

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LİNEER ISI AKIŞ METODUYLA In-Bi İNTERMETALİK
ALAŞIMLARININ ISIL İLETKENLİK KATSAYISININ
ÖLÇÜMÜ**

**Tezi Hazırlayan
Pınar ATA**

**Tezi Yöneten
Doç. Dr. Sezen AKSÖZ**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2015
NEVŞEHİR**

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LİNEER ISI AKIŞ METODUYLA In-Bi İNTERMETALİK
ALAŞIMLARININ ISIL İLETKENLİK KATSAYISININ
ÖLÇÜMÜ**

**Tezi Hazırlayan
Pınar ATA**

**Tezi Yöneten
Doç. Dr. Sezen AKSÖZ**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2015
NEVŞEHİR**

Doç. Dr. Sezen AKSÖZ danışmanlığında **Pınar ATA** tarafından hazırlanan “**Lineer Isı Akış Metoduyla In-Bi İntermetalik Alaşımlarının Isıl İletkenlik Katsayısının Ölçümü**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

09/07/2015

JÜRİ

Başkan : Doç. Dr. Sezen AKSÖZ

Üye : Doç.Dr. Tacettin YILDIRIM

Üye : Yrd.Doç.Dr. Mevlüt ŞAHİN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 13.07.2015 tarih ve 2015/30-01 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

14.7.2015

Doç.Dr. Şahlan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Pınar ATA



TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her konuda destek olan, bilimsel görüşleriyle ışık tutan, karşılaştığım sorunlarda yakın ilgisiyle çözümler üreten, her zaman umut veren, bu aşamaya gelmem de emeği büyük olan çoğu zaman hocadan daha da yakın olan sayın Doç. Dr. Sezen AKSÖZ' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel süreçler de benimle birlikte emek harcayan, bilgilerini esirgemeyen, bilgilerimi ve çalışmalarımı geliştirmem de büyük payı olan Erciyes Üniversitesi Araştırma Görevlisi Ümit BAYRAM hocama teşekkürü borç bilirim. Ayrıca aynı laboratuarda çalışma arkadaşım olan Yasin KARAMAZI' ya gösterdiği emek, sabır, güler yüz ve iyilikleri için çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın bir bölümünün yapıldığı Katıhal 1 Araştırma laboratuvarının oluşumunda ve gelişiminde çok büyük katkıları olan güler yüzlü yaklaşımlarıyla yardımlarını esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI ve Prof. Dr. Kâzım KEŞLİOĞLU' na teşekkür ederim.

Tez çalışmasında maddi destek veren TÜBİTAK-BİDEB 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans (2014-2) Burs Programı' na ve Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: NEÜADP15518) teşekkür ederim.

Bu süreç içerisinde maddi ve manevi destek olan, her zaman yanımda olan ailem, kardeşlerim, yeğenlerim ve nişanlıma gösterdikleri sabırdan ötürü teşekkür ederim.

LİNEER ISI AKIŞ METODUYLA In-Bi İNTERMETALİK ALAŞIMLARININ ISIL İLETKENLİK KATSAYISININ ÖLÇÜMÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Pınar ATA

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2015

ÖZET

Bi-12 ağırlık % In (Bi₄In), Bi-15 ağırlık % In (Bi₃In), Bi-35.4 ağırlık % In (BiIn), Bi-45 ağırlık % In (Bi₂In₃), Bi-47.6 ağırlık % In (Bi₃In₅), Bi-53 ağırlık % In (BiIn₂), Bi-62 ağırlık % In (BiIn₃) In-Bi intermetalik alaşımlar için ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi lineer ısı akış metodu, elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi d.c. dört nokta prob metoduyla ölçüldü. Isıl iletkenliğe elektron ve fonon katkıları, In-Bi intermetalik alaşımlarında Wiedemann-Franz kanunuyla hesaplanan ısı ve elektriksel iletkenlik değerleri kullanılarak belirlendi. Isıl iletkenliğinin fonon bileşeninin yüzdesi, 313-373 K sıcaklık aralığında Bi-12 ağırlık % In, Bi-15 ağırlık % In, Bi-35.4 ağırlık % In, Bi-45 ağırlık % In, Bi-47.6 ağırlık % In, Bi-53 ağırlık % In, Bi-62 ağırlık % In intermetalik alaşımları için sırasıyla 49-54 %, 49-57 %, 37-52 %, 23-39 %, 30-40 %, 49-52 %, 35-46 % olarak bulundu. In-Bi intermetalik alaşımları için elektriksel iletkenliğinin sıcaklık katsayısı sırasıyla 2.41×10^{-3} , 1.61×10^{-3} , 1.95×10^{-3} , 2.28×10^{-3} , 2.54×10^{-3} , 0.46×10^{-3} , $1.65 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ bulundu. İntermetalik alaşımlar için erime sıcaklığındaki katı fazın ısı iletkenlikleri ve ısı sıcaklık katsayıları sırasıyla 14.50, 16.23, 19.42, 25.63, 25.63, 31.83, 35.93 W/Km ve 1.36×10^{-3} , 1.29×10^{-3} , 3.27×10^{-3} , 2.86×10^{-3} , 2.47×10^{-3} , 1.79×10^{-3} ve $4.34 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 'dir. Aynı zamanda In-Bi intermetalik alaşımlarının mikroyapı ve yapısal karakteristikleri X-ışını kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile araştırıldı.

Anahtar Kelimeler: *Metaller ve Alaşımlar, Fononlar, Termoelektrik, Isıl Analiz.*

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Sezen AKSÖZ

Sayfa Adeti: 102

**THE DETERMINATION OF THERMAL TEMPERATURE COEFFICIENTS
WITH LINEAR HEAT FLOW APPARATUS OF In-Bi İNTERMETALLIC
ALLOYS
(M. Sc. Thesis)**

Pınar ATA

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

July 2015

ABSTRACT

The electrical and thermal conductivity variations with temperature for In-Bi intermetallic alloys, namely Bi-12 wt.% In (Bi₄In), Bi-15 wt.% In (Bi₃In), Bi-35.4 wt.% In (BiIn), Bi-45 wt.% In (Bi₂In₃), Bi-47.6 wt.% In (Bi₃In₅), Bi-53 wt.% In (BiIn₂), Bi-62 wt.% In (BiIn₃) alloys were measured by d.c. four-point probe method and linear heat flow apparatus, respectively. The contributions of electron and phonon to the thermal conductivity have been separately determined by using the measured values of thermal and electrical conductivities from Wiedemann-Franz law in the In-Bi intermetallic alloys. The percentages of phonon component of thermal conductivity were found to be in the range of 49-54 %, 49-57 %, 37-52 %, 23-39 %, , 30-40 % , 49-52 % , 35-46 % for Bi-12 wt.% In , Bi-15 wt.% In, Bi-35.4 wt.% In, Bi-45 wt.% In, Bi-47.6 wt.% In, Bi-53 wt.% In, Bi-62 wt.% In alloys at the ranges of 313-373 K temperature, respectively. The temperature coefficients (α) of electrical conductivity for the In-Bi intermetallic alloys were found to be 2.41×10^{-3} , 1.61×10^{-3} , 1.95×10^{-3} , 2.28×10^{-3} , 2.54×10^{-3} , 0.46×10^{-3} , 1.65×10^{-3} K⁻¹, respectively. The thermal conductivities of the solid phases at their melting temperature and the thermal temperature coefficients for In-Bi intermetallic were also found to be 14.50, 16.23, 19.42, 25.63, 25.63, 31.83, 35.93 W/Km and 1.36×10^{-3} , 1.29×10^{-3} , 3.27×10^{-3} , 2.86×10^{-3} , 2.47×10^{-3} , 1.79×10^{-3} and 4.34×10^{-3} K⁻¹, respectively. Also, the microstructure and structural characteristics of In-Bi intermetallic alloys were investigated by X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM).

Keywords: Metals and Alloys, Phonons, Thermoelectric, Thermal Analysis.

Thesis Supervisor: Doç. Dr. Sezen AKSÖZ

Page Number: 102

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
BÖLÜM 1	
ISIL İLETKENLİK İÇİN TEMEL KAVRAMLAR.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Isıl İletkenlik ile İlgili Tanımlar	1
1.2.1. Isı.....	1
1.2.2. Sıcaklık.....	2
1.2.3. Isı akısı	2
1.2.4. Isı sığası.....	3
1.2.4.1. Fonon ısı sığası.....	3
1.2.4.1.1. Klasik model	4
1.2.4.1.2. Einstein modeli	6
1.2.4.1.3. Debye modeli	10
1.2.4.2. Elektronik ısı sığası	13
1.2.5. Isı iletkenliği	16
1.2.6. Malzemelerde ısı iletkenliği.....	19
1.2.7. Termoelektrik özellikler.....	20
1.2.7.1. Seebeck etkisi.....	20
1.2.7.2. Peltier etkisi.....	22
1.3. Faz Diyagramları.....	23
1.3.1. İkili ötektik faz diyagramları.....	24
1.4. Elektriksel Özdirenç/İletkenlik	25
1.5. In-Bi İntermetalik Alaşımların Kullanım Alanları.....	31

BÖLÜM 2

ISIL İLETKENLİĞİN BELİRLENMESİ İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	33
2.1. Giriş.....	33
2.2. Isıl İletkenliğin Belirlenmesi için Yapılan Çalışmalar.....	33
2.2.1. Kararlı hal metotları.....	35
2.2.1.1. Lineer ısı akış metotları.....	35
2.2.1.1.1. Mutlak metotlar.....	36
2.2.1.1.1.1. Çubuk (rod) metodu.....	36
2.2.1.1.1.2. Levha (disk) metodu.....	37
2.2.1.1.2. Karşılaştırmalı metotlar.....	38
2.2.1.1.2.1. Bölünmüş çubuk metodu.....	38
2.2.1.1.2.2. Levha (disk) metodu.....	39
2.2.1.1.2.3. Bileşik Metot.....	39

BÖLÜM 3

DENEYSEL SİSTEMLER ve BİR DENEYİN YAPILIŞI.....	45
3.1. Giriş.....	45
3.2. Deneysel Sistemler.....	45
3.2.1. Vakumlu eritme fırını.....	45
3.2.2. Döküm fırını.....	47
3.2.3. Lineer ısı akış sistemi.....	49
3.2.3.1. Isıtıcı sistem.....	49
3.2.3.2. Soğutucu sistem.....	52
3.2.3.3. Numune tutucu.....	53
3.3. Isı İletkenliğinin Ölçümü için Bir Deneyin Yapılışı.....	54
3.3.1. Numune kalıbının hazırlanması.....	54
3.3.2. Numune kalıbının döküm fırınına yerleştirilmesi ve dökümün yapılması.....	56
3.3.3. Numunenin lineer ısı akış sistemine yerleştirilmesi.....	58
3.3.4. Lineer ısı akış sisteminde bir deneyin yapılışı.....	61
3.3.5. Metalografik işlemler.....	62
3.3.5.1. Numunelerin kesilmesi.....	62
3.3.5.2. Numunelerin zımparalanması.....	63
3.3.5.3. Numunelerin parlatılması.....	63
3.3.5.4. Numunelerin dağlanması.....	66

3.3.6. Fazların belirlenmesi.....	67
3.3.7. Elektriksel özdirenç/iletkenlik değerlerinin ölçülmesi.....	67
BÖLÜM 4	
DENEYSEL SONUÇLAR	69
4.1. Giriş.....	69
4.2. Alaşımın Isıl İletkenliğinin Ölçümü	69
4.3. Alaşımın Elektriksel İletkenliğinin Ölçümü	73
4.4. Isıl Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması	76
4.5. Elektriksel Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması.....	76
4.6. Isı İletkenliğe Elektron ve Fononların Katkısının Hesabı.....	76
4.7. In- Bi İntermetalik Fazlarının Mikroyapılarının Tayini.....	80
4.8. Katı Fazın Isıl İletkenlik Katsayısının Ölçümündeki Hata Analizi	85
4.8.1. Isı akış hızındaki kısmi belirsizlik.....	85
4.8.2. Isıl çiftler arasındaki sıcaklık farkı $\Delta T=T_1-T_2$ ölçümündeki belirsizlik	86
4.8.3. Kesit alanı (A) ve ısı çift konumlarının (X_1, X_2) ölçümündeki belirsizlik	86
BÖLÜM 5	
SONUÇ-TARTIŞMA ve ÖNERİLER.....	88
5.1. Giriş	88
5.2. Öneriler	89
KAYNAKLAR	90
EKLER.....	100
ÖZGEÇMİŞ	101

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Bazı malzemelerin Debye Sıcaklıkları	13
Tablo 1.2.	Bazı ısı çiftlerin özellikleri	22
Tablo 1.3.	Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması.....	26
Tablo 1.4.	Malzemelerin elektriksel iletkenlik değer aralıkları	26
Tablo 1.5.	Alaşımelerde kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri	28
Tablo 2.1.	Metalik alaşımların ısı iletkenlik değerleri (W/Km)	40
Tablo 3.1.	Parlatmada kullanılan çözelti ve kumaşlar	65
Tablo 3.2.	İkili intermetalik alaşımlara uygulanan dağılayıcılar	66
Tablo 4.1	Farklı sıcaklıklarda alüminyum çubuk numune üzerindeki güç akışını tespit etmek için tipik deneysel veriler.....	71
Tablo 4.2.	İntermetalik alaşımları için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişiminden elde edilen deneysel veriler	72
Tablo 4.3.	In-Bi intermetalik alaşımlarının katı fazlarının ısı ve elektriksel özellikleri.....	79

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Isı sığasının sıcaklıkla değişimi	9
Şekil 1.2.	C/T' nin $T^{2'}$ ye bağlı değişim grafiğinin şematik gösterimi	16
Şekil 1.3.	(a) Termoelektrik etki ve (b) ısıl çift.....	21
Şekil 1.4.	Peltier etkisi	23
Şekil 1.5.	İkili ötektik faz diyagramı.....	24
Şekil 1.6.	Elektriksel öz direnç/ iletkenlik ölçümü için kullanılan dört nokta metodunun şematik diyagramı	30
Şekil 3.1.	Vakumlu eritme fırınının (a) fotoğrafı (b) şematik gösterimi.....	46
Şekil 3.2.	Döküm fırınının (a) fotoğrafı (b) şematik gösterimi.....	48
Şekil 3.3.	Isıtıcı sistemin genel görünümü	49
Şekil 3.4.	Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı	50
Şekil 3.5.	(a) Soğutucu sistemin genel görünümü (b) Soğutucu bloğun şematik gösterimi.....	52
Şekil 3.6.	Soğutucu-ısıtıcı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü	53
Şekil 3.7.	Numune tutucunun şematik gösterimi	54
Şekil 3.8.	Grafitten yapılmış olan pota, huni ve numune kalıbının fotoğrafı	54
Şekil 3.9.	Lineer ısı akış tekniğinde kullanılan numune kalıbının (a) fotoğrafı (b) şematik gösterimi	55
Şekil 3.10.	Numune kalıbı yapımında kullanılan küçük torna tezgahı	55
Şekil 3.11.	Numune dökümünde kullanılan huni.....	56
Şekil 3.12.	(a) Numune potası ve üst desteğin silikon yapıştırıcı ile birleşiminin fotoğrafı (b) Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi	57
Şekil 3.13.	Grafitten yapılmış potanın şematik gösterimi.....	58
Şekil 3.14.	Numunenin ve ısıl çiftlerin konumlarının şematik çizimleri	59
Şekil 3.15.	Numunelerin ölçümünde kullanılan R tipi termal çiftler.....	59
Şekil 3.16.	Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü.....	60
Şekil 3.17.	Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan sıcaklık kaydedicisi	61
Şekil 3.18.	Epoksi-resin ile kalıplanmış numuneler.....	62
Şekil 3.19.	Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kağıtları	63

Şekil 3.20. Otomatik parlatma robotu	64
Şekil 3.21. Numunelerin parlatılmasında kullanılan (a) kumaşlar (b) süspansiyonlar ..	65
Şekil 3.22. Optik mikroskop ve CCD kameradan oluşan görüntü sistemi	67
Şekil 3.23. Elektriksel özdirenç/iletkenlik ölçüm düzeneği.....	68
Şekil 4.1. In-Bi intermetalik alaşımlarının ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi	74
Şekil 4.2. In-Bi intermetalik alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	75
Şekil 4.3. In-Bi intermetalik alaşımlarının ısı iletkenlik değerlerine fonon ve elektron katkılarının sıcaklıkla değişimi	78
Şekil 4.4. EDX analizi kullanarak (a) Bi- 12 ağı. % In (b) Bi- 15 ağı. % In intermetalik alaşımlarının kimyasal bileşim analizi	81
Şekil 4.5. EDX analizi kullanarak (a) Bi- 35.4 ağı. % In (b) Bi- 45 ağı. % In intermetalik alaşımlarının kimyasal bileşim analizi	82
Şekil 4.6. EDX analizi kullanarak (a) Bi- 47.6 ağı. % In (b) Bi- 53 ağı. % In intermetalik alaşımlarının kimyasal bileşim analizi	83
Şekil 4.7. EDX analizi kullanarak Bi- 62 ağı. % In intermetalik alaşımının kimyasal bileşim analizi	84

BÖLÜM 1

ISIL İLETKENLİK İÇİN TEMEL KAVRAMLAR

1.1.Giriş

Isıl iletkenlik değerleri; kristal yapı parametreleri, öz direnç, genleşme katsayısı, erime sıcaklığı, kaynama noktası, entropi ve özkütle gibi malzemelerin temel fiziksel özellikleri arasında yer almaktadır. Metallerin ve metalik alaşımların ısıl özelliklerinin bilinmesi elektronik ev aletlerinden uzay sanayisine pek çok endüstriyel alanda tasarım ve kullanım açısından önemli faydalar sağlar. Isıl iletkenlik (K) malzemelerin sağlamlık ve performanslarının kontrolünde kritik rol oynar. Saf metallerin ısıl iletkenliği sadece sıcaklığa bağlı olarak değişirken alaşımların ısıl iletkenlikleri hem sıcaklık hem de bileşime bağlı olarak değişir.

1.2. Isıl İletkenlik ile İlgili Tanımlar

1.2.1. Isı

Bir maddenin bütün moleküllerinin sahip olduğu çekim potansiyel enerjileri ile kinetik enerjilerinin toplamına ısı denir. Isı bir enerji türüdür, diğer enerjilere dönüşebilir. Isı kalorimetre kabı ile ölçülür. Birim olarak “Joule” veya “kalori” kullanılır. Madde miktarına bağlıdır. Maddeyi oluşturan atom ve moleküllerin sürekli hareketinden kaynaklanır. Bu hareket ne kadar hızlı olursa madde de o kadar çok ısınır. Atom ve moleküller ise birkaç şekilde hızlandırılabilir. Bu yollardan birisi kimyasal tepkimedir. Örneğin bir yakıt yandığı zaman bir kimyasal tepkime gerçekleşir. Atom ve molekülleri hızlandırma yöntemlerinden bir başkası ise sürtünmedir. İki cisim birbirine sürtülerek ısı üretilebilir.

Isı ile çoğu zaman karıştırılan bir enerji türü mevcuttur. Bu enerji, bir maddenin bütün moleküllerinin sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamı şeklinde tanımlanabilen iç enerjidir ve U ile gösterilir. İç enerji madde miktarına bağlıdır. Mesela; 50 °C sıcaklığa sahip 100 g su ile aynı sıcaklıkta bulunan 200 g suyun iç enerjileri karşılaştırılacak olursa 200 g suyun ki daha büyüktür. Yine 50 °C sıcaklığa sahip 100 g su ile 80 °C sıcaklıkta bulunan 100 g suyun iç enerjileri karşılaştırılacak

olursa daha sıcak olan daha çok iç enerjiye olacaktır. Bu iki su karıştırılırsa sıcaklık farkından dolayı sıcak sudan soğuğa ısı aktarımı olacaktır.[1]

1.2.2. Sıcaklık

Sıcaklık, maddenin ne kadar soğuk ya da sıcak olduğunu gösteren temel bir büyüklüktür. Sıcaklığı bir maddeyi oluşturan atomların veya moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin bir ölçüsü şeklinde tanımlamak mümkündür. Atom veya molekülün kinetik enerjisi arttıkça sıcaklıkta orantılı olarak artar. Sıcaklık bir enerji türü değildir, maddeyi oluşturan atom ve moleküllerin hızları ile ilgili bir kavramdır. Bütün moleküllerin kinetik enerjileri eşit değilse her bir molekülün kinetik enerjileri toplanıp, parçacık sayısına bölünerek akışkanın ortalama kinetik enerjisi bulunur. Bulunan enerji yüksek ise madde sıcak olarak nitelenirken, düşük ise madde soğuk olarak nitelenir. Sıcaklık artırılırsa moleküller daha büyük kinetik enerjiye sahip olacağından maddenin iç enerjisi de artar.

Sıcaklık termometre adı verilen genleşme prensibiyle çalışan aletler ile ölçülür. Günümüzde farklı yapılarda ve farklı çalışma aralıklarında kullanılan birçok termometre türü kullanılmaktadır. Sıcaklık ölçmek için genelde suyun kaynama ve donma noktasını esas alan Celsius, Fahrenheit ve Kelvin ölçekleri kullanılmaktadır. Birim olarak günlük hayatta çoğu ülkede °C (santigrat derece), İngiltere’de °F (Fahrenheit derece), bilim ve teknikte ise K (Kelvin) kullanılmaktadır. 20°C sıcaklığa sahip bir odanın sıcaklığı Fahrenheit termometresinde 68 °F olarak Kelvin termometresinde ise 293 K olarak ölçülür.

Bir cismin sıcaklığı mekanik iş (sürtünme), elektriksel iş, ışımaya veya daha sıcak bir ortamla doğrudan temas gibi bir kaç şekilde artırılabilir. Sıcaklık madde miktarına bağlı değildir.[2]

1.2.3. Isı akısı

İki cisim arasındaki Sıcaklık farkı tarafından meydana gelen ve mekanik olmayan enerji iletimidir. Isı da iş gibi yola bağlıdır. Sistemin başlangıç ve son durumlarına tabi değildir. Isı akısı q bir maddenin birim alanından birim zamanda geçen ısının miktarı olup

Fourier yasasıyla hesaplanabilir:

$$j = -KdTdx \quad j = -KdTdx \quad j = -K \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Burada j 'nin birimi (W/m^2)'dir; K malzemenin ısı iletkenliğini gösteren ısı iletim katsayısıdır ve birimi $W/(^{\circ}Cm)$ 'dir. T =sıcaklık ($^{\circ}C$) ve x =ısı akısının doğrultusu boyunca olan mesafedir (m).

1.2.4. Isı sığası

Herhangi bir maddenin bir molünün sıcaklığını 1 K artırabilmek için maddeye verilmesi gereken ısı miktarına molar ısı sığası denir. Isı sığası katıların ısı soğurma ve ısı tutma kabiliyeti olarak da ifade edilebilir. Tezde bundan sonra sadece ısı sığası olarak geçecek olan bu büyüklük maddenin molar kütlesi ile öz ısısının çarpımına eşittir. Birimi $J/mol.K$ 'dir. İlk olarak 1819'da; Dulong ve Petit sabit hacimdeki ısı sığasının çoğu katı için $25 J/mol.K$ değerine yaklaşık olarak eşit olduğunu deneysel olarak bulmuştur. Fakat sonraki çalışmalarda ısı sığasının sıcaklığa bağlı olduğunun gözlenmesi üzerine bunu açıklamak için bazı teoriler ileri sürülmüştür. Maddenin ısı sığasına, örgü titreşimlerinin kuantası olarak adlandırılan fononlar, elektronlar katkıda bulunmaktadır. Şimdi bu katkıyı ayrı ayrı inceleyelim.

1.2.4.1. Fonon ısı sığası

Bir kristalin ısı sığasına fononların katkısı örgü ısı sığası olarak adlandırılır. Deneysel yöntemler ile sabit basınçtaki ısı sığası ölçülür. Sabit hacimdeki ısı sığası ise temel kavramlar olan sıcaklık ve enerji yardımıyla bulunur. Sıcaklığı T ve iç enerjisi U olan bir maddenin sabit hacimdeki ısı sığası,

$$C_v \equiv \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (1.2)$$

şeklinde tanımlanır. Şimdi fonon ısı sığasının önce klasik model ile sonra Einstein'ın ve Debye'nin yaklaşımlarıyla nasıl açıklandığına değinelim.

1.2.4.1.1. Klasik model

Pierre Louis Dulong ve Alexis Thérèse Petit adında iki Fransız bilim adamı 1819'da deneysel olarak katı elementlerin ısı sığasının, atom ağırlıklarıyla yakından ilişkili olduğunu gösterdiler. Dulong-Petit kanunu adını verilen bu kanuna göre katı elementlerin özısıları ile molar atom ağırlıkları çarpılırsa elde edilen ısı sığası yaklaşık olarak 25 J/mol.K değerindeydi. Bu kanuna göre katıların ısı sığası sabitti ve sıcaklıktan ve malzemenin cinsinden bağımsızdı [3].

Klasik modelde, m kütleli bir atomun bir katı içerisinde x_m genlikli ve ω frekanslı bir harmonik hareket yaptığı düşünülür. Enerji soğuran atom, bulunduğu nokta civarında titreşim hareketi yapacaktır. Bu salınımın genliği, en yakın komşu atomlardaki elektrostatik itme kuvveti ile sınırlanır. Bu sebeple ısı titreşimin sınırı, sıcaklığa bağlı olarak, atomlar arasındaki boşluğun % 5 veya % 10'undan büyük değildir. Kısaca, bir atom iki yay arasında tutulan bir küreye benzetilmektedir [4]. Atom iki yay arasındaki geri çağırıcı kuvvetler etkisi altında harmonik hareket yapmaktadır.

Geri çağırıcı kuvvetin sabiti μ olsun. Herhangi bir anda atomun denge durumundan sapmasını gösteren yer değiştirmesi, x ; hızı,

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (1.3)$$

ve sahip olduğu ivmesi,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \left(-\frac{\mu x}{m} \right) = -\omega^2 x \quad (1.4)$$

olacaktır. Bu harekette toplam enerji ifadesi ise kinetik ve potansiyel enerjilerin toplamından,

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{\mu x^2}{2} \quad (1.5)$$

$$E = \frac{m}{2}(v^2 + \omega^2 x^2) \quad (1.6)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadenin Boltzmann dağılımı kullanılarak ortalama değeri bulunacak olursa enerjinin beklenen değeri,

$$\langle E \rangle = \frac{\int_{v=0}^{v_m} \int_{x=0}^{x_m} E \exp\left(\frac{-E_0}{k_B T}\right) dv dx}{\int_{v=0}^{v_m} \int_{x=0}^{x_m} \exp\left(\frac{-E_0}{k_B T}\right) dv dx} \quad (1.7)$$

Bu integralden T sıcaklığında klasik harmonik salıncının ortalama enerjisi,

$$\langle E \rangle = k_B T \quad (1.8)$$

olur. Buradan bir serbestlik derecesine sahip olan ve harmonik hareket yapan bir atomun soğurulabileceği ısı enerjisinin sıcaklıkla doğru orantılı olduğu görülür. Buradaki orantı katsayısı k_B Boltzmann sabitidir.

Üç boyutlu kristal bir yapıdaki N tane atom için her atomun 3 tane klasik serbestlik derecesi bulunduğu için toplam enerji,

$$U = 3Nk_B T \quad (1.9)$$

olarak bulunur ve buradan (1.2) denklemini kullanılarak ısı sığası

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v = 3Nk_B \quad (1.10)$$

şeklinde elde edilir. (1.10) denkleminde de görüleceği gibi klasik modele göre (Dulong- Petit kanunu) ısı sığası katılar için sabit olmaktadır ve sıcaklıktan bağımsızdır. 1 mol katı madde içerisinde Avagadro sayısı kadar yani $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ adet atom olduğundan, N_A ve Boltzmann sabiti $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K değerleri (1.9) denkleminde kullanılarak klasik ısı sığasının değeri belirtildiği gibi yaklaşık olarak $C_v \cong 25$ J/mol.K olarak bulunur.

Dulong-Petit ikilisinin deneysel olarak tespit ettiği bu ısı kapasitesi değeri atom başına üç harmonik salıncı içeren basit bir modelle bu şekilde kolayca açıklanmıştır. Bu kanun o zamanlar için yeni olan metal elementlerin yaklaşık atom ağırlıklarının belirlenmesinde fayda sağlamıştır. Model bazı basit kristaller için oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Fakat bu yaklaşım hafif ve sıkıca bağlı atomlardan oluşan katı Bor, Berilyum,

Karbon (elmas) ve Silikonun oda sıcaklığındaki ısı sığalarının neden düşük olduğunu açıklamada başarısız olmuştur. Bunun sebebi kuantum mekaniksel etkilerin daha önemli hale gelmesidir. Bu kanun ayrıca incelenen malzemelerin çalışılan sıcaklıkta erimediklerini, kaynamadıklarını veya kristal yapılarını değiştirmediklerini varsayar.

Elmas modern fizik tarihinde özel bir yere sahiptir çünkü oda sıcaklığında bile, Dulong –Petit kanunundan en büyük sapmayı sergiler. Bu gözlem Einstein'ın özısı üzerinde malzemelerin olası kuantum etkilerini dikkate almasına sebep olmuştur. Bu etkiler özel tetrahedral örgülü atom yapısından dolayı elmasta oldukça güçlüdür [5]. Ayrıca deneysel olarak sıcaklık azaldıkça ısı sığasının sabit kalmayıp azaldığı da gözlenmiştir.

Sonuç olarak ısı sığasının oda sıcaklığında her katı için aynı olmaması ve sıcaklığa bağlı olması yeni bir modele olan ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Klasik mekaniğin açıklayamadığı bu noktalar ancak Einstein ve sonra Debye'nin katkılarıyla kuantum mekaniğinden yararlanılarak açıklanabilmiştir.

1.2.4.1.2. Einstein modeli

Elmasın ısı sığasının bulunması ile ilgili sorulara cevap bulmak için yola çıkan Einstein 1907 yılında Planck'ın siyah cisim ışımasının kuantumlu olacağı yaklaşımına dayanan ve genelde katıların ısı sığasına daha gelişmiş bir açıklama getiren bir makale yayınladı. Isı sığası ifadesini daha kullanışlı bir şekilde ifade etmek için Einstein maddenin üç boyutta hareket eden harmonik salınımcılardan oluştuğunu varsaydı. Bu klasik salınımcıların kuantize olacağını yani sadece izinli belirli titreşim modlarında olabileceğini vurguladı. Bu örgü titreşimlerinin kuantasını ise fonon olarak isimlendirildi.

Fonon kelimesi elektron veya foton kelimesine benzeştirilerek türetilmiştir. Fotonlar, elektromanyetik ışımının kuantasıdır ve uygun frekans aralığındaki klasik ışığı tanımlamada kullanılır. Diğer taraftan fononlar ise, iyonik yer değiştirme alanın kuantasıdır ve uygun frekans aralığındaki klasik sesi tanımlar.

Fonon, salınıcının tanecik özelliğini gösterir. Ayrıca Einstein dalga-tanecik ikiliğinden de bahseder. Buna göre fonon dalgaları kristal içinde ses süratinde hareket eder. Fonon dalgaları, elektromanyetik dalgalar değil enine veya boyuna modlarda titreşen elastik dalgalardır.

Elektronlara benzer şekilde, fononların özellikleri de band diyagramlarıyla, Brillouin bölgeleriyle veya durum eğrilerinin yoğunluğu ile ifade edilebilir. Fakat küçük farklılıklar da göze çarpar. Mesela; bir elektronun band diyagramındaki enerjisi yerine fonon band diyagramında, fononun titreşim frekansı ω vardır. Fonon bandları artık valans ve iletim bandları olarak değil akustik ve optik bandlar olarak isimlendirilir [4].

Einstein'ın ısı sığası teorisinde üç varsayımı vardır. Birincisi, her katı N tane atomdan meydana gelen bir örgü yapısına sahiptir. Her atomun, birbirlerinden bağımsız olarak, üç serbestlik derecesiyle örgü içerisinde üç boyutta hareket ettiği varsayılmıştır. Böylece bütün örgüdeki titreşim hareketi toplam $3N$ tane modla tanımlanabilecektir. İkincisi, katı örgüdeki atomlar birbirleriyle etkileşime girmezler. Üçüncüsü, katı içerisindeki bütün atomlar aynı frekansta titreşirler. Son varsayım, Einstein ile bir sonraki modeli ortaya koyan Debye'nin yaklaşımlarındaki altı çizilmesi gereken fark olması açısından önemlidir [6].

Kuantize bir harmonik salınıcı sadece bir ω frekansıyla salınım yaptığından bir salınıcı için enerji ifadesi (1.11) denklemindeki gibi olacaktır.

$$E_n = n\hbar\omega \quad (n = 0, 1, 2, 3...) \quad (1.11)$$

Fononlar ve elektronlar arasındaki önemli bir farkın burada vurgulanması gerekir. Fononlar, sıcaklığın artırılmasıyla oluşur ve düşürülmesiyle de kaybolur yani fonon sayısı korunmazken elektron sayısı sabittir. Bu yüzden Einstein'a göre, sayıları sıcaklıkla artan aynı ω titreşim frekansına ve aynı $\hbar\omega$ enerjisine sahip fononlar meydana gelir [4].

Bulunma ihtimali, n. hal için klasik termodinamikteki Boltzmann faktörü kullanılarak (1.12) denkleminde verilmiştir.

$$g_n = \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right) \quad (T=0 \text{ ise } g_n=0) \quad (1.12)$$

ω frekansında salınan kuantum harmonik bir salınıcının ortalama enerjisi;

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} E_n \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right)} \quad (1.13)$$

ifadesinden ortalama fononların sayısı ile bir fononun enerjisi çarpımı olan

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1} \quad (1.14)$$

ifadesi bulunur. Burada,

$$\langle n \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1} \quad (1.15)$$

ifadesi ortalama fononların sayısıdır. Einstein modeli N tane atomun 3N tane moda ve her modun da aynı ω_E Einstein frekansına sahip olduğunu kabul ettiğinden örgü titreşimlerinden meydana gelen enerji,

$$U = 3N \left[\frac{\hbar\omega_E}{\exp\left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}\right) - 1} \right] \quad (1.16)$$

olur. Bu enerji ve (1.2) denklemi kullanılarak Einstein modeline göre ısı sığası sonuç olarak

$$C_v = 3Nk_B \cdot \frac{\left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}\right)^2 \exp\left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}\right)}{\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}\right) - 1\right]^2} \quad (1.17)$$

şeklinde bulunur. ω_E frekansına sahip fonon enerjisi ortalama enerjiye eşitlenerek

Einstein sıcaklığı, olarak isimlendirilen $\frac{\hbar\omega_E}{k_B} = T_E$ bulunur. Buradan, C_v ısı sığası

yüksek ve düşük sıcaklıklar olmak üzere iki bölgede incelenebilir.

