



**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**KONTROLLÜ DOĞRUSAL KATILAŞTIRILMIŞ
ALÜMİNYUM İÇERİKLİ ÇOKLU ÖTEKTİK ALAŞIMLARIN
YAPI PARAMETRELERİ İLE MEKANİK, ELEKTRİK VE
TERMAL ÖZELLİKLERİNİN KATILAŞTIRMA HIZINA
BAĞLILIKLARININ İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Ümit BAYRAM**

**Danışman
Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI**

Doktora Tezi

**Eylül 2017
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**KONTROLLÜ DOĞRUSAL KATILAŞTIRILMIŞ
ALÜMİNYUM İÇERİKLİ ÇOKLU ÖTEKTİK ALAŞIMLARIN
YAPI PARAMETRELERİ İLE MEKANİK, ELEKTRİK VE
TERMAL ÖZELLİKLERİNİN KATILAŞTIRMA HIZINA
BAĞLILIKLARININ İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Ümit BAYRAM**

**Danışman
Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI**

**Bu çalışma; TÜBİTAK-BİDEB tarafından 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi
Doktora Burs Programı (2013-1) kapsamında ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma
Projeleri Birimi tarafından FDK-2013-4741 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Eylül 2017
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

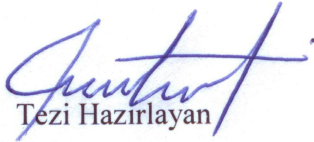
Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Umit BAYRAM

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Kontrollü Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum İçerikli Çoklu Ötektik Alaşımın Yapı Parametreleri İle Mekanik, Elektrik ve Termal Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan

Ümit BAYRAM

Danışman

Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Fizik Bölümü ABD Başkanı

Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN

Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI danışmanlığında Ümit BAYRAM tarafından hazırlanan “Kontrollü Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum İçerikli Çoklu Ötektik Alaşımın Yapı Parametreleri İle Mekanik, Elektrik ve Termal Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

25 /08 / 2017

(Tez savunma sınav tarihi)

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI
 Üye : Prof. Dr. Sait YILMAZ
 Üye : Prof. Dr. Hasan KAYA
 Üye : Doç. Dr. Gökhan KOÇAK
 Üye : Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN

[Handwritten signatures of the jury members]

ONAY:

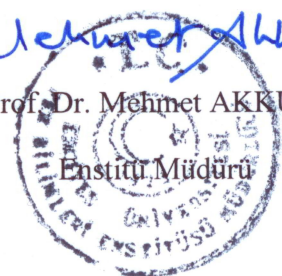
Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 14/08/2017 tarih ve 2017/38-02 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

14 / 08 / 2017

[Handwritten signature of Prof. Dr. Mehmet AKKURT]

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında beni yönlendiren, tüm bilgi birikimini benimle paylaşan, yakın ilgi ve yardımlarını benden esirgemeyen, farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan ve en önemlisi de bu günlere gelmemde büyük katkı sahibi olan danışman hocam sayın Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI 'ya teşekkürü bir borç bilir, minnet ve şükranlarımı sunarım.

Araştırmalarım süresince büyük yardımını gördüğüm, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım değerli hocam, Doç. Dr. Sezen AKSÖZ' e ve tez çalışmam sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamdaki yardımlarından dolayı, özellikle aynı laboratuvarı paylaştığımız çalışma arkadaşlarım Yasin KARAMAZI ve Pınar ATA' ya ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN' e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren TUBİTAK-BİDEB' e (2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı 2013-1) ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FDK 2013-4741) teşekkür ederim.

Her konuda beni yüreklendiren ve çalışmalarımın her aşamasında benden desteğini ve emeğini esirgemeyen eşim Şehnaz BAYRAM' a sabrı, özverisi ve bana olan inancı için sonsuz teşekkür ederim.

Ümit BAYRAM

Eylül 2017, KAYSERİ

KONTROLLÜ DOĞRUSAL KATILAŞTIRILMIŞ ALÜMİNYUM İÇERİKLİ ÇOKLU ÖTEKTİK ALAŞIMLARIN YAPI PARAMETRELERİ İLE MEKANİK, ELEKTRİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN KATILAŞTIRMA HIZINA BAĞLILIKLARININ İNCELENMESİ

Ümit BAYRAM

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Eylül 2017

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

ÖZET

Bu çalışmada, özellikle yirmibirinci yüzyıl bilim ve teknolojisinde kullanılan alüminyum içerikli Al-Cu-Ni (Al-32.5ağ.%Cu-%1ağ.Ni), Al-Cu-Ti (Al-33ağ.%Cu-%0.1ağ.Ti) and Zn-Al-Cu (Zn-5ağ.%Al-%0.5ağ.Cu) ötektik alaşımlarının numuneleri özel olarak tasarlanmış vakumlu eritme fırını ve döküm fırını kullanılarak hazırlandı. Numuneler Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınına yerleştirildikten sonra erime sıcaklığının 50-100 K üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtıldı. Daha sonra bu alaşımlar, doğrusal katılaştırma fırınında, argon ortamı ve sabit sıcaklık gradyenti altında aşağıdan yukarı doğru çok geniş bir katılaştırma hızı aralığında (8.45-2087.15 $\mu\text{m/s}$) katılaştırıldı.

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mikroyapı fotoğrafları optik ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak çekildi. Ötektik mesafelerin, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısıl iletkenlik değerlerinin katılaştırma hızına bağlılıkları, düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için lineer regresyon analizi kullanılarak ayrı ayrı deneysel olarak elde edildi. Aynı şekilde ölçülen ötektik mesafe λ_E ve katılaştırma hızı V değerleri yardımıyla hacimsel büyütme değerleri de belirlendi. Ayrıca, bu alaşımların öz ısı (ΔC_p), entalpi (ΔH) ve erime sıcaklıkları (T_E) değerleri de diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) yardımıyla elde edildi.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Jackson-Hunt ötektik teorisi ve literatürdeki benzer deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlarda; Jackson-Hunt ötektik teorisinin çok yüksek katılaştırma hızlarında mevcut deneysel sonuçla uyuşmadığı gözlemlendi ve Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti and Zn-Al-Cu ötektik alaşımları için kritik katılaştırma hızı değerinin 400.0 $\mu\text{m/s}$ civarında olabileceği ifade edildi.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum alaşımları; doğrusal katılaştırma; mikroyapı; mikrosertlik; çekme-dayanım; elektriksel özdirenç; ısıl iletkenlik.

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF MECHANICAL, ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES WITH STRUCTURE PARAMETERS ON THE GROWTH RATES IN THE CONTROLLED DIRECTIONALLY SOLIDIFIED ALUMINIUM CONTAINED MULTIPLE EUTECTIC ALLOYS

Ümit BAYRAM

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph.D. Thesis, September 2017

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

ABSTRACT

In present work, the samples of Al-Cu-Ni (Al-32.5wt.%Cu-%1wt.Ni), Al-Cu-Ti (Al-33wt.%Cu-%0.1wt.Ti) and Zn-Al-Cu (Zn-5wt.%Al-%0.5wt.Cu) aluminum-contained eutectic alloys which are especially using in the science and technology during the twenty-first century were prepared using specially constructed vacuum melting and casting furnaces. After the specimens were positioned in a Bridgman-type furnace, they were heated up to 50–100 K above the melting temperature. Then, those alloys have been directionally solidified upwards under argon atmosphere and a wide range of growth rates (8.45-2087.15 $\mu\text{m/s}$) at a constant temperature gradient in directional solidification furnace.

The microstructures of the controlled directionally solidified samples were photographed by using an optical light microscopy and the scanning electron microscope (SEM). The dependencies of the eutectic spacings, microhardness, ultimate tensile strength, electrical resistivity and thermal conductivity on growth rates were experimentally obtained by using linear regression analysis for low growth rates, high growth rates and all growth rates one by one. Likewise, the bulk growth rates were also determined by using the measured values of λ_E and V . Also, the values of the specific heat difference (ΔC_P), enthalpy of fusion (ΔH) and melting temperature (T_E) for those alloys were obtained by means of differential scanning calorimetry (DSC).

The results obtained in present work were compared with the Jackson-Hunt eutectic theory and the similar experimental results in the literature. From experimental result, it can be concluded that the Jackson-Hunt eutectic theory differs from present experimental results at higher growth rates and the critical growth rate might be about 400.0 $\mu\text{m/s}$ for the Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti and Zn-Al-Cu eutectic alloy.

Keywords: Aluminum alloys; directional solidification; microstructure; microhardness; ultimate tensile strength; electrical resistivity; thermal conductivity.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI.....	ii
KABUL ve ONAY SAYFASI.....	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR ve SİMGELER	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvii
 GİRİŞ	 1

1. BÖLÜM

KATI-SIVI FAZ DÖNÜŞÜMLERİ İÇİN TEMEL KAVRAMLAR VE KATILAŞTIRILMIŞ ÖTEKTİK MALZEMELERİN MİKROYAPI, MİKROSETLİK, ÇEKME-DAYANIM, ELEKTRİKSEL ÖZDİRENÇ VE TERMAL İLETKENLİKLERİNİN KATILAŞTIRMA HIZINA BAĞLILIĞI

1.1. Gibbs-Serbest Enerjisi	4
1.2. Faz Dönüşümlerinde Denge	6
1.3. Katılaşmada Sürücü Kuvvet	7
1.4. Alt Soğumalar	8
1.4.1. Kinetik Alt Soğuması (ΔT_k).....	11
1.4.2. Çözünürlük Alt Soğuması (ΔT_s).....	11
1.4.3. Eğrilik Alt Soğuması (ΔT_r).....	12
1.5. Çekirdeklenme	13
1.5.1. Homojen Çekirdeklenme.....	13

1.5.2. Heterojen Çekirdeklenme	17
1.6. Alaşımların Katılaştırılması	19
1.6.1. Alaşımların Düzlemsel Cephe Katılaştırılması	21
1.6.2. Alaşımların Hücrel Katılaştırılması	22
1.6.3. Alaşımların Dendritik Katılaştırılması	24
1.6.4. Ötektik Alaşımların Katılaştırılması	25
1.7. Ötektik Yapılar ve Ötektik Yapıların Sınıflandırılması	29
1.7.1. Normal Ötektikler	31
1.7.2. Anormal Ötektikler	31
1.7.3. Üçlü Ötektikler	34
1.8. Ötektik Katılaştırma İçin Teorik Modeller	36
1.8.1. Jackson-Hunt (J-H) Modeli	36
1.8.2. Trivedi-Magnin-Kurz (TMK) Modeli	39
1.8.3. Wilde-Froyen-Witusiewicz-Hecht (WFWH) Modeli	40
1.9. Sertlik	41
1.9.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	42
1.9.2. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi	42
1.9.3. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi	43
1.9.4. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi	44
1.9.5. Mikroyapı Parametresi, Katılaştırma Hızı ve Sertlik Değerleri Arasındaki İlişki	45
1.10. Çekme-Dayanım	45
1.10.1. Mikroyapı Parametresi, Katılaştırma Hızı ve Çekme-Dayanım Değerleri Arasındaki İlişki	47
1.11. Elektriksel Özdirenç.	48
1.11. Isı İletkenliği	54
1.12.1. Isıl İletkenliğin Belirlenmesinde Kullanılan Metotlar	57
1.12.1.1. Kararlı Hal Metotları	59
1.12.1.1.1. Lineer Isı Akış Metotları	60
1.12.1.1.1.1. Mutlak Metotları	60
1.12.1.1.1.1.1. Çubuk (Rod) Metodu	60
1.12.1.1.1.1.2. Levha (Disk) Metodu	61
1.12.1.1.1.2. Karşılaştırmalı Metotları	62

1.12.1.1.2.1. Bölünmüş Çubuk Metodu	62
1.12.1.1.2.2. Levha (Disk) Metodu	63
1.12.1.1.2.3. Bileşik Metot	63
1.12.2. Malzemelerde Isı İletkenliği	63
1.13. Ötektik Katılaştırma Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar.	65
1.13.1. $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ Tipindeki Bağlıntılar	65
1.13.2. $\lambda = kV^{-n}$ ve $\lambda = kG^{-m}$ Tipindeki Bağlıntılar	65
1.14. Metalik Alaşımların Mikrosertliklerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar.	67
1.15. Metalik Alaşımların Çekme-Dayanımlarının Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar.	68
1.16. Metalik Alaşımların Elektriksel Özdirençlerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar.	69
1.17. Metalik Alaşımların Isıl İletkenliklerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar.	70

2. BÖLÜM

DENEYSEL SİSTEM VE BİR DENEYİN YAPILIŞI

2.1. Deneysel Sistem	75
2.1.1. Vakumlu Eritme Fırını	75
2.1.2. Döküm Fırını	78
2.1.3. Kontrollü Katılaştırma Fırını	80
2.1.3.1. Isıtıcı Sistem	80
2.1.3.2. Soğutucu Sistem	81
2.1.3.3. Sürücü Sistem	81
2.2. Bir Deneyin Yapılışı	83
2.2.1. Numunenin Hazırlanması	83
2.2.1.1. Numune Kalıbının Yapılması	83
2.2.1.2. Numune Potasının Yapılması	84
2.2.1.3. Alaşımın Hazırlanması	86
2.2.1.4. Numune Kalıplarının Doldurulması	87
2.2.1.5. Termal Çift Seçimi ve Sıcaklık Ölçümleri	89

2.2.2. Doğrusal Katılaştırma	90
2.2.2.1. Sıcaklık Gradyentinin Ölçülmesi.....	93
2.2.2.2. Katılaştırma Hızının Ölçülmesi	94
2.2.3. Metalografik İşlemler	95
2.2.3.1. Numunelerin Kesilmesi.....	96
2.2.3.2. Numunelerin Zımparalanması.....	97
2.2.3.3. Numunelerin Parlatılması	98
2.2.3.4. Numunelerin Dağlanması.....	100
2.2.4. Mikroyapılar.....	101
2.3. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi	102
2.4. Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi	104
2.5. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi.....	104
2.6. Entâlp ve Öz Isı Ölçülmesi	105
2.7. Lineer Isı Akış Sistemi	106
2.7.1. Isıtıcı Sistem	106
2.7.2. Soğutucu Sistem	107
2.7.3. Numune Tutucu.....	110
2.7.4. Numunenin Lineer Isı Akış Sistemine Yerleştirilmesi.....	111
2.7.5. Lineer Isı Akış Sisteminde Bir Deneyin Yapılışı	114

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Ötektik Alaşımlarda Gözlenen Mikroyapılar	116
3.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi.....	120
3.3. Ötektik Mesafelerin Ölçülmesi	124
3.3.1. Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu Ötektik Alaşımlarında Mikroyapıların Ölçümü	125
3.4. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi.....	125
3.5. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi.....	127

3.6. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi	127
3.7. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Isıl İletkenlik Değerlerinin Ölçülmesi.....	128
3.8. Erime Sıcaklığı, Entalpi ve Özısı Değerlerinin Ölçülmesi.....	132
3.9. Doğrusal Katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu Ötektik Alaşımlarının Ötektik Mesafe, Mikrosertlik, Çekme-Dayanım, Elektriksel Özdirenç ve Isıl İletkenlik Değerlerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi	132
3.9.1. Al-Cu-Ni Ötektik Alaşımının İncelenmesi	132
3.9.2. Al-Cu-Ti Ötektik Alaşımının İncelenmesi	145
3.9.3. Zn-Al-Cu Ötektik Alaşımının İncelenmesi	157

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Deneysel Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması	169
4.1.1. Ötektik Mesafelerin Literatürle Karşılaştırılması	169
4.1.2. Mikrosertlik Değerlerinin Literatürle Karşılaştırılması.....	172
4.1.3. Çekme-Dayanım Değerlerinin Literatürle Karşılaştırılması.....	174
4.1.4. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Literatürle Karşılaştırılması	175
4.1.5. Isıl İletkenlik Değerlerinin Literatürle Karşılaştırılması.....	177
4.2. Sonuç ve Öneriler	179
EKLER.....	185
KAYNAKLAR	188
ÖZGEÇMİŞ.....	206

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
C_o	Alaşımın başlangıç bileşimi	(% ağı.)
C_s	Alaşımın sıvı bileşimi	(% ağı.)
C_k	Alaşımın katı bileşimi	(% ağı.)
G	Sıcaklık gradyenti	(K/m)
G_s	Sıvının sıcaklık gradyenti	(K/m)
G_k	Katının sıcaklık gradyenti	(K/m)
V	Katılaştırma hızı	($\mu\text{m/s}$)
λ	Lamelsel mesafe (enine kesit)	(μm)
λ^*	Lamelsel mesafe (boyuna kesit)	(μm)
λ_E	Lamelsel ötektik mesafe	(μm)
λ_{ext}	Ekstremum ötektik mesafe	(μm)
λ_m	Minimum ötektik mesafe	(μm)
λ_M	Maksimum ötektik mesafe	(μm)
λ_1	Birincil kollar arası mesafe	(μm)
λ_2	İkincil kollar arası mesafe	(μm)
R	Dendrit uç yarıçapı	(μm)
d	Yumuşak bölge derinliği	(μm)
Γ	Gibbs-Thomson katsayısı	(K.m)
$a\grave{g}.$	Ağırlık olarak	--
$at.$	Atomik olarak	--
T	Sıcaklık	(K)
T_{θ}	Ötektik sıcaklık	(K)
G	Gibbs serbest enerjisi	(J)
ΔG	Gibbs serbest enerjisi değişimi	(J)
ΔG_D	Difüzyon için gerekli aktivasyon enerjisi	(J)
ΔG_v	Birim hacim başına düşen serbest enerji	(J/m ³)
g	Molar Gibbs serbest enerjisi	(J/mol)
G_s	Sıvının Gibbs-serbest enerjisi	(J)
G_k	Katının Gibbs-serbest enerjisi	(J)
E	Sistemin iç enerjisi	(J)

