntemde, silindirik koordinatlarda tek boyutlu radyal doğrultuda düzgün dağılımlı hacimsel ısı üretimi olan ve ısı kaçağı olmayan hacim içerisinde izoterm yüzey sıcaklıkları ölçülerek akışkanların ısı iletkenlikleri bulunabilmektedir. Buna göre eşitlik yeniden düzenlenirse,

$$\lambda = \frac{1}{2\pi l} \frac{dQ}{dt} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \frac{1}{(T_2 - T_1)} \quad (49)$$



formunda yazılarak ölçülebilen niceliklere ulaşılır. Burada dQ/dt , enerjinin zamanla değişimi olarak ifade edilmişti ve sıcak tel yönteminde ısıtıcıya uygulanan güce ($P=I \cdot V= dQ/dt$) eşittir. Isıtıcıya uygulanan güç deney süresince sabit tutulmalıdır.

Isıl iletkenlik ölçümlerinde elde edilen verilerin değerlendirilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada ısı iletkenlik ölçüm sonuçlarının hesaplanması için $\Delta T (T_2 - T_1)$ sıcaklık farkı, gerilim değerleri ölçülür. Uygulanan sabir akım ve ölçülen gerilim değerlerinden güç hesaplanır. Güç ve diğer sabit değerler kullanılarak ısı iletkenlik katsayısı hesaplanır. Bu amaçla LabVIEW

programlama dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır (Ek 1). Sabir sıcaklıkta ΔT hesaplandıktan sonra bu sıcaklık için ısı iletim katsayısı hesaplanır.

3.2. Sistem

Isı iletim ölçüm sistemi şematik olarak Şekil 3.2' de verilmiştir. Görüldüğü gibi sistemdeki ölçüm düzeneği iki bölümden oluşmaktadır;

a- Deney Düzeneği

b- Elektronik Ölçüm Sistemi ve Kişisel Bilgisayar

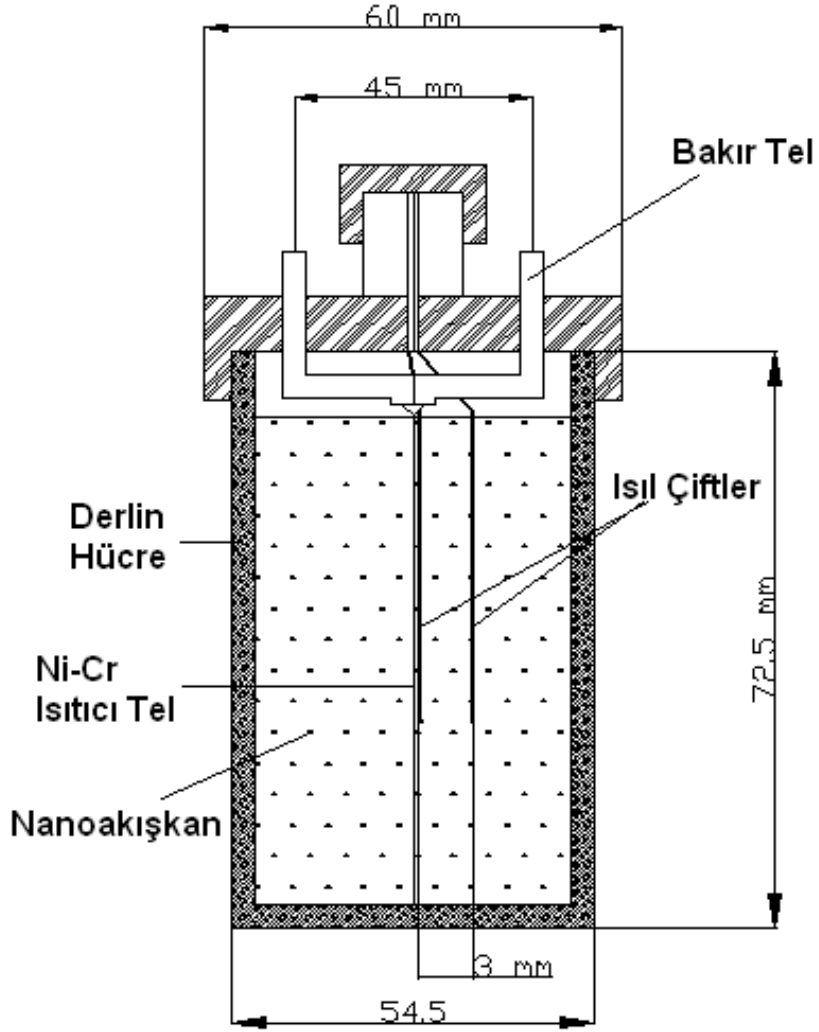
a- Deney Düzeneği

Deney düzeneği, ısı iletimi ölçümünün temelini oluşturmaktadır. Deney düzeneği sıcaklıktaki homojenliği sağlamak için silindirik geometride tasarlanmıştır. Şekil 3.1' den görüldüğü gibi en dışta çapı 54,5 mm yüksekliği 72,5 mm delrinden yapılmış örnek hücresi bulunmaktadır ve tüm deney düzeneği içerisine yerleştirilmiştir. Silindirik hücrenin deney bölgesinin hacmi 80 ml' dir. Kapak üzerinde iki adet 0,3 mm ve 1,0 mm çapında kromel–alumel ısıl çiftler, elektriksel izolasyonlu 0,5 mm çapında, 58,0 mm uzunluğunda nikel–krom alaşımından yapılmış ısıtıcı tel bulunmaktadır. Sistemde ısı üretimi radyal geometride gerçekleştirebilmek için ısıtıcı tel deney düzeneğinin simetri eksenine doğrultusunda yerleştirilmiştir. Deney düzeneği, ileriye dönük olarak manyetik nanoakışkan sıvıların ısı iletkenliklerini ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. Nanoakışkandaki manyetik nanoparçacıkların akım taşıyan telden kaynaklanan manyetik indüksiyonların neden olabileceği birleşme etkilerini kaldırmak için ısıtıcı tel iki kat burğu şeklinde sarıldı. Isıtıcı telin 25 °C oda sıcaklığındaki direnci 2,2 Ω ' dur.

Isıtıcı teli kapağa sistemin simetri eksenine doğrultusunda kapak üzerine montelemek ve akım uygulamak için 1,0 mm çapında elektriksel izolasyonu bulunan iki adet bakır tel kullanıldı. Bakır teller ucuna 0,6 mm çapında 5,0 mm uzunluğunda delikler açıldı. Açılan deliklere ısıtıcı telin izolasyonsuz uçları yerleştirilerek preslendi.

0,3 mm çapındaki kromel–alumel ısıl çift ısıtıcı tel üzerine “staycast” ile ısı iletimi yüksek olan özel bir yapıştırıcı ile sabitlendi. 1,0 mm çapındaki ikinci bir kromel-

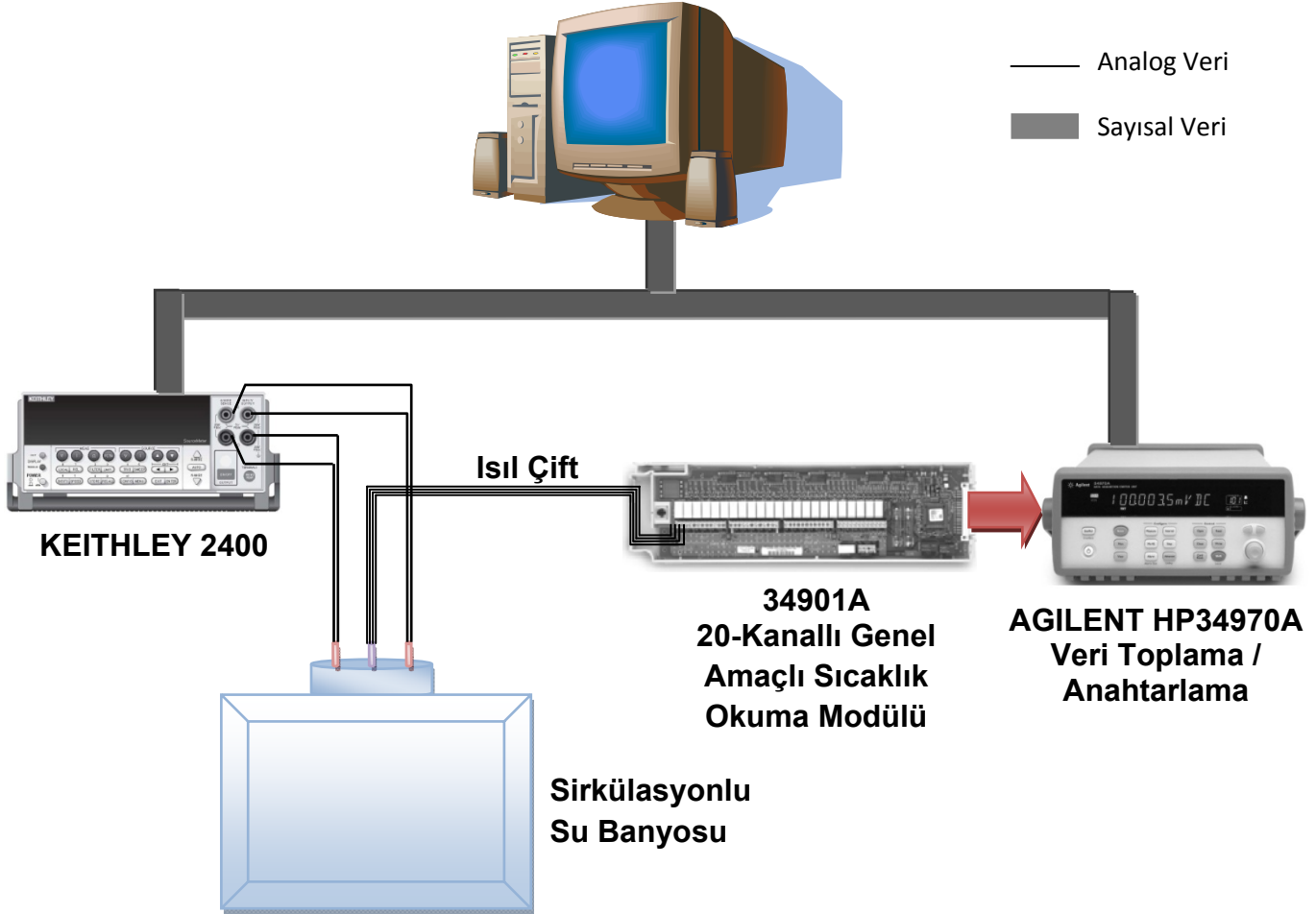
alumel ısıl çifti deney düzeneğinin simetri ekseninden, radyal doğrultuda 3,0 mm mesafeye yerleştirildi.



Şekil 3.1. Deney düzeneği

b- Elektronik Ölçüm Sistemi ve Veri Toplama

Elektronik ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.2. de verilmiştir. Görüldüğü gibi deney bölgesi ile ölçü aletleri ve ölçü aletleri ile kişisel bilgisayar arasında iki şekilde bilgi alışverişi olmaktadır. Bunlar, analog ve sayısal bilgilerdir. Sayısal bilgi kişisel bilgisayar ve ölçü altelerinde bulunan IEEE488 arabirimi ile yapılmaktadır. Kişisel bilgisayar bu arabirim ile sayısal kontrol bilgilerini ölçü aletlerine gönderirken ölçü aletlerinden gelen sayısal bilgileri de değerlendirmektedir. Ölçü aletleri ise deney bölgesinden gelen akım, gerilim ve sıcaklık analog sinyalleri sayısal bilgiye çevirerek bilgisayara aktarmaktadır. Bütün bu bilgi akışı ve ölçü aletlerinin kontrol bilgileri, LabVIEW ile derlenen bilgisayar programı (EK-1) ile yapılarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.2. Elektronik ölçüm sistemi şematik gösterimi

Örneğe sabit güç uygulamak için Keithley 2400 sabit akım kaynağı kullanılmaktadır, ısıtıcı tel üzerine düşen gerilim ise 51/2 hane, Keithley 2400 ile de okunmaktadır. Bilgisayar, okunan bu gerilim değerini kullanarak sisteme uygulanan ortalama gücü hesaplamaktadır. Elektriksel teller ve kontaklardan kaynaklanan hataları azaltmak amacıyla ölçümler dört nokta yöntemi ile yapılmıştır.

HP34970 veri toplama / anahtarlama ünitesi (Data Acquisition / Switch) ve 34901A 20-kanallı genel amaçlı sıcaklık okuma modülü (20-Channel General-Purpose Multiplexer) ile ısı çiftlerinin uçlarındaki sıcaklıklar ölçülmektedir.

Deneyde çevre ile olan ısı yalıtımı sağlayabilmek ve etkin bir kontrol yapabilmek için deney düzeneği Phywe marka M6 model sirkülasyonlu su banyosu içinde yerleştirilmiştir.

3.3. Deney Akışı

Bir ısı iletkenlik deneyinde aşağıdaki işlemler sırayla yapılır:

- Sirkülasyonlu su banyosunun termostat ayarı ile ölçümün yapılacağı ortam sıcaklığı ayarlanır.
- Nanoakışkan sıvı hazırlanır. Nanoakışkanı oluşturan nanoparçacıklar sıvı içerisinde homojen dağılım göstermesi için ses üstü temizleyicide yeteri kadar bekletilir. Ses üstü temizleyici haricinde ses üstü parçalayıcı da kullanılabilir.
- Hazırlanan nanoakışkan örnek haznesine yerleştirilir ve sirkülasyonlu su banyosunda ısı dengeye ulaşıncaya kadar beklenir. Bu ısı çiftlerinin bulunduğu konumların sıcaklıkları Agilent HP34970A üzerinden okunarak izlenir.
- Dört nokta ölçüm modunda iken Keithley 2400 üzerinden Nikel-Krom ısıtıcı tele uygulanan güç belirlenir (25 °C de 2,2 Ω dur).
- Bu adımda bilgisayardan ısı iletkenlik ölçüm programı çalıştırılır. Bilgisayara kütük ismi, örneği tanımlama, ısıtıcı tele sürülen akım değeri,

sıvının yüksekliği, ortam sıcaklığı ve ısılı çiftler arasındaki mesafe değerleri girilerek ölçüm başlatılır.

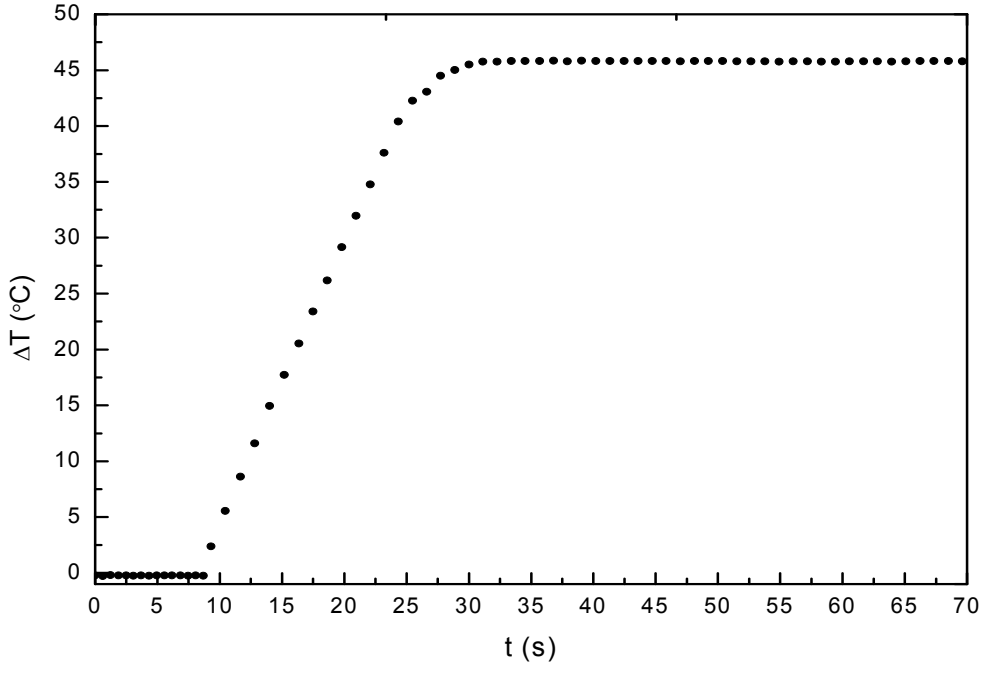
- Ölçüm sırasında ısıtıcıya sabit akım uygulanarak sıcaklığın zamanla değişimi izlenir ve kaydedilir.