Yüksek sıcaklıklar için $\frac{\hbar\omega_E}{k_B T} \ll 1$ ve $e^x \approx 1 + x$ yaklaşımı uygulanacak olursa ısı sığasını veren bağıntı,

$$C_V \approx 3Nk_B \left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T} \right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T} \right)^2} \approx 3Nk_B \quad (1.18)$$

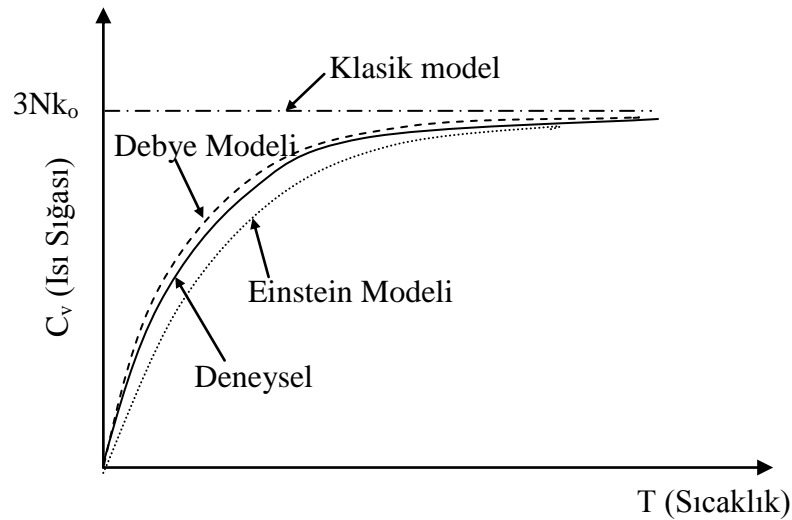
şeklinde olur. Bu değer klasik Dulong – Petit değerine eşittir.

Düşük sıcaklıklarda için ise $\frac{\hbar\omega_E}{k_B T} \gg 1$ olur bu durumda $\hbar\omega_E \gg k_B T$ ve $\exp\left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}\right) \gg 1$ olacaktır. Böylece ısı sığası

$$C_V = 3Nk_B \left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}\right) \quad (1.19)$$

olarak ifade edilir. Bu sonuca göre sıcaklık azaldıkça ısı sığası üstel olarak $\exp\left(-\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}\right)$ terimiyle azalmaktadır. Sıcaklık 0'a yaklaştıkça C_V değeri de 0'a yaklaşır.

Ancak sonraki deneysel çalışmalar düşük sıcaklıklardaki bu azalma fonksiyonunun bu şekilde üstel değil de sıcaklığın küpüyle orantılı bir şekilde olduğunu göstermektedir. Bu da yeni bir teoriye kapı aralamıştır.



Şekil 1.1. Isı sığasının sıcaklıkla değişimi

Isı sığasının farklı modellerle nasıl açıklandığı Şekil 1.1.'de kabaca gösterilmiştir. Klasik modele göre oldukça başarılı olan Einstein modeli yüksek sıcaklıklarda klasik teori ile uyumludur ancak düşük sıcaklıklarda ise hem klasik teoriyle hem de deneysel sonuçlarla bir uyum görülmemektedir. Einstein modelindeki bu kusur bir katı içerisindeki bütün salınıcıların frekansının eşit kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum bütün parçacıklar birbirinden bağımsız hareket etmesi durumunda doğru olabilir ve bir katı içerisinde böyle bir durumun olması gerçeklere aykırıdır.

Yapılan deneysel çalışmalar düşük sıcaklık değerlerinde C_v 'nin T^3 ile orantılı olduğunu göstermektedir [7]. Debye bir teori geliştirerek bunu açıklamaya çalışmıştır.

1.2.4.1.3. Debye modeli

Debye atomdaki kristallerin birbirleriyle etkileştiklerini ve salınıcıların birbirlerine bağlı titreşimlerini dikkate alarak Einstein modelini biraz daha geliştirdi.

Debye, Einstein gibi N atomlu bir katıda $3N$ tane mod olacağını ve bu modların her birinin enerji bağıntısının,

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1 \right]} \quad (1.20)$$

olduğunu kabul eder. Ancak atomlar arasındaki etkileşimlerden dolayı, Einstein frekansı civarından akustik modda ki salınım frekansına birçok frekans değeri bulunmalı ve Debye frekansı olarak da adlandırılan ω_D gibi bir kesme frekansı olmalıdır. Salınım boyunca bir kristaldeki atomun toplam yer değiştirmesi tüm titreşim modlarının toplanmasıyla bulunur. Bir frekans aralığı için $g(\omega)$ kadar mod varsa toplam mod sayısı,

$$3N = \int_0^{\omega_D} g(\omega) d\omega \quad (1.21)$$

olarak bulunur. Toplam enerji ifadesi buradan,

$$U = \int_0^{\omega_D} \frac{(\hbar\omega)g(\omega)d\omega}{\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T} \right) - 1 \right]} \quad (1.22)$$

şeklinde elde edilir. Maksimum titreşim frekansına (ω_D)'ye karşılık gelen $\theta_D = \frac{\hbar\omega_D}{k_B}$ karakteristik Debye sıcaklığı olarak adlandırılmaktadır. Verilen frekans aralığındaki mod sayısı,

$$g(\omega) = \frac{\omega^2}{2\pi^2} \left[\frac{1}{v_L^3} + \frac{2}{v_T^3} \right] \quad (1.23)$$

şeklinde ifade edilir. Burada v_L esnek dalgaların x doğrultusundaki boyuna hareket etme hızı, v_T ise enine dalgaların y-z doğrultusundaki yayılma hızıdır. Debye katıda x-y-z yönündeki dalga hızlarının eşit olduğunu varsaydı. Buradan birim hacimde birim frekans aralığında bulunan modların sayısı,

$$v_L = v_T = v_D \Rightarrow g(\omega) = \frac{3\omega^2}{2\pi^2 v_D^3} \quad (1.24)$$

olarak elde edilir.

$$\frac{3N}{V} = \int_0^{\omega_D} g(\omega)d\omega \Rightarrow \frac{\omega_D^3}{2\pi^2 v_D^3} \quad (1.25)$$

$$\theta_D = \frac{\hbar\omega_D}{k_B} = \left(\frac{\hbar v_D}{k_B} \right) \left(\frac{6\pi^2 N}{V} \right)^{1/3} \quad (1.26)$$

$$U = \left(\frac{3V\hbar}{2\pi^2 v_D^3} \right) \int_0^{\omega_D} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T} \right) - 1} \quad (1.27)$$

$\frac{\hbar\omega_D}{k_B T} = x \equiv \frac{\theta}{T}$ olarak tanımlanacak olursa enerji,

$$U = \left[\frac{9Nk_B T^4}{\theta_D^3} \int_0^{\frac{\theta_D}{T}} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \right] \quad (1.28)$$

şeklinde elde edilir. Isı sığası ise

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{9Nk_B T^3}{\theta_D^3} \right) \int_0^{\frac{\theta_D}{T}} \frac{x^4 e^x dx}{(e^x - 1)^2} \quad (1.29)$$

olarak bulunur. θ_D 'den çok yüksek sıcaklıklarda enerji ifadesindeki integral $\frac{1}{3} \left(\frac{\theta_D}{T} \right)^3$ ifadesine dönüşür ve ısı sığası $C_v \cong 3Nk_B$ olur. Böylece bu değer yüksek sıcaklıklar için Dulong - Petit değerine eşit olmaktadır. Çok düşük sıcaklıklara gelince ($T < \frac{\theta_D}{10}$),

enerji ifadesindeki integral sabit bir değer olan $\frac{\pi^4}{15}$ 'e yaklaşır. Buradan Debye modeli kullanılarak elde edilen enerji ifadesi,

$$U = \left(\frac{3\pi^4 Nk_B T^4}{5\theta_D^3} \right) \quad (1.30)$$

şeklinde elde edilir buradan ısı sığası,

$$C_v = \left(\frac{12\pi^4 Nk_B}{5} \right) \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \quad (1.31)$$

şeklinde T^3 ile orantılı olarak bulunur ve bu değer düşük sıcaklıklarda elde edilen deneysel verilerle uyumludur. (1.31) eşitliği “Debye'nin T^3 yasası” olarak da isimlendirilir [5].

Bu bağıntıdan hareketle 0 K sıcaklıkta bütün malzemeler için ısı sığası sıfır olmaktadır. Isı sığası sıcaklığın artmasıyla birlikte T^3 ile orantılı olarak artar ve θ_D (Debye sıcaklığı) değerinde yaklaşık olarak son alabileceği değere gelir. Debye sıcaklığı, kristal yapıdaki her bir katı için maddenin cinsine göre değişen düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerini ayıran karakteristik bir sıcaklıktır. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemeler için Debye sıcaklık değerleri Tablo 1.1.'de verilmiştir.

Sonuç olarak, Debye'nin modeli oldukça iyi bir yaklaşımdır, deneysel sonuçlarla uyumludur ayrıca düşük ve yüksek sıcaklıklardaki ısı sığasını açıklamada da oldukça başarılıdır. Fakat Debye modelinin de bir yaklaşım olduğu unutulmamalıdır çünkü kristal örgüdeki atomların periyodikliğini dikkate almaz. Bu yüzden Debye modelinin geliştirilmesi için bir malzemenin modlarının gerçek yoğunluğunun kullanılmasına ihtiyaç vardır [4].

Tablo 1.1. Bazı malzemelerin Debye sıcaklıkları [8]

Malzeme	Debye Sıcaklığı (K)
Al	428
Ag	225
Au	165
Bi	119
Cu	343
Ga	320
In	108
Pb	105
Sb	211
Sn	200
Zn	327

1.2.4.2. Elektronik ısı sığası

Metallerin elektron teorisinin geliştirildiği ilk yıllarda en büyük güçlük elektronların ısı sığası ile ilgilidir. Klasik istatistiksel mekanik bir serbest parçacığın ısı sığasının, k_B Boltzmann sabiti olmak üzere, $\frac{3}{2}k_B$ olması gerektiğini öngörmektedir. Eğer N tane atomun her biri elektron gazına bir valans elektronu verirse ve elektronlar serbestçe hareket ediyorsa bu durumda ısı sığasına elektron katkısı tıpkı tek atomlu gazların atomlarında olduğu gibi $\frac{3}{2}Nk_B$ olur. Fakat oda sıcaklığında gözlenen ısı sığasına elektron katkısı genellikle bu değer %1'inden daha az olmaktadır.

Bu uyuşmazlık teorisinin ilk emektarlarının aklını karıştırdı. Mesela Lorentz “Elektronlar elektriksel iletkenlik işlemlerine sanki devingenmiş gibi katılırken ısı sığasına nasıl katılmaz?” şeklinde düşünüyordu. Bu soru sadece Pauli dışarlama ilkesinin keşfi ve Fermi dağılım fonksiyonu ile cevaplanabildi. Fermi doğru sonucu buldu ve şöyle yazdı: “Özısı mutlak sıfırda kaybolur ve düşük sıcaklıklarda ise mutlak sıcaklıkla doğru orantılıdır”.

Bir numuneyi mutlak sıfırdan başlayarak ısıttığımızda, her elektron klasik olarak beklendiği gibi $k_B T$ kadar enerji almaz, fakat sadece Fermi seviyesinin $k_B T$ enerji aralığındaki orbitallerde bulunan elektronlar ısıl olarak uyarılırlar. Bu elektron gazının ısı sığası probleminde hemen kabaca bir çözüm sunar. N toplam elektron sayısı ise T sıcaklığında sadece T/T_F kesirli kısmı ısıl olarak uyarılabilir, çünkü ancak bu kadar elektron üst enerji dağılımının $k_B T$ aralığı içerisinde yer almaktadır.

Bu NT/T_F sayıdaki elektronların her biri $k_B T$ kadar enerjiye sahiptir. Toplam elektron ısıl kinetik enerjisi,

$$U_{el} \approx (NT/T_F)k_B T \quad (1.32)$$

mertebesinde olup elektronik ısı sığası,

$$C_{el} = \partial U/\partial T \approx 2Nk_B(T/T_F) \quad (1.33)$$

şeklinde, deneysel gözlemlerle uyumlu olarak, T ile doğru orantılı olarak bulunur. Oda sıcaklığında $T_F \propto 5 \times 10^4 K$ için C_{el} klasik $\frac{3}{2} Nk_B$ değerinden %1 ile çarpımı veya daha azı kadar küçüktür.

Şimdi ısı sığası için düşük sıcaklıklarda ($k_B T \ll \langle E_F \rangle$) geçerli olan bir nicel bir ifade elde edelim. N elektrondan oluşan bir sistem sıfırdan T'ye kadar ısıtıldığında toplam enerjideki artış $\Delta U \equiv U(T) - U(0)$ ifadesi

$$\Delta U = \int_0^\infty d\varepsilon \varepsilon D(\varepsilon) f(\varepsilon) - \int_0^{\varepsilon_F} d\varepsilon \varepsilon D(\varepsilon) \quad (1.34)$$

olup $f(\varepsilon)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ve $D(\varepsilon)$ birim enerji aralığındaki orbitallerin sayısıdır.

Elektron gazının ısı sığası, ΔU nun T ye göre türevi alınarak bulunur.

$$C_{el} = \frac{dU}{dT} = \int_0^{\infty} d\varepsilon (\varepsilon - \varepsilon_F) \frac{df}{dT} D(\varepsilon) \quad (1.35)$$

Gerekli işlemler yapılırsa,

$$C_{el} = \frac{1}{2} \pi^2 N k_B (T/T_F) \quad (1.36)$$

olarak bulunur. T_F Fermi sıcaklığı olarak isimlendirilmesine rağmen elektron sıcaklığı değil sadece uygun bir referans gösterimi olduğu unutulmamalıdır [8].

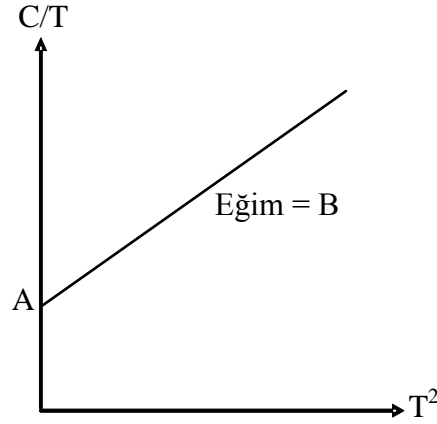
Metallerin ısı sığası, Debye sıcaklığı ve Fermi sıcaklığı değerlerinin çok altındaki sıcaklıklarda, elektron ve fonon katkılarının toplamı olarak

$$C = AT + BT^3 \quad (1.37)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A ve B malzemenin karakteristik sabitleri olmak üzere; AT terimi serbest elektronlardan, BT^3 terimi ise fononlardan kaynaklanmaktadır. Elektronik katkı sıcaklıkla orantılı olup düşük sıcaklıklarda baskındır, fonon katkısı ise Debye'nin T^3 kanunu ile uyumludur. Yalıtkanlarda serbest elektronlar bulunmadığından birinci terim AT yaklaşık olarak sıfırdır bu yüzden katkı sadece fononlardan gelir. (1.37) denkleminde her iki taraf T sıcaklığına bölünürse;

$$C/T = A + BT^2 \quad (1.38)$$

elde edilir. Deneysel verilerden elde edilmiş olan C/T değerinin T^2 'ye bağlı grafiği Şekil 1.2.'de olduğu gibi çizilirse malzemenin sabitleri olan A eksenini kesen noktadan B ise grafiğin eğiminden elde edilir. Böylece ısı sığası ölçümlerinden elde edilen A değeriyle Fermi yüzeyindeki elektron sayıca yoğunluğunun bulunmasında yararlanılabilir.



Şekil 1.2. C/T 'nin T^2 'ye bağlı değişim grafiğinin şematik gösterimi [4]

1.2.5. Isı iletkenliği

Isı enerjisi soğuran malzemelerin iç enerjisi artar ve sıcaklığı yükselir. Bu enerjinin bir kısmı örgü titreşimleriyle kinetik enerjiye, bir kısmı da genişleme yoluyla potansiyel enerjiye dönüşür. Soğurulan ısı enerjisinin büyüklüğü, enerji iletme hızı (ısı iletkenlik) ve boyutlardaki değişimler (ısı genişleme) malzeme türüne, iç yapıya ve çevre şartlarına bağlı birer ısıl özelliktir. Üzerine kaynar su dökülen camın çatlaması, genişmesi kısıtlanmış gevrek malzemenin sıcaklık etkisinde kırılması, porselen bardak yerine alüminyum bardakla içilen çayın dudağı yakması gibi uygulamada görülen bir çok olay, ısıl özelliklerle ilgilidir. Özellikle metallerde, ısı iletimi büyük ölçüde elektron hareketi ile sağlanır. Diğer taraftan ısıl enerjinin elektrik akımına dönüşmesi (termoelektrik etki) başka bir ısıl özelliktir [9].

Sıcak bir cisimden soğuğa sıcaklık farkından dolayı aktarılan enerji şeklinde ısı tanımlanmıştır. Bu aktarım işlemi ışımaya, konveksiyon (yayıma) ve iletim olmak üzere üç ayrı şekilde sağlanır. Bunlardan ışımada madde ortamına ihtiyaç duyulmazken konveksiyon ve iletimde ise madde ortamı kullanılır. Işıma (radyasyon) elektromanyetik dalgalar veya fotonlarla gerçekleşen ısı iletimidir. Güneş enerjisinin Dünya'ya ulaşması bu yoldadır. İkinci olarak akışkanlarda olduğu gibi, atomların ve moleküllerin kütle içinde hareketi ile sağlanan konveksiyonla ısı iletimidir. Üçüncüsü atomdan atoma titreşimle veya fononlarla vasıtasıyla gerçekleşen iletimdir. Farklı durumlar için enerji aktarımının hangi oranda hangi metotla gerçekleştiği farklılık göstermektedir. Bu enerji aktarım metotları bilimden endüstriyel uygulamalara büyük önem taşımaktadır.

Örneğin; bir döküm veya bir kristal malzeme (mesela metaller, yarı iletkenler veya polimerler) erimiş halden katılaştırılırken, malzeme içinde ısı iletimi katının nihai özellikleri üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olabilir.

Bu nedenle, bu üç ısı aktarım yolunun anlaşılması ve tanımlanması büyük ilgi görmektedir. Bunlar arasında, ısı iletkenlik ilke olarak tanımlanması en basit olanıdır. Oda sıcaklığında bir metale dokunulduğunda tahtaya göre daha soğuk hissedilmesinin sebebi metalin ısı iletkenliğinin tahtaya göre yüksek olmasıdır.

Isıl iletkenlik (K), malzeme içinde ısı enerjisinin iletim hızını belirler. Tanım olarak ısı akı (j_U), birim alandan birim zamanda geçen ısı enerjidir ve birimi $\text{cal/m}^2\text{s}$ 'dir [9].

Bir katının ısı iletkenlik katsayısı K , uzun bir çubuk şeklindeki bir katıda (dT/dx) sıcaklık gradyenti altında kararlı ısı akışı kullanılarak,

$$j_U = -K \frac{dT}{dx} \quad (1.39)$$

şeklinde tanımlanır. Bu denklem Fourier Yasası olarak da bilinir. Burada j_U ısı enerjisi akışı veya birim zamanda birim kesit alandan aktarılan enerji miktarıdır. Denklemdeki (-) işareti ısının azalan sıcaklık tarafına doğru gittiğini göstermektedir. Bu denklem ısı enerjisi transferinin rastgele bir süreç olduğunu belirtir. Enerji basit bir şekilde numunenin bir ucundan girip doğrudan düz bir yol izleyip diğer ucuna ulaşmaz fakat numune içinde sık sık gerçekleşen çarpışmalar neticesinde difüzyona uğrar. Eğer enerji numunede sapmaya maruz kalmadan doğrudan yayılıyorsa, ısı akışı sıcaklık gradyentine değil numunenin uzunluğuna bağlı olmaksızın sadece numunenin uçları arasındaki ΔT sıcaklık farkına bağlı olurdu. İletkenlik olayının rastgele doğası, sıcaklık gradyentini ve ortalama serbest yolu ısı akışı ifadesine katar.

Gazların kinetik teorisinden yararlanılarak ısı iletkenlik katsayısı ifadesi,

$$K = \frac{1}{3} C v \ell \quad (1.40)$$

şeklinde bulunur burada C birim hacim başına ısı sığası, v ortalama parçacık hızı ve ℓ parçacığın çarpışmalar arasındaki ortalama serbest yoludur. Bu sonuç ilk defa Debye

tarafından dielektrik katıların ısı iletkenlik hesabında, C fonon ısı sığası, v fonon hızı ve ℓ ise fonon ortalama serbest yolu olarak alınarak kullanılmıştır.

Burada denklem (1.40)'u veren basit kinetik teoriyi ele alalım. Parçacık yoğunluğu n olmak üzere bir ortamda x yönünde ilerleyen parçacık akısı $\frac{1}{2}n\langle v_x \rangle$ olur. $\langle v_x \rangle$ ifadesi parçacık hızının ortalama değerini göstermektedir. Denge durumunda bununla aynı büyüklükte ama ters yönde bir akı daha vardır.

Isı sığası c olan bir parçacık, sıcaklığı $T+\Delta T$ olan bir yerden sıcaklığı T olan bir yere geçtiğinde $c\Delta T$ kadar bir enerji bırakacaktır. Parçacığın ortalama serbest yolunun uçları arasındaki sıcaklık farkı,

$$\Delta T = \frac{dT}{dx} l_x = \frac{dT}{dx} v_x \tau \quad (1.41)$$

olup τ çarpışmalar arasındaki ortalama zaman aralığını gösterir. Her iki yönü de göz önüne alırsak net enerji akısı,

$$j_U = -n\langle v_x^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} = -\frac{1}{3} n\langle v^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} \quad (1.42)$$

olur. Fononlar için olduğu gibi v sabit ise, $\langle v_x^2 \rangle = \frac{\langle v^2 \rangle}{3}$ alınır, $\ell \equiv v\tau$ ve $C \equiv nc$ yazılırsa

$$j_U = -\frac{1}{3} C v \ell \frac{dT}{dx} \quad (1.43)$$

olur. (1.39) denklemi (1.43) denkleminde kullanılırsa (1.40) denkleminde verilen $K = \frac{1}{3} C v \ell$ elde edilir [8].

Fermi gazının ısı iletkenlik katsayısı, ısı sığası ve $\varepsilon_F = \frac{1}{2} m v_F^2$ kullanılarak,

$$K_{el} = \frac{\pi^2}{3} \frac{n k_B^2 T}{m v_F^2} v_F \ell = \frac{\pi^2 n k_B^2 T \tau}{3m} \quad (1.44)$$

olarak bulunur. Isıl iletkenlik, serbest elektron sayısı arttıkça ve elektronların etkin kütlesi azaldıkça büyür. Saf metaller için her sıcaklıkta elektron katkısı fonon katkısından daha büyük olmaktadır. Saf olmayan malzemeler yahut örgü kusuru taşıyan alaşımlarda ise elektron ortalama serbest yolunda azalma olacağından fonon katkısı elektron katkısına yaklaşabilir.

1.2.6. Malzemelerde ısı iletkenliği

Metallerde ısı iletimi fononlarla ve elektronlarla sağlanır. Kovalent bağlı ve iyonik bağlı cisimlerde serbest elektron bulunmadığından ısı yalnız fononlarla iletilir. Metallerde en etkili ısı iletkenlik serbest elektron hareketi ile sağlanır. Yukarıda belirtildiği gibi ısı enerji etkisinde hareket eden elektronlar Fermi seviyesi üstüne çıkarak serbest hale geçer ve sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareket ederek ısı enerji iletirler. (1.40) denkleminde göre elektronların ısı iletkenliği,

$$K_e = \frac{1}{3} C_e l_e v_e \quad (1.45)$$

ile verilir. Benzer şekilde fononların sağladığı iletkenlik,

$$K_f = \frac{1}{3} C_f l_f v_f \quad (1.46)$$

bağıntısı ile verilir. Elektronların ortalama serbest yolu, fononların ortalama serbest yolunun 10-100 katı, hareket hızları fononların hareket hızının 10-100 katı kadardır. Diğer taraftan metallerin ısı iletkenliğine fononların katkısı ise elektronların katkısının 10-100 katı kadardır. Bu bağıntılara göre, metallerde elektronların sağladığı ısı iletkenlik fononlarıninkinin yaklaşık olarak 10-100 katı kadar olacağı sonucuna varılır.

Seramiklerde serbest elektronlar bulunmadığından ısı iletkenlik yalnız fononlarla sağlanır. Bu tür malzemelerde dolu valans bandı ile boş iletim bandı arasında geniş bir enerji aralığı bulunduğundan, ısı enerjinin elektronları bir üst banda çıkarma olasılığı azdır. Ancak çok yüksek sıcaklıklarda bu enerji aralığını atlayan elektronların katkısı söz konusu olabilir. Seramikler genellikle ısı yönden yalıtkan sayılırlar.

Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı küçük olduğundan, elektronlar kolaylıkla üst banda geçebilirler ve fononların yanında ısı iletimine önemli katkıda bulunurlar. Bu tür malzemelerin ısı iletkenliği sıcaklıkla artar [9].

Isıl iletkenliği yüksek olan bir malzeme sıklıkla yüksek bir elektriksel iletkenliğe sahiptir ve metallerin ısı iletimi iyidir. Bu kuralın istisnası elmadır çünkü çok yüksek bir ısı iletkenliğe sahip olmasına rağmen elektriksel iletkenliği düşüktür. Elmanın ısı iletkenliğinin yüksek olduğu dokunulduğunda soğuk hissedilmesinden de anlaşılabilir. En iyi ısı ileten malzemeler sırasıyla elmas, karbon nanotüpler, gümüş, bakır ve altındır. Bu malzemelere kıyasla çok zayıf ısı ileten malzemelere cam, su ve hava örnek olarak verilebilir. Elmanın yüksek ısı iletkenliğinden hareketle basit aletler kullanılarak gerçeği sahtesinden ayırt edilebilir [5].

1.2.7. Termoelektrik özellikler

Isıl ve elektriksel özellikler arasındaki ilişkiler uygulama yönünden bazı ilginç sonuçlar doğurur. En basit örnek direncin sıcaklıkla artışıdır. Bu özellikten yararlanılarak sıcaklık ölçülür. Sıcaklık değişimine karşı çok duyarlı olan bazı yarıiletkenler özellikle aşırı düşük sıcaklıkları (kriyojenik) ölçmeye elverişlidirler.

Termoelektrik özellikler üç ilginç olayda etkilerini gösterirler:

- a) Bir metal çubuğun sıcaklıkları farklı olan iki ucu arasında bir gerilim farkı doğar, buna *Seebeck etkisi* denir.
- b) İki ucunun sıcaklıkları farklı olan bir metal çubuktan akım geçirilirse akımın yönüne bağlı olarak ısı emilir veya yayılır, buna *Thompson etkisi* denir.
- c) İki değişik tür metal iletken ekinden akım geçirilirse akımın yönüne bağlı olarak ısı emilir veya yayılır, buna *Peltier etkisi* denir.

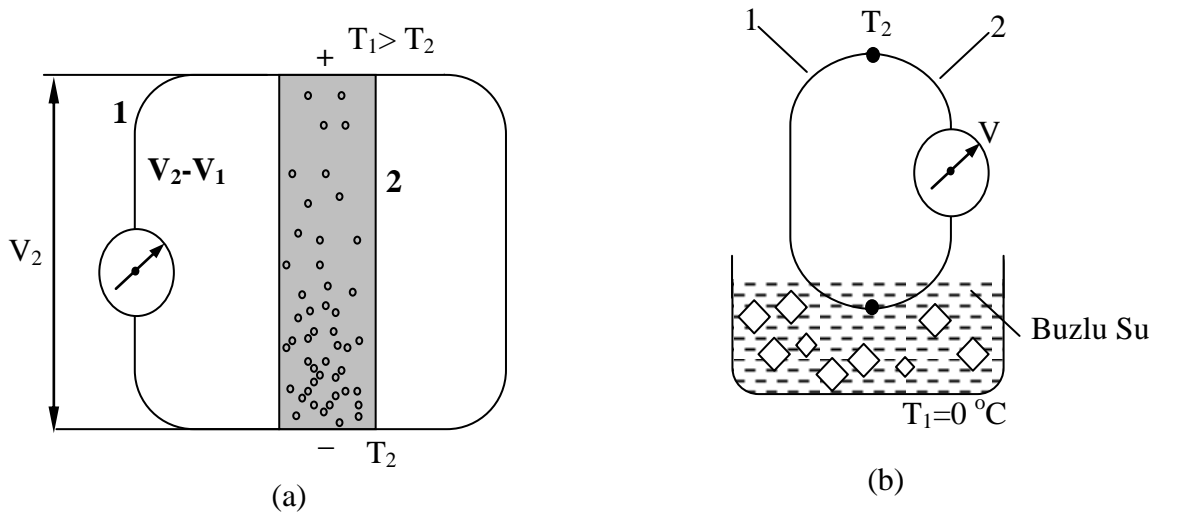
Uygulama yönünden önemi büyük olan Seebeck ve Peltier etkilerinden aşağıda ayrıntılı olarak bahsedilecektir [9].

1.2.7.1. Seebeck etkisi

Bir metal çubuğun sıcak ucundaki elektronların enerjisi soğuk uçtakilerden fazladır. Yüksek enerjili elektronlar soğuk uca doğru hareket ederek bu uçtaki elektron

yoğunluğunu arttırırlar. Bu durumda Şekil 1.3.'te görüldüğü gibi, soğuk uç eksi, sıcak uç artı yüklü olur. Elektron yoğunluğu farkından doğan potansiyel fark, enerji farkından doğan Seebeck potansiyeline eşit olunca denge sağlanır ve elektron akımı durur. İki uç arasında oluşan V_1 gerilim farkı sıcaklıkla orantılıdır. Isıl enerjinin oluşturduğu *termoelektrik güç katsayı* S aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$S = -\frac{dV}{dT} \quad (1.47)$$



Şekil 1.3. (a) Termoelektrik etki ve (b) ısıl çift [9]

Şekil 1.3.'te görüldüğü gibi elektronlar T_1 ' den T_2 ' ye doğru akar, $T_1 > T_2$ olduğundan $\Delta T = T_2 - T_1 < 0$. Burada termoelektrik güç katsayısı S artı bir büyüklüktür. Çubuğun iki ucu aynı tür iletkenle birleştirilirse her iki iletkenin uçları arasındaki gerilim farkları eşit olduğundan voltmetre sıfır potansiyel farkı gösterir. Bunun yerine metal çubuğun uçları farklı türde bir iletkenle birleştirilirse uçları arasındaki gerilim farkı $V_{12} = V_1 - V_2$ olur ve bu değer voltmetreden okunur. Bu metal çiftinin oluşturduğu bağıl termoelektrik güç katsayısı S_{12}

$$S_{12} = -\frac{dV_{12}}{dT} \quad (1.48)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Sıcak uçta elektronlar 1 metalinden 2 metale akarsa $V_{12} > 0$, tersi yönde akarsa $V_{12} < 0$ sayılır.

Bir iletkenin mutlak termoelektrik güç katsayısı ancak bir süper iletken yardımı ile ölçülebilir. Süper iletkenin direnci sıfır olduğundan voltmetrede okunan gerilim farkı yalnız V_1 gerilim farkıdır.

Uygulamada sıcaklık ölçmelerinde kullanılan ısı çiftleri iki farklı metal iletkenin uçlarını lehim veya kaynakla birleştirilerek elde edilir. Şekil 1.3. (b) de görüldüğü gibi, ısı çiftinin bir ucu sıcaklığı ölçülecek ortama, diğer ucu buzlu suya sokulur. Bu durumda ölçmeler referans sıcaklığı 0°C olan bir ortama göre yapılmış olur. Uygulamada kullanılan bazı ısı çiftlerinin özellikleri Tablo 1.2.'de verilmiştir. Yüksek sıcaklık ölçmeleri için genellikle (Platin-Rodyum) alaşımı tel ile platin tel çiftinden oluşan ısı çifti kullanılır [9].

Tablo 1.2. Bazı ısı çiftlerinin özellikleri [9]

Isıl Çift	Maksimum Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	Duyarlılık ($\text{mV}/^\circ\text{C}$)	Kullanıldığı Bölge ($^\circ\text{C}$)
Kromel (90Ni-10Cr) – Alumel (94Ni-2Al-2Mn-1Si)	1250	0.0400	0-1250
Fe – konstanton (55Cu-45Ni)	850	0.0570	0-850
(Pt-10Rh) - Pt	1500	0.0120	0-1500
(Ir-40Rh) - Ir	2000	0.0185	1400-2000
(W-3Re) – (W-25Re)	2500	0.0139	0-1500

1.2.7.2. Peltier etkisi

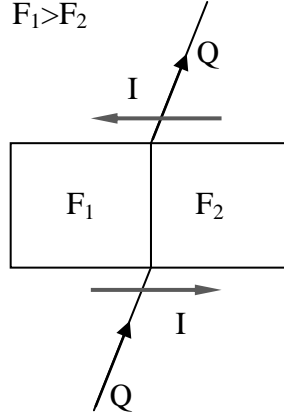
Bir metal çiftinin ekinde akım geçerse Peltier etkisi ile akımın yönüne bağlı olarak ısı yayılır veya ısı emilir. Belirli bir metal çifti ekinin karakteristik değeri *Peltier katsayısı* (P) ile belirtilir. Peltier katsayısı, ekten geçen birim akımın birim zamanda oluşturduğu ısı enerjisi ile

$$P_{12} = -\frac{dQ / dT}{I} \quad (1.49)$$

şeklinde tanımlanır.

Peltier etkisi farklı türde metallerin farklı kinetik ve potansiyel enerjiye sahip olmalarından kaynaklanır, iki metal birbirine değerse Fermi düzeyi yüksek olandan düşük olana bir miktar elektron akar ve denge sağlanır. Denge durumundaki eke bir

gerilim uygulayarak Fermi düzeyi yüksek olandan Fermi düzeyi düşük olana elektron akımı sağlanırsa ekte enerji emilir, sonuçta sıcaklık düşer. Bunun tersi Fermi düzeyi düşük olandan yüksek olana elektron akarsa ekten ısıl enerji yayılır, dolayısıyla sıcaklık



Şekil 1.4. Peltier etkisi [9]

artar. Şekil 1.4.'te gösterildiği gibi kapalı devre oluşturan bir iletken çiftinin uçlarından akımın yönüne bağlı olarak istenirse ısıtma, istenirse soğutma sağlanır.

Metal çiftlerinin Peltier katsayıları genellikle düşüktür. Diğer tarafta yarıiletkenlerde ise bu katsayı oldukça büyüktür. Uygulamada seri olarak bağlanan (p-n) yarıiletken çiftleri ile soğutma sağlanabilir. Örneğin ($\text{Bi}_2\text{Fe}_3\text{-PbTe}$) çiftleri seri olarak bağlanırsa termoelektrik soğutma elde edilir. Bu tür soğutucular düşük verimli olmakla birlikte basit, küçük ve sessizdirler.

Yarıiletken çiftlerinin eki ısıtıldığı takdirde elektrik enerjisi üretebilir. Örneğin bu amaçla kullanılan ($\text{Sb}_2\text{Se}_3\text{-GeTe}$) çiftlerinden oluşan bir termoelektrik jeneratörün verimi düşük olmakla beraber (yaklaşık %10) basit ve hafiftirler. Kurak ve sıcak bölgelerde güneşten aldığı ısıl enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılırlar [9].