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
H	Entalpi	(J)
H_k	Katının entalpisi	(J)
H_s	Sıvının entalpisi	(J)
L	Erime gizli ısı	(J)
ΔT	Alt soğuma	(K)
ΔT_k	Kinetik alt soğuması	(K)
ΔT_s	Çözünürlük alt soğuması	(K)
ΔT_r	Eğrilik alt soğuması	(K)
k	Dağılım katsayısı	--
δ	Lamelsel yapı için boyutsuz parametre	--
m_s	Sıvılık eğrisinin eğimi	(K / % at)
m_α	Ötektik sıcaklıktaki α fazının sıvılık eğimi	(K / % at)
m_β	Ötektik sıcaklıktaki β fazının sıvılık eğimi	(K / % at)
N_L	Toplam lamel sayısı	--
X	Lamellerin toplam genişliği	(m)
P	Peclet sayısı	--
r	Korelasyon katsayıları	--
r	Eğrilik yarıçapı	(m)
r^*	Kritik yarıçap	(m)
σ_{ks}	Katı-sıvı arayüzey enerjisi	(J/m ²)
σ_{ka}	Katı-alt cisim arayüzey enerjisi	(J/m ²)
σ_{sa}	Alt cisim-sıvı arayüzey enerjisi	(J/m ²)
σ_U	Maksimum gerilme değeri	(N/mm ²)
A_{ks}	Katı-sıvı arayüzey alanı	(m ²)
n	Atom sayısı	--
N_a	Avagadro sayısı	(6.02×10 ²³ mol ⁻¹)
k	Boltzmann sabiti	(1.38×10 ⁻²³ J / K)
h	Planck sabiti	(6.63×10 ⁻³⁴ J.s)
R	Gaz sabiti	(8.31 J /mol K)
S	Entropi	(J/K)
ΔS	Birim hacim başına düşen entropi değişimi	(J/m ³ K)

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
D_s	Sıvı içindeki çözünenin dağılım katsayısı	($\mu\text{m}^2/\text{s}$)
f_α	α fazının hacim kesri	--
f_β	β fazının hacim kesri	--
K	Sistem parametresi	--
F	Kuvvet	(N)
P	Basınç	(N/m^2)
V	Hacim	(m^3)
V_k	Katının molar hacmi	(m^3)
V_s	Sıvının molar hacmi	(m^3)
V_F	Düzlemlı fazın hacim oranı	(m^3)
V_{NF}	Düzlemsiz fazın hacim oranı	(m^3)
γ	Yüzey gerilimi	(N/m)
θ	Temas açısı	($^\circ$)
λ	Hücre genişliği	(m)
α	A bileşenince zengin faz	--
β	B bileşenince zengin faz	--
ρ_k	Katının yoğunluğu	(kg/m^3)
ρ_s	Sıvının yoğunluğu	(kg/m^3)
ρ	Elektriksel özdirenc	(Ωm)
I_{hom}	Homojen çekirdeklenme hızı	(atom/s)
I_{het}	Heterojen çekirdeklenme hızı	(atom/s)
HB	Brinell sertliği	(kgf/mm^2)
HR	Rockwell sertliği	(kgf/mm^2)
HK	Knoop sertliği	(kgf/mm^2)
HV	Vickers sertliği	(kgf/mm^2)
D	Baskı küresinin yarıçapı	(m)
d	İz çapı	(m)
L	İz eksenel uzunluğu	(m)
C_p	Düzeltilme faktörü	--
g	Yer çekim ivmesi	(m/s^2)
H_o	Malzemenin ilk sertlik değeri	(kg/mm^2)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması.....	49
Tablo 1.2.	Malzemelerin elektriksel iletkenlik değer aralıkları.	49
Tablo 1.3.	Alaşımelerde kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri	52
Tablo 1.4.	Ötektik katılaştırma üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	66
Tablo 1.5.	Mikrosertlik üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	67
Tablo 1.6.	Çekme-dayanım üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	68
Tablo 1.7.	Elektriksel öz direnç ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	69
Tablo 1.8.	Metalik alaşımların ısı iletkenlik değerleri (W/Km)	70
Tablo 2.1.	Parlatmada kullanılan çözelti ve kumaşlar	100
Tablo 3.1.	Farklı sıcaklıklarda alüminyum çubuk numune üzerindeki güç akışını tespit etmek için tipik deneysel veriler.	130
Tablo 3.2.	Doğrusal katılaştırılmış alaşımların 50°C (323K)'deki ısı iletkenliğinin katılaştırma hızına bağlı olarak değişiminden elde edilen deneysel veriler	131
Tablo 3.3.	Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerine ait diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen veriler.....	131
Tablo 3.4.	Yüksek katılaştırma hızları için dizayn edilmiş çekme motorunda uygulanan gerilime karşılık gelen çekme hızı ve Al-Cu-Ni ötektik alaşımı için numune üzerindeki katılaştırma hızı değerleri.....	135
Tablo 3.5.	Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılan Al-Cu-Ni ötektik alaşımının ötektik mesafe, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değerleri	136
Tablo 3.6.	Yüksek katılaştırma hızları için dizayn edilmiş çekme motorunda uygulanan gerilime karşılık gelen çekme hızı ve Al-Cu-Ti ötektik alaşımı için numune üzerindeki katılaştırma hızı değerleri.....	147
Tablo 3.7.	Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılan Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ötektik mesafe, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değerleri	148
Tablo 3.8.	Yüksek katılaştırma hızları için dizayn edilmiş çekme motorunda uygulanan gerilime karşılık gelen çekme hızı ve Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için numune üzerindeki katılaştırma hızı değerleri.....	159

Tablo 3.9. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılan Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ötektik mesafe, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değ erleri	160
Tablo 4.1. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşımları için katılaştırma deneylerinden farklı katılaştırma hızları için elde edilen bazı bağıntılar	170
Tablo 4.2. Doğrusal katılaştırılmış bazı Al ve Zn esaslı ikili ve üçlü alaşımlarda ötektik katılaştırma üzerine yapılan ç alışmalar ve elde edilen bağıntılar	172
Tablo 4.3. Doğrusal katılaştırılmış alaşımlarda mikrosertlik değ erlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafeye bağıllığı	173
Tablo 4.4. Doğrusal katılaştırılmış alaşımlarda çekme-dayanım değ erlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafeye bağıllığı	175
Tablo 4.5. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımların elektriksel öz direnç değ erlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafeye bağıllığı	177
Tablo 4.6. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımların ısı iletkenlik değ erlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafeye bağıllığı	178

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Katı ve sıvı fazların Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi.....	5
Şekil 1.2. Atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjisinin değişimi.....	7
Şekil 1.3. Katılaştırmada zamana bağlı sıcaklık değişimi ve alt soğuma.....	8
Şekil 1.4. Alaşımların katılaştırılmasında yapısal alt soğuma (a) Katı-sıvı arayüzeyi, (b) Katı-sıvı arayüzey önündeki çözünence zengin bölge, (c) Yapısal olarak alt soğuma.....	10
Şekil 1.5. Çözünürlük alt soğumasına neden olan faktörlerin şematik gösterimi..	12
Şekil 1.6. Homojen çekirdeklenmede embriyonun serbest enerjisinin embriyo yarıçapına bağlılığı	14
Şekil 1.7. Heterojen çekirdeklenmenin şematik gösterimi.....	17
Şekil 1.8. Aktivasyon enerjisinin ve çekirdeklenme hızının alt soğumaya göre değişimi	19
Şekil 1.9. Değişik malzemelerde gözlenen mikroyapılar.....	20
Şekil 1.10. Birbirini sınırlı oranda eriten ikili sistemlerde denge faz diyagramı	21
Şekil 1.11. Düzlemsel cephede katılaşmanın şematik gösterimi.....	21
Şekil 1.12. Düzlemsel katılaşmadan dendritik katılaşmaya geçiş.....	23
Şekil 1.13. Hücresel katılaşmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi.	23
Şekil 1.14. (a) Katı ve sıvı fazlar arasında malzemenin katılaşma morfolojisi ve yumuşak bölge derinliği, (b) Al-Cu alaşımında oluşan dendritlerin fotoğrafı	24
Şekil 1.15. Dendritik katılaşmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi.	25
Şekil 1.16. İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu.....	26
Şekil 1.17. Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu	27
Şekil 1.18. Lamelsel ötektik büyümenin şematik gösterimi (a) Lamelsel büyümede katı-sıvı arayüzey şekli, (b) Katı-sıvı arayüzeyinde A ve B atomlarının bileşimi, (c) Lamelsel ötektik mesafeler..	28
Şekil 1.19. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımlara ait farklı yapılar a) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), düzlemsel arayüzey,	

b) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), eğrisel arayüzey,	
c) Düzlemsiz/Düzlemlı (Nf/F), düzlemsel arayüzey,	
d) Düzlemsiz/Düzlemlı (Nf/F), eğrisel arayüzey,	
e) Düzlemlı/Düzlemlı (F/F), düzlemsel arayüzey,	
f) Düzlemlı/Düzlemlı (F/F), eğrisel arayüzey	32
Şekil 1.20. Farklı ötektik yapıların şematik gösterimi	
(a) Lamelsel ötektik (Pb-Sn), (b) Çubuksal ötektik (Cu-Cr),	
(c) Küresel ötektik (Cu-CrO), (d) Karmaşık Düzenli ötektik (Al-Si).	
(e) Çin yazısı yapı (Al-Si-Mg)	34
Şekil 1.21. Doğrusal katılaştırılmış üçlü ötektiklerin sınıflandırılması (a-a*) Üçlü	
lamelsel büyüme, (b) Bir lifli, iki lamelsel büyüme, (c) İki lifli, bir	
lamelsel büyüme, (d) Bir ana faz, iki lifli büyüme, (e) Üçlü lifli büyüme	35
Şekil 1.22. Temas açıları ve ötektik yapının şematik gösterimi.....	37
Şekil 1.23. Jackson-Hunt modelinin öngördüğü sabit kayılaştırma hızında alt	
soğuma ile lamelsel mesafeler arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (a)	
Eğriliğin ve çözünürlüğün etkisi, (b) Farklı hızlarda alt soğumaya karşı	
lamelsel mesafelerin değişimi	38
Şekil 1.24. Sabit hızda ötektik mesafe ile ortalama arayüzey alt soğumasının	
ilişkisi ve kararlı-kararsız bölgeler	39
Şekil 1.25. Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi.	42
Şekil 1.26. (a) Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi,	
(b) Batan ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı	44
Şekil 1.27. Çekme-uzama diyagramı.	46
Şekil 1.28. İki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği.	51
Şekil 1.29. Dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği.	54
Şekil 2.1. Vakumlu eritme fırınının fotoğrafı.....	76
Şekil 2.2. Vakumlu eritme fırınının şematik gösterimi	77
Şekil 2.3. Döküm fırınının fotoğrafı.....	78
Şekil 2.4. Döküm fırınının şematik gösterimi.	79
Şekil 2.5. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırını	82
Şekil 2.6. Grafit numune kalıbı (a) Üst enine kesiti, (b) Alt enine kesiti,	
(c) Yandan görünüşü	84
Şekil 2.7. Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi.....	85
Şekil 2.8. (a) Grafit numune kalıplarının yapımında kullanılan pirinç destek ve	

değişik ebatlarda matkap uçları,	
(b) Üst destek ile numune kalıplarının silikon yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmesi.....	86
Şekil 2.9. Alaşım metallerinin tartılmasında kullanılan hassas terazi.....	86
Şekil 2.10. Grafitten yapılmış (a) Pota ve (b) Huninin şematik gösterimi.....	88
Şekil 2.11. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan sıcaklık kaydedicisi.....	90
Şekil 2.12. Deney sisteminin şematik gösterimi.	91
Şekil 2.13. Deney sisteminin fotoğrafı.....	91
Şekil 2.14. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının içyapısı (a) Fırının sıcak ve soğuk bölgeleri, (b) Numune kalıbı	93
Şekil 2.15. Yüksek katılaştırma hızlarına çıkabilmek için özel olarak dizayn edilmiş çekme motoru fotoğrafı.	95
Şekil 2.16. Numune için, numune kalıbının oluşturulmasından epoksi- resin ile kalıplanması sürecine kadar ki her bir aşamanın gösterimi.	96
Şekil 2.17. Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kağıtları.	97
Şekil 2.18. Kesme robotu ile kesilmiş numunedeki yüzey durumu (A, B, C tabakaları zımparalama işlemiyle oluşan şekil değişikliklerini D ise orijinal iç yapıyı göstermektedir)	97
Şekil 2.19. Otomatik parlatma robotu.	98
Şekil 2.20. Numunelerin parlatılmasında kullanılan (a) Kumaşlar ve (b) Süspansiyonlar.....	99
Şekil 2.21. Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) fotoğrafı (a) Dıştan görünüş, (b) İçten görünüş	102
Şekil 2.22. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının şematik gösterimi, (b) Numune üzerinde cihazın bıraktığı izin detayları.....	103
Şekil 2.23. Mikrosertlik ölçüm cihazının fotoğrafı... ..	103
Şekil 2.24. Çekme-dayanımı ölçüm cihazının fotoğrafı.....	104
Şekil 2.25. Elektriksel iletkenlik ölçüm düzeneği.....	105
Şekil 2.26. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı.....	106
Şekil 2.27. Isıtıcı sistemin genel görünümü	106
Şekil 2.28. Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı	108
Şekil 2.29.a. Soğutucu sistemin genel görünümü	109
Şekil 2.29.b. Soğutucu bloğun şematik gösterimi	109

Şekil 2.30. Soğutucu-ısıtıcılı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü.....	110
Şekil 2.31. Numune tutucunun şematik gösterimi	111
Şekil 2.32. Numunenin ve ısıtıcı çiftlerin konumlarının şematik çizimi.....	112
Şekil 2.33. Numunelerin ısıtıcı iletkenlik, katılaştırma hızı ve soğuma eğrisi ölçümünde kullanılan termal çiftler	112
Şekil 2.34. Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü	113
Şekil 3.1. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=9.25-2056.68 \mu\text{m/s}$) doğrusal katılaştırılmış Al-% 32.5 Cu-% 1 Ni (ağ.) ötektik alaışımının düşük ve yüksek katılaştırma hızlarında çekilen bazı SEM fotoğrafları.....	117
Şekil 3.2. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.58-2038.65 \mu\text{m/s}$) doğrusal katılaştırılmış Al-% 33 Cu-% 0.1 Ti (ağ.) ötektik alaışımının düşük ve yüksek katılaştırma hızlarında çekilen bazı SEM fotoğrafları..	118
Şekil 3.3. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.45-2087.15 \mu\text{m/s}$) doğrusal katılaştırılmış Zn-% 5 Al-% 0.5 Cu (ağ.) ötektik alaışımının düşük ve yüksek katılaştırma hızlarında çekilen bazı SEM fotoğrafları..	119
Şekil 3.4. Al-Cu-Ni ötektik alaışımının kimyasal bileşim analizi (EDX); Siyah faz (Al(α) çözelti fazı), gri faz (Al ₂ Cu intermetalik fazı) ve ani soğutulmuş ötektik sıvı faz.	121
Şekil 3.5. Al-Cu-Ti ötektik alaışımının kimyasal bileşim analizi (EDX); Siyah faz (Al(α) çözelti fazı), gri faz (Al ₂ Cu intermetalik fazı) ve ani soğutulmuş ötektik sıvı faz	122
Şekil 3.6. Zn-Al-Cu ötektik alaışımının kimyasal bileşim analizi (EDX); Siyah faz (Al(α) çözelti fazı), gri faz (Zn (η) çözelti fazı) ve ani soğutulmuş ötektik sıvı faz	123
Şekil 3.7. Ötektik mikroyapılar arası mesafelerin gösterimi (boyuna kesit).....	124
Şekil 3.8. Düzenli ötektiklerde lamelsel mesafelerin ölçümü (a) Geniş bölge görüntüsü (enine kesit), (b) Dar bölge görüntüsü (enine kesit).....	125
Şekil 3.9. (a) Al-Cu-Ni, (b) Al-Cu-Ti ve (c) Zn-Al-Cu alaışimleri için ötektik mikroyapı mesafelerinin ölçümünün alınmış olduğu bölgeden örnek ölçümler ve SEM görüntüleri.	126

Şekil 3.10. Doğrusal katılaştırılmış ötektik (a) Al-Cu-Ni (b) Al-Cu-Ti (c) Zn-Al-Cu alaşımlarına ait optik mikroskop ile çekilmiş örnek sertlik iz fotoğrafları.....	127
Şekil 3.11. Sabit sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının ötektik mesafelerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar	135
Şekil 3.12. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	137
Şekil 3.13. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	137
Şekil 3.14. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.....	138
Şekil 3.15. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımın mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.....	138
Şekil 3.16. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	139
Şekil 3.17. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	139
Şekil 3.18. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.....	140
Şekil 3.19. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaışımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.....	140