Sonuçta 250 ms aralıklarla kütüğe zaman, ısılı çiftlerden okunan sıcaklıklar, ısıtıcı tel uçları arasındaki potansiyel değişimi yazılır. ΔT , ısılı çiftler arasındaki sıcaklık verileri, yazılan bilgisayar programı ve Origin Corporation' a ait Origin paket programı yardımı ile analiz edilir. Analizler sonucunda akışkana ait ısılı iletkenliği Denklem 49 bağıntısından hesaplanır.

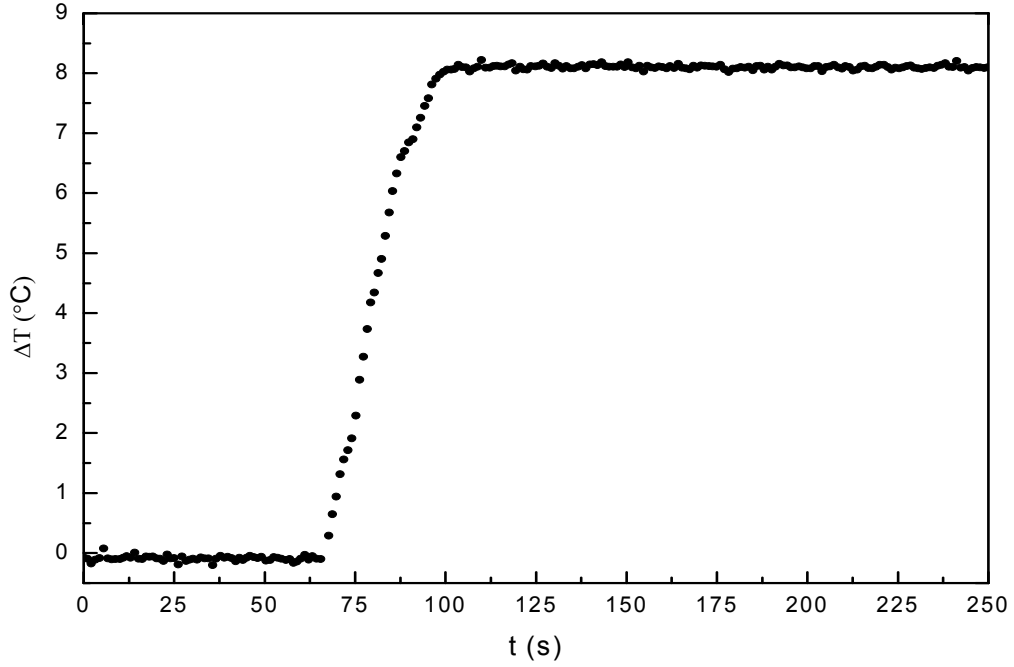
3.4. Ölçüm Sistemi Özellikleri ve Hataların Analizi

Sistemi daha iyi tanımlamak ve doğruluğunu saptamak için %99,9 saflıkta 2-propanol alkol ve saf suyun ısılı iletkenliği 25 °C oda sıcaklığında ölçüldü. Ölçüm sırasında ısıtıcı tele 800 mA akım uygulandı.

80 ml %99,9 saflıkta 2-propanol alkol ile yapılan ölçümde Şekil 3.3 görüldüğü gibi 30 s sonra sıcaklık farkı $45,8 \pm 0,1$ °C olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden ısılı iletkenlik $0,139 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Aynı koşullarda Şekil 3.4' de verildiği gibi saf su için yapılan ölçümlerde sıcaklık farkı $2,7 \pm 0,1$ °C olarak ölçüldü ve ısılı iletkenlik $0,602 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak hesaplandı. Bu değerler literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, 20 °C de 2-propanol alkolün $0,135 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve saf suyun $0,607 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olan değerleri ile uyuştüğü görüldü (Sengers, J.V., Watson, J.T.R., 1986; Cengel, Yunus A., 2003).



Şekil 3.3. 2-propanol alkol için yapılan ısı iletkenlik ölçümünde ısı ıiftler arasındaki sıcaklık farkının zamana bağılı değişimi.



Şekil 3.4. Saf su için yapılan ısı iletkenlik ölçümünde ısı ıiftler arasındaki sıcaklık farkının zamana bağılı değişimi.

a- Tekrarlanabilirlik

Sonuçların tekrarlanabilirliğini saptamak için oda sıcaklığında 3 gün süreyle, 25 °C ortamda 2-propanol alkol ve saf su ile ölçümler yapıldı. 24 saat içerisinde yapılan ölçümler 10 kez tekrarlandı.

Bu ölçümler sonucunda sistemin tekrarlanabilirliğinin % 1, saçılmaların ise % 0,7 olduğu gözlemlendi.

b- Deneysel Hatalar

Bu çalışmada uygulanan ölçüm yöntemi için ısı iletkenlik katsayısının,

$$\lambda = \frac{1}{2\pi l} \frac{dQ}{dt} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \frac{1}{\Delta T} \quad (50)$$

ifadesine eşit olduğu belirtilmişti. Burada dQ/dt ısıtıcıya uygulanan güçtür ve ölçülen büyüklükler cinsinden I·V' ye eşittir. Bu durumda ısı iletkenlik hata oranı,

$$\frac{\partial \lambda}{\lambda} \times 100 = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\partial r_1}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial r_2}{r_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\Delta T}\right)^2} \quad (51)$$

eşitliğinden (51) bulunabilir.

Deneysel hata oda sıcaklığı civarında saptandı. Bu sıcaklıklarda tipik olarak $I \approx 800$ mA, $\partial I \approx 1$ pA, $V \approx 1,76$ V, $\partial V \approx 1$ μ V, $l = 58,0$ mm, $\partial l = 0,1$ mm, $r_1 = 0,6$ mm, $\partial r_1 = 0,1$ mm, $r_2 = 3,0$ mm, $\partial r_2 = 0,1$ mm, $\Delta T = 8,1$ °C, $\partial \Delta T = 0,5$ °C değerini almaktadır. Bu veriler kullanılarak ısı iletim katsayısındaki en büyük hata oranı $\frac{\partial \lambda}{\lambda} \times 100 \approx 0,2$ olarak bulundu.

3.5. Isıl Çiftler Arasındaki Mesafe Tayini

Isıl çiftler arasındaki mesafeyi belirlemek için farklı mesafelerde ölçüm alınıp saf suyun ve %99,9 saflıkta 2-propanol alkolün 25 °C ortam sıcaklığında ısı iletim katsayıları hesaplandı. Isıtıcı tel üzerinden 800 mA değerinden akım geçirildi. Çizelge 3.1' de görüldüğü gibi ısı çiftler arasındaki maksimum aralık $3,0 \pm 0,1$ mm' de saf suyun ve 2-propanol alkolün literatürdeki değerleri ile uyuştugu görüldü (Cengel, Yunus A., 2003, Hwang, Y. vd., 2006, Zhang, Xing vd., 2006).

| Isıl Çiftler Arasındaki Mesafe (mm) | Saf Suyun Isı İletim Katsayısı (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | 2-propanol Alkolün Isı İletim Katsayısı (Wm ⁻¹ K ⁻¹) |
|---|--|---|
| 5,2 ± 0,1 | 0,812 | 0,269 |
| 4,0 ± 0,1 | 0,720 | 0,176 |
| 3,5 ± 0,1 | 0,636 | 0,156 |
| 3,0 ± 0,1 | 0,602 | 0,139 |

Çizelge 3.1. Isıl çiftler arasındaki mesafeye göre saf suyun ve 2-propanol alkolün ısı iletim katsayısı

3.6. Uygulanan Güç

Nikel-Krom ısıtıcı telin oda sıcaklığındaki direnci 2,25 Ω olduğunu söylemiştir. Bu ısıtıcıya farklı değerlerde akım uygulanarak akımın oluşturduğu gerilim dört nokta yöntemi ile okunmaktadır. Böylece nanokaşıkanaya aktarılan güç I-V bağıntısından hesaplanabilmektedir. Tüm deney boyunca gücün sabit tutulması ölçümlerin duyarlılığı açısından önemli bir parametredir. Çünkü telin direnci sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Yapılan ölçümlerden nikel-krom ısıtıcı telin direncinin 25 °C ile 60 °C sıcaklık aralığında değişimi $2,18 \times 10^{-4} \Omega/^{\circ}\text{C}$ dir. Isıtıcı telin direncinin ~% 0,4 olarak değişmektedir. Sabit akımdaki sapma ~ 1 pA civarında olması nedeni ile güçteki değişim de ~% 0,4 mertebesindedir. Tüm deneylerin oda sıcaklığında yapıldığı düşünüldüğünde güçteki değişimin deney hataları içinde kalacağı açıktır.

3.7. Yazılım

Isıl iletkenlik ölçümleri ve sonuçların değerlendirilmesi için LabVIEW dilinde yazılan programlar Ek 1' de verilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümü için yazılan program ölçü aletlerinin kontrolü ve verilerin bir kütüğe yazılmasını içermektedir. Veri analizi için yazılan program ile ΔT , dT/dt nin hesaplanmasında kullanılabilir.

3.8. Örnek Hazırlama Yöntemleri

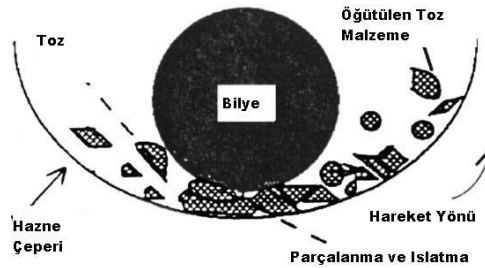
Literatürde yaygın olarak nanoakışkan oluşturmak için alüminyum oksit (AlO), bakır (Cu), bakır oksit (CuO), altın (Au), gümüş (Ag) ve silisyum dioksit (SiO₂) nanoparçacıklar kullanılmaktadır (Simchi, A., 2007; Koo, Junemoo, 2004). Bu nanoparçacıklar genellikle asal gaz ile yoğunlaştırma, mekanik öğütme, mekanik aşındırma ve kimyasal çöktürme yöntemleri ile hazırlanmıştır (Lee, S. vd., 1999). Bu başlık altında çalışma kapsamında kullanılan mekanik öğütme ve asal gaz yoğunlaştırma metodları hakkında bilgi verilecektir.

3.8.1. Mekanik Öğütme Yöntemi

Mekanik öğütme yöntemi, malzemenin bir hazne (havan) içerisinde bilyeler yardımıyla öğütülmesi ilkesine dayanır. Mekanik öğütme yönteminin sık kullanılan çeşitleri, gezegensel öğütme, çarpıştırıcı-bilye (attritor) ve aşındırmadır.

Bu çalışmada kullanılan öğütücü gezegensel öğütücüdür. Metal malzemeleri öğütmek için literatürde en sık kullanılan öğütücüdür .

Gezegensel öğütmede malzeme gezegenlerin dünyanın etrafında yaptığı harekete benzer şekilde hareket eden bir hazne içerisinde, bilyeler yardımıyla öğütülür (Şekil 3.6). Malzemenin sertliğine bağlı olarak paslanmaz çelik, zirkonyum, agat, alümina ve benzeri malzemelerden yapılmış bilyeler ve hazneler seçilir (Şekil 3.7). Bu çalışmada malzeme olarak bakır toz metallerinin kullanılması nedeniyle sertleştirilmiş paslanmaz çelik malzemedan hazne ve bilyeler seçilmiştir.



Şekil 3.6. Havan içerisindeki top ve malzeme.



Şekil 3.7. Mekanik öğütmede kullanılan havan ve bilyeler

Mekanik öğütme sırasında malzemelerin boyutları küçüldükçe yüzey hacim oranları ve bu nedenle kimyasal aktiflikleri de artar. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda gözlenen tepkimeler daha düşük sıcaklıklara indirgenmiş olur. Bundan dolayı mekanik öğütme işlemi süresince istenilen tepkimelerin oluşması ve daha küçük boyutlu malzeme üretme olasılığı artar (Castro, Claudio vd., 2007).

Mekanik öğütme tekniğinde oluşacak malzemenin parçacık büyüklüğünü ve istenilen veya istenmeyen tepkimelerin oluşmasını etkileyen parametreler vardır (Janot, Raphael, vd., 2005). Bunların başında öğütme süresi gelir. Öğütme süresi arttıkça parçacık büyüklüğü azalır. Fakat sürenin artması ile öğütme süresince birlikte kullanılan havan ve bilyelerin aşınması, malzemedeki safsızlıkları da arttırır. Öğütme hızı, diğer bir öğütme parametresidir. Öğütme hızı arttıkça malzeme üzerinde harcanan enerjinin artması parçacık büyüklüğünü azaltır. Yüksek hızlara gidilmesi çarpışma enerjisini attıracağından çarpışma anındaki anlık sıcaklığın artmasına da neden olur. Bu nedenle istenen veya istenmeyen tepkimeler hatta bozulmalar oluşur.

Parçacık büyüklüğünü azaltan parametrelerin bir diğeri de bilye kütle oranıdır. Bilyelerin kütesinin malzemenin kütesine oranı arttıkça parçacık büyüklüğü azalır ve yüksek enerji gerektiren tepkimelerin oluşma olasılığı artar. Bu oran arttıkça bilye-bilye ve bilye-hazne çarpışmaları da artacağından örneğe karışan safsızlıklar da artar.

3.8.2. Asal Gaz Yoğunlaştırma Yöntemi

Geçmiş birkaç onyıl içerisinde nanoparçacık üretim metodları çok yönlü olarak araştırılmış ve bu yönde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Metal nanoparçacıkların sentezi için bulunan farklı uygulamaların arasından metallerin buhar fazında iken yoğunlaştırılması yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Gaz yoğunlaştırma işlemi diğer yöntemlere göre daha avantajlı bir yöntemdir. Zira parçacıklar daha temiz bir ortamda üretilmekte ve yüzeyleri istenmeyen maddelerle kaplanmamaktadır. Ancak düşük bir enerji uygulanması durumunda parçacıklar küçük demetçiklere ayrılarak topraklanmalar meydana getirmektedir. Gleiter ve meslektaşları tarafından nano boyuttaki yapıları oluşturmak için ilk kez uygulanan bu yöntem asal gaz ile birleştirme olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde Jolue ısısı ile kısmi basıncı düşük seviyelerde, asal gaz atmosferinde metallerin buharlaştırılması sağlanır. Jolue ısısı haricinde ısısal plazma ve lazer demeti ile buharlaştırma gibi yöntemler de metalleri buharlaştırmak için uygulanabilir.