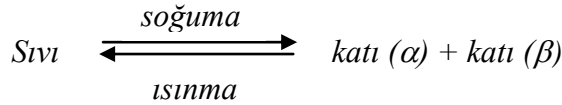
1.3. Faz Diyagramları

Faz diyagramları, maddenin farklı basınç, sıcaklık ve bileşimdeki mikroyapısını gösteren bir haritadır [10,11]. Bu üç özelliği tek bir diyagramda göstermek hem zor hem de çok kullanışlı olmayacağından faz diyagramları genellikle basınç-sıcaklık, basınç-bileşim ve sıcaklık-bileşim şeklinde ayrı ayrı ele alınırlar. Faz diyagramları tek bileşenli

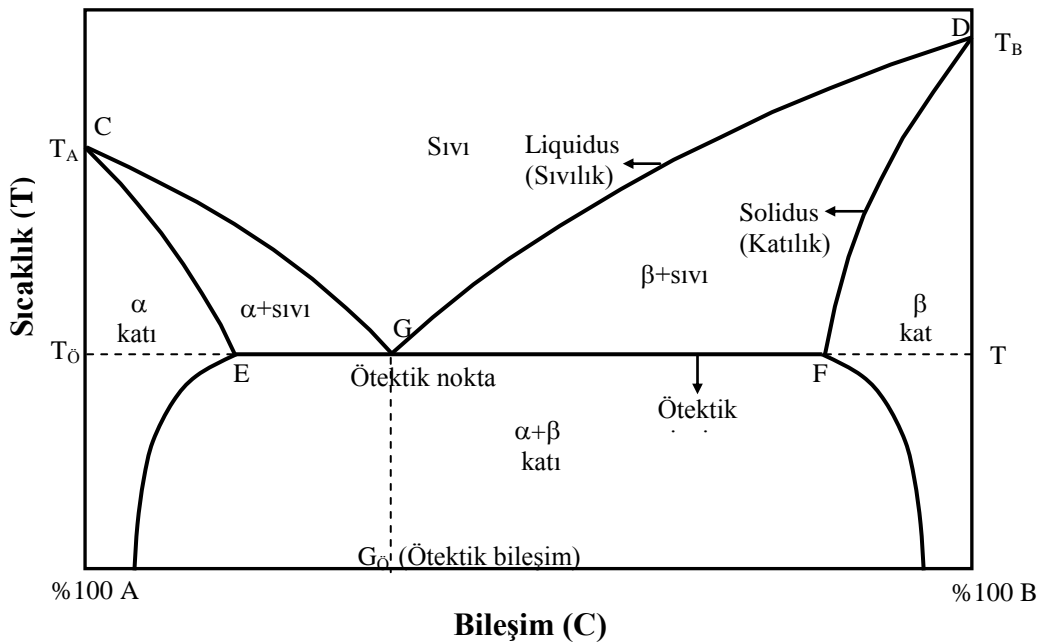
maddeler için çizilebildiği gibi ikili ve üçlü alaşım sistemleri için de çizilebilirler. Genellikle ikili ve üçlü sistemlerde katı-sıvı geçişlerinde basıncın etkisi ihmal edilir [12].

1.3.1. İkili ötektik faz diyagramları

Ötektik alaşım; alaşımı meydana getiren metallerin erime sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta eriyebilen alaşımdır. Örneğin saf haldeyken alüminyumun erime sıcaklığı 660 °C, silisyumun erime sıcaklığı 1430 °C 'dir. Al-Si alaşımının ötektik erime sıcaklığı ise 577 °C'dir. *Ötektik nokta*; faz diyagramında V şeklinde olan sıvılık (liquidus) eğrilerinin tabanındaki noktadır. Ötektik noktaya karşılık gelen bileşime ise *ötektik bileşim* denir. Ötektik bileşime sahip bir alaşım, saf maddelerde olduğu gibi ötektik sıcaklıkta aniden erir [9]. İkili alaşımlarda ötektik bileşimdeki sıvı faz soğutulursa aynı anda iki farklı katı faz elde edilir. Yani sıvı alaşımın katılaştırılması neticesinde α ve β katı fazlarının karışımı elde edilir. Böylece ötektik reaksiyon,



şeklinde tanımlanır [10]. Metalik ikili alaşımların sıcaklık-bileşim faz diyagramlarında yatay eksen bileşim, düşey eksen ise sıcaklığı göstermektedir. Yatay eksen A ve B gibi iki saf metalin mümkün olan bütün bileşim değişimlerini göstermektedir.



Şekil 1.5. İkili ötektik faz diyagramı [10]

Yatay eksenin başlangıcında % 100 oranında *A* maddesi, sonunda ise % 100 oranında *B* maddesi vardır. Bileşim ya ağırlıkça orana göre ya da atomik orana göre belirlenir. Faz diyagramlarında sıcaklık birimi olarak $^{\circ}C$ veya *K* kullanılır.

Şekil 1.5’de ikili ötektik faz diyagramı verilmektedir. Şekilde *A* noktası saf haldeki *A* maddesinin erime sıcaklığını, *B* noktası ise saf haldeki *B* maddesinin erime sıcaklığını göstermektedir. *G* noktası ötektik noktadır. *CG* ve *DG* eğrileri sıvılık (liquidus) eğrileridir ve bu eğrilerin üzerinde sadece sıvı faz vardır. *CE* ve *DF* eğrileri ise katılık (solidus) eğrileridir ve bu eğrilerin altında sadece katı faz vardır. *EF* doğrusu ise ötektik çizgidir ve bu çizginin altında α ve β fazlarına ait katı fazlar birlikte bulunur.

1.4. Elektriksel Özdirenc/İletkenlik

Elektriksel yüklerin herhangi bir etki ile bir yönde veya her iki yöndeki hareketi elektriksel iletkenlik olarak tanımlanır. Elektriksel iletkenlik hareketli taneciklere göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırmada hareketli tanecikler elektronlar ise elektronik iletkenlik, iyonlar ise iyonik iletkenlik, her iki tanecik türününse hareketli olduğu iletkenlik türü karma iletkenlik olarak tanımlanmıştır. Bu durumda iletkenlik üçe ayrılır ve Tablo 1.3’de verilen şekilde gruplandırılır.

Bir malzemenin elektrik iletimi iyonik ya da elektronik mekanizmalardan biri ile olur [13]. İyonik ve elektronik iletkenliğe sahip malzemelerin iletkenlik aralıkları Tablo 1.4’de verilmiştir. Yarıiletkenlik, süper iletkenlik ve metalik iletkenliği içine alan elektronik iletkenliğin dışında diğer bir iletkenlik türü iyonların hareketine bağlı olan iyonik iletkenliktir. İyonik iletkenlik özellikle O^{-2} , N^{-3} , Cl^{-} , B^{-2} gibi anyonlar veya H^{+} , Na^{+} , Li^{+} gibi katyonların hareketleri ile görülür [13].

İyonların (katyon veya anyon) kristal örgüde hareket etmeleri (göç etmeleri) ile gerçekleşen iletkenliğe *iyonik iletkenlik*, bu tür iletkenliğe sahip katılara ise *katı elektrolit* denir. Yalnızca yüksek sıcaklıkta atomların termal enerjilerinin yüksek olduğu ve örgü kusuru konsantrasyonunun çok yüksek sayılara ulaştığı yerlerde bu tür iletkenlik fark edilebilir.

Tablo 1.3. Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması

Elektriksel İletkenlik		
Elektronik İletkenlik	İyonik İletkenlik	Karma İletkenlik
Metalik İletkenlik (<i>Au, Cu gibi</i>)	Katı Elektrolitler (<i>Zirkonyum tabanlı katı elektrolit gibi</i>)	
Yarıiletkenlik (<i>Si, Ge, Polimer gibi</i>)	Süper İyonik İletkenlik (<i>SrF₂</i>)	(<i>δ-Bi₂O₃ Fazı</i>)
Süper İletkenlik (<i>Hg, Al, MgB₂ gibi</i>)	Hızlı İyon İletkenliği (<i>Tl₃Cu₂Cl₅</i>)	

Tablo 1.4. Malzemelerin elektriksel iletkenlik değer aralıkları

Malzeme	İletkenlik ($\Omega \text{ cm}$) ⁻¹	
İyonik İletkenlikler	İyonik Kristaller	$< 10^{-16} - 10^{-2}$
	Katı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
	Sıvı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
Elektronik İletkenlikler	Metaller	$10^3 - 10^7$
	Yarıiletkenler	$10^{-3} - 10^4$
	Yalıtkanlar	$< 10^{-10}$

NaCl, MgO gibi çoğu kristal malzemeler düşük iyonik iletkenliğe sahiptir. Çünkü atomlar termal titreşimlerine rağmen örgü noktalarından ayrılamazlar. Bunun tersi olarak, çoğu katı elektrolit malzemeler yüksek iyonik iletkenliğinden dolayı hızlı iyonik elektrolit ya da süper iyonik elektrolit olarak sınıflandırılırlar.

Sıfır sıcaklıkta (K) sistemin serbest enerjisi potansiyel enerji tarafından baskılanır. Sıcaklık artırıldıkça sistemin düzensizliğinin derecesi olan entropinin artmasından dolayı sistemin serbest enerji dağılımı oldukça belirginleşir. Tablo 1.5'te alaşımlarda

sıkça kullanılan bazı metalik malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri azalan sıralanışa göre verilmiştir.

Sistem artan serbest enerjiyi en aza indirmek ve kararlılığını artırmak için en düşük düzeyde örgü boşluklarına sahip olmalıdır. Bu durum hareketli taneciklerin sürekli örgü kusurlarından hareketi ile gerçekleştirilir [14]. Taneciklerin bu hareketi bir elektrik alan ile yönlendirilerek iletkenlik meydana getirilir. Katı haldeki malzemenin iletkenliği, yük taşıyıcıların konsantrasyonu, kristalin sıcaklığı, iyonun örgü içinde hareket edebilirliği, kristal içindeki kusurun miktarı gibi özelliklerden etkilenir. Örgüde boşluk kusurları normalde iki metotla meydana getirilir. Bunlardan biri kristalin ısıtılması sonucunda meydana gelen örgü kusurlarıdır. Bir diğer yolu ise safsızlık katkılanmasıdır. Sıcaklık ve safsızlık iyonik iletkenliği büyük oranda etkiler. Safsızlık katkılanmış bileşiklerde yüksek sıcaklıkta bu iki etki de iletkenlikte rol oynar. Düşük sıcaklıklarda, elektriksel iletkenlik oldukça azdır. Bu durumda safsızlık etkisi ile meydana gelen kusurlar daha baskındır. Ancak yüksek sıcaklıklara çıktıkça sıcaklık etkisiyle oluşan kusurlar artacağından katı, karışık tip örgü kusur içermeye başlar. Bu durumda gözlenen iletkenlik türü karışık tip iletkenliktir.

Elektriksel iletkenlik ve öz direnç (dirençlilik) bir malzemenin karakteristik özelliğidir. Bir numunenin elektriksel iletkenliğinin belirlenebilmesi için ölçülen voltaj ve akım şiddeti, hesaplanan öz direnç değeri ile numunenin geometrik yapısı arasındaki ilişki kullanılır. Bu nedenle öz direncin hesaplanmasında kullanılan Ohm Kanunu;

$$\frac{V}{I} = R \quad (1.50)$$

eşitliğine, geometrik yapıya bağlı olan bir düzeltme faktörü (resistivity correction factor) değeri ilave edilerek öz direnç hesaplanır. Bu düzeltme katsayısı numunenin kalınlığına ve geometrik yapısına, yüzey büyüklüğüne, numune kenar sınırlarının yapısına, kontakların numune üzerinde bulunduğu konuma ve kontakların düzenine bağlı olarak değişir [15].

Malzemelerin öz dirençlerinin belirlenebilmesi için numune içinde elektrik alan oluşturacak bir akım kaynağına, bu elektrik alan nedeniyle numune içinde meydana gelen I elektrik akımının şiddeti ve keyfi seçilen herhangi iki nokta arasında meydana gelen V potansiyel düşmesinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bir maddenin elektriksel

özdirenci, maddenin üzerinden geçen I akımı ve bunun meydana getirdiği V geriliminin oranı ile bulunur.

Bu yöntemle yapılan direnç belirleme ölçümünde elde edilen R değeri ileride de belirteceğimiz şartlara bağlı olarak kontakların direncini de içerir. Bu durumda elde edeceğimiz R direnci ve buna bağlı elde edilen ρ elektriksel özdirenç değeri sadece numuneye ait olmayacaktır. Direncin elde edilmesi numunenin özdirencinin belirlenmesini sağlar. Homojen bir numunenin elektriksel özdirenci belirlenmek istendiğinde malzemenin geometrik özelliklerinin de bilinmesi gereklidir. Elektriksel özdirenç ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir [16]:

$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (1.51)$$

Burada G ; numunenin yüzey geometrik sınırlarını ve kalınlığını, elektriksel kontakların numune üzerindeki konumlarını, kontakların diziliş düzenlerini içeren bir katsayıdır ve “*Geometrik Düzeltme Katsayısı / Faktörü*” (Resistivity Correction Factor, RCF) olarak tanımlanır.

Tablo 1.5. Alaşımlarda kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri [15]

Malzeme	Sembolü	Elektriksel İletkenlik ($\times 10^7 (\Omega \text{ m})^{-1}$)
Gümüş	Ag	6.3
Bakır	Cu	5.96
Altın	Au	4.52
Alüminyum	Al	3.77
Magnezyum	Mg	2.26
Tungsten	W	1.89
Molibdenyum	Mo	1.87
Kobalt	Co	1.72
Çinko	Zn	1.66
Nikel	Ni	1.43
İndiyum	In	1.16
Lityum	Li	1.08
Demir	Fe	0.993

Tablo 1.5.'in devamı

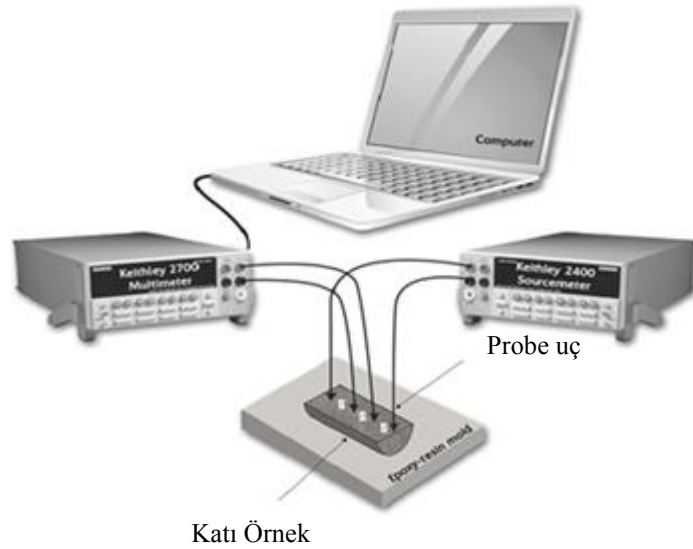
Platin	Pt	0.966
Kalay	Sn	0.917
Krom	Cr	0.774
Kurşun	Pb	0.481
Uranyum	U	0.38
Antimon	Sb	0.288
Titanyum	Ti	0.234
Neodyum	Nd	0.157
Cıva	Hg	0.104
Bizmut	Bi	0.0867
Plutonyum	Pu	0.0666
Karbon	C	0.0061
Germanyum	Ge	1.45×10^{-7}
Silikon	Si	2.52×10^{-11}
Selenyum	Se	1.0×10^{-11}
Bor	B	1.0×10^{-11}

İki nokta (d.c.) elektriksel ölçüm yöntemi ile elde edilen R_{toplam} direnç değeri numunenin direncinin dışında başka ek dirençleri de içerir. Bu ek dirençler iletken telin (R_{tel}), numuneye akımı aktaran iğne uçların (prob, pin) (R_{prob}), gerekirse problemleri numuneye tutturarak iletken lehimin (R_{pasta}), kontak ucu ve numune temas ara yüzeyinin dirençlerinin (R_{kontak}) toplamıdır. Bu nedenle numunenin hesaplanan ρ öz direnci olması gerekenden daha yüksektir.

Numuneye kontak olarak kullanılan iletken teller genel olarak iki parçalıdır ve bu da iki farklı dirençli kontak kullanmak demektir. Bu kontakların bir kısmı, ölçüm cihazlarına bağlı olan iletken tel kablolar ve diğer kısmı da bu kabloların numuneye temas eden uç kısımları olan problemlerdir. Problemler genelde ihtiyaca uygun farklı metallere yapılır. Bunun nedeni numunenin cinsine göre numuneye sert ve sağlam temasın sağlanmasıdır. Bu gibi durumlardan dolayı sadece numunenin direncini belirleyen bir direnç ölçme tekniği daha uygun olacaktır. Bu durum özellikle kontak direnci numune direncine oranla yüksek olan iyi iletkenlerin ve yarıiletkenlerin öz direncinin belirlenmesinde ortaya çıkar.

Elektriksel iletkenliğin ölçümünde kullanılan diğer bir yöntem olan *dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik* ölçme tekniğinde, kullanılan kontakların dirençleri ölçümde hesaba girmez ve hesaplanan değer sadece numunenin öz direncidir. Bu amaçla kurulan düzenekte kontaklardan ikisi numune üzerinden akan akımı ölçmek için, diğer ikisi ise herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek için kullanılır. Şekil 1.6.'da görüldüğü gibi 1.ve 4. problardan akım, 2. ve 3. problardan ise potansiyel fark ayrı ayrı ölçüldüğü için iki nokta iletkenlik ölçüm tekniğindeki gibi kontak dirençleri, ölçüme doğrudan dâhil olmaz. Yine bu sistemde de kontak direnci söz konusudur ama ölçümün sonucunu çok az etkileyeceğinden ihmal edilebilir.

Kontakların aynı doğrultuda dizilmeleri en avantajlı ölçüm şekli olacaktır. Bu durumda G faktörünün belirlenmesi ve hesabı daha kolaydır. Burada s ardışık kontaklar arası mesafedir (Şekil 1.6.). Böyle bir ölçüm düzeneğinde yukarıda yer alan ρ öz direnç denklemindeki G katsayısı numune geometrisine, kontakların numune üzerindeki konumuna ve kontaklar arası s mesafesine bağlıdır. Uygulamada genel olarak yapılan kontak dizilişi $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s$ olan eşit aralıklı düzendir.



Şekil 1.6. Elektriksel öz direnç/ elektriksel iletkenlik ölçümü için kullanılan dört nokta metodunun şematik diyagramı

Bu ölçüm tekniğinde elektriksel öz direnç denklemi yukarıda verilenden farklı olmamakla beraber aşağıdaki şekildedir;

$$\rho = \frac{V_{23}}{I_{14}} G \quad (1.52)$$

1.5. In-Bi İntermetalik Alaşımların Kullanım Alanları

Bizmut (Bi); kurşun, bakır, kalay ve altın cevherlerinin katkılarıyla meydana gelir. Bizmut, çok iyi ıslatma özelliklerine sahiptir. Ötektik Sn-Bi lehimini delik içine iğneleme teknolojisinde kullanılmaktadır. Telekomünikasyon, tıp, endüstri gibi uygulama alanları da vardır. Işık ve karakterizasyon tekniklerinde, beyaz ışık, floresan lamba aydınlatmasında, lazerlerde, lehimlerde, plazma ekran, sintilatör, optik yükselteçler de Bizmut vazgeçilmez unsur haline gelmiştir. Aynı zamanda nükleer reaktör için soğutucu, yakıt taşıyıcı, metalürjik katkı maddesi, katalizör olarak kullanılmaktadır. Bizmut yüksek iyonik iletkenliğe sahip olduğundan katı oksit yakıt pilleri (SOFC) ve oksijen sensörleri gibi bilgisayar uygulamaları için iyi bir elektrolit olarak önerilir [17-20].

İndiyum (In) çok nadir bulunan ve geniş uygulama alanları için çok pahalı sayılan bir elementtir ayrıca kolaylıkla da oksitlenir. Televizyonlar ve bilgisayar ekranları en sık kullanıldığı alanlardır. İnfrared fotodedektörlerde, lehimlerde, LCD'lerde kullanılmaktadır. Yeni tip güneş pilleri için İndiyum talebi her geçen gün artmaktadır ve bu uygulama sektörü için önemli olmaya başlamıştır [21-23].

Alaşımların termal ve elektriksel özellikleri birçok teknolojik aygıtlar için önemlidir. Isıl ve elektriksel iletkenlik metalik alaşımların performansını ve kararlılığını test etmek için kullanılan fiziksel niceliklerdir. Literatürde intermetalik alaşımların termal ve elektriksel özellikleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın esas amacı, Bi-12 ağırlık % In (Bi_4In), Bi-15 ağırlık % In (Bi_3In), Bi-35.4 ağırlık % In (BiIn), Bi-45 ağırlık % In (Bi_2In_3), Bi-47.6 ağırlık % In (Bi_3In_5), Bi-53 ağırlık % In (BiIn_2), Bi-62 ağırlık % In (BiIn_3) ikili intermetalik alaşımlarının ısı iletkenliğini ve elektriksel iletkenliğini ölçmektir. Bunu gerçekleştirmek için In-Bi intermetalik alaşımlarının lineer ısı akış yöntemiyle ısı iletkenliği, dört nokta prob yöntemiyle elektriksel iletkenliği ölçüldü. Peki, neden bu ikili intermetalik alaşımlar seçilmiştir?

Elektrik tel ya da tabloların yapımında kullanılan Bi esaslı alaşımların kullanımı Bizmut'un kırılgan yapısından dolayı oldukça zordur. Bu yüzden bu alaşımlar birçok aygıt için uygun değildir. Bi ve In, elektronik endüstri de kullanılan Ag, Sn, Zn ve Sb içeren kurşunsuz lehim malzemeleri kadar büyük önem taşır. Bi-Sn, Ag-Cu ya da Ag-Bi gibi ikili alaşımların aksine Bi-In alaşım sisteminin BiIn, Bi₃In₅, BiIn₂ bir kaç intermetalikleri ince intermetalik bileşik tabakası şeklinde istenilen iyi bir metalürjik bağ olmayı başarmıştır [24]. Elektronik aygıtların bağlanmasında, lehim bağlantıları paketleme entegrasyonunun önemli bir parçasıdır. Çünkü bu fazlar elektrik bağlantısı ve mekanik destek de yardımcı olurlar [25]. Bi-In intermetaliklerini içeren Zn esaslı alaşımlar da bahsedilen kalem pillerin yapımında da önemlidirler [26].

BÖLÜM 2

ISIL İLETKENLİĞİN BELİRLENMESİ İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde malzemelerin ısı iletkenliğinin tespit edilebilmesi için kullanılan metot ve yapılan çalışmalar anlatıldı. Isıl iletkenliğin ölçümü için kullanılan kararlı durum metotları hakkında bilgi verildi. Kararlı durum metotlarında, numune sabit bir sıcaklıkta tutulur ve ısı iletim katsayısı birim alan başına ısı akışının ölçümü ile belirlenir.

Isıl iletkenliğin belirlenmesinde kullanılan en yaygın kararlı hal metodu lineer ısı akış metodudur. Sıklıkla kullanılan ve kararlı hal metodundan biri olan lineer ısı akış metodunun numune geometrisine bağlı olarak farklı çeşitleri vardır. Isıl iletkenliğin ölçümünde kullanılan çoğu metot da, farklı geometriye sahip numuneler için ısı akışı ya lineer ya da radyal yönde olacak şekilde kontrol edilir. Bu çalışma da kararlı hal durumlarından olan lineer ısı akış metodu kullanılarak ısı iletkenlik ölçümü yapılmıştır.

2.2. Isıl İletkenliğin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Katılarda ısı iletkenliği deneysel olarak tayin edebilmek için farklı sıcaklıklar ve farklı ısı iletkenlik değerlerine sahip çeşitli maddeler için bir dizi farklı ölçüm metotları uygulamak gerekmektedir. Maddenin cinsi ve sıcaklık aralığına uygun bir metot tercih edilir. Hiçbir metot gereken ölçüm koşullarının tamamı için mükemmel olmamaktadır. Bir metodun uygunluğu; maddenin fiziksel özelliği, numunenin uygun geometrik yapısı, sonuçların gereken kesinlik derecesi, deneyin hızı, zaman ve gerekli finansman gibi hususlarla belirlenir.

Isıl iletkenliği ölçme metotları; kararlı-hal ve kararsız-hal metotları olmak üzere iki bölüme ayrılır. Bu çalışma da kararlı hal metodu kullanıldığı için kararlı hal metodundan bahsedilecektir.

Kararlı hal ölçüm metodunda numune sabit bir sıcaklıkta tutulur ve ısı iletkenlik, denge durumu oluştuktan sonra birim alan başına düşen ısı akış hızının ve dengeye ulaşıldıktan sonraki sıcaklık gradyentinin ölçülmesiyle doğrudan bulunur.

Çoğu ölçüm metodundaki temel sorun, istenilen doğrultuda kontrollü bir ısı akışı elde edilememesidir. Bu ısı akışı öyle olmalıdır ki teorik şartlarla deneysel sınır koşullarını örtüşürmelidir. Teorik olarak kontrollü bir ısı akışı elde etmenin en kolay yolu merkezinde bir ısı kaynağı olan içi boş küre şeklinde bir numune kullanmaktır. Dâhili ısıtıcı tarafından sağlanan ısı numune içerisinden kayıpsız olarak radyal şekilde geçer. Fakat gerçekte bütün radyal doğrultularda düzenli ısı akışı veren küre şeklinde bir ısı kaynağı oluşturmak çok zordur. Ayrıca deneysel düzende küresel numune oluşturmak, ısı girişini ve sıcaklık gradyentini ölçmekte zordur.

Katıların ısı iletkenliklerinin deneysel ölçüm çalışmaları 18. yüzyılda başlamıştır. Benjamin Franklin [27] 1753 yılında farklı maddelerin ısıyı soğurması ve yaymasıyla ilgili ilk çalışmalara başlamıştır. Metal ve tahta gibi malzemelerin dokunuldukları zaman hissedilen soğukluk derecesine göre ısı yönünden iyi veya zayıf iletkenler olup olmadıklarını incelemeye başlamıştır. Fordyce [28] 1787 yılında mukavva ve demirin iletkenlik güçleriyle ilgili deneylerle bu alandaki çalışmalara öncülük etmiştir. Katıların ısı iletkenliklerinin ölçümlerinde ilk olarak kararlı hal mukayeseli ölçüm metodunu ortaya koyan Franklin olup çalışmaları geliştirerek devam ettiren ise 1789 yılında rapor edildiği üzere Ingen-Hausz'dur [29]. Desperits 1822 yılında bu metodu daha da geliştirmiştir [30]. Desperits'in bu metodu 1853 yılında Wiedeman ve Franz tarafından bazı metallerin ısı iletkenliklerinin tayininde kullanılmış ve Wiedemann-Franz kanunu olarak adlandırılmıştır [31]. Mutlak olarak ilk kararlı hal mutlak metod 1851 yılında Forbes [32-35] tarafından, ilk kararsız hal mutlak metod ise 1861 yılında Angström [36] tarafından uygulanmıştır. O günlerden bu yana bir grup farklı metod ve onların çeşitleri yıllar geçtikçe geliştirilmiştir. Metodun deneysel gelişimi için birçok araştırma mevcuttur [37-47]. Metodların matematiksel teorileri birçok kitapta anlatılmıştır [47-52].

Lineer ısı akışı metodunda ısı akışının ölçümüne göre mutlak metod ve karşılaştırmalı metod arasında bir ayrım olmaktadır. Mutlak metotta, numunenin ucundaki ısıtıcıdan elektriksel güç girdisini ölçerek numunedeki ısı akış oranı doğrudan tayin edilir. Numune dışındaki ısı akışı, akı kalorimetresi ve buharlaşma kaybı kalorimetresi ile ölçülebilir. Isı akış hızı, birinci metod kullanılarak bilinen ısı kapasitesine sahip su gibi dolanan sıvının sıcaklık artışı ve akış hızı vasıtasıyla tespit edilirken; ısı akış hızı ikinci metod kullanılarak ise, bilinen buharlaşma ısısına sahip su gibi bir sıvının buharlaşma

kayıp hızı yani buharlaşma ısısı vasıtasıyla tespit edilir. Mukayeseli bir metotta ısı akış hızı, genelde aynı ısı akışının gerçekleşeceği ümit edilen numune ile seri olarak yerleştirilen bilinen bir ısıl iletkenliğe sahip bir referans örnek üzerindeki sıcaklık gradyentinden hesaplanır. Ayrıca yukarıda bahsedilen metotlar numune geometrilerine göre de alt başlıklara ayrılabilirler.

2.2.1. Kararlı hal metotları

Katıların ısı iletkenliklerini ölçmekte kullanılan kararlı hal metotları aşağıda gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır.

A. Lineer Isı Akış Metotları

a. Mutlak Metotlar

1. Çubuk (Rod) Metodu
2. Levha (Disk) Metodu

b. Karşılaştırmalı Metotlar

1. Bölünmüş Çubuk Metodu
2. Levha (Disk) Metodu
3. Bileşik Metot

2.2.1.1. Lineer ısı akış metotları

Lineer (doğrusal-boyuna) ısı akış metotlarında deneysel düzenek, ısı akışı bir çubuk (veya disk) numunenin sadece aksenal yönünde olacak şekilde tasarlanmıştır. Numunenin radyal ısı kaybı veya kazancı önlenir ya da en aza indirilir. Kararlı hal şartları altında radyal ısı kaybı veya kazancı olmadığı varsayılarak, ısı iletkenlik tek boyutlu Fourier-Biot ısı iletim denklemi,

$$K = \frac{-q\Delta x}{A\Delta T} \quad (2.1)$$

yardımıyla elde edilir [128, 129]. Burada K değeri $(1/2)(T_1+T_2)$ sıcaklığına karşılık

gelen ortalama ısıl iletkenlik katsayısı, $\Delta T = T_2 - T_1$, q ısı akış hızı, A numunenin kesit alanı ve Δx ise T_1 ve T_2 sıcaklıklarının ölçüldüğü noktalar arasındaki uzaklıktır.

2.2.1.1.1. Mutlak metotlar

2.2.1.1.1.1. Çubuk (rod) metodu

Bu metot iyi iletkenler ve çok yüksek sıcaklıklar haricindeki tüm sıcaklıklar için uygundur. Aslında bu metot oda sıcaklığının altındaki hemen hemen bütün ölçümlerde kullanılmaktadır. Kullanılan numune oldukça uzun bir çubuk şeklindedir. Bunun sebebi kesin ve doğru bir ölçüm için numune boyunca fark edilebilir bir sıcaklık düşüşü elde edebilmektir. Sabit sıcaklıktaki bir ısı kaynağı çubuğun bir ucuna uygulanır ve ısı, aksel olarak daha düşük sıcaklıktaki bir soğutucuya dokundurulan diğer uca doğru çubuk boyunca akar. Çubuğun radyal ısı alış verisi ihmal edilir. Eşitlik (2.1)' den ısıl iletkenliği hesaplamak için çubuğun içine ve dışına doğru olan ısı akış hızının, kesit alanının, çubuk boyunca en azından iki noktadaki sıcaklıkların ve sıcaklık ölçümü yapılan noktalar arası uzaklığın ölçülmesi gereklidir.

Çok düşük (kriyojenik) sıcaklıklardaki ölçümler için radyal ısı kaybı ciddi bir problem oluşturmamaktadır. Bu nedenle de ısıl yalıtıma ve korumalı ısıtıcılara gerek yoktur. Ölçüm genelde gaz iletimini ve konveksiyonu engellemek için yüksek vakum altında yapılır. Ayrıca numune etrafında ışınma kaybını en aza indirmek için örneği çevreleyen bir (ışınma) radyasyon kalkanı kullanılabilir. Numunenin bir ucuna verilen ısı, ince direnç telli ısıtma bobini (ısıtıcı ve numune arasındaki temas direncini kaldırmak için doğrudan numunenin üzerine sarılabilir) veya karbon rezistansı ile sağlanabilir. Sıcaklıklar gaz termometreleriyle, buhar-basınç termometreleri ile termal çiftlerle, direnç termometreleri ile ya da manyetik alınganlık termometreleriyle ölçülebilir.

Yüksek sıcaklıktaki ölçümlerde ısı kaybı çok ciddi bir problem haline gelir çünkü radyant (ışınma) ısı transferi sıcaklıkla hızla artar. Radyal ısı kaybını engellemek için kontrollü koruma ısıtıcısı ile birlikte numunenin etrafında koruma tüpü kullanılabilir. Yalıtım tozu genelde numune çubuğu ve koruma tüpü arasındaki boşlukları doldurmakta kullanılır. Berget [53, 54] 1887 yılında ısı kaybını engellemek için numune etrafında korumalı halka kullanmıştır.

Herhangi bir numunenin, ısı akış hızı, çubuk numunenin serbest ucundaki bir elektrikli ısıtıcının güç girişi ölçülerek veya düşük sıcaklığa sahip uçtaki su akış kalorimetresiyle numune dışına akan ısı ölçülerek ya da her ikisiyle tespit edilebilir. Sıcaklık ölçümleri genelde ısı çiftleriyle yapılır. Doğru sıcaklık ölçümleri elde etmek ve ısı çiftlerinin uçları boyunca ısı iletimini en aza indirmek için ısı çiftleri düşük iletkenliğe sahip alaşımlardan yapılmış çok ince tellerden oluşmalıdır ve bağlantı noktasından çıkan uçlar izotermal çizgiler boyunca olmalıdır.

Bu metod yüksek sıcaklıklardaki ölçümler için Laubitz [55] ve Flynn [56] tarafından etraflıca tartışılmış ve eleştirilmiştir. Isı kaybı etkileri, ısı temas dirençleri, ısı çiftlerinin zayıf temasları ve sıcaklık sürüklenmesi gibi nedenlerden kaynaklanan sistematik ölçüm hataları ise Bauerle tarafından analiz edilmiştir [57].

Bu metodun değişik bir şekli şu şekilde kullanılmıştır [58-60]. Çubuk numunenin merkezindeki boşluğa ısıtıcı yerleştirilmiştir. Ayrıca her iki ucuna da birer soğutucu yerleştirilmiştir. İki uca doğru oluşan ortalama sıcaklık gradyenti, ısı iletkenlik hesaplamalarında kullanılmıştır.

2.2.1.1.1.2. Levha (disk) metodu

Bu metod zayıf iletkenler örneğin yarıiletkenler için ve düşük iletkenliğe sahip malzemeler mesela sıkılaştırılmış metalik tozlar ve yalıtkanlar için uygundur. Çubuk metoduna benzer bir metottur. Fakat tek farkı numune boyutlarının küçük bir parça haline indirgenmiş olmasıdır. Bu numune geometrisi zayıf iletkenlerin ölçümleri için elverişlidir. Çünkü numunenin küçük olması ısı akışı sırasında daha az ısı kaybına sebep olur ve denge durumu daha kısa zamanda sağlanır. Farklı çeşitlerdeki maddeler için tasarlanmış cihazlarda kullanılan numunelerin boyutları çok çeşitlilik göstermektedir. Yarı iletkenleri ölçmek için yapılmış bir alette kullanılan numune 1 cm genişlikte [61] olabilirken, yalıtkanları veya ısıya dayanıklı maddeleri ölçmek için yapılmış alette kullanılan numune 30cm olabilir [62].