Şekil 3.20. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	141
Şekil 3.21. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	141
Şekil 3.22. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı	142
Şekil 3.23. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı	142
Şekil 3.24. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının ısıl iletkenlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	143
Şekil 3.25. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının ısıl iletkenlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	143
Şekil 3.26. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanım ve uzama (%) eğrileri	144
Şekil 3.27. Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.) ötektik alaşımı için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen ısı akışı-sıcaklık eğrisi	144
Şekil 3.28. Sabit sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar	147
Şekil 3.29. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	149
Şekil 3.30. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar	149

- Şekil 3.31. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları. 150
- Şekil 3.32. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları..... 150
- Şekil 3.33. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 151
- Şekil 3.34. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 151
- Şekil 3.35. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları..... 152
- Şekil 3.36. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları..... 152
- Şekil 3.37. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 153
- Şekil 3.38. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 153
- Şekil 3.39. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı..... 154
- Şekil 3.40. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı..... 154

Şekil 3.41. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ısıl iletkenlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	155
Şekil 3.42. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ısıl iletkenlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	155
Şekil 3.43. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanım ve uzama (%) eğrileri	156
Şekil 3.44. Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) ötektik alaşımı için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen ısı akışı-sıcaklık eğrisi	156
Şekil 3.45. Sabit sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar	159
Şekil 3.46. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	161
Şekil 3.47. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar	161
Şekil 3.48. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.....	162
Şekil 3.49. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.....	162
Şekil 3.50. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	163
Şekil 3.51. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.....	163

- Şekil 3.52. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları..... 164
- Şekil 3.53. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları..... 164
- Şekil 3.54. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 165
- Şekil 3.55. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 165
- Şekil 3.56. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı..... 166
- Şekil 3.57. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel öz direnç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı..... 166
- Şekil 3.58. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ısı iletkenlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 167
- Şekil 3.59. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ısı iletkenlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar..... 167
- Şekil 3.60. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanım ve uzama (%) eğrileri 168
- Şekil 3.61. Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) ötektik alaşımı için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen ısı akışı-sıcaklık eğrisi 168

- Şekil 4.1. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin farklı büyütme hız aralıkları ile değişimi ve literatürdeki bazı Al-Cu esaslı ötektik alaşımların deneysel sonuçları ile Al-33 Cu (% ağırlık) ötektik alaşımı için Jackson-Hunt ötektik teorisinin öngördüğü ötektik mesafelerin değişimi 170
- Şekil 4.2. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin farklı büyütme hız aralıkları ile değişimi ve literatürdeki bazı Al-Cu esaslı ötektik alaşımların deneysel sonuçları ile Al-33 Cu (% ağırlık) ötektik alaşımı için Jackson-Hunt ötektik teorisinin öngördüğü ötektik mesafelerin değişimi 171
- Şekil 4.3. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin farklı büyütme hız aralıkları ile değişimi ve Zn-5Al (ağırlık) alaşımı için literatürdeki deneysel sonuçları ile Jackson-Hunt ötektik teorisinin öngördüğü ötektik mesafelerin değişimi 171

GİRİŞ

Alaşım, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bileşimde eritilmesiyle elde edilen yeni bir katı çözeltidir. Alaşımlar, alaşım tipine bağlı olarak kendisini oluşturan elementlerin özelliklerini taşıyabileceği gibi, bu elementlerin özelliklerinden başka yeni özellikler de taşıyabilirler. Alaşımlar saf metallerden elde edilen malzemelere göre birçok açıdan üstün özelliklere sahiptirler. Fakat bilim ve teknolojinin yirminci yüzyıldaki hızlı ilerleyişi ile özellikle otomotiv, uçak, haberleşme vb. endüstri dallarındaki gelişmeler, fiziksel, kimyasal, elektriksel ve manyetik özellikleri yüksek malzemelere ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Başlangıçta iki metalin karışımıyla elde edilen alaşımlar, sonra üç veya daha fazla metalin karıştırılması ile elde edilmeye başlanmıştır [1-11].

Saf metal veya eriyik kristallerin çekirdeklenme ve büyümeleri üzerinde yürütölen çalışmalar, dökümlerle elde edilen malzemelerin yapı ve özelliklerinin anlaşılmasında yeni boyutlar kazandırmıştır. Sıvı fazdan katı faza geçiş ve yüzey yapısı üzerine son elli yıldır fizikçiler, malzeme bilimcileri ve özellikle son yıllarda uygulamalı matematikçiler yoğun bir şekilde çalışmaktadırlar. Çok fazlı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar güncelliğini korumakta, yeni teori ve bulgularla çalışmalar sürdürölmektedir. Özellikle ötektik katılaştırma, ötektik yapı ile ana faz ilişkisi ve çok fazlı kompozit malzeme üretimi üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir [4-38].

Günümüzde alaşımların katılaştırılması genellikle tek kristallerin büyütölmesinde, malzemelerin saflaştırılmasında ve malzemede homojen bileşim elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu tür katılaştırmaların en önemli ticari uygulamaları yarı iletken kristallerin büyütölmesi, oksit lazer sistemleri, ısıya ve zora dayanıklı savunma sistemleri ve optik uygulamalar için kristallerin büyütölmesidir. Czochralski kristal büyütme yöntemi [39], bölgesel arıtma metodu [20] ve Bridgman doğrusal katılaştırma yöntemi [40] günümüzde yaygın olarak kullanılan kristal büyütme yöntemleridir.

Katılaştırma olayında, katılaştırılan malzemenin bileşimi (Co), sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırma hızı (V) birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Co , G ve V parametreleri "*katılaştırma parametreleri*" olarak bilinir. Katılaştırma parametrelerine bağlı olarak, kontrollü katılaştırılan ötektik malzemenin λ_E (ötektik mesafe, lameller arası mesafe veya lamelsel mesafe) değeri ve buna bağlı olarak malzemelerin mekanik, elektriksel ve ısısal özellikleri değişmektedir.

Dünyada en fazla mevcut metaller sıralamasında alüminyum ikinci sırayı alır. Alüminyum metalinden muhtelif alaşımlama ve farklı ısıl işlem şartı ile çok farklı fiziksel ve mekanik özellikler elde etmek mümkün olmuştur. Endüstriyel uygulama amacı için dört yüze yakın sayıda alüminyum alaşımı geliştirilmiştir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri, özgül ağırlığının düşük olması, elektriği ve ısıyı iyi iletmesi ve kolay biçimlendirilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı günümüz endüstrisinde son yıllarda artan kullanım alanına sahip malzemeler konumuna gelmişlerdir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının her geçen gün yeni kullanım alanları açılmakta olup bu kullanım alanları; ev eşyalarından uzay teknolojisine kadar geniş bir alana yayılmıştır. Mühendislik uygulamalarında ve insan yaşamında yaygın kullanım alanı bulan alüminyumun en belirgin özelliği hafifliğidir. Buna ilaveten alüminyuma katılan alaşımlama elementleri de alüminyumun mukavemet ve sertlik özelliklerini daha da iyileştirerek diğer metallere göre üstün olmasını sağlarlar. Özellikle bakırın alüminyum içine katılanması döküm kabiliyetini iyileştirmesinin yanı sıra mukavemet ve sertlik özelliklerini de artırır. Bu nedenle literatürde alüminyum ve bakır içeren çoklu alaşımlar üzerine yapılan çalışmaların sayısı oldukça fazladır. Bu çalışmalara bakıldığında genel olarak özellikle ötektik kompozisyonda çalışmaların yoğunlaştığı görülmektedir. Çünkü ötektik kompozisyon, alaşımı yapılan elementlerin erime noktasından daha düşük erime noktasına sahip olup alüminyum alaşımlarının akıcılığını artırmasının yanında tek bir sıvı fazdan iki ayrı katı faz elde edilmesi nedeniyle endüstriyel uygulama alanına sahiptir.

Yapılan güncel çalışmalar ve yirminci yüzyıl teknolojisinin ihtiyaç duyduğu mekaniksel, elektriksel ve termal özellikler göz önüne alınarak bu doktora tez çalışmasının amacı; alüminyum içeren üçlü ötektik metalik alaşımları geniş hız aralığında ($8.45\text{-}2087.15\ \mu\text{m/s}$) ve sabit sıcaklık gradyentinde kontrollü doğrusal olarak katılaştırmak ve katılaştırılmış numunelerden ötektik yapı parametresi (lamelsel mesafe

λ_E) ile mekaniksel özellikler (sertlik, çekme-dayanım), elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değ erlerinin büy ütme hızına bağlılığını lineer regresyon analizi ile ortaya koymaktır. Ayrıca elde edilen sonuçları ilgili teorik modellerle ve literatürde yer alan benzer deneysel çalışmaların sonuçları ile de karşılaştırmaktır.

Bu amaçla tez çalışması için belirlenen Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu üçlü ötektik alaşımları Bridgman tipi katılaştırma yöntemi kullanılarak sekiz farklı hızda katılaştırılmış ve katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı (λ_E), sertlik (HV), çekme-dayanım (σ_C), elektriksel öz direnç (ρ) ve ısı iletkenlik (K_k) üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca alaşımların kompozisyon analizi için EDX (energy dispersive X-Ray), öz ısı (ΔC), entalpi (ΔH) ve erime noktası (T_E) gibi diğer termal özelliklerin tespit edilmesi için de DSC (differential scanning calorimeter) analizleri yapılmıştır.

1.Bölüm’ de katı-sıvı faz dönüşümleri ve bu dönüşümlere etki eden parametreler anlatılacak, ardından malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri hakkında temel bilgiler özetlenecektir. Ayrıca temel katılaştırma türleri hakkında kısa bilgiler verildikten sonra ötektik katılaştırma, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik üzerine yapılan deneysel sonuçlar hakkında literatürde yer alan bazı çalışmalar da tablolar halinde verilecektir. 2. Bölüm’ de ise deneysel sistemler ve deneylerin yapıları ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Elde edilen bulgular, grafikler ve tablolar halinde 3. Bölüm’ de verilecektir. Son olarak 4. Bölüm’de deneysel sonuçların literatürle kıyaslanması yapılacak ve yorumlanacaktır.

1. BÖLÜM

KATI-SIVI FAZ DÖNÜŞÜMLERİ İÇİN TEMEL KAVRAMLAR VE KATILAŞTIRILMIŞ ÖTEKTİK MALZEMELERİN MİKROYAPI, MİKROSETLİK, ÇEKME-DAYANIM, ELEKTRİKSEL ÖZDİRENÇ VE TERMAL İLETKENLİKLERİNİN KATILAŞTIRMA HIZINA BAĞLILIĞI

Bu bölümde öncelikle katılaştırma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için katı-sıvı faz dönüşümleri ve bu dönüşümlere etki eden parametreler anlatılacak ve Gibbs serbest enerjisi, faz dönüşümlerinde denge durumu, sürücü kuvvet ve alt soğumalar üzerinde de kısaca durulacaktır. Daha sonra katılaştırma türleri hakkında kısa bilgiler verilerek ötektik katılaştırma üzerinde durulacak, daha önce yapılan ötektik katılaştırma çalışmaları özetlenecek ve katılaştırma parametrelerinin mikroyapı, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik üzerine etkisi izah edilecek ve literatürde bu konuyla ilgili mevcut bazı çalışmalar özetlenecektir.

1.1. Gibbs Serbest Enerjisi

Katı-sıvı faz dönüşümleri sabit sıcaklık ve sabit basınçta oluşan bir faz dönüşümü olup Gibbs serbest enerjisiyle izah edilir. Gibbs serbest enerjisi,

$$G = H - TS \quad (1.1)$$

olarak ifade edilir [12]. Burada T mutlak sıcaklık, S entropi (sistemin düzensizliğinin ölçüsü) ve H ise entalpi (sistemin ısı kapasitesinin ölçüsü)'dir. Entalpi,

$$H = E + PV \quad (1.2)$$

olarak ifade edilir. Burada E sistemin iç enerjisi, P basıncı ve V hacmidir. Sistemin iç enerjisi atomların kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Kinetik enerji, katıdaki atomların titreşim enerjisinden ve sıvıdaki atomların titreşim, öteleme ve dönme

enerjilerinden ileri gelir. Potansiyel enerji ise atomların bağ enerjilerinden ve birbirleri ile olan etkileşme enerjilerinden oluşur. Katı-sıvı faz dönüşümlerinde PV terimi E ile mukayese edildiğinde çok küçük olduğundan sistemin entalpisi yaklaşık olarak sistemin iç enerjisine eşittir. Yani $H \cong E$ olur.

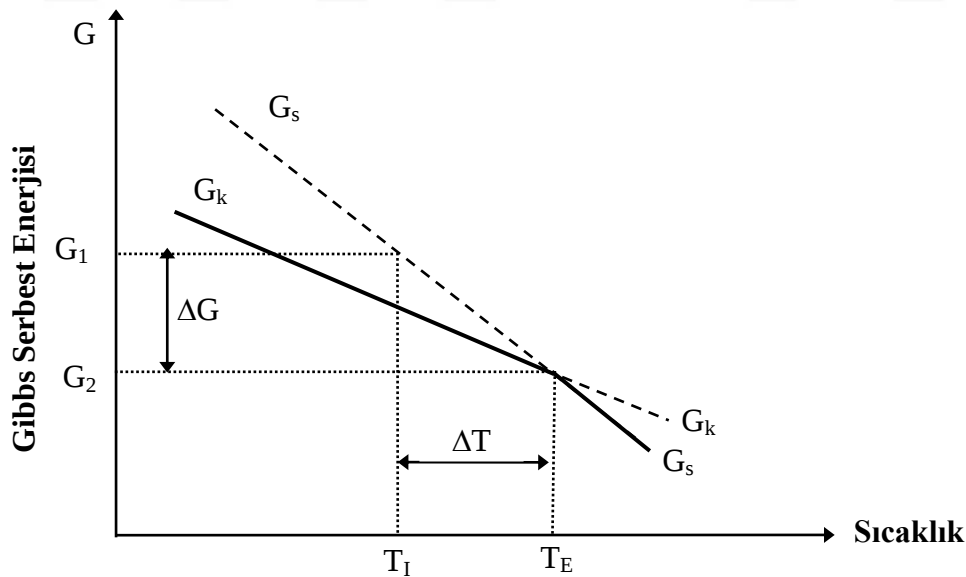
Sabit kütleli ve sabit bileşimli yani kapalı bir sistem için Gibbs serbest enerjisinin sıcaklıkla değişimi klasik termodinamiğe göre,

$$dG = -SdT + VdP \quad (1.3)$$

olarak elde edilir. Sabit basınçta $dP = 0$ olduğundan,

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P = -S \quad (1.4)$$

olur. Bu ifadeden sıcaklığın artmasıyla Gibbs serbest enerjisinin azaldığı anlaşılmaktadır. Katı ve sıvı fazların Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Katı ve sıvı fazların Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi.

Eğer bir sıvı erime sıcaklığı, T_E ’nin altındaki bir T_I sıcaklığına kadar soğutulursa sıvının T_E sıcaklığında aniden katıya dönüşeceği beklenebilir. Oysa bu her zaman mümkün değildir. Örneğin, uygun şartlar altında saf metaller sıvı fazdan katı faza geçerken soğutma hızına bağlı olarak erime sıcaklığının birkaç derece altında katılaşabildikleri

gibi yüksek aşırı soğuma nedeniyle erime sıcaklığının 300 °C altında bile katılaşabilirler [35, 36]. Bunun sebebi, ilk katı oluşurken yeni bir katı-sıvı arayüzeyinin oluşumu için büyük miktarda bir enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır. Sıvı fazdaki atomların katı faza geçmeleri için $\Delta T = T_E - T_I$ kadar bir sıcaklık değişimine ihtiyaç vardır. Bu sıcaklık düşmesi sırasında sıvıdaki atom veya moleküller katıya benzer bir yapıya sahip olan atom gruplarını (embriyo) oluşturmak için bir araya gelirler. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi sıvı-katı faz dönüşümünün olabilmesi için Gibbs serbest enerjisi azalmalıdır. Gibbs serbest enerjisindeki bu azalma katılaşmada sürücü kuvveti meydana getirir. Bir sistemde faz dönüşümünün olabilmesi için son durumun Gibbs serbest enerjisi G_2 ’nin ilk durumun Gibbs serbest enerjisi G_1 ’den küçük olması gerekir. Yani $\Delta G = G_2 - G_1 < 0$ olmalıdır. Sistem kararlı denge durumuna ulaşabilmek için yüksek enerjili durumdan (G_1) düşük enerjili duruma (G_2) geçmek isteyecektir.

