

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

**SAC105 KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMINA ESER  
MİKTARDA ANTIMON (Sb) İLAVESİ YAPILARAK  
TERMAL, ELEKTRİKSEL, MEKANİK VE  
MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan  
Fadimana ÖCAL**

**Tezi Yöneten  
Prof. Dr. Sezen AKSÖZ**

**Fizik Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Ocak 2021  
NEVŞEHİR**

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışma konusunu belirleyen, çalıŐmalarımın her aŐamasında maddi ve manevi desteği ile hep yanımda olan değerli hocam Prof. Dr. Sezen AKSÖZ'e çok teşekkür ederim.

Deneysel çalıŐmalarım sırasında laboratuvar tecrübelerini ve birikimlerini esirgemeyen, sabır ve ilgiyle her konuda yardımda bulunan Erciyes Üniversitesi doktora öğrencisi Pınar ATA ESENER arkadaşıma çok teşekkür ederim.

Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ArŐ.Gör. Serkan DAL hocama ve Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Yusuf KARACA kardeŐime Metalografi Laboratuvarı çalıŐmalarıma yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Benimle zaman geçirmek için çalıŐmalarımın bitmesini sabırla bekleyen iki gözümün nuru yavrularım ağrı Bartu ve Duru Burçe'me, her türlü desteği, anlayıŐı ve sabrı ile daima arkamda olan kıymetli eŐim Dr. Hakan ÖCAL'a sonsuz teŐekkürü borç bilirim.

**SAC105 KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMINA ESER MİKTARDA ANTİMON  
(Sb) İLAVESİ YAPILARAK TERMAL, ELEKTRİKSEL, MEKANİK VE  
MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Fadimana ÖCAL**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ  
ENSTİTÜSÜ**

**Ocak, 2021**

**ÖZET**

Sn-1 ağı. % Ag-0.5 ağı. % Cu, Sn-1 ağı. % Ag-0.5 ağı. % Cu-0.5 ağı. % Sb, Sn-1 ağı. % Ag-0.5 ağı. % Cu-1 ağı. % Sb, Sn-1 ağı. % Ag-0.5 ağı. % Cu-1.5 ağı. % Sb, kurşunsuz lehim alaşımlarının ısı iletkenliklerinin sıcaklığa bağılı değişimi lineer ısı akış metodu, elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla değişimi 4-nokta iletkenlik ölçüm tekniği ile ölçüldü. Her bir alaşım için elektriksel ve ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişim grafikleri çizildi. Çizilen bu grafiklerden ısı ve elektriksel iletkenlik katsayıları belirlendi. Isı iletkenliğe elektron ve fonon katkıları, Wiedemann-Franz Kanunu kullanarak hesaplandı ve elde edilen sonuçlar grafiklerle gösterildi. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için Mikrosertlik ve Çekme-Uzanim analizleri yapıldı. Bu tez çalışmasında Vickers sertlik ölçme yöntemiyle mikrosertlik ölçümü yapıldı. Tüm alaşımlar için alınan sertlik değerlerinin kompozisyonla değişim grafikleri çizildi. Çekme analizi, mekanik tahrikli çekme cihazında tek eksen ve sabit hızla koparılmaya kadar çekilerek yapıldı. Her bir numune için gerilme-birim uzama ve gerilme-% uzama grafikleri çizildi.

***Anahtar Kelimeler: Kurşunsuz Lehim Alaşımları, Isı İletkenlik, Elektriksel İletkenlik Mekanik Özellikler***

***Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sezen AKSÖZ***

**INVESTIGATION OF THERMAL, ELECTRICAL, MECHANICAL, AND  
MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF SAC105 LEAD-FREE SOLDER  
ALLOY SYSTEMS BY ADDING TRACE AMOUNT OF ANTIMONY (Sb)**

**(Master Thesis)**

**Fadimana ÖCAL**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**January, 2021**

**ABSTRACT**

Linear heat flow method and four point probe method were used to measure respectively thermal and electrical conductivity variations with temperature in Sn-1 wt. % Ag-0.5 wt. % Cu, Sn-1 wt. % Ag-0.5 wt. % Cu-0.5 wt. % Sb, Sn-1 wt. % Ag-0.5 wt. % Cu-1 wt. % Sb, Sn-1 wt. % Ag-0.5 wt. % Cu-1.5 wt. % Sb lead free solder alloy systems. Temperature variation graphs of electrical and thermal conductivity were drawn for each alloy system. Electrical and thermal conductivity coefficients were determined from these graphs. Electron and phonon contributions to thermal conductivity were calculated by using Wiedemann-Franz Law and the results were plotted. Microhardness and tensile-strain tests were performed to determine the mechanical properties. In this thesis, microhardness was measured with Vickers hardness measurement method. The microhardness variation with composition were plotted for all alloy systems. Tensile analysis were performed on a mechanic traction device in a single axis and by pulling until it ruptured at constant speed. Stress-strain and stress-elongation % graphs were drawn for each sample.

***Key Words: Lead-Free Solder Alloy Systems, Thermal Conductivity, Electrical Conductivity, Mechanical Properties***

***Thesis Advisor: Prof. Dr. Sezen AKSÖZ***

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xi
<b>BÖLÜM 1</b>	
<b>MALZEMELERİN ISIL, ELEKTRİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ</b>	
KAVRAMLAR .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Isıl Özellikler .....	1
1.2.1. Isı.....	1
1.2.2. Sıcaklık .....	2
1.2.3. Isı transferi .....	2
1.2.4. Isı sığası .....	3
1.2.4.1. Fonon ısı sığası.....	4
1.2.4.2. Elektronik ısı sığası .....	4
1.2.5. Isıl genleşme .....	5
1.2.6. Isıl iletkenlik .....	6
1.2.6.1. Isıiletim mekanizmaları .....	6
1.2.6.2. Metaller.....	7
1.3. Elektriksel Özellikler .....	7
1.3.1. Ohm kanunu.....	7
1.3.2. Elektrik iletkenlik.....	8
1.3.3. Elektronik ve iyonik iletkenlik .....	9
1.3.4. Katılarda enerji bant yapıları .....	9
1.3.5. Bant ve atomik bağ modeline göre iletkenlik .....	12
1.3.5.1. Metaller.....	13

1.3.5.2.Yalıtkanlar ve yarı iletkenler .....	14
1.3.6.Elektron hareketliliği.....	15
1.3.7 Metallerin elektriksel öz direnci. ....	16
1.3.7.1. Sıcaklığın etkisi.....	17
1.3.7.2. Empüritelerin etkisi. ....	17
1.3.7.3. Plastik deformasyonun etkisi. ....	17
1.4. Malzemelerin Mekanik Özellikleri. ....	18
1.5.Faz Diyagramları .....	19
1.5.1.İkili ötektik faz diyagramları .....	19

## BÖLÜM 2

MALZEMELERİN ISIL İLETKENLİĞİ, ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN DENEYSEL YÖNTEMLER.....	22
2.1. Giriş.....	22
2.2. Isıl İletkenliğin Belirlenmesinde Kullanılan Deneysel Yöntemler. ....	22
2.2.1.Lineer ısı akış yöntemleri .....	22
2.3.Elektriksel İletkenliğin Belirlenmesinde Kullanılan Deneysel Yöntemler. ....	23
2.4.Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Deneysel Yöntemler.....	25
2.4.1.Çekme deneyi .....	26
2.4.2.Sertlik deneyi .....	29
2.4.2.1. Çizilerek yapılan sertlik deneyleri.....	30
2.4.2.2. Batırılarak Yapılan Sertlik Deneyleri.....	30
2.4.2.2.1.Vickers sertlik deneyi .....	31
2.4.2.3. Sıçratılarak Yapılan Sertlik Deneyleri.....	32

## BÖLÜM 3

DENEYSEL SİSTEMLER .....	45
3.1.Giriş.....	45
3.2.Termal Analiz .....	45
3.3. Deneysel Sistemler.....	46
3.3.1 Kül fırını .....	46
3.3.2. Lineer ısı akış sistemi .....	46
3.3.2.1.Isıtıcı sistem .....	47

3.3.2.2. Soğutucu sistem .....	49	
3.3.2.3. Numune tutucu .....	52	
3.4. Isıl iletkenlik Ölçümü için Bir Deneyin Yapılışı. ....	53	
3.4.1. Numune kalıbının hazırlanması .....	53	
3.4.2 . Numune kalıbının fırına yerleştirilmesi ve dökümün yapılması.....	56	
3.4.3. Numunenin lineer akış sistemine yerleştirilmesi .....	57	
3.4. 4.Linear ısı akış sisteminde bir deneyin yapılışı.....	61	
3.5. Metalografik İşlemler .....	62	
3.5.1. Numunelerin kesilmesi ve kalıplanması.....	62	
3.5.2. Numunelerin zımparalanması .....	64	
3.5.3.Numunelerin parlatılması .....	64	
3.5.4.Numunelerin dağlanması.....	65	
3.5.5.Fazların belirlenmesi .....	66	
3.6. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Yapılan Hazırlıklar .....	66	
3.6.1.Sertlik deneyinin yapılışı.....	66	
3.6.2. Çekme-dayanım deneyinin yapılışı.....	67	
3.7.Elektriksel İletkenlik .....	68	
3.7.1.Özdirenç ölçümü .....	68	
3.7.2.4-Nokta iletkenlik ölçüm tekniğini sistemi .....	69	
3.7.3.Elektriksel iletkenlik ölçümü için deneyin yapılışı.....	70	
<b>BÖLÜM 4</b>		
<b>DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>		72
4.1.Giriş.....	72	
4.2.Alaşımın Termal Özelliklerinin Belirlenmesi .....	72	
4.3.Alaşımın Isıl İletkenlik Ölçümü .....	74	
4.4.Isıl Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması .....	78	
4.5. Elektrik İletkenliği .....	78	
4.6. Elektriksel Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması.....	79	
4.7. Mikroyapı Tayini .....	80	
4.8. Alaşımın Mekanik Özellikleri .....	81	
4.8.1.Mikrosertlik değerinin ölçülmesi.....	81	
4.8.2.Çekme-dayanım deneyi.....	82	

KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	91





## TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Metalik alaşımların ısı iletkenlik değerleri .....	33
Tablo 2.2. Metalik alaşımların elektriksel iletkenlikleri .....	42
Tablo 3.1 Özdirenç düzeltme faktörü eşitlikleri[61] .....	71
Tablo 4.1. Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının termal özellikleri.....	74
Tablo 4.2. Alaşımlar için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişiminden elde edilen deneysel veriler. ....	76
Tablo 4.3. Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının katı fazlarının ısı ve elektriksel özellikleri.....	80
Tablo 4.4. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının katı fazlarının mekanik özellikleri.....	84

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. ( N=12) Atomdan oluşan bir kümede elektron enerjisinin atomlararası mesafeyle değişim eğrisi [2].....	10
Şekil 1.2. (a) Bir katı malzeme için atomlararası denge mesafesindeki elektron enerji bant yapısının klasik gösterimi. (b) bir atom kümesi için elektron enerjisinin atomlararası mesafe ile değişimi [2].....	11
Şekil 1.3. Katılarda 0K'de olası çeşitli elektron bant yapıları [2] .....	12
Şekil 1.4. Bir metal için, elektronun uyarılmasından (a)önceki (b) sonraki konumları[2] .....	13
Şekil 1.5. Yalıtkan ve yarı iletkenler için elektron konumları. Valans bandından iletim bandına bir elektronun uyarılması öncesi (a) ve sonrası (b) bir elektron ve bir boşluk oluşumu [2].....	15
Şekil 1.6. İkili ötektik X-Y faz diyagramı [6] .....	21
Şekil 2.1. İki nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniğinin şematik gösterimi .....	23
Şekil 2.2. Dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniğinin şematik gösterimi .....	24
Şekil 2.3 . Dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği çalışma prensibi .....	25
Şekil 2.4. Gerilme-% uzama diyagramı .....	27
Şekil 2.5. Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi [13] .....	31
Şekil 2.6. Vickers sertlik deneyinde elde edilen iz ve izin ölçülmesi.....	33
Şekil 3.1. DSC grafiği .....	46
Şekil 3.2 . Kül Fırını Fotoğrafi .....	46
Şekil 3.3. Isıtıcı sistemin genel görünümü [4].....	47
Şekil 3.4. Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı .....	49
Şekil 3.5. Soğutucu sistemin genel görünümü [55].....	50
Şekil 3.6. Soğutucu-ısıtıcılı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü [4] .....	51
Şekil 3.7. Numune tutucunun şematik gösterimi [4] .....	52
Şekil 3.8. Grafitten yapılmış Pota, Huni ve Numune Kalıbı [4] .....	53
Şekil 3.9. Kalıp hazırlamak için kullanılan torna tezgahı .....	53
Şekil 3.10. Kullanılan numune kalıbının fotoğrafı (a) ,şematik gösterimi (b) [4].....	54
Şekil 3.11. a) Numune potası ve üst desteğin silikon yapıştırıcı ile birleşiminin fotoğrafı, (b) Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi [56].....	55

Şekil 3.12. Grafitten yapılmış potanın şematik gösterimi [4] .....	56
Şekil 3.13. Kesme Aleti .....	57
Şekil 3.14. Numunenin ve ısıl çiftlerin konumlarının şematik çizimi [4].....	58
Şekil 3.15. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan sıcaklık kaydedicisi [57] .....	58
Şekil 3.16. Numune ölçümünde kullanılan K tipi Termal Çiftler .....	59
Şekil 3.17. Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü [4] .....	60
Şekil 3.18. Optik mikroskop ve CCD kameradan oluşan görüntü sistemi.....	62
Şekil 3.19. Elmas Kesme Diski .....	63
Şekil 3.20. Epoksi-resin ile kalıplanmış numunelerin resmi.....	63
Şekil .3.21. Zımparalama-Parlatma aleti.....	64
Şekil 3.22. Parlatma işleminde kullanılan zımpara, keçe ve süspansiyonlar .....	65
Şekil 3.23. Sertlik ölçme aleti.....	67
Şekil 3.23. Çekeme-basma test cihazı [58] .....	68
Şekil 3.24. t Kesitli Numune Şematik Gösterimi [61] .....	69
Şekil 3.25 (a )Numune tutucu şematik gösterimi, (b) Numune tutucu resim [61] .....	70
Şekil 4. 1. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının ısı akışının sıcaklıkla olan değişimi. ....	73
Şekil 4.2. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının ısıl iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri. ....	77
Şekil 4.3 Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri.....	79
Şekil 4.4. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının mikroyapı fotoğrafları.....	81
Şekil 4.5. Alaşım kompozisyonlarına göre sertlik değişimleri.....	82
Şekil 4.6. Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının gerilme-birim uzama diyagramı. ....	83
Şekil 4.7. . Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının kuvvet-uzama diyagramı.....	83

## 1.BÖLÜM

### MALZEMELERİN ISIL, ELEKTRİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ KAVRAMLAR

#### 1.1. Giriş

Metaller fiziksel dayanıklılıkları, elektrik ve ısıyı iyi iletmeleri, parlaklıkları ve kolay şekil verilebilme özellikleri ile tanınırlar [1].

Malzemenin uygulanan ısıya karşı gösterdiği davranışa ısıl özellik olarak ifade edilirken uygulanan elektrik alanına karşı gösterdikleri tepkiye de elektriksel özellikleri denir. Isı kapasitesi, ısıl iletkenlik ve ısıl genleşme termal değişkenlerdir. Elektronların iletkenlikteki rolü ve malzemelerin iletkenlik kabiliyetini etkilerken enerji bant yapısı da elektriksel iletkenlik değişkeni olarak kabul edilir. Malzemenin mekanik davranışı ise uygulanan yüke ve kuvvete karşı malzemenin gösterdiği direnci veya deformasyonu yansıtır. Rijitlik (sert davranış), dayanım (mukavemet) , sertlik ve süneklik tasarımında kullanılan temel parametreleri oluşturur [2] .

Metallerin ve metalik alaşımların bütün bu özelliklerinin bilinmesi, en ileri teknolojik tasarımlarının geliştirilmesi için önemli rol oynar.

#### 1.2. Isıl Özellikler

##### 1.2.1. Isı

“ Bir maddenin bütün moleküllerinin sahip olduğu çekim potansiyel enerjileri ile kinetik enerjilerinin toplamına ısı denir” [3].Bir maddeden başka bir maddeye aktarılan ısı bir enerji çeşididir, diğer enerjilere dönüşebilir. Birimi kalori veya jouledir. Calorimetre kabı ile ölçülür.

Bir maddedeki moleküllerin kinetik enerjileri ile moleküller arası bağlanma enerjilerinin toplamına ısı enerjisi denir. Isı enerjisi, foton adı verilen enerji paketleri olduğu için boşlukta da yayılır. Diğer bir deyişle ısı enerjisi maddeleri meydana getiren moleküllerin hareket enerjileridir. Bu hareketin hızı maddenin ısisını belirler, hareketin hızı ne kadar çoksa maddenin ısisı da o kadar çoktur [3].

Isı kavramı ile karıştırılan başka bir kavram vardır ki, o da iç enerji kavramıdır. İç enerji, bir cismin atom veya moleküllerinin

hareketleri ile oluşan tüm enerjilerinin (potansiyel ve kinetik enerji) toplamıdır ve  $U$  ile gösterilir. İç enerji maddenin miktarına bağlıdır. Örneğin;  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki  $150\text{ g}$  su ile yine  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki  $500\text{ g}$  suyun iç enerjileri kıyaslırsak  $500\text{ g}$  suyun iç enerjisinin daha büyük olduğu görülür. Başka bir örnekte  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki  $100\text{ g}$  su ile  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki  $100\text{ g}$  suyun iç enerjileri kıyaslanacak olursa yüksek sıcaklığa sahip olan daha çok iç enerjiye sahip olacaktır. “Farklı sıcaklıklardaki bu iki su karıştırılırsa sıcaklık farkından dolayı sıcak sudan soğuk suya doğru ısı transferi olacaktır “[4].

### 1.2.2. Sıcaklık

Sıcaklık, bir cismin moleküllerinin ortalama kinetik enerjilerinin bir ölçütüdür. Sıcaklık bir enerji türü değildir, maddenin moleküllerinin ortalama kinetik enerji ile doğru orantılıdır bir büyüklüktür. Tüm moleküllerin hareket enerjileri eşit değilse her birinin hareket enerjileri tek tek eklenip parçacık tanesine bölünerek maddenin ortalama kinetik enerjisi bulunur. Bu yüzden cisimlerin sıcaklığından bahsederken ortalama kinetik enerjisi kastedilir. Moleküller hızlandırılırsa maddenin ortalama kinetik enerjisi artar ve dolayısı ile sıcaklığı artar, yavaşlarsa maddenin sıcaklığı azalır. Sıcaklık maddenin miktarına ve cinsine bağlı olmayan bir büyüklüktür.

Isı hesaplanarak ölçülen bir nicelikken sıcaklık doğrudan ölçülür. Sıcaklığı ölçen alete termometre denir. Bunlar genelde Kelvin, Fahrenheit, Celsius, Reomür’dür.

### 1.2.3. Isı transferi

Atomik boyutta ısı transferi için iki ayrı mekanizma vardır; bunlardan ilki örgü titreşimleridir. Örneğin bakır atomları sadece buldukları konumlarda titreşim yapabilirler. Fakat aldıkları ısıyla enerjileri ve dolayısı ile titreşim genlikleri artar. Atomlar artan enerjilerinin bir kısmını komşu atomlara aktarırlar. Böylece titreşim dalgaları bakırın bir ucundan diğerine ulaşır. İkincisi serbest elektronlardır. Bakır, demir gibi iletken maddelerin atomlarındaki elektronların bir kısmı katı ortamda serbest halde dolaşırlar. Böylece bakırın bir ucundan diğer ucuna serbestçe enerji taşırlar. Elektriği iyi ileten metaller ısıyı da iyi iletirler [5].

Farklı iki ortamın sıcaklıkları farklı ise yüksek sıcaklıklı ortamdan düşük sıcaklıklı ortama ısı akışı olur. Isının akışı ortam sıcaklıklarındaki farklılığa bağlı olduğu kadar, ortamların ve yüzeylerin özelliklerine de bağlıdır. Isının bir ortamdan diğerine aktarılması üç farklı mekanizma ile mümkündür.

Bunlar; Kondüksiyon (İletim), Konveksiyon (Taşınım), Radyasyon ( Işınım)'dır.

Kondüksiyon (İletim) yoluyla ısı aktarımının temel denklemi (1.1)'deki Fourier denklemidir. Isı derecesi değişmeyen birim yüzeyden geçen ısı akışının hızı ile yüzeydeki sıcaklık değişimleri arasındaki orantıyı ifade eder. Bu denklemde A = izotermal yüzeyin alanı; Q= yüzeye normal yöndeki ısı akış hızı; T = sıcaklık; x =ölçülen mesafe (yüzeye dik ); K ısı iletkenlik katsayısını ifade eder.

$$\frac{dQ}{dA} = -K \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Denklemdaki kısmi türevin sebebi sıcaklığın konum ve zamana bağlı değişimini göstermektedir. Negatif işaretli olması, ısı akışının sıcak taraftan soğuk tarafa doğru ve ısı değişimlerinin ısı akış yönü ile zıt işaretli olduğunu gösterir. K ısı iletkenlik katsayısı maddenin cinsine bağlıdır. .

Maddenin yer değiştirmesiyle gerçekleşen ısı iletimine konveksiyon denir. Maddelere ısı verdiğimizde genellikle hacimlerinde artış olur ve dolayısıyla özkütlelerinde azalma görülür. Özkütle farkı maddelerin yer değiştirmesine sebep olur. Örneğin ısınan havanın yoğunluğu azalır ve yükselmeye başlar. Onun yerini soğuk hava alır ve o da ısınarak yükselir. Bu olay ısı denge olana kadar devam eder.

Işıma yoluyla ısı yayılmasına en iyi örnek güneşin dünyamızı ısıtmasıdır. Işıma elektromanyetik dalgalarla iletilen ısı türüdür. Tüm cisimler her sıcaklıkta ışıma yapabilirler. Üzerine gelen dalgaları iyi soğuran yüzeyler daha çok ısınırken yansıtıcı yüzeyler daha az ısınır.

#### 1.2.4. Isı sığası

Bir katı malzeme ısıtıldığında, sıcaklığın artması malzemenin bir miktar ısı enerjisini absorbe ettiğini gösterir. Isı kapasitesi, bir malzemenin dış ortamdan ısı absorblama kabiliyetinin bir göstergesi olup sıcaklığı bir birim arttırmak için gerekli olan enerji miktarına karşılık gelir. Matematiksel olarak ısı kapasitesi C aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (1.2)$$

Burada  $dQ$  ,  $dT$  kadar sıcaklık değişimi meydana getirmek için gerekli enerji miktarıdır. Isı kapasitesi bir mol malzeme için ifade edilir. Bazen ısı kapasitesi yerine, birim kütle başına ısı kapasitesini belirten ve c ile gösterilen, özgül ısı kavramı da kullanılmaktadır ki bunlar değişik birimlere sahiptir.

Isı iletiminin olduğu ortam şartlarına bağlı olarak ısı kapasitesi iki şekilde ölçülebilir. Numune hacminin sabit değerinde korunduğu birinci durumdaki ısı kapasitesi  $C_v$  ile dış basıncın sabit tutulduğu ikinci durumda ise  $C_p$  ile gösterilir.  $C_p$  her zaman  $C_v$ 'den büyüktür ancak oda sıcaklığı ve altındaki sıcaklıklarda, çoğu katı malzemeler için arasındaki fark önemsenmez [2].

#### 1.2.4.1. Fonon ısı sığası

Çoğu katıların ısı enerjisi soğurması atomların titreşim enerjilerindeki artış ile olur. Katı malzemelerin atomları, yüksek frekanslarda ve nispeten düşük genliklerde sürekli titreşim hareketi yapar. Atomlardaki bu titreşim hareketleri birbirine bağımlı olup, atomlar arası bağlar nedeniyle komşu atomlar ile birlikte gerçekleşir. Bu titreşimler kafes dalgaları üretecek şekilde birbiriyle uyumludur. Kafes dalgaları kristal içinde ses hızı ile ilerleyen, kısa dalga boylarına sahip elastik dalgalar olarak düşünülür. Bir malzemede titreşim kaynaklı ısı enerjisi, belirli bir dağılım ve frekans aralığına sahip elastik dalgadan meydana gelir. Sadece belirli enerji değeri alabilen ve kafes dalgası titreşim enerjisinin bir birim miktarına fonon denir. Fonon, elektromagnetik ışınımın birim miktarı olan fotona benzetilir ve elastik dalga özelliği ile ısı iletkenlikte enerjinin taşınmasına katkı sağlar [2].

#### 1.2.4.2. Elektronik ısı sığası

T sıcaklığında dengede bulunan bir sistemdeki her bir parçacığın ortalama kinetik enerjisi, gazların kinetik teorisinde  $(3/2)k_B T$  olarak verilmektedir. Buna göre parçacıkların, 1 mol gramının ortalama enerjisi,

$$E = N_A \left( \frac{3}{2} k_B T \right) = 3RT \quad (1.3)$$

olur.

(1.3) eşitliğinde enerjinin sıcaklığa bağlı türevi alınarak elektronların özısıya katkısı,

$$C_{elektron} = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_v = \frac{3}{2} RT \approx 3 \text{Kal} / (\text{mol} - \text{K}) \quad (1.4)$$

şeklinde bulunur. Metallerin özısısı, fononlardan gelen katkı da hesaba katılarak

$$C_V = C_{fonon} + C_{elektron} \quad (1.5)$$

yazılabilir. (1.5) eşitliği yüksek sıcaklıklarda

$$C_V = 3R + \frac{3}{2}R = 4,5R \approx 9 \text{ mol/K} \quad (1.6)$$

olmasını gerektirir [1]. Deney sonuçları ise metallerin özısılarının yüksek sıcaklıklarda hemen hemen  $3R$ 'ye eşit olduğunu göstermektedir. Yine kesin ölçümler, elektronun ölçülen özısı değerini klasik  $(3/2)R$  değerinden 100 kat daha küçük olduğunu göstermektedir. [1]

Klasik Serbest Elektron Gazı Modelinin elektron için tahmin ettiği  $(3/2)R$  büyüklüğündeki özısı ile ilgili olarak ortaya çıkan güçlük Pauli Dışarlama İlkesi ve Fermi-Dirac Dağılım fonksiyonunun kullanılması sonucu ortadan kaldırıldı. Sommerfeld Serbest Elektron Modeli olarak bilinen bu modelde bir cisim mutlak sıfır sıcaklığından başlanarak ısıtıldığında; her elektron, klasik olarak tahmin edilen  $k_B T$  enerjisini kazanmaz. Fakat sadece Fermi enerjisi civarındaki bir  $k_B T$  aralığı içinde bulunan yörüngelerdeki elektronlar termal olarak uyarılabilirler.

### 1.2.5. Isıl genleşme

Çoğu katı malzemeler ısıtıldığında genleşir, soğutulduğunda ise büzülür. Bir katı malzemede sıcaklığa bağlı olarak uzunluğundaki değişimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{l_s - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_s - T_0) \quad (1.7 a)$$

veya

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T \quad (1.7 b)$$

Olur. Burada  $l_0$  ve  $l_s$  sırasıyla sıcaklığın  $T_0$  'dan  $T_s$  'ye değişmesiyle başlangıç ve son uzunluklarını göstermektedir.  $\alpha_l$  parametresi ısıl genleşme katsayısı olarak adlandırılır. Bu malzemeye özgü bir özellik olup ısıtmadan sonra malzemenin ne kadar genleşeceğini göstergesidir. Doğal olarak ısıtma ve soğutma bir katının boyutlarını etkiler, dolayısıyla hacimde de bir değişim söz konusudur. Sıcaklıkla hacimsel değişim aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.



$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T \quad (1.8)$$

Burada  $\Delta V$  ve  $V_0$  sırasıyla hacim değişimi ve başlangıç hacmidir,  $\alpha_v$  ise ısıl genleşme katsayısını belirtir. Çoğu malzemelerde  $\alpha_v$  değeri anizotropiktir, yani kristalografik yone bağlı olarak değişir. Isıl genleşmesi izotropik olan malzemerde  $\alpha_v$  yaklaşık olarak  $3\alpha_l$  'e eşittir [2].

### 1.2.6. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik, bir maddenin farklı sıcaklıktaki iki bölgesi arasında, yüksek sıcaklıktan, düşük sıcaklığa ısının iletilmesi olayıdır. Bir malzemenin ısı iletim kabiliyetini karakterize eden bu özelliğe ısıl iletkenlik denir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$Q = -K \frac{dT}{dx} \quad (1.9)$$

Burada Q, birim alandan birim zamanda gerçekleşen ısı akısını, K ısıl iletkenliği ve  $\frac{dT}{dx}$  ise ortamın sıcaklık gradyentini belirtir. Q ve K'nın birimleri sırasıyla  $W/m^2$  ve  $W/m.K$  'dir. Denklem (1.9) sadece kararlı hal ısı akışı, yani ısı akısının zamanla değişmediği durumlarında geçerlidir. Ayrıca (1.9) denkleminde eksi işareti, sıcaklık gradyentinin negatif olmasıyla ilgilidir [2].

#### 1.2.6.1. Isı iletim mekanizmaları

Katı malzemelerde ısı, fonon (kafes titreşim dalgaları) ve serbest elektronlar ile iletilir. Isıl iletkenlik, bu mekanizmaların her ikisiyle ilişkilidir ve toplam iletkenlik bu iki etkinin toplamına eşittir.

$$k = k_f + k_e \quad (1.10)$$

Burada  $k_f$  ve  $k_e$  sırasıyla kafes titreşim dalgaları (fonon) ve serbest elektronun ısıl iletkenlikleridir ve bunlardan genellikle biri diğerine göre daha etkili olabilmektedir. Fononların taşıdığı ısı enerjisi, titreşim dalgalarının doğrultusunda iletilir. Burada  $k_f$  etkisi, sıcaklık gradyeni bulunan bir kütlenin kesitinde, yüksek sıcaklık bölgelerinden, düşük sıcaklık bölgelerine fononların net hareketiyle sağlanır [2].