Bu metotta da ısı iletkenliği (2.1) denklemi ile elde edilir. Isı akış hızı, korumalı ısıtıcıya [62-64] elektriksel güç girdisiyle, korumalı su akış kalorimetresi ile [65], buhar kaybı kalorimetresiyle [66-69] ya da ısı akışı tespit cihazı [70] ile tayin edilebilir. Sıcaklık

ölçümleri genelde test edilen malzemeye göre numunenin içerisine yerleştirilmiş veya numune yüzeyindeki boşluklara sıkıca monte edilmiş termal çiftlerle ölçülür. Yanal ısı kayıpları korumalı ısıtıcılar kullanılarak veya büyük bir numune üzerindeki küçük bir merkezi alanda çalışma yaparak engellenebilir.

Levha (disk) metodunda iki çeşit deneysel düzenek vardır. Bunlardan birincisi tek levha sistemi, diğeri ise çift levha sistemidir. Tek levha deneysel sisteminde sıcak ve soğuk levhalar arasına konmuş bir tane numune varken çift levha deneysel sisteminde iki tane numune ortalarına sıcak levha ve dış taraflarına soğuk levhalar konularak sandviç şeklinde yerleştirilir.

2.2.1.1.2. Karşılaştırmalı metotlar

Kararlı hal karşılaştırmalı metodu ilk defa Franklin tarafından önerildi ve 1789 yılında Ingen-Hausz [71] tarafından geliştirildi. Bu metotta çubuk şeklinde farklı metaller balmumuyla kaplandı ve hepsi tek taraflı uçlarından sıcak su veya yağ içine konarak ortak bir sıcaklığa getirildi. İyi iletken maddelerde balmumu, daha az iletken maddelere göre çubuk üzerinde çok fazla bir mesafeye kadar eridi. İşte geçmişte yapılan bu deneyde kararlı-hal durumunda çubukların iletkenlik oranının bu mesafenin karesiyle doğru orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. Günümüzde modern karşılaştırmalı metotlar; bölünmüş çubuk metodu ve karşılaştırmalı levha metodu olarak iki şekilde incelenir.

2.2.1.1.2.1. Bölünmüş çubuk metodu

Bu metot ilk defa 1878 yılında Lodge [72] tarafından uygulanmış ve sonra Berget [73], Lees [74] ve birçok bilim adamı tarafından da kullanılmıştır. Isı iletkenliği bilinen bir ya da birden fazla referans numune ile ısı iletkenliği bilinmeyen bir numune ard arda yerleştirilir. Hem referans numunesi hem de ısı iletkenliği bilinmeyen numune boyunca aynı ısı akış hızının olduğu kabul edilir. Bu ideal şartlar altında numunenin ısı iletkenliği (2.2) denklemi ile verilir.

$$K = k_r \frac{A_r (\Delta T / \Delta x)_r}{A (\Delta T / \Delta x)} \quad (2.2)$$

Burada r alt indisi referans numunesini belirtmektedir. Bu metot kendi içerisinde iki farklı gruba bölünebilir. Bunlar iyi iletkenlerin ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan uzun-numune çubuk metodu [73, 75, 76] ve zayıf iletkenlerin ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan kısa-numune çubuk metodu [72, 74, 77-80] şeklindedir. Karşılaştırmalı metotlar diğerlerine göre daha basit cihazlarla işlem yapabilme, numunenin kolay hazırlanması ve kolay işlem yapabilme özelliklerinden dolayı oldukça avantajlı metotlardır. Dezavantajları arasında ısıl çift aralıkları belirlemeden dolayı oluşan ölçüm hataları, referans örneğin iletkenliğindeki belirsizlik ve numune ile referans örnek arasındaki iletkenlik uyumsuzluğu bulunmaktadır. Flynn [81] bölünmüş çubuk metodunun iyi tasarlanmadığını ve bu metotla elde edilen verilerin büyük hatalara yol açabileceğini vurgulamıştır.

2.2.1.1.2.2. Levha (disk) metodu

Bu karşılaştırmalı metot zayıf iletkenler ve yalıtkanlar için uygun bir ölçüm metotudur. Genel olarak bölünmüş çubuk metoduna ilke olarak benzerlik gösterir. Fakat burada referans ve ölçüm yapılacak numune düz levhalar (veya diskler) şeklinde sıcak ve soğuk plakalar arasında bulunmaktadır. Christiansen [82] 1881 yılında bu metodu ilk defa kullanarak sıvılar ile havanın ısıl iletkenliklerini karşılaştırmıştır. Peirce ve Willson [83] bu metodu, karşılaştırmada cam plakaları referans malzeme olarak, mermer levhaların ısıl iletkenliğini ölçmek için kullanmıştır. Sieg [84] ise cihazın yanal ısı kaybını önlemek için koruma halkasını kullanmıştır.

2.2.1.1.2.3. Bileşik metot

Bileşik metot ile hem mutlak hem de karşılaştırmalı metotların özellikleri birleştirilir. Bu metotta referans numunesi ile ölçüm yapılacak numune seri olarak yerleştirilir ve eş zamanlı olarak su akış kalorimetresi [85-87] ile veya ısıtıcının elektrik gücünün ölçülmesiyle ısı akış hızı tayin edilebilir.

Bu bölümde ısıl iletkenliğin belirlenmesi için yapılan çalışmalar ile ilgili literatür taraması yapıldı. Metalik alaşımların ısıl iletkenlik değerleri Tablo 2.1. de gösterildi. Gelecek bölümde ise kullandığımız deneysel teknikler hakkında geniş bilgiler verilecektir.

Tablo 2.1. Metalik alaşımların ısı iletkenlik değerleri (W/Km)

Sistem	Alaşım	Sıcaklık	Isıl İletkenlik	Ref.
		(K)	(W/Km)	
BiSnAg	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ. Ag	313	25.03	[1]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ. Ag	333	24.97	[1]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ. Ag	353	24.58	[1]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ. Ag	373	23.92	[1]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ. Ag	393	22.54	[1]
SnAgCu	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	313	59.41	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	333	57.57	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	353	57.42	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	373	56.66	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	393	55.64	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	413	53.58	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	433	52.42	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	453	51.96	[1]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	473	50.52	[1]
InSnAg	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	313	77.76	[1]
	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	333	75.31	[1]
	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	353	74.72	[1]
	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	373	71.29	[1]
SnBiCu	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	313	27.66	[1]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	333	26.00	[1]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	353	24.83	[1]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	373	23.31	[1]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	393	21.26	[1]
SnSbAg	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	313	55.01	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	333	54.91	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	353	53.55	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	373	52.16	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	393	51.50	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	413	49.36	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	433	48.16	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	453	46.02	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	473	45.65	[1]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	493	42.26	[1]
Sn-Ag	Sn-%10 ağ. Ag	313	64.86	[2]
	Sn-%10 ağ. Ag	333	63.94	[2]
	Sn-%10 ağ. Ag	353	63.19	[2]

Tablo 2.1.'in devamı

	Sn-%10 ağ. Ag	373	62.59	[2]
	Sn-%10 ağ. Ag	393	61.95	[2]
	Sn-%10 ağ. Ag	413	59.78	[2]
	Sn-%10 ağ. Ag	433	58.17	[2]
	Sn-%10 ağ. Ag	453	56.75	[2]
Sn-In	Sn-%10 ağ. In	313	80.33	[2]
	Sn-%10 ağ. In	333	77.84	[2]
	Sn-%10 ağ. In	353	75.44	[2]
	Sn-%10 ağ. In	373	74.98	[2]
Sn-Bi	Sn-%10 ağ. Bi	313	38.14	[2]
	Sn-%10 ağ. Bi	333	37.70	[2]
	Sn-%10 ağ. Bi	353	36.56	[2]
	Sn-%10 ağ. Bi	373	35.77	[2]
	Sn-%10 ağ. Bi	393	35.64	[2]
Sn-Cu	Sn-%10 ağ. Cu	313	75.51	[2]
	Sn-%10 ağ. Cu	333	74.15	[2]
	Sn-%10 ağ. Cu	353	73.39	[2]
	Sn-%10 ağ. Cu	373	71.97	[2]
	Sn-%10 ağ. Cu	393	70.69	[2]
	Sn-%10 ağ. Cu	413	69.69	[2]
	Sn-%10 ağ. Cu	433	68.86	[2]
	Sn-%10 ağ. Cu	453	67.24	[2]
Sn-Sb	Sn-%10 ağ. Sb	473	66.01	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	313	70.03	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	333	69.36	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	353	67.51	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	373	65.55	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	393	64.25	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	413	62.79	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	433	60.49	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	453	59.94	[2]
	Sn-%10 ağ. Sb	473	59.12	[2]
Sn-Zn	Sn-%10 ağ. Sb	493	58.84	[2]
	Sn-%10 ağ. Zn	313	62.13	[2]
	Sn-%10 ağ. Zn	333	61.35	[2]
	Sn-%10 ağ. Zn	353	60.40	[2]
	Sn-%10 ağ. Zn	373	59.53	[2]
	Sn-%10 ağ. Zn	393	58.34	[2]
	Sn-%10 ağ. Zn	413	58.10	[2]
	Sn-%10 ağ. Zn	433	57.08	[2]
Sn-Bi-In	Sn-%10 ağ. Zn	453	56.74	[2]
	In-%21.23 at. Bi-%19.04 at. Sn	332.15	29.24	[88]

Tablo 2.1.'in devamı

	Sn-%40.14at. In-%16.11at. Bi	332.15	31.56	[88]
Sn-Pb	Sn-%26.1 at. Pb	456	40.1	[89]
Sn-Sb	Sn-%7.8 at. Sb	518.65	40.50	[90]
	Sn-%41.4 at. Sb	518.65	31.98	[90]
	Sn-%5 at. Sb	518.65	43	[91]
Sn-Zn	Sn-%8.9 ağ. Zn	472	35.74	[92]
Bi-Cd	Bi-%39.7ağ. Cd	413	12.46	[93]
Zn-Cu	Zn-%2.83 at. Cu	695.65	141.6	[94]
	Zn-%12 at. Cu	695.65	136.3	[94]
Bi-Cd	Bi-%54.6 at. Cd	413	12.46	[95]
Al-Zn	Al-%95 ağ. Zn	653	122	[96]
	Al-%84 ağ. Zn	653	133	[96]
Al-Cu	Al-%31.94 at. Cu	821	108.7	[97]
	Al-%3 ağ. Cu	821	143.1	[98]
	Al-%6 ağ. Cu	821	130.7	[98]
	Al-%15 ağ. Cu	821	116.3	[98]
	Al-%24 ağ. Cu	821	113.1	[98]
	Al-%33 ağ. Cu	821	111.7	[98]
	Al-%52.5 ağ. Cu	821	107.9	[98]
Al-Cu-Ag	Al-%32.21 at. Cu-%0.04 at. Ag	775.09	110.64	[99]
	Al-%32.21 at. Cu-%0.04 at. Ag	799.35	112.25	[100]
In-Bi	In-%12.4 at. Bi	345.15	32.82	[101]
	In-%33.2 at. Bi	345.15	25.21	[101]
Sn-Cu	Sn-%1.3 at. Cu	500.15	58.90	[102]
Pb-Sb	Pb-%17.5 at. Sb	525.15	26.8	[103]
	Pb-%5.8 at. Sb	525.15	28.7	[103]
Sn-Ag-In	Sn-%4.4 at. Ag-%2.1 at. In	490.65	62.50	[104]
	Ag-%23.7 at. Sn-%2.1 at. In	490.65	44.48	[104]
Zn-Cd	Zn-%1.3 ağ. Cd	539	77	[105]
	Sn-%0.09 at. Ag	494	57.70	[106]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	323	89	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	343	86	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	363	83	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	383	82	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	403	77	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	423	75	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	443	72	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	463	70	[107]
	Sn-%1.5 ağ. Ag	483	69	[107]
	Sn-%3.5 ağ. Ag	323	98	[107]

Tablo 2.1.'in devamı

Sn-Ag	Sn-% 3.5 ağı. Ag	343	97	[107]
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	363	96	[107]
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	383	92	[107]
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	403	90	[107]
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	423	90	[107]
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	443	89	[107]
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	463	87	[1107]
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	483	84	[107]
	Sn-%3.5 ağı. Ag	483	84	[107]
	Sn-%3.84 at. Ag	494	83.70	[108]
Sn-In	Sn-%25.63 at. In	391.5	65.90	[108]
Sn-Cu	Sn-% 1.30 at. Cu	500.15	58.90	[108]
Sn-Pb	Sn-%1.45 at. Pb	456	52.30	[108]
	Sn-%26.1 at. Pb	456	40.10	[108]
Sn-Zn	Sn-%1.0 ağı. Zn	300	79.00	[109]
	Sn-% 1.0 ağı. Zn	500	66.00	[109]
	Sn-% 8.9 ağı. Zn	300	88.34	[109]
	Sn-% 8.9 ağı. Zn	500	72.48	[109]
	Sn-% 15 at. Zn	199	35.74	[110]
	Sn-%2 at. Zn	199	52.60	[110]
Cd-Sn	Cd-%2.5 ağı. Sn	300	34.17	[111]
	Cd-%2.5 ağı. Sn	500	22.60	[111]
	Cd-%22.5 ağı. Sn	300	37.79	[111]
	Cd-%22.5 ağı. Sn	500	25.58	[111]
	Cd-%33.5 ağı. Sn	300	41.90	[111]
	Cd-%33.5 ağı. Sn	500	28.00	[111]
	Cd-%88.0 ağı. Sn	300	46.37	[111]
	Cd-%88.0 ağı. Sn	500	30.17	[111]
	Cd-%5 at. Zn	373	96.62	[112]
	Cd-%5 at. Zn	533	85.28	[112]
	Cd-%26.5 at. Zn	373	91.00	[112]
	Cd-%26.5 at. Zn	533	81.53	[112]
Zn-Cd	Zn-%1.3 at. Cd	373	86.20	[112]
	Zn-%1.3 at. Cd	533	76.94	[112]
Sn-Pb	Sn-%30 ağı. Pb	183–192	50.0	[112]
	Sn-%40 ağı. Pb	183–188	50.0	[113]
Sn-Pb-Ag	Sn-%36 ağı. Pb-%2 ağı. Ag	177–189	50.0	[113]
Zn-Bi-Al	Zn-%41.58 ağı. Bi- %0.6ağı. Al	373	46.00	[114]
	Zn-%41.58 ağı. Bi- %0.6ağı. Al	423	44.46	[114]
	Zn-%41.58 ağı. Bi- %0.6ağı. Al	473	42.14	[114]
	Zn-%41.58 ağı. Bi- %0.6ağı. Al	523	40.59	[114]

Tablo 2.1.' in devamı

Sn-Al-Cu	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	373	105.25	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	423	102.96	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	473	102.08	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	523	101.26	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	573	98.99	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	623	96.89	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	673	94.35	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	723	91.12	[114]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	773	90.78	[114]

BÖLÜM 3

DENEYSEL SİSTEMLER ve BİR DENEYİN YAPILIŞI

3.1. Giriş

Bu tezde katıların ısı iletkenliğin belirlenmesinde lineer ısı akış metodu kullanılmıştır. Lineer ısı akış metodu kararlı durum metotlarından ve numune geometrisine bağlı olarak farklı lineer ısı akış metodları vardır [115].

Bu tezin amacı ikili intermetalik alaşımların ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimini lineer ısı akış metodu ile ölçmektir. Bu bölümde ısı iletkenliğin belirlenmesinde kullanılan lineer ısı akış sistemi ve bu tez çalışmasında kullanılan diğer sistemler detaylarıyla anlatılacaktır.

3.2. Deneysel Sistemler

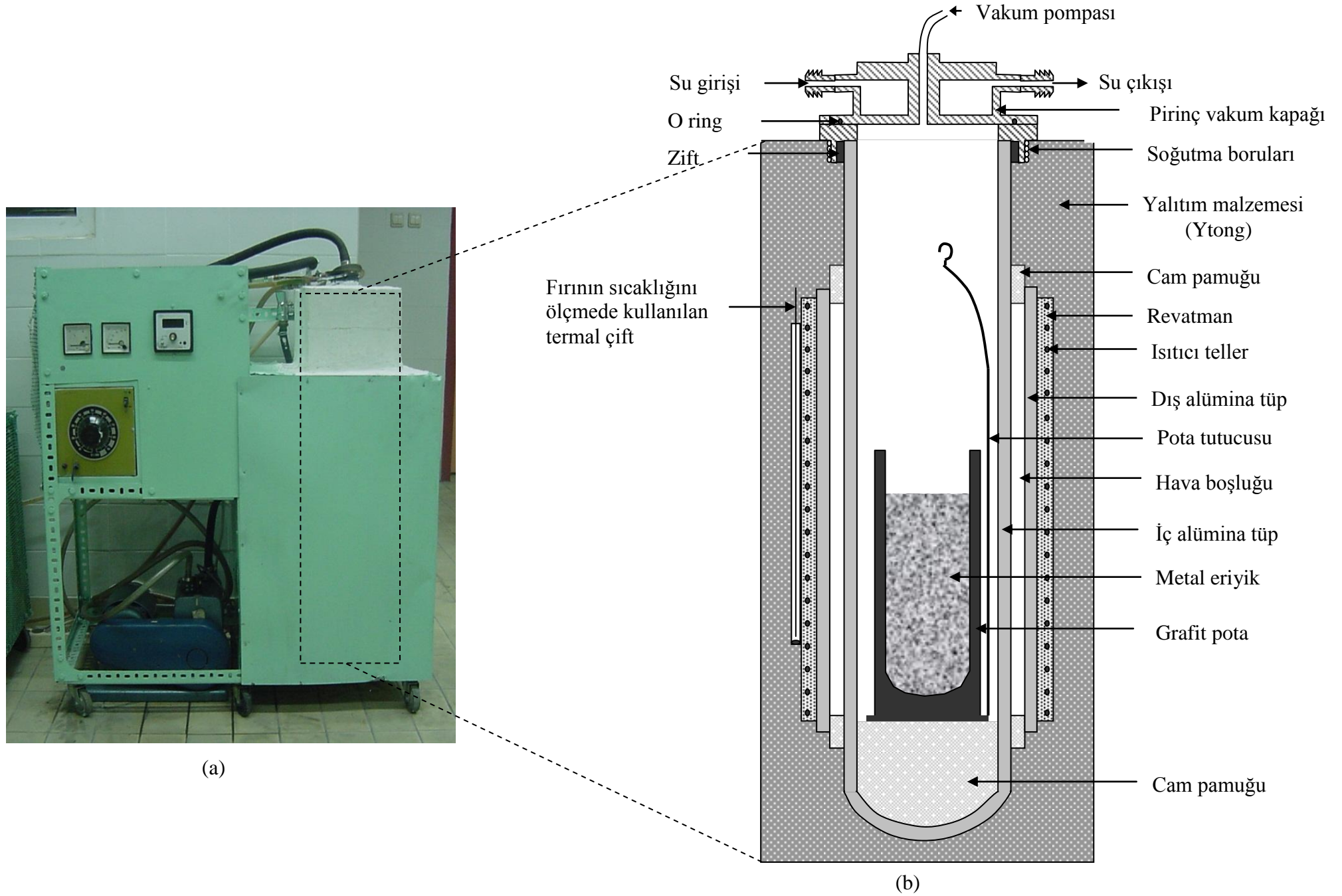
Bu tez çalışmasında; vakumlu eritme fırını, döküm fırını ve lineer ısı akış sistemi kullanılmıştır. Bu kesimde, tezin gerçekleşmesinde kullanılan deneysel sistemler hakkında bilgi verilecektir.

3.2.1. Vakumlu eritme fırını

Vakumlu eritme fırını, alaşım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Şekil 3.1.a'da fotoğrafı ve Şekil 3.1.b'de Şematik gösterimi verilen vakumlu eritme fırını, iç içe geçmiş iki alümina tüp, vakum pompası, sıcaklık kontrolcüsü, varyak (transformatör) ve soğutma sisteminden oluşur [116].

İçteki alümina tüpün iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 700 mm olup bir ucu kapalıdır ve bu alümina tüpün içinde vakumlu ortam sağlanır. Dış alümina tüpün ebatları ise 80 mm × 90 mm × 500 mm olup her iki ucu da açıktır.

Dış alümina tüpün etrafına 1.2 mm kalınlığındaki Kanthal A1 telinden (FeCrAl alaşımından yapılmış tel) 80 sarım yapılmıştır. Isıtıcı telin toplam direnci 28.1 Ω olarak ölçülmüştür.



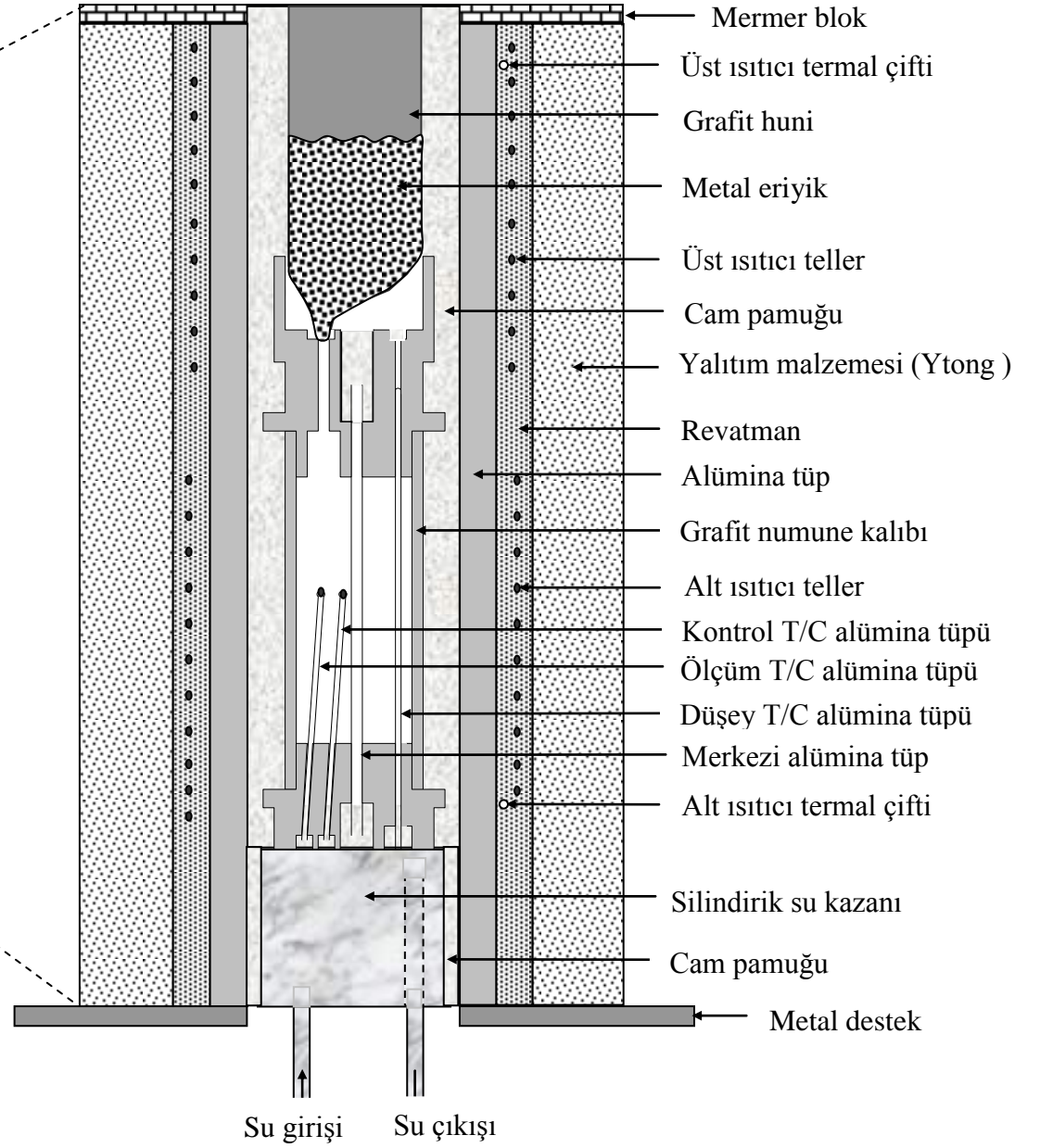
Şekil 3.1. Vakumlu eritme fırınının a) Fotoğrafi b) Şematik gösterimi [116].

Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde, tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Revatman ısındıkça sertleşen iyi bir yalıtım malzemesidir.

Fırının ısı kaybını önlemek için alümina tüplerin etrafına gaz beton (Ytong) tuğlası yerleştirilmiştir. Vakumlu ortam oluşturabilmek için bir ucu kapalı alümina tüpün açık ucuna vakum pompasını bağlayacak şekilde pirinçten bir soğutma sistemi yapılmıştır. Vakumlama esnasında hava sızmaması için iç alümina tüp ile pirinç soğutma sisteminin arası zift ile yalıtılmıştır. Fırın ısıtıldığında ziftin erimemesi için ise soğutma sisteminden sürekli su dolandırılmıştır. Fırının sıcaklığı, sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. Vakumlu eritme fırını 1100 °C'ye kadar çıkabilmektedir ve sıcaklığı $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassaslıkta kontrol edebilmektedir [116]. Eritme işlemi vakum pompası yardımıyla 10^{-3} mbar basınç altında yapılmaktadır.

3.2.2. Döküm fırını

Döküm fırını, eriyik haldeki alaşımın özel numune kalıbı içerisine dökümünün yapılması ve alaşımın kalıp içerisinde tek yönlü (doğrusal) olarak katılaştırılmasında kullanılmaktadır. Döküm fırınının fotoğrafı Şekil 3.2.a'da ve şematik gösterimi Şekil 3.2.b'de verilmiştir. Döküm fırını; iki ucu açık alümina, alt ısıtıcı, üst ısıtıcı ve soğutma kazanından oluşmaktadır. İç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 750 mm olan alümina tüpün etrafındaki farklı iki bölgeye ısıtıcı teller sarılarak birbirinden bağımsız iki ısıtıcı bölge oluşturulmuştur. Isıtıcı tel olarak 1.2 mm kalınlığında Kanthal A1 teli kullanılmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların dirençleri sırasıyla 34.028 Ω ve 28.725 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine dokunarak kısa devre olmaması için sarımların arasını dolduracak şekilde tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için ısıtıcı tellere yakın mesafelere iki adet yalıtılmış *K-tipi* termal çift yerleştirilmiştir. Alümina tüpün alt tarafına 40 mm çapında ve 160 mm uzunluğunda silindirik bir su kazanı yerleştirilmiştir. Alümina tüpün etrafı ise ısı yalıtımı amacıyla gaz beton (Ytong) tuğlası ile kaplanmıştır. Döküm fırını 1100 °C'ye kadar çıkabilmekte ve sıcaklığı $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassaslıkta kontrol edebilmektedir [116].



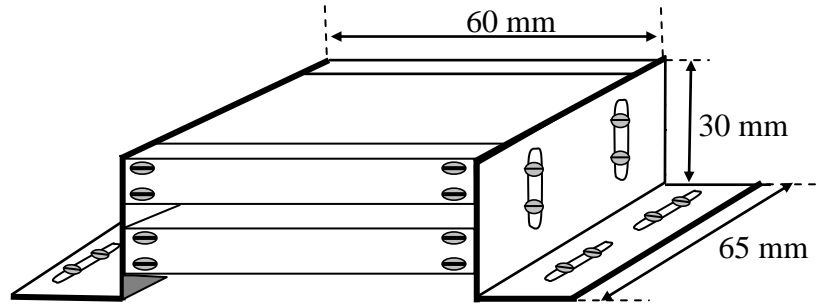
Şekil 3.2. Döküm fırınının (a) fotoğrafı (b) şematik gösterimi [116].

3.2.3. Lineer ısı akış sistemi

Malzemelerin ısı iletkenliğini doğrudan gözleyebilmek için Maraşlı ve arkadaşları tarafından lineer ısı akış sistemi kuruldu. Lineer ısı akış sistemi, soğutucu sistem, ısıtıcı sistem ve numune tutucusundan oluşmaktadır. Sabit sıcaklık gradyenti elde edebilmek için deney süresi boyunca ısıtıcı ve soğutucu sistemlerin sıcaklıklarının sabit olması gerekmektedir. Şimdi bu sistemi ayrı ayrı inceleyelim.

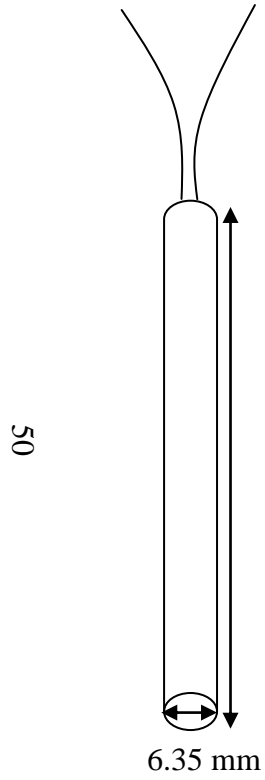
3.2.3.1. Isıtıcı sistem

Şekil 3.3.'te görüldüğü gibi ısıtıcı sistem 2 adet ana gövde, 4 adet kapak ve 2 adet gövde tutucusu olmak üzere sekiz parçadan meydana gelmektedir. Isıtıcı sistem; yüksek sıcaklık iletimi, oksitlenmeye dayanıklılık ve kolay işlenebilir olması nedeniyle pirinç malzemeden yapıldı. Bu sistem 45 mm boyunda, 60 mm eninde ve 6 mm kalınlığında iki pirinç gövdeden oluşmaktadır.

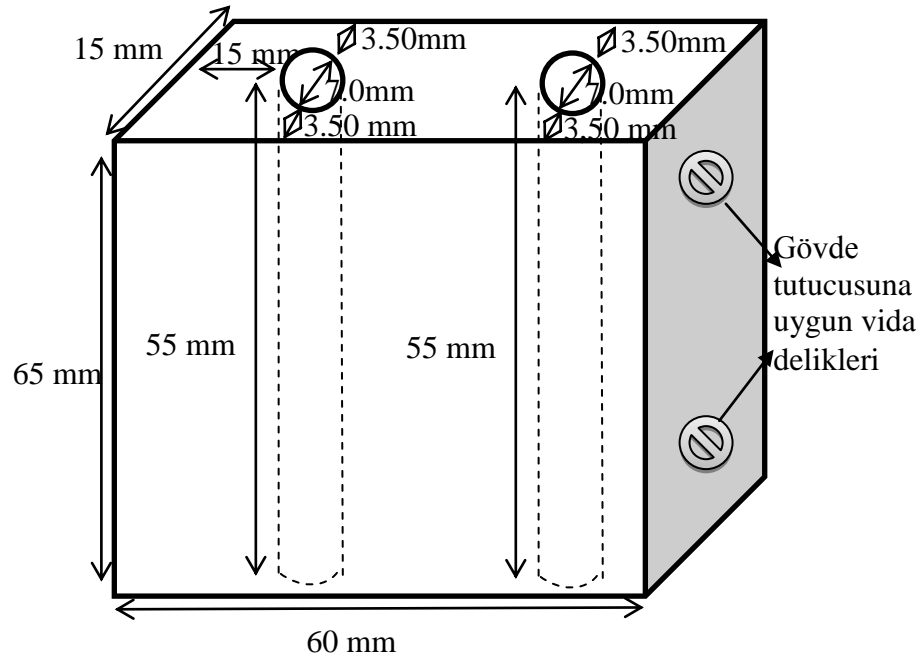


Şekil 3.3. Isıtıcı sistemin genel görünümü [1]

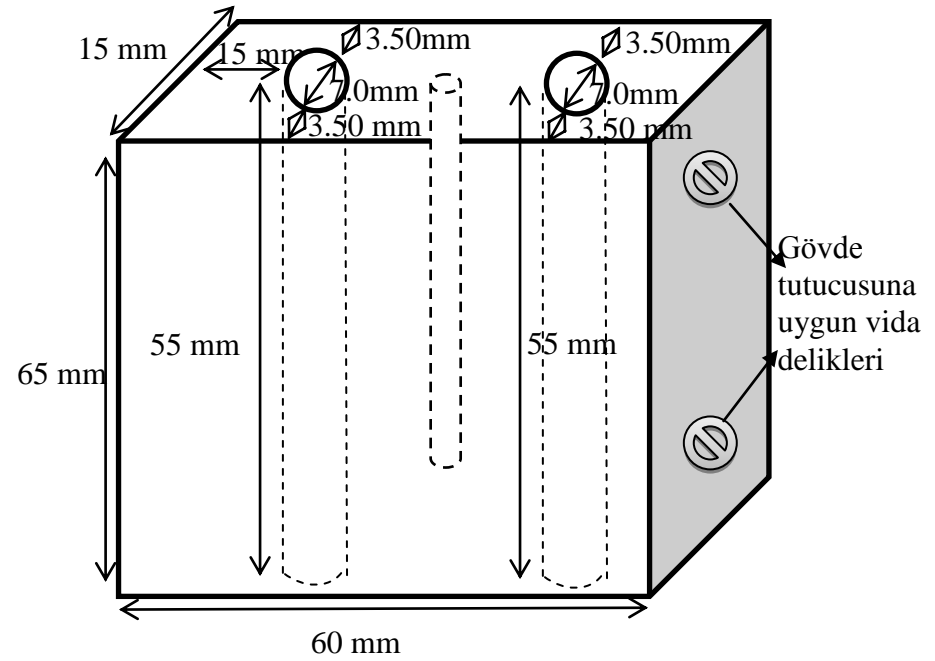
Şekil 3.4. da görüldüğü gibi gövdelerin ön kısmına pirinç malzemeden yapılmış; 60 mm eninde 65 mm boyunda 30 mm kalınlığında; ısıtıcı elementler için üst ve alt ısıtıcı sistemler oluşturuldu. Üst ve alt ısıtıcı sistemlerin her birinin içine 2 adet, 7 mm çapında delikler açılarak ısıtıcı yatağı oluşturuldu. Isıtıcı sistemin sıcaklığını termal çiftle ölçmek için alt ısıtıcı sistemin ısıtıcı elementleri arasına 1.5 mm çapında 35 mm uzunluğunda bir delik açıldı. Isıtıcı sistemin numuneye temas etmesi ve homojen bir ısı dağılımı sağlanması için ısıtıcı sistemin alt ve üst yüzeyleri parlatıldı.