1.2. Faz Dönüşümlerinde Denge

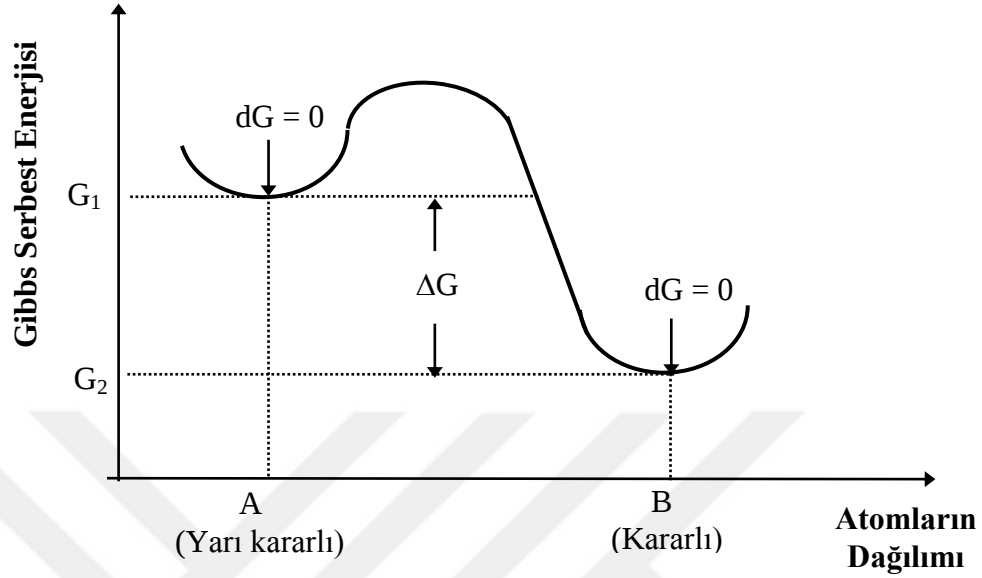
Bir sistemin dengede olması, mekanik, termal ve kimyasal olarak dengede olması demektir. Katı-sıvı arayüzeyi hareket etmediği zaman sistem mekanik olarak dengededir. Arayüzey sabit bir sıcaklıkta tutulduğu zaman ise termal dengededir. Kimyasal denge durumunda ise fazların kimyasal potansiyelleri eşittir, yani kütle akışı olmaz.

Sıvı fazın entropisinin büyük olmasından dolayı sıvının Gibbs serbest enerjisi katının Gibbs serbest enerjisinden daha hızlı azalmaktadır (Şekil 1.1). Erime sıcaklığından (T_E) küçük sıcaklıklarda katı fazın serbest enerjisi sıvı fazın serbest enerjisinden daha küçüktür. Bu yüzden katı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise sıvının serbest enerjisi katının serbest enerjisinden daha küçüktür. Dolayısıyla erime sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda sıvı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığında ise her iki fazın Gibbs serbest enerjileri birbirlerine eşittir. Böylece erime sıcaklığında katı ve sıvı faz birlikte dengede bulunurlar.

Klasik termodinamiğe göre sabit basınç ve sıcaklıkta bulunan yalıtılmış bir sistemin Gibbs serbest enerjisi minimum değerinde ise bu sistemin dengede olduğu söylenir. Yani yalıtılmış bir sistemin denge durumu için Gibbs serbest enerjisi matematiksel olarak,

$$(dG)_{T,P} = 0 \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 1.2’de atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjileri verilmektedir.



Şekil 1.2. Atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjisinin değişimi [12].

Şekil 1.2’de görüldüğü gibi (1.5) denklemini A (yarı kararlı) ve B (kararlı) durumları sağlamaktadır. B durumunda sistemin Gibbs serbest enerjisi mümkün olabilecek en küçük değere sahip olduğundan sistem *kararlı denge* durumundadır denir. A durumunda da Gibbs serbest enerjisindeki değişim sıfırdır fakat mümkün olabilecek minimum değerden büyüktür. Bu durumu kararlı denge durumundan ayırt etmek için A noktasına *yarı kararlı denge* durumu denir. Kararlı denge durumu ile yarı kararlı denge durumu arasındaki geçiş durumlarına ise *kararsız denge* durumları denir [12].

1.3. Katılaşmada Sürücü Kuvvet

Bir sıvı erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulursa Gibbs serbest enerjisinde $\Delta G = G_2 - G_1$ kadar değişme olacaktır (Şekil 1.1). Gibbs serbest enerjisindeki bu azalma katılaşma için gerekli olan sürücü kuvveti sağlar [12]. Katılaşma için gerekli olan serbest enerji değişim miktarı aşağıdaki şekilde elde edilebilir;

Sabit basınçta ΔT sıcaklık aralığında katı ve sıvı fazlar için Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişiminin lineer olduğu kabul edilir. Böylece Gibbs serbest enerjileri,

$$G_k = H_k - T S_k \text{ ve } G_s = H_s - T S_s \quad (1.6)$$

olur. Bu durumda,

$$\Delta G = G_k - G_s = H_k - H_s - T(S_k - S_s) = \Delta H - T\Delta S \quad (1.7)$$

şeklinde elde edilir. Burada k ve s indisleri sırasıyla katı ve sıvı fazları göstermektedir. Saf bir maddenin faz dönüşüm sıcaklığında (yani T_E 'de), $G_k = G_s$ olacağından $\Delta G = 0$ olur. Buna göre denklem (1.7)'den,

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_E} \quad (1.8)$$

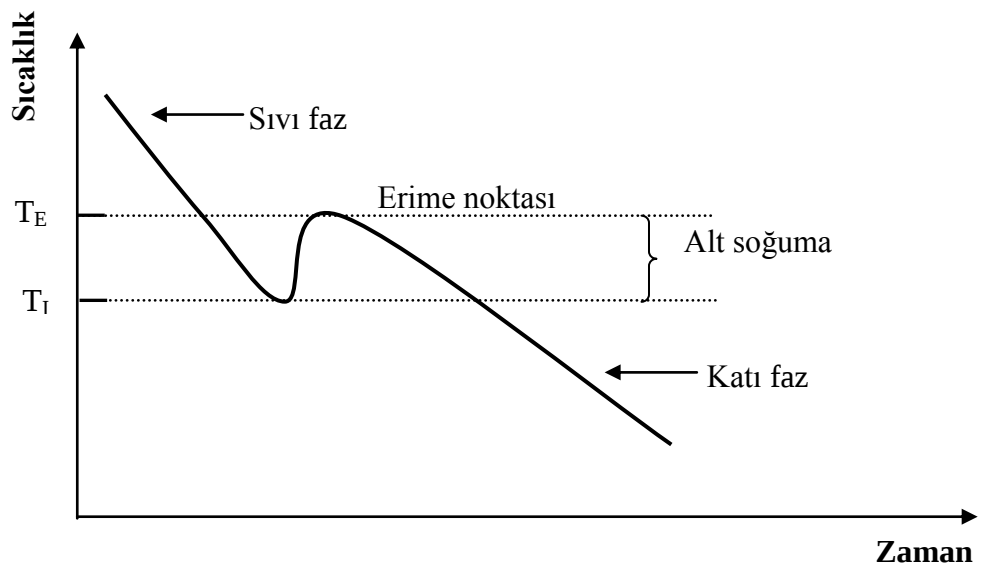
yazılabilir. Burada ΔS entropi değişimidir. Sonuç olarak herhangi bir T sıcaklığında Gibbs serbest enerjisindeki değişim (1.7) ve (1.8) denklemlerinden,

$$\Delta G \cong \Delta H - \frac{\Delta H T}{T_E} = \frac{\Delta H (T_E - T)}{T_E} = \frac{\Delta H \Delta T}{T_E} = \Delta T \Delta S \quad (1.9)$$

olarak elde edilir. Denklem (1.9)'a sıvı fazdan katı faza dönüşüm için hacimsel serbest enerji değişimi veya *sürücü kuvvet* denir [12]. Saf maddeler için erime sıcaklığındaki entalpi değişimi erime gizli ısıya eşittir, yani $\Delta H = L$ dir.

1.4. Alt Soğumalar

Herhangi bir maddenin katılaşması T_E erime sıcaklığında olmayıp erime sıcaklığının altındaki bir T_I sıcaklığında gerçekleşebilir. Maddelerin erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta katılaşmasının sebebi, çekirdeklenme olayının olması için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmasındandır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Katılaştırmada zamana bağlı sıcaklık değişimi ve alt soğuma.

Bu enerji, ΔT sıcaklık farkından sağlanmakta olup bu farka *alt soğuma* denir [37]. Alt soğuma arayüzey eğriliğine, sıvının bileşimine ve atomların sıvıdan katıya geçmesi için gerekli olan enerji miktarına bağlıdır. Katılaşma için gerekli olan toplam alt soğuma,

$$\Delta T = T_E - T_I = \Delta T_k + \Delta T_s + \Delta T_r \quad (1.10)$$

olarak ifade edilir. Buradaki ΔT_k kinetik alt soğuması, ΔT_s çözünürlük alt soğuması ve ΔT_r ise eğrilik alt soğumasıdır.

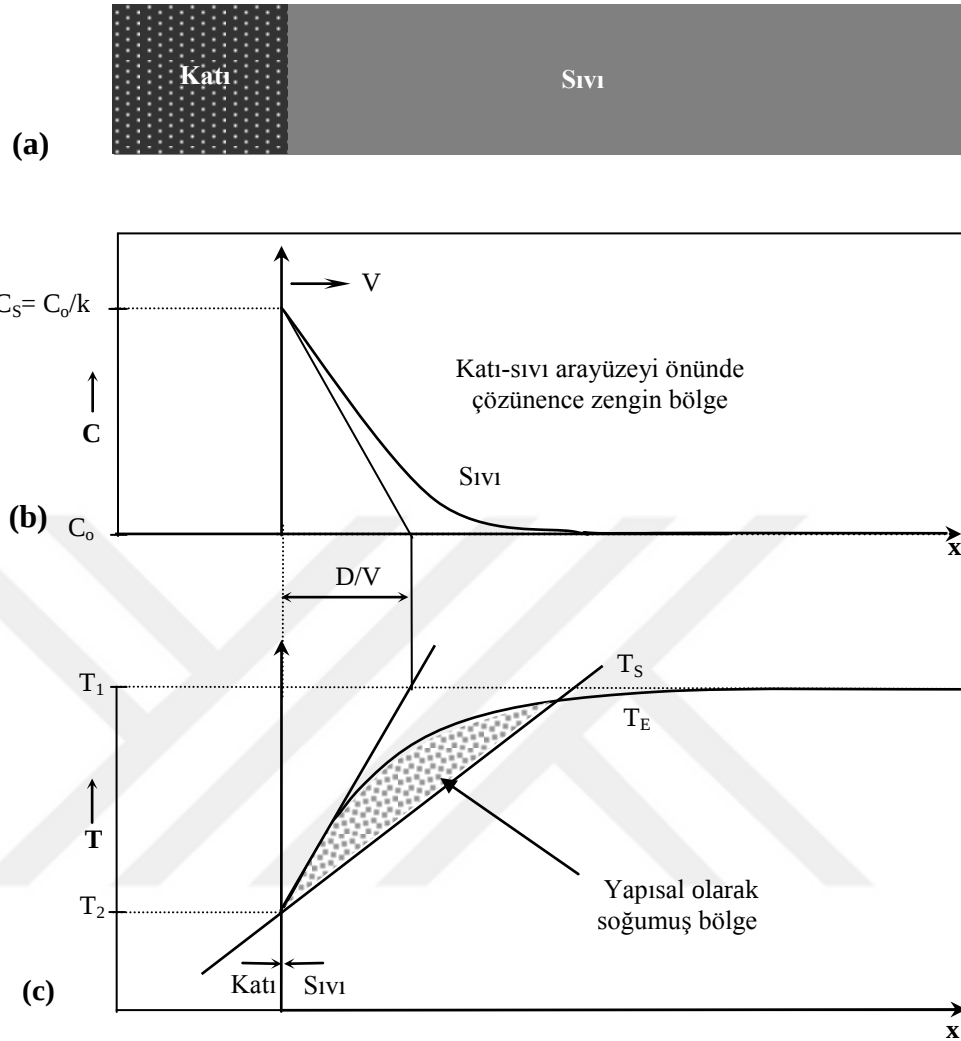
Arayüzeydeki düzlemsel cepheyi kararsız yapan sıcaklık değişiminin nasıl oluştuğu Şekil 1.4'te görülmektedir. Şekil 1.4.b'de gösterilen sıvı bileşimi C_s , arayüzeyde maksimum iken, arayüzeyden uzaklaştıkça azalır ve çözünence zengin bir sıvı tabakası oluşturur. Çözünen miktarı azaldıkça sıvı sıcaklığı artacağından, dengesel sıvılaşma (likudus) sıcaklığı arayüzeyden uzaklaştıkça artar. Şekil 1.4.c'de arayüzey sıcaklığı, dengesel sıvılaşma sıcaklığının üstündedir. Bu durum düzlemsel cephede kararlı bir katılaşma için gerekli olan şartı göstermektedir.

Eğer bir kararsızlık başlangıçta, düz bir arayüzeyde, bir çıkıntı oluşturursa bu çıkıntı aşırı ısıtılmış ortam içerisinde bulunacak ve tekrar eriyecektir. Şekil 1.4.c'de kararsız durum gösterilmektedir. Burada arayüzeyin hemen önündeki sıvının gerçek sıcaklığı, sıvılaşma sıcaklığının altındadır. Bu durumda arayüzeyde oluşan bir çıkıntı, aşırı soğumuş ortam içinde bulunacak ve katılaşma devam edecektir. Sıvılaşma sıcaklığının altında bulunan bu sıvı aşırı soğumuş durumdadır. Bu olaya, Rutter ve Chalmers [14] *yapısal alt soğuma* demişlerdir.

Yapısal ifadesi, bileşimdeki değişmeden kaynaklandığını göstermektedir. Yapısal alt soğuma teorisine göre, arayüzeyde oluşan bir çıkıntı, kendisini aşırı soğumuş bir sıvı içerisinde bularak düzlemsel cephede bir kararsızlık meydana getirecektir. Arayüzeyde sıvı içerisinde çözünen bileşim gradyenti,

$$\left(\frac{dC_s}{dx} \right)_{x=0} = - \frac{V}{D_s} C_s (1-k) \quad (1.11)$$

eşitliği ile verilir [13]. Burada V , katı-sıvı arayüzeyinin ilerleme hızıdır. D_s , sıvı maddenin difüzyon katsayısı, C_s sıvı maddenin bileşimi, k ise dağılım katsayısıdır.



Şekil 1.4. Alaşımların katılaştırılmasında yapısal alt soğuma [13] (a) Katı-sıvı arayüzeyi, (b) Katı-sıvı arayüzey önündeki çözünence zengin bölge, (c) Yapısal olarak alt soğuma.

Düzlemsel arayüzeyin denge olduğu kabul edilirse,

$$\left(\frac{dT_s}{dx}\right)_{x=0} = m_s \left(\frac{dC_s}{dx}\right)_{x=0} \quad (1.12)$$

eşitliği yazılabilir. Arayüzeydeki sıvı içerisinde sıcaklık gradyenti,

$$G \geq \left(\frac{dT_s}{dx}\right)_{x=0} \quad (1.13)$$

değerine eşit veya bu değerden daha büyük ise yapısal alt soğuma yoktur [13].

$C_k = kC_s$ durumunda,

$$\frac{G_s}{V} \geq - \frac{m_s C_k (1-k)}{k D_s} \quad (1.14)$$

yapısal alt soğuma ifadesi elde edilir. Burada m_s sıvılık eğimi, C_k katı fazın bileşimidir. Bu durumda düzlemsel cephe kararlıdır [13]. Alt soğuma olayında Gibbs serbest enerjisi, aşırı soğutulmuş bir sıvıda kararlı veya yarı kararlı fazlardan hangisinin oluşabileceğini belirler. Alt soğuma olayının anlaşılmasında, bir sıvının katılaşmasında başlangıç olan çekirdeklenme olayının da bilinmesi gerekmektedir.

1.4.1. Kinetik Alt Soğuması (ΔT_k)

Bütün maddelerde atomların katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçişlerini engelleyen bir enerji engeli vardır. Eğer bir madde erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulursa sıvıdan katıya geçen atomların sayısı katıdan sıvıya geçen atomların sayısından fazla olur. Bu durumda katı faz büyür, yani katılaştırma olur. Bu durumun aksine katıdan sıvıya geçen atomların sayısı sıvıdan katıya geçen atomların sayısından daha fazla olursa sıvı faz büyür, yani erime olur. Atomların geçişlerini sürdürmeleri için gerekli olan bu alt soğumaya *kinetik alt soğuma* denir.

Bir katı-sıvı arayüzeyinde katı fazdan sıvı faza geçen atomların sayısı, sıvı fazdan katı faza geçen atomların sayısına eşit ise katı-sıvı arayüzeyi dengededir. Dengedeki bir sistem ister saf olsun isterse çok bileşenli bir sistem olsun kinetik alt soğuma, $\Delta T_k = 0$ olur.