Elektronlarca sağlanan ısı iletkenlikte elektronik ısı iletkenliğini sağlayan serbest elektronlardır. Numunenin sıcak bölgesindeki serbest elektronların sıcaklıktan dolayı kinetik enerjileri artar. Bu elektronlar daha sonra numunenin soğuk bölgesine geçmekte, burada atomlarla çarpışması veya kristaldeki diğer kusurlarla etkileşime girmesi sonucu kinetik enerjilerinin bir kısmını atomlara titreşim enerjisi olarak aktarır. Elektronik ısı iletkenliğinin toplam ısı iletkenliğe olan bağıl katkısı, serbest elektron konsantrasyonu ile artar; bu, ısı iletim olayında daha çok elektronun rol alacağı anlamına gelir [2].

### 1.2.6.2. Metaller

Yüksek saflıktaki metallerde, elektronların ısı iletimine olan katkısı, fononların katkısından daha fazladır, bunun nedeni elektronların fononlara göre daha az saçılır olması ve daha yüksek hızlara sahip olmasıdır. Metallerin ısı iletkenliği sağlayan çok sayıda serbest elektrona sahip olması nedeniyle, aynı zamanda ısı iletkenlikleri de oldukça iyidir [2].

Saf metallerde hem elektrik hem de ısı iletkenlik serbest elektronlarla yapıldığı için, teorik yaklaşımlar bu iki iletkenliğin, Wiedemann-Franz kanununa göre aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi ilişkili olması gerektiğini ileri sürmüştür.

$$L = \frac{k}{\sigma T} \quad (1.11)$$

Burada  $\sigma$  elektrik iletkenliği, T mutlak sıcaklık, L ise bir sabittir. Isı enerjisi tamamen serbest elektronlar tarafından iletiliyorsa, teorik değeri  $2,44 \times 10^{-8} \Omega - W / (K)^2$  olan L sıcaklıktan bağımsız olmakta ve değeri tüm metaller için aynı olmaktadır [2].

## 1.3. Elektriksel Özellikler

### 1.3.1. Ohm kanunu

Bir iletken katı malzemenin en önemli elektriksel özelliklerinden birisi, elektrik akımını kolaylıkla iletmesidir. Ohm kanunu, akım I ve uygulanan voltaj V ile aşağıdaki şekilde ilişkilidir.

$$V = I \times R \quad (1.12)$$

Burada R akımın geçtiği malzemenin direncidir. V, I ve R'nin birimleri sırasıyla volt (J/C), amper (C/s) ve ohm (V/A)'dır. R'nin değeri numune geometrisine göre değişir ve birçok malzeme için akımdan bağımsızdır. Elektriksel öz direnç  $\rho$  ise numune geometrisinden bağımsızdır ve aşağıda ifade edildiği gibi R ile ilişkilidir:

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (1.13)$$

Burada  $l$  gerilimin ölçüldüğü iki nokta arasındaki mesafe, A ise akımın geçtiği yöne dik kesit alanıdır.  $\rho$ 'nun birimi ohm-metre ( $\Omega \text{ m}$ )'dir. Ohm kanunu denklem (1.12) kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\rho = \frac{VA}{Il} \quad (1.14)$$

### 1.3.2. Elektrik iletkenlik

Bir malzemenin elektriksel özelliklerini belirtmek için, elektrik iletkenliği  $\sigma$  kullanılır. Bu basit olarak öz direncin tersidir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.15)$$

Bu malzemenin elektrik akımını iletme kabiliyetinin göstergesidir.  $\sigma$ 'nın birimi ohm-metrenin tersidir veya (1/ohm.m)' dir. Aşağıda elektriksel özelliklerle ilgili incelemede hem öz direnç, hem de iletkenlik kullanmıştır [2].

Denklem (1.12)'e ilave olarak ohm kanunu aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$J = \sigma \varepsilon \quad (1.16)$$

Burada J akım yoğunluğu olup, numunenin birim alanından geçen akım değerine eşittir (I/A).  $\varepsilon$  elektrik alan şiddetidir veya birbirinden belirli bir mesafedeki iki nokta arasındaki potansiyel gerilim farkıdır.

$$\varepsilon = \frac{V}{l} \quad (1.17)$$

Katı malzemelerin elektrik iletkenliği birbirine göre 27 kat gibi, çok büyük bir aralıkta değişirken, diğer fiziksel özellikleri bu denli geniş bir aralığa sahip değildir. Malzemeleri sınıflandırmada kullanılan önemli bir özellik, elektrik akımının iletim kabiliyetidir ve bu sınıflandırmada iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç temel grup vardır. Metaller iyi bir iletkendir, tipik olarak  $10^7 (\Omega m)^{-1}$  mertebesinde elektrik iletkenliğine sahiptirler. Diğerleri ise  $10^{-10}$  ile  $10^{-20} (\Omega m)^{-1}$  arasında değişen çok düşük elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir; bunlar, elektriksel açıdan yalıtkan kabul edilir. Orta seviyede iletkenliğe sahip olanlar, genellikle  $10^{-6}$  ile  $10^4 (\Omega m)^{-1}$  arasında bir değere sahiptir ve yarı iletken olarak adlandırılır [2].

### **1.3.3. Elektronik ve iyonik iletkenlik**

Elektrik akımı, dışardan bir elektrik akımının uygulanmasıyla, elektriksel olarak yüklenen parçacıkların hareket etmesi sonucunda oluşur. Pozitif yüklü parçacıklar alan doğrultusunda, negatif yüklü parçacıklar ise ters yönde ivmelenir. Çoğu katı malzemelerde, akım elektronların akışından kaynaklanır ve bu elektronik iletkenlik olarak adlandırılır. Diğer taraftan, iyonik malzemelerde akım, yüklü iyonların hareketleri ile oluşur ve bu iyonik iletkenlik olarak adlandırılır [2].

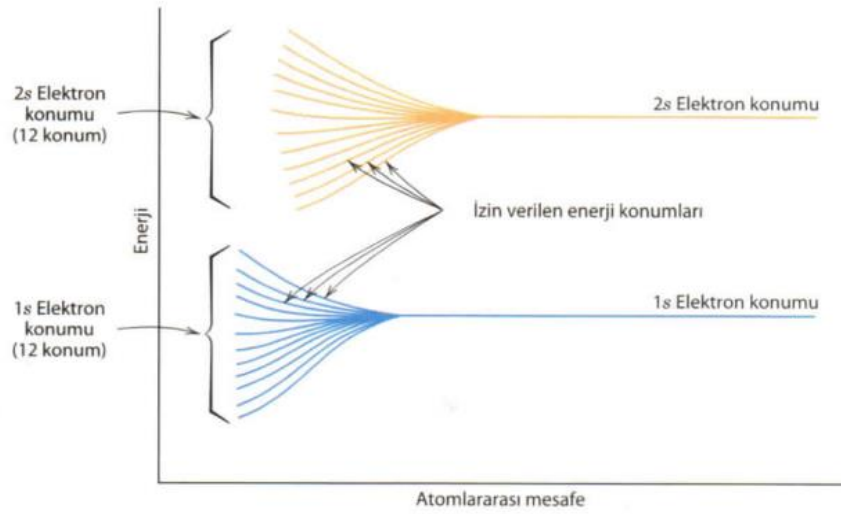
### **1.3.4. Katılarda enerji bant yapıları**

Bütün iletkenler, yarıiletkenler ve çoğu yalıtkan malzemelerde sadece elektronik iletkenlik söz konusudur ve elektrik iletkenliğinin büyüklüğü, iletkenlik işlemine katılan elektronların sayısına bağlıdır. Ancak, her bir atomdaki elektronların tamamı elektrik alanından etkilenerek ivmelenmez. Belirli bir malzemede, elektrik iletkenliğini sağlayan elektronların sayısı, elektronların dizilişine veya enerji seviyesine ve bu konumlara yerleşimiyle ilgilidir. Bu konular oldukça karmaşık olup kuantum mekaniği prensiplerini kapsar [2].

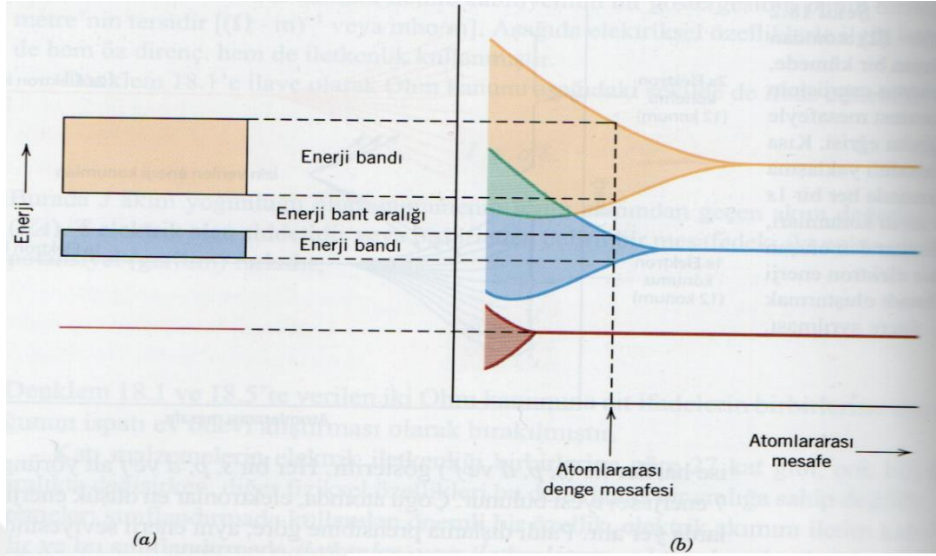
Her bir atom için, elektronların yer aldığı belirli enerji seviyeleri bulunur ve bunlar yörünge ve alt yörüngeler şeklinde düzenlenmiştir. Yörüngeler tam sırasıyla (1,2,3, vs.), alt yörüngeler ise harfler ile (s,p,d ve f) gösterilir. Her bir s, p, d ve f alt yörünge için sırasıyla 1, 3, 5, ve 7 enerji seviyesinde bulunur. Çoğu atomda, elektronlar en düşük enerji seviyesine sahip konumlarda yer alır. Pauli dışarlama prensibine göre aynı enerji

seviyesinde bulunan iki elektron zıt yönde döner. İzole bir atomdaki elektronların düzeni, enerji seviyelerine göre elektronların dizilişini gösterir [2].

Bu aşamada katı malzemeler için bu kavramların bazıları değerlendirilecektir. Bir katının  $N$  sayısında atomdan meydana geldiği düşünülebilir ve başlangıçta birbirinden ayrı olan bu atomlar kristal malzemedeki düzenli atomsal yapıyı oluşturmak için bir araya gelerek birbirine bağlanır. Atomlar arası mesafenin nispeten büyük olduğu durumlarda, her bir atom diğerlerinden bağımsızdır ve izole bir atomda olduğu gibi atomik enerji seviyelerine dizilişine sahiptir. Ancak atomların bir başka atoma çok yaklaşması durumunda, komşu atomun elektronları ve çekirdeği tarafından etkilenir. Bu etkiye katıda her bir atom konumu, birbirine çok kısa mesafeli bir seri elektron konumlarına ayrılır ve oluşan konumlara elektron enerji bandı denir. Burada ayrılan enerji seviyelerinin genişliği, atomlar arası mesafeye bağlıdır (şekil 1.1). Ayrılma etkileşimi, atomlar bir araya geldiğinde en dış elektron yörüngesinden itibaren başlar. Her bir bant içerisinde, enerji konumları farklıdır ancak iki komşu konum arasındaki fark oldukça küçüktür. Şekil (şekil 1.2b'de görüleceği gibi denge mesafesinde, çekirdeğe en yakın elektron alt yörüngesinde bant oluşumu meydana gelmez. İlave olarak, komşu iki bant arasında bir aralık (gap) mevcuttur, ayrıca şekilde gösterildiği gibi, normal olarak bu enerji bandında elektron bulunmaz. Katılarda elektron bant yapılarının tipik bir gösterimi şekil 1.2a' de verilmiştir [2].



Şekil 1.1. (  $N=12$ ) Atomdan oluşan bir kümede elektron enerjisinin atomlar arası mesafeye değişim eğrisi [2].



Şekil 1.2. (a) Bir katı malzeme için atomlar arası denge mesafesindeki elektron enerji bant yapısının klasik gösterimi. (b) bir atom kümesi için elektron enerjisinin atomlar arası mesafe ile değişimi [2]

Her bir banttaki enerji seviyeleri,  $N$  sayısındaki atomlar tarafından katkıda bulunan tüm enerji seviyelerinin toplamına eşittir. Örneğin  $s$  bandı  $N$  enerji seviyesinden oluşurken,  $p$  bandı  $3N$  enerji seviyesinden oluşur. Enerji seviyelerinde elektronların bulunmasına göre, her bir enerji seviyesinde zıt dönme hareketine sahip iki elektron bulunur. Ayrıca bantlar izole atomlardaki enerji seviyesine karşılık gelen elektronları içerir, örneğin katıdaki bir  $4s$  bandı, bu izole atomun  $4s$  elektronları bulunur. Doğal olarak, boş bantlar söz konusu olabilir ve bu bantlar sonra kısmen doldurulacaktır [2].

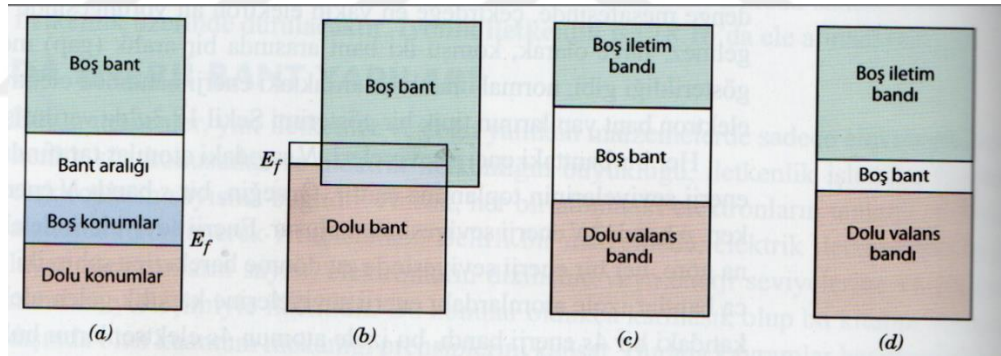
Bir katı malzemenin elektriksel özellikleri elektron bant yapısının, yani en dış elektron bant düzeni ve buradaki elektronların bulunma şekline bağlıdır.

Bir sıcaklığın  $0K$  olduğu durumda, dört farklı bant yapısının oluşması mümkündür. İlk olarak, elektronlar en dıştaki bantta kısmen yer alır (şekil 1.3a). Fermi enerjisi  $0K$  'dedolu olan mevcut elektron enerji seviyelerinin en yüksek konumuna karşılık gelir ve  $E_f$  ile gösterilir. Bu enerji bant yapısı, özellikle bir tek  $s$  valans elektronuna sahip olan bazı metallerde (örneğin bakır) belirgindir. Her bir bakır atomu bir  $4s$  elektronuna sahiptir, ancak  $N$  atomdan oluşan bir katı için, bu  $4s$  bandı  $2N$  elektronu bulundurabilir. Böylece

4s valans bandında mevcut elektron konumlarının sadece yarısında elektronlar yer alır. Ayrıca metallerde şekil 1.3b’ de bulunan ikinci bant yapısı için, dolu bant ile boş bant üst üste gelmiştir. Magnezyum bu bant yapısına sahiptir [2].

Her bir izole Mg atomunun 3s enerji seviyesinde, iki 3s valans elektronu mevcuttur. Ancak bir katı oluştuğunda, 3s ve 3p bantları üst üste gelir. Bu örnekte, 0K sıcaklık için, N sayıdaki atomun her bir enerji seviyesinde iki elektron olmak üzere N enerji seviyesi dolmuştur. Fermi enerjisi, bu enerji seviyesinin altındaki enerji olarak alınır [2].

Son iki bant yapısı birbirine benzerdir. Burada boş bir iletim bandı ile elektronlar tarafından tamamen dolu olan bir valans bandı, enerji bant aralığı ile ayrılmıştır. Çok saf malzemelerde, bu enerji aralığında elektron bulunmaz. İki bant yapısı arasında bu fark, enerji bant aralığının büyüklüğünden kaynaklanır ve yalıtkan olan çoğu malzemeler için bu enerji aralığı nispeten daha geniştir (şekil 1.3c), yarıiletkenlerde ise dardır (1.3d). bu iki bant yapıları için Fermi enerjisi bu bandın merkezine yakın düşmektedir [2].



Şekil 1.3. Katılarda 0K’de olası çeşitli elektron bant yapıları [2]

### 1.3.5. Bant ve atomik bağ modeline göre iletkenlik

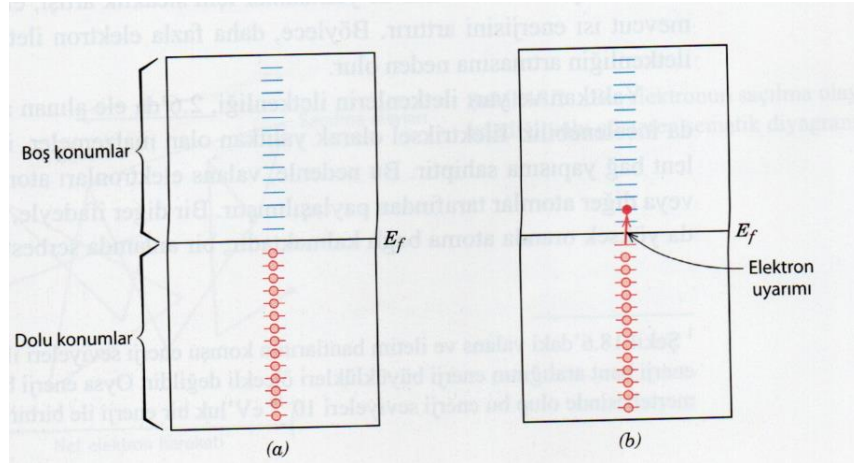
Burada, anlaşılması gereken bir başka önemli nokta, sadece Fermi enerji seviyesinden daha yüksek enerjiye sahip elektronların elektrik alanından etkilenerek ivmelenmesidir. İletkenliği sağlayan elektronlar, serbest elektron olarak tanımlanır. Yarıiletken ve yalıtkanlarda boşlukta bir elektrik yüküne sahiptir. Boşlukların enerjileri  $E_f$ ’den daha az olmasına karşın, iletme katkıda bulunurlar. Sonraki kısımlarda da belirtildiği gibi, elektrik iletkenliği serbest elektron ve boşluk sayısının doğrudan bir fonksiyonudur.

Ayrıca, iletken ile iletken olmayan malzemeler arasındaki fark, yük taşıyıcı durumundaki serbest elektron ve boşluk sayısına bağlıdır [2].

### 1.3.5.1. Metaller

Bir elektronun serbest hale geçmesi için,  $E_f$  enerji seviyesi üzerindeki boş bir enerji seviyesine uyarılması gerekir. Şekil 1.3a ve 1.3b'de gösterilen bant yapılarına sahip metallerde, elektronlarca dolu olan  $E_f$  enerji seviyesine yakın çok sayıda komşu boş enerji seviyeleri mevcuttur. Böylece şekil 1.4'te görüleceği gibi, düşük enerjili  $E_f$  seviyesine yakın elektronların boş enerji seviyelerine uyarılması için daha az enerji gerekir. Genel olarak, bir elektrik alan tarafından sağlanan enerji çok sayıdaki elektronu iletken konumlara (boş enerji seviyelerine) uyarmak için yeterli olur [2].

Metalik bağ modelinde, bütün valans elektronların serbest hareket kabiliyetine sahip olduğu ve bir elektron bulutu oluşturduğu, bunun sonucu olarak iyon çekirdeklerine ait kafesin tamamında üniform olarak dağıldığı kabul edilir. Bu elektronlar belirli bir atoma bağlı olmalarına rağmen, elektriği iletmesi için bu elektronların uyarılarak tamamen serbest duruma geçmesi gerekir. Sadece belirli orandaki elektronların uyarılmasına rağmen, yüksek iletkenlik için uyarılan bu elektron sayısı genelde yeterlidir [2].



Şekil 1.4. Bir metal için, elektronun uyarılmasından (a) önceki (b) sonraki konumları[2]



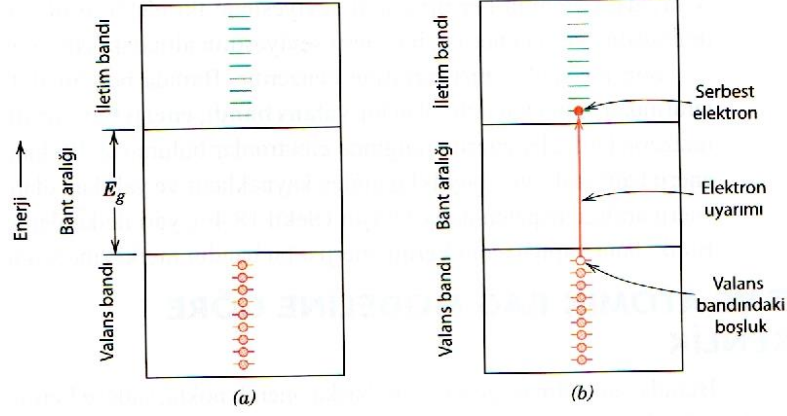
### 1.3.5.2. Yalıtkanlar ve yarı iletkenler

Yalıtkan ve yarı iletkenlerde, dolu valans bandının üst kısmına komşu boş enerji konumları mevcut değildir. Bu nedenle, elektronların serbest hale geçebilmesi için, enerji bant aralığını aşarak boş olan iletim bandının alt enerji seviyesine uyarılmalıdır. Bir elektrona, valans bandının üst enerji seviyesi ile iletim bandının alt enerji seviyesi arasındaki enerji farkı kadar, yaklaşık  $E_g$  enerjisine eşit miktarda bir enerji verilmesi durumunda, bant aralığının aşılması mümkün olur. Bu uyarılma işlemi şekil 1.5'te gösterilmiştir. Birçok malzeme için bu bant aralığı birkaç elektron volt mertebesindedir. Uyarılma enerjisi çoğunlukla elektrik kaynaklı değil, ısı veya ışık kaynaklı olup genellikle de ısı kaynaklıdır[2].

Isı enerjisiyle iletim bandına uyarılan elektronların sayısı, sıcaklığın yanı sıra enerji bant aralığının genişliğine bağlıdır. Verilen bir sıcaklıkta,  $E_g$  ne kadar büyük ise valans elektronun iletim bandındaki bir enerji konumuna uyarılma ihtimali o kadar düşüktür; bu, çok az sayıda iletken elektron sayısı anlamına gelir. Bir başka ifade ile bant aralığı ne kadar büyükse, verilen bir sıcaklık için elektrik iletkenliği o kadar düşük olacaktır. Bu nedenle, yarı iletken ile yalıtkanlar arasındaki fark bant aralığı genişliğine bağlıdır. Bu bant aralığı yarı iletkenler için dar, yalıtkanlar için nispeten geniştir [2].

Hem yarı iletken hem de yalıtkanlar için sıcaklık artışı, elektronların uyarılması için mevcut ısı enerjisini artırır. Böylece, daha fazla elektron iletim bandına uyarılır, bu da iletkenliğin artmasına neden olur.

Elektriksel olarak yalıtkan olan malzemeler, iyonik veya kuvvetli kovalent bağ yapısına sahiptir. Bu nedenle, valans elektronları atoma sıkıca bağlıdır veya diğer atomlar tarafından paylaşılır. Bir diğer ifade ile bu elektronlar kristal yapıda yüksek oranda atoma bağlı kalmaktadır; bir anlamda serbest hareket kabiliyetine sahip değildir. Yarı iletkenlerdeki bağ çoğunlukla kovalent olup, zayıftır. Bu valans elektronlarının atoma sıkı bir şekilde bağlanmadığı anlamına gelir. Sonuç olarak, yarı iletkenlere ait elektronların ısı uyarılması, yalıtkan malzemelere göre daha kolaydır [2].



Şekil 1.5. Yalıtkan ve yarı iletkenler için elektron konumları. Valans bandından iletim bandına bir elektronun uyarılması öncesi (a) ve sonrası (b) bir elektron ve bir boşluk oluşumu [2].

### 1.3.6. Elektron hareketliliği (Mobilitesi)

Bir malzemeye uygulanan elektrik alan, serbest elektronlar üzerine bir yük meydana getirir, bunun sonucunda negatif yüklü elektronlar uygulanan alana ters yönde ivmelenir. Kuantum mekaniğine göre, kusursuz bir kristalde ivmelenen bir elektron ve atomlar arasında herhangi bir etkileşim yoktur. Bu şartlar altında, elektrik akımında bir artışın meydana gelmesi için, tüm serbest elektronlara elektrik alanın uygulanması gerekir. Ancak bir elektrik alan uyguladığında, akım sabit bir değere ulaşır. Bunun nedeni, dış elektrik alana karşı koyan sürtünme kuvvetleri olarak isimlendirilen bir etkinin varlığıdır. Bu sürtünme kuvvetleri, empürite atomları, boşluklar, arayer atomları, dislokasyonlar gibi kristal kusurları ve hatta atomların kendi ısıl titreşimlerinin elektronlarda neden olduğu saçılmalardan kaynaklanır. Her saçılma olayı elektronun kinetik enerjisinin azalmasına ve hareket yönünün değişmesine neden olur. Bununla beraber, alana ters yönde bir elektron hareketi mevcuttur ve elektriksel yükün akışı, söz konusu elektrik akımına karşılık gelir [2].

Elektrondaki saçılma olayı, geçen elektrik akımına gösterilen direnç olarak ifade edilebilir. Bu saçılmanın boyutunu tanımlamak için, birkaç parametre kullanılır. Bunlar elektronun sürüklenme hızı ve elektronun hareketliliğidir. Sürüklenme hızı  $v_d$  elektrik

alanı etkisi altındaki elektronların, kuvvet yönündeki ortalama hızını gösterir. Sürüklenme hızı elektrik alanı ile aşağıdaki gibi ilişkilidir [2]:

$$v_d = \mu_e \mathcal{E} \quad (1.18)$$

Orantı sabiti  $\mu_e$ , elektronun hareketliliği olarak adlandırılır ve bu saçılma olayı sıklığının bir göstergesidir; birimi volt saniye başına metre karedir ( $m^2/Vs$ ).

Çoğu malzemelerin iletkenliği  $\sigma$ ,

$$\sigma = n |e| \mu_e \quad (1.19)$$

Burada  $n$  birim hacim başına serbest veya iletken elektron sayısı ve  $|e|$  bir elektron üzerindeki mutlak elektriksel yüküdür ( $1.6 \times 10^{-19}$ ). Böylece elektrik iletkenliği, hem serbest elektron sayısı hem de elektronların hareketliliği ile orantılıdır [2].

### 1.3.7. Metallerin elektriksel öz direnci

Metallerde, çok sayıdaki serbest elektronun Fermi enerji seviyesi üzerindeki boş enerji seviyelerine uyarıldığından, yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu nedenle, denklem 1.17'de verilen iletkenlik ifadesindeki,  $n$ 'nin değeri oldukça yüksektir [2].

Metallerde yapı kusurları iletkenliği sağlayan elektronlar için saçılma merkezleri olarak davranması nedeniyle, kusur sayısının artması, öz direnci artırır veya tersi iletkenliği düşürür. Bu kusurların konsantrasyonu, sıcaklığa, bileşime ve metal numunenin gördüğü soğuk şekillendirmenin derecesine bağlıdır. Gerçekten, bir metalin toplam öz direnci, ısıtma titreşim, empürite ve plastik deformasyondan kaynaklanan öz dirençlerinin toplamı olduğu deneysel olarak gözlenmiştir, yani saçılma mekanizması birbirinden bağımsız etkiye sahiptir. Bu matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\rho_{toplam} = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (1.20)$$

Burada  $\rho_t$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_d$  sırasıyla ısıtma, empürite ve deformasyonun neden olduğu öz direnci göstermektedir. Denklem 1.20 Matthiessen kuralı olarak bilinir [2].

### 1.3.7.1. Sıcaklığın etkisi

Saf metal için öz direnç  $-200^{\circ}C$  üzerindeki sıcaklıklarda, sıcaklıkla doğrusal olarak artmaktadır. Buna göre,

$$\rho_i = \rho_0 + aT \quad (1.21)$$

Burada  $\rho_0$  ve  $a$  malzemeye özgü sabitlerdir. Isıl öz direncin sıcaklığa olan bağımlılığı, artan sıcaklıkla elektron saçılma merkezleri olarak davranan atomların ısıl titreşim hareketleri ve diğer kafes düzensizliklerinin artışından kaynaklanır [2].

### 1.3.7.2. Empüritelerin etkisi

Empürite içeren bir katı çözeltilde, empürite öz direnci  $\rho_i$  atomsal olarak empürite konsantrasyonu  $c_i$  ile aşağıdaki şekilde ilişkilidir.

$$\rho_i = A c_i (1 - c_i) \quad (1.22)$$

Burada  $A$  bileşimden bağımsız bir sabit olup, hem empürite hem de ana metalin bir fonksiyonudur.