Asal gaz ile yoğunlaştırma dinamiği, çekirdeklenme, büyüme, parçacık oluşturma evrelerinden oluşur. Moleküler ışın olarak buharlaşan metal atomları soğuk asal gaz atomları ile sürekli çarpışarak enerjilerini kaybederler ve başka atomlar ile birleşerek atom çiftleri oluştururlar. Soğuk yüzeye ulaşma hızlarına bağlı olarak atom çiftleri başka tek atomlarla birleşerek atom grupları oluştururlar. Çarpışma süresince ortalama serbest yol kısa olduğu kabul edilirse asal gaz yönteminde çekirdeklenme evresinde kararlı yapılar elde edilir. Büyüme evresinin gelişmesine yol açan bu kararlı yapılar bulunduğu hacim içinde istatistiksel olarak düzgün bir şekilde dağılmışlarsa, çekirdeklenmenin homojen olduğundan söz edilebilir. Çekirdeklenme evresinde kararlı yapıların oluşabilmesi için atomların veya atom gruplarının termodinamik enerji engelini aşması gerekir; bu enerji serbest enerji engeli olarak adlandırılır. Bu enerji yüzey enerjisindeki değişime bağlıdır ve değeri, çekirdeklenmenin gerçekleştiği ortama bağlı olarak değişir. Çekirdeklenme oranı S ve yüzey gerilimi σ olmak üzere serbest enerji engeli,

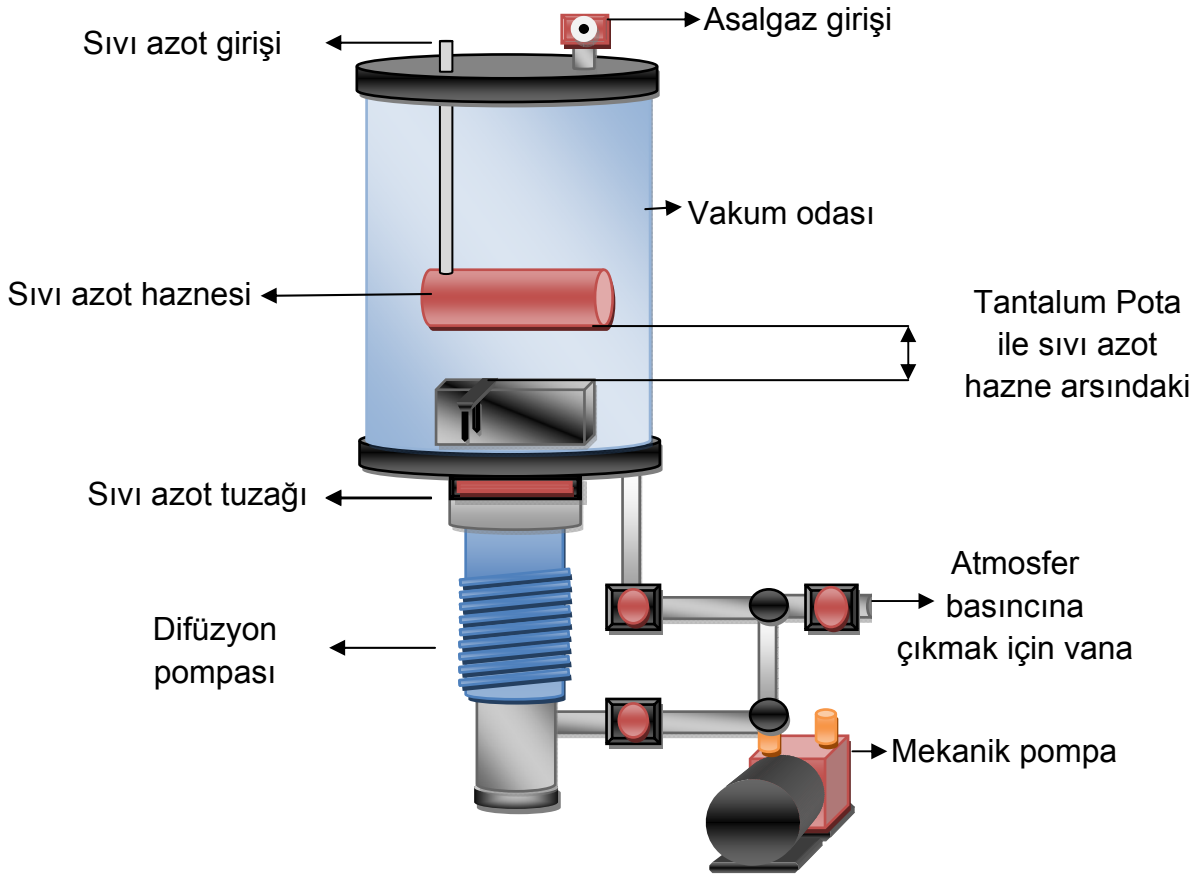
$$\Delta G = \frac{16}{3} \pi \frac{\sigma^3}{(\rho RT \ln S)^3} \quad (52)$$

ifadesi ile verilir. ρ parçacığın yoğunluğu, R gaz sabiti ve T ise sıcaklıktır. Sonuç olarak nanoparçacıkların boyutları, buharlaşma sıcaklığına, asal gazın kısmi basıncına, buharlaşan atomların veya moleküllerin difüzyon hızlarına ve soğuk yüzey ile kaynak arasındaki mesafeye bağlıdır (Simchi, A., 2007).

Asal gaz ile yoğunlaştırma yöntemi mekanik öğütme yöntemine göre safsızlık oranının ihmal edilebilecek kadar çok düşük seviyelerde olması ve parçacık büyüklüğü dağılımı küçük olması nedeniyle nanomalzeme hazırlamak için daha çok tercih edilen bir yöntemdir. Yaptığımız deneyler sonucunda mekanik öğütme yöntemiyle hazırlanan nanoparçacıklardan oluşturulan nanoakışkanlarda büyük parçacık büyüklüğüne sahip parçacıklar çöktüğü gözlenmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi çökme mekanik öğütme tekniğinin doğasından kaynaklanmaktadır.

Bu nedenle bölümümüzde bulunan ısı buharlaştırma sistemi bu çalışma kapsamında yeniden düzenlenerek asal gaz yoğunlaştırma sistemi oluşturulmuştur. Yüzeyinde gaz fazındaki metal nanoparçacıkları yoğunlaştırmak amacıyla bakır silindirik borudan sıvı azot haznesi yapılarak yeniden düzenlenen ısı buharlaştırma sistemi şematik olarak Şekil 3.8' de verilmiştir. Sıvı azot haznesinin çapı 5 cm ve uzunluğu 18 cm' dir. Biriktirilen nanomalzeme miktarının fazla olmasını sağlamak amacı ile soğuk yüzeyin yüzey alanı geniş tutulmaya çalışılmıştır.

Asal gaz yoğunlaştırma sistemi vakum odası, difüzyon pompası, mekanik pompa, sızdırmaz vakum bağlantı parçaları ve gaz vanalarından oluşmaktadır. Sistem difüzyon pompası ile pompalanmaktadır ve difüzyon pompası ile sistem 5×10^{-6} Torr basınca kadar vakuma alınabilmektedir.



Şekil 3.8. Isısal buharlaştırma sistemi.

3.1. X-ışınları Toz Kırınımı

X-ışınları toz kırınımı ölçümleri, Rigaku' nun Dmax-B model x-ışınları toz kırınım metresinde yapıldı. Ölçümler dalga boyu $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ olan CuK α radyasyonunda ve 0.02 °/saniye hızında gerçekleştirildi. Sisteme ait bilgisayar ile elde edilen 2θ ' ya karşılık şiddet değerleri ve veri tabanı ile karşılaştırılarak malzemenin içerdiği fazlar belirlendi. Ayrıca x-ışınları toz kırınım deseninden her bir pike ait yarı genişliklerden parçacık boyutu ve nanoparçacıklardaki gerilmeler (strain) hesaplandı. Bu hesaplamalar için Williamson Hall eşitliği (53) kullanıldı.

$$\xi = \frac{\lambda}{D \cos \theta} + 4\epsilon \tan \theta \quad (53)$$

Bu eşitlikte D; parçacık boyutunu, λ ; x-ışını dalga boyunu, Θ ; Bragg açısını, ξ ; pik yarı genişliği ve ε ise öğütme süresince malzemede oluşan gerilmeyi gösterilmektedir. Williamson Hall ifadesi yeniden düzenlenirse,

$$\xi \cos \Theta = \frac{\lambda}{D} + \varepsilon 4 \sin \Theta \quad (54)$$

eşitliği elde edilir. $\xi \cos \Theta$ ' nın $4 \sin \Theta$ ' ya karşı grafiği çizilecek olursa bu bir doğru denklemdir. Doğrunun eğimi malzemede oluşan gerilmeyi (ε) ve y eksenini kestiği nokta ise λ / D ' yi verecektir. Böylece parçacık boyutu ve nanomalzemedeki gerilmeler belirlenebilmektedir

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Nano malzemelerin karakterizasyonunda genellikle X-ışınları, nötron kırınımı, geçirmeli elektron mikroskobu (TEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), termogravimetrik (TGA) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ölçülen x-ışınları toz kırınımı ile kristal yapının belirlenmesi, boyut analizinin yapılabilmesi ve malzemede öğütme süresince oluşan gerilmelerin belirlenmesinde geçerli bir yöntemdir.

Bu çalışmada farklı parçacık boyutlarında bakır ve gümüş nanoparçacıklar mekanik öğütme ve asal gaz ile yoğunlaştırma yöntemleri kullanılarak hazırlandı. Hazırlanan örneklerin karakterizasyonu için, x-ışınları toz kırınımı ölçümleri yapıldı. Nanoparçacık örneklerden farklı miktarlarda alınarak 80 ml 2-propanol alkol sıvı içersine katkılanarak nanoakışkan sıvılar oluşturuldu. Nanoakışkan sıvıların etkin ısı iletkenlik ölçümleri yapılarak Hamilton-Crosser (H-C) ve Maxwell modelleri ile karşılaştırıldı.

4.1. Mekanik Öğütme Yöntemi ile Hazırlanan Örnekler

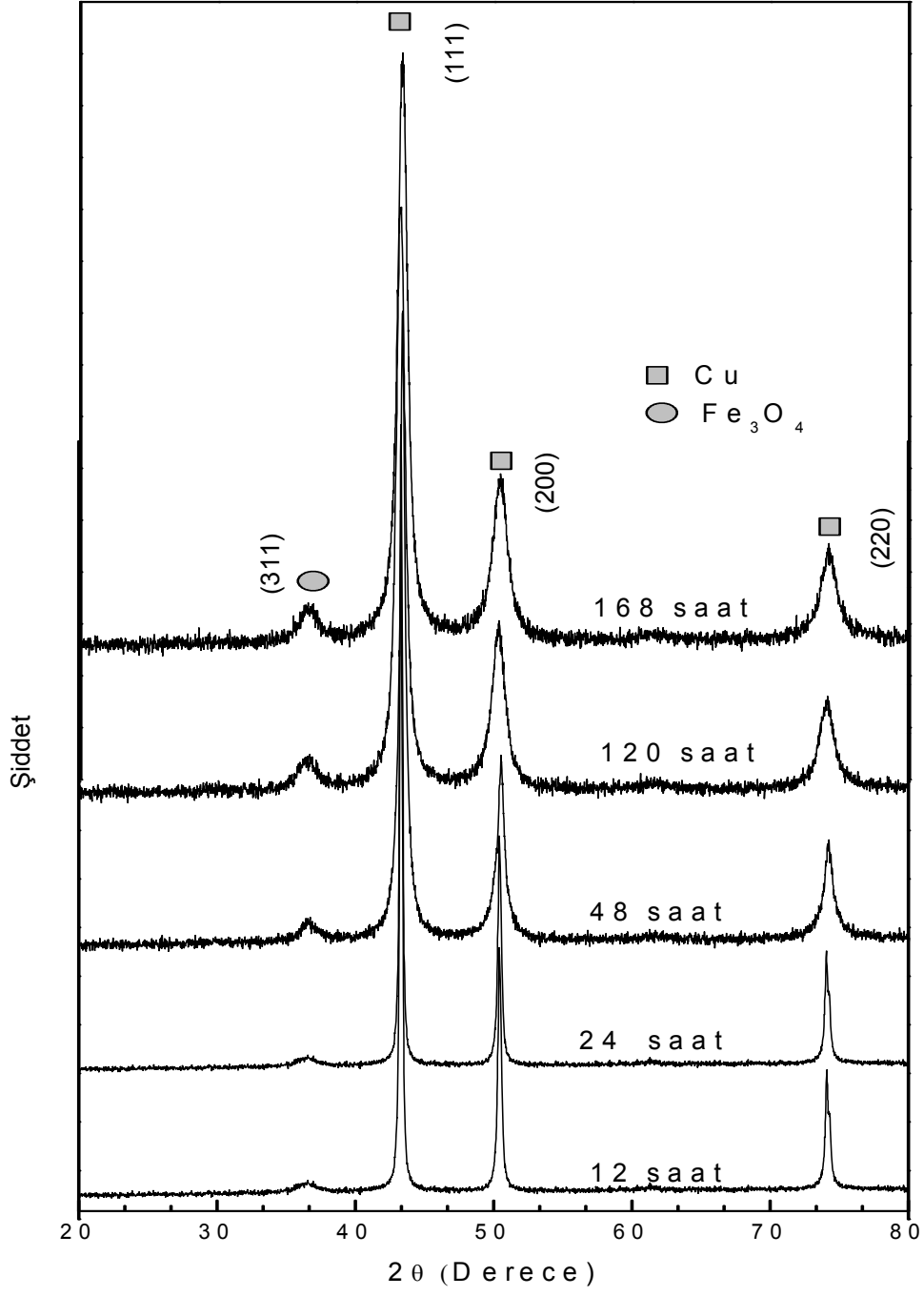
Farklı parçacık büyüklüğüne sahip nanoparçacıklar elde etmek amacıyla başlangıç parçacık büyüklüğü ortalama 30 µm olan metalik bakır 24:1 toz/malzeme kütle oranında paslanmaz çelik havan içersinde 10 mm çaplı toplar kullanılarak 30 dev/dak hızda 12, 24, 48, 120 ve 168 saat öğütüldü. Bu işlem için Resch S1000 model gezegensel öğütücü kullanıldı. Bakırın yumuşak bir malzeme olması nedeniyle olası sıvanmalardan kaçınmak amacı ile öğütme %99,9 saflıkta aseton içersinde gerçekleştirildi.

4.1.1. Cu Nanoparçacıkların X-ışınları Toz Kırınım Ölçüm Sonuçları

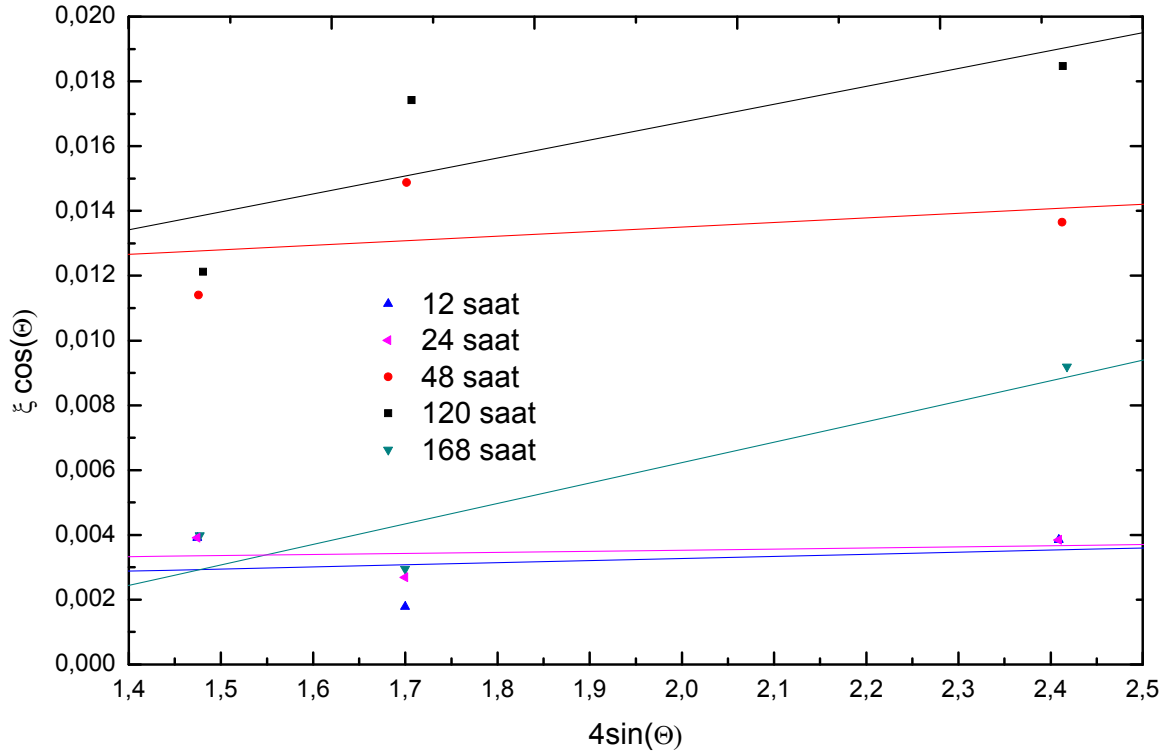
12, 24, 48, 120 ve 168 saat öğütme sürelerine sahip bakır nanoparçacıkların X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.1' de verilmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi X-ışını toz kırınım desenin malzemenin kristal yapısını ve olası fazları belirlemede kullanılan yaygın bir yöntemdir. Şekilden görüldüğü gibi tüm örneklerde Cu ait (111), (200) ve (220) yansımaları gözlenirken artan öğütme süresine bağlı olarak Fe₃O₄ bileşiğine ait (311) yansıması ve bu yansımaaya ait pik şiddeti de artış göstermektedir (JCPDS, PDF# 26-1136). Fe₃O₄ bileşiğine ait pik tümü ile havan ve

top malzemesi olan paslanmaz çelikten kaynaklanmakta ve yapı içerisindeki miktarı artan öğütme süresi ile artmaktadır.