Isıtıcı Element



(a)



(b)

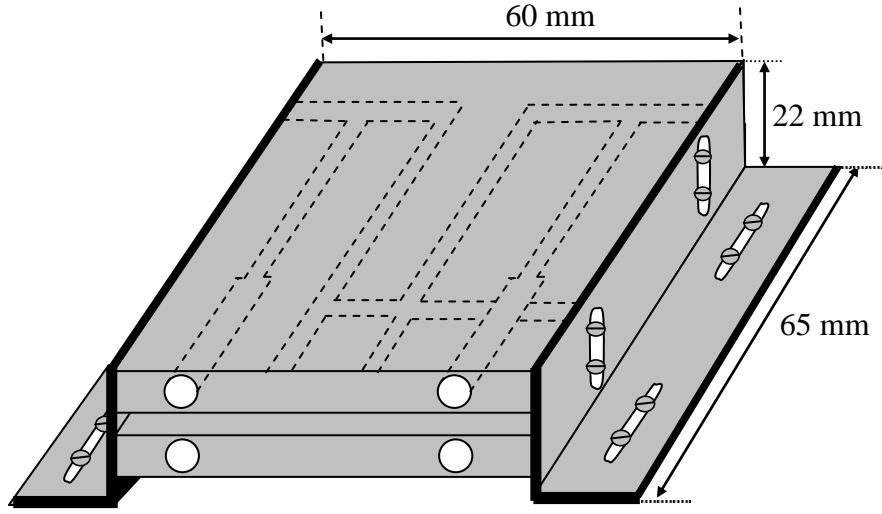
Şekil 3.4. Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı

Isıtıcı gövdelerini sabit tutmak ve gövdeler arasındaki düşey mesafeyi numune kalınlığına göre ayarlayabilmek için sağ ve sol tutuculara kaydırılabilir vida yuvaları açıldı [118]. Isıtıcı blok 5 mm kalınlığında, 130 mm eninde ve 310 mm boyunda metal bir tabla üzerine yerleştirildi. Tabla olarak metal kullanılmasının nedeni ise yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasıdır. Isıtıcı sistemin sıcaklığı 2704 tipi Eurotherm sıcaklık kontrolcüsü ile ± 0.01 K aralığında kontrol edildi. Isıtıcı sistemle 673 K sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir.

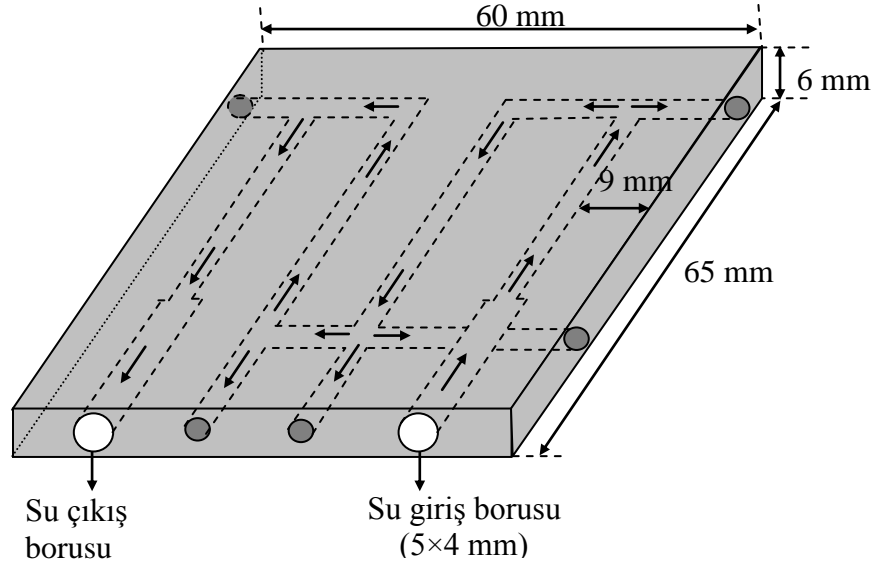
3.2.3.2. Soğutucu sistem

Soğutucu sistem, ısıtıcı sisteme benzer şekilde pirinç malzemeden yapılmış olup 2 adet soğutucu gövde ve 2 adet gövde tutucusu olmak üzere 4 parçadan ibarettir (Şekil 3.5.a). Şekil 3.5.b’de gösterildiği gibi soğutucu gövde, 65 mm uzunluğunda, 60 mm eninde ve 6 mm kalınlığında 2 tane pirinç bloktan yapılmıştır ve her bir bloğa 5 mm çapında su giriş ve çıkış kanalı açılmıştır. Ayrıca homojen soğutma elde edebilmek için 4 mm çapında ve birbirine paralel 4 tane kanal açıldı. Su kanallarının yüksek basınca dayanabilmesi ve suyu sızdırmaması için kanal girişleri kaynak ile kapatıldı. Sadece su giriş ve çıkış delikleri açık bırakılmak suretiyle bu deliklere 3 mm çapında 8 cm uzunluğunda pirinç borular kaynak edildi. Alt ve üst soğutucu blokların numune tutucusuna tam temasının sağlanması için soğutucu sistemin temas noktaları parlatma setinde parlatıldı. Su geçişini sağlamak amacıyla alt soğutucu bloğun çıkışı ile üst soğutucu bloğun girişi hortum ile bağlandı. Bu şekilde su devir-daimi yapılarak sistem homojen olarak soğutulmakta ve incelenecek numunenin sabit bir sıcaklık gradyentinde tutulması sağlanmaktadır.

Soğutucu gövdeleri tablaya tutturmak için Şekil 3.6.’da görülen 22 mm yüksekliğinde, 19 mm eninde ve 65mm uzunluğunda pirinç köşebentler kullanıldı. Bu köşebentler ayarlanabilir vida ile soğutucu bloğa monte edildi. Daha sonra bu soğutucu sistem ısıtıcı sistemin monte edildiği tabla üzerine yerleştirilerek sabitlendi. Şekil 3.6.’da soğutucu-ısıtıcı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü verilmiştir.

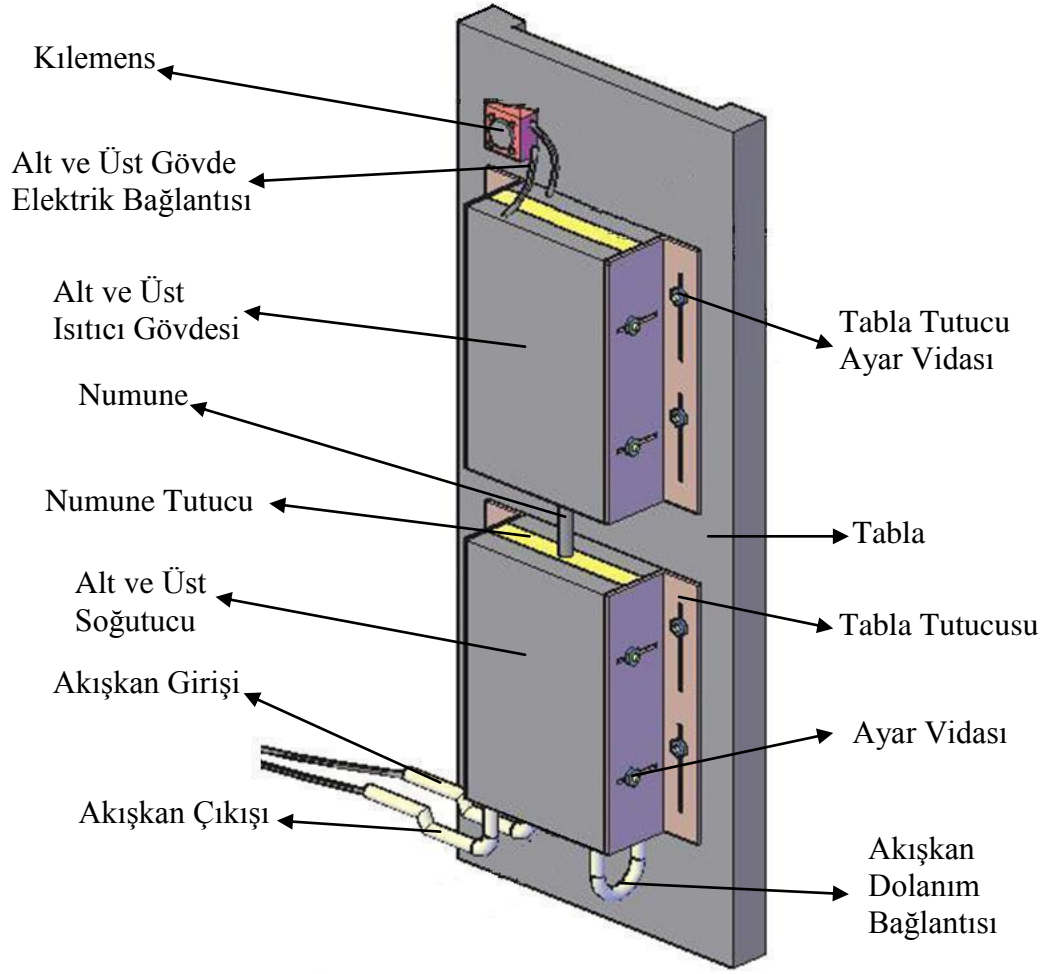


Şekil 3.5.a. Soğutucu sistemin genel görünümü [118]



Şekil 3.5.b. Soğutucu bloğun şematik gösterimi [118]

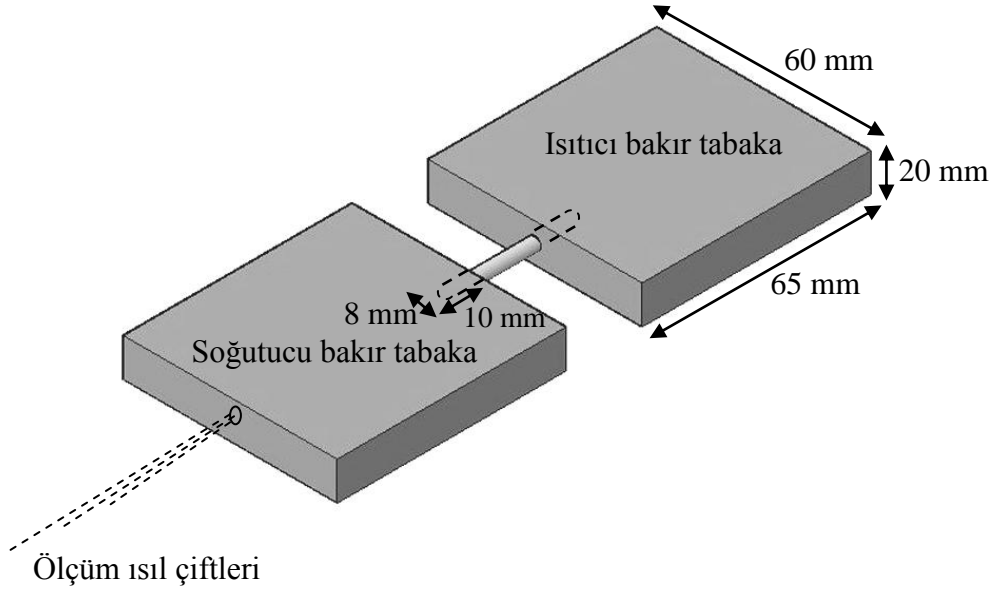
Soğutucu sistemin sıcaklığı 9702 model PolyScience tipi dijital su dolanım sistemi ile kontrol edildi. Kullandığımız su dolanım sistemi; 13 litre su kapasitesine sahip olup 233 K (-40°C) ile 473 K (200°C) arasında sıcaklık kontrolü yapabilmektedir. $\pm 0,01$ K sıcaklık hassasiyetine sahip dijital LCD grafik özelliğine sahiptir. Su dolanım sistemi; 12-25 litre/dakika pompalama hızına ve 8-18 litre/dakika emme hızına sahiptir [118].



Şekil 3.6. Soğutucu-ısıtıcı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü [1]

3.2.3.3. Numune tutucu

Numune tutucu Şekil 3.7.'de gösterildiği gibi 60 mm boyunda 65 mm eninde 20 mm yüksekliğinde iki bakır tabakadan oluşur. Burada bakır tercih edilmesinin nedeni erime noktasının ve iletkenliğinin yüksek olmasıdır. Numune tutucu malzemeyi sıcak ve soğuk sistemler arasına yerleştirmek ve numune içinde iyi bir ısı iletimi elde etmek için kullanılmıştır. Numune tutucularına malzemeyi yerleştirmek için 10 mm derinliğinde ve 8 mm çapında iki delik açılmıştır. Isıl çiftlerini numuneye yerleştirmek için de soğutucu bakır tabaka arkasına 3 mm çapında bir delik açılmıştır.

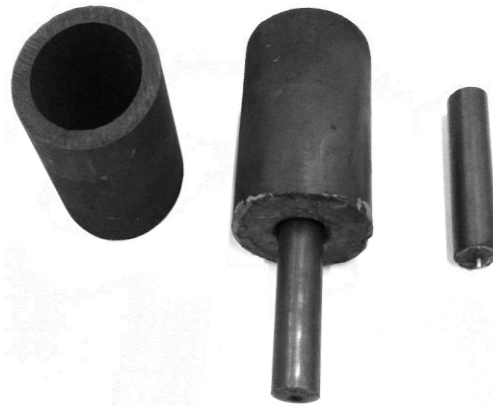


Şekil 3.7. Numune tutucunun şematik gösterimi [1]

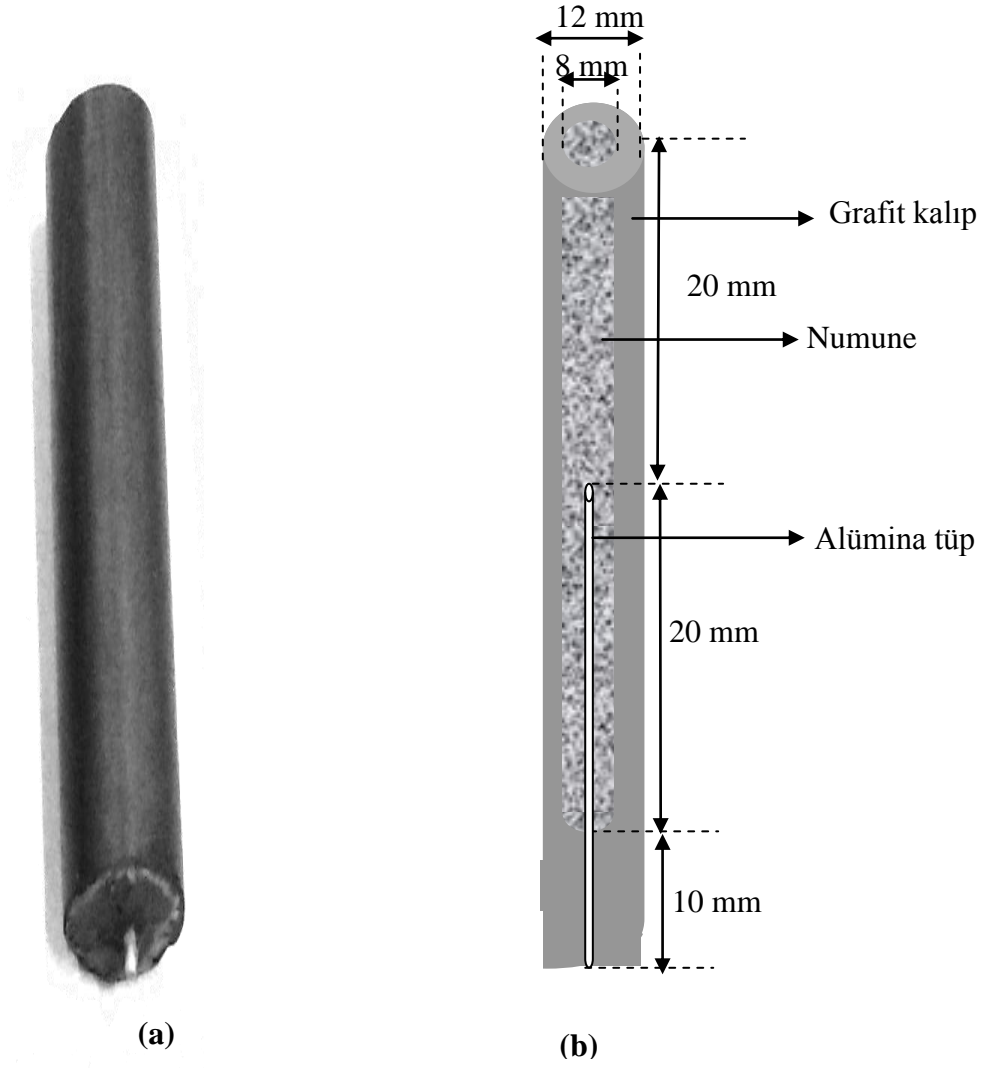
3.3. Isı İletkenliğinin Ölçümü İçin Bir Deneyin Yapılışı

3.3.1. Numune kalıbının hazırlanması

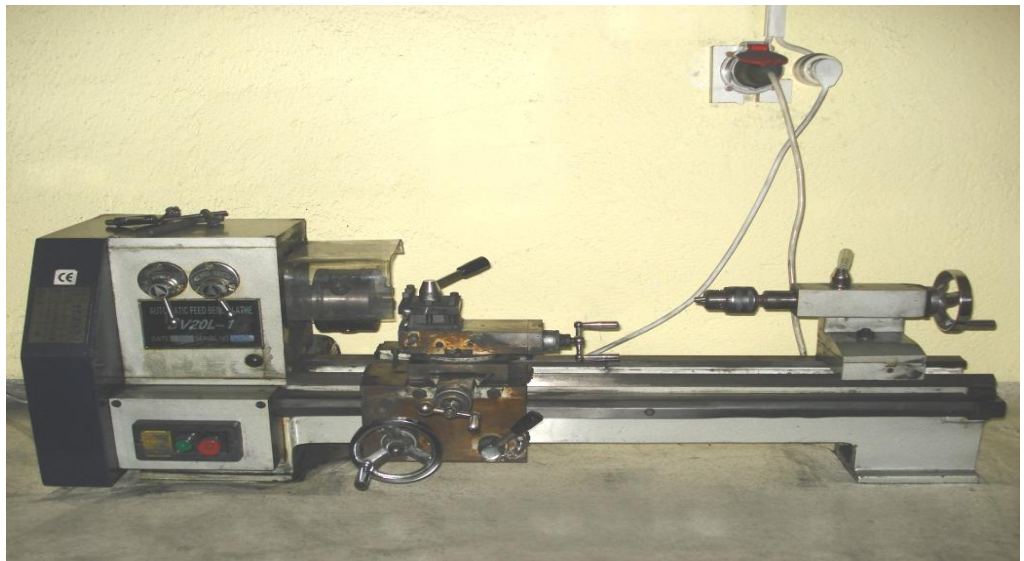
Şekil 3.8. de fotoğrafı görülen pota, huni ve numune kalıbı gibi malzemelerin yapımı için Morgan marka grafitler kullanıldı. Deneylede incelenecek olan alaşımların dökümünün yapılabilmesi amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı özel grafitten numune kalıpları hazırlandı. Numune kalıbı olarak grafit kullanmamızın sebebi ise ısı iletkenliğinin metallerinkine yakın olması, çoğu metal ile etkileşmeye girmemesi ve kolay işlenilebilir bir malzeme olmasıdır. Numune kalıbının fotoğrafı ve şematik gösterimi Şekil 3.9.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Grafitten yapılmış olan pota, huni ve numune kalıbının fotoğrafı [1]



Şekil 3.9. Lineer ısı akış tekniğinde kullanılan numune kalıbının (a) Fotoğrafı, (b) Şematik gösterimi [1]



Şekil 3.10. Numune kalıbı yapımında kullanılan küçük torna tezgahı [117]

Numune kalıbı silindirik boru şeklinde tek parçadan oluşmaktadır. 12 mm çapa ve 250 mm uzunluğa sahip grafit çubuklar Şekil 3.10.'da gösterilen tornada işlenmektedir. Grafit kalıplar iç çapı 8 mm, dış çapı 12 mm ve boyu 50 mm olacak şekilde hazırlandı. Alümina tüp için kalıbın alt kısmında çapı 1.2 mm olan bir delik açıldı.

33 mm uzunluktaki alümina tüplerin bir ucu oksijen kaynağıyla kapatılırken bir ucu açık bırakıldı. Alümina tüpün kapalı ucundan itibaren 30 mm'lik kısmı numune kalıbının içine yerleştirildi ve döküm esnasında sızıntı olmaması için silikonla kapatıldı ve kuruması beklendi. Numune kalıbının üzerine rahat döküm yapabilmek için 30 mm çapında, 40 mm boyunda bir huni Şekil 3.11.'de gösterildiği gibi numune kalıbının üzerine yerleştirildi.

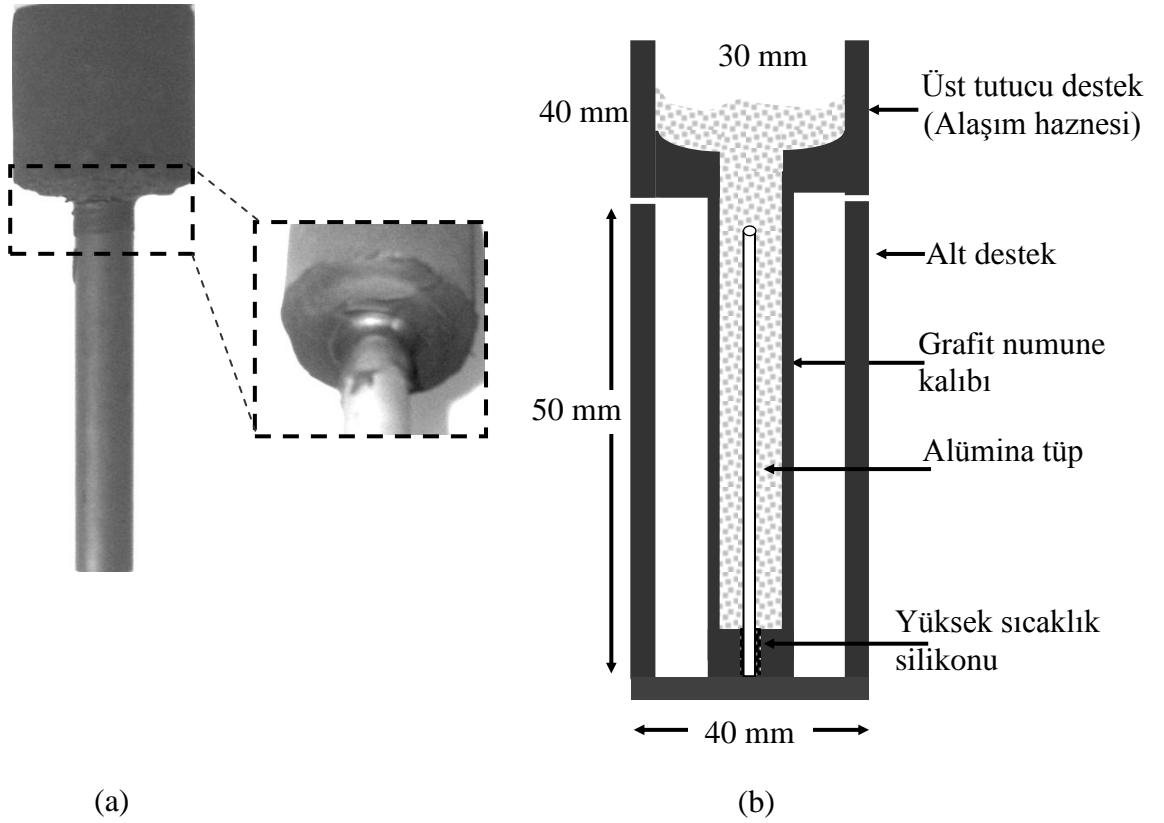


Şekil 3.11. Numune dökümünde kullanılan huni [1]

3.3.2. Numune kalıbının döküm fırınına yerleştirilmesi ve dökümün yapılması

Şekil 3.12.'de gösterildiği gibi hazırlanan numune kalıbı boş bir grafit potanın içine yerleştirilir. Boş potaya yerleştirilen numune kalıbı iki tel ile bağlanarak kalıbın döküm fırınının içine rahatça girip çıkarılması sağlanır. Bu tel yardımıyla numune kalıbı döküm fırınının içerisine yerleştirilir. Böylece numune kalıbımız döküme hazır hale getirilir.

İncelenecek olan alaşımların bileşim oranları faz diyagramı yardımıyla tespit edildi (EK. 1).Grafit potanın içerisi iyice temizlenerek erime sıcaklığı düşük olan metal alta, yüksek olan metal ise üste gelecek şekilde potaya yerleştirilmelidir. Pota bir tel yardımıyla vakumlu eritme fırınına indirilerek vakumlu eritme fırını ısıtılır. Eritilen metaller grafit karıştırıcı ile karıştırılarak alaşımın homojen olması sağlanır.

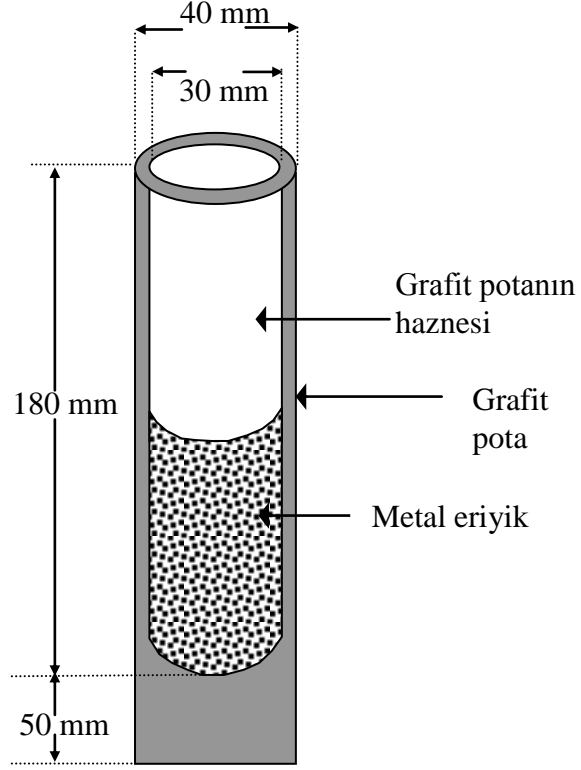


Şekil 3.12. (a) Numune potası ve üst desteğin silikon yapıştırıcı ile birleşiminin fotoğrafı, (b) Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi [119]

Sıvı haldeki alaşım, vakumlu eritme fırınından tel yardımıyla çıkarılarak maşa ile sıkıca tutulup katılaşmaya meydan vermemek için hızlı bir şekilde döküm fırınına yerleştirilen numune kalıbına huni yardımıyla dökülür. Şekil 3.13.'te vakumlu eritme fırınında alaşımı oluşturacak metalleri eritmede kullanılan grafit pota görülmektedir.

İnce bir grafit çubuk ile sıvı alaşım tekrar karıştırılarak numune kalıbı içerisinde olabilecek hava kabarcıklarının dışarıya çıkması sağlanır. Döküm fırınının alt ısıtıcısı kapatılır, üst ısıtıcı çalışır haldeyken numune kalıbının altında bulunan soğutma kazanından su geçirilerek tek yönlü katılaştırma başlatılır. Tek yönlü katılaştırmanın amacı numune kalıbının hiç boşluk kalmayacak şekilde tamamen doldurulmasıdır. Katılma esnasında boşlukların oluşmaması ve numunenin üstten katılmasını önlemek için alaşım grafit çubukla sık sık karıştırılır. Katılma tamamlandıktan sonra üst ısıtıcı da kapatılarak fırının soğuması beklenir. Fırın tamamen soğuduktan sonra dökümü yapılan numune fırından çıkarılır ve huni kısmı ayrılır. Böylece, katılan ve

simetrik hale gelen numuneler grafit kalıplardan çıkarılır ve 30 mm standart uzunlukta kesilir ve lineer ısı akış sistemine yerleştirilmeye hazır hale getirilir.



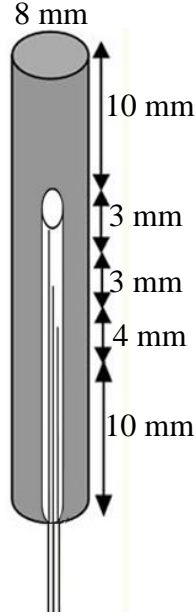
Şekil 3.13. Grafiten yapılmış potanın şematik gösterimi [1]

3.3.3. Numunenin lineer ısı akış sistemine yerleştirilmesi

30 mm uzunluktaki numunenin 10 mm uzunluktaki her iki ucu sıkıca soğuk ve sıcak bakır numune tutucu tabakalardaki iki deliğin içine yerleştirildi. Böylece numune içinde doğrusal bir sıcaklık gradyenti elde etmek ve radyal ısı kaybını önlemek için ısıtıcı ve soğutucu sistemler arasında 10 mm' lik bir kısım açıkta kaldı. Bakır tabakalar sonra soğutucu ve ısıtıcı sistem içine yerleştirildi. Sonrasında, ısıl çiftler Şekil 3.7.'de olduğu gibi soğutucu sistemdeki 3 mm lik boşluğa yerleştirildi Numunenin farklı üç bölümündeki sıcaklık, Şekil 3.14.'da gösterildiği gibi hazırlanan numune içine yerleştirilen ısıl çiftlerle ölçüldü.

Burada termal çiftler hakkında genel bir bilgi vermek faydalı olacaktır. Termal çiftler fırınların ve ısıtılan maddelerin sıcaklıklarının hassas bir biçimde ölçülmesinde ve sıcaklık kontrolü yapan aletlerde kullanılır. Termal çift; iki farklı iletken telden oluşan ve sıcaklık ölçümünde kullanılan iletken tel çiftidir. En yaygın kullanılan termal çiftler

Chromel – Alümel (K tipi) ve Platin – Platin %13 Rodyum (R tipi) termal çiftlerdir. Düşük sıcaklıklarda K tipi termal çiftlerinin, yüksek sıcaklıklarda ise R tipi termal çiftlerinin kullanılması daha uygundur [118].

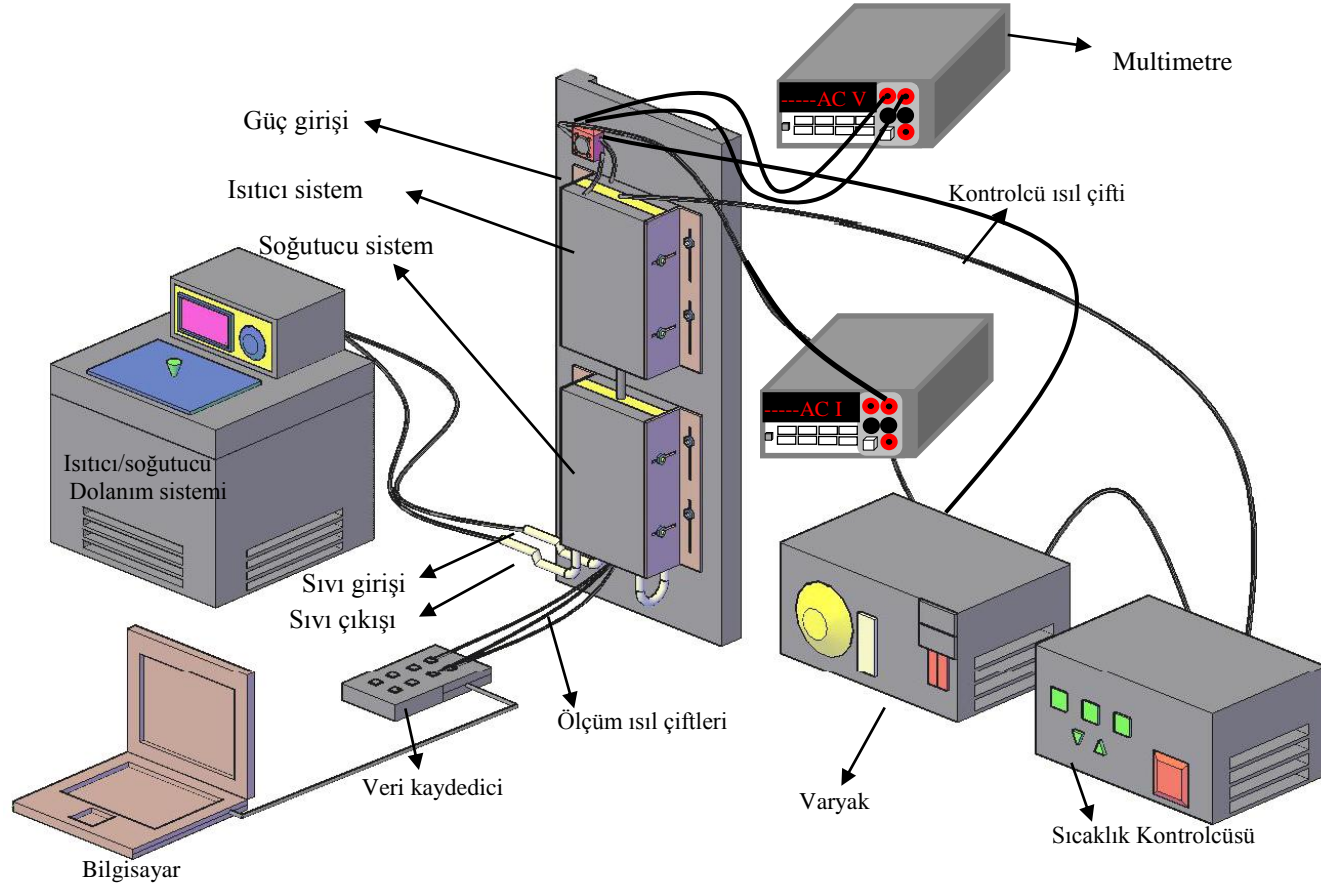


Şekil 3.14. Numunenin ve ısı çiftlerinin konumlarının şematik çizimi [1]



Şekil 3.15. Numunelerin ölçümünde kullanılan R tipi termal çiftler [117]

Üç ısı çifti 2–3 mm aralıklarla yerleştirilip ve ölçüm esnasında kaymamaları için bantla masaya sabitlendi. Isıtıcı ve soğutucu sistemler aralarında 10 mm olacak şekilde bir metal tabaka üzerine yerleştirildikten sonra metal tabaka, ısı iletimi üzerine konveksiyon etkisini azaltmak ve numune içine doğru sabit bir doğrusal sıcaklık gradyenti elde etmek için, ısıtıcı sistem üstte soğutucu sistem altta olacak biçimde Şekil 3.16.de gösterildiği gibi düşey olarak sabitlendi.



Şekil 3.16. Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü [1]

Isıl çiftleri numune içine yerleştirmeden önce, ısıl çiftler arasındaki uzaklığı (ΔX) ölçmek için ısıl çiftlerin konumlarının optik mikroskopla fotoğrafları alındı. Sonra bütün ısıl çiftler birlikte dış çap 1.2 mm \times iç çap 1.0 mm \times uzunluk 20 mm ebatlarındaki alümina tüplerin içine yerleştirildi ve daha sonra ısıl çiftlerin uçları veri kaydedici (data logger) ve bilgisayardan oluşan ölçme ünitesine bağlandı.