$\alpha$  ve  $\beta$  fazlarından oluşan iki fazlı bir alaşımın öz direncini belirlemek için aşağıdaki karışım kuralı ifadesi kullanılabilir:

$$\rho_i = \rho_{\alpha} V_{\alpha} + \rho_{\beta} V_{\beta} \quad (1.23)$$

Burada  $V$ 'ler ve  $\rho$ 'lar sırasıyla her bir faz için hacim oranlarını ve öz dirençleri göstermektedir [2].

### 1.3.7.3. Plastik deformasyonun etkisi

Plastik deformasyon da elektronların saçılmasına neden olduğu için, dislokasyon sayısındaki artış elektrik öz direncini artırır. Deformasyonun etkisi sıcaklık veya empüriteye göre çok azdır [2].

#### 1.4. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Malzemelerin belirli bir yük altındaki davranışlarına malzemelerin mekanik özellikleri adı verilir. Malzemelerin mekanik özellikleri, titiz bir şekilde tasarlanmış ve mümkün mertebe gerçek çalışma koşullarına yakın laboratuvar deneyleriyle belirlenir. Burada yükün uygulanma süresi, çevre koşulları ve yükün türü gibi faktörler dikkate alınır. Uygulanan yük, çekme, basma veya kayma türünde, büyüklüğü ise sabit veya zamanla değişken olabilir. Diğer taraftan yükün uygulanma süresi bir saniyenin bir dilimi olabileceği gibi yıllar mertebesinde uzun bir süreyi de kapsayabilir [2].

Belirli bir yük altında çalışan malzeme özellikleri, uygulanan yükün türüne göre değişiklikler gösterir. Genellikle bir konstrüksiyon veya makine elemanına statik veya dinamik olmak üzere iki farklı yük türünün etki ettiği görülür. Bu yük türüne bağlı olarak malzemelerin çeşitli meknik özellikleri belirlenir. Örneğin, malzemelerin önemli özelliklerinden bir tanesi olan yorulma dayanımı (değişen yük altında malzemenin ne kadar zaman sonra hasara uğradığının gösterimi) , uygulanan dinamik yük altındaki malzemenin davranışıyla tespit edilir. Malzemeler statik yük altında değişik kuvvetlere maruz kalabilirler. Genellikle makine elemanları veya kontrüksiyonlar çekme, basma,eğme, ve burulma olmak üzere beş farklı statik kuvvet altında çekilebilir. Dolayısıyla bu statik kuvvet türleri dikkate alınarak tatbik edilecek mekanik deneylerin tayin edilmsi gerekir [6].

Çekme, statik yük uygulanan malzemenin tek eksen doğrultusunda koparılmasıyla çalışılacak şekilde çekilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Basma ise, çekme işleminin tam tersi bir işlemdir. Malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru karşılıklı dış kuvvetlerin etkisi altında, malzemenin sıkıştırılması veya büzülmesi davranışı gösterecek şekilde basılması işlemine basma adı veilir. Makaslama, malzemeyi aynı eksen doğrultusunda fakat birbirine zıt yönde uygulanan statik kuvvet ile kesme veya makaslama etkisiyle hasara uğratmaya çalışması işlemi olarak tarif edilebilir. Eğme, tek taraflı ankastre bağlantılı veya iki mesnet üzerine yerleştirilmiş bir malzemeye, statik kuvvet uygulandığında, malzemedede belirli bir sehim ile şekil değişiminin meydana gelmesi işlemidir. Burulma, malzemenin boylaması eksenini doğrultusunda, birbirine zıt yönde döndürülmeye çalışılması sonucu meydana gelen şekil değişimi işlemidir [6].

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, çeşitli endüstriyel sektörler için oldukça önemlidir. Hatta bu amaç doğrultusunda, firmalarda kalite kontrol bölümleri

mevcuttur. İmalatçı bir firma üretimi için kullanacağı malzemenin istenilen nitelikte olup olmadığını anlamak için malzemenin mekanik özelliklerini bilmek ister [6].

### **1.5.Faz Diyagramları**

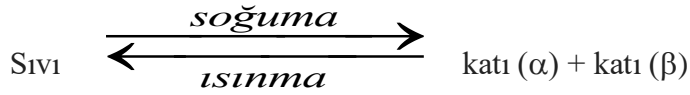
Bir maddenin kristal yapısı, atom dizilişleri, kimyasal içerikleri ve özellikleri aynı olan ve birbirinden ayırt edilebilir homojen hallerine faz denir. Fazlar arasındaki temel fark atomik dizilişler ve kristal yapıdaki temel farklılıklardır. Saf malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aynı olduğu için tek fazlı yapıya sahiptirler. Fakat birden fazla elementin oluşturduğu alaşımlarda çok fazlı bir yapı söz konusudur. Bir alaşımın mikroyapısı alaşımın kimyasal içeriğine, sıcaklığa ve soğutma hızına bağlı olarak değiştirilebilir. Dolayısıyla belli kimyasal yapıdaki bir alaşımın hangi sıcaklık değerinde hangi mikroyapıya sahip olacağını belirlemek önemlidir. Bunu anlamak için her bir alaşım için faz diyagramlarından faydalanılır. Bilindiği gibi maddenin katı, gaz, sıvı ve plazma olmak üzere dört temel fazı bulunmaktadır [6].Faz diyagramlarını, malzemenin farklı sıcaklık ve basınç altındaki mikro yapısını gösteren harita olarak nitelendirebiliriz [7,8]. Faz diyagramları genellikle sıcaklık, bileşim ve basınca bağlı olarak gösterilir. Aynı anda tek bir diyagram üzerinde bu üç özelliği gösterebilmek hem zor hem de karmaşık olduğundan faz diyagramları çizilirken ayrı ayrı “basınç-sıcaklık, basınç-bileşim ve sıcaklık-bileşim şeklinde çizilirler” [9].

Faz diyagramlarında sıcaklık birimi olarak °C veya K alınır. Faz diyagramları yardımıyla fazların türü, fazların bileşimi (bağ çizgisi kuralı ), fazların miktarı(levye kuralı) hakkında bilgiler sağlanabilir.

#### **1.5.1.İkili ötektik faz diyagramları**

Birbirlerini sınırlı oranda çözebilen iki elementli alaşım sistemlerinde sabit sıcaklıkta sıvı faz aynı anda iki ayrı katı faza dönüşür bu dönüşüme “ötektik reaksiyon” denir.

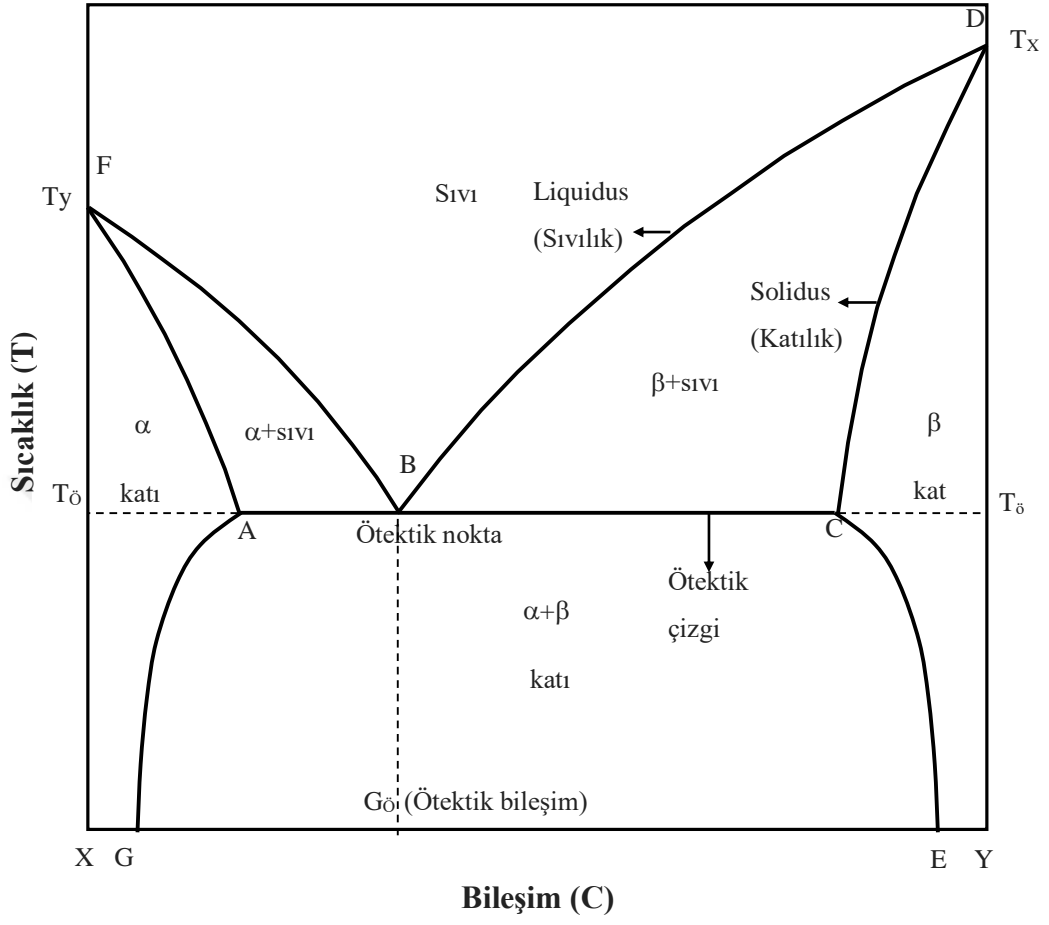
“İkili alaşımlarda ötektik bileşimdeki sıvı faz soğutulursa aynı anda iki farklı katı faz elde edilir. Yani sıvı alaşımın katılaştırılması neticesinde  $\alpha$  ve  $\beta$  katı fazlarının karışımı elde edilir.” Böylece ötektik reaksiyon,



Şeklinde tanımlanır [7].

Ötektik reaksiyona sahip alaşımlardaki ötektik dönüşüm noktası, en düşük ergime sıcaklığına sahip noktadır. Bu nedenle lehimleme işleminde kullanılan ilave dolgu telleri, ötektik alaşım oranında katılaştırılarak piyasaya sürülürler.

Şekil 1.6'da verilen ikili ötektik faz diyagramında yatay eksenin başlangıcında % 100 oranında X metali, sonunda ise % 100 oranında Y metali vardır. X-Y faz diyagramının ABC doğrusu altındaki herhangi bir sıcaklık değerinde, X metalinin sınırlı bir miktarı Y metalinin içerisinde ( $\alpha$  fazı) ve Y metalinin sınırlı bir miktarı X metalinin içerisinde ( $\beta$  fazı) çözünebilmektedir.  $\alpha$  fazı için çözünebilirlik sınırı A noktasına kadar artmakta, daha sonra F noktasına doğru azalarak sıfıra ulaşır.  $\alpha$  ile  $\alpha+\beta$  faz bölgelerini birbirinden ayıran çözünebilirlik sınırına solvüs (AG çizgisi) denir.  $\alpha$  ile  $\text{sıvı}+\alpha$  bölgelerini ayırabilen çözünebilirlik çizgisine solüdüs (AF çizgisi) denir. X-Y faz diyagramı üzerinde  $\beta$  fazı için çözünebilirlik sınırı ECD çizgisi ile gösterilir. CE çözünebilirlik sınır çizgisine solvüs, CD solüdüs adı verilir. X-Y faz diyagramı üzerinde üç farklı ikili faz bölgesi bulunur: (1)  $\text{sıvı}+\alpha$ , (2)  $\beta+\text{sıvı}$  ve (3)  $\alpha+\beta$  ikili fazlarıdır.  $\alpha+\beta$  faz bölgesi içerisinde, sıcaklık ve bileşim ne olursa olsun  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları bir arada bulunur. X metaline Y metali ilave edildiğinde alaşımın tamamen sıvı olduğu sıcaklık değeri, liquidüs çizgisi boyunca azalır. Buda Y metalinin ergime sıcaklığı X metali ilavesi ile azaldığı anlamına gelir. Aynı olay X metaline Y eklendiğinde de gerçekleşir. Yani Y nin ergime sıcaklığı X ilavesi ile azalmaktadır [6].



Şekil 1.6. İkili ötektik X-Y faz diyagramı [6]



## BÖLÜM 2

### MALZEMELERİN ISIL İLETKENLİĞİ, ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN DENEYSEL YÖNTEMLER

#### 2.1. Giriş

Bu bölümde malzemelerin ısı ve elektriksel iletkenliği ile mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel süreçler hakkında bilgi verilecektir.

#### 2.2. Isıl İletkenliğin Belirlenmesinde Kullanılan Deneysel Yöntemler

Isıl iletkenliğin belirlenmesinde kullanılan en yaygın metodlardan biri kararlı durum metodlarıdır. Kararlı durum metodu ile ısı iletim katsayısı ölçülürken malzemenin sıcaklığı değiştirilmeden birim alanda ısı akışı 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 metod 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” [10].

##### 2.2.1. Lineer ısı akış yöntemleri

Lineer (çizgisel-boyuna) ısı akış yöntemlerinde numunenin sahip olduğu toplam ısı akışı tek eksenlidir. Bu sebeple radyal doğrultudaki ısı kazançları ve ısı kayıpları minimuma indirilmelidir. Isı kayıp ve kazançlarını minimuma indirmek için numunenin etrafı yalıtım malzemeleri ile korumaya alınmalıdır.

Kararlı hal kuralları altında merkezden yayılan ısı kaybının veya kazancın olmadığı kabul edilerek, ısı iletkenlik bir boyutlu Fourier-Biot ısı iletim bağıntısı,

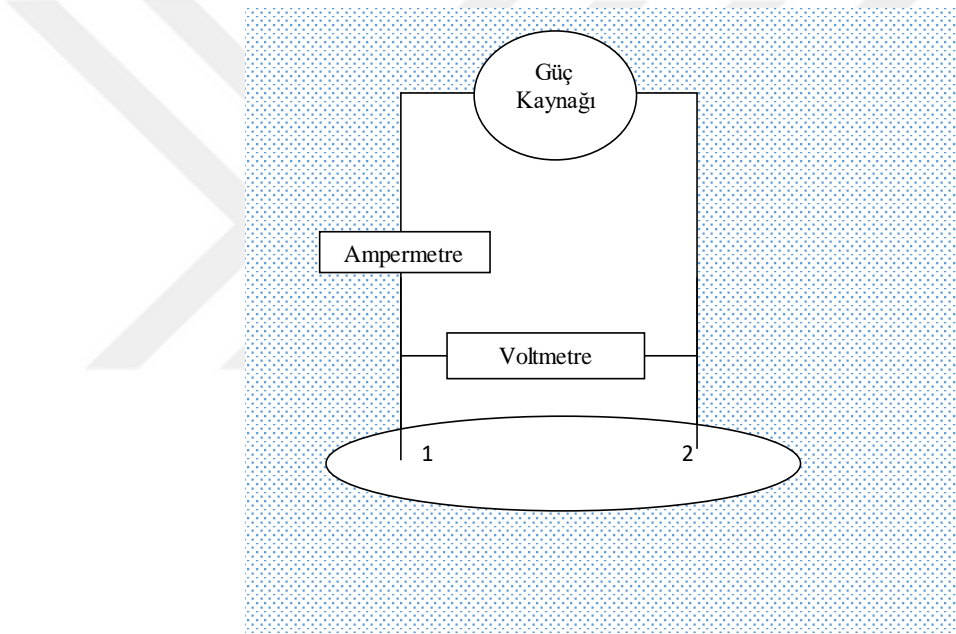
$$K = \frac{-Q\Delta x}{A\Delta T} \quad (2.1)$$

yardımıyla elde edilir [11,45]. Burada K değeri ısı iletkenlik katsayısı, Q ısı akış hızı, A numunenin birim kesit alanı,  $\Delta X$ ,  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarının ölçüldüğü noktaların birbirine olan uzaklığı,  $\Delta T = T_2 - T_1$  ise  $X_1$  ve  $X_2$  noktalarından ölçülen sıcaklık farkıdır. [3].

### 2.3. Elektriksel İletkenliğin Belirlenmesinde Kullanılan Deneysel Yöntemler

Elektriksel iletkenliğin ölçümünde genellikle kullanılan iki teknik vardır. Bunlardan ilki iki nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği ikincisi dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniğidir.

Şekil 2.1.'de gösterilen iki metal iletken kontak tel ile yapılan ölçüm yöntemi iki nokta elektriksel iletkenlik ölçümü olarak adlandırılır. Burada direncin belirlenebilmesi için V ve I değerinin doğrudan ölçülmesi yeterlidir. “Bu yöntemle yapılan direnç belirleme ölçümünde elde edilen R değeri kontakların direncini de içerir. Bu durumda elde edeceğimiz R direnci sadece numuneye ait olmayacaktır”.



Şekil 2.1. İki nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniğinin şematik gösterimi

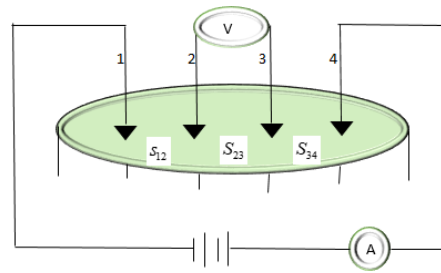
“İki-nokta ölçümü ile elde edilen  $R_{TOPLAM}$  direnç değeri numunenin direncinin dışında başka ek dirençleri de ihtiva eder. Bu ek dirençler iletken telin ( $R_{TEL}$ ), numuneye akımı aktaran iğne uçların (prob, pin), gerek ( $R_{PROB}$ ) gerekirse problemleri numuneye tutturarak iletken lehimin ( $R_{PASTA}$ ), kontak ucu ve numune temas ara yüzeyinin dirençlerinin ( $R_{KONTAK}$ ) toplamıdır. Bu nedenle numunenin hesaplanan  $\rho$  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 metalden yapılırlar. Bunun nedeni numunenin cinsine göre numuneye sert ve sağlam temasın “sağlanması ya da yüksek sıcaklığa dayanıklı olan metaller kullanılmasıdır” [12].

Elektriksel iletkenliğin ölçümünde kullanılan diğer bir yöntem olan dört nokta elektriksel iletkenlik ölçme tekniğinin şematik gösterimi şekil (2.2)'deki gibidir. Dört nokta elektriksel iletkenlik ölçme tekniğinde kullanılan kontakların dirençleri ölçümde hesaba girmez ve hesaplanan değer sadece numunenin öz direncidir. Bu amaçla kurulan düzende kontaklardan ikisi numune üzerinden akan akımı ölçmek için, ikisi ise herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek için kullanılır. Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi 1. ve 4. problemlardan akım, 2. ve 3. problemlardan ise potansiyel fark ayrı ayrı ölçüldüğü için iki nokta iletkenlik ölçüm tekniğindeki gibi kontak dirençleri ölçüme doğrudan dahil olmaz. Yine bu sistemde de kontak direnci söz konusudur ama ölçümün sonucunu çok az etkileyeceğinden ihmal edilebilir. Bu ölçüm tekniğinde öz direnç denklemi yukarıda verilen farklı olmamakla beraber (2.2) denklemindeki gibidir”.

$$\rho = \frac{V_{23}}{I_{14}} G \quad (2.2)$$

“Kontaktların aynı doğrultuda dizilmeleri en avantajlı ölçüm şekli olacaktır. Bu durumda G faktörünün belirlenmesi ve hesabı daha sadedir. Şekil 2.2.'de görülen s mesafesi ardışık kontaktlar arası mesafedir. Böyle bir ölçüm düzeneğinde yukarıda yer alan  $\rho$  öz direnç denklemindeki G katsayısı numune geometrisi, kontaktların numune üzerindeki konumuna ve kontaktlar arası s mesafesine bağlıdır. Uygulamada genel olarak yapılan kontak dizilişi  $S_{12} = S_{23} = S_{34} = S$  olan eşit aralıklı düzendir “[12].

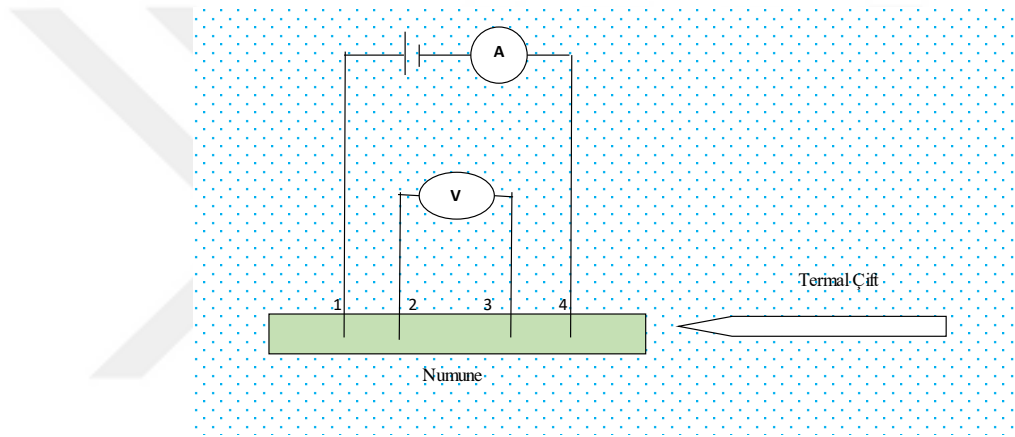


Şekil 2.2. Dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniğinin şematik gösterimi

Dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği çalışma prensibi Şekil 2.3.'te gösterilmiştir. Burada I akımı ve V voltajı multimetreden okunur. Termal çift ise o anki numunenin sıcaklığını ölçer. I akışı her durumda numune üzerinde 1. kontakta 4. kontakta doğrudur. Akım geçişi esnasındaki numune üzerine düşen gerilim 2. ve 3. kontaklardan okunur. Burada elektriksel iletkenlik aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\sigma_r = \frac{I}{V} \frac{1}{G} \quad (2.3)$$

Burada I numuneden geçen akım (A), V numune üzerinde gözlenen potansiyel fark (V), G geometrik düzeltme faktörü (cm) olarak tanımlanır.



Şekil 2.3. Dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği çalışma prensibi.

#### 2.4. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Deneysel Yöntemler

Malzemenin mekanik davranışı ise uygulanan yüke veya kuvvete karşı malzemenin gösterdiği direnci veya deformasyonu yansıtır. Rijitlik (sert davranış), dayanım (mukavemet) , sertlik ve süneklik tasarımında kullanılan temel parametreleri oluşturur [2].

Belirli bir yük altında çalışan malzeme özellikleri, uygulanan yükün türüne göre değişiklikler gösterir. Genellikle bir konstrüksiyon veya makine elemanına statik veya dinamik olmak üzere iki farklı yük türünün etki ettiği görülür. Bu yük türüne bağlı olarak malzemelerin çeşitli meknik özellikleri belirlenir. Malzemelerin çekme mukavemeti, akma mukavemeti, kopma mukavemeti, tokluk, süneklik, elastikiyet modülü, rezilyans modülü, poisson oranı, uzama miktarı, eğme mukavemeti, sürünme dayanımı ve sertlik özellikleri ise uygulanan statik yük altındaki malzemenin davranışıyla belirlenir[6].

Malzemelerin mekanik özelliklerini statik yük uygulayarak tespit etmek amacıyla kullanılan en yaygın metodlar şunlardır.

1. Çekme deneyi
2. Basma deneyi
3. Eğme deneyi
4. Burulma deneyi
5. Sertlik deneyi
6. Sürünme deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerini dinamik yük uygulayarak tespit etmek amacıyla uygulanan en yaygın deney metodları ise şunlardır.

1. Yorulma deneyi
2. Çentik derbe deneyi

#### **2.4.1.Çekme deneyi**

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ve mekanik davranışlarının değerlendirilmesinde en yaygın olarak kullanılan deney metodudur.

Çekme deneyi boyutları standartlara göre hazırlanmış bir numunenin, tek eksen doğrultusunda statik bir yük uygulanarak, belirli bir çekme hızında, belirli sabit bir sıcaklıkta numunenin koparılıncaya kadar çekilmesi işlemidir. Deneyde dikkat edilmesi gereken dört parametre vardır:

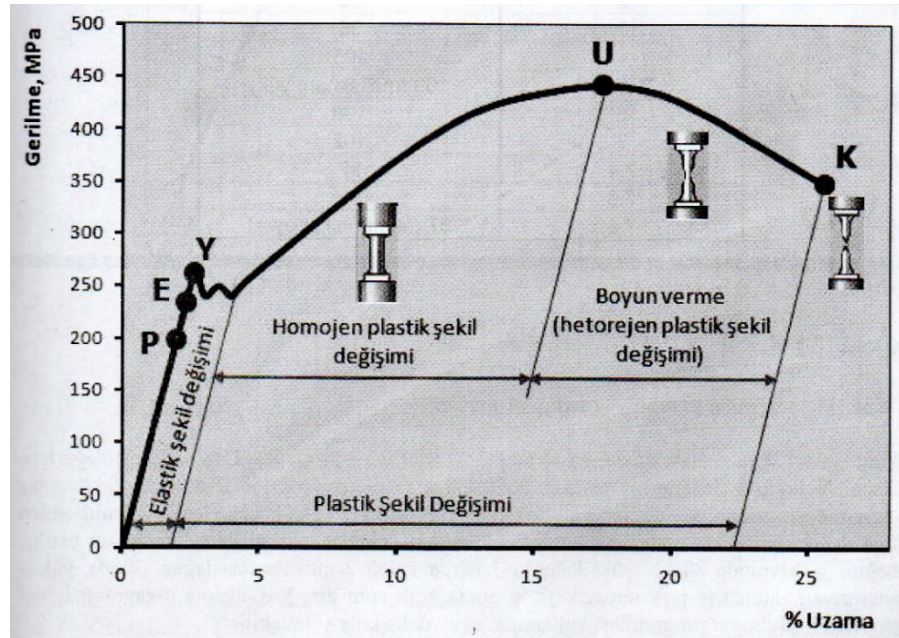
1. Çekme numunelerinin standartlarda belirlenen boyut ve geometrik şekillerde hazırlanması
2. Numuneye tek bir eksen doğrultusunda yük uygulanması
3. Numuneyi bilinen belirli bir hızda çekilmesi
4. Numunenin hangi sıcaklıkta çekildiğini bilinmesidir.

Çekme deneyinde kullanılan numuneler, standartlara göre geometrik özellikleri ve ebatları belirlenmiş deney parçalarıdır. Çekme numuneleri, malzeme türüne, malzeme kalınlığına, malzemenin imalat çeşidine göre standartlarda belirtilen değişik ebatlara ve kesitlere sahiptir. En yaygın olarak kullanılan numune yuvarlak kesitli veya levhasal dikdörtgen kesitli olanlarıdır [6]. Çekme numunesi belirtilen geometrik şekillere getirildikten sonra, deney öncesi yapılması gereken bazı işlemler vardır. Bu işlemleri kısaca şöyle açıklayalım; ilk olarak yuvarlak çekme numunesinin inceltilmiş bölgesinin

çapı ölçülerek kaydedilir. Ölçülen değerler cihazın bağlı olduğu bilgisayara kaydedilir. Sonuçlar hangi birim cinsinden isteniyorsa o program seçilir. Genellikle gerilim-birim diyagramı tercih edilir. İkinci olarak numunenin inceltilmiş bölgesinin tam ortası işaretlenerek sağ ve sol taraflardan eşit uzaklık kalacak şekilde de işaretlenerek ilk uzunluk olan  $l_0$  kaydedilir. Daha sonra numunenin hangi hızla çekileceği belirlenerek cihazın hareket hızı ayarlanır. Son olarak numune cihazın alt ve üst çekme çenelerine yerleştirilerek deney gerçekleştirilir. Numune çekilip koparıldıktan sonra her iki çenede kalan parçalar çıkartılır ve birbirine temas ettirilerek son uzama boyu olan  $l_1$  ölçülerek kaydedilir. Numunenin kesit daralması da ölçülüp malzemenin çekme hesaplanırken kullanılır.

Çekme deneyinin bir amacı da malzemelerin statik yük altında elastik ve plastik davranışlarının belirlenmesidir. Malzemelerin bu davranışlarını mühendislik diyagramları ile ifade ederiz [6].

Mühendislik diyagramları numuneye uygulanan ve devamlı olarak artan kuvvet ile bu kuvvetlere karşılık gelen numunenin uzama miktarları arasındaki ilişkinin cihazlar tarafından kaydedilerek çizilmesidir. Bu diyagram şekil 2.4 'te tanımlanmıştır.



Şekil 2.4. Gerilme-% uzama diyagramı

Çekme deneyinde üç farklı diyagram oluşturulur.

Kuvvet(yük)-uzama diyagramı, gerilme –birim uzama diyagramı ve gerilme -%uzama diyagramıdır.

Bu tez çalışmasında ise gerilme-% uzama diyagramı kullanıldı. Gerilme-% uzama ifadeleri aşağıdaki formüllerle hesaplandı.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.4)$$

$$\text{Birim uzama} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.5)$$

$$\%uzama = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (2.6)$$

Burada  $\sigma$  =Gerilme ( $kgf / mm^2$  veya  $N / mm^2$  veya MPa), P=Kuvvet (kgf veya N),

$A_0$  =Numunenin ölçü uzunluğu içindeki ilk kesit alanı ( $mm^2$ ),  $l_1$  =Numunenin uzayan boy miktarı(mm),  $l_0$  =Numunenin ilk ölçü uzunluğu (mm) olarak ifade edilir.

Şekil 2.4'te verilen gerilme -%uzama diyagramındaki her bir noktanın anlamı aşağıda ifade edildiği gibidir.

#### **0-P arasında (P noktası orantı sınırı)**

Eğrinin başlangıç noktasından P noktasına kadar doğrusal bir çizgi olduğu görülür. Malzemeye uygulanan kuvvet ile malzemenin uzama miktarı doğru orantılı olduğu için belirli bir eğimde doğrusal bir eğri oluşmuştur.