Farklı sürelerde öğütülen örnekler için x-ışını desenlerinden gözlenen diğer bir sonuç ise artan öğütme süresine bağlı olarak Cu ait piklerin genişlemesidir. Bu sonuç artan öğütme süresine bağlı olarak ortalama parçacık boyutunun azladığını göstermektedir. Bu değişim Williamson Hall eşitliğinden kullanılarak hesaplanan ortalama parçacık boyutu ve gerilmelerden belirlenebilir. Bunun için her bir örneğe ait X-ışınları desenlerinden yarı genişlik (ξ) ve açı (θ) değerlerinden " $\cos(\theta)\xi$ " ve " $4\sin(\theta)$ " değerleri hesaplandı. Bu verilere uyan en iyi doğru denklemleri elde edildi (Şekil 4.2). Elde edilen denklemlerden ortalama parçacık büyüklükleri (Çizelge 4.1, Şekil 4.3) ve örnekler üzerindeki gerilmeler hesaplandı (Çizelge 4.1).



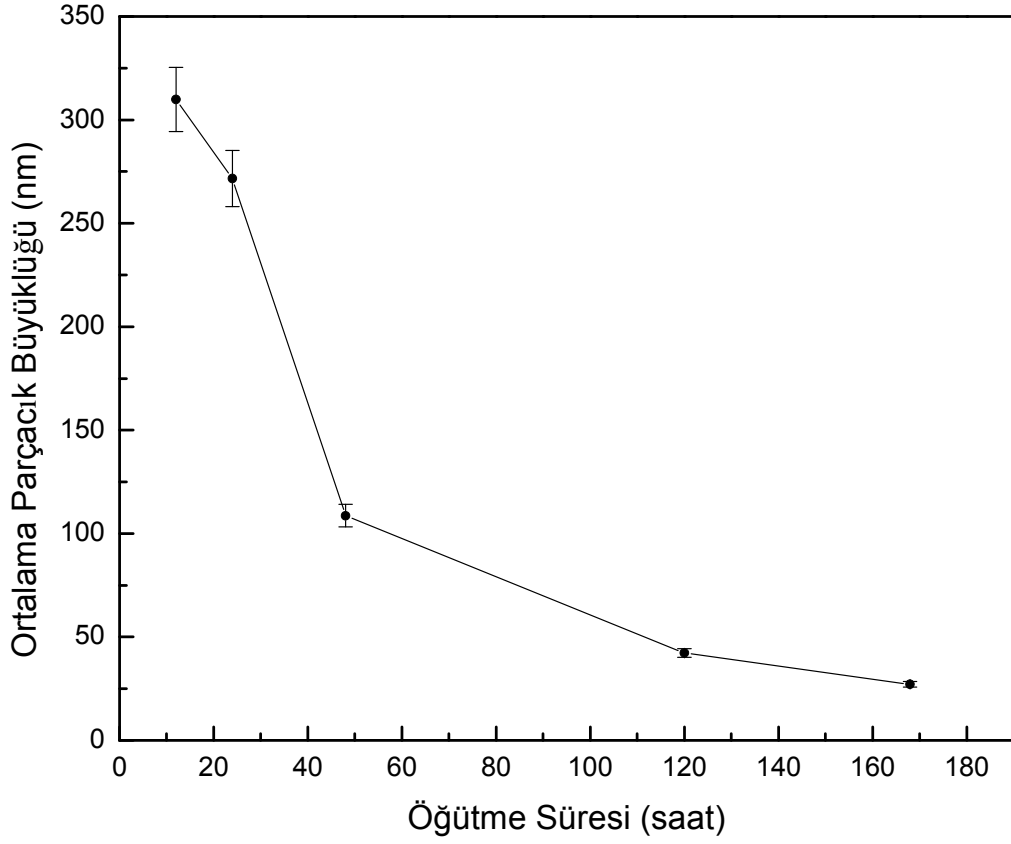
Şekil 4.1. Farklı sürelerde öğütülen bakır örneğinin x-ışınları toz kırınım deseni (JCPDS, PDF# 040836 0.205).



Şekil 4.2. Parçacık büyüklüğü ve gerilme hesabında kullanılan en iyi doğru denklemleri.

| Malzeme Miktarı (g) | Aseton Miktarı (ml) | Öğütme Süresi (saat) | Ortalama Parçacık Büyüklüğü (nm) | Yapıdaki Gerilme () |
|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|
| 2,5043 | 6 | 12 | 309,8 ± 6,1 | 0,130 ± 0,030 |
| 2,4910 | 6 | 24 | 271,6 ± 5,3 | 0,266 ± 0,015 |
| 2,0655 | 6 | 48 | 108,6 ± 3,6 | 0,277 ± 0,177 |
| 2,0072 | 8 | 120 | 42,3 ± 2,1 | 0,313 ± 0,045 |
| 4,0619 | 10 | 168 | 27,2 ± 1,3 | 0,666 ± 0,152 |

Çizelge 4.1. Öğütme süresine bağlı olarak ortalama parçacık büyüklüğü ve malzeme üzerinde oluşan gerilme.



Şekil 4.3. Bakır için öğütme süresine bağlı olarak ortalama parçacık büyüklüğünün değişimi (çizgiler görünüş içindir).

Tüm bu sonuçlardan görüldüğü gibi mekanik öğütmenin doğası gereği artan öğütme süresine bağlı olarak ortalama parçacık boyutu küçülürken Cu nanoparçacıklardaki gerilmeler de artmaktadır.

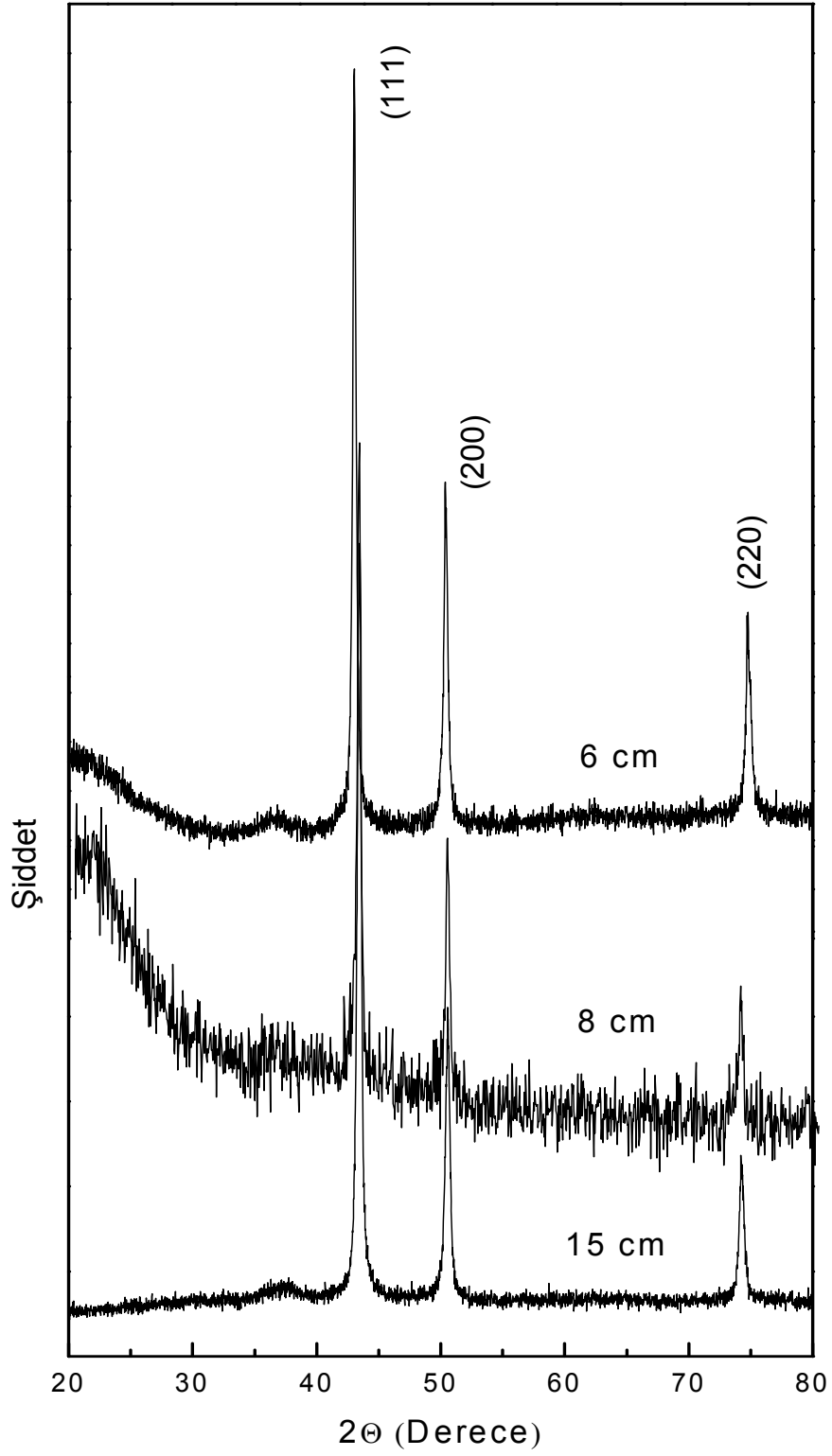
Elde edilen örneklerden sadece 168 saat öğütme sonrasında nanoakışkan oluşturmak için gerekli parçacık boyutuna sahip olduğu belirlenmiştir.

4.2. Asal gaz ile Yoğunlaştırma Yöntemiyle Hazırlanan Örnekler

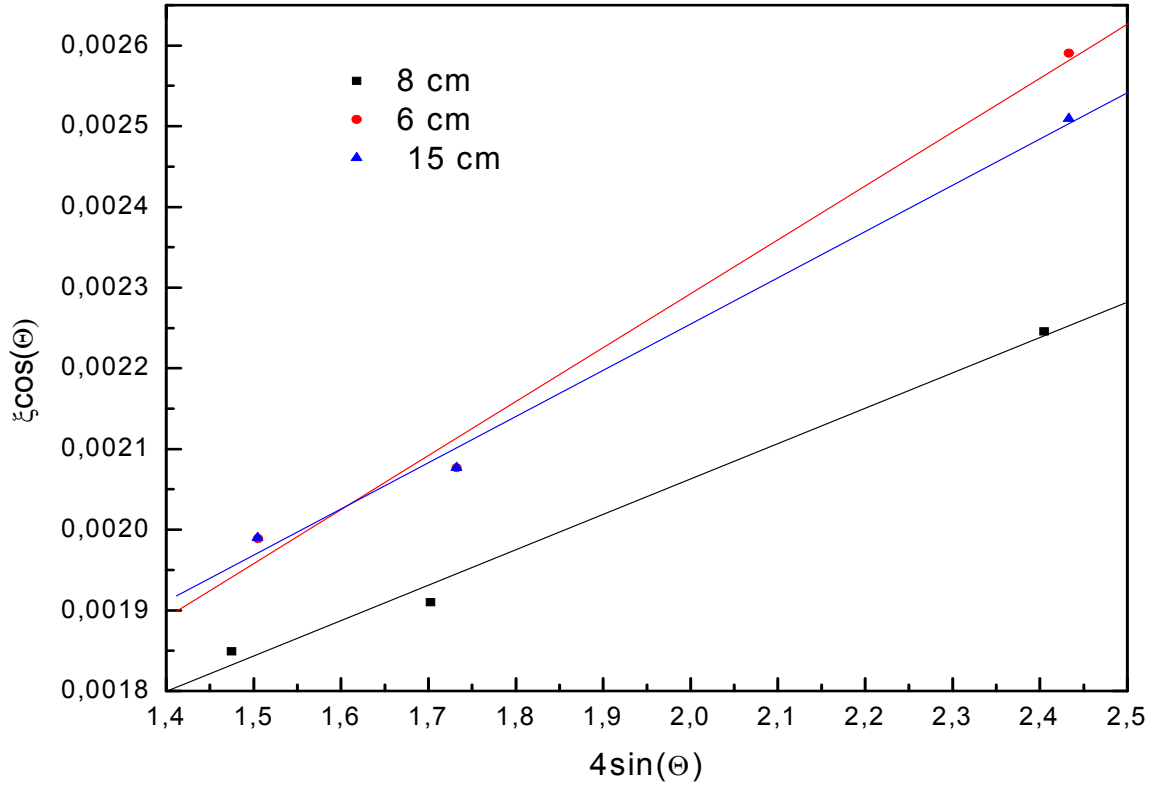
Mekanik öğütmenin dezavantajlarından dolayı çalışma kapsamında asal gaz buharlaştırma sistemi ile bakır ve gümüş nanoparçacıklar elde edilmiştir. Cu ve Ag nanoparçacıklar asal gaz buharlaştırma yöntemi ile elde etmek için yüksek saflıkta Cu ve Ag teller kullanıldı. Başlangıçta malzemeleri ısısal buharlaştırma sisteminde tantalum potaya konularak 1 Torr argon atmosfer basıncında buharlaştırıldı ve sıvı azot tuzağı yüzeyinde biriktirildi. Taşıyıcı asal gaz olarak % 99,9 saflıkta argon gazı kullanıldı. Farklı parçacık boyutlarında nanoparçacıklar elde edebilmek için asal gaz yoğunlaştırmada etkin olan parametrelerden sadece soğuk yüzey ile pota arasındaki mesafe değiştirildi. Bu işlem soğuk yüzey ile pota arasındaki 6, 8 ve 15 cm mesafeler için gerçekleştirildi. Farklı nanoparçacıkların, nanoakışkanın etkin ısı iletkenliğe katkısını irdelemek için Cu ve Ag nanoparçacıklar hazırlandı.

4.2.1. Cu Nanoparçacıkların X-ışınları Toz Kırınım Ölçüm Sonuçları

Soğuk yüzey ile pota arasındaki mesafeye bağlı olarak elde edilen nanoparçacıkların X-ışınları kırınım deseni Şekil 4.4.'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi tüm örneklerde sadece Cu ait (111), (200) ve (220) yansıma pikleri gözlenirken farklı bir faza ait yansıma görülmemektedir. Bu sonuç yapı içerisine safsızlık bulunmadığının bir göstergesidir. Şekil 4.4' deki X-ışını desenlerinden çıkartılabilecek diğer bir sonuç ise Cu ait piklerin genişlemesi yani tanecik boyutunun küçülmesidir. Bu sonuç atomların ortalama serbest yolları azalmasıyla daha az sayıda atomlar ile etkileşerek daha küçük parçacık büyüklüğüne sahip yapılar oluşturması ile açıklanabilir (Simchi, A., 2007). Williamson Hall eşitliği kullanılarak çizilen en iyi doğru denkleminde (Şekil 4.5) parçacık büyüklükleri ve örnek üzerindeki gerilmeler hesaplanarak Çizelge 4.2' de verildi.