Şekil 3.17. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan sıcaklık kaydedicisi [117]

3.3.4. Lineer ısı akış sisteminde bir deneyin yapılışı

Isıl iletkenlik katsayısının hassas bir şekilde ölçülebilmesi sıcaklık kontrolünün çok iyi olmasıyla mümkündür bu yüzden ısıtıcı sistemin sıcaklığı ± 0.01 K hassasiyetle Eurotherm 2604 tipi sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilir ve soğutucu sistemin sıcaklığı ise ± 0.01 K hassasiyetle Poly Science digital 9702 model ısıtma/soğutma dolaşım banyosu ile sabit tutulur. Numune her sıcaklık için en az yaklaşık iki saat boyunca kararlı halde tutulur. Hareketsiz ısıl çiftlerin sıcaklıkları *Pico TC-08* veri-kaydedici ile ısıtma boyunca kaydedilir ve iki ısıl çift arasındaki sıcaklık farkı ΔT veri-kaydedici kayıtlarından okunur. Potansiyel farkı ve akım AC olarak *Hewlett-Packard 34401-A* tipi multimetre ile ölçülür ve not edilir. Deneye başlamadan önce soğutucu Poly Science digital 9702 model ısıtma/soğutma dolaşım banyosu açılarak 278 K sıcaklıkta soğutucu sistemin sıcaklığı sabitlendi. Isıtıcı sisteme güç

sağlayan varyak en düşük seviyesinde açılıp yavaş yavaş ısıtıldı. Isıtıcı sistem kontrolcüsünde set sıcaklığı 313 K olarak ayarlandı ve sabit bir sıcaklık gradyenti için sistemin kararlı hale gelmesi beklendi. Kararlı hale gelince veri-kaydedici ile 3 farklı noktanın sıcaklıkları ölçülerek kaydedildi. Benzer şekilde numune 20 K adımlarla malzemenin erime sıcaklığının 10 K altına kadar bir tarafından ısıtıldı ve böylece alaşımların ısı iletkenlikleri lineer ısı akış sistemi ile sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü.

3.3.5. Metalografik işlemler

Isıl iletkenlik katsayısının ölçümünden sonra numunelerin kesilmesi, zımparalanması, kalıplanması, parlatılması, ultrasonik temizlenmesi ve dağlanması gibi metalografik işlemler sonunda, açığa çıkan fazların fotoğrafları dijital kamera monte edilmiş optik ışık mikroskobundan oluşan görüntü sistemi vasıtasıyla çekildi.

3.3.5.1. Numunelerin kesilmesi

Metal numuneleri istenilen boyutlara kesmede *Struers Minitom* kesme aleti ve 127 mm çaplı, 0.4 mm kalınlığında *Struers* elmas kesici kullanıldı. Kesilen numuneler soğuk kalıplama yöntemi kullanılarak epoksi-resin ile kalıplandı. Numunenin boyutlarına uygun, plastikten yapılmış kalıplar içine numuneler yerleştirildi. Numune, üzerine kalıplama için hazırlanan epoksi-resin karışımının dökülmesi esnasında kaymaması için sabitlendi. Epoksi ve sertleştirici 7/1 oranında karıştırılarak kalıba döküldü ve sertleşmeye bırakıldı. Epoksi-resin yaklaşık 8 saat içerisinde sertleşti. Bu süre sonunda kalıp etrafındaki plastik çıkartılarak zımparalamaya hazır hale getirildi.

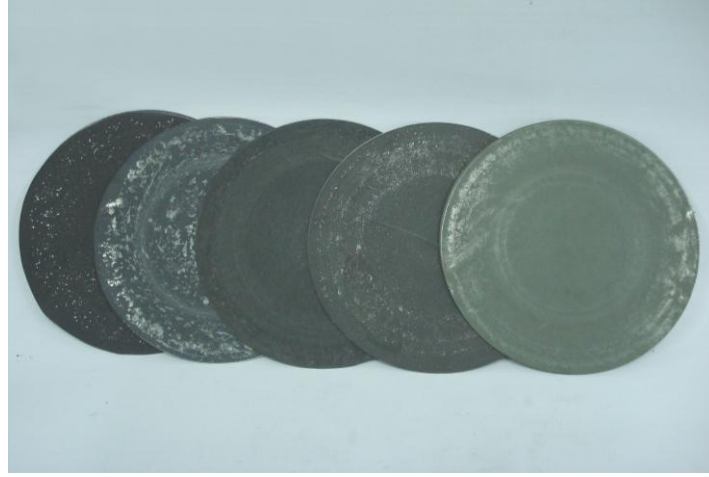


Şekil 3.18. Epoksi-resin ile kalıplanmış numuneler

3.3.5.2. Numunelerin zımparalanması

Numunelerin zımparalanması silisyum karbür (SiC) taneleri ve magnetit tozu içeren zımpara kâğıtlarıyla yapıldı. Zımpara kâğıtlarında birim alana düşen tane sayısı (grid) arttıkça mikron cinsinden tane boyutu azalmaktadır. 120-600 gridler kaba, 800-2000 gridler ise ince zımpara olarak sınıflandırılmaktadır.

Numuneler, 120 gridlik zımpara kâğıdından başlayarak 2000 gride kadar, kabadan inceye doğru kademeli olarak zımparalandı. Numunelerin zımparalanmasında kullanılan bazı zımpara kâğıtlarının fotoğrafı Şekil 3.19.'da verilmektedir [117].



Şekil 3.19. Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kâğıtları

3.3.5.3. Numunelerin parlatılması

Zımparalama ve parlatma işlemleri *Struers TegraPol-15* tipi otomatik parlatma robotu ile yapıldı. Otomatik parlatma robotunun fotoğrafı Şekil 3.20'de verildi. Öncelikle parlatma robotun disklerine farklı tane büyüklüklerine sahip zımparalar takıldı. Cihazın su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapması sağlandı. Böylelikle numunenin hem ısınması engellendi hem de homojen bir temas sağlandı.

Zımparalamanın düzgün ve itinalı yapılması fotoğraf çekmede odaklama kolaylığı sağlamaktadır. Her bir zımparalama kademesinden sonra numune yüzeyinin düz olmasına ve derin çiziklerin giderilmiş olmasına dikkat edildi. Daha sonra dönüş hızı ve baskı basınç değeri ayarlanabilen otomatik parlatma robotunun disklerine, parlatılacak

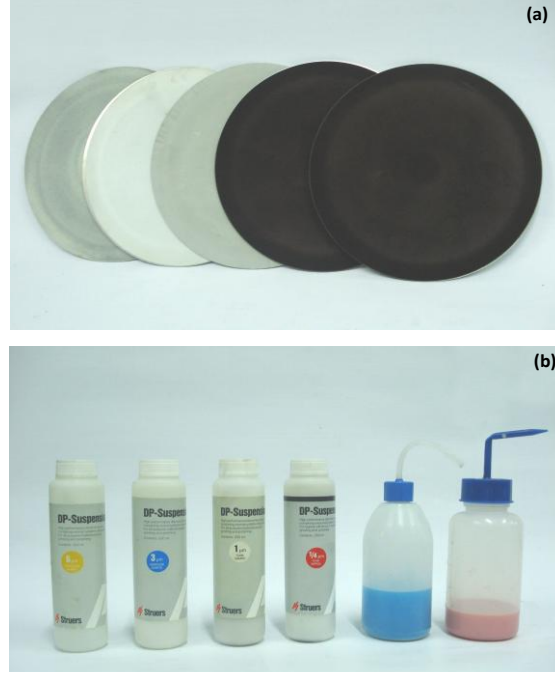
numuneye uygun parlatma kumaşları takıldı. Kaba ve ince parlatma için farklı tane büyüklüğüne sahip elmas süspansiyonlar kullanıldı.

Parlatma işleminde kullanılan elmas süspansiyonlar sırasıyla 6 μm , 3 μm , 1 μm , 0.25 μm ve 0.05 μm tane büyüklüğüne sahip elmas çözeltilerdir. Parlatma sırasında her bir elmas süspansiyon için ayrı metal diskler üzerine yapıştırılmış parlatma kumaşları kullanıldı. Numune ile parlatma kumaşı arasında yumuşak bir temas sağlamak ve nem miktarını ayarlamak amacıyla parlatıcı ile birlikte *Struers Depif* yağlayıcı (lubrikant) kullanıldı. Parlatma sırasında disk dönerken nem azaldıkça, numune yüzeyine parlatıcı çözeltiler yapışabilmekte ve yüzeyde leke oluşturabilmektedir. Disk üzerindeki kumaşın kurumaması için zaman zaman çözelti veya yağlayıcı ilavesi yapıldı.



Şekil 3.20. Otomatik parlatma robotu

6 μm , 3 μm ve 1 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken numune üzerine her numunede farklı olmak üzere kuvvet (20-50 N) uygulandı. 0.25 μm ve 0.05 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken uygulanan kuvvetin büyüklüğü azaltıldı. Numuneler her bir çözelti ile ortalama 10-15 dakika parlatıldı. Parlatma sırasında elmas çözeltinin disk üzerinde homojen dağılmasına dikkat edildi. Her aşama sonunda numune bol damıtık su ile yıkandı. Numunelerin parlatılmasında kullanılan parlatma kumaşları ve parlatma süspansiyonları Şekil 3.21'de verilmektedir.



Şekil 3.21. Numunelerin parlatılmasında kullanılan a) kumaşlar b) süspansiyonlar

Artık numune yüzeyi dağlanmaya hazır duruma gelmiştir. Tablo 3.1’de bu çalışmada kullanılan çözelti ve kumaşların özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.1. Parlatmada kullanılan çözelti ve kumaşlar

Çözeltinin Tane Büyüklüğü	Çözeltinin Özelliği	Parlatma Kumaşı	Kullanılan Yağlayıcı
6 μm	Struers Elmas Çözelti Monokristal, Samex	Struers Polifloc3 200 mm çapında	Struers Depif Mavi renkli
3 μm	Struers Elmas Çözelti Monokristal, Samte	Struers Polifloc3 200 mm çapında	Struers Depif Mavi renkli
1 μm	Struers Elmas Çözelti Monokristal, Samno	Struers Polifloc3 200 mm çapında	Struers Depif Mavi renkli
0.25 μm	Struers Elmas Çözelti Polikristal, Sapuq	Struers Policel2 200 mm çapında	Struers Depif Mavi renkli
0.05 μm	Struers Alümina Çözelti	Struers Policel2 200 mm çapında	Damıtık Su

Her malzemenin parlatılması birbirinden farklılıklar gösterebilmektedir. Yumuşak malzemenin parlatılması sürecinde malzemenin taneleri parlatılan yüzeye yapışarak yapıyı kapatmaktadır. Dolayısıyla her bir parlatma kademesinde yüzeyde oluşan tabakanın temizlenmesi gerekmektedir. Sert malzemelerde ise parlatma esnasında üzerine oldukça yüksek (50 N) bir kuvvet uygulamak gerekmektedir.

3.3.5.4. Numunelerin dağlanması

Her ne kadar parlatma sonucunda numunenin yüzeyi düzgün, pürüzsüz ve ayna gibi parlak olsa da numune yüzeyinde kontrast oluşturmadan inceleme yapmak mümkün değildir. Mikroyapı analizi için numunenin dağlanması gerekmektedir. Dağlama sonucunda mikroyapı karakteristikleri ortaya çıkarılır. Metalografide iki çeşit dağlama vardır: elektrolitik dağlama ve kimyasal dağlama. Elektrolitik dağlama ile yüzeyden atom tabakaları atılır. Bunun için belirli bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji, ısı veya yüksek voltaj uygulanarak sağlanabilir. Kimyasal dağlama ise numunenin yüzeyine uygun bir çözelti uygulanarak yapılmaktadır. Dağlama işleminde en önemli nokta metalik malzeme için uygun dağlama çözeltisini seçmektir [117].

Bu çalışmada, numunelerin fazlarını ortaya çıkarmak için numune yüzeyine uygun bir reaktif tespit edilerek kimyasal dağlama tekniği uygulandı. Kimyasal dağlama işlemi; yüzeyi istenen kalitede temizlenmiş ve pürüzsüz hale getirilmiş numunenin, dağlama çözeltisine uygun sürelerde daldırılmasıyla yapılmaktadır. Dağlama işlemi sonunda parlatılmış yüzey, çözeltinin etkisiyle renk değiştirir ve donuklaşır. Dağlamanın yeterli olup olmadığına mikroskopla numuneye bakılarak karar verilir. Bu çalışma da Bi-12 ağ. % In, Bi- 15 ağ. % In, Bi-35.4 ağ. % In, Bi-45 ağ. % In, Bi- 47.6 ağ. % In, Bi- 53 ağ. % In, Bi- 62 ağ. % In alaşımları için metalografi kitaplarından faydalanarak uygun dağlayıcı çözeltileri hazırlandı. Çalışılan alaşım sistemleri ve bu alaşım sistemlerine uygun dağlama çözeltileri ve dağlama süreleri Tablo 3.2’te verildi.

Tablo 3.2. İkili intermetalik alaşımlara uygulanan dağlayıcılar

Alaşım Sistemi	Dağlama Çözeltisi	Dağlamanın Uygulanması
Bi-% 12 ağ.In Bi-% 15 ağ.In Bi-% 35.4 ağ.In	20 ml. Hidrojen klorür 4 gr. Picric Asit 400 ml. Etanol	İşlem: Oda sıcaklığında çözeltiye daldırma Süre: 5-10 s.
Bi-% 45 ağ. In Bi-% 47.6 ağ.In Bi-% 53 ağ.In Bi-% 62 ağ.In	1.3 gr. Potasyum Dikromat 4.3 ml. Sülfirik Asit 2.7 ml. Sodyum klorür 17.7 ml. Hidrojen florür 8.8 ml. Nitrik Asit 66.3 ml. Su	İşlem: Oda sıcaklığında çözeltiye daldırma Süre: 5-10 s.

3.3.6. Fazların belirlenmesi

Üretilen her bir numuneden kesitler alınıp soğuk kalıplama yöntemiyle kalıplandıktan sonra metalografik işlemlere tabi tutuldu ve uygun dağlayıcılarla dağlandı. Üretilen her bir numunenin fotoğrafları farklı büyüklükteki objektiflerle *ASUS Dizüstü* bilgisayar bağlantılı *Olympus DP12* tipi dijital kamera monte edilmiş *Olympus BX51* tipi optik ışık mikroskobundan oluşan görüntü sistemi vasıtasıyla çekildi. Görüntü sisteminin fotoğrafı Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22. Optik mikroskop ve CCD kameradan oluşan görüntü sistemi [117]

Her bir numune için dağlamanın yeterli olduğu optik mikroskopta gözlendikten sonra *SEM* görüntüleri ve *EDX* analizi için hazırlandı.

3.3.7. Elektriksel özdirenç/ iletkenlik değerlerinin ölçülmesi

Hazırlanan her bir alaşımın elektriksel özdirenç/ iletkenlik değerlerinin ölçümünde dört nokta iletkenlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Ölçümler için *Keithley 2400* marka programlanabilir güç kaynağı, *Keithley 2700* marka multimetre ve *Protherm* marka kül fırından faydalanılmıştır (Şekil 3.23).

Ölçümlerde gümüş tellerin numunelere doğrudan teması (kontak) sağlandı. Ölçümler, her bir numune için oda sıcaklığından başlayıp erime sıcaklığına yakın değere kadar 5 saniyede bir kez olmak üzere 50 defa ölçüm alınarak yapıldı.



Şekil 3.23. Elektriksel özdirenç/iletkenlik ölçüm düzeneği

Bu çalışmada Bi- 12 ağı. % In, Bi- 15 ağı. % In, Bi- 35.4 ağı. % In, Bi- 45 ağı. % In, Bi- 47.6 ağı. % In, Bi- 53 ağı. % In, Bi- 62 ağı. % In alaşımlarının katı fazlarının ısı iletkenliklerinin ölçümünde lineer ısı akış sistemi kullanıldı. Faz diyagramları yardımıyla alaşımı oluşturan malzemelerin oranları belirlendi, hesaplanan miktarlarda malzemeler vakumlu eritme fırınında eritildi ve dökümleri yapıldı. Her bir alaşımdan meydana gelen çubuk numune lineer ısı akış sistemine yerleştirilerek gerekli ölçümler alındı. Daha sonra her bir alaşımın elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklıkla değişimi ölçüldü. Fazların kimyasal bileşim tayini için *SEM* ve *EDX* analizleri yapıldı. Alınan değerler, yapılan hesaplamalar, grafikler ve fotoğraflar 4. bölümde ayrıntılı olarak anlatıldı.

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Giriş

Bu tez çalışmasında In-Bi alaşımına ait intermetalik fazların ısı iletkenlikleri ölçüldü. Alaşımların katı fazlarının ısısal iletkenlikleri, sıcaklığa bağlı olarak lineer ısı akış sistemi kullanılarak ölçüldü. Aynı malzemelere ait ısısal sıcaklık katsayıları da, ısısal iletkenliğin sıcaklığa göre değişim grafiklerinden belirlendi. Ayrıca ısı iletkenliğe fonon ve elektronlardan gelen katkılar hesaplandı. Bunun yanı sıra, her bir intermetalik alaşım için elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi ölçülerek elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla değişim grafikleri çizildi. Ayrıca intermetalik alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri sonucunda fazların kimyasal bileşim analizleri yapıldı.

Bu bölümde, ölçülen parametreler ayrıntılı bir şekilde izah edildi, deneysel ölçümlerin hata analizleri yapıldı ve elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla mukayese edildi.

4.2. Alaşımların Isıl İletkenliğinin Ölçümü

Katı fazdaki alaşımların ısısal iletkenliklerinin bulunmasında kullanılacak birçok metot bulunmaktadır bunlar arasında en yaygın tekniklerden birisi lineer ısı akış metodudur.

Bu tez çalışmasında Bi-12 ağı. % In (Bi_4In), Bi-15 ağı. % In (Bi_3In), Bi-35.4 ağı. % In (BiIn), Bi-45 ağı. % In (Bi_2In_3), Bi-47.6 ağı. % In (Bi_3In_5), Bi-53 ağı. % In (BiIn_2), Bi-62 ağı. % In (BiIn_3) ikili alaşımlarının katı fazının ısısal iletkenliklerinin ölçümünde lineer ısı akış metodu kullanıldı. Bu metotta çubuk numune, ısı akışı aksel yönde olacak şekilde bir ucundan ısıtıcı sistemle ısıtılırken diğer ucundan da soğutucu sistem vasıtasıyla soğutulur ve numune üzerinde sabit bir sıcaklık gradyenti oluşturulur. Daha sonra numune, belirlenen sıcaklıkta kararlı hale gelmesi için beklenir. Kararlı durumda numune üzerindeki farklı noktalara ait sıcaklıklar zamana bağlı olarak sıcaklık kaydedicisi yardımıyla bilgisayar kaydedilir. Numune içindeki termal çiftlerin konumlarının üstten görünüşü ve termal çiftlerin boyuna konumları Şekil 3.16.'da

gösterildi. Bu çalışmada ısı iletkenliği ölçmek için kullandığımız numune kalıbının şematik gösterimi ise Şekil 3.11.'de verildi.

Lineer ısı akış sisteminde radyal, ısı kaybı veya kazancı olmadığı varsayılarak, numune üzerindeki sıcaklığın kararlı olduğu durumda ısı iletkenlik tek boyutlu Fourier-Biot ısı iletim denklemi,

$$K = -\frac{Q \Delta X}{A \Delta T} \quad (4.1)$$

ile ifade edilir. Burada K katının ısı iletkenliği, Q ısı akış hızı veya numune boyunca akan güç girişi, A numunenin kesit alanı, $\Delta X = X_2 - X_1$ uzunluğu T_1 ve T_2 sıcaklıklarının ölçüldüğü noktalar arasındaki uzaklık ve $\Delta T = T_2 - T_1$ ise X_2 ve X_1 noktaları arasındaki sıcaklık farkıdır.

Bu deneysel teknikteki başlıca zorluk, çubuk numune üzerinden akan ısı akış hızının yani giriş gücünün ölçülmesiydi. Bu zorluğu aşmak için, her bir kararlı hal için numune üzerindeki Q ısı akış hızının,

$$Q = Q_{NV} - Q_{NY} \quad (4.2)$$

yani Q_{NV} ve Q_{NY} arasındaki farka eşit olduğu varsayıldı. Deneysel sistemde numune yokken (Q_{NY}) ve numune varken (Q_{NV}) verilen giriş gücü ise kararlı hal durumları altında ısıtıcının üzerindeki voltaj düşmesi ve ısıtıcıdan geçen akım ölçülerek sırasıyla

$$Q_{NY} = V_{NY} \cdot I_{NY} \quad (4.3)$$

ve

$$Q_{NV} = V_{NV} \cdot I_{NV} \quad (4.4)$$

bağıntılarından bulundu.

Eşitlik 4.1'den ısı iletkenliği tespit etmek için; numunenin kesit alanını, çubuk boyunca en az iki noktanın sıcaklığını, sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar arası uzaklığı ve giriş gücünü tespit etmek gereklidir. Kesit alanını (πr^2) tespit etmek için çubuk numunenin yarıçapı optik mikroskopla ölçüldü. Alaşımların katı fazının ısı iletkenlik katsayısının ölçümünde biri kontrolcü ve diğer üç tanesi ise sıcaklık ölçümü için olmak üzere 4 adet K tipi termal çift kullanıldı. Isıl çiftlerin sıcaklıkları *Pico TC-08*

veri-kaydedici ile bilgisayara aktarılarak ısıtma boyunca kaydedildi ve iki ısı çift arasındaki sıcaklık farkı ΔT veri-kaydedici kayıtlarından tutuldu. İki ısı çift arasındaki uzaklık ısı çiftlerin konum fotoğrafından ölçüldü.

Her bir kararlı hal sıcaklığında en az iki saat beklenilerek *Hewlett Packard 34401-A* model multimetre ile ısıtıcı sistem üzerindeki potansiyel düşüşü ile ısıtıcıdan geçen akım ölçüldü ve güç girişi hesaplandı.

Isınma boyunca arzu edilen bütün ölçümler tamamlandıktan sonra, oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi aynı adımlarla devam edildi. Numune daha sonra lineer ısı akış sisteminden çıkarıldı. Numunenin boyuna kesiti, ölçümlerde hataya sebep olmayacağından emin olmak için gözeneklilik, çatlaklık ve döküm hataları açısından incelendi.

Tablo 4.1.'de deneysel sistemin hata payının tespitinde kullanılan alüminyum çubuk numuneye ait deneysel veriler görülmektedir.

Tablo 4.1 Farklı sıcaklıklarda alüminyum çubuk numune üzerindeki güç akışını tespit etmek için tipik deneysel veriler.

Sıcaklık (K)	I_{NY} (A)	V_{NY} (V)	Q_{NY} (W)	I_{NV} (A)	V_{NV} (V)	Q_{NV} (W)	$Q=Q_{NV}-Q_{NY}$ (W)
313	0.77	7.59	5.87	0.95	9.0	8.55	2.68
353	1.39	13.04	18.12	1.57	14.65	23.00	4.89
393	1.95	19.34	37.71	2.29	19.90	45.20	7.49
433	2.35	23.50	55.23	2.68	26.80	65.00	9.78
473	2.88	29.62	85.32	3.25	32.15	99.00	13.68
513	3.28	33.35	109.46	3.61	36.25	124.50	15.04

I_{NY} : Numune yokken ısıtıcıdan geçen akım,

I_{NV} : Numune varken ısıtıcıdan geçen akım,

V_{NY} : Numune yokken ısıtıcının uçları arasındaki potansiyel düşüşü,

V_{NV} : Numune varken ısıtıcının uçları arasındaki potansiyel düşüşü,

Q_{NY} : Numuneye yokken ısıtıcıya verilen güç girişi,

Q_{NV} : Numuneye varken ısıtıcıya verilen güç girişi,

Bi-12 ağ. % In, Bi-15 ağ. % In, Bi-35.4 ağ. % In, Bi-45 ağ. % In, Bi-47.6 ağ. % In, Bi-53 ağ. % In, Bi-62 ağ. % In alaşımları için yapılan DSC analizlerine göre her bir

alaşımın erime sıcaklığı sırasıyla 385.78 K, 384.61 K, 387.24 K, 368.27 K, 368.11 K, 367.06 K, 349.03 K civarındadır. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi eşitlik 4.1'den, Q , ΔX , A ve ΔT ölçülen değerleri kullanılarak tespit edildi. İntermetalik alaşımlar için deneysel veriler kaydedildi ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen ısıl iletkenlik değerleri Tablo 4.2.'de verildi.

Tablo 4.2. İntermetalik alaşımları için ısıl iletkenliğin sıcaklıkla değişiminden elde edilen deneysel veriler

Bi-12 ağı. % In				Bi-15 ağı. % In			
T (K)	Q (W)	ΔT (K)	K(W/Km)	T (K)	Q (W)	ΔT (K)	K(W/Km)
313	1.41	5.01	16.84	313	1.71	5.63	18.18
333	2.02	7.64	15.76	333	2.66	9.02	17.62
353	2.69	10.24	15.70	353	3.72	12.82	17.31
373	3.37	13.06	15.41	373	4.72	16.99	16.58

Bi-35.4 ağı. % In				Bi-45 ağı. % In			
T (K)	Q (W)	ΔT (K)	K(W/Km)	T (K)	Q (W)	ΔT (K)	K(W/Km)
313	1.15	2.57	26.75	313	1.85	3.63	30.44
333	1.48	3.89	22.73	333	2.74	5.60	29.24
353	1.86	5.12	21.67	353	3.57	7.57	28.16
373	1.96	5.57	20.97	363	4.09	9.57	25.49

Bi-47.6 ağı. % In				Bi-53 ağı. % In			
T (K)	Q (W)	ΔT (K)	K(W/Km)	T (K)	Q (W)	ΔT (K)	K(W/Km)
313	1.58	3.13	30.12	313	2.84	4.77	35.57
333	2.07	4.38	28.27	333	3.78	6.57	34.34
353	2.41	5.30	27.20	353	4.31	7.83	32.91

Bi-62 ağı. % In			
T (K)	Q (W)	ΔT (K)	K(W/Km)
313	2.65	3.69	42.88
333	3.69	5.58	39.52
343	4.75	7.66	37.04

Bu verilerden faydalanılarak In-Bi intermetalik alaşımların ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklığa göre değişim grafikleri çizildi. Bu çalışmada alaşımlara ait ölçülen ısı iletkenlik değerleri saf Bi [120] ve saf In [115] metallerinin ısı iletkenlik değerleri ile karşılaştırılarak ısı iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişim eğrileri Şekil 4.1. de gösterildi. Şekil 4.1.'den görüleceği üzere ısı iletkenlik değeri sıcaklık arttıķa azalmaktadır.

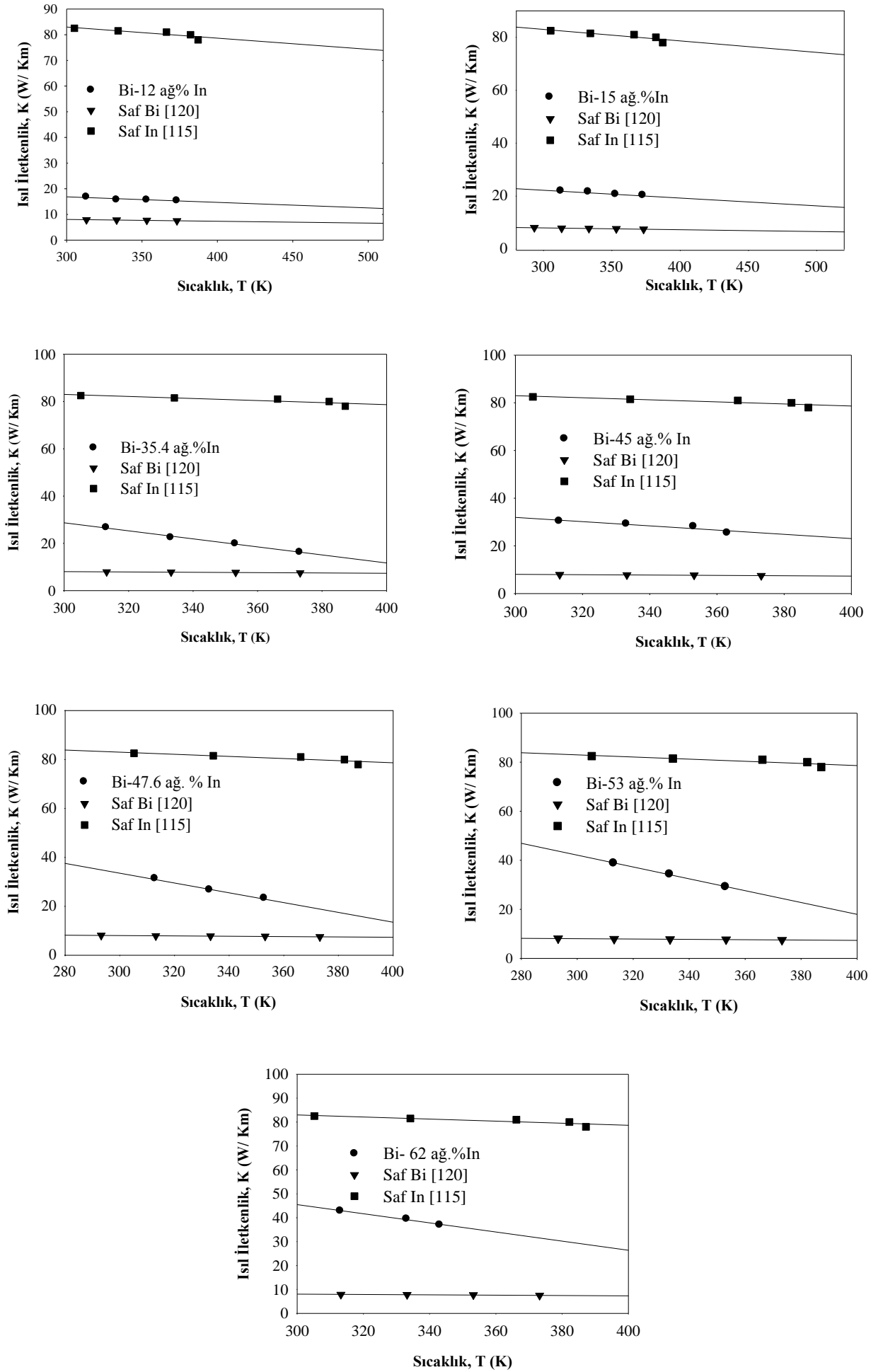
4.3. Alaşımların Elektriksel İletkenliğinin lm

Elektriksel iletkenlik ve özdirenç (dirençlilik) bir malzemenin karakteristik özelliğidir. Malzemelerin zdirenlerinin belirlenebilmesi için numune içinde elektrik alan oluşturacak bir akım kaynağına, bu elektrik alan nedeniyle numune içinde meydana gelen elektrik akımının Őiddetine ve keyfi seçilen herhangi iki nokta arasında meydana gelen V potansiyel düşmesinin belirlenmesine ihtiyaç vardır.

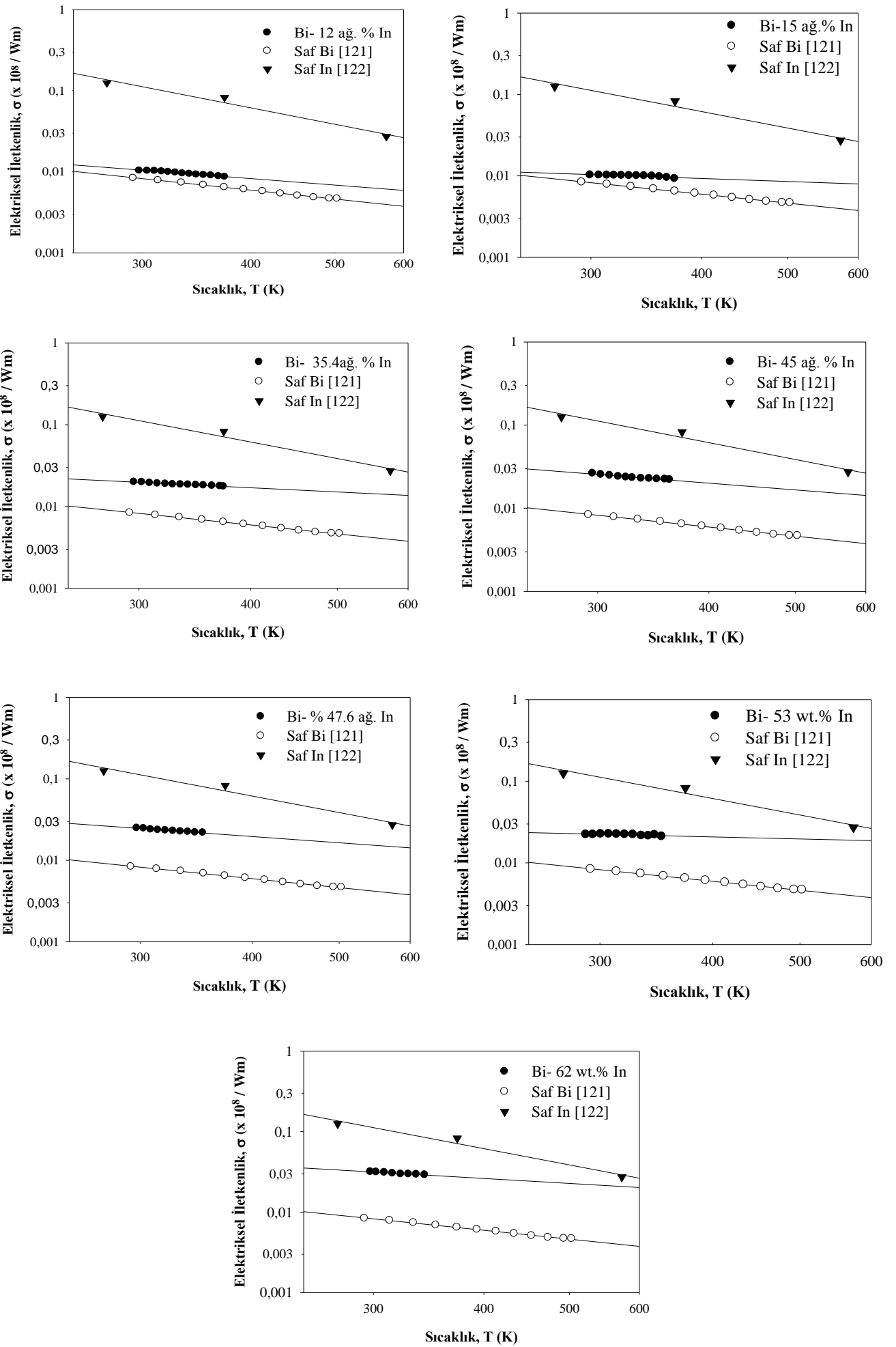
Akım ve gerilim ölçümlerinin hassas bir Şekilde yapılabilmesi için sırasıyla *Keithley 2400* model sourcemetre ve *Keithley 2700* model multimetre kullanıldı. Bir maddenin elektriksel özdirenci, maddenin üzerinden geçen I akımı ve bunun meydana getirdiği V geriliminin oranı ile bulunur. Homojen bir numunenin elektriksel özdirenci (ρ) belirlenmek istendiğinde, malzemenin geometrik özelliklerinin de bilinmesi gereklidir. Elektriksel zdiren ifadesi aşağıdaki Şekilde verilebilir:

$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (4.5)$$

Burada G ; numunenin yüzey geometrik sınırlarını ve kalınlığını, elektriksel kontakların numune üzerindeki konumlarını, kontakların diziliş düzenlerini içeren bir katsayıdır ve "*Geometrik Düzeltme Katsayısı / Faktörü*" (Resistivity Correction Factor, RCF) olarak tanımlanır. Elektriksel iletkenliğinin belirlenebilmesi için kurulan düzenekte kontaklardan ikisi numune üzerinden akan akımı ölçmek için, diğer ikisi ise herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek için kullanılır. In- Bi intermetalik alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç (iletkenlik) değerlerinin ölçümünde dört nokta iletkenlik ölçüm metodu kullanıldı. Şekil 4.2. de intermetalik alaşımın elektriksel iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla olan değişimi saf Bi [121] ve saf In [122] elektriksel iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi ile kıyaslanarak çizildi. Elektriksel iletkenlik değerleri artan sıcaklıkla azalmaktadır.