Bu doğrusal eğimin sona erdiği P noktasına kadar olan bölgede malzemenin elastik bir davranış sergilediği görülür. Yani bu bölgede malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığında malzeme deforme olmadan tekrar eski haline döner. Malzeme elastik özelliğini kaybetmez [6]. Eğrinin başlangıç noktasından P noktasına kadar olan bu bölgeye orantı sınırı adı verilir.

### **P-E arasında (E elastik sınır)**

Malzemeye P noktasından sonrada kuvvet uygulanmaya devam edilirse eğrinin doğrusallığı (lineerliği) belli bir eğimle bozulmaya başlar. Malzemeye E noktasına kadar uygulanan kuvvet, doğrunun eğimini değiştirirse de malzemenin elastik özelliğini bozmaz.

Fakat kuvvet uygulanmaya devam ederse, E elastik sınırından sonra malzemede kalıcı, yani plastik deformasyon başlar. Kuvvet kaldırıldığında uzamanın görülmediği sadece elastik şekil değişiminin olduğu görülür. Bu nedenle E elastik sınır altındaki kuvvet uygulamalarında malzemenin elastik davranış, üstündeki kuvvet uygulamalarında ise plastik şekil değişim davranışını gösterdiği kabul edilir [6].

### **E-Y arasında (Y akma sınırı)**

Malzemeye uygulanan kuvvet, E elastik sınır noktasını geçerse malzemede plastik şekil değişiminin önemli derecede arttığı görülür. Bu durum eğrinin Y noktasına kadar devam eder. Düzgün olmayan bir eğri ile karşı karşıya kalınır. Eğri üzerindeki bu noktaya malzemenin akma sınırı adı verilir.

Akmanın başladığı kuvvet, üst akma sınırı ve akmanın devam ettiği ortalama kuvvet alt akma sınırı olarak adlandırılır [6].

### **Y-U aralığında (U boyun verme noktası)**

Malzemeye uygulanan kuvvet akma bölgesini geçecek şekilde daha da arttırılırsa U noktası olarak gösterilen maksimum kuvvet noktasına ulaşılmış olur. U noktasına boyun verme noktası adı verilir. U noktasını geçer geçmez malzeme boyun vermeye başlar ve malzeme kesitinde kısmi kesit daralmaları oluşur [6].

### **U-K aralığında (K kopma noktası)**

B boyun bölgesinde malzemenin kesit alanı daraldığından, taşıdığı net kuvvet de azalacaktır. Böylece numunenin kesiti daha da daralacak ve eğrinin K noktasına ulaştığında malzeme kopacak. Malzemenin koptuğu bu noktaya da kopma noktası adı verilir [6].

## **2.4.2.Sertlik deneyi**

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan diğer bir metot da malzemelerin sertliklerini ölçme işlemidir. Sertlik sürtünmeye, çizmeye, kesmeye veya plastik deformasyona karşı malzemenin göstermiş olduğu direnç olarak tarif edilir.



Sertlik, soyut bir ölçü kavramıdır. Malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç özelliğini rakamsal olarak ifade edip malzeme sertliklerini birbirleriyle karşılaştırabiliriz [6].

Genellikle sertlik ölçme işlemi, oldukça sert konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasıyla meydana gelen plastik deformasyona karşı, malzemenin gösterdiği direnci ölçerek, sayısal bir değer olarak ifade edilmesi şeklinde yapılır. Sertliği ölçülecek malzemedan daha sert olan uç uygulanan belirli bir yük altında batırılırsa, malzeme yüzeyinde bir iz meydana getirecektir. Malzemenin sertliği bu izin büyüklüğü ile ters orantılıdır. Yani iz büyük ise sertlik düşük, iz küçük ise sertlik yüksektir denilir [6].

Malzemelerin sertliği üç farklı yöntemle bulunur. Bunlar çizilerek, batırılarak ve sıçratılarak yapılan sertlik ölçme işlemidir. Bu tezde batırılarak yapılan sertlik ölçme deneylerinden Vickers Sertlik Deneyi yapılmıştır.

#### **2.4.2.1 Çizilerek yapılan sertlik deneyleri**

Çizilerek yapılan sertlik ölçme yöntemi malzeme yüzeyinin kendinden daha sert bir cisim ile çizilerek malzemenin çizilebilme seviyesi dikkate alınarak yapılan soyut bir sertlik değerlendirme işlemidir. Modern endüstriyel sertlik ölçme yöntemleri geliştirilmeden önce çeşitli minerallerin sertlikleri belirli bir sıralamaya göre tanımlanmış. En eski sertlik tanımlama yöntemi olan bu tekniğe Mohs Skalası adı verilir. Bu skalaya göre mineraller kendinden daha sert bir cisim ile çizilerek çizilebilme seviyesi dikkate alınarak birden ona kadar değişen soyut bir sertlik değerlendirme cetveli oluşturulmuştur [6].

#### **2.4.2.2 Batırılarak Yapılan Sertlik Deneyleri**

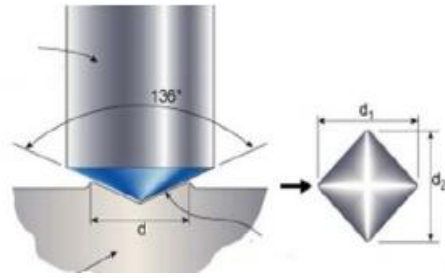
Batırılarak yapılan sertlik ölçme yönteminde malzeme yüzeyine kendinden daha sert konik veya küresel standart bir ucun belirli bir yük altında batırılmasıyla meydana gelen plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin sayısal değeridir.

Batırılarak yapılan sertlik deneyinde, sert uca uygulanan yük statik veya dinamik olabilmektedir. Yükün statik veya dinamik olması deneyin adını değiştirmektedir. Batırılarak yapılan sertlik deneylerini aşağıdaki gibi sınıflandırırız.

- A) Statik sertlik ölçme yöntemleri
  - a) Brinell sertlik deneyi
  - b) Vickers sertlik deneyi
  - c) Mikrosertlik ölçme deneyi
  - d) Rockwell sertlik deneyi
- B) Dinamik sertlik ölçme yöntemleri
  - a) Shore sertlik ölçme yöntemi
  - b) Poldi sertlik ölçme yöntemi

#### 2.4.2.2.1. Vickers sertlik deneyi

Vickers sertlik ölçme tekniğinde batıcı uç olarak tabanı kare olan piramit şeklindeki 136° uç açısına sahip elmas bir uç kullanılmaktadır. Bu elmas ucun şematik gösterimi şekil 2.4'te verilmiştir.



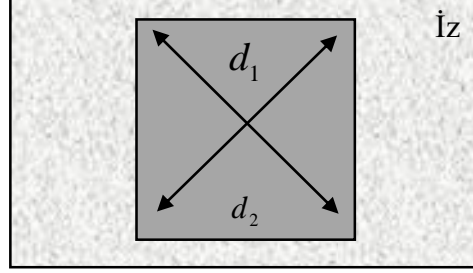
Şekil 2.5. Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi [13]

Vickers sertlik deneyinde piramit şeklindeki bu elmas uç malzeme yüzeyine belirli bir yük ile batırılır ve belirli bir süre bekletildikten sonra kaldırılır. Yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenleri ölçülür. Vickers sertlik değerini bulmak için geliştirilen eşitlikten yararlanarak Vickers sertlik değeri hesaplanır. Hesaplanan bu Vickers sertlik değeri denklem 2.7 ile verilir.

$$VSD = \frac{F}{A} = \frac{2.F.\sin\frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1,854.\frac{F}{d^2} \quad (2.7)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.8)$$

Burada VSD = Vickers sertlik değeri ( $\text{kgf/mm}^2$ ),  $F$  = Uygulanan yük ( $\text{kgf}$ ),  $A$  = İz alanı ( $\text{mm}^2$ ),  $d$  = Ortalama taban köşegen uzunluğu (mm),  $d_1$  = Birinci köşegen uzunluğu (mm) ,  $d_2$  = İkinci köşegen uzunluğu olarak ifade edilir.



Şekil 2.6. Vickers sertlik deneyinde elde edilen iz ve izin ölçülmesi

Şekil 2.5 te gösterildiği gibi taban köşegeni ( $d$ ) kare bir piramit şeklindedir. Vickers sertlik deneyi kullanılan deney yükünün iz alanına bölünmesi ile bulunur. İz alanının bulunması için malzeme yüzeyinde meydana gelen izin  $d_1$  ve  $d_2$  olarak adlandırılan köşegenleri ölçülerek ortalaması alınır ve taban köşegen değeri ( $d$ ) (2.8) bağıntısı belirlenir [6].

#### 2.4.2.3 Sıçratılarak Yapılan Sertlik Deneyleri

Sıçratılarak yapılan sertlik ölçme yönteminde malzeme yüzeyine kendinden daha sert bir bilye atılarak, bilyenin malzeme yüzeyine arpıtıktan sonra geriye doğru sıçraması ile ulaştığı yüksekliğin ölçülerek, sayısal olarak ifade edilmesi şeklindedir [6].

#### 2.5. Sonuç

Bu bölümde ısı iletkenliğin ve elektriksel iletkenliğin belirlenmesi için yapılan çalışmalar ile ilgili literatür taraması yapıldı. Tablo 2.1'de ısı iletkenlik, tablo 2.2'de elektriksel iletkenlik değerleri gösterilmiştir.

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

	Alaşım	Sıcaklık	Isıl İletkenlik	Ref.
		(K)	(W/Km)	
BiSnAg	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ.Ag	313	25.03	[4]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ.Ag	333	24.97	[4]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ.Ag	353	24.58	[4]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ.Ag	373	23.92	[4]
	Bi-%42.73 ağ. Sn-% 1.03 ağ.Ag	393	22.54	[4]
SnAgCu	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	313	59.41	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	333	57.57	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	353	57.42	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	373	56.66	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	393	55.64	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	413	53.58	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	433	52.42	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	453	51.96	[4]
	Sn-%3.5 ağ. Ag-% 0.9 ağ. Cu	473	50.52	[4]
InSnAg	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	313	77.76	[4]
	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	333	75.31	[4]
	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	353	74.72	[4]
	In-%48.4 ağ. Sn-% 2.31 ağ. Ag	373	71.29	[4]
SnBiCu	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	313	27.66	[4]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	333	26.00	[4]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	353	24.83	[4]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	373	23.31	[4]
	Sn-%42.8 ağ. Bi-%0.04 ağ. Cu	393	21.26	[4]

SnSbAg	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	313	55.01	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	333	54.91	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	353	53.55	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	373	52.16	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	393	51.50	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	413	49.36	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	433	48.16	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	453	46.02	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	473	45.65	[4]
	Sn-%6 ağ. Sb-%5 ağ. Ag	493	42.26	[4]
Sn-Ag	Sn-%10 ağ. Ag	313	64.86	[14]
	Sn-%10 ağ. Ag	333	63.94	[14]
	Sn-%10 ağ. Ag	353	63.19	[14]
	Sn-%10 ağ. Ag	373	62.59	[14]
	Sn-%10 ağ. Ag	393	61.95	[14]
	Sn-%10 ağ. Ag	413	59.78	[14]
	Sn-%10 ağ. Ag	433	58.17	[14]
	Sn-%10 ağ. Ag	453	56.75	[14]
Sn-In	Sn-%10 ağ. In	313	80.33	[14]
	Sn-%10 ağ. In	333	77.84	[14]
	Sn-%10 ağ. In	353	75.44	[14]
	Sn-%10 ağ. In	373	74.98	[14]
Sn-Bi	Sn-%10 ağ. Bi	313	38.14	[14]
	Sn-%10 ağ. Bi	333	37.70	[14]
	Sn-%10 ağ. Bi	353	36.56	[14]
	Sn-%10 ağ. Bi	373	35.77	[14]
	Sn-%10 ağ. Bi	393	35.64	[14]

Sn-Cu	Sn-%10 ağ. Cu	313	75.51	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	333	74.15	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	353	73.39	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	373	71.97	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	393	70.69	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	413	69.69	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	433	68.86	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	453	67.24	[14]
	Sn-%10 ağ. Cu	473	66.01	[14]
Sn-Sb	Sn-%10 ağ. Sb	313	70.03	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	333	69.36	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	353	67.51	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	373	65.55	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	393	64.25	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	413	62.79	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	433	60.49	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	453	59.94	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	473	59.12	[14]
	Sn-%10 ağ. Sb	493	58.84	[14]
Sn-Zn	Sn-%10 ağ. Zn	313	62.13	[14]
	Sn-%10 ağ. Zn	333	61.35	[14]
	Sn-%10 ağ. Zn	353	60.40	[14]
	Sn-%10 ağ. Zn	373	59.53	[14]
	Sn-%10 ağ. Zn	393	58.34	[14]
	Sn-%10 ağ. Zn	413	58.10	[14]
	Sn-%10 ağ. Zn	433	57.08	[14]
	Sn-%10 ağ. Zn	453	56.74	[14]

Sn-Bi-In	In-%21.23 at. Bi-%19.04 at. Sn	332.15	29.24	[15]
	Sn-%40.14at. In-%16.11at. Bi	332.15	31.56	[15]
Sn-Pb	Sn-%26.1 at. Pb	456	40.1	[16]
Sn-Sb	Sn-%7.8 at. Sb	518.65	40.50	[17]
	Sn-%41.4 at. Sb	518.65	31.98	[17]
	Sn-%5 at. Sb	518.65	43	[18]
Sn-Zn	Sn-%8.9 aḡ. Zn	472	35.74	[19]
Bi-Cd	Bi-%39.7aḡ. Cd	413	12.46	[20]
Zn-Cu	Zn-%2.83 at. Cu	695.65	141.6	[21]
	Zn-%12 at. Cu	695.65	136.3	[21]
Bi-Cd	Bi-%54.6 at. Cd	413	12.46	[22]
Al-Zn	Al-%95 aḡ. Zn	653	122	[23]
	Al-%84 aḡ. Zn	653	133	[23]
Al-Cu	Al-%31.94 at. Cu	821	108.7	[24]
	Al-%3 aḡ. Cu	821	143.1	[25]
	Al-%6 aḡ. Cu	821	130.7	[25]
	Al-%15 aḡ. Cu	821	116.3	[25]
	Al-%24 aḡ. Cu	821	113.1	[25]
	Al-%33 aḡ. Cu	821	111.7	[25]
	Al-%52.5 aḡ. Cu	821	107.9	[25]
Al-Cu-Ag	Al-%32.21 at. Cu-%0.04 at. Ag	775.09	110.64	[26]
	Al-%32.21 at. Cu-%0.04 at. Ag	799.35	112.25	[27]
In-Bi	In-%12.4 at. Bi	345.15	32.82	[28]
	In-%33.2 at. Bi	345.15	25.21	[28]
Sn-Cu	Sn-%1.3 at. Cu	500.15	58.90	[29]
Pb-Sb	Pb-%17.5 at. Sb	525.15	26.8	[30]
	Pb-%5.8 at. Sb	525.15	28.7	[30]

Sn-Ag-In	Sn-%4.4 at. Ag-%2.1 at. In	490.65	62.50	[31]
	Ag-%23.7 at. Sn-% 2.1 at. In	490.65	44.48	[31]
Zn-Cd	Zn-%1.3 ağ. Cd	539	77	[32]
Sn-Ag	Sn-% 0.09 at. Ag	494	57.70	[33]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	323	89	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	343	86	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	363	83	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	383	82	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	403	77	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	423	75	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	443	72	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	463	70	[34]
	Sn-% 1.5 ağ. Ag	483	69	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	323	98	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	343	97	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	363	96	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	383	92	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	403	90	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	423	90	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	443	89	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	463	87	[34]
	Sn-% 3.5 ağ. Ag	483	84	[34]
	Sn-%3.5 ağ. Ag	483	84	[34]
	Sn-%3.84 at. Ag	494	83.70	[35]
Sn-In	Sn-%25.63 at. In	391.5	65.90	[35]
Sn-Cu	Sn-% 1.30 at. Cu	500.15	58.90	[35]
Sn-Pb	Sn-% 1.45 at. Pb	456	52.30	[35]



	Sn-%26.1 at. Pb	456	40.10	[35]
Sn-Zn	Sn-%1.0 ağ. Zn	300	79.00	[36]
	Sn-% 1.0 ağ. Zn	500	66.00	[36]
	Sn-% 8.9 ağ. Zn	300	88.34	[36]
	Sn-% 8.9 ağ. Zn	500	72.48	[36]
	Sn-% 15 at. Zn	199	35.74	[37]
	Sn-%2 at. Zn	199	52.60	[37]
Cd-Sn	Cd-%2.5 ağ. Sn	300	34.17	[38]
	Cd-%2.5 ağ. Sn	500	22.60	[38]
	Cd-%22.5 ağ. Sn	300	37.79	[38]
	Cd-%22.5 ağ. Sn	500	25.58	[38]
	Cd-%33.5 ağ. Sn	300	41.90	[38]
	Cd-%88.0 ağ. Sn	300	46.37	[38]
	Cd-%88.0 ağ. Sn	500	30.17	[38]
	Cd-%5 at. Zn	373	96.62	[39]
	Cd-%5 at. Zn	533	85.28	[39]
	Cd-%26.5 at. Zn	373	91.00	[39]
	Cd-%26.5 at. Zn	533	81.53	[39]
	Zn-Cd	Zn-% 1.3 at. Cd	373	86.20
Zn-% 1.3 at. Cd		533	76.94	[39]
Sn-Pb	Sn-%30 ağ. Pb	183–192	50.0	[40]
	Sn-%40 ağ. Pb	183–188	50.0	[40]
Sn-Pb-Ag	Sn-%36 ağ. Pb-%2 ağ. Ag	177–189	50.0	[40]
Zn-Bi-Al	Zn-%41.58 ağ. Bi- %0.6ağ. Al	373	46.00	[41]
	Zn-%41.58 ağ. Bi- %0.6ağ. Al	423	44.46	[41]
	Zn-%41.58 ağ. Bi- %0.6ağ. Al	473	42.14	[41]

	Zn-%41.58 ağ. Bi- %0.6ağ. Al	523	40.59	[41]
Sn-Al-Cu	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	373	105.25	[41]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	423	102.96	[41]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	523	101.26	[41]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	573	98.99	[41]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	623	96.89	[41]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	673	94.35	[41]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	723	91.12	[41]
	Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	773	90.78	[41]
Sn-Cd-Sb	Sn-%41.39 ağ. Cd- %6.69 ağ. Sb	323	59.12	[42]
	Sn-%41.39 ağ. Cd- %6.69 ağ. Sb	353	57.38	[42]
	Sn-%41.39 ağ. Cd- %6.69 ağ. Sb	383	55.14	[42]
	Sn-%41.39 ağ. Cd- %6.69 ağ. Sb	413	51.45	[42]
	Sn-%41.39 ağ. Cd- %6.69 ağ. Sb	443	48.71	[42]
Sn-In-Cu	Sn-%49 ağ. In-%1 ağ. Cu	318	76.14	[42]
	Sn-%49 ağ. In-%1 ağ. Cu	333	75.71	[42]
	Sn-%49 ağ. In-%1 ağ. Cu	348	73.80	[42]
	Sn-%49 ağ. In-%1 ağ. Cu	363	71.32	[42]
	Sn-%49 ağ. In-%1 ağ. Cu	378	68.53	[42]
Sn-Ag-Bi	Sn-%50 ağ. Ag-%10 ağ. Bi	313	92.47	[42]
	Sn-%50 ağ. Ag-%10 ağ. Bi	333	86.94	[42]
	Sn-%50 ağ. Ag-%10 ağ. Bi	353	81.79	[42]
	Sn-%50 ağ. Ag-%10 ağ. Bi	373	80.79	[42]
	Sn-%50 ağ. Ag-%10 ağ. Bi	393	76.89	[42]
Sn-Bi-Zn	Sn-%32 ağ. Bi-% ağ. 2.99 Zn	313	47.87	[42]
	Sn-%32 ağ. Bi-% ağ. 2.99 Zn	333	45.24	[42]
	Sn-%32 ağ. Bi-% ağ. 2.99 Zn	353	42.93	[42]

	Sn-%32 ağ. Bi-% ağ. 2.99 Zn	373	41.59	[42]
	Sn-%32 ağ. Bi-% ağ. 2.99 Zn	393	38.71	[42]
Al-Cu-Si	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	323	193.70	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	373	187.27	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	423	183.48	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	473	169.34	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	523	137.38	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	573	121.22	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	623	119.08	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	673	115.21	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	723	111.06	[43]
	Al - %26.82 ağ. Cu - %5.27 ağ. Si	773	110.90	[43]
Zn-Sn-Bi	Zn-%5 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	313	101.82	[44]
	Zn-%5 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	333	98.80	[44]
	Zn-%5 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	353	95.92	[44]
	Zn-%5 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	373	92.03	[44]
	Zn-%5 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	393	90.46	[44]
Zn-Sn-Bi	Zn-%10 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	313	99.08	[44]
	Zn-%10 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	333	95.87	[44]
	Zn-%10 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	353	93.26	[44]
	Zn-%10 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	373	91.55	[44]
	Zn-%10 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	393	89.87	[44]
Zn-Sn-Bi	Zn-%85 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	313	59.71	[44]

	Zn-%85 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	333	56.87	[44]
	Zn-%85 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	353	54.58	[44]
	Zn-%85 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	373	52.29	[44]
Zn-Sn-Bi	Zn-%40 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	313	78.33	[44]
	Zn-%40 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	333	76.23	[44]
	Zn-%40 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	353	74.61	[44]
	Zn-%40 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	373	72.40	[44]
	Zn-%40 ağ. Sn-%10 ağ. Bi	393	70.28	[44]
Bi-Sn-Zn	Bi-%1.39 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	313	24.85	[44]
	Bi-%1.39 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	333	22.76	[44]
	Bi-%1.39 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	353	20.57	[44]
	Bi-%1.39 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	373	18.13	[44]
	Bi-%1.39 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	393	16.04	[44]
Bi-Sn-Zn	Bi-%43.26 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	313	46.24	[44]
	Bi-%43.26 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	333	44.92	[44]
	Bi-%43.26 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	353	41.88	[44]
	Bi-%43.26 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	373	39.12	[44]
	Bi-%43.26 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	393	37.84	[44]
Bi-Sn-Zn	Bi-%79.3 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	313	63.23	[44]
	Bi-%79.3 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	333	61.11	[44]
	Bi-%79.3 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	353	60.75	[44]
	Bi-%79.3 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	373	57.35	[44]
	Bi-%79.3 ağ. Sn-%12 ağ. Zn	393	53.17	[44]

Tablo 2.2. Metalik alaşımların elektriksel iletkenlikleri

Alaşım	Sıcaklık (K)	Elektriksel Özdirenç $\rho(10^{-7}\Omega \text{ m})$	Ref.	Elektriksel İletkenlik $\sigma \times 10^6(1/\Omega \text{ m})$	Ref.
Al-%3 ağ. Cu	821			5.5	[46]
Al-%6 ağ. Cu	821			5.0	[46]
Al-%15 ağ. Cu	821			4.6	[46]
Al-%24 ağ. Cu	821			4.5	[46]
Al-%33 ağ. Cu	821			4.3	[46]
Al-%52.5 ağ. Cu	821			3.3	[46]
Cd-%2.5 ağ. Sn	300	2.18	[47]	4.59	[47]
Cd-%2.5 ağ. Sn	500	5.41	[47]	1.85	[47]
Cd-%22.5 ağ. Sn	300	1.93	[47]	5.18	[47]
Cd-%22.5 ağ. Sn	500	4.79	[47]	2.09	[47]
Cd-%33.5 ağ. Sn	300	1.75	[47]	5.71	[47]
Cd-%33.5 ağ. Sn	500	4.38	[47]	2.28	[47]
Cd-%88.0 ağ. Sn	300	1.61	[47]	6.20	[47]
Cd-%88.0 ağ. Sn	500	4.05	[47]	2.47	[47]
Sn-%1.0 ağ. Zn	300	1.11	[48]	9.01	[48]
Sn-%1.0 ağ. Zn	500	6.25	[48]	1.60	[48]
Sn-%8.9 ağ. Zn	300	1.30	[48]	9.52	[48]
Sn-%8.9 ağ. Zn	500	7.68	[48]	1.17	[48]
Sn-0.7Cu		1.114	[51]		
Sn-0.7Cu-0.5Zn		1.305	[51]		

Sn-0.7Cu-0.5Bi		1.568	[51]		
Cd-%5 at. Zn	373	1.15	[49]	8.73	[49]
Cd-%5 at. Zn	533	3.77	[49]	2.65	[49]
Cd-%26.5 at. Zn	373	1.13	[49]	8.86	[49]
Cd-%26.5 at. Zn	533	5.15	[49]	1.94	[49]
Zn-%1.3 at. Cd	373	1.58	[49]	6.34	[49]
Zn-%1.3 at. Cd	533	4.17	[49]	2.40	[49]
Sn-%5 ağ. Sb	234-240	1.45	[52]		
Sn-%30 ağ. Pb	183-192	1.46	[52]		
Sn-%40 ağ. Pb	183-188	1.49	[52]		
Sn-%36 ağ. Pb-%2 ağ. Ag	177-189	1.45	[52]		
Sn-%40 ağ. Pb	183-188	1.49	[52]		
Sn-%3.5 ağ. Ag	221	1.231	[52]		
Sn-%8 ağ. Sb	244-295	1.55	[52]		
Sn-%5 ağ. Sb	298	1.45	[53]		
Sn-%5 ağ. Ag	273	1.04	[53]		
Sn-%30 ağ. Pb		1.46	[53]		
Sn-%37 ağ. Pb		1.45	[53]		
Sn-%40 ağ. Pb		1.499	[53]		
Zn-%41.58 ağ. Bi-%0.6ağ. Al	373			4.5	[50]
Zn-%41.58 ağ. Bi-%0.6ağ. Al	423			3.9	[50]
Zn-%41.58 ağ. Bi-%0.6ağ. Al	473			3.3	[50]
Zn-%41.58 ağ. Bi-%0.6ağ. Al	523			2.8	[50]
Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	373			11.8	[50]
Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	423			10.2	[50]
Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	473			9.0	[50]
Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	523			8.1	[50]
Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	573			7.2	[50]
Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	623			6.5	[50]

Sn-%30 ağ.A1- %15ağ. Cu	673			5.9	[50]
Sn-%30 ağ.A1- %15ağ. Cu	723			5.3	[50]
Sn-%30 ağ.A1- %15ağ. Cu	773			4.9	[50]
Sn-41.39 at.% Cd-6.69 at.% Sb	453			2.61	[42]
Sn-49 at.% In-1 at.% Cu	389			3.26	[42]
Sn-50 at.% Ag-10 at.% Bi	411.4			4.57	[42]
Sn-32 at.% Bi-3 at.% Zn	404.7			1.35	[42]

## **BÖLÜM 3**

### **DENEYSEL SİSTEMLER**

#### **3.1. Giriş**

Bu tezin amacı SAC105(Sn-1Ag-0.5Cu) Kurşunsuz lehim alaşımına Antimon(0.5Sb,1Sb,1.5Sb) ilavesi yapılarak, alaşımın termal, elektrik, mikroyapı ve mekaniksel özelliklerinde ne gibi değişiklikler olduğunu incelemektir.

Bu tezde, üretilen kurşunsuz lehim alaşımlarının ısı iletkenlikleri lineer ısı akış metodu ile belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlikleri dört nokta ölçüm metodu ile ölçülmüştür. Ayrıca mekanik özelliklerinden de çekme-gerilim dayanımları ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik değeri Vickers Sertlik ölçüm metodu ile yapılmıştır. Bu bölümde kullanılan metotlar hakkında detaylı bilgi verilecektir.

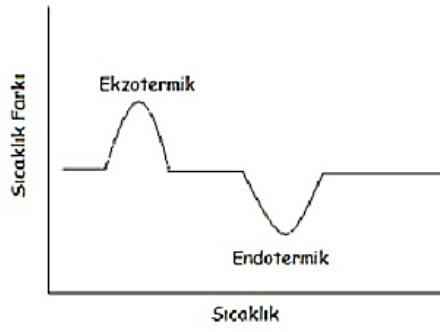
#### **3.2. Termal Analiz**

Termal analiz, numune sıcaklığının kontrollü bir şekilde değiştirilirken, numunenin herhangi bir fiziksel özelliğinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğü yöntemler topluluğudur.

Bu tez çalışmasında numunelerin erime sıcaklığının belirlenmesi için DSC yöntemi ile termal analiz yapılmıştır. Yöntemde numune ve bir referans maddeye ait ısı akışı arasındaki sıcaklık farkı, sıcaklığın fonksiyonu olarak incelenir. Numune ve referans madde ısınırken numune eriyene kadar sıcaklık artar. Erime sırasında numunenin sıcaklığı değişmeyip sabit kalırken, referansın sıcaklığı artar. Numune ve referans arasında sıcaklık farkı istenmez, sıcaklığın eşitlenmesi için numuneye verilen enerji ölçülür. Bu şekilde sıcaklık farkı bulunur. DSC'nin temel uygulama alanları ekzotermik ve endotermik ayrışma gibi faz değişimleri üzerindeki çalışmalardır [54].

DSC grafiklerinde ekzoterm olaylar yukarı yöne, endoterm olaylar aşağı yöne bakar. Şekil 3.1'de DSC cihazı ile elde edilebilecek tipik bir DSC grafiği yer almaktadır.