Şekil 4.4. Farklı mesafelerde elde edilen bakır örneğın x-ışınları toz kırınım deseni (JCPDS, PDF# 040836 0.205).



Şekil 4.5. Ag ait x-ışını kırınım deseninde (111), (200), (220) pikleri için Williamson Hall eşitliği kullanılarak uyarlanan grafikler.

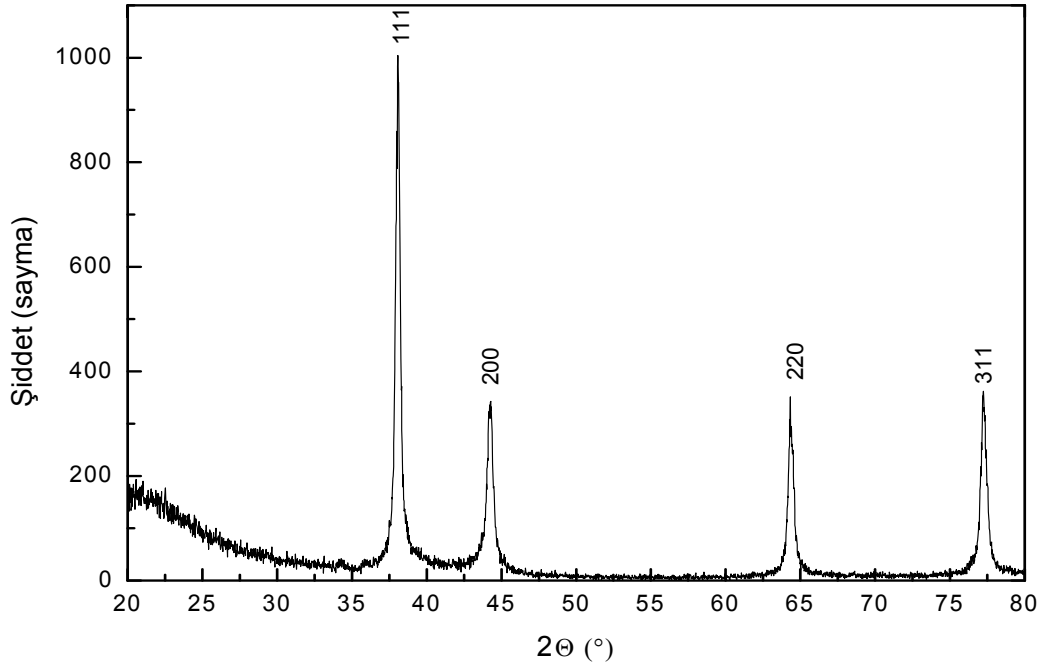
| Malzeme Miktarı (mg) | Soğuk Yüzey ile Pota Arasındaki Mesafe (cm) | Ortalama Parçacık Büyüklüğü (nm) | Yapıdaki Gerilme () |
|----------------------|---|----------------------------------|----------------------|
| 22,043 | 6,0 ± 0,5 | 20,06 ± 1,44 | 0,000 ± 0,158 |
| 20,491 | 8,0 ± 0,5 | 24,58 ± 0,14 | 0,086 ± 0,002 |
| 20,655 | 15,0 ± 0,5 | 42,10 ± 4,50 | 0,022 ± 0,016 |

Çizelge 4.2. Asal gaz ile yoğunlaştırma yöntemiyle hazırlanan Cu nanoparçacık toz numunelerinin ortalama parçacık büyüklüğü ve yapıdaki gerilme.

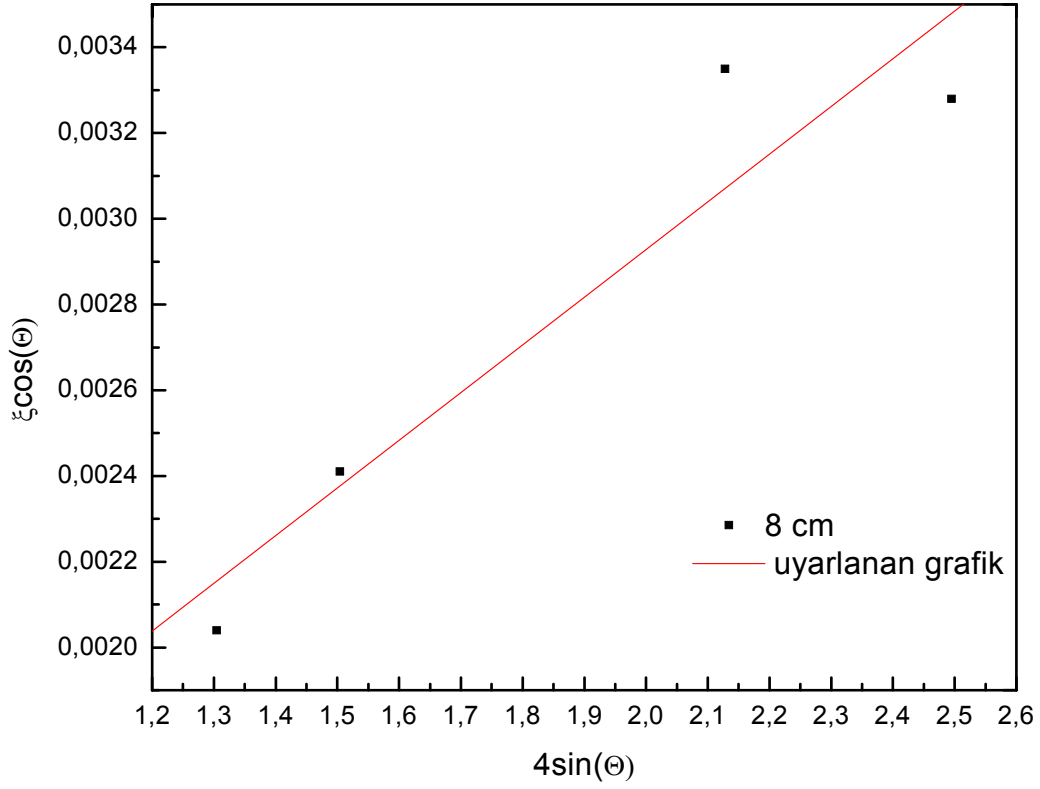
Sonuç olarak asal gaz yoğunlaştırma yönteminde nanoparçacıkların kattetikleri pota ile soğuk yüzey arasındaki mesafenin artmasıyla parçacık büyüklüğü artmaktadır. Ayrıca örnekler vakum ortamında hazırlandığı için yapı içerisinde farklı fazlar görülmemekle birlikte gerilmelerde bulunmamaktadır.

4.2.2. Ag Nanoparçacıkların X-ışınları Toz Kırınım Ölçüm Sonuçları

%99,9 saflıktaki gümüş tel şeklindeki numune ısısal buharlaştırma sisteminde aynı şartlarda buharlaştırılıp sıvı azot tuzak yüzeyinde yoğunlaştırıldı. Ag nanoparçacıkları hazırlamak için soğuk yüzey ile pota arasındaki mesafe 8 cm olarak belirlenmiştir. 6 cm ve daha küçük mesafeler için yapılan deneylerde ince film kaplamalar elde edilmiştir. Ag nanoparçacıkların X-ışınları kırınım deseni Şekil 4.15’ de verilmiştir. Kırınım deseninden de görüldüğü gibi (111), (200), (220) ve (311) yansımasına ait pikler Ag aittir. Şekil 4.6’ da X-ışını toz kırınım deseninden elde edilen en iyi doğru ve veriler Şekil 4.7’ de verilmiştir. Bu sonuçlardan örneğin parçacık boyutu $18,23 \pm 1,16$ nm ve gerilme ise 0,0 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.6. 8.0 ± 0.5 cm mesafede elde edilen Ag örneğin x-ışınları toz kırınım deseni (JCPDS, PDF# 870597 0.088).



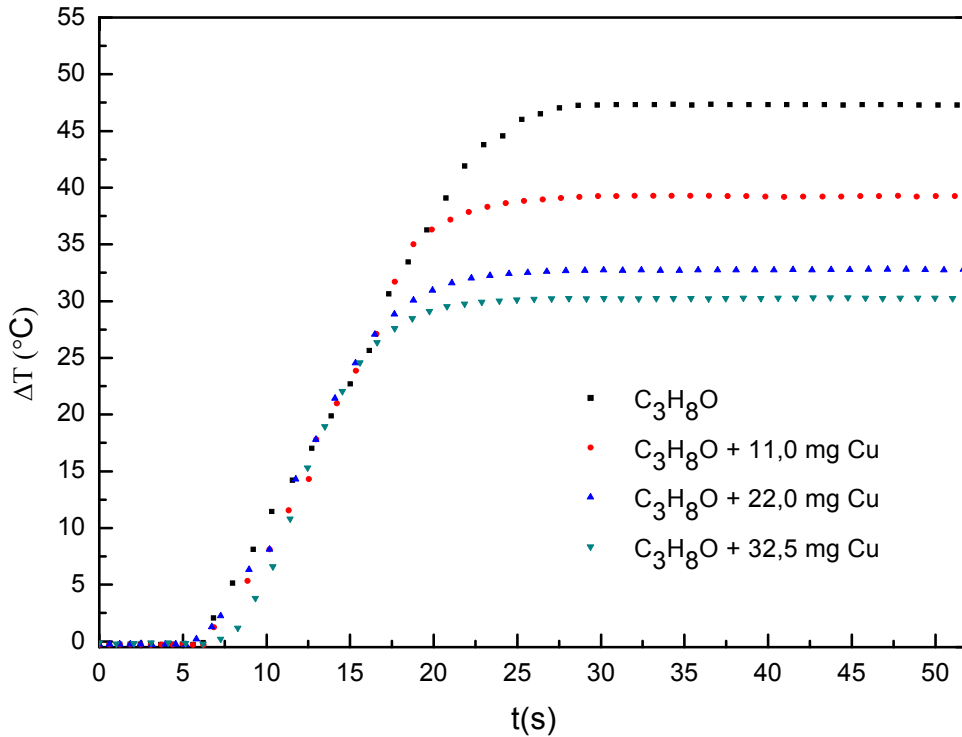
Şekil 4.7. Ag ait x-ışını kırınım deseninde (111), (200), (220) ve (311) pikleri için Willamson Hall eşitliği kullanılarak uyarlanan grafik.

4.2. Bakır Nanoakışkanların Etkin Isıl İletkenlik Sonuçları

4.2.1. Mekanik Öğütme Yöntemi ile Hazırlanan Bakır Nanoparçacıklar

Nanoakışkana katılan farklı miktarlardaki nanoaparçacığın ısı iletkenliğe katkısını irdelemek için mekanik öğütme yöntemi ile hazırlanan ve ortalama parçacık boyutu $27,20 \pm 1,34$ nm olan Cu nanoparçacıklar kullanıldı. 1,0, 22,0 ve 32,5 mg Cu nanoparçacıklar 2-propanol alkol içersine katılarak üç farklı nanoakışkan hazırlandı. Genel olarak 25 °C yapılan etkin ısı iletkenlik ölçümü sonucunda ısı çiftler arasındaki sıcaklık farkının Şekil 4.3' de görüldüğü gibi 25 s sonra sabit olduğı gözlemlendi. Nanoakışkandaki katkılama oranı arttıkça ısı çiftler arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır. Bu sonuç nanoakışkan içersindeki artan nanoparçacık miktarına bağılı olarak ısı iletkenliğe katkısının arttığını göstermektedir.

Ölçülen sıcaklık farkı verileri ile daha önce ölçüm sistemi başlığı altında detayları verildiğı gibi nanoakışkanların etkin ısı iletkenlik katsayıları hesaplandı (Çizelge 4.3).

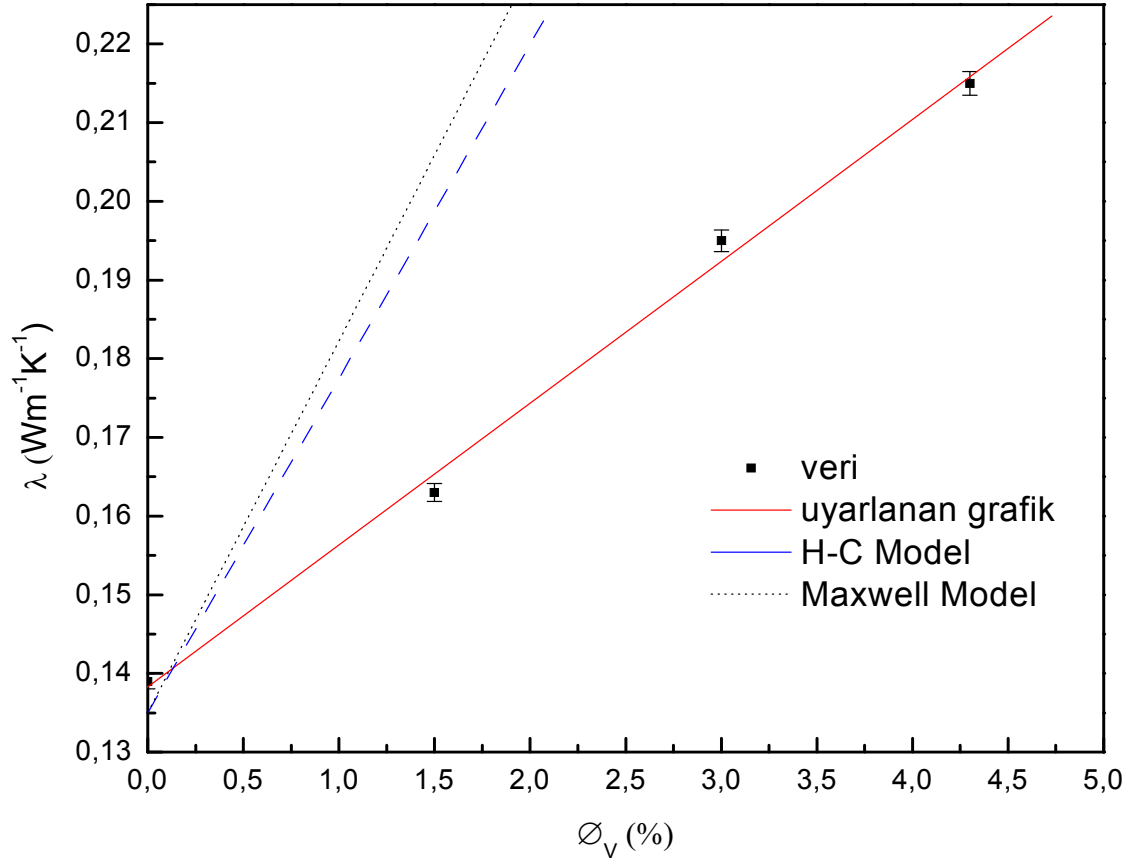


Şekil 4.8. Cu nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanlar için ısı çiftler arasındaki sıcaklık – zaman grafiğı.

| Nanoakışkandaki Cu Nanoparçacık Miktarı (Ortalama Boyutları; 27,20 ± 1,34 nm) (mg) | Isıl Çiftler Arsındaki Sıcaklık Farkı ΔT (°C) | Nanoakışkanın Etkin Isıl İletkenliği (25 °C) (Wm⁻¹K⁻¹) |
|---|---|---|
| - | 47,3 ± 0,1 | 0,137 ± 0,050 |
| 11,0 | 39,0 ± 0,1 | 0,163 ± 0,050 |
| 22,0 | 32,5 ± 0,1 | 0,195 ± 0,050 |
| 32,5 | 30,5 ± 0,1 | 0,215 ± 0,050 |

Çizelge 4.3. Cu nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanların etkin ısı iletkenlikleri.