1.4.2. Çözünürlük Alt Soğuması (ΔT_s)

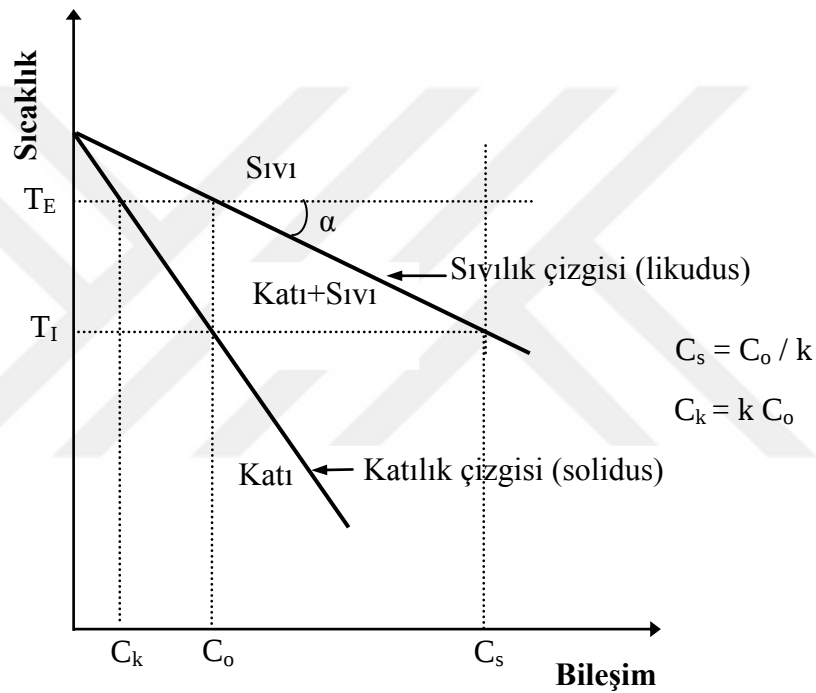
Çözünürlük alt soğuması, katı-sıvı arayüzeyindeki sıvının bileşimi ile sıvı içerisindeki herhangi bir noktanın bileşim farklılığından kaynaklanır. Çözünürlük alt soğuması (Şekil 1.5) [20];

$$\Delta T_s = T_E - T_1 = m_s (C_o - C_s) = m_s C_o \left(\frac{k-1}{k} \right) \quad (1.15)$$

olarak verilir. Burada,

$$m_s = \tan \alpha = \frac{\Delta T}{\Delta C} = \frac{T_E - T_I}{C_s - C_o} \quad (1.16)$$

olarak verilir. Burada T_E erime sıcaklığı, T_I arayüzey sıcaklığı, C_s sıvı içerisindeki herhangi bir noktanın bileşimi, C_o eğrili arayüzeydeki katının bileşimi, m_s sıvılaşma eğrisinin eğimi ve k dağılım katsayısıdır. Tek bileşenli sistemler için yani tek kristal büyütme durumunda $C_o = C_s$ olduğundan $k=1$ 'dir. Bu yüzden saf malzemeler için çözünürlük alt soğuması $\Delta T_s = 0$ olur.



Şekil 1.5. Çözünürlük alt soğumasına neden olan faktörlerin şematik gösterimi [20].

Ayrıca katı-sıvı arayüzeyi dengede olduğu durumda, sistem ister iki bileşenli isterse daha fazla bileşenli olsun sıvı içerisinde bileşim gradyenti olmadığı için $\Delta T_s = 0$ olur [48]. Sonuç olarak, katı-sıvı arayüzeyinin denge durumunda toplam alt soğuma sadece eğrilik alt soğumasına eşittir, yani $\Delta T = \Delta T_r$ olur.

1.4.3. Eğrilik Alt Soğuması (ΔT_r)

Eğrilik alt soğuması genellikle Gibbs-Thomson alt soğuması olarak da adlandırılır. Bu alt soğuma katı-sıvı arayüzey eğriliğinden meydana gelmektedir. Eğrisel bir arayüzeyin kimyasal ve mekanik dengesi göz önüne alınarak, eğrilik alt soğuması ΔT_r ,

$$\Delta T_r = \Gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.17)$$

olarak verilir [37]. Burada Γ Gibbs-Thomson katsayısı, r_1 ve r_2 ise arayüzeyin eğrilik yarıçaplarıdır. Küresel bir katı-sıvı arayüzeyinin eğrilik yarıçapları $r_1=r_2=r$ olduğundan (1.17) denklemi,

$$\Delta T_r = \frac{2\Gamma}{r} \quad (1.18)$$

şeklini alır. Silindirik katı-sıvı arayüzeyi için $r_1=r$ ve $r_2=\infty$ olacağından (1.17) denklemi,

$$\Delta T_r = \frac{\Gamma}{r} \quad (1.19)$$

olur.

1.5. Çekirdeklenme

Katılaşmak üzere soğumaya bırakılan herhangi bir sıvı, erime sıcaklığına düşünce hemen katılaşmaz. Soğuma hızına bağlı olarak erime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta katılaşır. Sıvı içerisinde, önce aynı moleküllerin bir araya gelerek oluşturduğu katıya benzer bir yapı oluşur. Bu yapıya *embriyo* (çekirdekçik) denir. Embriyonun etrafında büyüme meydana gelir ve katılaşma başlar. Bu olaya *çekirdeklenme* denir. İki çeşit çekirdeklenme vardır; homojen ve heterojen çekirdeklenme.

1.5.1. Homojen Çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenme, içerisinde hiçbir yabancı madde katkısı olmaksızın uygun laboratuvar şartlarında çok yüksek aşırı soğumalarda nadiren gerçekleşen bir çekirdeklenmedir. Aşırı soğutulmuş sıvı ile katı arasındaki serbest enerji farkına *sürücü kuvvet* denir ve homojen çekirdeklenme için büyük bir sürücü kuvvete ihtiyaç duyulur [38]. Homojen çekirdeklenme için gerekli olan enerji yani sürücü kuvvet hacimsel serbest enerjideki azalma ve yüzey enerjisindeki artmanın toplamı olarak ifade edilir, yani,

$$\Delta G = -V_k \Delta G_V + A_{ks} \sigma_{ks} \quad (1.20)$$

şeklinde yazılır. Burada, V_k oluşan katının molar hacmi, ΔG_V katının birim hacim başına düşen hacimsel serbest enerjisindeki değişim, A_{ks} katı-sıvı arayüzey alanı ve σ_{ks} katı-sıvı arayüzey enerjisidir. Hacimsel serbest enerjideki değişim ise,

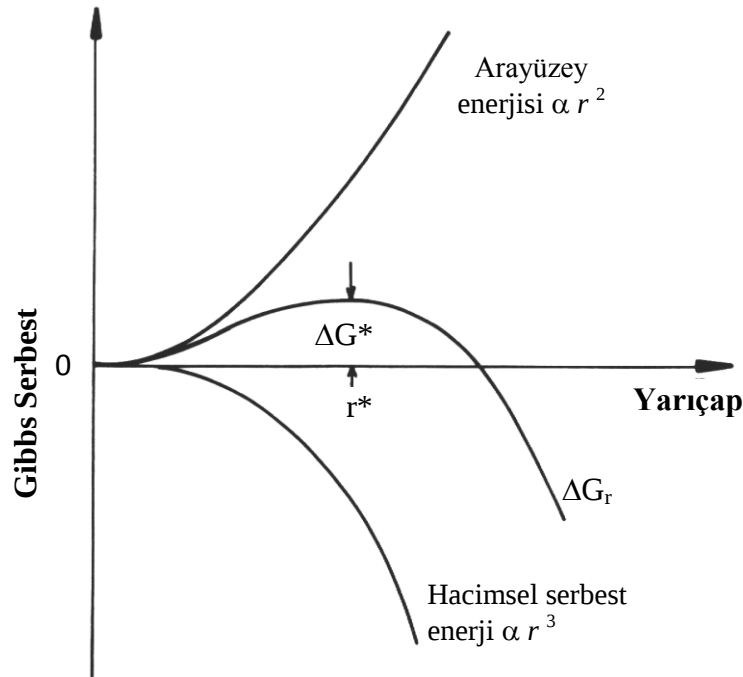
$$\Delta G_V = \frac{\Delta H \Delta T}{T_E} \quad (1.21)$$

şeklindedir. Burada ΔH erime entalpisi, ΔT alt soğuma, T_E ise erime sıcaklığıdır.

Homojen çekirdeklenmede başlangıçta oluşan embriyonun r yarıçaplı bir küre olduğu kabul edilerek, embriyonun serbest enerjisindeki değişim (1.20) denkleminde,

$$\Delta G = -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4 \pi r^2 \sigma_{ks} \quad (1.22)$$

olarak ifade edilir. ΔG 'nin r 'ye göre değişimi Şekil 1.6'da verilmiştir [12].



Şekil 1.6. Homojen çekirdeklenmede embriyonun serbest enerjisinin embriyo yarıçapına bağlılığı [12].

r 'nin küçük değerlerinde ΔG kritik bir değere kadar artar ve kritik değerde maksimum olduktan sonra tekrar azalır. ΔG 'nin maksimum olduğu andaki r değerine kritik yarıçap denir ve r^* ile gösterilir. Kritik yarıçapa karşılık gelen serbest enerji ise ΔG^* ile gösterilir ve aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır ve homojen çekirdeklenmenin oluşması için gerekli olan enerjidir. Çekirdeklenme kritik yarıçapta başladığı için embriyonun yarıçapı r^* olur. ΔG 'nin eğiminin kritik yarıçaptaki değeri sıfır olacağından, $\frac{d\Delta G}{dr} = 0$ şartı denklem (1.22)'de uygulandığında kritik yarıçap,

$$r^* = \frac{2\sigma_{ks}}{\Delta G_v} \quad (1.23.a)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (1.21), denklem (1.23.a)'da yerine yazılarak embriyonun yarıçapı,

$$r^* = \frac{2\sigma_{ks} T_E}{L\Delta T} \quad (1.23.b)$$

olarak bulunur. Şekil 1.6'dan da görüldüğü gibi r 'nin küçük değerleri için ΔG artar fakat kritik bir yarıçap değerinden sonra azalma gösterir. Homojen çekirdeklenme için kritik yarıçapa karşılık gelen aktivasyon serbest enerjisi, denklem (1.23.b)'yi, denklem (1.22)'de yerine yazarak:

$$\Delta G_{\text{hom}}^* = \frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3(\Delta G_v)^2} = \frac{4}{3}\pi r^{*2} \sigma_{ks} \quad (1.24)$$

şeklinde bulunur.

Denklem (1.23.b)'den σ_{ks} 'nin artmasıyla veya ΔT 'nin azalmasıyla kritik yarıçap değerinin artacağı anlaşılmaktadır.

Klasik çekirdeklenme teorisinin temelleri Volmer-Weber [41] ve Becker-Döring [42] tarafından atılmıştır. Bu araştırmacılar yoğunlaştırılmış buhar ile oluşturdukları sıvı damlacıklarının çekirdeklenme kinetiğini incelemişlerdir. Turnbull'da [43-46] yaptığı çalışmalarla çekirdeklenme teorisinin temellerinin oluşmasına önemli katkılar sağlamıştır.

Daha sonra Turnbull ve Fisher [47], Becker ve Döring yaklaşımını kullanarak bir sıvı içerisinde katının çekirdeklenme hızının belirlenmesi için yeni bir teori geliştirmişlerdir. Bu teori çekirdeklenme kinetiğini tasvir etmek için ve arayüzey enerjisini tahmin etmek için kullanılmıştır. Turnbull [43-47] homojen çekirdeklenme hızını (I_{hom}) alt soğumanın bir fonksiyonu olarak ölçmüştür.

Erime sıcaklığının altındaki herhangi bir T sıcaklığında, sıvının birim hacimdeki homojen çekirdeklenme hızı,

$$I_{\text{hom}} = N_v \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_D}{kT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3(\Delta G_v)^2 kT}\right) \quad (1.25)$$

şeklinde verilmiştir. Burada N_v birim hacimdeki sıvı atom sayısı, k Boltzmann sabiti, h Planck sabiti, ΔG_D difüzyon için gerekli olan aktivasyon enerjisi ve ΔG_v ise hacimsel serbest enerji değişimidir.

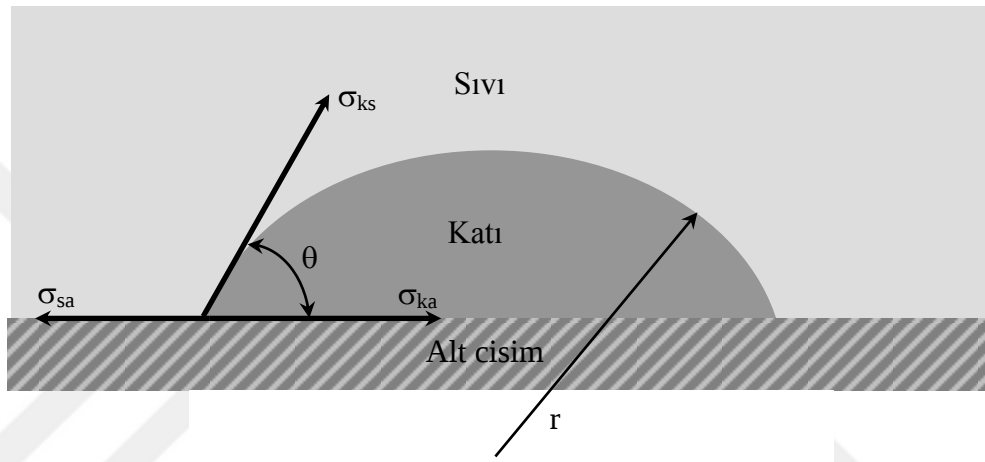
Çekirdeklenme sırasında çözünmeyen parçacıkları ortadan kaldırmak için sıvı damlacıkların çapları bir mikron ile yüz mikron arasında çok küçük damlacıklara ayrılır. Böylece, bu damlacıklardan bazıları heterojen çekirdekçik oluşturamayacak ve gerçek homojen çekirdeklenme meydana gelecektir. İlk homojen çekirdeklenme deneylerinde çekirdeklenme hızı ve sıcaklığı, dilatometre ile ölçülmüştür [48-50]. Daha sonraki deneyler ise numunelerin katılaşma sıcaklığının değişimi mikroskop altında gözlemlenerek gerçekleştirilmiştir [51, 52]. Homojen çekirdeklenme teorisinin eksiklikleri şunlardır:

- ❖ Katı-sıvı arayüzey enerjisi erime sıcaklığının altında ($0.81T_E$) ölçülmektedir.
- ❖ Yüzey entropisinin bilinmesi gerektiği halde bu teoride arayüzey enerjisi tayin edilirken yüzey entropisi genellikle bilinmemektedir.
- ❖ Katı-sıvı arayüzey enerjisi çekirdek içerisindeki bütün yönelimlerin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.
- ❖ Homojen çekirdeklenme şartlarını sağlamak oldukça zordur.
- ❖ Sıvı damlacıklarının boyutları azaltıldığında yüksek miktarda alt soğuma gerekmektedir.

Sonuç olarak, homojen çekirdeklenme ancak yüksek alt soğuma ve vakum şartları sağlanarak yarı kararlı (metastable) durumda oluşturulabilmektedir [53].

1.5.2. Heterojen Çekirdeklenme

Sıvı içerisinde bulunan yabancı maddeler üzerinde, şapka şeklinde çekirdekçiklerin oluşmasıyla heterojen çekirdeklenme başlar. Heterojen çekirdeklenme, homojen çekirdeklenmeye göre çok daha sık rastlanılan ve çekirdeklenme hızının büyük olduğu bir çekirdeklenme türüdür. Şematik olarak Şekil 1.7’de görülen heterojen çekirdeklenmede, bir alt cisim üzerinde oluşan çekirdeğin küresel bir yapıda olduğu kabul edilir.



Şekil 1.7. Heterojen çekirdeklenmenin şematik gösterimi [12].

Heterojen çekirdeklenmede alt cisim, yeni oluşan katı çekirdek ve sıvı arasındaki arayüzey enerjilerinin mekanik denge şartı,

$$\sigma_{sa} = \sigma_{ka} + \sigma_{ks} \cos \theta \quad (1.26)$$

olarak yazılır. Burada σ_{sa} sıvı ile alt cisim arasında birim uzunluktaki arayüzey gerilimini, σ_{ka} katı çekirdek ile alt cisim arasında birim uzunluktaki arayüzey enerjisini, σ_{ks} katı çekirdek ile sıvı arasında birim uzunluktaki arayüzey enerjisini, θ açısı ise ıslatma (temas) açısını ifade etmektedir.

Heterojen çekirdeklenme teorisi için serbest enerji ifadesi,

$$\Delta G_{het} = \left(-\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \sigma_{ks} \right) \frac{1}{4} (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta) \quad (1.27)$$

olarak verilir. Kritik yarıçapta $\frac{d\Delta G}{dr} = 0$ şartı denklem (1.27)'ye uygulanarak kritik yarıçap,

$$r_{het}^* = \frac{2\sigma_{ks}}{\Delta G_V} \quad (1.28)$$

olarak bulunur ve bu ifade denklem (1.27)'de yerine yazılırsa,

$$\Delta G_{het}^* = \frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3\Delta G_V^2} f(\theta) \quad (1.29)$$

elde edilir.

Burada $f(\theta) = \frac{1}{4}(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)$ olup, ıslatma (temas) açısı faktörü olarak adlandırılır. Denklem (1.24) ve (1.29) birbirine eşitlenirse,

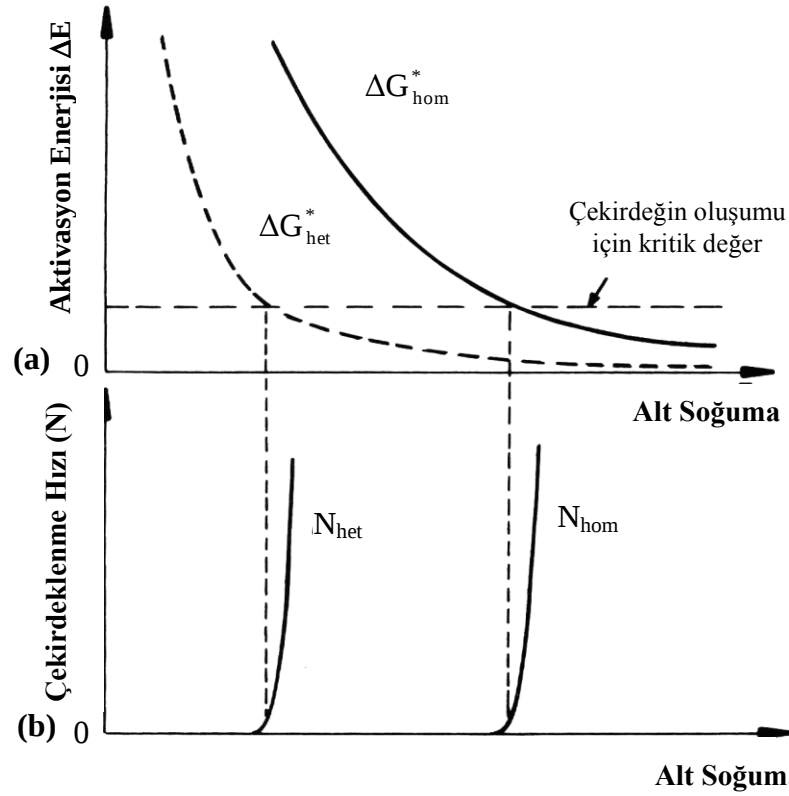
$$\Delta G_{het}^* = \Delta G_{hom}^* f(\theta) \quad (1.30)$$

elde edilir [12]. Buradan da anlaşılacağı gibi heterojen çekirdeklenmedeki aktivasyon enerji engeli homojen çekirdeklenmedeki enerji engelinden $f(\theta)$ faktörü kadar daha küçük olduğu görülmektedir.