Şekil 3.1. DSC grafiği

### 3.3. Deneysel Sistemler

#### 3.3.1. Kül fırını

Kül fırını diğer bir adıyla laboratuvar fırınları kül testi, ön ısıtma, temperleme, su verme, oksidasyon vb. pek çok ısıl işlemde ve malzeme geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Kül fırınları daha çok laboratuvar ortamında küçük materyallerin yüksek sıcaklıklarda test ve analizi için kullanılır.

Bu tezde kullanılan ve şekil 3.2 de gösterilen kül fırını 65 dakikada ve maksimum 1100 °C de ısıveren, sıcaklığı  $\pm 2$  °C hassaslıkla kontrol eden, 6,3 L hacimde, 2 kW güce sahiptir.



Şekil 3.2. Kül Fırını Fotoğrafı

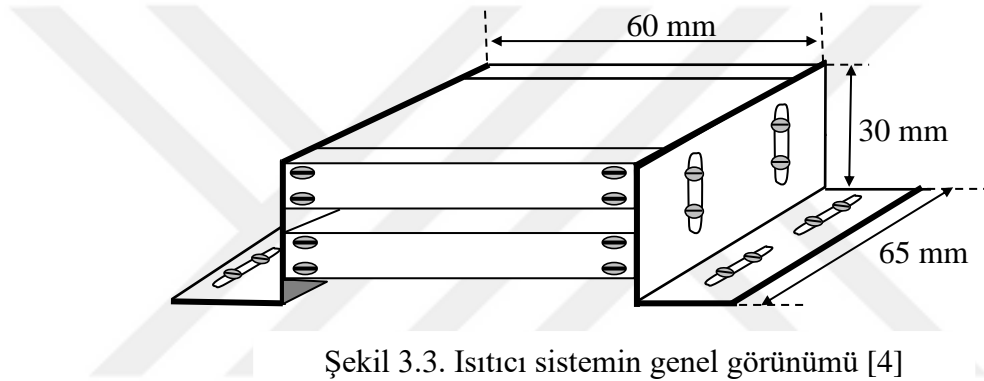
#### 3.3.2 Lineer ısı akış sistemi

Numunelerin ısıl iletkenliğini ölçebilmek için Maraşlı ve arkadaşları tarafından geliştirilen lineer ısı akış sistemi kullanıldı. Sistem, soğutucu ve ısıtıcı sistem ve numune

tutucusundan oluşmaktadır. Sabit sıcaklık gradyenti için deney süresince ısıtıcı ve soğutucu sistemlerinin sıcaklıklarının sabit tutulmuştur.

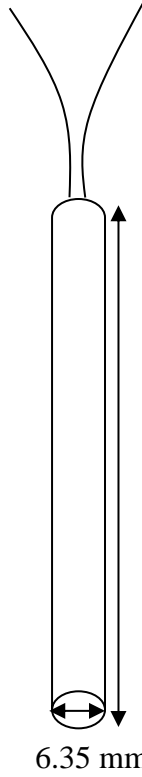
### 3.3.2.1 Isıtıcı sistem

Sistem şekil 3.4 deki görüldüğü üzere iki adet ana gövde, dört adet kapak ve iki adet gövde tutucusundan oluşmaktadır. Isıtıcı sistem iyi sıcaklık iletimi, oksitlenmeye karşı dirençli ve kolay işlenebilir olması nedeniyle pirinç malzemeden üretilmiştir. Sistemde 45 mm boyunda, 60 mm eninde ve 6 mm kalınlığında iki pirinç gövde bulunmaktadır.

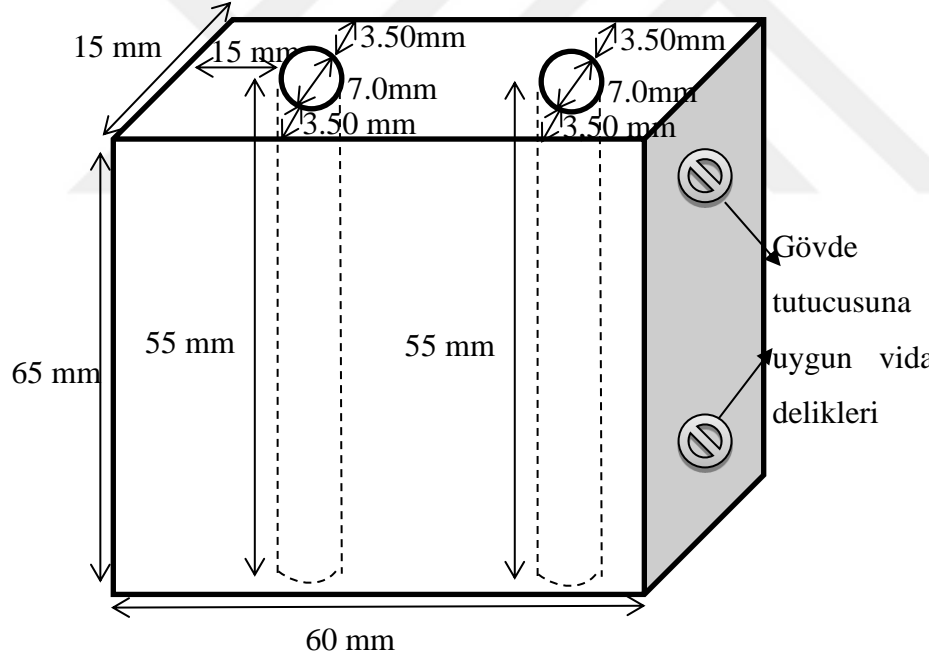


“Şekil 3.3’ de görüldüğü üzere gövdelerin ön cephesi pirinçten yapılmış; 60 mm eninde 65 mm boyunda 30 mm kalınlığında; ısıtıcı elementler için üst ve alt ısıtıcı sistemler oluşturuldu. Şekil 3.4a ve şekil 3.4b’de görülen, üst ve alt ısıtıcı sistemlerin her birinin içine 2 adet, 7 mm çapında delikler 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.”

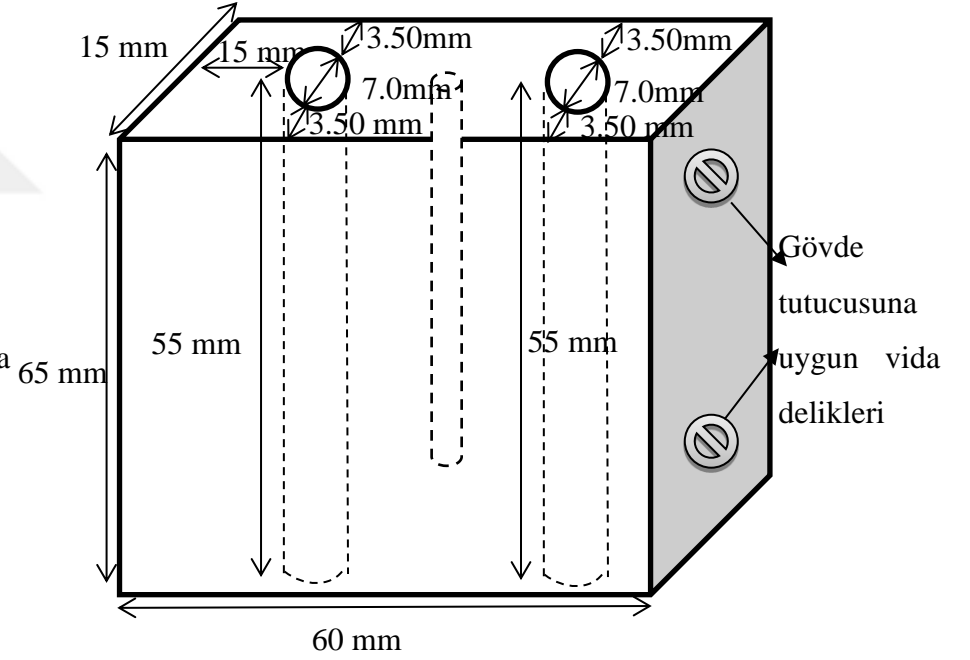
Isıtıcı gövdelerinin kaymasını engellemek için ve gövdeler arasındaki düşey uzaklığı numunenin kalınlığına göre ayarlayabilmek için sağ ve sol tutuculara oynatılabilir vida yuvaları açıldı [55]. Isıtıcı blok 5 mm kalınlığında, 130 mm eninde ve 310 mm boyunda metal bir tabla üzerine yerleştirildi. Tabla metal malzemeden tercih edilmiştir çünkü yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Isıtıcı sistemin sıcaklığı 2704 tipi Eurotherm sıcaklık kontrolcüsü ile  $\pm 0.01$  K aralığında kontrol edildi. Isıtıcı sistemle 673 K sıcaklığa kadar çıkabilmektedir.



Isıtıcı Element



(a)



(b)

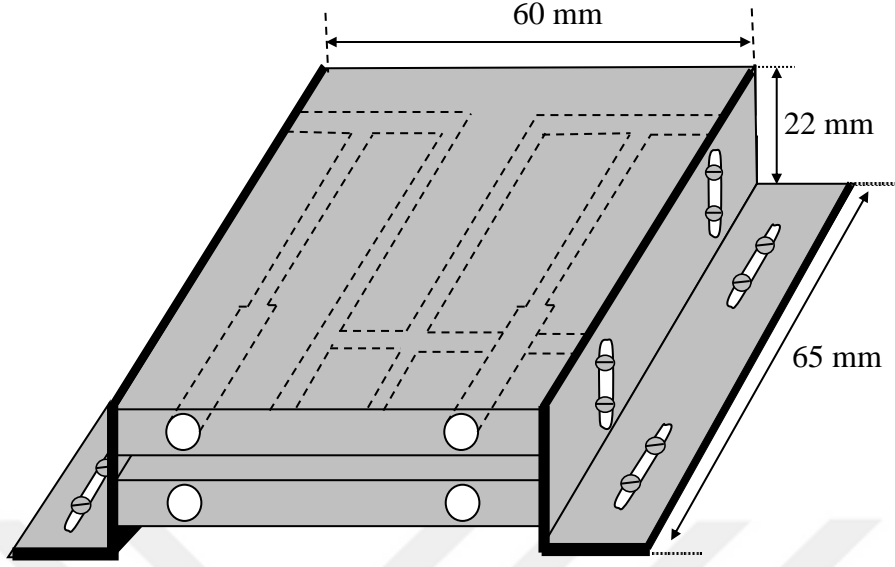
Şekil 3.4. Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı

### 3.3.2.2 Soğutucu sistem

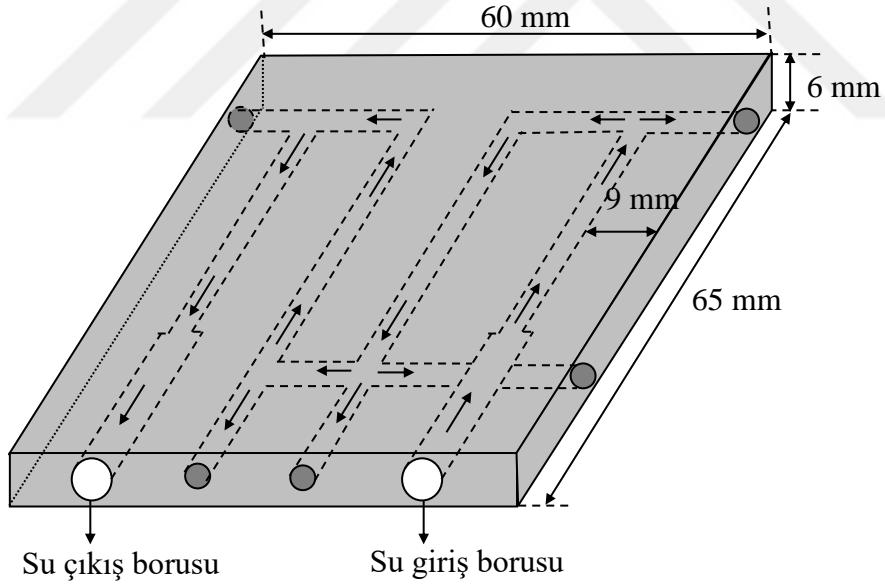
Soğutucu sistem pirinç malzemedan yapılmış olup iki tane soğutucu gövde ve yine iki tane gövde tutucusu şeklinde dört parçadan oluşur (Şekil 3.5.a). Şekil 3.5.b’de soğutucu gövde, 65 mm uzunluğunda, 60 mm eninde ve 6 mm kalınlığında iki pirinç bloktan oluşmuş ve her bir blokta su giriş-çıkışı için 5 mm çapında kanal açılmıştır. Ayrıca eşit dağılımlı soğutma için 4 mm çapında ve birbirlerine paralel 4 tane kanal bulunur. Açılan kanalların deney sırasında yüksek basınca direnebilmesi ve suyun sızması için kanal girişleri kaynak ile kapatılmıştır. Su giriş-çıkış kanallarının açık kalması şartı ile bu kanallara 3 mm çapında 8 cm uzunluğunda pirinç borular kaynak edildi. 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 Şekil 3.6’da görüldüğü gibi 22 mm yüksekliğinde, 19 mm eninde ve 65mm uzunluğunda pirinç malzemedan yapılmış metal bir plakaya sabitlenmiştir. Aynı plakaya ısıtıcı sistem de monte edilmiştir. Şekil 3.6.’da soğutucu ve ısıtıcı sıcaklık gradyenti sisteminin bulunduğu plakanın genel görüntüsü verilmiştir.

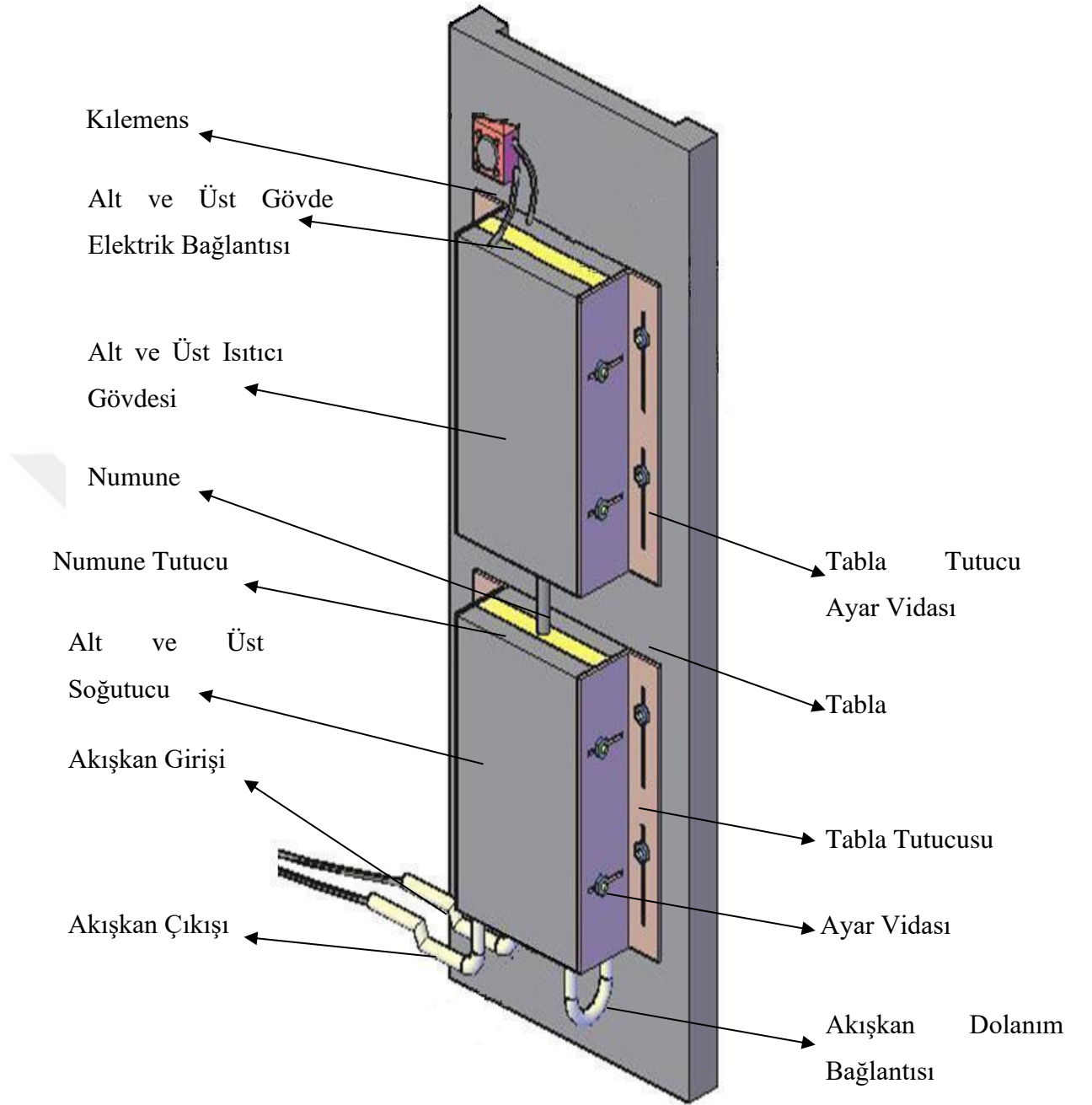
“Soğutucu sistemin sıcaklığı 9702 model PolyScience tipi dijital su dolanım sistemi ile kontrol edildi. Kullandığımız su dolanım sistemi; 13 litre su kapasitesine sahip olup 233 K ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) ile 473 K ( $200^{\circ}\text{C}$ ) arasında sıcaklık kontrolü yapabilmektedir.  $\pm 0,01$  K 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 [55].”



Şekil 3.5.a. Soğutucu sistemin genel görünümü [55]



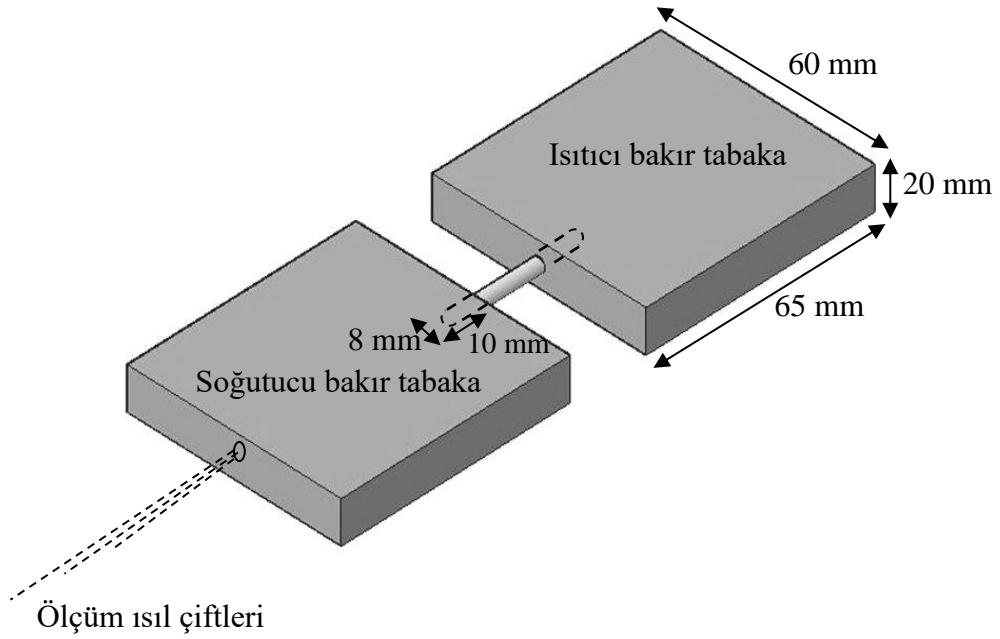
Şekil 3.5.b. Soğutucu bloğun şematik gösterimi [55]



Şekil 3.6. Soğutucu-ısıtıcılı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü [4]

### 3.3.2.3 Numune tutucu

Numune tutucu 65 mm en, 60 mm boy ve 20 mm yükseklikteki birbirinden ayrı iki bakır tabakadan yapılmıştır. Erime noktasının ve iletkenliğinin yüksek olma özelliği bakırın tercih edilme sebebidir. Numune tutucunun amacı numuneyi sıcak ve soğuk sistemler arasına yerleştirerek iyi bir ısıl iletimi sağlamaktır. Numuneyi yerleştirmek için tutuculara 10 mm derinliğinde, 8 mm çapında iki yuva açılmıştır. Termal çiftlerin numuneye yerleştirilmesi için soğutucu bakır tabakaya da iki ucu açık olacak şekilde 3 mm çapında ince bir delik açılmıştır. Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Numune tutucunun şematik gösterimi [4]

### 3.4. Isıl iletkenlik Ölçümü için Bir Deneyin Yapılışı

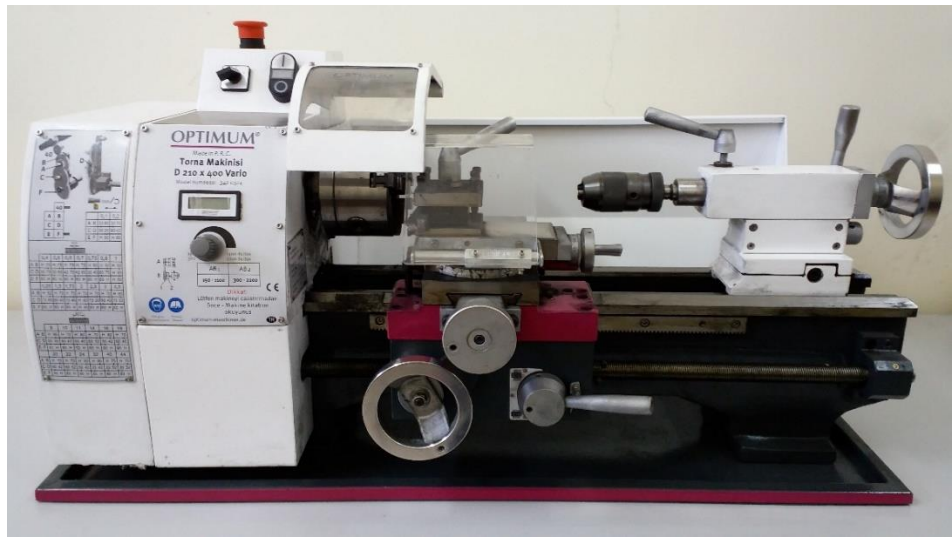
#### 3.4.1 Numune kalıbının hazırlanması

Deneyde ölçüm yapılacak numunelerin istenilen ebatlarda dökümünün yapılabilmesi için Morgan marka grafit çubuklar kullanılmıştır. Grafit çubuklar yüksek sıcaklığa dayanıklı, iletkenliği yüksek ve birçok metalle reaksiyona girmediği için tercih edildi. Ayrıca kolayca işlenerek şekil verilebilmektedir. Alaşımın hazırlanacağı pota, huni ve numune kalıbı şekil 3.8’de fotoğraf olarak görülmektedir.



Şekil 3.8 .Grafitten yapılmış Pota, Huni ve Numune Kalıbı [4]

Pota, huni ve numune kalıpları Şekil 3.9’de görülen tornada işlenmiştir.

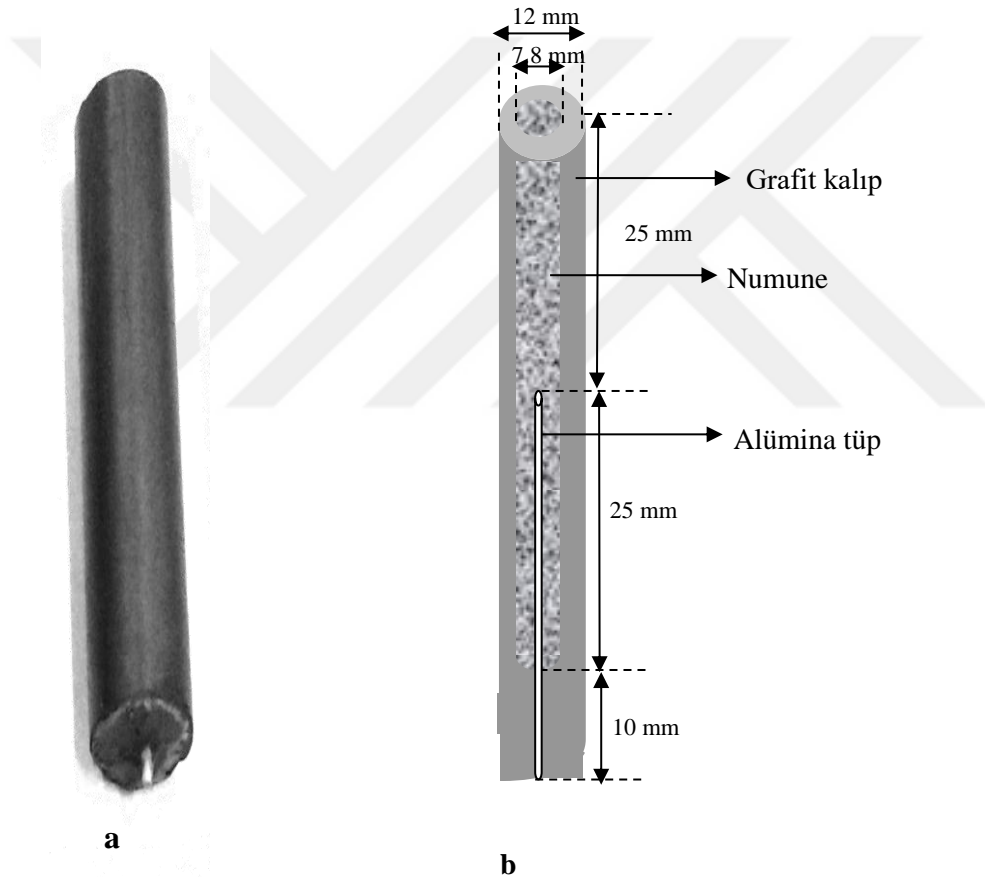


Şekil 3.9. Kalıp hazırlamak için kullanılan torna tezgahı



Pota hazırlanırken 30mm çaplı grafit çubuk 80 mm boyunda kesilir. Pota iki çeşit yapılmaktadır. İlk pota 23mm'lik matkap ucu ile 60 mm derinliğinde oyuk açılarak yapılır. Bu pota, alaşımı fırında eritmek için kullanılır. İkinci potanı bir tarafı 23 mm'lik matkap ucu ile 30 mm derinliğinde, diğer ucu da numune kalıbının yerleştirilmesi için 7.8 mm'lik matkap ucu ile 10 mm derinliğinde delinmiştir. Böylece pota iki ucu açık bir boru şeklini alır. Hazırlanan bu potaya alaşım haznesi denir.

Numune kalıbı Şekil 3.10 'da gösterildiği gibi silindirik bir boru şeklindedir.

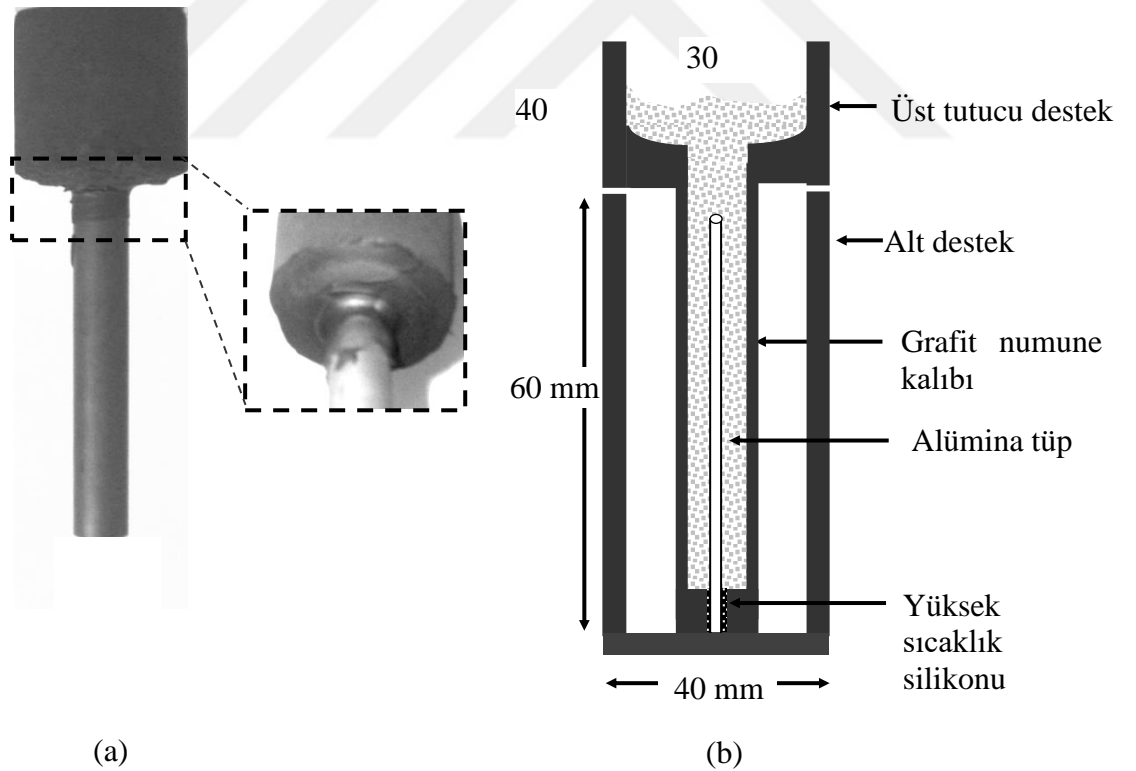


Şekil 3.10. Kullanılan numune kalıbının fotoğrafı (a) ,şematik gösterimi (b) [4]

Kalıp için 12 mm çaplı 250 mm uzunluklu grafit çubuklar kullanılır. Çubuk önce tornanın kesme aletiyle 60 mm 'lik parçalara ayrılır. Her bir parça numune kalıbıdır. Bu kalıbın bir ucu 7.8 mm'lik matkap ucu ile iç çapı 7 mm, dış çapı 12 mm ve derinliği 50 mm olacak şekilde oyulur. Kalıbın diğer ucuna alümina tüpün yerleştirilmesi için 1.2 mm'lik matkap ucu ile yaklaşık 20 mm bir derinlik açılır.