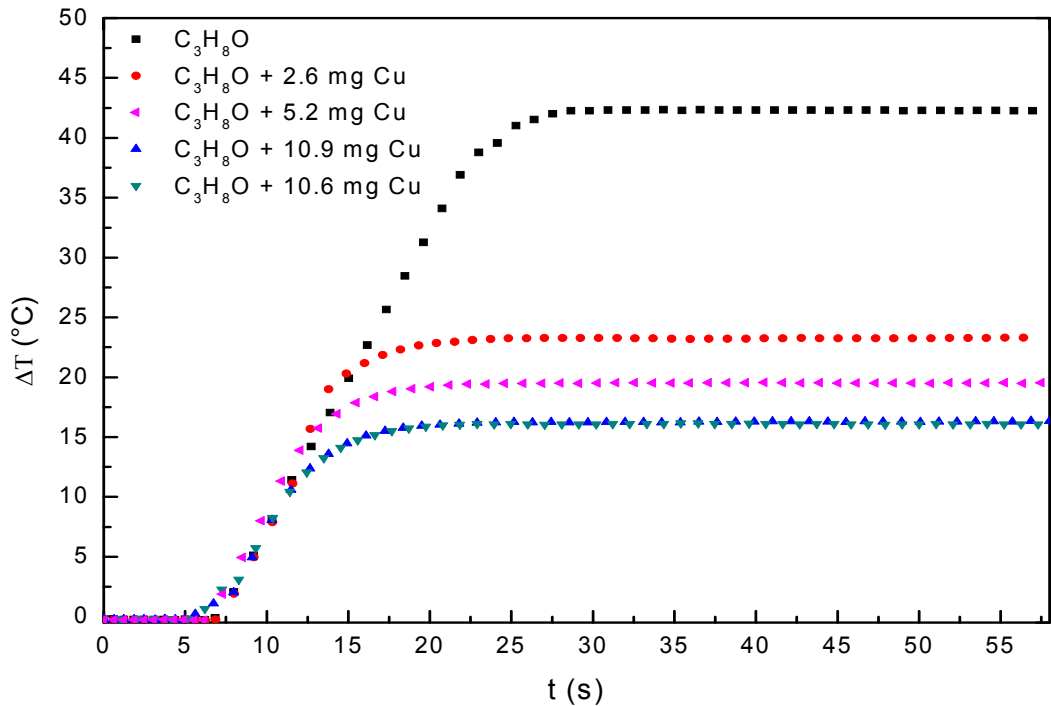
Nanoakışkandaki ısı iletim artışını nanoparçacıkların hacimsel oranlarına göre irdelemek yaygın olarak literatürde kullanılmaktadır (Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981). 11,0, 22,0 ve 32,5 mg katkılama miktarlarına göre hesaplanan hacimsel oranlar sırası ile %1,5, %3,0 ve % 4,3 olarak belirlendi. Şekil 4.9.'da etkin ısı iletkenliğin hacimsel orana göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi artan hacimsel orana bağlı olarak etkin ısı iletkenlik artmaktadır. Çünkü yoğun Cu' ın ısı iletkenlik katsayısı 401 Wm⁻¹K⁻¹' dir. Nanoakışkan içersine eklenen naopaçacığın ısı iletkenliğinin akışkanın ısı iletkenliğinden büyük olması nedeniyle akışkanın etkin ısı iletkenliği arttıracağı açıktır (Cengel, Yunus A., 2003). Ayrıca daha önce belirtildiği gibi azalan parçacık boyutuna bağlı olarak nanoparçacıkların hareket hızları da artmaktadır. Etkin ısı iletkenliğin Brownian bileşeninden dolayı ısı iletkenliğe pozitif bir katkı getirmektedir (Koo, J., Kleinstreuer, C., 2005). Yinede bu artış Hamilton-Crosser ve Maxwell modelleri ile uyuşum içersinde değildir. Bunun nedeni mekanik öğütme yöntemi ile hazırlanan nanoparçacıkların parçacık boyutu dağılımının büyük olmasıdır. Büyük parçacık dağılımına sahip parçacıklar akışkan içersinde çökelmektedir. Sonuç olarak katkılanan madde miktarına bağlı olarak etkin ısı iletimine katkısı beklenenden küçük olmaktadır.



Şekil 4.9. 2-propanol alkol ile hazırlanan nanoakışkandaki bakır nanoparçacık miktarının etkin ısı iletkenlik ile değişimi.

4.3. Asal Gaz ile Yoğunlaştırma Yöntemiyle Hazırlanan Bakır Nanoparçacıklar

Bir önceki kesimde olduğu gibi bu kesimde de nanoakışkana katılan farklı miktarlardaki asal gaz yöntemi ile hazırlanan nanoparçacığın ısı iletkenliğe katkısını irdelemek için ortalama parçacık boyutu $24,58 \pm 0,14$ nm Cu nanoparçacıklar kullanıldı. 2,6, 5,2, 10,6 ve 10,9 mg Cu nanoparçacıklar 2-propanol alkol içerisine katılarak üç farklı nanoakışkanlar hazırlandı. 25 °C yapılan ısı iletkenlik ölçümü sonucunda ısı çiftleri arasındaki sıcaklık farkının Şekil 4.5’ de görüldüğü gibi 30 s sonra sabit olduğu gözlemlendi. Doğal olarak nanoakışkandaki katkılama oranı arttıkça ısı çiftleri arasındaki sıcaklık farkı da azalmaktadır. Mekanik öğütme yöntemi ile elde edilen nanoparçacıklar ile nanoakışkan içerisindeki artan nanoparçacık miktarına bağlı olarak etkin ısı iletkenliğe katkısının arttığı gibi bu kesimde de hazırlanan nanoakışkanların etkin ısı iletiminde artış söz konusudur. Çizelge 4.3’ de Cu nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanların etkin ısı iletkenlik katsayıları verilmiştir.



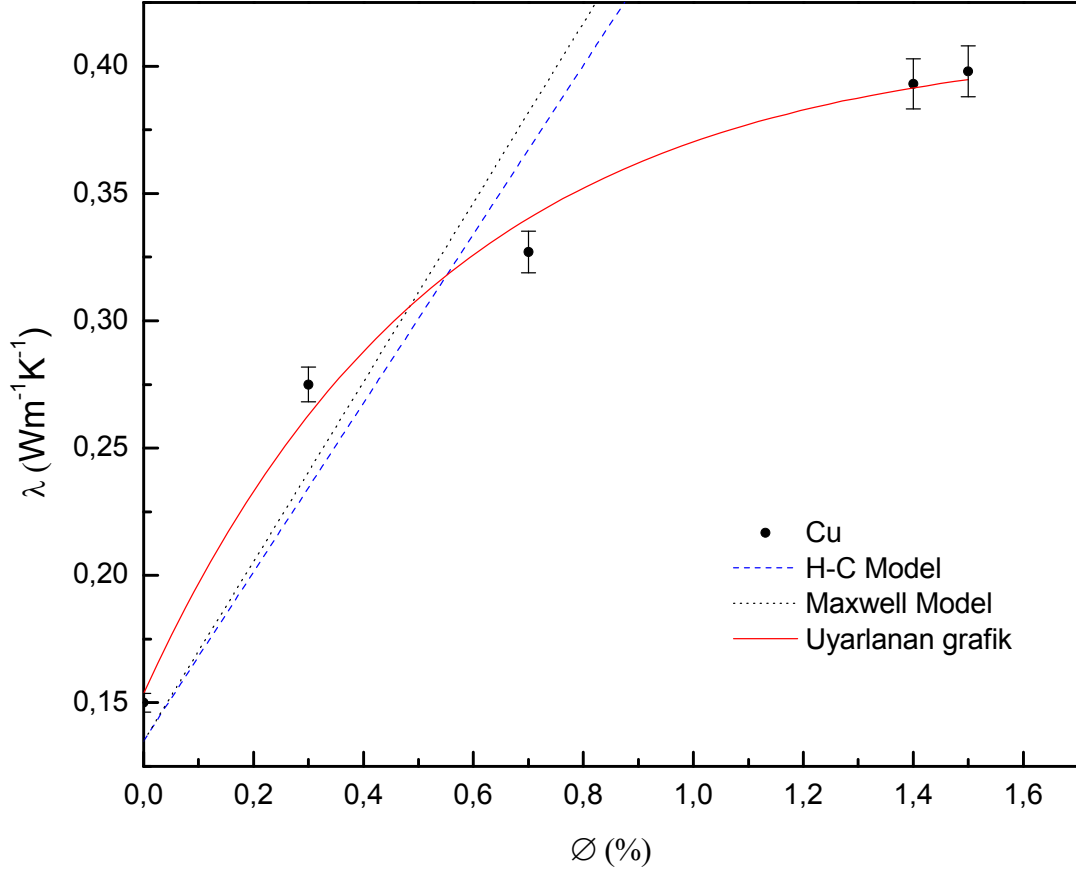
Şekil 4.10. $24,58 \pm 0,14$ nm boyutundaki bakır nanoparçacık katkılama miktarlarına göre ısı çiftleri arasındaki sıcaklık – zaman grafiği.

| Nanoakışkandaki Cu Nanoparçacık Miktarı (Ortalama Boyutları; 24,58 ± 0,14nm) (mg) | Isıl Çiftler Arasındaki Sıcaklık Farkı ΔT (°C) | Nanoakışkanın Etkin Isıl İletkenliği (25 °C) (Wm⁻¹K⁻¹) |
|--|---|---|
| - | 42,3 ± 0,1 | 0,150 ± 0,050 |
| 2,6 | 23,2 ± 0,1 | 0,275 ± 0,050 |
| 5,2 | 19,5 ± 0,1 | 0,327 ± 0,050 |
| 10,6 | 16,1 ± 0,1 | 0,393 ± 0,050 |
| 10,9 | 16,3 ± 0,1 | 0,398 ± 0,050 |

Çizelge 4.4. Cu nanaoparçacıklardan oluşan nanoakışkanların etkin ısı iletkenlikleri.

Soy gaz yoğunlaştırma yöntemi ile hazırlanan Cu nanoparçacıkların 2-propanol alkol içerisine 2,6, 5,2, 10,6 ve 10,9 mg katkılama miktarlarına bağlı olarak hacimsel oranları sırası ile %0,3, %0,7, %1,4 ve %1,5 olarak hesaplandı. Nanoparçacıkların akışkan içerisindeki hacimsel oranları etkin ısı iletkenlik katsayısındaki değişim grafiği Şekil 4.11' de verilmiştir. Görüldüğü gibi artan hacimsel oranlara bağlı olarak ısı iletkenlik artış göstermektedir. Nanoakışkan içersine eklenen naopaçacığın ısı iletkenliğinin akışkanın ısı iletkenliğinden büyük olması ve parçacık hızlarının da artması etkin ısı iletkenliği artırmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde de gözlenmiştir (Zhang, Xing, vd., 2006; Kebslinski, P., 2002; Murshed, S.M.S., 2006; Min-Sheng, Liu, , 2006; Koo, Junemoo, 2004). Üstelik artış oranı mekanik öğütme yöntemi ile elde edilen nanoparçacıklar ile yapılan katkılamaların getirmiş olduğu orandan daha fazladır. Bunun nedeni soy gaz yöntemi ile elde edilen parçacıkların parçacık boyutu dağılımının küçük ve homojen olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca sonuçlar küçük hacim oranlarında Hamilton-Crosser ve Maxwell modelleri ile uyuşum içersinde olduğu gözlenmiştir. Artışın büyük hacim oranlarında beklenen değerlerden saptığını ve yaklaşık 0,39 Wm⁻¹K⁻¹ civarında doyuma ulaştığı görülmektedir. Bunun nedeni büyük hacim oranlarında nanoparçacıkların aktifliklerinin yüksek olması nedeniyle zayıf van der Waals kuvvetleriyle birleşmektedirler (Kebslinski, P. vd., 2005). Bu noktadan sonra eklenen nanoparçacıklar akışkan içerisinde yüzmek yerine kümeleşerek

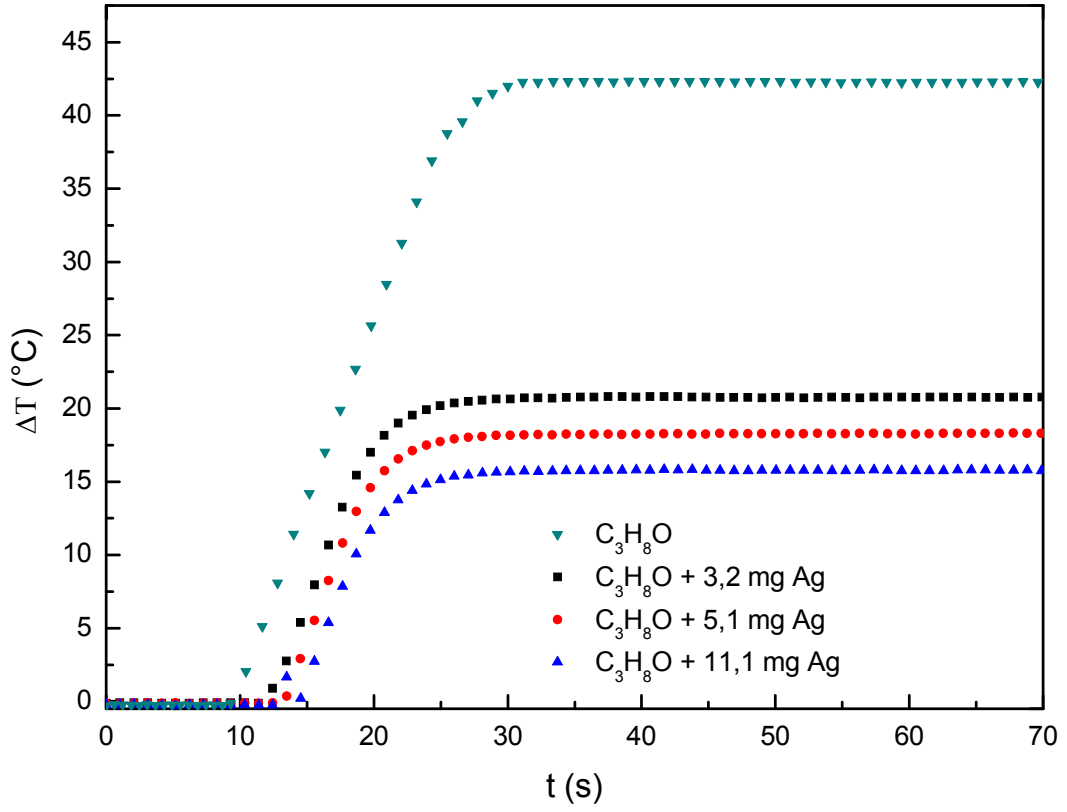
çökmektedirler ve ne kadar nanoparçacık katılırsa da hacimsel oran değişmemektedir.



Şekil 4.11. Cu nanoparçacık miktarına bağlı olarak nanoakışkanın etkin ısı iletkenlik katsayısının değişim grafiği.

4.4. Gümüş Nanoakışkanların Etkin Isıl İletkenlik Sonuçları

Asal gaz yöntemi ile hazırlanan ve ortalama parçacık boyutları $18,23 \pm 1,16$ nm olan Ag gümüş nanoparçacıklar kullanılarak üç farklı nanoakışkan hazırlandı. Şekil 4.12' de görüldüğü gibi $25\text{ }^\circ\text{C}$ ' de yapılan ısı iletkenlik ölçümü sonucunda ısı çiftleri arasındaki sıcaklık farkının 30 s sonra sabit olduğu ve artan katkılama miktarlarına bağlı olarak da sıcaklık farkının azaldığı gözlemlendi. Parçacık büyüklüğünün azalmasına bağlı olarak akışkanın ısı iletimindeki artışın bir göstergesidir. Buna en önemli iki etkin faktör, daha önceki bölümde de belirtildiği gibi, Ag nanoparçacıkların ısı iletkenlik katsayılarının akışkaninkine göre büyük olmasıdır ve $25\text{ }^\circ\text{C}$ ' de $429\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dir (Cengel, Yunus A., 2003). Diğer etkin faktör ise parçacık boyutuna bağlı olarak parçacıkların hızlarındaki artıştır. Bu durumda nanoakışkanın etkin ısı iletkenlikleri hesaplandı ve Çizelge 4.5 oluşturuldu. Bir önceki kesimde, aynı yöntem ile hazırlanan, madde miktarları ve boyutları yakın olan Cu nanoparçacıkların katkılama miktarlarına göre etkin ısı iletkenlik katsayısındaki artış oranları kıyaslanırsa, bu oranın Ag nanoparçacıklar için büyük olduğu belirlendi. 5,2 mg Cu nanoparçacık katkılama sonucunda etkin ısı iletkenliğinin akışkanın ısı iletkenliğine oranı; $\lambda_{\text{etkin}}/\lambda_{\text{nanoakışkan}} = 2,18$ ve 5,1 mg Ag nanoparçacıklar için de bu oran, 2,47' dir. 10,9 mg Cu ve 11,1 mg Ag nanoparçacıklar için de bu oran sırası ile 2,65 ve 2,83' dür. Bunun nedeni Ag' nin ısı iletiminin Cu' ın iletiminden büyük olmasıdır.