Şekil 4.1. In-Bi intermetalik alaşımlarının ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.2. In-Bi intermetalik alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

4.4. Isıl Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması

Verilen bir bileşim için katı fazın ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağılılığı doğrusaldır. Katı fazın ısısal iletkenliğinin sıcaklığa bağılı değişimini ifade eden denklem ise,

$$K_K = K_{K0} [1 + \alpha_T (T - T_0)] \quad (4.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, K_K katı faza ait T sıcaklığındaki ısı iletkenlik katsayısı, K_{K0} ise $T_0=300$ K oda sıcaklığındaki ısı iletkenlik katsayısı ve α_T ise ısı sıcaklık katsayısıdır. Denklem (4.9)'dan ısı sıcaklık katsayısını veren bağıntı,

$$\alpha_T = \frac{K_K - K_{K0}}{K_{K0} (T - T_0)} = \frac{1}{K_{K0}} \frac{\Delta K}{\Delta T} \quad (4.7)$$

olarak yazılabilir. Isıl sıcaklık katsayısının ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağılı grafiğinin eğiminden yararlanılarak Denklem (4.7)'den elde edildiği görülmektedir.

4.5. Elektriksel Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması

Katı fazın elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağılı değişimi,

$$\alpha_E = \frac{\sigma_K - \sigma_{K0}}{\sigma_{K0} (T - T_0)} = \frac{1}{\sigma_{K0}} \frac{\Delta \sigma}{\Delta T} \quad (4.8)$$

ile verilir. Burada σ_K katı fazın T sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği, σ_{K0} numunenin $T_0=300$ K oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği, α_E ise elektriksel sıcaklık katsayısını göstermektedir. Denklem (4.8)'den elektriksel sıcaklık katsayısının, Şekil 4.2'deki elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağılı grafiğinin eğiminden faydalanarak elde edildiği görülmektedir.

4.6. Isı İletkenliğe Elektron ve Fononların Katkısının Hesabı

Katılarda ısı elektronlar, fononlar, manyetik uyarı ve bazı durumlarda elektromanyetik radyasyon gibi çeşitli taşıyıcılarla iletilir. Toplam ısı iletkenlik her birinin katkısıyla oluşmaktadır. Parçacıkların ısı iletkenliği aşağıdaki ifade ile verilir.

$$K = \frac{1}{3} \sum_j c_j v_j l_j \quad (4.9)$$

Burada j taşıyıcı tipini gösterir. Birim hacimdeki ısı sığası c_j , taşıyıcıların hızı v_j , ortalama serbest yol l_j 'dir.

Metallerde başlıca ısı taşıyıcıları elektronlar ve fononlar olduğundan toplam ısı iletkenlik elektronların ve fononların katkıları toplamı olarak gösterilebilir.

$$K_{toplam} = K_e + K_f \quad (4.10)$$

Burada ısı iletkenliğe elektronların katkısı K_e , fononların katkısı K_f ile gösterilmektedir. Bir metalde elektronlar mı yoksa fononlar mı daha çok ısı akımı sağlarlar? Saf metallerde elektron katkısı tüm sıcaklıklarda daha büyüktür. Saf olmayan veya örgü kusurlu alaşımlarda elektron ortalama serbest yolu azalacağı için fonon katkısı elektronlara yakın değere çıkabilir [8]. Wiedemann-Franz kanunu metallerin ısı iletkenliğinin elektriksel iletkenliğe elektronik katkısının oranıdır ve bu oran sıcaklıkla doğru orantılıdır.

$$\frac{K_e}{\sigma} = LT \quad (4.11)$$

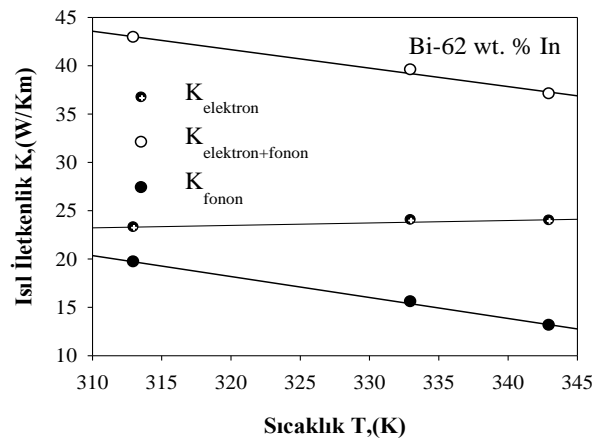
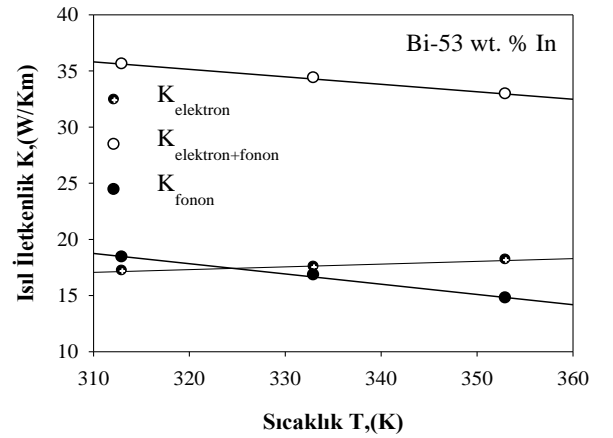
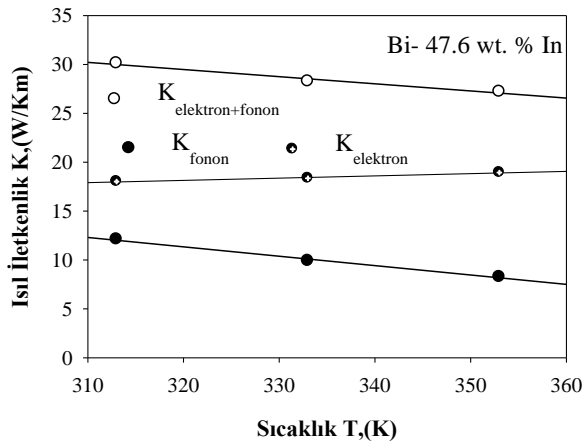
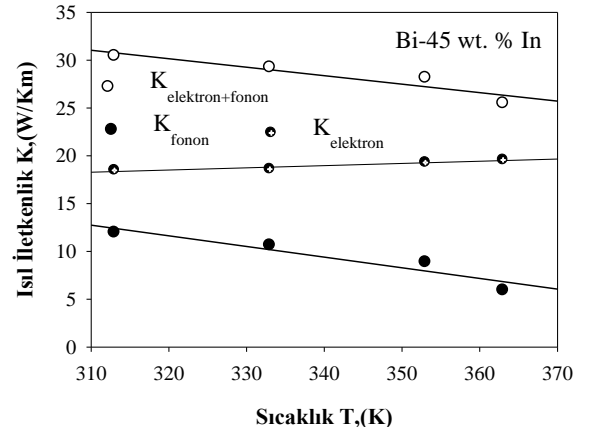
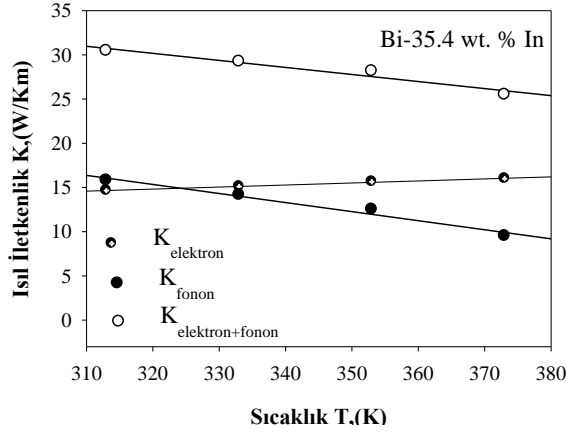
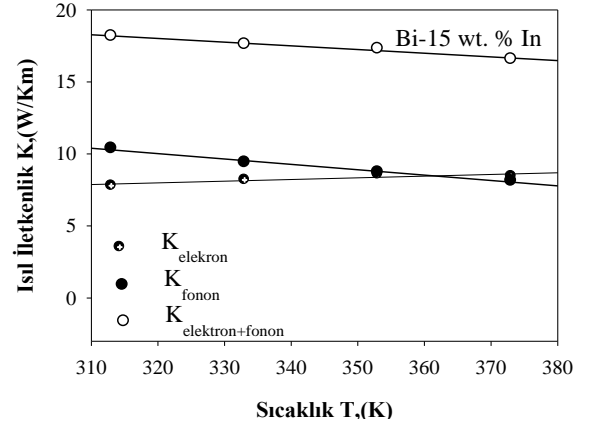
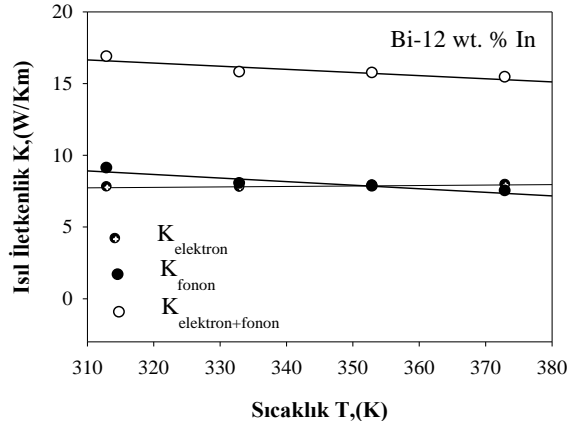
Teorik olarak Lorenz Sayısı olarak bilinen orantı sabit değeri L ile gösterilir. Değer olarak da

$$L = \frac{K}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.44 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2} \quad (4.12)$$

Alaşımların ısı iletkenliğinin ana kaynağı bilinmekte fakat pratikte bu durumu yorumlamak için yeterince bilgi yoktur. Denklem (4.9) ve (4.10)'da görüleceği gibi, eğer metallerin belirli bir sıcaklıkta ısı iletkenliği veya elektriksel iletkenliği ölçülüyor veya biliniyorsa denklem (4.9) ve (4.10) kullanılarak ısı iletkenliğe elektronların veya fononların katkısı hesaplanabilir.

Şekil 4.3. de intermetalik alaşımlarının elektron, fonon katkılarının ısıl iletkenlikleri ve toplam ısıl iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi verildi.

In-Bi intermetalik alaşımlarının katı fazlarının ısıl ve elektriksel özellikleri Tablo 4.3. gösterildi.



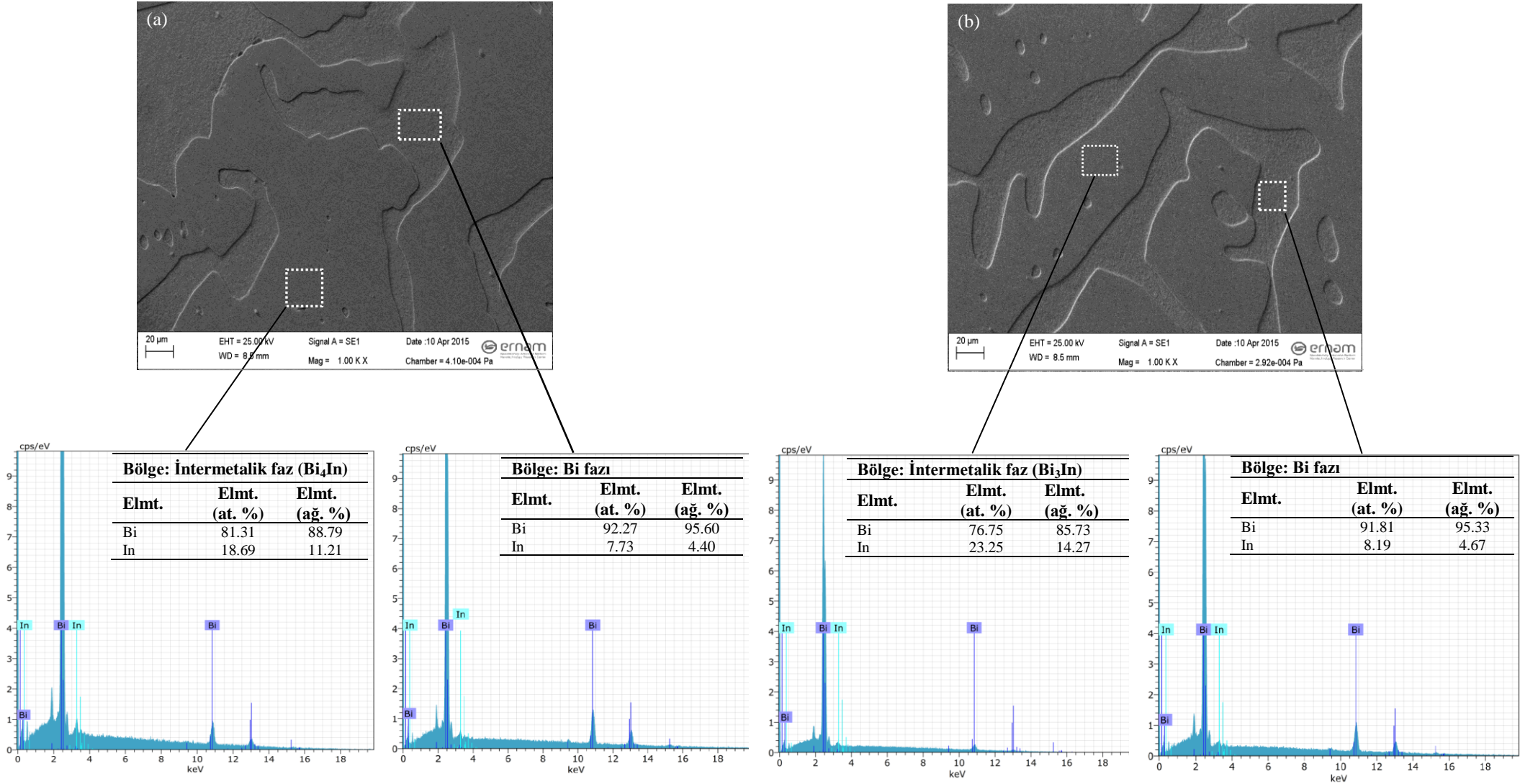
Şekil 4.3. In-Bi intermetalik alaşımlarının ısıl iletkenlik değerlerine fonon ve elektron katkılarının sıcaklıkla değişimi

Tablo 4.3. In-Bi intermetalik alaşımlarının katı fazlarının ısı ve elektriksel özellikleri

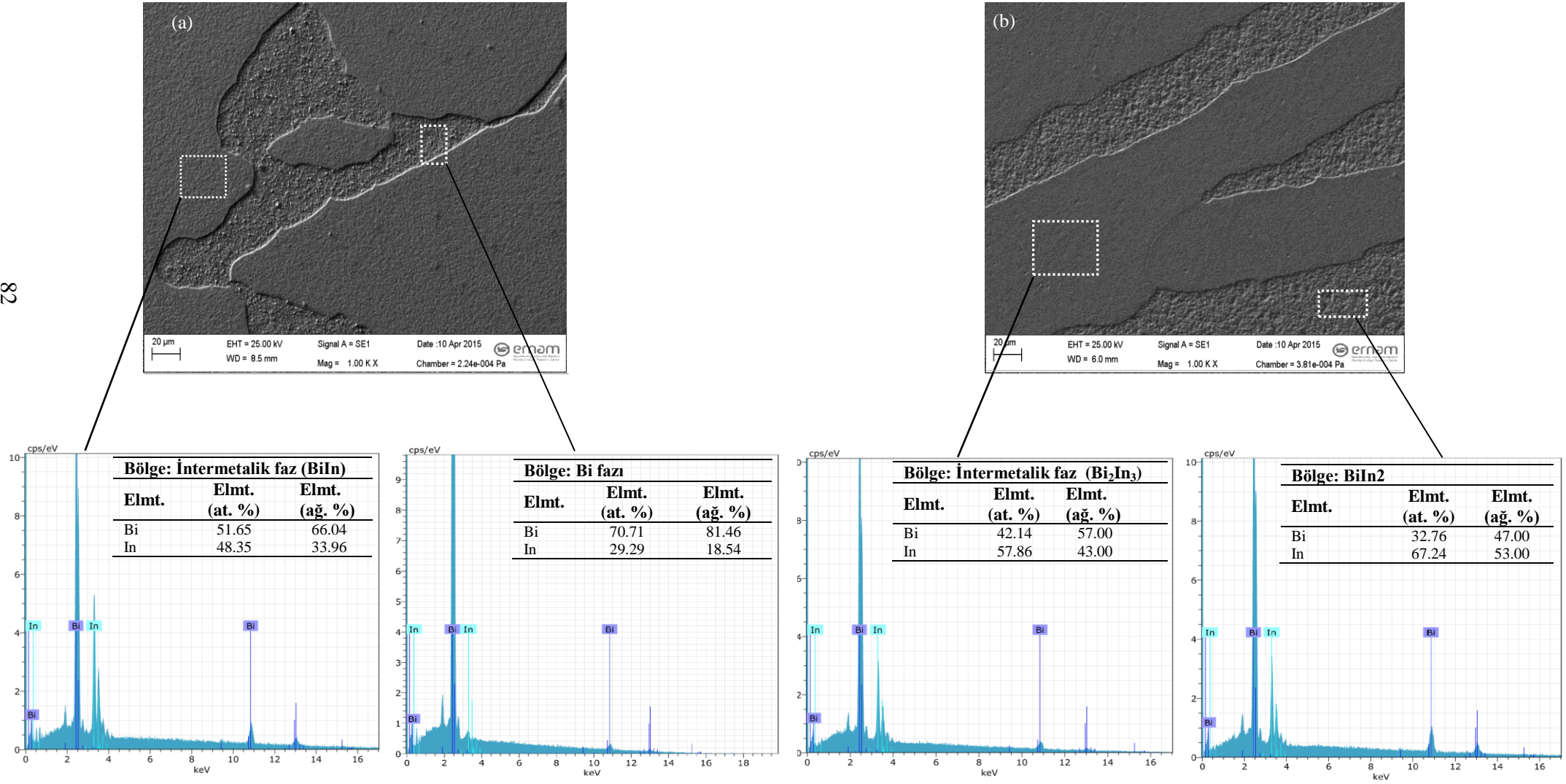
Malzemeler	Erime Sıcaklığı (K)	Elektriksel İletkenliğin Sıcaklık Katsayısı α (K ⁻¹) x10 ⁻³	Isıl İletkenliğin Sıcaklık Katsayısı α (K ⁻¹) x10 ⁻³	Erime Sıcaklığındaki Elektriksel İletkenlik σ (1/Ω m) ×10 ⁶	Erime Sıcaklığındaki Isıl İletkenlik K (W/Km)
Bi-12 ağı.%In (Bi ₄ In)	385.78	2.41	1.36	0.8524	14.50
Bi-15 ağı.%In (Bi ₃ In)	384.61	1.61	1.29	0.9128	16.23
Bi-35.4 ağı.%In (BiIn)	387.24	1.95	3.27	1.6567	19.42
Bi-45 ağı.%In (Bi ₂ In ₃)	368.27	2.28	2.86	2.1422	25.63
Bi-47.6 ağı.%In (Bi ₃ In ₅)	368.11	2.54	2.47	2.0622	25.98
Bi-53 ağı.%In (BiIn ₂)	367.06	0.46	1.79	2.1146	31.83
Bi-62 ağı.%In (BiIn ₃)	349.03	1.65	4.34	2.8381	35.93

4.7. In- Bi İntermetalik Fazlarının Mikroyapılarının Tayini

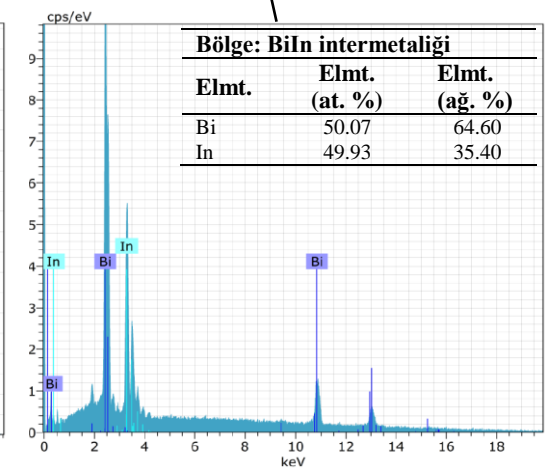
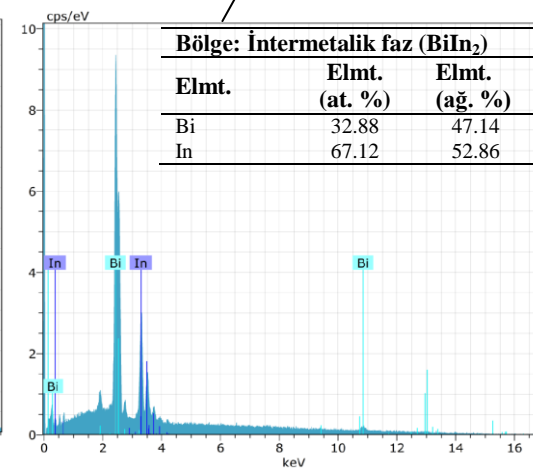
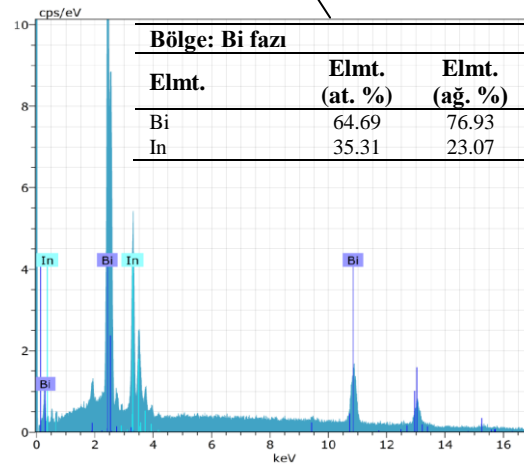
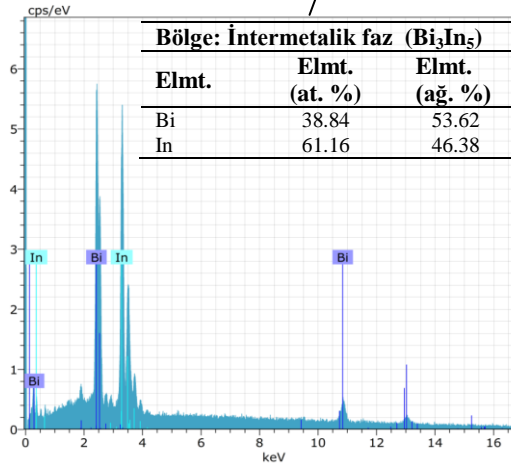
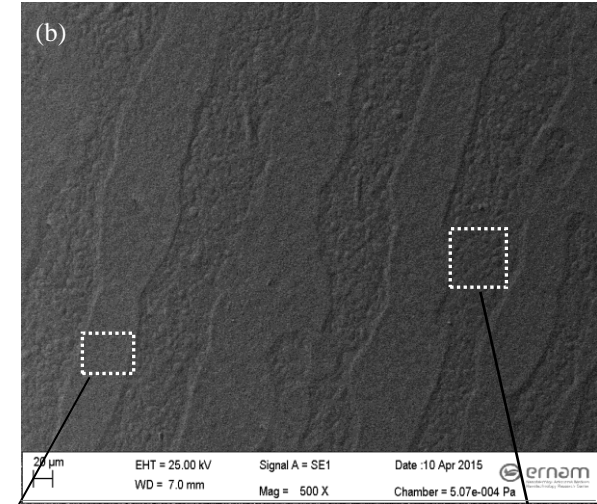
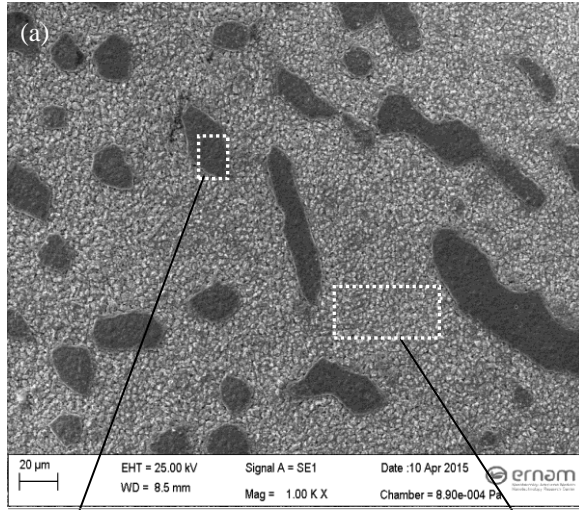
Alaşımın mikroyapısı, numunelerin farklı bölgelerinde optik mikroskop ve *SEM* (Scanning Electron Microscope) boyunca gözlemlendi. Örnekler, mikroskopta gözlemlenebilmesi için standart metalografik işlemler kullanılarak hazırlandı. Zımparalama ve parlatma işlemleri standart yol izlenerek gerçekleştirildi. Parlatmadan sonra, Bi-12 ağırlık % In, Bi-15 ağırlık % In, Bi-35.4 ağırlık % In alaşımları 20 ml. hidrojen klorür, 4 gr. picric asit ve 400 ml. etanol çözeltisinde 5- 10 s. dağıldı. Bi-45 ağırlık % In, Bi-47.6 ağırlık % In, Bi-53 ağırlık % In, Bi-62 ağırlık % In alaşımları ise 1.3 gr. potasyum dikromat, 4.3 ml. sülfirik asit, 2.7 ml. sodyum klorür, 17.7 ml. hidrojen florür, 8.8 ml. nitrik asit, 66.3 ml. su çözeltisinde 5- 10 s. dağıldı. In- Bi intermetalik alaşımlarının mikroyapılarının *SEM* görüntüleri Şekil 4.4.- 4.7. de gösterildi. *EDX* kimyasal bileşim analizi, In-Bi intermetalik alaşımlarının fazlarının belirlenmesi için kullanıldı. *EDX* sonuçları Şekil 4.4.- 4.7. de gösterildi.



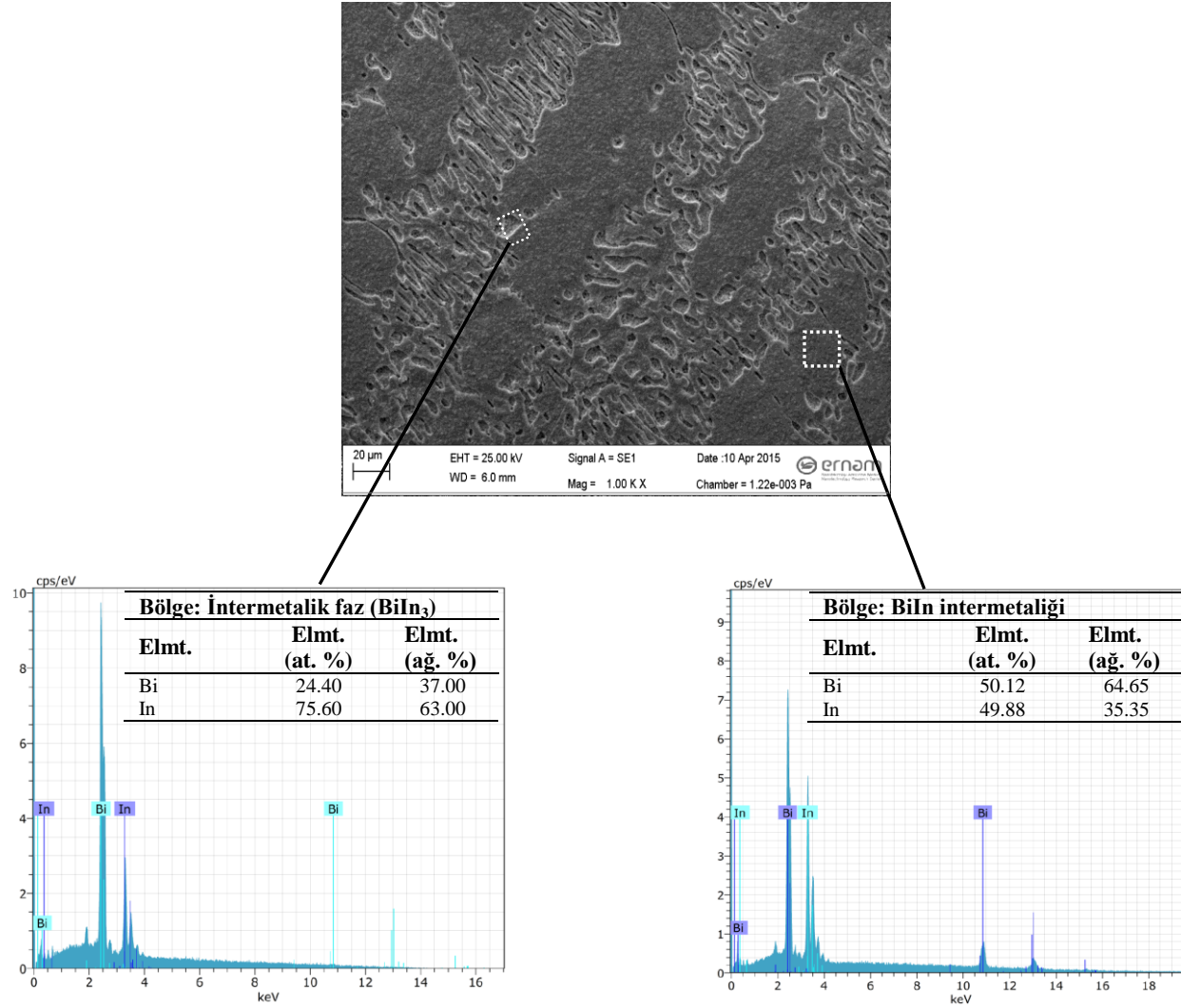
Şekil 4.4. EDX analizi kullanarak (a) Bi- 12 ağ. % In (b) Bi- 15 ağ. % In intermetalik alaşımlarının kimyasal bileşim analizi



Şekil 4.5. EDX analizi kullanarak (a) Bi- 35.4 ağı. % In (b) Bi- 45 ağı. % In intermetalik alaşımlarının kimyasal bileşim analizi



Şekil 4.6. EDX analizi kullanarak (a) Bi- 47.6 ağ. % In (b) Bi- 53 ağ. % In intermetalik alaşımlarının kimyasal bileşim analizi



Şekil 4.7. EDX analizi kullanarak Bi- 62 ağ. % In intermetalik alaşımının kimyasal bileşim analizi

4.8. Katı Fazın Isıl İletkenlik Katsayısının Ölçümündeki Hata Analizi

Isıl iletkenliğin ölçümündeki tahmini deneysel hata; ısı akış hızının, sıcaklık farkının, numunenin kesit alanının ve ısıl çift konumlarının ölçümlerindeki kısmi belirsizlikler toplamına eşittir ve

$$\left| \frac{\Delta K_s}{K_s} \right| = \left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| + \left| \frac{\Delta T^*}{T} \right| + \left| \frac{\Delta A}{A} \right| + \left| \frac{\Delta X}{X} \right| \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilebilir.

4.8.1. Isı akış hızındaki kısmi belirsizlik

Yukarıda belirtildiği gibi, her bir kararlı hal için numune üzerindeki ısı akış hızının Q_{NV} ve Q_{NY} arasındaki fark olduğu yani $Q = Q_{NV} - Q_{NY}$ varsayılp ısı akış hızı ölçümleri için tipik veriler Tablo 4.1.' de verilmişti. Böylece, Q ölçümündeki tahmini deneysel hata Q_{NV} ve Q_{NY} ölçümlerindeki kısmi belirsizlik toplamına eşittir ve

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| = \left| \frac{\Delta Q_{NV}}{Q_{NV}} \right| + \left| \frac{\Delta Q_{NY}}{Q_{NY}} \right| \quad (4.14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Giriş gücü ise

$$Q = V.I \quad (4.15)$$

olarak ifade edilir, burada V ve I sırasıyla kararlı hal şartları altında ısıtıcı sistem (ısıtıcı) üzerindeki potansiyel düşmesi ve ısıtıcıdan geçen akımdır. Güç ölçümündeki kısmi belirsizlik

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| = \left| \frac{\Delta V}{V} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| \quad (4.16)$$

olarak ifade edilebilir.

Potansiyel düşüşü ve akım *Hewlett-Packard 34401-A* tipi multimetre ile ölçüldü. Farklı sıcaklıklarda, akım okunmasındaki değişimler $(\Delta I) \pm 0.02$ amper oldu. Farklı sıcaklıklarda alüminyum çubuk üzerinden geçen ısı akış hızını tespit etmek için

kullanılan tipik veriler Tablo 4.1.'de verilmiştir. Numune üzerinden geçen akımlar farklı sıcaklıklarda 0.9– 5.2 Amper aralığındaydı. Akım ölçümlerindeki belirsizlikler % 0.3–2.2 aralığındadır. Akım ölçümündeki tahmini hata % 4.4 civarındadır.

Potansiyel düşüşü değerlerindeki değişimler (ΔV) farklı sıcaklıklarda ± 0.03 volt idi. Tablo 4.1.'den görülebileceği gibi, numune üzerinden geçen farklı sıcaklıklarda potansiyel düşüşü 9.1– 53.9 V aralığındadır. Potansiyel düşüşü ölçümlerindeki belirsizlikler farklı sıcaklıklarda % 0.05–0.3 aralığındadır. Potansiyel düşüşü ölçümündeki tahmini hata % 0.6 civarındadır. Bundan dolayı, ısı akış hızındaki toplam kısmi belirsizlik % 5 civarındadır.

4.8.2. Isıl çiftler arasındaki sıcaklık farkı $\Delta T=T_1-T_2$ ölçümündeki belirsizlik

Numunenin sıcaklığı K tipi ısıl çiftlerle ölçüldü. Sıcaklık ölçümündeki belirsizliği tespit etmek için numunenin aynı noktalarındaki iki ısıl çift okuması arasındaki fark (ΔT) bilinmelidir veya ölçülmelidir. Isıl çift okumaları arasındaki farkı tespit etmek için, ısıl çiftler metalik malzeme içerisine erime sıcaklığı belirlenerek ayarlandı. İki ısıl çift okuması arasındaki fark (ΔT) 373 K de ± 0.3 K aralığındaydı [123]. Tablo 4.2.'den Bi-% 12wt. In alaşımı için 373 K görülebileceği gibi, numune içindeki sıcaklık farkları ($\Delta T=T_1-T_2$) 13.06 K aralığındadır. Bu durumda numune üzerindeki sıcaklık ölçümlerindeki tahmini hata yaklaşık % 2.5 civarındadır.