Alümina tüp 35 mm boyunda kesilir. Alümina tüpün bir ucu oksijen kaynağı ile ısıtılarak sızıntı olmayacak şekilde tamamen kapatılır. Hazırlanan alümina tüp, numune kalıbımızın 1.2 mm 'lik çaplı deliğe yerleştirilir. Kalıp ile alümina tüpün birleştiği kısma, eriyen alaşımın sızmasını engellemek için yüksek ısıya dayanıklı silikon sürülür.

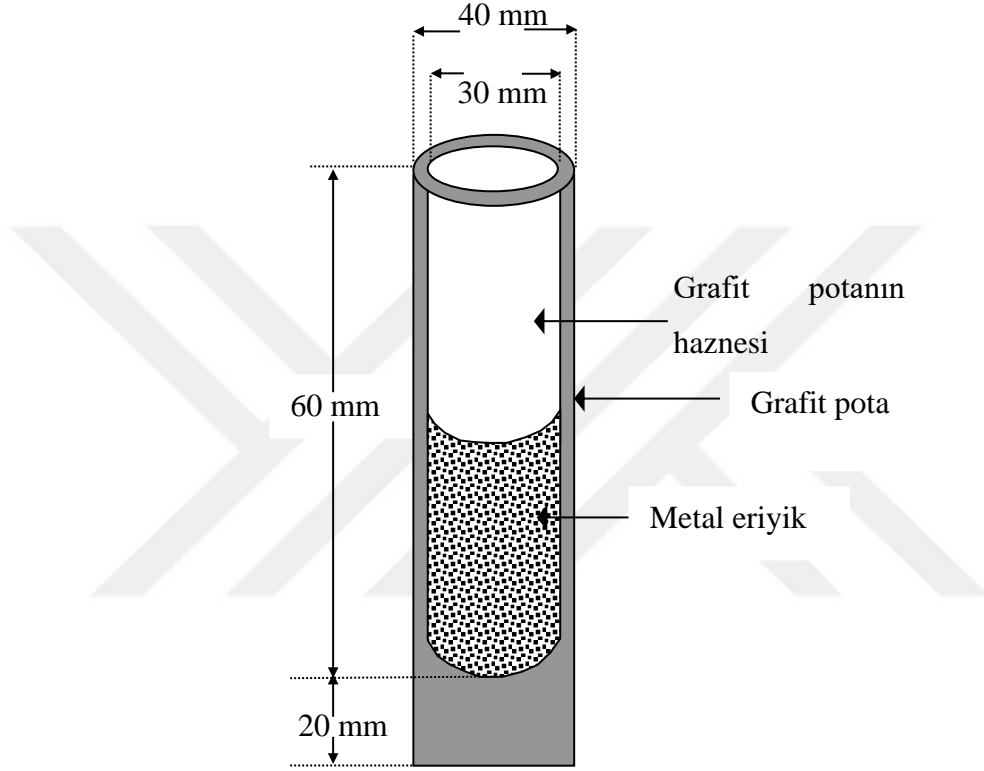
Hazırlanan numune kalıbı, alaşım haznesi de denilen iki ucu delinmiş potanın 12 mm çaplı deliğine yerleştirilir. Burada da kalıbın ve potanın birleştiği yer ısıya dayanıklı silikon ile sızıntı olmayacak şekilde dikkatlice kapatılır ve kurutulmaya bırakılır. Oluşturulan bu kalıp Şekil 3.11 da gösterilmiştir.



Şekil 3.11. (a) Numune potası ve üst desteğin silikon yapıştırıcı ile birleşiminin fotoğrafı, (b) Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi [56]

### 3.4.2. Numune kalıbının fırına yerleştirilmesi ve dökümün yapılması

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi hazırlanan numune kalıbı tek tarafı oyuk grafit potanın içine, kalıp alt tarafta, alaşım haznesi üst tarafa gelecek şekilde yerleştirilir. Şekil 3.12 ‘de gösterilen tek tarafı oyuk başka bir potaya alaşımın yapılacağı metal karışımı doldurulur.



Şekil 3.12. Grafitten yapılmış potanın şematik gösterimi [4]

Grafit potanın içinin temiz olduğundan emin olduktan sonra alaşıma katkıda bulunacak metallerin, erime sıcaklığı düşük olan altta kalacak şekilde yüksek olan ise üstte kalacak şekilde sırayla yerleştirilir. İçi dolu pota ve hazırlanan kalıp aynı anda kül fırınına yerleştirilir ve fırın ısıtılır Fırın istenilen sıcaklığa getirilir ve set edilir. Fırın set edilen ısıya geldiğinde kapağı dikkatlice açılarak erimiş metaller grafitten yapılmış bir karıştırıcı çubuk ile alaşımın homojen olması için belirli aralıklarla karıştırılır. Akışkan hale gelmiş metal alaşımın içinde bulunduğu pota bir maşa yardımı ile sıkıca tutularak alaşımın donmasına ve üst yüzeyinin oksitlenmesine izin vermeyecek hızla numune kalıbına dökülür. Fırının kapağı kapatılır ve tekrar set edilen sıcaklığa gelmesi beklenir.

Kalıba aktarılan sıvı alaşım grafit çubuk ile tekrar karıştırılır. Bu sayede numune kalıbının içinde hava kabarcıklarının yok olması sağlanırken, alaşımın daha da homojen hale gelmesine yardımcı olunur. Alaşımın kalıba sorunsuz aktığından emin olduktan sonra fırın kapatılır. Alaşımı bulunduğu kalıp fırın içinde kendi halinde soğutulmaya bırakılır. Böylece alaşım yavaş yavaş katılaştığı olur.

Fırın tamamen soğuduktan sonra kalıp fırından çıkartılır. Kalıp ile alaşım haznesi silikon ile yapıştırılan eklentisinden yavaşça ayrılır. Alaşım haznesinin zarar görmemesine dikkat edilir. Zira hazne daha sonra da kullanılabilir.

Hazneden ayrılmış grafit kalıp hafif darbelerle kırılarak numune kalıptan çıkartılır. Numuneler Şekil 3.13’de görülen Metkon MICRACUT 151 marka kesme aleti ile 30 mm uzunlukta, alümina tüpün olmadığı taraftan kesilip Lineer Isı Akış Sistemine yerleştirilmeye hazır hale getirilir.

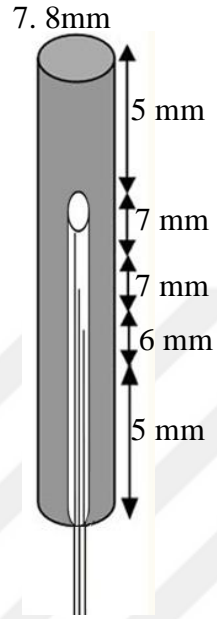


Şekil 3.13 Kesme Aleti

### 3.4.3. Numunenin lineer akış sistemine yerleştirilmesi

30 mm boyunda hazırlanmış numunenin her iki ucundan 10 mm’lik kısımları Şekil 3.7’deki gibi karşılıklı duran sabit soğuk ve sıcak bakır numune tutucuları içindeki deliklere yerleştirilir. Böylece numune içinde doğrusal bir sıcaklık gradyenti elde edilir. Sonrasında termal çiftler Şekil 3.14’teki gibi 7 mm lik aralıklarla dış çapı 1.2 mm, iç çapı

1 mm ve uzunluğu 20 mm olan alümina tüpün içine yerleştirilir. Termal çiftlerin diğer ucu veri kaydedici (data logger) ve bilgisayardan oluşan ölçme sistemine bağlıdır. Veri kaydedici Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Böylece alümina içinde üç farklı noktada sıcaklık ölçülmüş olur.



Şekil 3.14. Numunenin ve ısı çiftlerinin konumlarının şematik çizimi [4]

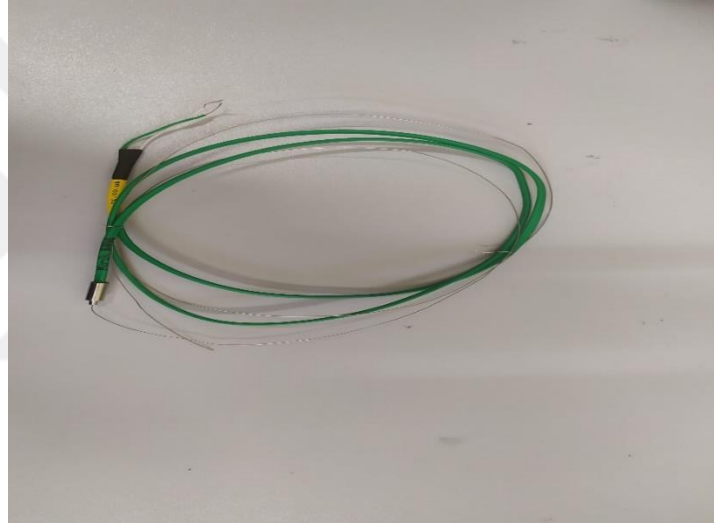


Şekil 3.15. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan sıcaklık kaydedicisi [57]

Termal çiftlere bir çeşit sıcaklık sensörü denilebilir. Farklı iletken malzemelerin bileşiminden oluşur. Birleştirilen bu malzemeler ısıtılırsa iki uç arasında gerilim oluşur. 1821 yılında Seebeck tarafından bulunmuştur. Çok yüksek sıcaklıklarda termometre kullanımı uygun olmadığı için termal çiftler kullanılmıştır. Termal çiftler yaklaşık olarak  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' ye kadar farklı sıcaklıklarda kullanılabildiği için tercih edilir.

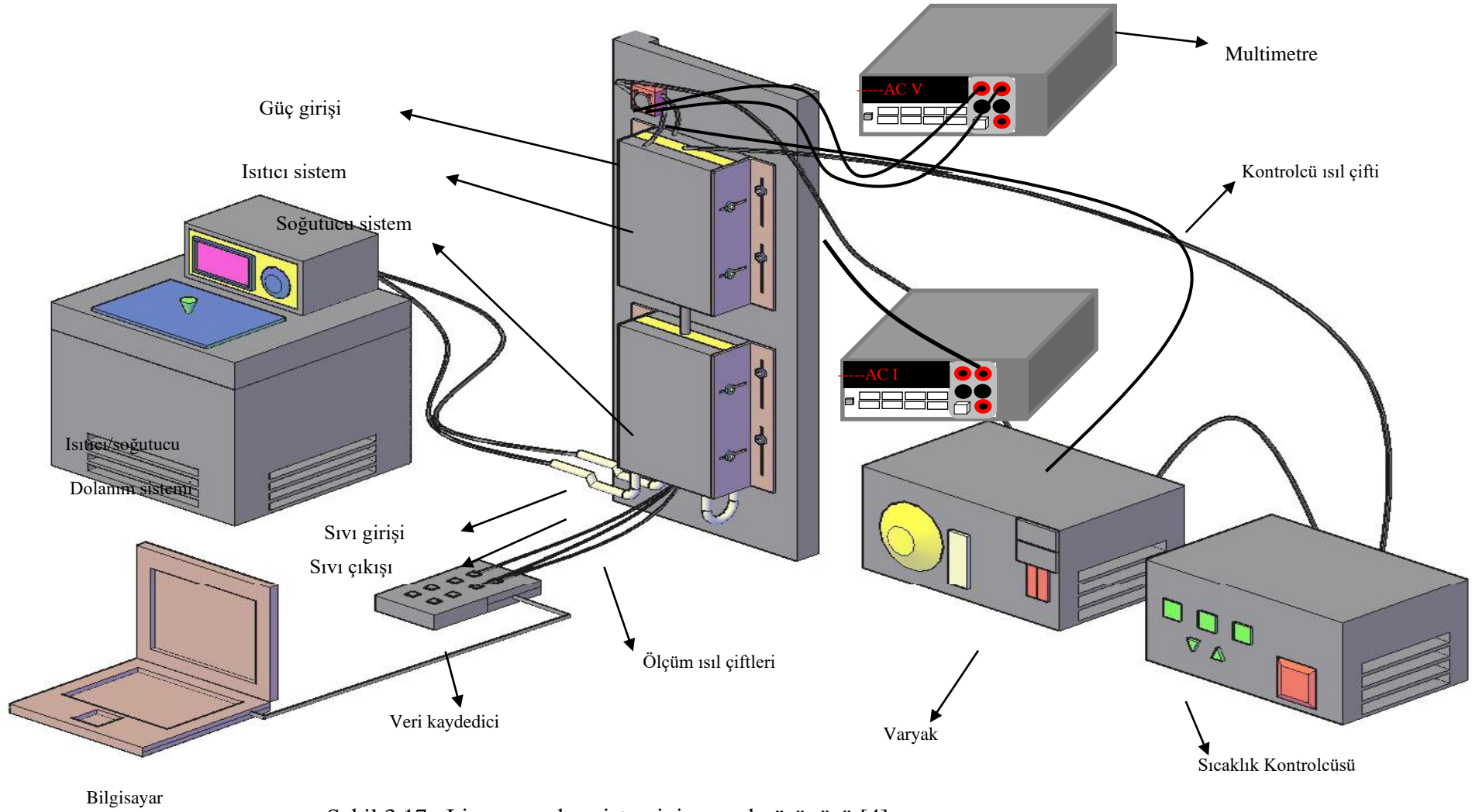
En yaygın kullanılan termal çiftler Chromel – Alümel (K tipi) ve Platin – Platin %13 Rodyum (R tipi) termal çiftlerdir. Düşük sıcaklıklarda K tipi termal çiftlerinin, yüksek sıcaklıklarda ise R tipi termal çiftlerinin kullanılması daha uygundur [55].

Bu tez çalışmasında şekil 3.16'te gösterilen K tipi termal çiftler kullanılmıştır.



Şekil 3.16. Numune ölçümünde kullanılan K tipi Termal Çiftler

Bu tez çalışmasında üç termal çift 7 mm aralıklarla numunen içindeki alümina tüpe yerleştirildi ve ölçüm esnasında çiftlerin kayması için bir bant yardımıyla sistemin bulunduğu masaya sabitlendi. Isıtıcı ve soğutucu sistemlere yerleştirilen numune ve ısıtıcı-soğutucu sistemin sabitlendiği metal plaka düşey olarak tutucu ayaklara yerleştirildi. Burada ısıtıcı ve soğutucu sistemlerin metal plakaya yerleştirildikten sonra, ısı iletiminin üzerinde oluşabilecek herhangi dış etkiyi azaltmak ve numune içine doğru sabit lineer sıcaklık akışı elde etmek amacıyla ısıtıcı sistemin üstte, soğutucu sistemin altta olacak şekilde yerleştirilmesine özen gösterildi. Sistem Şekil 3.17'deki gibi düşey olarak konumlandırıldı.



Şekil 3.17. Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü [4]

#### 3.4.4. Lineer ısı akış sisteminde bir deneyin yapılışı

Numune hazırlandıktan sonra Şekil 3.17’de şematik gösterimi verilen deneysel sisteme yerleştirilir. Sabit bir sıcaklık gradyenti hesaplamak için sıvı dolanım aletinin sıcaklığı 273 K set edilir. Isıtıcı sisteme ise sabit bir güç vermek için Eurotherm 2604 model kontrolcü arasına birbirine seri olacak şekilde 5 kVA ’lık bir varyak bağlandı. Böylece malzemelerin üzerinde kontrollü bir sıcaklık elde edilmiş oldu. Her bir kararlı hal sıcaklığında en az iki saat beklenilerek numune üzerindeki sıcaklığın kararlı hale gelmesi sağlandıktan sonra Hewlett Packard 34401A model multimetre ile  $\pm 1 \mu\text{V}$  hassaslıkta, ısıtıcı tel üzerindeki akım ve voltaj düşmeleri ve her bir termal çiftin bulunduğu noktalardaki okuduğu sıcaklık değerleri Pico TC-08 model veri kaydedicisi (veri logger) ile bilgisayara aktarılarak kaydedildi. Katı fazının ısı iletkenlik katsayısının ölçümünde üç adet K tipi termal çift kullanıldı. Bu termal çiftler 7mm aralıklarla numunenin içine yerleştirildi. Lineer ısı akış sisteminde radyal, ısı kaybı veya kazancı olmadığı varsayılarak, numune üzerindeki sıcaklığın kararlı olduğu durumda ısıl iletkenlik tek boyutlu Fourier-Biot ısı iletim denklemi,

$$K = -\frac{Q \Delta X}{A \Delta T} \quad (2.1)$$

ile ifade edilir.

Burada K katının ısıl 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.

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 ölçülür ve güç girişi hesaplanır. Isınma boyunca arzu edilen bütün ölçümler tamamlandıktan sonra, oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi aynı adımlarla devam edilir.

Numune daha sonra lineer ısı akış sisteminden çıkarılır. Numunenin boyuna kesiti, ölçümlerde hataya sebep olmayacağından emin olmak için gözeneklilik, çatlaklık ve döküm hataları açısından incelenir.



Metalik alaşımların için ısıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi denklem 2.1'den ,  $Q$  ,  $\Delta X$  ,  $A$  ve  $\Delta T$  llen değerleri kullanılarak tespit edilecektir.

### 3.5. Metalografik İşlemler

Isıl iletkenlik katsayısı ölçümünden sonra numunenin içyapısında açığa çıkan fazların fotoğrafları, Şekil 3.18'deki dijital kamera monte edilmiş optik mikroskop ile görüntülenir.

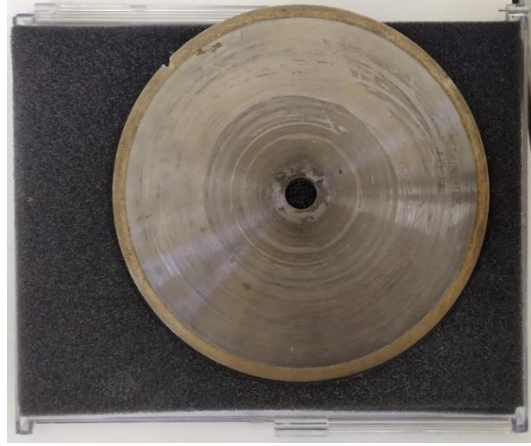


Şekil 3. 18. Optik mikroskop ve CCD kameradan oluşan görüntü sistemi

Numune mikroyapı analizine gönderilmeden önce belli ölçülerde kesilir, daha sonra kalıplanır, zımparalanır ve parlatılır. En son basamakta ise mikroyapıyı net olarak görüntülemek için numuneler dağlanır. Yapılan bu metalografik işlemlerin detayları aşağıdaki gibidir.

#### 3.5.1. Numunelerin kesilmesi ve kalıplanması

Oluşturduğumuz numunelerin istenilen boyuta getirilmesi için Şekil 3.13'de görülen Metkon MICRACUT 151 kesme aleti ve Şekil 3.19'deki hassas kesiciler için kullanılan çapı 152 mm olan elmas kesme diski kullanıldı.



Şekil 3.19. Elmas Kesme Diski

Numuneler kesme aletinde yaklaşık 1 cm kalınlığında pul şeklinde kesilerek kalıplanmaya hazır hale getirilir. Kesilen numuneler soğuk kalıplama tekniği ile epoksi-resin kullanılarak kalıplandı. Numuneler plastikten yapılmış 3-3.5 cm çapında ve 3 cm boyunda kalıbın içine yerleştirilir. Kalıp epoksi-resin dökülmesi esnasında kaymaması için konulduğu zemine sabitlenir.

Epoksi-resin 7 ml Epofix-resin ve 1 ml Epofix-hardener karıştırılarak yapılır. Karışım hazırlanırken epofix-resin ve epofix-hardener boş bir kabın içerisinde iyice karıştırılır. Bu karışım hazırlanan kalıbın içindeki numunelerin üzerine dökülür. Kalıp kendi halinde donmaya bırakılır. Donan epoksi kalıbının dışındaki plastik kalıp çıkartılarak numuneler zımpara ve parlatmaya hazır hale getirilir. Kalıplanmış numuneler Şekil 3.20'deki gibidir.



Şekil 3.20. Epoksi-resin ile kalıplanmış numunelerin resmi

### 3.5.2. Numunelerin zımparalanması

Zımpara pürüzlü yüzeylerin düzeltilmesi işleminde kullanılan bir aşındırıcı olarak tanımlanabilir. Zımpara kağıdının sertliği yüzeyindeki taneciklerin sayısı ile değerlendirilir. Zımpara kağıdında birim yüzeye düşen tanecik sayısına grid denir ve grid arttıkça mikron cinsinden tanecik boyutu azalır. 120-600 gridliler kaba, 800-2000 gridliler ince zımpara olarak gruplandırılır. Bu tez çalışmasında kullanılan zımpara silisyum karbür (SiC) taneleri ve magnetit tozu içeriklidir. Çalışmada zımpara işlemi Şekil 3.21'deki Metkon marka zımpara-parlatma aleti ile yapılmıştır. Alette aynı anda zımparalama ve parlatma işlemi yapılabilmektedir.



Şekil 3.21. Zımparalama-Parlatma aleti

Öncelikle aletin zımpara diskine istenilen tane büyüklüğündeki zımpara kağıdı konulur. Daha sonra aletin su modu açılır. Zımparalama için istenilen devir belirlendikten sonra, kalıplanmış numuneler zımpara üzerine tutularak sulu zımpara işlemi yapılmış olur. Suyun zımparalama işlemi boyunca açık tutulmasının sebebi sürtünmeden dolayı oluşacak ısınmayı engellemek ve zımparaya temasın mümkün olduğunca tüm yüzeyde eşit olmasını sağlamaktır. Çalışmada zımparalama dakikada 160 devirde yapıldı. Zımpralar 120 gridlikten başlayarak 2000'lik grite kadar sırasıyla kullanıldı.

### 3.5.3. Numunelerin parlatılması

Parlatma işlemi Şekil 3.21'deki zımparalama-parlatma aletiyle yapılmıştır. Parlatma işlemi zımparalama işleminden sonra gözle görülmeyen çizikleri yok etmek için yapılır.

Zımparalama bittikten sonra aletin parlatma diskine numuneye uygun özellikte parlatma keçesi yapıştırılır. Keçe ilk etapta su ile ıslatılıp nemlendirilir. Çalışmada parlatma işlemi dakikada 160 devirde yapılmıştır. Parlatma işlemi yapılırken farklı tane büyüklüğünde DIAPAT-M marka elmas süspansiyonlar kullanıldı. Sırasıyla 6µm, 3µm, 1µm, 0.25µm tane büyüklüğüne sahip süspansiyonlar kullanıldı. Numuneler her bir süspansiyon çözeltisinde 15-20 dakika parlatıldı. Parlatma sırasında dönen disk keçenin nemini azaltabilir, bunun için zaman zaman süspansiyon ilavesi yapıldı. Süspansiyonun keçe üzerine eşit dağılmasına dikkat edilmiştir. Yine işlem yapılırken keçenin kurummasını engellemek ve keçe ile numunenin temasının yumuşak bir şekilde sağlanması için, süspansiyona ilaveten yağlayıcı (lübrikant) ilave edilmiştir. Lübrikant 10-15 saniye aralıklarla kullanılır. İşlemi biten her bir süspansiyon aşamasından sonra yeni süspansiyona geçmeden önce keçe ve numune damıtık su ile iyice yıkanır. Parlatma işleminin yapıldığı keçe ve süspansiyonlar Şekil 3.22’te gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Parlatma işleminde kullanılan zımpara, keçe ve süspansiyonlar

#### 3.5.4. Numunelerin dağlanması

“Her ne kadar parlatma sonucunda numunenin yüzeyi düzgün, pürüzsüz ve ayna gibi parlak olsa da numune yüzeyinde kontrast oluşturmaktan 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 [57]. “

Bu tez çalışmasında fazların görülebilmesi için numunelere uygun dağlayıcı belirlenerek kimyasal dağlama tekniği kullanıldı. Kimyasal dağlama numune yüzeyinin gerektiği gibi temizlenip ve parlatıldıktan sonra uygun süre ile dağlayıcı karışıma daldırılmasıyla yapılır. Dağlama süresinin yeterli olup olmadığına mikroskoba bakarak karar verilir.

Bu çalışmada (Sn-1ağ. %Ag-0,5 ağ. %Cu), ( Sn-1ağ. %Ag-0,5 ağ. %Cu-0,5 ağ. %Sb), (Sn-1ağ. %Ag-0,5 ağ. %Cu-1 ağ. %Sb), (Sn-1ağ. %Ag-0,5 ağ. %Cu-1,5 ağ. %Sb) alaşımları için uygun görülen dağlayıcı çözeltisi 2,5 ml hidroklorik asit (HCl), 15 ml su ( $H_2O$ ), 30 ml etil alkol ( $C_2H_5OH$ ) katkılarından oluşturuldu. Çözeltiyi oda sıcaklığında her bir numuneye 50 saniye uygulanarak dağlama işlemi tamamlandı.

### **3.5.5. Fazların belirlenmesi**

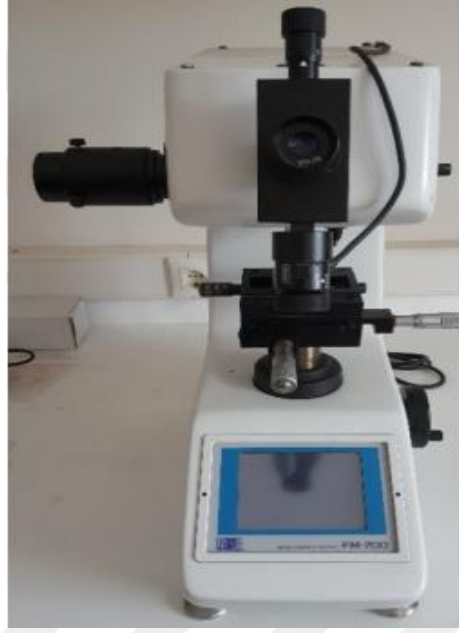
Üretilen numunelerin, gerekli tüm işlemlerden geçirildikten sonra Şekil 3.18’de görülen optik mikroskop yardımıyla faz görüntüleri alındı. Görüntüler farklı büyüklükteki objektiflerle numunelerin farklı bölgelerinden alındı

## **3.6. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Yapılan Hazırlıklar**

Bu tez çalışmasında mekanik özelliklerden sertlik ve çekme-dayanım deneyleri yapılmıştır.

### **3.6.1. Sertlik deneyinin yapılışı**

Numunelerin sertlikleri statik sertlik ölçme yöntemlerinden Vickers Sertlik deneyi ile ölçüldü. Epoksi-resin ile kalıplanmış numunelerin zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra Şekil 3.23’ de görülen sertlik ölçme aleti yardımı ile sertlikleri ölçüldü. Çalışmada numunelerin yüzeyinde farklı bölgelerden seçilen noktalarda 25g’lık HV(  $kg / mm^2$ ) ve 50g’lık HV(  $kg / mm^2$ ) yük altında 10s süre ile sertlik ölçümü yapıldı.



Şekil 3.23. Sertlik ölçme aleti

### 3.6.2. Çekme-dayanım deneyinin yapılışı

Çekme-dayanım deneyi için imalat çeşidine göre standartlarda belirtilen değişik ebatlarda ve kesitlerde numuneler üretilebilir. Bu tez çalışmasında yuvarlak kesitli numune üretildi. Kalıp için 6.35 mm'lik grafit çubuk kullanıldı. Grafit çubuk torna aletinde 50 mm boyunda kesilir. Çubuk tek taraflı olarak 4 mm'lik matkap ucu yardımıyla 40 mm derinliğinde oyulur. Kalıbın yerleştirilmesi için pota (alaşım haznesi) hazırlanır. Pota 40mm'lik grafit çubuk kullanılarak yapılır. Grafit çubuk ilk önce 40 mm boyunda kesilir. Bir ucu 23 mm'lik matkap ucuyla 30 mm derinliğinde oyulur. Diğer ucu 6 mm'lik matkap ucuyla 10 mm delinir. Bir tarafı oyularak hazırlanan kalıp potanın 6 mm'lik matkap ucu ile oyulmuş tarafındaki deliğe yerleştirilir. Eklenti yerleri sızıntı olmaması için ısıya dayanıklı silikonla kapatılır. Böylece kalıp fırında döküm işlemi için hazır hale gelir. Döküm yapılırken, ısıl iletkenlik numunesi hazırlamada uygulanan tüm yöntemler burada da uygulanır. Fırında döküm işlemi bittikten sonra soğuyan kalıp küçük darbelerle kırılır ve 4 cm boyunda ince silindirik şeklindeki numune çekme-dayanım analizi için hazır edilir.

Çekme deneyi cihazları, mekanik tahrikli veya hidrolik olmak üzere iki farklı çalışma sisteminde imal edilir. Çekme cihazlarında, aşağı ve yukarı hareket eden çapraz kafa denilen bir kısım bulunur. Mekanik tahrikli çekme cihazında, bu kafanın aşağı veya yukarı hareketini elektronik motoru, hidrolik çekme cihazlarında ise çapraz kafanın aşağı

veya yukarı hareketi hidrolik pistonlar yardımıyla yapılır. Çekme deneyi cihazı şekil 3.24'te görüldüğü gibi çapraz kafa, tek veya çift kolonlar, gövde ve kontrol ünitesi, yük hücresi, çekme çeneleri ve bilgisayar donanımından oluşur [6].