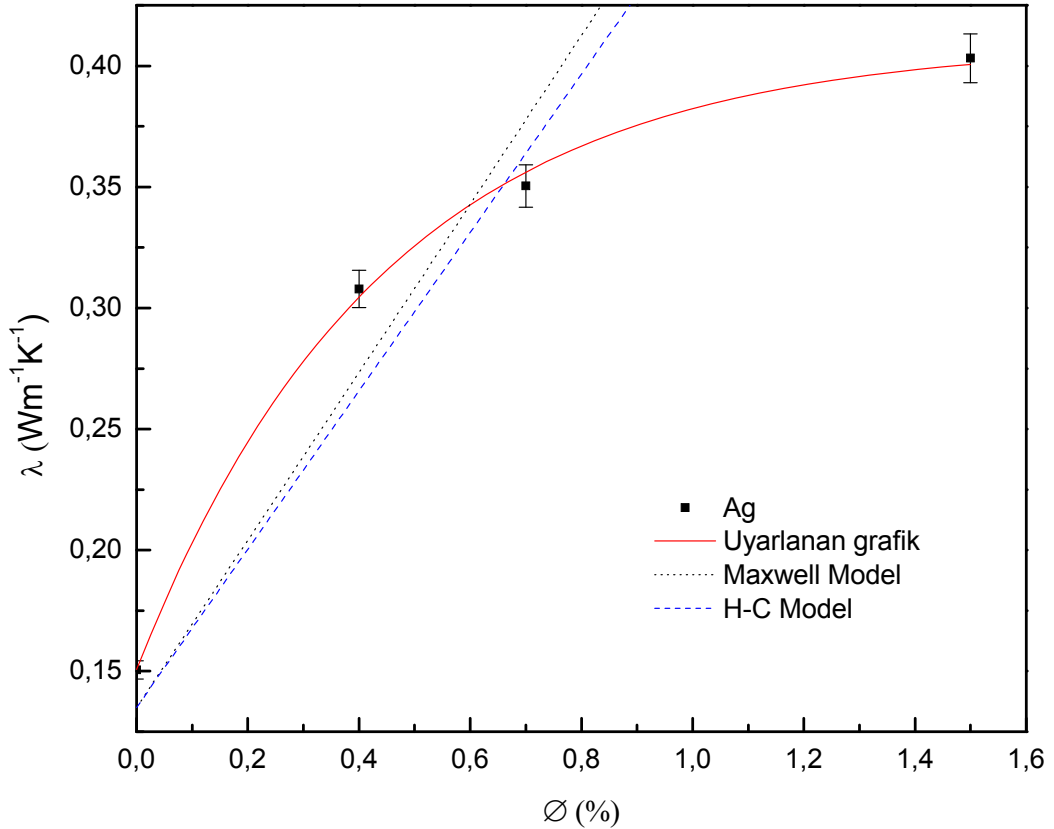


Şekil 4.12. Ag nanoparçacık katkılama miktarlarına bağlı olarak ısıtıcı çiftler arasındaki sıcaklık – zaman grafiği.

| Nanoakışkandaki Ag Nanoparçacık miktarı (Ortalama Boyutları; $18,23 \pm 1,16$ nm) (mg) | Isıl Çiftler Arındaki Sıcaklık Farkı ΔT (°C) | Nanoakışkanın Etkin Isıl İletkenliği (25 °C) ($Wm^{-1}K^{-1}$) |
|--|--|--|
| - | $42,3 \pm 0,1$ | $0,142 \pm 0,050$ |
| 3,2 mg | $20,7 \pm 0,1$ | $0,308 \pm 0,050$ |
| 5,1 mg | $18,3 \pm 0,1$ | $0,350 \pm 0,050$ |
| 11,1 mg | $15,7 \pm 0,1$ | $0,403 \pm 0,050$ |

Çizelge 4.5. Ag nanoparçacıklardan oluşan nanoakışkanın etkin ısı iletkenliği.

Teorik olarak Hamilton-Crosser ve Maxwell modelleri ile kıyaslamak için 3,2, 5,1 ve 11,1 mg Ag nanoparçacıkların nanoakışkan içerisindeki hacimsel oranları sırası ile % 0,4, % 0,7 ve % 1,5 olarak hesaplandı. Şekil 4.13' de verildiği gibi nanoparçacıkların akışkan içerisindeki hacimsel oranlarına bağlı olarak etkin ısı iletkenlik katsayısındaki değişim grafiği verilmiştir. Parçacıkların ısı iletkenlik katsayısının akışkanınkinden büyük olması ve hızlarının artmasından kaynaklı etkin ısı iletiminde artışlar görülmektedir. Küçük hacim oranlarında Hamilton-Crosser ve Maxwell modelleri ile uyum gösterdiği fakat büyük hacim oranlarında teorik değerlerden saptığı ve $0,40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ civarında sabitlendiği görülmektedir. Bu davranışı bir önceki kesimde Cu nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanda da izlendi. %1,5 hacimsel orandan sonra nanoparçacıklar kristal yapılar meydana oluşturarak çökmektedir ve ısı iletkenlikteki artış sabitlenmektedir.



Şekil 4.13. Ag nanoparçacık miktarına bağlı olarak nanoakışkanın etkin ısı iletkenlik katsayısının değişim grafiği.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada öncelikle ısı iletkenlik ölçüm sistemi tasarımı olarak kurulmuştur. Isı iletim katsayısı ölçüm sistemi bilgisayar kontrollü ve 298 K–353 K sıcaklık aralığında sirkülasyonlu su banyosu ile kontrol ederek deney yapma özelliğine sahiptir.

Yapılan ölçümler sonucunda sistemin tekrarlanabilirliğinin %1, deneysel noktalardaki saçılmaların ise % 0,7 olduğu saptanmıştır. Isıl iletkenlik ölçüm sisteminde ısı çiftleri arasındaki mesafe $3,0 \pm 0,1$ mm olarak belirlenmiştir. Sistem her ne kadar metal nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayılarını ölçmek amacıyla tasarlanmış olsa da genel amaçlıdır ve sıvıların ısı iletkenlik katsayılarını ölçmede de kullanılabilir.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında bakır ve gümüş metali kullanılarak mekanik öğütme ve asalgaz ile yoğunlaştırma yöntemleri ile nanoparçacıklar hazırlanmıştır.

Nanoparçacıkların akışkandaki artan hacimsel oranlarına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Fakat kritik bir hacim oranından sonra etkin ısı iletkenlik doyuma ulaşmaktadır.

Literatürde saf su için %2 hacimsel katkılama oranlarında 40 nm safir (Al_2O_3) nanoparçacıklar ile yapılan ısı iletim katsayısı ölçümlerinde yaklaşık 1,2 , 33 nm bakır oksit (CuO) ile yapılan ölçümlerde 1,3 ve 40 nm boyutunda TiO_2 ile yapılan ölçümler de ise 1,1 oranlarında artışlar gözlenmiştir. Yapılan çalışmada ise mekanik öğütme yöntemi ile elde edilen 27 nm boyutundaki bakır nanoparçacıklar ile 2-propanol alkole ile %1,5 hacimsel oranda katkılama sonucunda ısı iletiminde 1,2 oranında artış gözlenmiştir. Asal gaz ile buharlaştırma yöntemi ile elde edilen 24 nm boyutundaki bakır nanoparçacıklar ile aynı hacimsel oranda hazırlanan nanoakışkan için ısı iletimindeki bu oran 2,7 olarak görülmektedir. Gümüş nanoparçacıklar kullanılarak aynı hacimsel oranda yapılan katkılamada ise 2,8 oranda ısı iletimine katkısı olmuştur (Li, Calvin H. vd, 2007; Koo, Junemoo vd., 2004; Liu, Min-Sheng vd., 2006)

Nanoakışkanlarda ısı iletimi etkileyen faktörler nanoparçacık boyutu, nanoparçacıkların akışkan içerisindeki hacimsel oranı, sıcaklık, akışkan ile nanoparçacıkların ısı iletim katsayıları ve Brownian hareketidir. Nano boyuttaki parçacıklar ve yapıların akışkan içerisinde çevre molekülleri ile yapmış olduğu

Çarpışmaların sonucunda kontrol edilemeyen hareketine Brownian hareketi olarak ifade edildiğini belirtmiştik. Kurulan ısı iletkenlik ölçüm sistemi kullanılarak Brownian hareketinin akışkanların ısı iletimine katkısı ileriki yıllarda yapılacak çalışmalarda incelenebilir. Ayrıca parçacık boyutunun ısı iletimine etkisi de daha detaylı irdelenmesi gerekmektedir.

Nanoakışkanlar ısı transferinin iyileştirilmesinde büyük bir potansiyele sahip olup endüstriyel ısı transferi işlemlerine adapte etmeye son derece uygundur. Böylece ısı değiştiricisi tasarımcı ve üreticileri daha kompakt ve verimli ısı transferi ekipmanları üretebileceklerdir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Bergles, A. E., May 25- June 5, 1998, The Imperative to Enhance Heat Transfer. Proceeding of the NATO Advanced Study on Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers, Cesme-Izmir, Turkey, Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, (1999) pp.13-29.
- Cengel, Yunus A., 2003, Heat Transfer, Second Edition, McGraw-Hill in New York.
- Colliue, Antony McB., Powney, Derek J., 1973, The Mechanical Properties of Materials, Edward Arnold Published Ltd..
- Choi, S. U. S., Zhang Z. G, Yu W., Lockwood F. E., Grulke E. A., Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions, Appl. Phys. Lett, 79 (14), pp. 2252-2254.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959, Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, Oxford.
- Castro, Claudio L. De, Mitchell, Brian S., (2002), Nanoparticles from Mechanical Attrition, Chapter 1, American Scientific Publishers.
- Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., 2001, Thompson, L.J., Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles, Appl. Phys. Lett. 78 (6) (2001) pp. 718-720.
- Eastman, J.A., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., 2004, Keblinski, P., Thermal Transport In Nanofluids, Annu. Rev. Mater. Res. 2004. 34:219–46.
- Franco, Alessandro, 2007, An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2495–2504.,
- Frusteri, F., Leonardi, V., Vasta, S., Restuccia, G., 2005, Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers, Applied Thermal Engineering 25(2005) 1623-1633.
- Gobbe, Claire, Iserna, Sebastien, Ladevie, Bruno, 2004, Hot strip method: application to thermal characterisation of orthotropic media, International Journal of Thermal Sciences 43 (2004) 951–958.
- G.R.Blackwell, 2000, “Thermal Management” The Electronic Packaging Handbook Boca Raton: CRC Press LLC.
- Hwang, Y., Park, H.S., Lee, J.K., Jung, W.H., 2006, Thermal conductivity and lubrication caharacteristic of nanofluids, Current Applied Physics 6S1 (2006) e67-e71
- Incropera, Frank P., DeWitt, David P., 1981, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Inc.

- Janot, Raphael, Guerard, Daniel, 2005, Ball-milling in liquid media Applications to the preparation of anodic materials for lithium-ion batteries, *Progress in Materials Science* 50 (2005) 1–92.
- Kang, Kim, Y.T. and Choi, C.K., 2004, Analysis of Convective Instability and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids, *Phys Fluids* 16 (2004), pp. 2395-2401.
- Keblinski, P., Eastman, J A., and Cahil DG., June 2005, Nanofluids for thermal transport, *Materialstoday*, pp. 36-44.
- Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., 2002, Eastman, J.A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 855-863.
- Khanafer, K., Vafai, K. and Lightstone, M., 2003, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, *Int J Heat Mass Transfer* 46 (2003), pp. 3639-3653.
- Kittel, C., 1996, *Introduction to Solid State Physics*, VI. Edition, John Willey & Sons, Inc., New York.
- Kohout, M., Collier , A.P., Stepanek, F., 2004, Effective thermal conductivity of wet particle assemblies, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 5565–5574.
- Koo, Junemoo and Kleinstreuer, Clement, 2004, A new thermal conductivity model for nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research* (2004) 6:577–588.
- Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S. and Eastman, J.A., 1999, Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, *ASME J Heat Transfer* 121 (1999), pp. 280-289.
- Li, Calvin H., Peterson, G. P., 2007, The effects of particle size on the effective thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluids, *Journal of Applied Physics* 101, 044312.
- Min-Sheng, Liu, Mark, Ching-Cheng Lin, C.Y. Tsai, Chi-Chuan Wang, 2006, Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 3028–3033.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C. and Yang ,C., 2006, *Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions (Nanofluids)*, 2006 IEEE.
- Palm, Samy Joseph, Roy, Gilles, Nguyen, Cong Tam, 2006, Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 2209–2218.

- Patrick E. Phelan and Prajesh, Bhattacharya, 2006, Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid), *Nanoletters* 2006, Vol. 6, No. 7, 1529-1534
- Putra, N., Roetzel, W. and Das, S.K., 2003, Natural Convection of Nano-fluids, *Heat Mass Transfer* 39, pp. 775-784.
- Putra, Nandy, Roetzel, Wilfried, K. Das, Sarit, 2003, Natural convection of nano-fluids, *Heat and Mass Transfer* 39 775–784.
- Reimann, Hermsmeyer, J., S., 2002, Thermal conductivity of compressed ceramic breeder pebble beds, *Fusion Engineering and Design*, 61_/62, 345_/351.
- Ren, Yajie, Xie, Huaqing, Cai, 2005, An Effective thermal conductivity of nanofluids containing spherical nanoparticles, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38, 3958–3961.
- Sengers, J.V. and Watson, J.T.R., 1986, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15, pp. 1291-322.
- Simchi, A., Ahmadi, R., Seyed Reihani, S.M., Mahdavi, A., 2007, Kinetics and mechanisms of nanoparticle formation and growth in vapor phase condensation process, *Materials and Design* 28 850–856.
- Şahin, B., Çomaklı, K., Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., 2004, Nanoakışkanlar ile Isı Transferinin İyileştirilmesi, *Mühendis ve Makina*, Cilt:47, Sayı: 559.
- Trisaksri, V. and Wongwises, S., 2005, Critical Review of Heat Transfer Characteristics of Nanofluids, *Renew Sust Energ Rev*, Article In press.
- Xuan, Y. and Li, Q., 2000, Heat Transfer Enhancement of Nanofluids, *Int J Heat Fluid Flow* 21, pp. 58-64.
- Wang, Bu-Xuan, Zhou, Le-Ping, Peng, Xiao-Feng, 2003, A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 2665–2672.
- Wen, Dongsheng and Ding, Yulong, May 2006, Natural Convective Heat Transfer of Suspensions of Titanium Dioxide Nanoparticles (Nanofluids), *IEEE Transactions On Nanotechnology*, Vol. 5, No. 3.
- Wen, D. And Ding, Y., 2004, Experimental Investigation Into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region Under Laminar Flow Conditions, *Int J Heat Mass Transfer* 47 pp. 5181-5188.
- Vadasz, J., Johnathan, Govender, Saneshan, Vadasz, Peter, 2005, Heat transfer enhancement in nano-fluids suspensions: Possible mechanisms and explanations, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 2673–2683.