Enerji engelini küçük olması, heterojen çekirdeklenmede çekirdeklenme hızının büyük olmasını sağlamaktadır. Islatma açısının küçük olması, heterojen çekirdeklenmedeki enerji engelini azaltmaktadır. $\theta = 0$ olduğunda $\Delta G_{het}^* = 0$ olur ki bu durumda çekirdeklenme yok demektir. $\theta = 180^\circ$ olduğunda $\Delta G_{het}^* = \Delta G_{hom}^*$ olur, bu durumda ise çekirdeklenme homojendir ve çekirdekçiğin alt cisimle hiçbir teması yoktur. Turnbull ve Fisher [47] heterojen çekirdeklenme hızını,

$$I_{het} = N_s \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_D}{kT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3(\Delta G_V)^2 kT} f(\theta)\right) \quad (1.31)$$

olarak elde etmişlerdir. Burada N_s alt cisimle temas halinde bulunan birim yüzeydeki atom sayısı, ΔG_D katı-sıvı arayüzeyini geçmek için gerekli olan difüzyon enerjisi, ΔG_V ise birim hacimdeki enerji değişimidir. Şekil 1.8'de aktivasyon enerjisinin ve çekirdeklenme hızının alt soğumaya göre değişimi verilmektedir.



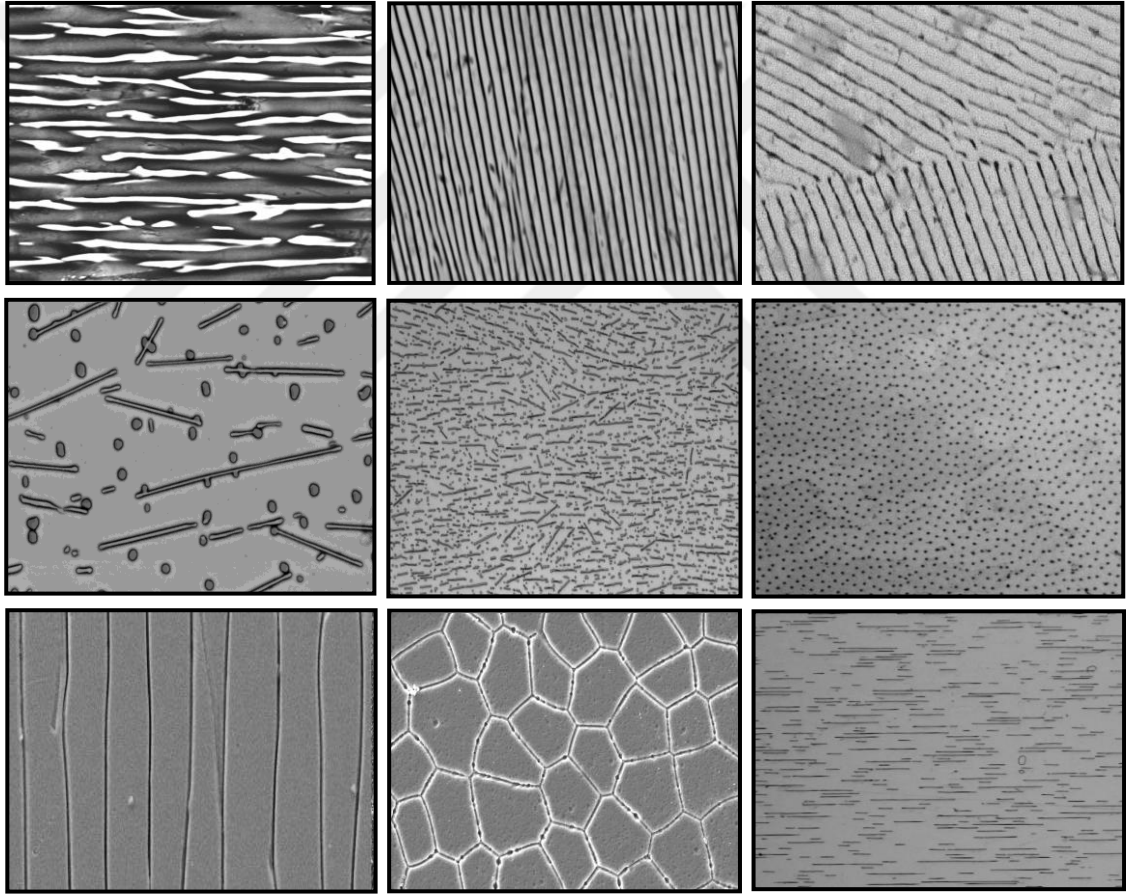
Şekil 1.8. Aktivasyon enerjisinin ve çekirdeklenme hızının alt soğumaya göre değişimi [12].

1.6. Alaşımların Katılaştırılması

Malzemelerin mikroyapılarındaki değişiklikler (tanecik büyüklükleri) mekanik özelliklerini (mikrosertlik, stres gibi) ve diğer özelliklerini (elektriksel iletkenlik, ısısal özellikler, korozyon gibi) etkilediği bilinmektedir. Malzemelerde düzenli mikroyapıların oluşması ve tanecik boyutları (λ), bu malzemelerin katılaştırılması esnasındaki katılaştırma parametrelerine yani sıcaklık gradyenti G , katılaştırma hızı V ve alaşımın bileşimi C_o 'a bağlıdır. Başka bir deyişle, katılaştırma parametreleri G , V ve C_o birbirinden bağımsız kontrol edilerek, malzemelerin mikroyapılarına, mekanik ve elektriksel özelliklerine etki etmek kontrollü (doğrusal) katılaştırma yöntemi ile mümkündür. Bu yöntem ile değişik malzemelerden elde edilen farklı mikroyapı şekilleri Şekil 1.9'da verilmiştir.

Bir alaşım sistemi, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bileşimde eritilmesiyle elde edilen yeni bir katı çözeltidir. Alaşımlar, alaşım tipine bağlı olarak kendisini oluşturan elementlerin özelliklerini taşıyabileceği gibi, bu elementlerin özelliklerinden başka yeni özellikler de taşıyabilirler. Örneğin saf bir metale alaşım elementi ilave edilerek, onun mekanik özellikleri büyük ölçüde geliştirilebilmektedir

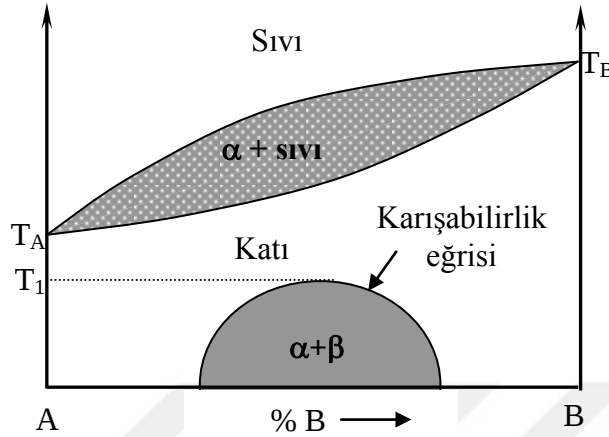
[20]. Alaşımlar, kendisini oluşturan elementlerin birbiri içerisindeki karışımına göre tek fazlı ve çok fazlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Homojen bir sistemin fiziksel sınırlarla ayrılmış olan kısmına *faz* denir. Birbiri içerisinde her oranda homojen olarak karışabilen alaşımlar, tek fazlı alaşımlardır. Böyle bir alaşım sistemindeki, alaşım elementlerinin örgü sistemlerinde bir değişiklik olur ve alaşım elementinden birinin atomları diğerinin kristal örgüsüne yerleşir. Yeni örgüde farklı özelliklere sahip atomların bulunmasından dolayı farklılıklar oluşur ve yeni bir malzeme ortaya çıkar. Çok fazlı alaşımlarda, alaşımı oluşturan elementlerin baskın özellikleri görülür ve örgü yapılarında bir değişiklik olmaz [3, 19].



Şekil 1.9. Değişik malzemelerde gözlenen mikroyapılar.

Endüstride kullanılan metalik sistemler, yüksek sıcaklıklarda birbirini her oranda eritebilmelerine rağmen, düşük sıcaklıklarda sınırlı oranda eritebilmektedirler. Şekil 1.10’da ikili bir alaşım sistemine ait faz diyagramı verilmektedir. Faz diyagramından da görüldüğü gibi alaşım sistemi, sıvı halden soğutulmaya başlatıldığında, önce katı çökelti oluşmasıyla α fazı meydana gelmektedir. Daha sonra sıcaklık T_1 ’e düşürüldüğünde α

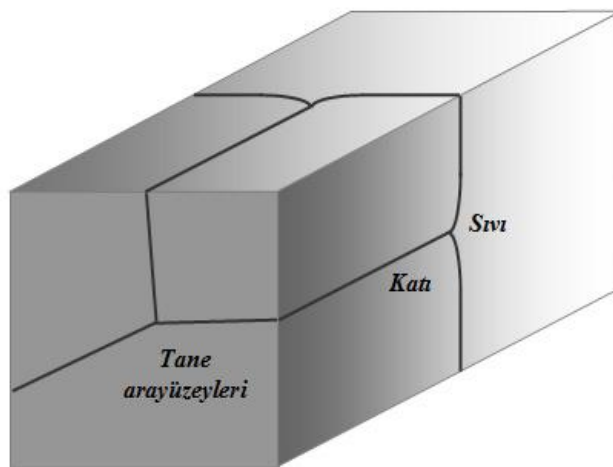
fazı B atomlarınca zenginleşmekte ve bu sıcaklığın altında B atomlarının fazlası β fazı şeklinde çökelerek α ve β fazlarını oluşturmaktadır.



Şekil 1.10. Birbirini sınırlı oranda eriten ikili sistemlerde denge faz diyagramı [3].

1.6.1. Alaşımların Düzlemsel Cephede Katılaştırılması

Alaşımların düzlemsel cephede kontrollü olarak katılaştırılması pratikte tek kristallerin büyütülmesinde, malzemeleri saflaştırmada (örneğin bölgesel arıtma) ve kontrollü büyütülen malzemede homojen bileşim elde etmede kullanılır. Bu tür katılaştırmanın en önemli ticari uygulaması, yarıiletken kristallerin büyütülmesidir. Diğer önemli bir uygulama ise, oksit lazer sistemleri ve optik uygulamalar için büyütülmesidir. Örneğin alüminyum oksitler, tantal oksitler, niyobyum oksitler gibi. Şekil 1.11’de düzlemsel cephede katılaşma yapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.11. Düzlemsel cephede katılaşmanın şematik gösterimi.

Metal-metal alaşımların düzlemsel cephede katılaştırılmış kristallerini inceleme, araştırmalarda çok geniş yer tutmaktadır. Birçok metalin ve metal olmayan inorganiklerin eriyiklerinin katılaştırılması esnasında arayüzeyin dengede olduğunun kabul edilmesi iyi bir yaklaşıktır. Yani katılaştırma esnasında, katı-sıvı arayüzeyinin önünde büyük bileşim gradyentleri meydana gelebilir, fakat arayüzeyden geçişte atomların aktarılmasına karşı sadece ihmal edilebilir bir direnç mevcuttur. Yapısal aşırı soğuma teorisi, başlangıçta düzlemsel cephede, arayüzeyin önünde katı ve sıvının hangisinin termodinamik olarak kararlı olduğu sorusu ile ilgilenir. Kararlı olan sıvı ise arayüzeyin düzlemsel kaldığı, kararlı olan katı ise arayüzeyin bozulduğu kabul edilir.

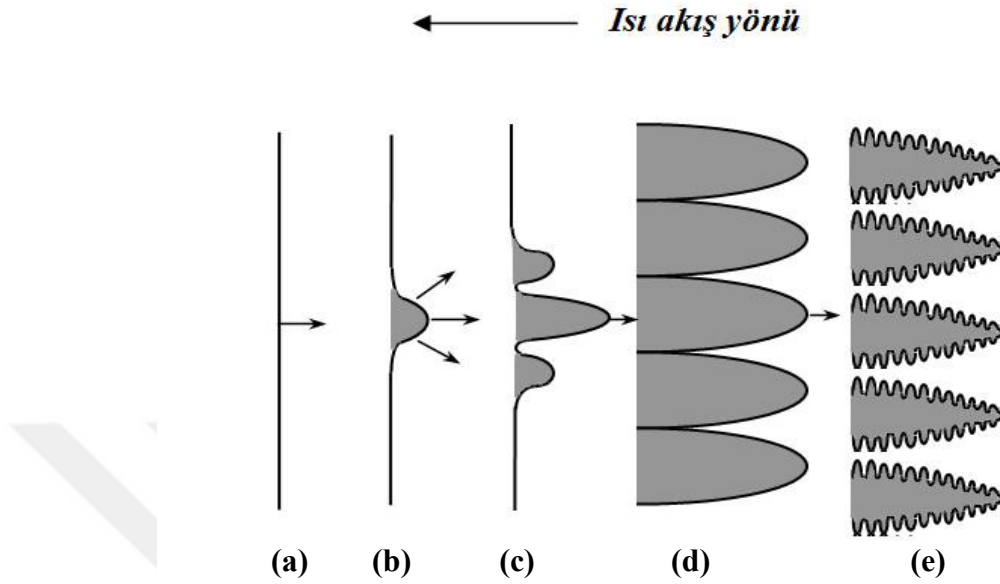
1.6.2. Alaşımların Hücresel Katılaştırılması

Arayüzey yapısının bozularak hücresel biçime, daha sonra da dendritik biçime nasıl dönüştüğü Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Düzlemsel cephede katılan bir alaşım sisteminde ilk katılan kısmın bileşimi, ortalama C_0 bileşiminin altında oluşur. Dolayısıyla bir kısım çözünen madde sıvı içine itilir. Katılma ilerledikçe sıvı içine itilmiş çözünen madde miktarı arayüzeyde artar ve çözünen zenginleşen arayüzeyde sıcaklık azalır [54].

Eğer arayüzeyin önündeki sıcaklık gradyenti kritik sıcaklık gradyentinden daha büyük ise arayüzey sıcaklığı normal sıcaklığın üstünde olacak ve katılan kısım tekrar erimeye başlayacaktır. Eğer düzlemsel arayüzeyin önündeki sıcaklık gradyenti yavaşça kritik sıcaklığın altına düşürülürse düzlemsel arayüzeydeki ilk çıkıntılar Şekil 1.12.b'deki gibi oluşur. Çıkıntılardan sıvı içerisine itilen çözünen madde, çıkıntının ön ve yanlarında toplanarak bu bölgeleri çözünen zenginleştirir ve arayüzey sıcaklığını sıvı denge sıcaklığının altına düşürür. Bu nedenle, katı-sıvı arayüzeyi kararsız hale gelir ve arayüzey sıcaklığının en düşük olduğu yerlerde yeni çıkıntılar oluşur.

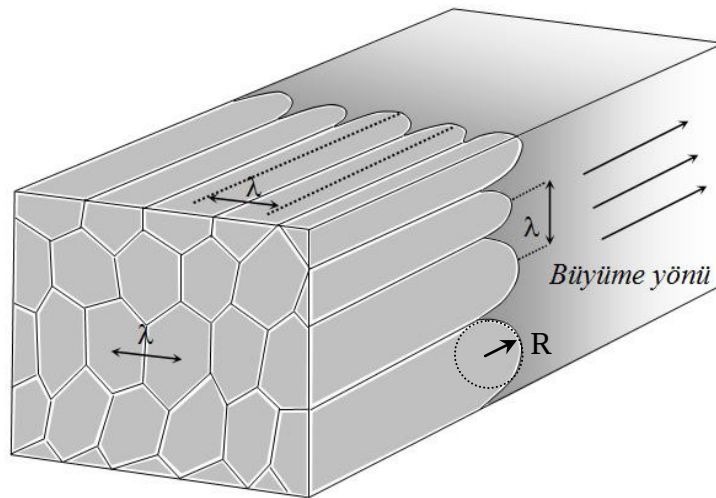
Bu çıkıntılar tarafından itilen çözünen maddeler çıkıntılar arasında toplanırlar ve çözünen maddelerce zenginleşen bu bölgeler sıvı halde iken Şekil 1.12.d'de görüldüğü gibi, çıkıntılar sıvının içine doğru hücreler halinde ilerler ki böyle bir katılaştırma olayına *hücresel katılaştırma* denir. Hücrenin uçlarındaki sıcaklık, hücrenin gerisindeki sıcaklıktan daha yüksek olduğundan, hücrenin gerisi ön kısmına göre çözünen madde yönünden daha zengindir. Katılaştırma hızı yeterince yüksek değere ulaştıkça Şekil

1.12.e’de görülen çam ağacına benzer bir yapı oluşur ki bu yapı dendritik yapı olarak bilinir.