Bu tez çalışmasında SHIMADZU AG-XD 50kN marka, test alanı: 500mmx1060mm, test hızı aralığı: 0.0005mm/dk-1000mm/dk, tüm hızlarda maksimum hız uygulayabilme, test hızı hassasiyeti:  $\pm 0.1\%$ , veri okuma sıklığı max. 0.2ms, Stroke, force ve stres kontrollü test yapabilme özelliğine, ISO 7500/1, ASTM E4, DIN51221 standartlarına göre 50kN ile 50N aralığında  $\pm 0.1$  hassasiyetli okuma aralığına, SIE 560 otomatik extensiyometre  $\pm 0.5$  veya  $\pm 2.5$  mikron hassasiyetine sahip çekme-basma test cihazı kullanılmıştır.[58]

Çekme deneyi, ilgili standartlara göre hazırlanan deney numunelerinin tek eksen ve sabit hızla koparıncaya kadar çekilmesi ile yapılmıştır. Deney, hazırlanan numunenin çekme aletinin çenelerine takıldıktan sonra başlar. Deney boyunca numuneye sürekli olarak aratan bir kuvvet uygulanıp numunenin kopması ile sonlandırılır. Deney sürecinde numunede kırılma anına kadar meydana gelen uzama kaydedilir. [59]. Deney sırasında elde edilen veriler (2.4), (2.5) ve (2.6) denklemlerinde yerine koyularak gerilme, birim uzama ve % uzama değerleri bulunur.



Şekil 3.24. Çekme-basma test cihazı [58]

### 3.7. Elektriksel İletkenlik

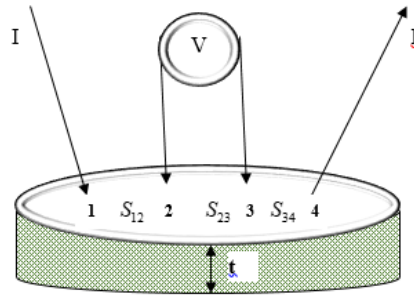
#### 3.7.1. Özdirenç ölçümü

Özdirenç maddenin ayırt edici özelliğidir. Numunelerin özdirençinin belirlenmesi için akım, voltaj ve geometrik yapı faktörü değerlerinin bilinmesi gerekir. Ayrıca özdirenç hesabı için geometrik yapının ölçülerinin bilinmesi gerekir. Özdirenç hesaplanmasında kullanılan  $V=IR$  eşitliğine geometrik yapı etkisinden oluşan “geometrik özdirenç

düzeltilme faktörü (RCF)” değeri eklenir ve yeni öz direnç değeri hesaplanır. Düzeltilme katsayısı numunenin kalınlığına, geometrik şekline, yüzey alanına, bağlantı tellerinin numune üzerindeki konumuna ve dizilişine bağlıdır [60]. Böylece öz direnç ifadesi  $\rho = \frac{V}{I} G$  şeklinde tanımlanır. Burada G “geometrik öz direnç düzeltilme faktörü (RCF)” olarak tanımlanır. Farklı geometrik şekillere ait öz direnç düzeltilme faktörü eşitlikleri tablo 3.1’de verilmiştir. Elektrik iletkenlik ölçmede kullanılan iki teknikten “2- nokta iletkenlik ölçüm” tekniğinde numunenin toplam direncine iletken telin direnci, bağlantı uçları ve numune temas noktasındaki ara yüzeyin direnci eklenir. Bu nedenle bu yöntemde hesaplanan  $\rho$  öz direnci gerçek değerden daha yüksek çıkar [61]. Bu sebeple “4-nokta iletkenlik ölçüm” tekniği tercih edilir. 4-nokta iletkenlik ölçüm tekniğinde, kullanılan bağlantıların uçlarındaki dirençler hesaba katılmaz ve ölçülen  $\rho$  sadece numunenin öz direncidir.

### 3.7.2. 4-Nokta iletkenlik ölçüm tekniğini sistemi

Şekil 3.25’te 4-nokta iletkenlik ölçüm tekniğinde numuneye temas eden problar şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi numuneye dört adet prob temas eder. Bu teller dairesel kesitli ve platinden üretilmiştir. Burada 1 ve 4 noktaları akım(I) ölçülen temas noktaları, 2 ve 3 noktaları ise potansiyel fark (V) ölçülen temas noktalarıdır. s ise problar arası mesafedir ve bu mesafeler birbirine eşittir ( $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s$ ). Teknikte genellikle probların dizilişleri doğrusal ve aralarındaki s mesafesi eşit alınır. t ise ölçüm yapılacak numunenin kalınlığıdır. Tüm bu veriler numunenin G faktörünün alacağı değere etki eder.



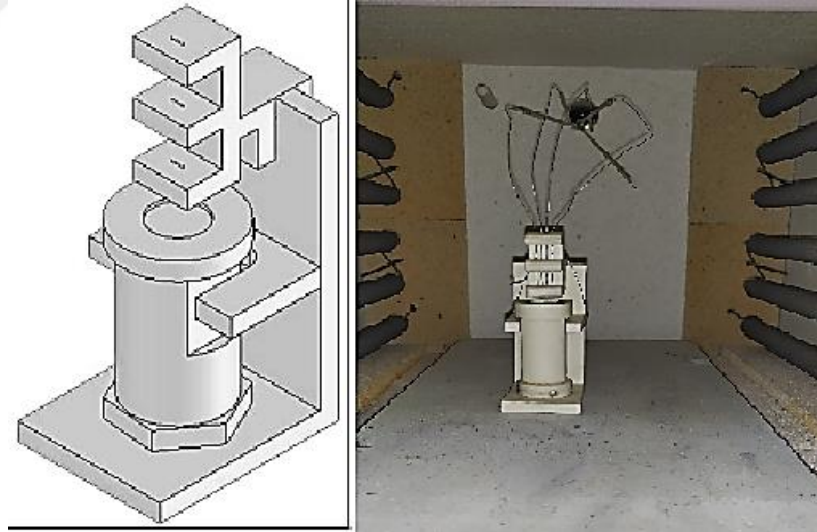
Şekil 3.25. t Kesitli Numune Şematik Gösterimi [61]



Bu tez çalışmasında probalar arası uzaklık 1 mm, t kalınlığı 3 mm ve 7.9 mm çaplı dairesel yüzey alanına sahip numuneler kullanıldı. Deneyin yapıldığı düzenekte Şekil 3.2’de görülen Proton marka kül fırını, akım ve potansiyel farkın ölçüldüğü ölçüm aleti kullanıldı. Fırının içerisinde deney esnasında fırının sıcaklığını ölçmek için 0.25 mm’lik K tipi termal çift kullanıldı. İletkenliği ölçülen numuneden elde edilen akım ve potansiyel farkı bilgisayara kaydedildi.

Şekil 3.26’da görülen numune tutucu, platin tellerinin numuneye tam temas edebilmesi için numunenin yerleştirildiği taşıyıcı tabletin aşağı ve yukarı hareketini sağlayan hareketli mekanizma ve gövdeden oluşmaktadır.

Numune tutucu, bu sistem için özel olarak alümina malzemesinden üretildi. Alüminadan yapılmasının sebebi alümina malzemesinin yüksek sıcaklığa dayanıklı olması ve yüksek sıcaklıkta iletken hale geçmemesidir [61].



(a)

(b)

Şekil 3.26. (a) Numune tutucu şematik gösterimi, (b) Numune tutucu resim [61]

### 3.7.3. Elektriksel iletkenlik ölçümü için deneyin yapılışı

Ölçüm için hazırlanan numune, numune tutucuya yerleştirilir. Platin teller numune üzerine temas ettirilir. Tam temas için numune tutucu tabletler el yordamıyla ayarlanır ve

tam temastan emin olunur. Fırın kapağı içindeki düzeneğin dengesi bozulmayacak şekilde yavaşça kapatılır. Bilgisayarda ölçüm için kullanılan program hazırlanır. Akım ve potansiyel fark değerleri için ölçüm aleti veri alacak konuma getirilir. Fırın ve bilgisayardaki program eş zamanlı olarak çalıştırılır. Programda numunenin erime sıcaklığına yakın bir değere kadar veri kaydedilir. Ardından fırın ve program eşzamanlı olarak kapatılır. Kaydedilen potansiyel fark, akım ve hesaplanan G değeri  $\rho = \frac{V}{I} G$  ifadesinde yerine yazılarak her bir numune için, farklı sıcaklık değerleri için elektriksel özdirenç ifadesi hesaplanır.

Tablo 3.1. Özdirenç düzeltme faktörü eşitlikleri [61].

(∞)- Kesit	(∞)- Yüzey	$G = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_2 + s_3}}$			
		$G = 2 \cdot \pi \cdot s$			(*)
(t)- Kesit	(∞)- Yüzey	$G = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot F_1(t/s)$ $F_1(t/s) = \frac{t/s}{2 \cdot \ln \frac{\text{Sinh } t/s}{\text{Sinh } t/2s}}$	Kalın	$G = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot F_1(t/s)$	(**)
			İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot t$	
			Çok İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2}$	(***)
	(Daire)- Yüzey	$G = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot F_1(t/s) \cdot F_2(d/s)$ $F_2(d/s) = \frac{\ln 2}{\ln 2 + \ln \left[ \frac{(d/s)^2 + 3}{(d/s)^2 - 3} \right]}$	Kalın	$G = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot F_1(t/s) \cdot F_2(d/s)$	(****)
			İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot t \cdot F_2(d/s)$	
			Çok İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot F_2(d/s)$	
<p>(*) <math>s_1 = s_2 = s_3 = s</math></p> <p>(**) <math>t \rightarrow \infty</math> yaklaşırken <math>F_1(t/s) \rightarrow 1</math> yaklaşır. <math>t \geq 5s</math> için <math>F_1(t/s) = 1</math> alınabilir.</p> <p>(***) Sonsuz ince kalınlık için <math>t</math> ihmal edilir.</p> <p>(****) <math>d \rightarrow \infty</math> yaklaşırken <math>F_2(d/s) \rightarrow 1</math> yaklaşır. <math>d \geq 40s</math> için <math>F_2(d/s) = 1</math> alınabilir.</p> <p>* <math>Kalın; t \geq \frac{s}{2}, İnce; t &lt; \frac{s}{2}, Çok (Sonsuz) İnce; t &lt; \frac{s}{10}, Çok (Sonsuz) Kalın; t \geq 5s</math></p>					

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 4.1. Giriş

Kurşun-kalay lehimleri üstün fiziksel, termal ve mekanik özelliklerinden dolayı geniş spektrumlu elektronik paketleme, havacılık, uydu, otomotiv ve enerji endüstrilerinde kullanılmaktadır. [65,66].

Fakat yapılan çalışmalar kurşuna su, gıda, toprak vb. şekillerde maruz kalınmanın merkezi sinir sistemine zarar verebileceğini ve yüksek tansiyona sebep olabileceğini gösterdi. [65] Ayrıca artan çevresel kaygılar, ilgili yasa ve yönetmelikler, Tehlikeli Maddelerin Sınırlandırılması (RoHS) direktifi Sn-Pb lehimleri başta olmak üzere Pb içeren tüm lehimler yerine kurşunsuz lehimlerin gelişmesine yeni bir kapı açtı. [67,68].

Son yıllarda antimonun etkili bir alaşım elementi olması sebebiyle öneminin arttığı görülmektedir. Erime sıcaklığı ve mükemmel ıslana birlik özelliğinden dolayı kurşunsuz lehim alaşımlarında tercih edilmeye başlandı [69].

Bu tez çalışmasında ise Sn-1Ag-0,5Cu (SAC105) lehim alaşımına ağırlıkça (0.5, 1, 1.5) antimon ilavesi yapılarak oluşturulan numunelerin mikro yapı, termal, elektriksel ve mekanik özellikleri incelendi. Eklenen bu antimon miktarının alaşımların termofiziksel özelliklerinde ne gibi değişiklikler yaptığı incelendi.

#### 4.2. Alaşımların Termal Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilmiş olan alaşımların termal özelliklerini belirlemek için diferansiyel taramalı kalorimetre yöntemi (DSC) kullanıldı. Şekil 4.1' de Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının DSC analiz sonuçları yer almaktadır. Elde edilen bu eğriler yardımıyla lehim alaşımları için önem arz eden erime başlangıç sıcaklığı ( $T_{onset}$ ), erime bitiş sıcaklığı ( $T_{end}$ ), erime sıcaklığı ( $T_E$ ), geçiş aralığı ( $\Delta T$ ), ısı kapasitesi ( $C_p$ ) ve entalpi ( $\Delta H$ ) değerleri Tablo 4.1'de verildi.

Malzemelerin sabit basınç altındaki ısı kapasitesi

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (4.1)$$

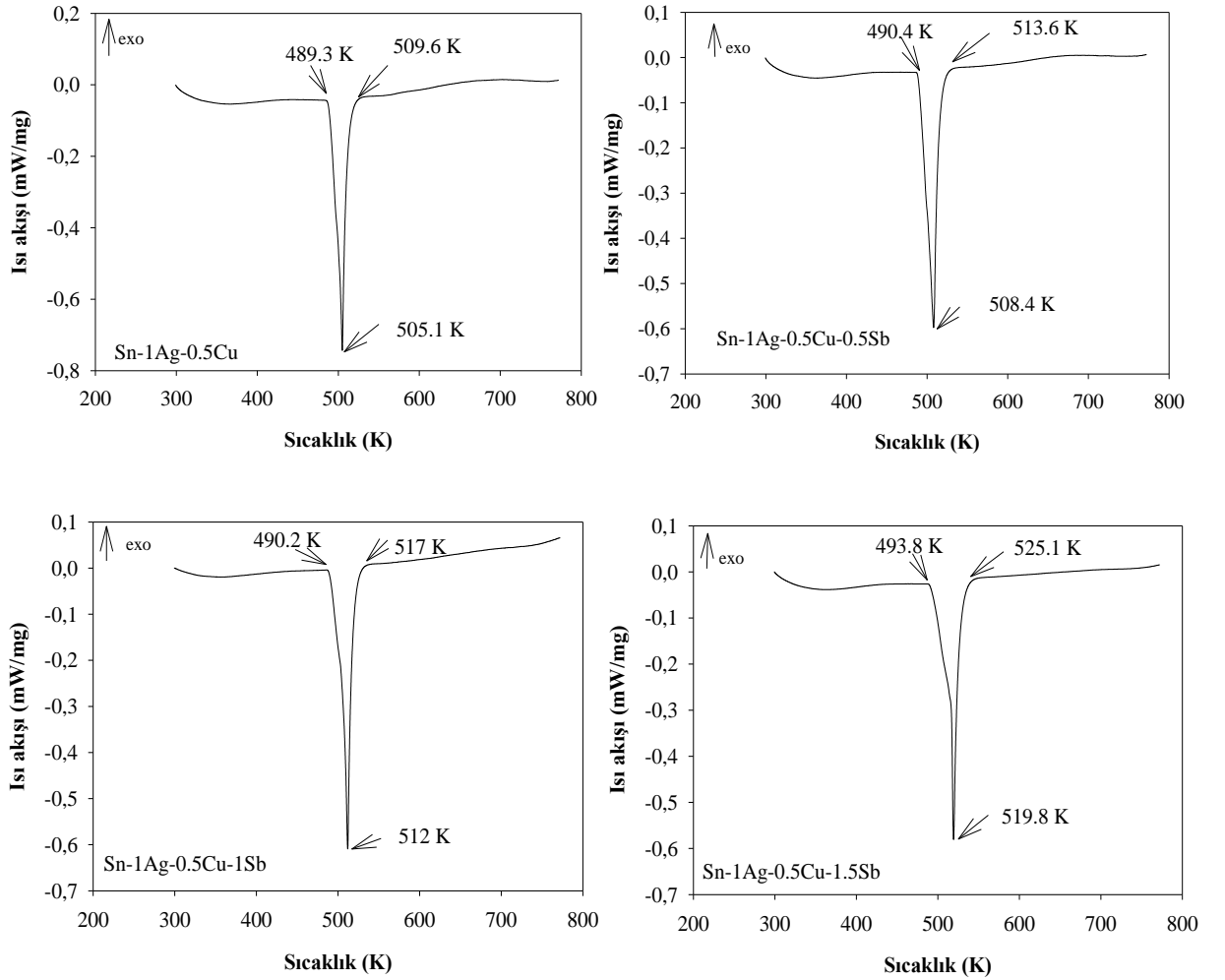
şeklinde verilir. Denklem 4.1'in integrasyonu ile, 298 K'de  $H=0$  tanımlanarak bir malzemenin entalpisi şu şekilde elde edilebilir:

$$H = \int_{298}^T C_p dT \quad (4.2)$$

Erime noktasında sisteme verilen ısı, onun sıcaklığını yükseltmeyecektir. Bu ısı, füzyon entalpisi veya gizli erime ısısı olarak adlandırılır ve katıdan sıvıya dönüşüm için kullanılır. Füzyon entalpisi şu şekilde verilebilir:

$$\Delta H \approx \Delta C_p T_M \quad (4.3)$$

Burada  $T_M$ , erime sıcaklığıdır ve  $\Delta C_p$ , özgül ısının değişimidir. Bu çalışmada üretilen alaşımlar için hesaplanan özgül ısı değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının ısı akışının sıcaklıkla olan değişimi.

Tablo 4.1’de görüldüğü gibi SAC105 alaşımında antimon miktarı arttıkça alaşımın erime noktası da artmaktadır. Bununla birlikte geçiş sıcaklığı aralığı da artış göstermektedir. Bu geçiş sıcaklık aralığı lehim alaşımlarında önemlidir. Çünkü bu değer lehim alaşımının ne kadar hızlı katılaşacağına belirlenmesinde aranan bir kriterdir. Dolayısıyla Sn-1Ag-0.5Cu alaşımının hamurumsu bölge genişliği dar iken Sn-1Ag-0.5Cu-1.5Sb alaşımının daha geniştir.

Bir diğer husus da lehim alaşımlarının ısı füzyonudur. Entalpi değeri 0.27 J/g ile enerji tasarrufunun en iyi sonuç verdiği Sn-1Ag-0.5Cu-1.5Sb alaşımıdır. Alaşımların DSC pik noktalarından hesaplanan özgül ısı değerlerine bakıldığında ise enerji depolama kapasitesinin en düşük olduğu alaşım 0.0011 J/g<sup>0</sup>C değeri ile yine Sn-1Ag-0.5Cu-1.5Sb alaşımıdır.

Tablo 4.1. Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının termal özellikleri

Malzeme (ağ.%)	Sn-1Ag-0.5Cu	Sn-1Ag-0.5Cu-1Sb	Sn-1Ag-0.5Cu-1Sb	Sn-1Ag-0.5Cu-1.5Sb
Başlangıç Sıcaklığı, T <sub>onset</sub> , (K)	489.30	490.40	490.20	493.80
Erime Sıcaklığı, T <sub>E</sub> , (K)	505.10	508.40	512	519.80
Bitiş Sıcaklığı, T <sub>end</sub> , (K)	509.60	513.60	517	525.10
$\Delta T = T_{end} - T_{onset}$ (K)	20.30	23.20	26.80	31.30
Entalpi, $\Delta H$ , (J/g)	0.78	0.69	0.54	0.27
Özgül Isı, C <sub>p</sub> , (J/g <sup>0</sup> C)	0.0034	0.0029	0.0023	0.0011

### 4.3. Alaşımların Isıl İletkenlik Ölçümü

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

$$K = -\frac{Q \Delta X}{A \Delta T} \quad (4.4)$$

ile ifade edilir. Burada  $K$  katının ısı iletkenliği,  $Q$  ısı akış hızı veya numune boyunca akan g¼c girişi,  $A$  ısı akışına dik olan y¼zey alanı,  $\Delta X = X_2 - X_1$  uzunluğu  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarının ¼lç¼ld¼đ¼ 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 g¼c¼n¼n ¼lç¼lmesiydi. Bu zorluğu aşmak için, her bir kararlı hal için numune üzerindeki  $Q$  ısı akış hızının,

$$Q = Q_{NV} - Q_{NY} \quad (4.5)$$

yani  $Q_{NV}$  ve  $Q_{NY}$  arasındaki farka eşit olduğu varsayıldı. Deneysel sistemde numune yokken ( $Q_{NY}$ ) ve numune varken ( $Q_{NV}$ ) verilen giriş g¼c¼ ise kararlı hal durumları altında ısıtıcının üzerindeki voltaj d¼řmesi ve ısıtıcıdan geçen akım ¼lç¼lerek sırasıyla

$$Q_{NY} = V_{NY} \cdot I_{NY} \quad (4.6)$$

ve

$$Q_{NV} = V_{NV} \cdot I_{NV} \quad (4.7)$$

bağıntılılarından bulundu.

Denklem 4.4'ten ısı iletkenliği tespit etmek için; numunenin kesit alanını, çubuk boyunca en az iki noktanın sıcaklığını, sıcaklık ¼lç¼mlerinin yapıldığı noktalar arası uzaklığı ve giriş g¼c¼n¼ tespit etmek gereklidir. Kesit alanını ( $\pi r^2$ ) tespit etmek için çubuk numunenin yarıçapı optik mikroskopla ¼lç¼ld¼. Alaşımların katı fazının ısı iletkenlik katsayısının ¼lç¼m¼nde biri kontrolc¼ ve diğer üç tanesi ise sıcaklık ¼lç¼m¼ 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 ısıl çift arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T$  veri-kaydedici kayıtlarından tutuldu. İki ısıl çift arasındaki uzaklık ısıl çiftlerin konum fotoğrafından ¼lç¼ld¼.

Her bir kararlı hal sıcaklığında en az iki saat beklenilerek Hewlett Packard 34401-A model multimetre ile ısıtıcı sistem üzerindeki potansiyel d¼ř¼ř¼ ile ısıtıcıdan geçen akım ¼lç¼ld¼ ve g¼c girişi hesaplandı. Tablo 2'de g¼r¼ld¼đ¼ gibi ısı iletkenliğin sıcaklıkla

değişimi denklem 4.4'ten,  $Q$ ,  $\Delta X$ ,  $A$  ve  $\Delta T$  ölçülen değerleri kullanılarak tespit edildi. Bu verilerden faydalanılarak Sn-1Ag-0.5Cu-xSb ( $x=0, 0.5, 1, 1.5$ ) alaşım sisteminin ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklığa göre değişim grafikleri çizildi.

Tablo 4.2. Alaşımlar için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişiminden elde edilen deneysel veriler.

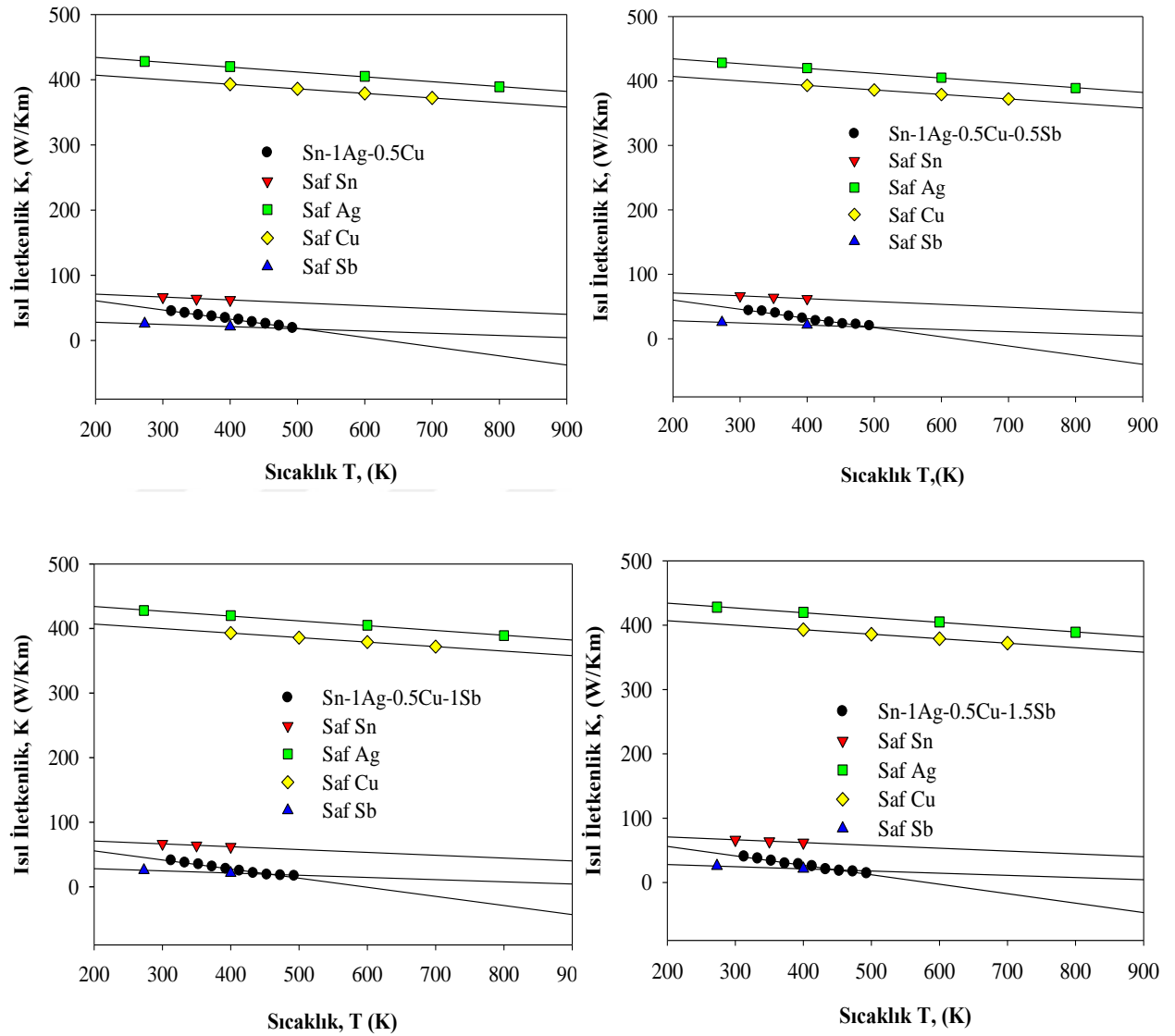
Sn-1ağ. % Ag-0.5ağ. % Cu			
T(K)	Q (W)	$\Delta T$ (K)	K(W/Km)
313	0.25	0.83	44.62
333	0.53	3.69	41.99
353	0.41	3.08	38.70
373	0.79	6.29	36.63
393	0.89	7.64	34.31
413	1.51	6.97	31.76
433	1.65	8.61	28.04
453	1.71	9.91	25.29
473	2.18	14.27	22.39
493	1.09	16.95	18.88

Sn-1ağ. % Ag-0.5ağ. % Cu-0.5ağ.%Sb			
T(K)	Q (W)	$\Delta T$ (K)	K(W/Km)
313	0.48	1.61	43.57
333	0.53	1.82	42.78
353	0.63	2.33	39.87
373	0.87	3.65	35.09
393	0.96	4.41	31.80
413	1.22	6.42	27.95
433	1.30	7.37	25.76
453	1.33	8.47	23.01
473	1.44	9.42	22.36
493	1.58	11.49	20.17

Sn-1ağ. % Ag-0.5ağ. % Cu-1ağ. % Sb			
T(K)	Q (W)	$\Delta T$ (K)	K(W/Km)
313	0.29	1.05	40.78
333	0.59	2.31	37.22
353	0.73	3.10	34.58
373	0.89	3.99	31.14
393	0.92	4.90	27.63
413	0.99	5.87	24.62
433	0.99	6.84	21.17
453	1.00	7.85	18.66
473	1.08	8.95	17.62
493	1.15	10.03	16.82

Sn-1ağ. % Ag-0.5ağ. % Cu-1.5ağ. % Sb			
T(K)	Q (W)	$\Delta T$ (K)	K(W/Km)
313	0.30	1.09	40.14
333	0.45	1.79	37.10
353	0.54	2.35	33.68
373	0.62	3.09	29.27
393	0.75	3.81	28.75
413	0.77	4.49	25.24
433	0.71	5.10	20.31
453	0.73	5.91	18.05
473	0.77	6.70	16.92
493	0.72	7.51	14.01

Bu çalışmada alaşımlara ait ölçülen ısı iletkenlik değerleri saf Sn, Ag, Cu ve Sb [10, 62, 63, 34, 22] metallerinin ısı iletkenlik değerleri ile karşılaştırılarak ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişim eğrileri Şekil 4.2’de gösterildi. Şekil 4.2’de görüleceği üzere ısı iletkenlik değeri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bununla birlikte Sn-1Ag-0,5Cu (SAC105) lehim alaşımına antimon ilavesi arttıkça ısı iletkenliğinin azaldığı gözlemlendi.



Şekil 4.2. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb ( $x=0, 0.5, 1, 1.5$ ) alaşımlarının ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri.



#### 4.4. Isıl Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması

Maddelerin katı fazlarının ısı iletkenliğinin sıcaklıkla ilişkisi doğru orantılıdır. Bu orantıyı gösteren bağıntı ise,

$$K_K = K_{K0} [1 + \alpha_T (T - T_0)] \quad (4.8)$$

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  $\alpha_T$  ise ısı sıcaklık katsayısıdır. Denklem (4.8) ve (4.9) bağıntıları kullanılarak ısı sıcaklık katsayısını veren bağıntı,

$$\alpha_T = \frac{K_K - K_{K0}}{K_{K0} (T - T_0)} = \frac{1}{K_{K0}} \frac{\Delta K}{\Delta T} \quad (4.9)$$

olarak yazılabilir [3]. Şekil 4.2'den ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı grafiğinin eğiminden elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te verilmektedir.