Yakut K., Sahin, B., 2004, Flow-induced Vibration Analysis of Conical-rings Used for Heat-transfer Enhancement in Heat Exchangers. Appl Energy 78/3, pp. 273-88.

Yakut, K., Sahin, B., 2004, The Effects of Vortex Characteristics on Performance of Coiled Wire Turbulators Used for Heat Transfer Augmentation. Appl Thermal Eng. 24, pp. 2427-2438.

Zhang, Xing, Gu, Hua, Fuji, Motoo, 2006, Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles, Experimental Thermal and Fluid Science, Article In press.

İnternet (www/ftp) kaynakları:

Comparing nanoparticles to microparticles, "[http://www.anl.gov /Media_Center/Frontiers/2003/b3excell3.html](http://www.anl.gov/Media_Center/Frontiers/2003/b3excell3.html)" (07.04.2006).

Kristiansen, H., 2001, Thermal Management in Electronics, "http://www.ppd.-chalmers.se/edu/mpr235/mpr235_thermgmnt.pdf" (07.04.2006).

Measurement of thermal conductivity of a poor conductor by Lee's Disk method, "<http://media.paisley.ac.uk/~davison/labpage/leedisk/leedisk.html>" (28.08.2006).

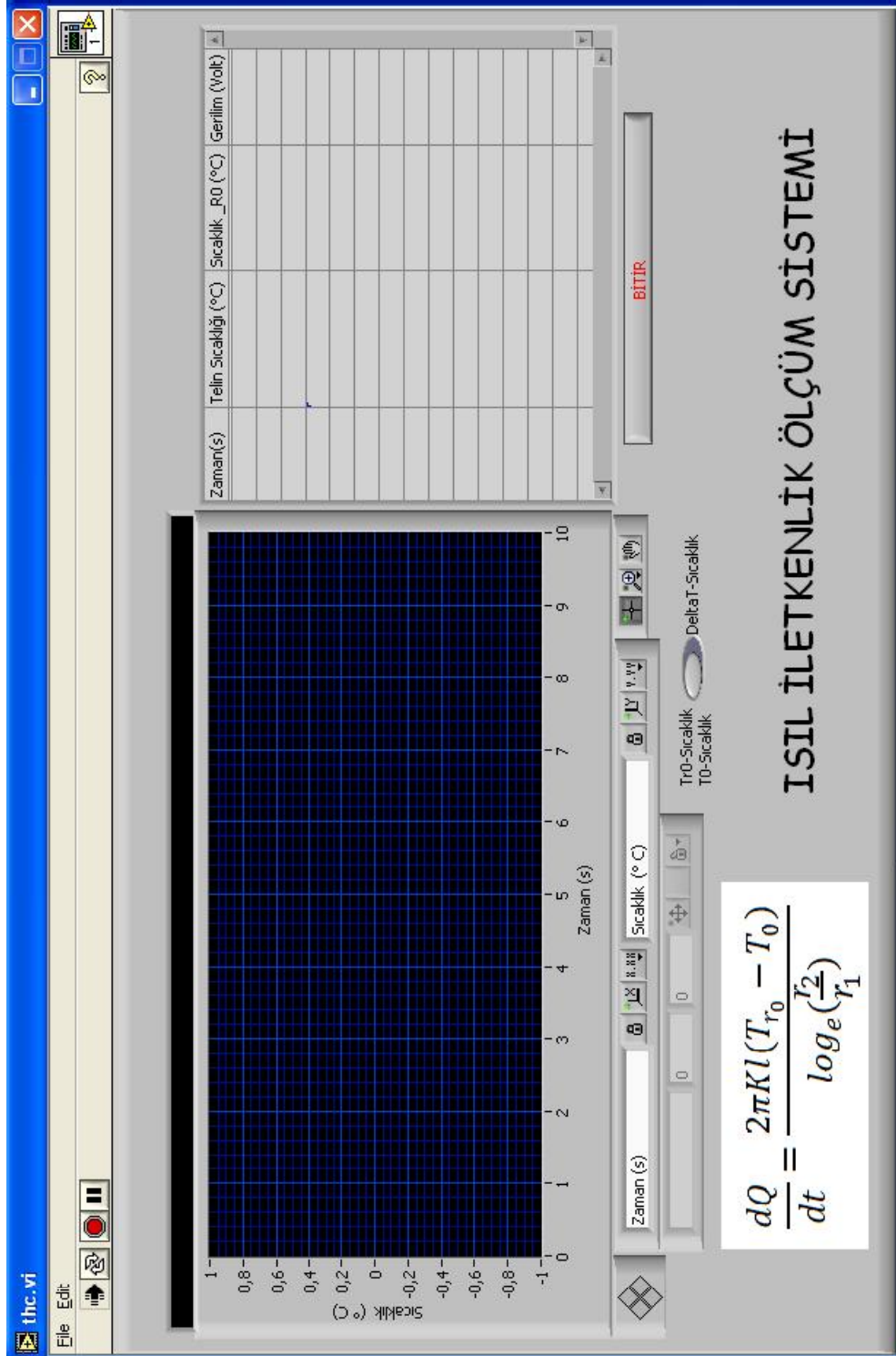
The Dual Role of Nanoparticles in the Thermal Conductivity Enhancement of Nanoparticle Suspensions, "<http://www.rpi.edu/~petersb/research/nptc/nptc.html#abst>", (08.06.2006).

Thermal Conductivity of a good conductor, "<http://media.paisley.ac.uk/~davison/labpage/searle/searle.html>", (28.08.2006).

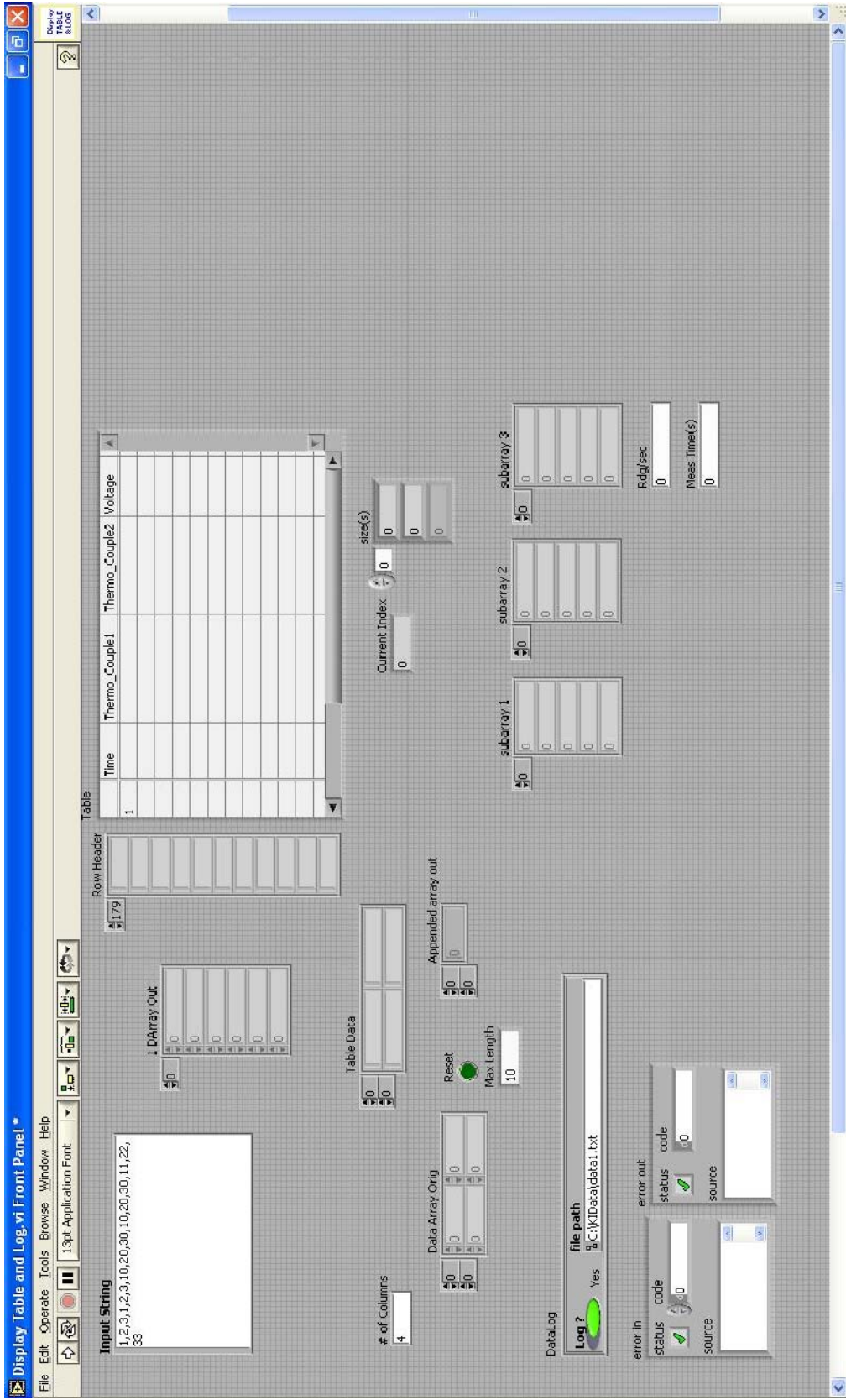
Thermal Conductivity of Liquids and Gases, "<http://fluidproperties.nist.gov/thermal.html>", (14.04.2007).

EKLER

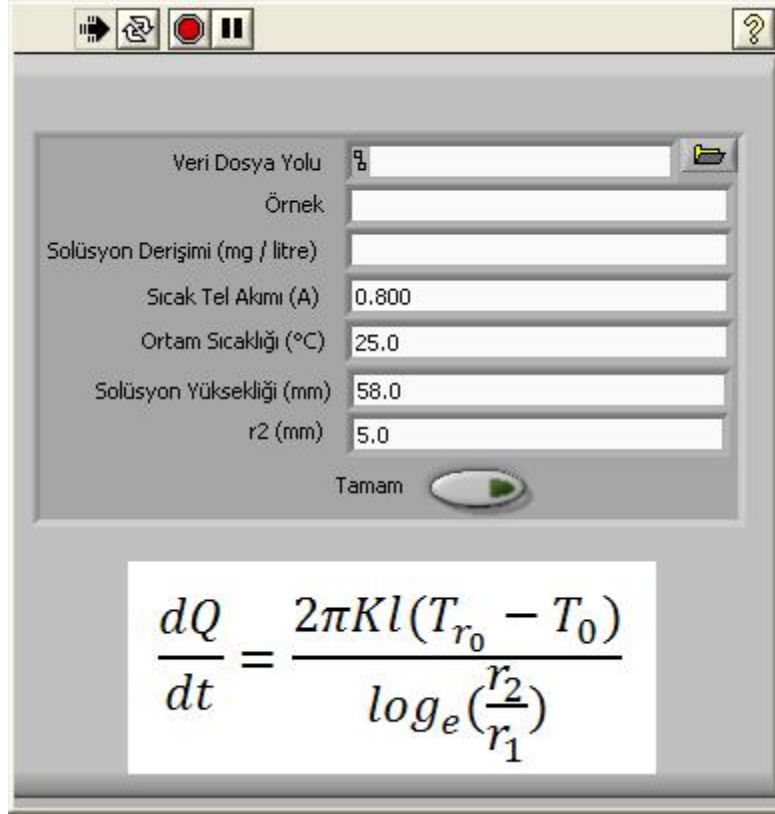
EK-1



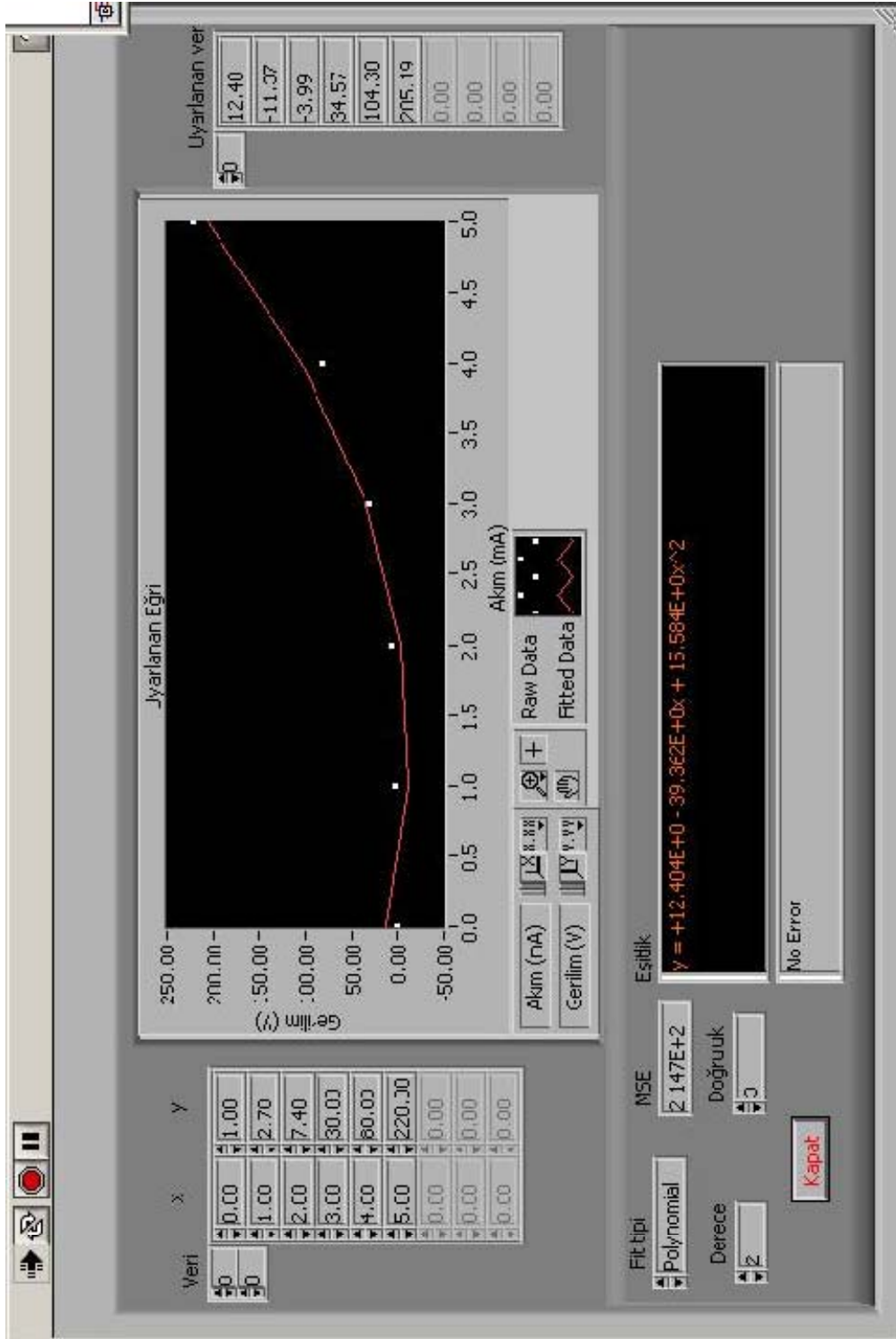
Şekil Ek 1. Isıl iletkenlik ölçüm sistemini kontrol eden yazılımın LabVIEW' de ara yüzü.



Şekil Ek 2. LabVIEW'de verilerin dizilere aktarılması ile ilgili altprogram.



Şekil Ek 3. LabVIEW'de ölçüm parametrelerinin girildiği arayüz.



Şekil Ek 4. LabVIEW'de verilerin analiz edildiği altprogramın arayüzü.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murat ARTUÇ

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Yılı : 1980

Medeni Hali : Bekâr

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1996 – 1999 Ankara 50. Yıl Lisesi

Lisans 2000 – 2004 Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dili: İngilizce

İş Tecrübesi:

2005 - ... Teknis Teknolojik Sistemler Ltd. Şti., Fizik Mühendisi