Şekil 1.12. Düzlemsel katılaşmadan dendritik katılaşmaya geçiş [55].

Metalik alaşımlarda hücresel ve dendritik yapıları incelemek için en iyi yol, katılaştırmayı aniden soğutma (quench) ile durdurmaktır. Bu metot, ağırlıkça % 1’den daha fazla çözünen içeren alaşımlarda oldukça iyi sonuçlar vermektedir [56]. Şekil 1.13’te hücresel katılaşma yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi verilmiştir.

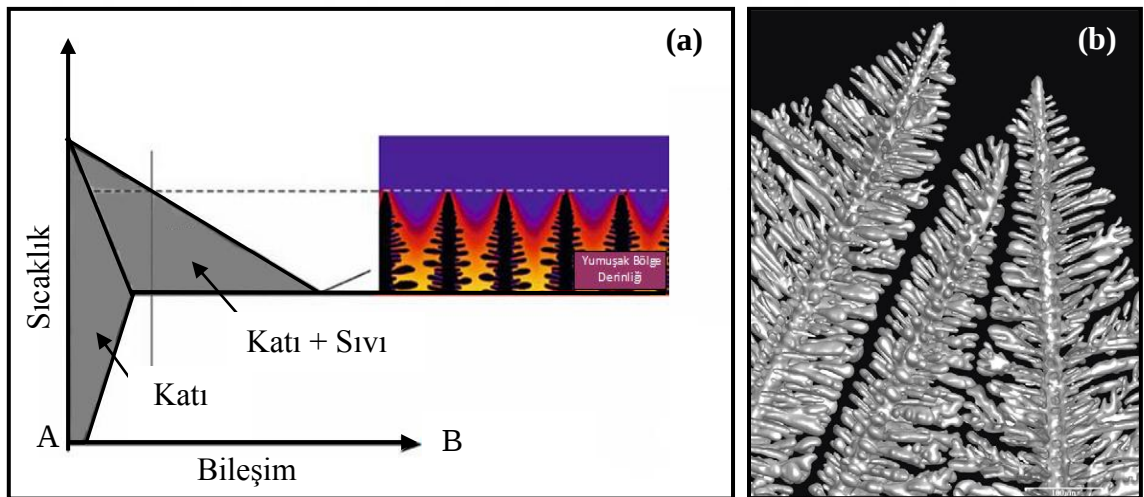


Şekil 1.13. Hücresel katılaşmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi.

1.6.3. Alaşımların Dendritik Katılaştırılması

Alaşımların katılaştırılmasında dendritik büyüme çok yaygın görülmektedir. Dendritik katılaştırma, hücresel katılaştırmanın bir sonraki aşamasıdır. Çözelti içindeki bileşim gradyentleri yapısal aşırı soğumaya neden olur. Bu ise arayüzeyin bozularak hücresel hale geçmesine neden olur. Bu durum da çözünen miktarının yanlara doğru itilmesine sebep olduğu için yapısal aşırı soğumayı daha da artırır. Sonuçta birincil (ana) kollara dik ikincil kollar oluşur ve büyür. Bu çam ağacına benzer yapı “*dendritik katılaşma yapısı*” olarak bilinir.

Dendritik katılaşma yapısında birincil kollardan çok daha fazla sayıda ikincil kollar mevcuttur (Şekil 1.14). Eğer katılaştırma tamamlanmışsa bütün dendritler bir çekirdekten tek bir tane biçiminde örülerek dendritik yapıyı oluşturur. Katılaşma yapısı bölgesel katılaştırma hızına ve sıcaklık gradyentine göre değişmektedir. Bunun anlamı şudur; eğer uygulanan katılaştırma hızı yeterince düşükse çözünen madde zamanla arayüzeyden sıvı içine itilir, bunun neticesinde arayüzey düzlemselleşeceği için katılaştırma düzlemsel olur.

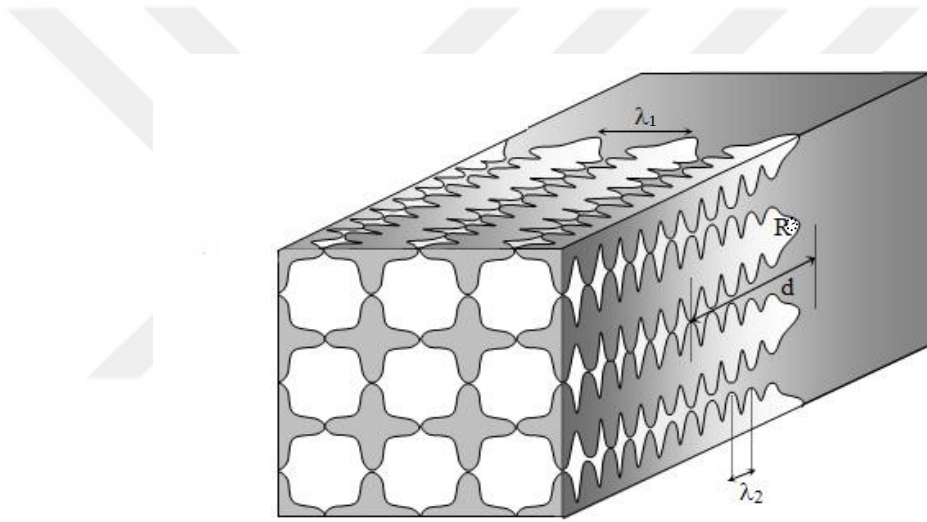


Şekil 1.14. (a) Katı ve sıvı fazlar arasında malzemenin katılaşma morfolojisi ve yumuşak bölge derinliği, (b) Al-Cu alaşımında oluşan dendritlerin fotoğrafı [57].

Diğer taraftan yüksek katılaşma hızlarında çözünen madde arayüzeyde birikir. Bu ise yapısal aşırı soğuma için potansiyel oluşturur ki bu durumda yapısal aşırı soğuma şiddetine bağlı olarak oluşan yapı, hücresel veya dendritik biçimde olur. Eğer uygulanan katılaştırma hızı yüksek ise ince dendritik yapı elde edilir, tane yapısı küçülür. Bu

nedenle malzemenin sertliği ve mukavemeti artar [58]. Dolayısıyla malzemelerin mekaniksel özellikleri ile dendrit kolları arası mesafe oldukça ilişkilidir [58].

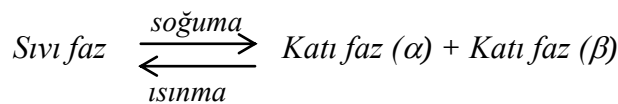
Doğrusal katılaştırmada dendritik yapı; birincil kollar arası mesafe λ_1 , ikincil kollar arası mesafe λ_2 , dendrit uç yarıçapı R ve yumuşak bölge derinliği d , alaşımın bileşimine, katılaştırma hızına ve sıcaklık gradyentine bağlı olarak değişmektedir. Bu özellik malzemeye yeni kullanım alanları kazandırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı son yıllarda dendritik katılaştırma konusu önem kazanmış ve bu konuda pek çok çalışma yapılmıştır [59-81]. Şekil 1.15’de dendritik katılaşmanın yapısı ve mikroyapı mesafeleri şematik olarak verilmiştir.



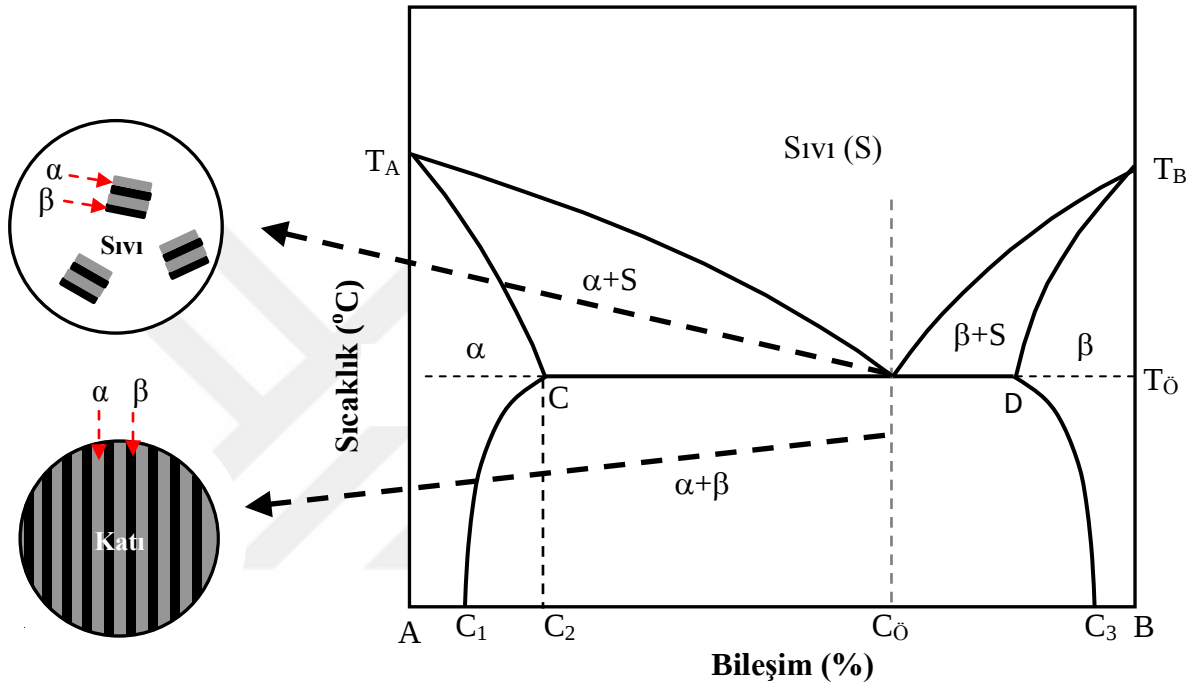
Şekil 1.15. Dendritik katılaşmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi.

1.6.4. Ötektik Alaşımların Katılaştırılması

“Ötektik” kelimesi, Yunancada kolay eriyen anlamına gelmektedir. Ötektik bölge, bir alaşım sisteminde α ve β gibi katı fazlar ile sıvı fazın dengede olduğu üçlü bölgedir. Bu noktadaki sıcaklığa *ötektik sıcaklık*, bileşime de *ötektik bileşim* denir. Ötektik alaşımı oluşturan iki bileşenli sistemlerde, bileşenler birbirinin erime sıcaklıklarını düşürür ve ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda iki farklı katı faza dönüşür. Dolayısıyla ötektik reaksiyon,



şeklinde ifade edilir [3]. Bu tür reaksiyona sahip sistemlere de *ötektik sistemler* denir. Bu reaksiyon esnasında iki katı faz yan yana gelerek ince tabakalar halinde şekillenir ve ötektik yapı oluşur [8]. Ötektik yapının oluşumu; katılaşma hızı, sıcaklık gradyenti ve alaşımın bileşimine göre değişim gösterir. Şekil 1.16'da iki bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve katılaşma yapısı verilmektedir.

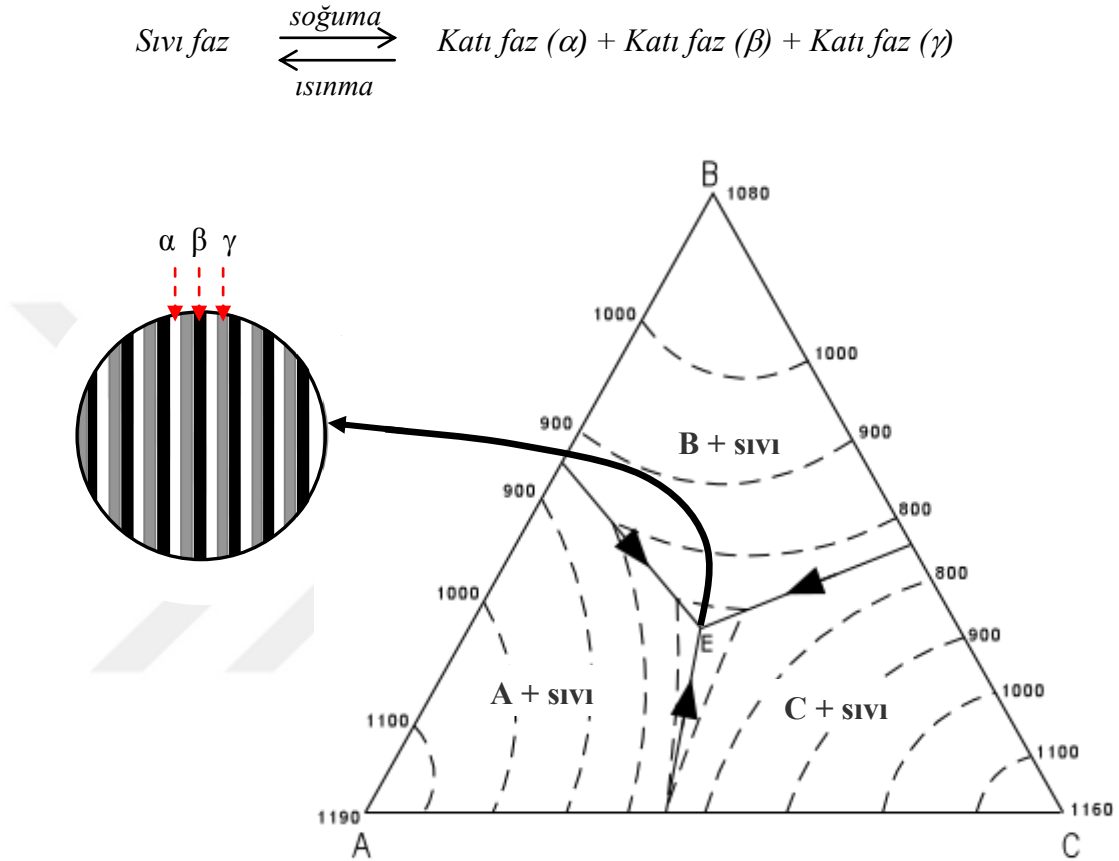


Şekil 1.16. İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu [8].

Şekil 1.16'da verilen faz diyagramındaki sembollerden C_0 ; ötektik bileşim, T_0 ; ötektik sıcaklık, T_A ve T_B ; A ve B bileşenlerin saf haldeki erime sıcaklıkları, C_1 ; oda sıcaklığında B metalinin α fazındaki çözünme sınırı, C_2 ; B metalinin α fazındaki en yüksek erime sınırı, C_3 ; A metalinin β fazındaki en yüksek erime sınırı anlamına gelmektedir.

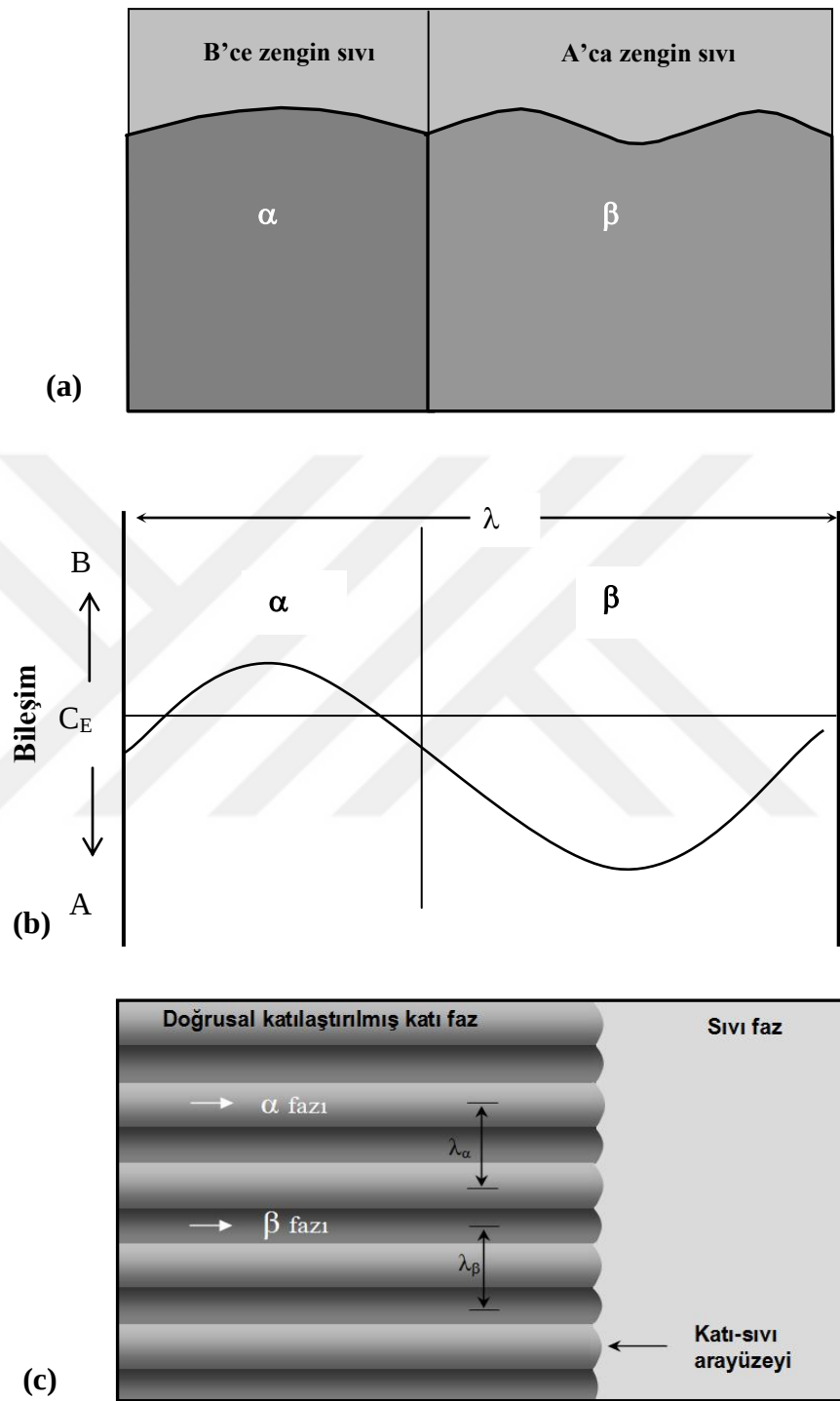
Faz diyagramında gösterilen C_0 ötektik bileşimindeki alaşım sistemi, sıvı halden soğuyarak, T_0 ötektik sıcaklığa geldiğinde, ötektik reaksiyon sonucu α ve β fazları oluşur. Bu dönüşüm sırasında α ve β kristalleri yan yana, sık ve ince tabakalar halinde büyür ve katılaştırma şartlarına bağlı olarak ötektik yapı oluşur [5].