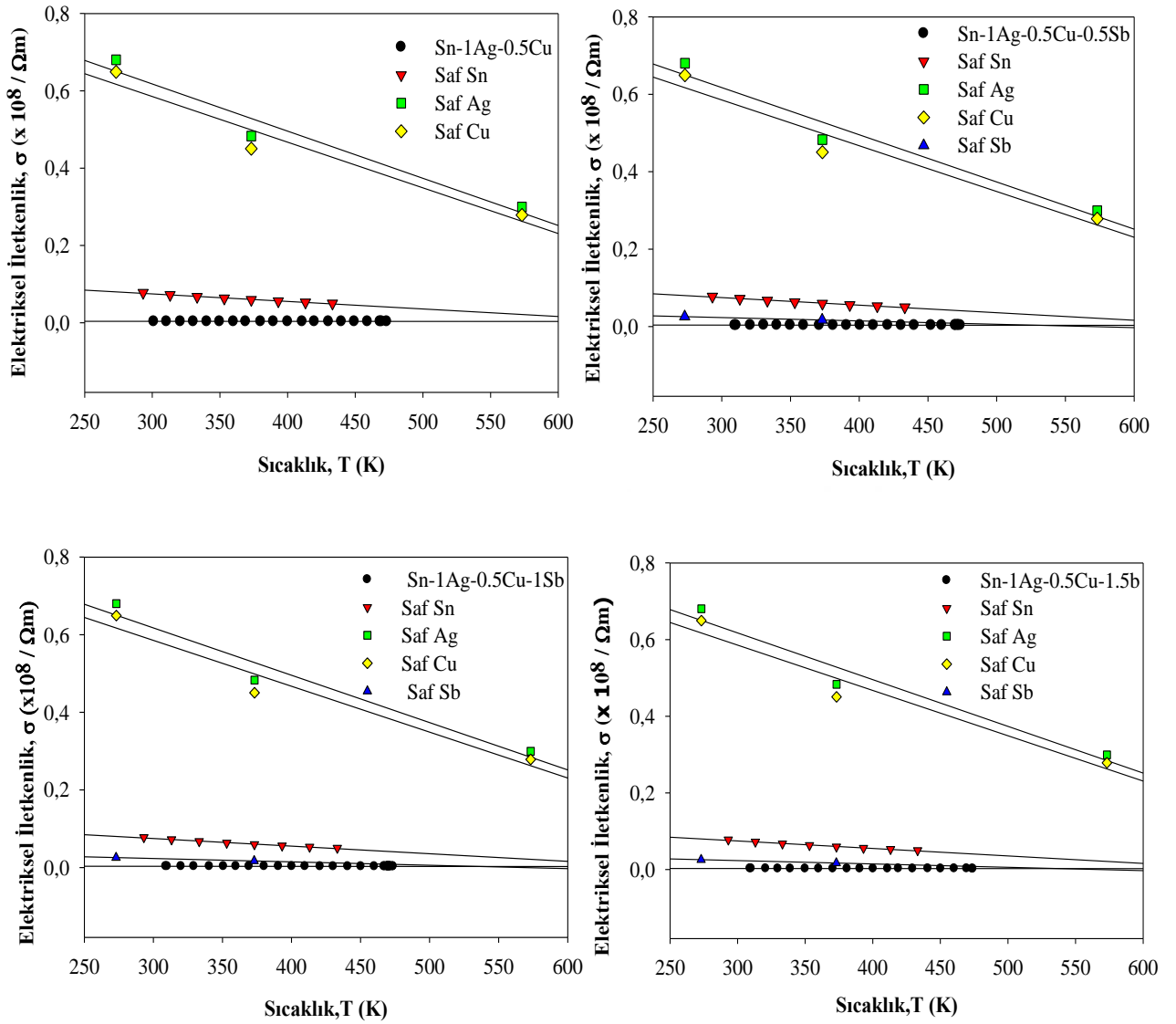
#### 4.5. Elektrik İletkenliği

Bu tez çalışmasında, numunelerin elektrik iletkenliği dört nokta iletkenlik ölçüm tekniği ile yapıldı. Her bir numune için G geometrik öz direnç katsayısı hesaplandı. Deney esnasında kaydedilen V gerilim farkı ve I akım

$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (4.10)$$

denkleminde yerine konularak istenilen sıcaklıklardaki elektriksel öz direnç ifadesi hesaplandı.

Alaşımın sıcaklık- elektriksel iletkenlik eğrileri saf Sn, Ag, Cu ve Sb [70] metallerinin elektriksel iletkenlik değerleri ile karşılaştırılarak Şekil 4.3'te gösterildi. Eğriler incelendiğinde alaşımların elektriksel iletkenliğinin artan sıcaklıkla azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte antimon miktarı arttıkça elektriksel iletkenlikte azalma meydana geldiği tespit edildi.



Şekil 4.3. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri.

#### 4.6. Elektriksel Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması

Katı fazın elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi,

$$\alpha_E = \frac{\sigma_K - \sigma_{K0}}{\sigma_{K0}(T - T_0)} = \frac{1}{\sigma_{K0}} \frac{\Delta\sigma}{\Delta T} \quad (4.11)$$

ile verilir. Burada  $\sigma_K$  katı fazın T sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği,  $\sigma_{K0}$  numunenin  $T_0=300$  K oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği,  $\alpha_E$  ise elektriksel sıcaklık katsayısını

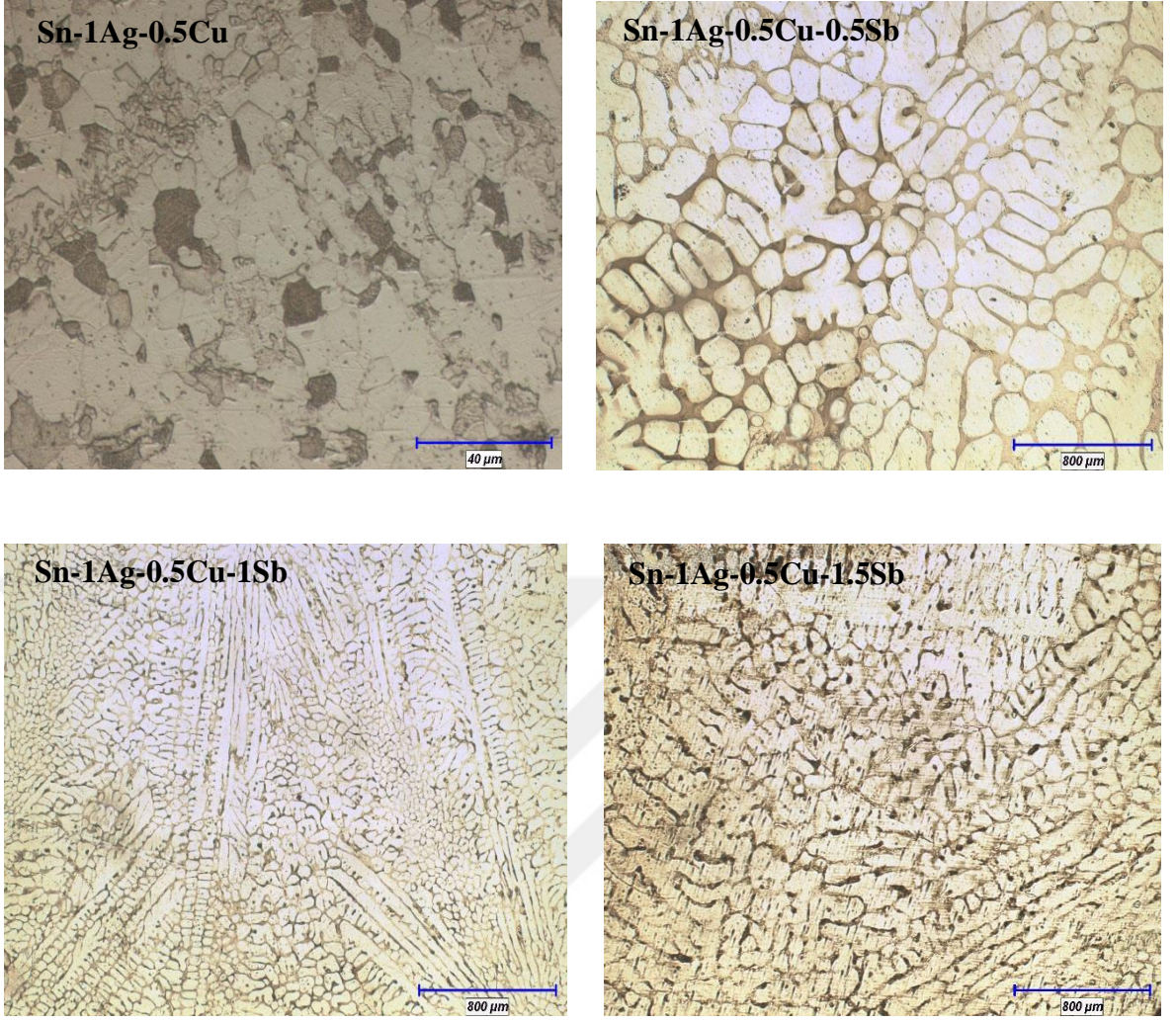
göstermektedir [3]. Denklem 4.11'den elektriksel sıcaklık katsayısının, elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı grafiğinin eğiminden faydalanarak elde edilir.

Tablo 4.3. Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının katı fazlarının ısı ve elektriksel özellikleri.

Malzeme (ağ.%)	Erime Sıcaklığı (K)	Elektriksel İletkenliğin Sıcaklık Katsayısı $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )x10 <sup>-3</sup>	Isıl İletkenliğin Sıcaklık Katsayısı $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )x10 <sup>-3</sup>	Erime Sıcaklığında Elektriksel İletkenlik $\sigma$ (x10 <sup>6</sup> /Ωm)	Erime Sıcaklığında Isıl İletkenlik K (W/Km)
Sn-1Ag-0.5Cu	505.10	4.88	2.95	0.2281	18.08
Sn-1Ag-0.5Cu-0.5Sb	508.40	4.79	3.04	0.2281	17.07
Sn-1Ag-0.5Cu-1Sb	512	4.72	3.43	0.0898	11.08
Sn-1Ag-0.5Cu-1.5Sb	519.80	4.55	3.55	0.0898	9.25

#### 4.7. Mikroyapı Tayini

Malzemelerin mikroyapılarındaki tanecik büyüklükleri, mikrosertlik, stres gibi mekanik özellikleri ve elektriksel, ısısal özellikleri etkilediği bilinmektedir. Metalografik işlemleri tamamlanmış ve uygun görülen dağlayıcı ile dağlanmış olan alaşımların, mikrosertlik değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.18'deki optik mikroskop vasıtasıyla mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.4'te 50X büyütme ile Sn-1Ag-0.5Cu, 2.5X büyütme ile Sn-1Ag-0.5Cu-0.5Sb, Sn-1Ag-0.5Cu-1Sb ve Sn-1Ag-0.5Cu-1.5Sb alaşımlarının mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.4. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının mikroyapı fotoğrafları.

#### 4.8. Alaşımların Mekanik Özellikleri

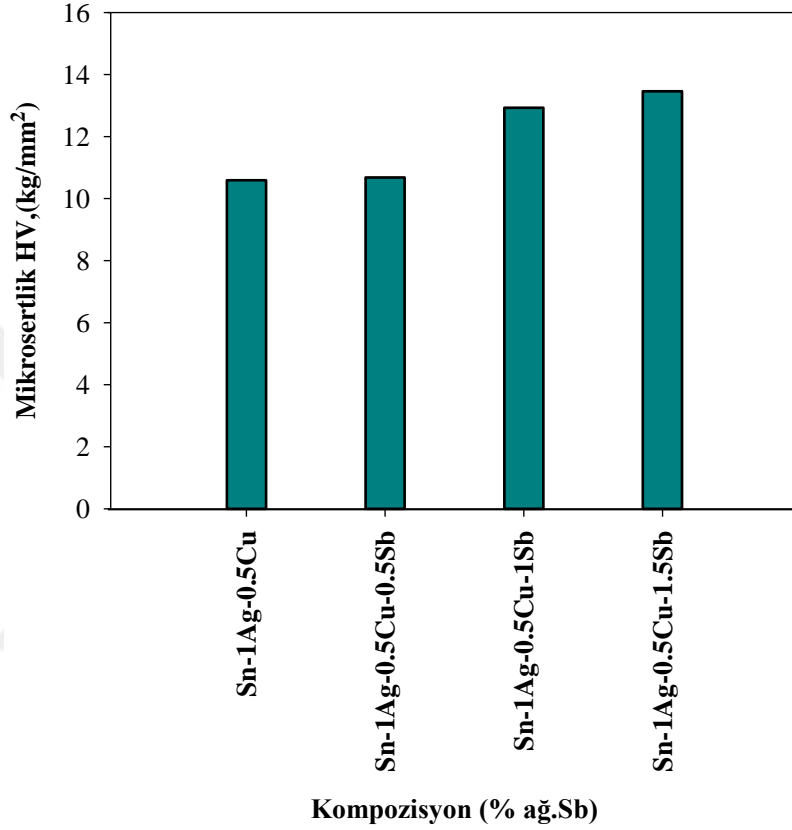
Bölüm 3 de mekanik özelliklerden olan mikrosertlik ve çekme-dayanım testleri detaylı bir şekilde anlatıldı. Bu çalışma da üretilmiş olan alaşımların her biri mikrosertlik ve çekme-dayanım testlerine tabi tutuldu ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.3 'te verildi.

##### 4.8.1. Mikrosertlik değerinin ölçülmesi

Bu tez çalışmasında Vickers sertlik ölçme yöntemiyle mikrosertlik ölçümü yapıldı. Çalışmada numunelerin yüzeyinden en az on farklı noktadan, 25g'lık ve 50g'lık yük altında 10s süre ile sertlik ölçümü yapıldı.

Alınan mikrosertlik değerlerinin değişen kompozisyon miktarlarına göre grafiği Şekil 4.5'deki gibidir. Grafikte görüldüğü gibi antimon (Sb) oranı arttıkça sertlik değeri de

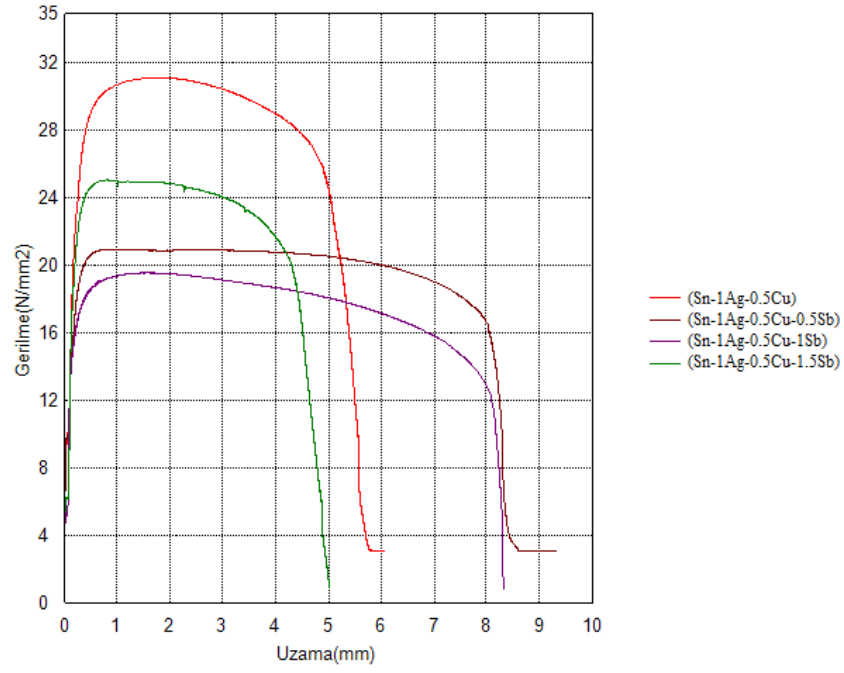
artmaktadır. Tıptan sanayiye kadar çeşitli sektörlerde kullanılan antimon çoğunlukla alaşımları sertleştirmek için kullanılır. Bu özelliklerinden dolayı tez çalışmasındaki alaşımlarda antimon oranı arttıkça sertlik değeri de artmaktadır.



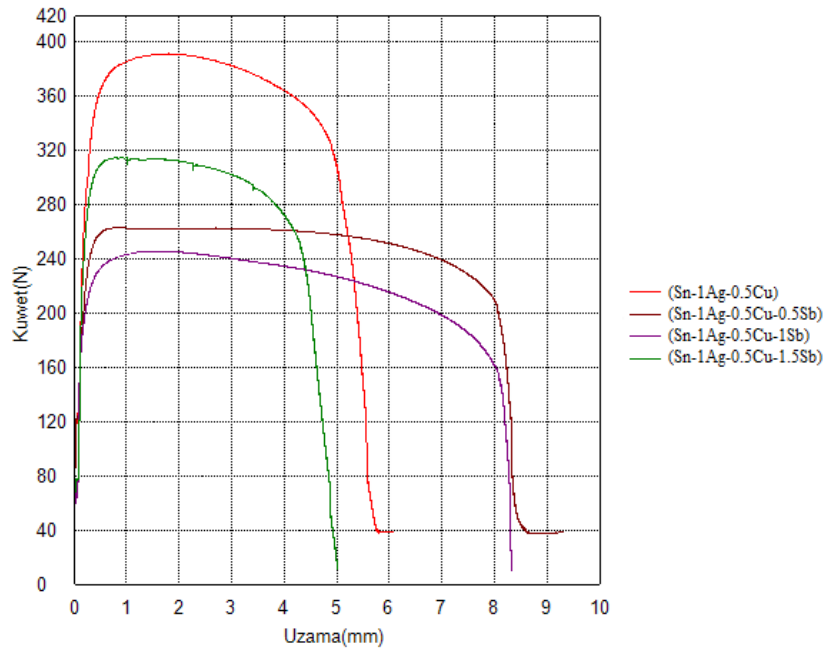
Şekil 4.5. Alaşım kompozisyonlarına göre sertlik değışimleri.

#### 4.8.2. Çekme-Dayanım deneyi

Çekme dayanım deneyi üçüncü bölümde de anlatıldığı üzere, ilgili standartlara göre hazırlanmış olan numuneler *Erciyes Üniversitesi TAUM*'a gönderildi. Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının tipik gerilme-uzama ve kuvvet uzama eğrileri Şekil 4.6 ve şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.6. Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının gerilme-birim uzama diyagramı.



Şekil 4.7. Sn-1Ag-0.5Cu ve Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının kuvvet-uzama diyagramı.

Tablo 4.4 Sn-1Ag-0.5Cu-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının katı fazlarının mekanik özellikleri.

Malzeme	Mikrosertlik HV (kg·mm <sup>-2</sup> )										Çekme-Dayanım σ (MPa)	Uzama (%)	
	25 g. yük					50 g. yük							Ortalama
Sn-1Ag-0.5Cu	11.8	12.0	11.9	14.0	12.2	11.9	11.5	11.3	11.8	12.5	10.59	31.16	12.03
	10.9	4.9	12.1	11.5	6.4	10.0	8.3	9.8	8.1	8.8			
Sn-1Ag-0.5Cu-0.5Sb	10.1	11.1	10.3	10.1	9.4	11.7	10.3	10.6	11.5	10.9	10.68	20.94	5.63
	8.9	10.9	11.1	10.9	11.3	10.8	11.6	11.3	10.9	9.9			
Sn-1Ag-0.5Cu-1Sb	12.7	12.8	13.4	12.2	12.7	13.2	13.5	12.0	13.0	13.1	12.93	19.55	10.49
	14.4	13.3	12.8	13.1	12.4	12.7	12.9	13.1	12.4	13.0			
Sn-1Ag-0.5Cu-1.5Sb	13.5	14.1	15.0	12.9	13.5	13.9	14.0	13.1	12.7	12.2	13.46	25.08	5.48
	12.6	12.9	15.1	14.1	13.0	12.6	14.1	13.8	12.9	13.2			

## KAYNAKLAR

1. Dikici, M., Termal Özellikler, Serbest Elektron Gazı, Katı Hal Fiziği, 2. Baskı, *Şeçkin Yayıncılık*, s. 171-190, 194-200, 2012.
2. Callister, W.D., Rethwisch, D.G., Elektriksel Özellikler, Isıl Termal Özellikler, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 8. Baskı, Genel, K., *Nobel Akademik Yayıncılık*, s. 721-729, 785-792, 2015.
3. Ata, P., Lineer Isı Akış Metoduyla In-Bi İntermetalik Alaşımının Isıl İletkenlik Katsayısının Ölçümü, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir, 2015.
4. Aksöz, N., Metalik Alaşımın Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir, 2013.
5. Karaoğlu, B., Sıcaklık ve Isı, Üniversiteler İçin Fizik, 3. Baskı, *Şeçkin Yayıncılık*, s. 200-209, 2015
6. Uzun, H., Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Faz Diyagramları, Mühendisler İçin Malzeme Biliminin Temel İlkeleri, 1. Baskı, *Değişim Yayınları*, s. 306-375, 2012.
7. John, V. B., Understanding Phase Diagrams, 2-3, *Macmillan Press, London*, 1974
8. Büyük, U., Üçlü Metalik Alaşımın Kontrollü Doğrusal Katılaştırılması ve Mikrosertliğinin İncelenmesi, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi*, Kayseri, 2009.
9. İnternet:Nelson,S.A.,EENS-2120.  
<http://www.tulane.edu/~sanelson/geo1212/ternaryphdiag.htm>, 2011.
10. 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.
11. 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.
12. Topsøe, H., Semiconductor Division, 472-13,38, Vedbaek, 1968.
13. Yıldız, A., Genç, Ö., Bektaş, S., "Enstrümental Analiz Yöntemleri", İkinci Baskı, *Hacettepe Üniversitesi Yayınları A-64*, Ankara, 1997



14. Demir, M., İkili Kurşunsuz Lehim Alaşımlarının Isı İletiminin Ölçümü, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir, 2013.
15. Rosenthal, D., Friedmann, N. E., Thermal Diffusivity of Metals at High Temperatures, *J. Appl. Phys.*, 25(8), 1059-60, 1954.
16. 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.
17. Hsu, S. T., Theory of a New Apparatus for Determining the Thermal Conductivities of Metals, *Rev. Sci. Instr.*, 28(5), 333-6, 1957.
18. Hsu, S. T., Determination of Thermal Conductivities of Metals by Measuring Transient Temperatures in Semi-Infinite Solids, *Trans. ASME*, 79, 1197-1203, 1957.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Kaygısız, Y., et al, Thermal Conductivity and interfacial energies of solid Sn<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> in the Sn-Sb peritectic system, *Thermochimica Acta*, 520, 25-32, 2011.
23. Mhiaoui, S., Sar, F. Gasser, J.G., *J. Non-Cryst. Solids* 353, 3628, 2007.
24. 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.
25. Erol, M., et al, Solid-liquid interfacial energy of bismuth in the Bi-Cd eutectic system, *Scripta Materialia*, 51, 131-136, 2004.
26. Kaygısız, Y., et al, Experimental determination of solid-solid and solid-liquid interfacial energies of solid  $\epsilon$  (CuZn<sub>5</sub>) in the Zn-Cu alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 487, 103-108, 2009.
27. 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.

28. Keşlioğlu, K., Maraşlı, N., Short communication Solid–liquid interfacial energy of the eutectoid  $\beta$  phase in the Al–Zn eutectic system, *Materials Science and Engineering, A* 369, 294–301, 2004.
29. Gündüz, M., Hunt, J.D., *Acta Metall.*, 33, 1651, 1985.
30. 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.
31. Witusiewicz, V.T., et al, *J. Alloy. Compd.*, 387, 217, 2005.
32. Ocak, Y., et al, Interfacial energies of solid CuAl<sub>2</sub> in the CuAl<sub>2</sub>-Ag<sub>2</sub>Al pseudo binary alloy, *Thin Solid Films*, 518, 4322-4327, 2010.
33. Akbulut, S., et al, Interfacial energy of solid In<sub>2</sub>Bi intermetallic phase in equilibrium with In–Bi eutectic liquid at 72 °C equilibrating temperature, *Materials Characterization*, 59,1101-1110, 2008.
34. Kaygısız, Y., et al, Thermal conductivity and interfacial energies of solid Sn in the Sn-Cu alloy, *Chemical Physics Letters*, 484, 219-224, 2010.
35. 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.
36. . Ocak, Y., et al, Experimental determination of thermal conductivity and solidliquid interfacial energy of solid Ag<sub>3</sub>Sn intermetallic in the Sn-Ag-In ternary alloy, *Intermetallics*, 18, 2250-2258, 2010.
37. 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.
38. Mc Cartney, D.G., *D. Phil. Thesis, University of Oxford*, London, UK 85, 1981.
39. 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.
40. 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.
41. Arı, M., et al, Thermo-electrical characterization of Sn–Zn alloys, *Materials Characterization*, 59, 757-763, 2008.

42. Altıntaş, Y., Kaygısız, Y., “The measurements of electrical and thermal conductivity variations with temperature and phonon component of the thermal conductivity in Sn-Cd-Sb, Sn-In-Cu, Sn-Ag-Bi and Sn-Bi-Zn alloys”, *International Journal of Thermal Sciences*, 100, 1-9, 2016.
43. Altıntaş, Y., Aksöz, S., “The experimental determination of thermophysical properties of intermetallic  $CuAl_2$  phase in equilibrium with (Al + Cu + Si) liquid” *J. Chem. Thermodynamics*, 97, 228-234, 2016.
44. Ata Esener, P., Altıntaş, Y., “Effect of Sn contents on thermodynamic, microstructure and mechanical properties in the  $Zn_{90} - Bi_{10}$  and  $Bi_{88} - Zn_{12}$  based ternary alloys”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 3678-3691, 2019.
45. Schleiermacher, A., On the Heat Conduction in Gases, *Ann. Physik Chemie*, 34(8a), 623-46, 1888.
46. 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.
47. Arı, M., et al, Microstructure and thermo-electrical transport properties of Cd-Sn alloys, *Materials Characterization*, 59, 624-630, 2008.
48. Arı, M., et al, Thermo-electrical characterization of Sn-Zn alloys, *Materials Characterization*, 59, 757-763, 2008.
49. Saatçi, B., et al, Thermal and electrical conductivities of Cd-Zn alloys, *J. Phys.: Condens. Matter*, 18, 10643-10653, 2006.
50. Yıldız, F., Üçlü Metalik Alaşımların Isısal ve Elektriksel İletkenliklerinin Ölçümü, *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri*, 2010.
51. El-Ashram , T., and Shalaby, R.M., Effect of Rapid Solidification and Small Additions of Zn and Bi on the Structure and Properties of Sn-Cu Eutectic Alloy, *Journal of Electronic Materials*, Vol. 34, No. 2, 2005.
52. Cardarelli, F., Properties of Tin Alloys, s. 209, 2nd. Ed., *Materials Handbook A Concise Desktop Reference, Springer, London*, 2008.
53. ASM International Handbook Committee, Electrical and mechanical properties of selected tin-base solders, p. 1603-1605, *ASM Handbook v.2, ASM International, USA*, 1990.

54. İnternet: Ege Üniversitesi “DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri)”  
[https://egematal.ege.edu.tr/files/egematal/icerik/20170209\\_dsc.pdf](https://egematal.ege.edu.tr/files/egematal/icerik/20170209_dsc.pdf)
55. Akbulut, S., İkili Saydam Monotektik Alaşımların Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Ölçümü, *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2006.*
56. Engin, S., Metalik Alaşımların Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Doğrusal Büyütme Tekniğiyle Ölçümü, *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2009.*
57. Engin, S., Kontrollü katılaştırılan çok bileşenli ötektik alaşımların, mekanik ve elektriksel özelliklerinin katılaştırma parametrelerine bağlılığının incelenmesi, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2013.*
58. İnternet: Erciyes Üniversitesi “çekme - basma test cihazı”  
<http://taum.erciyes.edu.tr/cekmen.html>
59. Şavaşkan, T., Malzeme Muayenesi, Çekme Deneyi, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 5. Baskı, *Celepler Matbaacılık-Trabzon, s. 305-307, 2009.*
60. Yamashita, M., “Resistivity correction factor for the four-probe method”, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 20: 1454-1456 (1987).
61. Yılmaz, S., “ $Dy_2O_3$ ,  $Eu_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  Katkılanmış  $\beta$ -  $Bi_2O_3$  Tipi Katı Elektrolitlerin Sentezlenmesi, Karakterizasyonları ve Katı Hal Oksijen İyonik İletkenliklerinin Araştırılması”, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2008.*
62. Aksöz S., et al, Determination of thermo-electrical properties in Sn based alloys, *Met. Mater. Int.*, Vol. 16, No. 3, 507-515, 2, 2010.
63. Ocak Y., et al, Thermal conductivity and interfacial energies of solid Sn solution in the Sn–Ag–In ternary alloy, *Chemical Physics Letters* 496 (2010) 263–269.
64. 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.
65. G. Zeng, S. McDonald, K. Nogita, Development of high-temperature solders, *Microelectron. Reliab.* 52 (7) (2012) 1306–1322.
66. Hammad, A. E., “Enhancing the ductility and mechanical behavior of Sn-1.0Ag-0.5Cu leadfree solder by adding trace amount of elements Ni and Sb”, *Microelectronics Reliability*, 87, (2018), 133-141.

67. ABTEW M, SELVADURAY G. Lead-free solders in microelectronics [J]. Materials Science and Engineering R, 2000, 27: 95–106.
68. SHANGGUAN D. Lead-free solder interconnect reliability [M]. Ohio: ASM International, 2005.
69. ] K.J. Puttlitz, K.A. Stalter, Handbook of Lead-Free Solder Technology For Microelectronic Assemblies, Marcel Dekker, Inc, 2004, pp. 292–294.
70. V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, Handbook of Induction Heating. Markel Dekker Inc, New York, 2003, pp. 119-120.