4.8.3. Kesit alanı (A) ve ısıl çift konumlarının (X_1, X_2) ölçümündeki belirsizlik

Numunenin kesit alanı (A) πr^2 ve kesit yüzeyi ölçümündeki kısmi belirsizlik

$$\left| \frac{\Delta A}{A} \right| = 2 \left| \frac{\Delta r}{r} \right| \quad (4.17)$$

olarak yazılabilir burada r numune yarıçapıdır. Numune yarıçapı optik mikroskop kullanılarak ± 10 μm hatayla ölçüldü. Böylece, yarıçap ve kesit alanı ölçümündeki belirsizlik % 0.5' den daha az oldu. İki ısıl çift konumu arasındaki uzaklık da ($\Delta X = X_2 - X_1$) optik mikroskop kullanılarak ± 10 μm hatayla ölçüldü. $\Delta X = X_2 - X_1$ ölçülen değeri 3000 μm civarındadır. Sabit uzaklığın ölçümündeki kısmi belirsizlik % 0.3 civarındadır. Bu nedenle, ısı akış hızından (güç ölçümünden) % 5 civarında, sıcaklık farklarının ölçümünden % 2.5 civarında, kesit alanının ölçümünden % 0.5 civarında ve

sabit uzaklık ölçümünden % 0.3 civarında hata geldiğinden bu çalışmada ısı iletkenliğin ölçümlerindeki toplam kısmi belirsizlik yaklaşık olarak % 9 olur.

BÖLÜM 5

SONUÇ-TARTIŞMA ve ÖNERİLER

5.1. Giriş

Metalik alaşımların ısı iletkenlikleri, maddelerin özelliklerini belirleyen erime sıcaklığı, erime entalpisi, özgül ısısı gibi fiziksel parametreler olup faz dönüşüm olaylarında büyük bir öneme sahiptir. Isıl iletkenliğin deneysel tayininde kullanılan en yaygın metot lineer ısı akış metodudur.

Literatürde saf elementlerin ısı iletkenlikleri mevcut olmasına rağmen metalik alaşımlarla ilgili yeteri kadar deneysel veri bulunmamaktadır. Saf metalik malzemelerde olduğu gibi metalik alaşımlarda da ısı iletkenlik (K) sıcaklığa ve bileşime bağlı olarak değişir.

Bu tez çalışmasında Bi- 12 ağı. % In, Bi- 15 ağı. % In, Bi- 35.4 ağı. % In, Bi- 45 ağı. % In, Bi- 47.6 ağı. % In, Bi- 53 ağı. % In, Bi- 62 ağı. % In intermetalik alaşımların ısı iletkenliklerinin bulunmasında lineer (doğrusal) ısı akış metodu kullanıldı. Bu metotta çubuk numune, ısı akışı aksel yönde olacak şekilde bir ucundan ısıtıcı sistemle ısıtılırken diğer ucundan da soğutucu sistem vasıtasıyla soğutulur ve numune üzerinde sabit bir sıcaklık gradyenti oluşturulur. Daha sonra numune, belirlenen sıcaklıkta kararlı hale gelmesi için beklenir. Kararlı durumda numune üzerindeki farklı noktalara ait sıcaklıklar zamana bağlı olarak sıcaklık ölçülüp Fourier denkleminde (4.1)'den ısı iletkenlik tespit edilir. Her bir alaşım için katı fazın ısı iletkenliği sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçüldü. Alaşımların ısı iletkenliklerinin beklendiği gibi sıcaklık arttıkça azalmakta olduğu gözlemlendi. Ayrıca her bir alaşım için ısı iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri çizildi. Bunlara ek olarak her bir intermetalik alaşımın oda sıcaklığından erime sıcaklığının yakın değerine kadar elektriksel iletkenlik değerleri ölçüldü ve elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla değişimi çizildi. Lineer Isı Akış Metodu ile ölçülen ısı iletkenlik değerinde hem fononların hem de elektronların katkısı mevcuttur. Bu sonucu (4.6) denkleminde yerine koyarak ısı iletme fononların katkısı hesaplandı. İntermetalik alaşım sistemine ait numunelerden SEM fotoğrafları çekildikten sonra bu fotoğraflarda belirginleşen her bir fazın kimyasal bileşim analizleri (EDX) yapıldı. Şekil 4.4-4.7'de her bir fazın kompozisyonu ve mikroyapıları net bir şekilde gösterildi.

5.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında lineer ısı akış Bi- 12 ağı. % In, Bi- 15 ağı. % In, Bi- 35.4 ağı. % In, Bi-45 ağı. % In, Bi- 47.6 ağı. % In, Bi-53 ağı. % In, Bi-62 ağı. % In alaşımlarının ısı iletkenlikleri % 9 deneysel hatayla ölçülmüştür. Lineer sıcaklık gradiyenti sistemiyle saf metallerin ve farklı bileşimdeki metalik alaşımların ısı iletkenliklerinin belirlenmesinin yanı sıra ileri ki çalışmalarda;

- Kontrollü doğrusal katılaştırma yapılarak mikroyapı parametreleri ile katılaştırma parametreleri arasındaki ilişki,
- Yine Kontrollü doğrusal katılaştırma yapılarak hız ve ısı iletkenlik katsayısı arasındaki değişimi,
- Isı iletim katsayısının sıcaklıkla ve bileşimle değişimi,
- Isı iletim katsayısının kristal yapılara göre değişim göstermesi,
- İkili ya da üçlü alaşımların Lorentz sabitinin tayini

gibi konular ayrıca incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Aksöz, N., Metalik Alaşımın Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir, 2013.
2. Demir, M., İkili Kurşunsuz Lehim Alaşımının Isı İletiminin Ölçümü, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir, 2013.
3. Hoffman, P. Solid State Physics, s.55, *Wiley, Weinbeim*, 2008.
4. Hummel, R., Electronic Properties of Materials 4th Ed., s. 405, 419, 421, 422, 426, 428, *Springer*, 2011.
5. Pickover, C., Laws and Science and the Great Minds Behind Them- Archimedes to Hawking, s. 212, 219, 230, 360, *Oxford University Press*, 2008.
6. İnternet: UC Davis Chemwiki, Physical Chemistry, University of California, http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Statistical_Mechanics/Heat_Capacity_of_Solids, 2010.
7. Karaoğlu, B., Katıhal Fiziğine Giriş, s. 84, 112, 113, 116, 117, *İstanbul*, 1996.
8. Kittel, C., Introduction to Solid State Phys. 8th Ed., s.114, 121, 122, 141-145, 147-152, *John Wiley & Sons Inc.*, 2005.
9. Onaran, K., Malzeme Bilimi, 8. Baskı, s. 100-104, 168, 171-173, 178-182, *İTÜ*, 2000
10. John, V. B., Understanding Phase Diagrams, 2-3, *Macmillan Press, London*, 1974
11. Böyük, U., Üçlü Metalik Alaşımın Kontrollü Doğrusal Katılaştırılması ve Mikrosertliğin İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2009.
12. İnternet: Nelson, S. A., EENS- 2120. <http://www.tulane.edu/~sanelson/geo1212/ternaryphdiag.htm>, 2011.
13. Kane, P.F., Larrabee, G.B., 1970, Characterization of Semiconductor Materials, McGraw Hill Book Co., U.S.A., 4.
14. Kumar, P.P., Yashonath, S., 2006, Ionic Conduction in the Solid State, *J. Chem.Sci.*, 118 (1), 135-154.
15. Caignan, A.G., Holt, E.M. 2002, New 1,4-dihydropyridine Derivates with Hetero , Saturated B Rings, *Journal of Chemical Crystallography* 32, 315-323.

16. Yamashita, M., 1987, Resistivity Correction Factor for the Four-Probe Method, *J.Phys. E: Sci. Instrum.*, 20, 1454-1456.
17. Hong-Tao Sun, Jiajia Zhou, Jianrong Qiu, Recent advances in bismuth activated photonic materials, *Progress in Materials Science*, 64, 1–72, 2014.
18. T. Takahashi, H. Iwahara, T. Esaka, High oxide ion conduction in sintered oxide of the system $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--M}_2\text{O}_3$, *Journal of the Electrochemical Society*, 124, 1563–1569, 1977.
19. N.M. Sammes, G.A.Tompsett, H.Nafe, F.Aldinger, Bismuth based oxide electrolytes structure and ionic conductivity, *Journal of European Ceramic Society*, 19, 1801–1826, 1999.
20. N. Jiang, E.D. Wachsman, S.H.Jung, A higher conductivity Bi_2O_3 -based electrolyte, *SolidStateIonics*, 150, 347–353, 2002.
21. R.B.H. Tahar, T. Ban, Y. Ohya, Y. Takahashi, Tin doped indium oxide thin films electrical properties, *J. Appl. Phys.*, 83, 2631–2645, 1998.
22. S.B. Yang, B.S. Kong, D.H. Jung, Y.K. Baek, C.S. Han, S.K. Oh, H.T. Jung, Recent advances in hybrids of carbon nanotube network films and nanomaterials for their potential applications as transparent conducting films, *Nanoscale*, 3, 1361–1373, 2011.
23. H.Y. Liu, V. Avrutin, N. Izyumskaya, U. Ozgur, H. Morkoc, Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices, *Superlattices Microstruct.*, 48, 458–484, 2010.
24. P.L. Bencze: *Int. J. Mass Spectrom.*, 2006, vol. 257, pp. 41–49.
25. J. Vizdal, M.H. Braga, A. Kroupa, K.W. Richter, D. Soares, L.F. Malheiros, J. Ferreira: *Calphad*, vol. 31, pp. 438–48, 2007.
26. W. Yang, R.W. Messler Jr: *J. Electron. Mater.*, vol. 23, pp. 765-72, 1994.
27. Franklin, B., Meteorological Observations (written in reply to Cadwallader Colden, Nov. 19, 1753 and read at the Royal Society of London, Nov, 4, 1756), in *The Writings of Benjamin Franklin* (Smyth, A. H., ed.), Vol. III (1750-59), The Macmillan Co., *New York*, 186-8, 1905.
28. Fordyce, G., An Account of an Experiment on Heat, *Phill. Trans. Roy. Soc. (London)*, 77, 310—7, 1787.

29. Ingen-Hausz, J., On Metals as Conductors of Heat, *J. de Physique*, 34, 68, 380, 1789.
30. Despretz, C., On the Conductivity of Several Solid Substances, *Ann. Chim. Phys.*, 19, 97-106, 1822.
31. Wiedemann, G., Franz, R., The Thermal Conductivity of Metals, *Ann. Physik*, 89, 497-531. 1853.
32. Forbes, J.D., On the Progress of Experiments on the Conduction of Heat, Undertaken at the Meeting of the British Association at Edinburgh in 1850, *Britt. Assoc. Adv. Sci. Rept. Ann. Meeting*, 21, 7-8, 1851.
33. Forbes, J.D., On Experiments on the Laws of the Conduction of Heat, *Britt. Assoc. Adv. Sci., Rept. Ann. Meeting*, 22, 260-1, 1852.
34. Forbes, J. D., Experimental Inquiry into the Laws of the Conduction of Heat in Bars and into the Conducting Power of Wrought Iron, *Trans. Roy. Soc. Edinburg*. 23, 133-46, 1864.
35. Forbes, J. D., Experimental Inquiry into the Laws of the Conduction of Heat in Bars. Part II. On the Conductivity of Wrought Iron, Deduced from the Experiments of 1851, *Trans. Roy. Soc. Edinburg*, 24, 73-110, 1865.
36. Angström, A. J., A New Method of Determining the Thermal Conductivity of Solids, *Ann. Physik*, 2, 114, 513-30, 1861.
37. Thomson, W. (Lord Kelvin), Heat, in *Encyclopedia Britannica*, Vol. 11, 9th Ed., 1880; reprinted in *Mathematical and Physical Papers*, Vol. 3, *Cambridge University Press*, 113-235, 1890.
38. Preston, T., the *Theory of Heat*, 719 pp., 1894; 4th Ed. (J. R. Cotter, ed.), *Macmillan Co., Ltd., London*, 836 pp., 1929.
39. Chwolson, O. D., Thermal Conductivity, in *Traite de Physique* (Translated into French by Davaux, E. and reviewed and augmented bay the author), Vol. 3, Chap. VII, *Librairie Scientifique A. Hermann et Fils, Paris*, 320-408, 1909.
40. Schofield, F. H., Conduction of Heat, in *A dictionary of Applied Physics* (Glazebrook, R., ed.), Vol. 1, *The Macmillan Co., New York*, 429-66, 1922 (reprinted 1950).
41. Ingersoll, L. R., Methods of Measuring Thermal Conductivity in Solids and Liquids, *J. Optical Soc. Am.*, 9,495-501, 1924.

42. Griffiths, E., A Survey of Heat Conduction Problems, *Proc. Phys. Soc. (London)*, 41, 151-79, 1929.
43. Partington, J. R., Thermal Conductivity of Solids, in An Advanced Treatise on Physical Chemistry, Vol. III, *Longmans, Green and Co., London*, 410-61, 1952.
44. Seibel, R. D., Survey and Bibliography on the Determination of Thermal Conductivity of Metals at Elevated Temperatures, *Watertown Arsenal Lab. Rept. No. WAL 821/9*, 1-65, 1954. (AD 51 228)
45. Kingery, W.D., Property Measurements at High Temperatures, John Wiley and Sons, Inc., *New York*, 416 pp., 1959.
46. Slack, G. A., Heat Conduction in Solids, Experimental, in Encyclopedic Dictionary of Physics (Thewlis, J., editor-in-chief), Vol. 3, *Pergamon Press, Oxford*, 601-6, 1961.
47. Tye, R. P., Thermal Conductivity, Vol. 1 and 2, Academic Press, *London*, 422 pp. and 353 pp., 1969.
48. Carslaw, H.S., Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, *Oxford University Press*, 1946; 2nd Ed., 510 pp., 1959.
49. Ingersoll, L.R., Zobel, O. J., Ingersoll, A. C., Heat Conduction, McGraw Hill, *New York*, 1948; 2nd Ed., University of Wisconsin Press, 325 pp., 1954.
50. Jakob, M., Heat Transfer, Vol. 1, John Wiley and Sons, Inc., *New York*, 758 pp., 1949.
51. Schneider, P.J., Conduction Heat Transfer, *Addison Wesley Publ. Co., Cambridge, Mass.*, 395 pp., 1955.
52. Arpaci, V. S., Conduction Heat Transfer, Addison Wesley Publ. Co., Reading, Mass., 550 pp., 1966.
53. Berget, A., Measurement of the Thermal Conductivity of Mercury, of Its Absolute Value, *Compt. Rend.*, 105,224-7, 1887.
54. Berget. A., Thermal Conductivity of Mercury and Certain Metals., *J. Phys. (Paris)*, 2,7,503-18, 1888.
55. Laubitz, M. J., Measurement of the Thermal Conductivity of Solids at High Temperatures by Using Steady-State Linear and Quasi-Linear Heat Flow, in Thermal Conductivity (Tye, R. P., ed), Vol. 1, Chap. 3, *Academic Press, London*, 111-83, 1969.

56. Flynn, D. R., Thermal conductivity of Ceramics, in Mechanical and Thermal Properties of Ceramics (Wachtman, J. B., Jr., ed), *NBS Spec. Publ*, 303, 63-123, 1969.
57. Bauerle, J. E., Thermal Conductivity, Section 10.1 in Thermoelectricity: Science and Engineering (Heikes, R.R. and Ure, R.W., Jr., eds.), *Interscience Publishers, New York*, 285-311, 1961.
58. Honda, K. and Simidu, T., On the Thermal and Electrical Conductivities of Carbon Steels at High Temperatures, *Sci. Repts. Tohoku Univ.*, 1, 6, 219-33, 1917.
59. Schofield, F. H., The Thermal and Electrical Conductivities of Some Pure Metals, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A107, 206-27, 1925.
60. Powell, R. W., The Thermal and Electrical Conductivities of Metals and Alloys: I. Iron from 0 to 800 C, *Proc. Phys. Soc. (London)*, 46, 659-78, 1934.
61. Goldsmith, H. J., The Thermal Conductivity of Bismuth Telluride, *Proc. Phys. Soc. (London)*, B69, 203-9, 1956.
62. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by Means of the Guarded Hot Plate, ASTM Designation: C177-63, in 1967 Book of ASTM Standards, Part 14, 17-28, 1967.
63. Poensgen, R., A Technical Method for Investigating the Thermal Conductivity of Slabs of Material, *VDI Zeitschrift*, 56(41), 1653-8, 1912.
64. Jakob, M., Measurement of the Thermal Conductivity of Liquids, Insulating Materials and Metals, *VDI Zeitschrift*, 66, 688-93, 1922.
65. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Refractories, ASTM Designation: C201-47 (1958), in 1967 Book of ASTM Standards, Part 13, 170-7, 1967.
66. Wilkers, G. B., Thermal Conductivity, Expansion, and Specific Heat of Insulators at Extremely Low Temperatures, *Refri. Eng.* 52(1), 37-42, 1946.
67. Schröder, J., A Simple Method of Determining the Thermal Conductivity of Solids, *Philips Tech. Rev.*, 21(12), 357-61, 1959-60.
68. Schröder, J., Apparatus for Determining the Thermal Conductivity of Solids in the Temperature Range from 20 to 200 C, *Rev. Sci. Instr.*, 34(6), 615-21, 1963.

69. ASTM, Tentative Method of Test for Thermal Conductivity of Insulating Materials at Low Temperatures by Means of the Wilkes Calorimeter, ASTM Designation: C420-62T, in *1967 Book of ASTM Standards*, Part 14, 172-9, 1967.
70. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by Means of the Heat Flow Meter, ASTM Designation: C518-67, in *1967 Book of ASTM Standards*, Part 14, 230-8, 1967.
71. Ingen-Hausz, J., On Metals as Conductors of Heat, *J. de Physique*, 34, 68, 380, 1789.
72. Lodge, O. J., On a Method of Measuring the Absolute Thermal Conductivity of Crystals and Other Rare Substances. Part I, *Phil. Mag.*, 5, 5, 110-7, 1878.
73. Berget, A., Measurement of the Coefficients of Thermal Conductivity of Metals. *Compt. Rend.*, 107, 227-9, 1888.
74. Lees, C. H., On the Thermal Conductivities of Crystals and Other Bad Conductors, *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, A183, 481-509, 1892.
75. van Dusen, M. S. and Shelton, S. M., Apparatus for Measuring Thermal Conductivity of Metals up to 600 C, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 12, 429-40, 1934.
76. Powell, R. W., The Thermal and Electrical Conductivity of a Sample of Acheson Graphite from 0 to 800 C. *Proc. Phys. Soc. (London)*, 49, 419-25, 1937.
77. Francl, J., Kingery, W. D., Apparatus for Determining Thermal Conductivity by a Comparative Method. Data for Pb, Al₂O₃, BeO, and MgO, *J. Am. Ceram. Soc.* 37, 80-4, 1954.
78. Stuckes, A. D., Chasmar, R. P., Measurement of the Thermal Conductivity of Semiconductors, Rept. Meeting of Semiconductors (*Phys. Soc., London*), 119-25, 1956.
79. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity on Whiteware Ceramics, ASTM Designation: C408-58, in *1967 Book of ASTM Standards*, Part 13, 348-52, 1967.
80. Mirkovich, V. V., Comparative Method and Choice of Standards for Thermal Conductivity Determinations, *J. Am. Ceram. Soc.*, 48(8), 387-91, 1965.
81. Flynn, D. R., Thermal conductivity of Ceramics, in *Mechanical and Thermal Properties of Ceramics* (Wachtman, J. B., Jr., ed), *NBS Spec. Publ*, 303, 63-123, 1969.

82. Christiansen, C., Some Experiments on Heat Conduction, *Ann. Physik*, 3,14, 23-33, 1881.
83. Peirce, B. O., Wilson, R. W., On the Thermal Conductivities of Certain Poor Conductors. I, *Proc. Am. Acad. Arts and Sci.*, 34 (1), 1-56, 1898.
84. Sieg, L. P., An Attempt to Detect a Change in the Heat Conductivity of a Selenium Crystal with a Change in Illumination, *Phys. Rev.*, 6, 213-8, 1915.
85. Powell, R. W., The Thermal and Electrical Conductivities of Metals and Alloys: II. Some Heat –Resistant Alloys from 0 to 800 C, *Proc. Phys. Soc. (London)*, 48, 381-92, 1936.
86. Powell, R. W. And Hickman, M. J., The Physical Properties of a Series of Steels. 3. Thermal Conductivity and Electrical Resistivity, *Iron and Steel Institute*, Special Report No. 24, 242-51, 1939.
87. Powell, R. W., Tye, R. P., The Thermal and Electrical Conductivities of Some Nickel-Chromium (Nimonic) Alloys, *The Engineer*, 209, 729-32,1960.
88. Rosenthal, D., Friedmann, N. E., Thermal Diffusivity of Metals at High Temperatures, *J. Appl. Phys.*, 25(8), 1059-60, 1954.
89. Rosenthal, D., Friedmann, N. E., The Determination of Thermal Diffusivity of Aluminium Alloys at Various Temperatures By Means of a Moving Heat Source, *Trans. ASME*, 78(8),1175-80, 1956.
90. Hsu, S. T., Theory of a New Apparatus for Determining the Thermal Conductivities of Metals, *Rev. Sci. Instr.*,28(5), 333-6, 1957.
91. Hsu, S. T., Determination of Thermal Conductivities of Metals by Measuring Transient Temperatures in Semi-Infinite Solids, *Trans. ASME*, 79, 1197-1203, 1957.
92. Deem, H. W., et al, Effect of Radiation on the Thermal Conductivity of Uranium-1.6 Wt. percent Zirconium, *USAEC Rept. BMI-986*, 1-19, 1955.
93. Akbulut, S., et al, Determination of interfacial energies of solid Sn solution in the In-Bi-Sn ternary alloy, *Materials Characterization* 60, 183-192, 2009.
94. Gündüz, M., Hunt, J. D., The measurement of solid-liquid surface energies in the Al- Cu, Al-Si and Pb-Sn systems, *Acta Metall.*, 33, 1651, 1985.
95. Kaygısız, Y., et al, Thermal Conductivity and interfacial energies of solid Sn₃Sb₂ in the Sn-Sb peritectic system, *Thermochimica Acta*, 520, 25-32, 2011.
96. Mhiaoui, S., Sar, F. Gasser, J.G., *J. Non-Cryst. Solids* 353, 3628,2007.

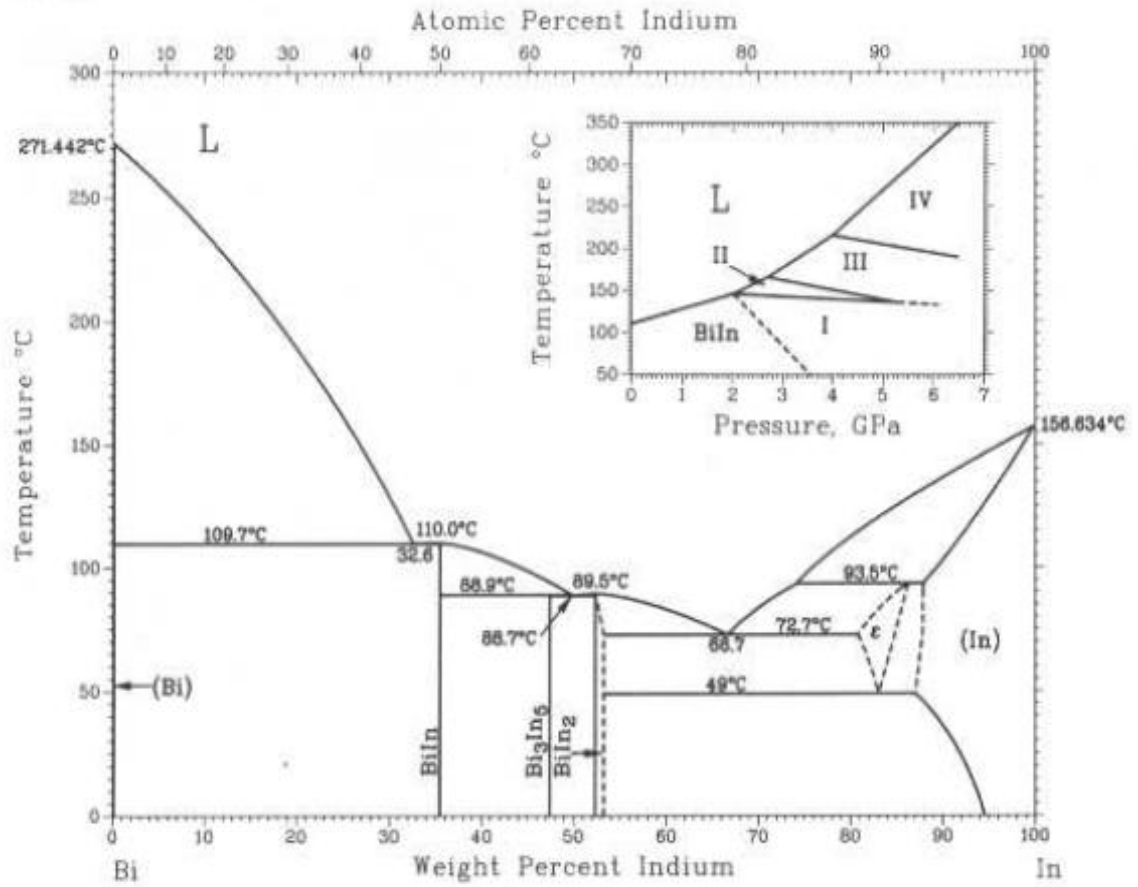
97. Saatçi, B., Maraşlı, N., Gündüz, M., Thermal conductivities of solid and liquid phases in Pb-Cd and Sn-Zn binary eutectic alloys, *Thermochimica Acta*, 454, 128-134, 2007.
98. Erol, M., et al, Solid–liquid interfacial energy of bismuth in the Bi–Cd eutectic system, *Scripta Materialia*, 51, 131–136, 2004.
99. Kaygısız, Y., et al, Experimental determination of solid–solid and solid–liquid interfacial energies of solid ϵ (CuZn₅) in the Zn–Cu alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 487, 103–108, 2009.
100. Keşlioğlu, K., et al, Experimental determination of solid–liquid interfacial energy for solid Cd in Bi–Cd liquid solutions, *Journal of Alloys and Compounds*, 385, 207-213,2004.
101. Keşlioğlu, K., Maraşlı, N., Short communication Solid–liquid interfacial energy of the eutectoid β phase in the Al–Zn eutectic system, *Materials Science and Engineering, A* 369, 294–301, 2004.
102. Gündüz, M., Hunt, J.D., *Acta Metall.*, 33, 1651, 1985.
103. Aksöz, S., et al, Dependency of the thermal and electrical conductivity on the temperature and composition of Cu in the Al based Al–Cu alloys, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 1507-1516, 2010.
104. Witusiewicz, V.T., et al, *J. Alloy. Compd.*, 387, 217, 2005.
105. Ocak, Y., et al, Interfacial energies of solid CuAl₂ in the CuAl₂-Ag₂Al pseudo binary alloy, *Thin Solid Films*, 518, 4322-4327, 2010.
106. Akbulut, S., et al, Interfacial energy of solid In₂Bi intermetallic phase in equilibrium with In–Bi eutectic liquid at 72 °C equilibrating temperature, *Materials Characterization*, 59,1101-1110, 2008.
107. Kaygısız, Y., et al, Thermal conductivity and interfacial energies of solid Sn in the Sn-Cu alloy, *Chemical Physics Letters*, 484, 219-224, 2010.
108. Karabulut, L., et al, Experimental determination of thermal conductivity and interfacial energies of solid Pb solution in the Pb–Sb eutectic system, *Chemical Physics Letters*, 503, 220-225, 2011.
109. Ocak, Y., et al, Experimental determination of thermal conductivity and solid-liquid interfacial energy of solid Ag₃Sn intermetallic in the Sn-Ag-In ternary alloy, *Intermetallics*, 18, 2250-2258, 2010.

110. Meydaneri, F., et al, Measurement of solid–liquid interfacial energy for solid Zn in the Zn–Cd eutectic system, *Surface Science*, 601, 2171-2177, 2007.
111. Mc Cartney, D.G., D. *Phil. Thesis, University of Oxford, London, UK* 85, 1981.
112. Meydaneri, F., Saatçi, B., Thermal Coefficients and Thermal Conductivities of Solid and Liquid Phases for Pure Ag, Pure Sn and Their Binary Alloys, *Int. J. Eng. Research & Development*, Vol.2,No.1, January, 2010.
113. Saatçi, B., et al, Experimental determination of interfacial energy for solid Sn in the Sn-Ag alloy by using radial heat flow type solidification apparatus , *Surface Science*, 605, 623–631, 2011.
114. Arı, M., et al, Thermo-electrical characterization of Sn–Zn alloys, *Materials Characterization*, 59, 757-763, 2008.
115. Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho and P. G. Klemens, Thermal Conductivity, Metallic Elements and Alloys, Thermophysical Properties of Matter, *New York - Washington*, Vol. 1, p. 13a-25a, 49, 149, 185, 408, 498, 845, 1970.
116. Keşlioğlu, K., Katı-Sıvı Arayüzey Enerjisinin Ölçümü, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri*, 2002.
117. Engin, S., Kontrollü katılaştırılan çok bileşenli ötektik alaşımların, mekanik ve elektriksel özelliklerinin katılaştırma parametrelerine bağlılığının incelenmesi, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri*, 2013.
118. Akbulut, S., İkili Saydam Monotektik Alaşımların Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Ölçümü, *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri*, 2006.
119. Engin, S., Metalik Alaşımların Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Doğrusal Büyütme Tekniğiyle Ölçümü, *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri*, 2009.
120. Touloukian, Y.S., Powell R.W., Ho, C.Y., Klemens PG, Thermal Conductivity Metallic Elements and Alloys, Vol.1. p. 39-40, New York, Washington, 1970.
121. W.B. Pietenpol, H. A. Miley, Electrical resistivities and temperature coefficients of lead, tin, zinc and bismuth in the solid and liquid states, *Physical Review*, Vol.34. p. 1599, 1929.
122. V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, Handbook of Induction Heating. Markel Dekker Inc, New York, 2003, pp. 119-120.

123. Aksöz S., Öztürk, E., Maraşlı, N., The measurement of thermal conductivity variation with temperature for solid materials, *Measurement*, Vol. 46, Issue 1, 161–170, 2013.
124. Y. Ocak, S. Akbulut, N. Maraşlı, K. Keşlioğlu, U. Büyük, H. Kaya, E. Çadırılı, *Met. Mater. Inter.* 14 (2008) 177.
125. S. Aksöz, N. Maraşlı, K. Keşlioğlu, F. Yıldız, Variations of thermal conductivity with temperature and composition of Zn in the Bi- [x] at. % Zn- 2 at. % Al alloys, *Thermochimica Acta*, 547, 1- 5, (2012).
126. Biot, J. B., *Traite de Physique*, Vol. 4, Paris, 669, 1816.
127. Fourier, J. B. J., *The Analytical Theory of Heat*, Fauthier-Villars, Paris, 1822; English translation by Freeman, A., Cambridge University Press, 466 pp., 1878; new edition of the English translation, Dover Publications, *New York*, 1955.
128. Platunov, E. S., Measurement of Heat Capacity and Heat Conductivity of Rod Subjected to Monotonic Heating and Cooling, *High Temperature (USSR)*, 2(3), 346-350, 1964.
129. Taylor, R. E., et al, Evaluation of Direct Electrical Heating Methods for the Determination of Thermal Conductivity at Elevated Temperatures , *Air Force Materials Laboratory Techn. Rept.* AFML-TR-68-227, 1-74, 1968.
130. ASM International Alloy Phase Diagram and the Handbook Committees, 1992, ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams, s. 100.

EKLER

EK 1. Bi-In Alaşımının Faz Diyagramı [130].



ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı: Pınar ATA

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 25 Haziran 1988, Reinbek-(D)

Medeni Durumu: Bekar

Tel: 0507 391 71 25

email: pinarata_88@hotmail.com

Yazışma Adresi: Melikgazi Mah. Hisar Geçidi Şahin Konağı 9/1, 38030

Melikgazi/KAYSERİ

Derece	Öğrenim Alanı	Üniversite	Yıl
Lisans	Fizik Bölümü	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi	2008-2012
Y.Lisans (Tezsiz)	Fizik Öğretmenliği	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi	2012-2013
Y.Lisans (Tezli)	Fizik Bölümü	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi	2012-2015
Y.Lisans (Tezli)	Metalürji ve Malzeme Mühendisliği	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi (Erciyes Üni. Ortak Program)	2014-...

TEZLER

Lisans Tez Başlığı ve Tez Danışmanı

Lisans Tez Konusu: Malzemelerin Isıl Özellikleri

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Sezen AKSÖZ

Yüksek Lisans Tez Başlığı ve Tez Danışmanı

Yüksek Lisans Tez Konusu: Lineer Isı Akış Metoduyla Metalik Alaşımların Isı İletkenlik Katsayısının Ölçümü

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Sezen AKSÖZ

BAŞARILARI

Lisans bölüm birinciliği (ortalama 3,57)

Yüksek lisans (ortalama 4,00)

ÖDÜLLER VE BURSLAR

2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı 2014-2.Dönem, TÜBİTAK-BİDEB.

SERTİFİKA, KURS VE EĞİTİMLER

1. C Sınıfı İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2014.
2. 21. İstatistiksel Fizik Günleri Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 19 – 21 Haziran 2014.

SSCI / SCI / AHCI EXPANDED KAPSAMINDA YAYINLANAN MAKALELER

1. **P. Ata**, Y. Karamazı, Ü. Bayram, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı, Solid-Liquid Interfacial Energy of Solid Succinonitrile in Equilibrium with Succinonitrile- (D)Camphor-Aminomethylpropanediol Eutectic Liquid, International Journal of Thermophysics, inceleme altında (under review).
2. Ümit BAYRAM, Yasin KARAMAZI, **Pınar ATA**, Sezen AKSÖZ, Kazım KEŞLİOĞLU, Necmettin Maraşlı, Dependence of Microstructure, Microharness, Tensile Strength and Electrical Resistivity on High Growth Rates for Directional Solidified Zn-Al-Sb Eutectic Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, inceleme altında (under review).
3. Yasin KARAMAZI, Ümit BAYRAM, **Pınar ATA**, Sezen AKSÖZ, Kazım KEŞLİOĞLU, Necmettin MARAŞLI, Dependence of microstructural, mechanical and electrical properties on growth rates in the directional solidified Zn-Al-Bi eutectic alloy, Elsevier Editorial System(tm) for Materials Science and Engineering C Manuscript Draft Manuscript Number: MSEC-D-15-00355 inceleme altında (under review)