Benzer şekilde Şekil 1.17’de üç bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu verilmiştir. Üç bileşenli sistemlerde ise, ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda üç farklı katı faza (veya iki-üç intermetalik faza) dönüşür.



Şekil 1.17. Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu.

Şekil 1.18’de arayüzey çözünen konsantrasyonuna ve aşırı soğumaya bağlı olarak α ve β lamellerinin oluşumu görülmektedir. Şekil 1.18.a’da A bileşenince zengin olan α fazı katılaştırırken, B atomları sıvı içerisine hareket ederek B bileşenince zengin olan β fazını oluşturmasının şematik gösterimi verilmiştir. Benzer şekilde β fazının önüne A atomları itilerek α fazı oluşur. Şekil 1.18.b’de ise B atomları α lamelleri önünde hafifçe artarken β lamellerinin önünde azalır. Katı-sıvı arayüzeyindeki A ve B atomlarının kısa mesafe difüzyonu ile α ve β katı fazlarının oluşturduğu lamelsel yapılar ise Şekil 1.18.c’de verilmektedir. Bu lamelsel ötektiklerin genişliği büyüme hızı ve difüzyon hızına (α fazı önündeki B atomlarının β fazına geçiş hızı ve β fazı önündeki A atomlarının α fazına



Şekil 1.18. Lamelsel ötektik büyümenin şematik gösterimi [21]

- (a) Lamelsel büyümede katı-sıvı arayüzey şekli,
- (b) Katı-sıvı arayüzeyinde A ve B atomlarının bileşimi,
- (c) Lamelsel ötektik mesafeler.

geçiş hızı) bağlıdır. Buna göre, katılaşma ne kadar hızlı gerçekleştirilirse, ötektik tane yapısı o oranda küçük olur [5].

$\alpha - \beta$ arayüzeyine ait yüzey geriliminin ($\gamma_{\alpha\beta}$) belirlenmesi ile de λ bulunabilir. Örneğin, bir mol sıvının katılaştırılmasıyla oluşan serbest enerji değişimi,

$$\Delta G(\lambda) = -\Delta G(\infty) + \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m}{\lambda} \quad (1.32)$$

eşitliği ile verilir [5]. Burada $\Delta G(\lambda)$, ötektik mesafeye bağlı serbest enerji değişimi, $\Delta G(\infty)$, λ 'nın çok büyük değerleri için azalan serbest enerji değişimi ve V_m ötektik malzemenin molar hacmidir. $\Delta G(\lambda) > 0$ ise katılaşma olmaz. $\Delta G(\infty)$, arayüzey enerjisini dengelemek için yeterince büyük olmalıdır. Yani ötektik katı-sıvı arayüzeyi, ötektik denge sıcaklığı altında aşırı soğutulmalıdır. Eğer toplam alt soğuma ΔT_o ile tanımlanırsa, $\Delta G(\infty)$ yaklaşık olarak,

$$\Delta G(\infty) = \frac{\Delta H \Delta T_o}{T_E} \quad (1.33)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ΔH , entalpi değişimidir. Lamelsel mesafenin alabileceği en küçük değer (λ^*) için, $\Delta G(\lambda^*) = 0$ olduğu göz önüne alınır,

$$\Delta G(\infty) = \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m}{\lambda^*} \quad (1.34)$$

$$\lambda^* = \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m}{\Delta G(\infty)} = \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m T_E}{\Delta H \Delta T_o} \quad (1.35)$$

eşitliği bulunur [24].

1.7. Ötektik Yapılar ve Ötektik Yapıların Sınıflandırılması

Ötektik alaşımların kontrollü katılaştırılması ile oluşan mikroyapıların sınıflandırılması konusunda değişik görüşler ileri sürülmüştür [21-28]. Bu sınıflandırmalar çoğunlukla mikroyapıların morfolojik görünümüne bağlı olarak yapılmıştır.

Schiell [22] ötektik mikroyapıları normal ve anormal olmak üzere iki ana grupta incelemiştir. Bu sınıflandırmada, ötektik yapıdaki fazların dağılımında birbirlerine göre düzenlilik derecesi dikkate alınmıştır. Normal mikroyapılar sürekli bir ana faz (matrix) içerisine gömülmüş birbirine paralel lamelsel, çubuksal ve küresel kristallerden meydana gelmiştir. Anormal mikroyapılarda ise ötektik mikroyapıyı oluşturan fazların aynı hızda ve sıcaklıkta büyümediği ve fazların gelişigüzel yöneldiği yapılardan meydana gelmiştir.

Chadwick [23] ise ötektik yapıyı sürekli, süreksiz ve spiral olmak üzere üçe ayırmıştır. Sürekli yapılar, lamelsel ve çubuksal yapılardan meydana gelirken, süreksiz yapı bir ana faz içerisinde gelişigüzel dağılmış taneciklerden meydana gelmiştir. Spiral katılaşma şeklini gösteren ötektik yapılar ise aynı isimle anılmıştır. Bu sınıflandırma, optik mikroskopta incelenen numunelerin yüzeylerindeki yapıların şekilsel görünüşlerine göre yapılmıştır.

Hunt ve Jackson [21] tarafından geliştirilen ve ötektik mikroyapıyı oluşturan fazların erime entropilerine dayanan sınıflandırma, ikili ötektik alaşımların katılaşmasıyla ortaya çıkan mikroyapıları üç gruba ayırmıştır. Bu yapılan sınıflandırmaya ait mikroyapı oluşumları Şekil 1.19'da şematik olarak gösterilmektedir. Bunlar,

a) Düzlemsiz-Düzlemsiz (Nonefaceted-Nonefaceted) Ötektikler; Her iki elementin erime entropisi düşüktür ve sadece düzenli lamelsel (regular lamellar) veya fiber şeklinde mikroyapılar oluşur. Metal-metal ötektik alaşımlarda gözlenir (Sn-Pb, Al-Zn).

b) Düzlemsiz-Düzleml (Nonefaceted-Faceted) Ötektikler; Elementlerden birisi düşük diğeri ise yüksek erime entropisine sahiptir. Bu tür alaşımlarda düzensiz veya kompleks düzenli mikroyapılar görülür. Metal-ametal ötektik alaşımlarda gözlenir (Al-Si, Fe-C).

c) Düzleml-Düzleml (Faceted-Faceted) Ötektikler; Bu tür ötektiklerde hiçbir düzenli yapı oluşmaz. Bu tür mikroyapı, sadece organik ötektiklerde (Azobenzen-Benzil), bazı yarı metallerde (Bi, Si, Ge) veya erime entropisi yüksek intermetalik bileşiklerde görülür.

Crocker ve ark. [24, 25], Hunt ve Jackson'un [21] ortaya attıkları modeli geliştirerek ötektik yapıları daha anlamlı bir şekilde sınıflandırmışlardır. Buna göre ötektik fazların

düzlemlili olup olmaması, ötektik sıcaklıktaki dönüşüm entropisine bağlıdır. Katı-sıvı dönüşüm entropisi $\Delta S_\alpha \geq 23 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ olduğu durumda, faz düzlemlidir ve normal ötektikle anormal ötektik birbirinden ayrılır. Normal ve özellikle anormal ötektiklerde yapılar, düzlemlili fazın hacim oranı V_F , katılaşma hızı, sıcaklık gradyenti ve bileşime bağlı olarak değişir. Croker ve ark. [24, 25] ötektikleri aşağıda ayrıntıları verilen *normal* ve *anormal* olmak üzere iki ana grupta incelemişlerdir.

1.7.1. Normal Ötektikler

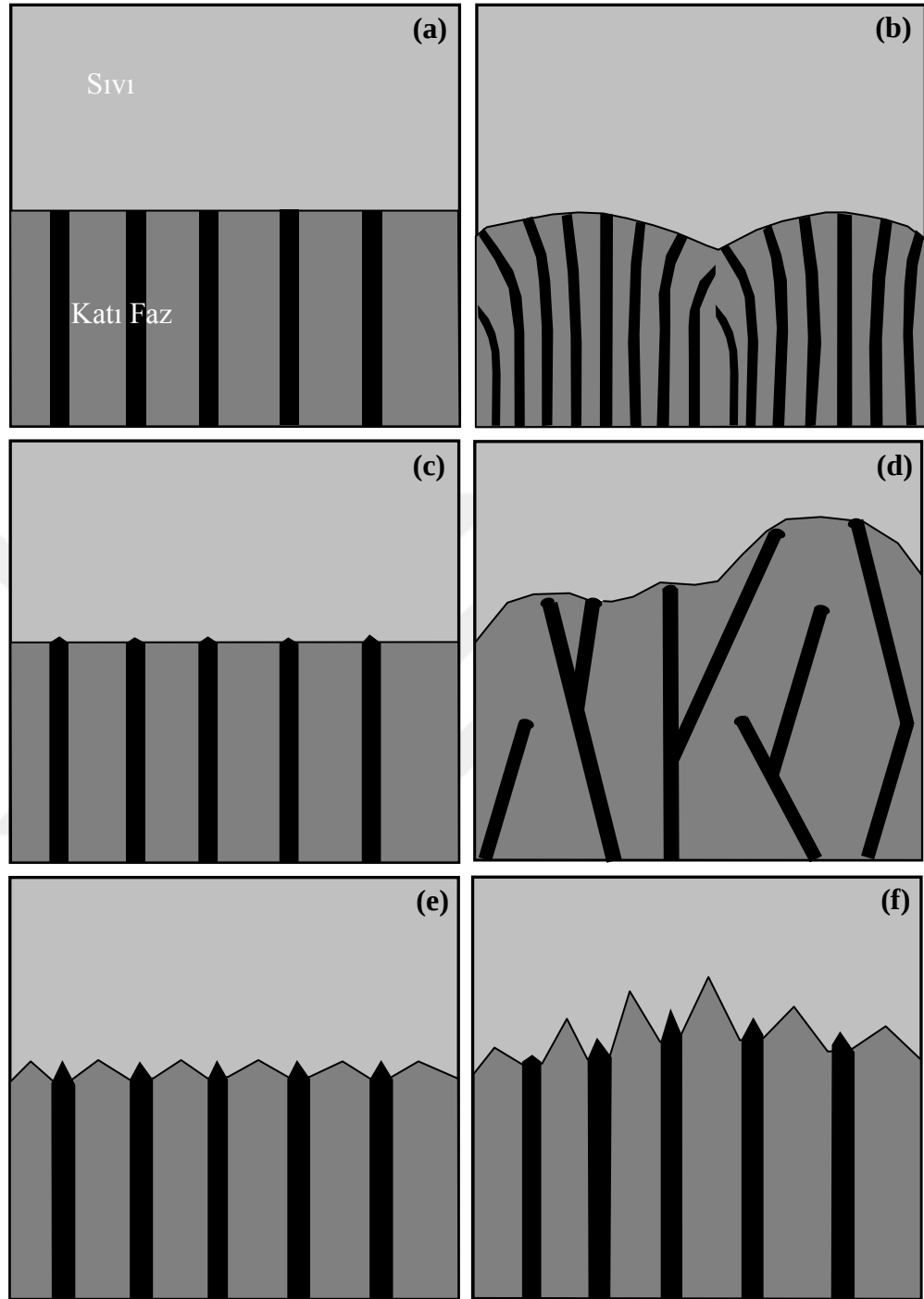
Normal ötektiklerde, her faz düşük bir dönüşüm entropisine sahip olup, çekirdeklenmeden sonra pürüzlü bir katı-sıvı arayüzeyi boyunca büyüme görülür. Çok az bir alt soğuma ile α ve β lamelleri veya ana faza çökelmiş çubuksal yapılar oluşur. Bu yapılar normal ötektiklerin en genel özelliğidir. Denge şartlarında, sıvıda bir bileşim gradyenti vardır. Bu bileşim gradyenti katı-sıvı arayüzeyinden yayılan A ve B atomlarınca oluşturulur. Bu yüzden lamelsel veya çubuksal kristaller arası mesafe (λ_E) korunur [26]. Normal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde ikiye ayrılır [24,25]. Bunlar;

a) Lamelsel; Uzun mesafeler boyunca uzanan düzenli fakat kristal hatalarıyla kesilen birbirine paralel lameller şeklindeki kristallerden oluşan mikroyapıdır.

b) Çubuksal; Uzun mesafeler boyunca uzanan ve katılaşma yönü doğrultusunda birbirine paralel olarak yönelmiş düzenli fiber şeklindeki kristallerden oluşan levhasal mikroyapıdır. Yapı düzenlidir fakat ana faz içerisinde dik kesiti çok köşeli veya çubuksaldır.

1.7.2. Anormal Ötektikler

Anormal ötektik yapı, ticari bakımdan çok önemli olan Al-Si ve Fe-C alaşımlarında görülür. Fazlardan biri düzlemlili karaktere sahip olduğundan, normal ötektiğe göre çok farklı ve karmaşık mikroyapısal özellik gösterir. Düzlemlili fazlarda kinetik alt soğuma ΔT_k büyük olduğundan ötektik büyüme yavaş olur. Dolayısıyla sıcaklık dalgalanmaları dengelenemez. Kinetik engelin aşılmasındaki zorluklardan dolayı düzensiz ve farklı yapılar oluşur. Düzlemlili fazın büyümesi için katı-sıvı arayüzeyinde büyüme tabakalarının oluşması gerekir. Bu tabakalar ve iki boyutlu çekirdeklenme, yüzeyde



Şekil 1.19. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımlara ait farklı yapılar

- a) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), düzlemsel arayüzey,
- b) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), eğrisel arayüzey,
- c) Düzlemsiz/Düzlemlı (Nf/F), düzlemsel arayüzey,
- d) Düzlemsiz/Düzlemlı (Nf/F), eğrisel arayüzey,
- e) Düzlemlı/Düzlemlı (F/F), düzlemsel arayüzey,
- f) Düzlemlı/Düzlemlı (F/F), eğrisel arayüzey.

oluşan düzensizliklerden kaynaklanır. Bu düzensizliklerin oluşumu ise büyük ölçüde alt soğumaya bağlıdır. Düzlemli fazın farklı kristal büyüme özelliği, anizotropik karakteri, diğer faz ile eş-zamanlı büyümemesi, anormal ötektiklerin çok farklı yapılara sahip olmasına neden olur [26].

Eğer düzlemli-düzlemsiz ötektik bir sistemde, düzlemli fazın hacim oranı V_F , düzlemsiz fazın hacim oranı V_{NF} 'den küçük ise kesikli lamelsel (broken lamellar) yapılar oluşur. Bu oluşumun nedeni, düzlemli olmayan fazın, düzlemli olan fazın büyümesini nispeten veya tamamen engellemesinden kaynaklanır. Düzlemli fazın hacim oranı, biraz daha artırılırsa düzlemli olmayan faz, düzlemli fazı büyüme esnasında sık sık kuşatır ve sıvı ile temasını kısmen keser. Bu engellemeyi aşmak için düzlemli faz, dallanmalar ve farklı yönelimler gösterir. Eğer V_F artırılırsa, düzlemli faz atomları katı-sıvı arayüzeyinde birikim gösterir. Bu arayüzey birikimi, yapısal alt soğumaya sebep olur ve karmaşık düzenli yapı meydana gelir. V_F , matris yani ana faz oluşturacak kadar çoksa, mikroyapı düzlemli olmayan fazın yarı düzenli dağılımından oluşur. Katılaştırma hızı ve sıvı sıcaklık gradyenti bu oluşumda önemli rol oynar. Yüksek G/V şartlarında katılaştırma, düzlemli fazın çevrelenmesini önler ve izotermal katı-sıvı arayüzeyi oluşur. Eğer arayüzey büyüme hızı (V) artarsa (düşük G/V şartında) izotermal arayüzey bozulur, bu ise düzlemsel fazın diğer faz tarafından çevrelenmesine ve düzensiz yapı oluşumuna yol açar [26]. Anormal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde altıya ayrılır [24,25]. Bunlar;

a) Fleyk (Flake) Yapı; Uzun mesafeler boyunca düzenli olmayan, dallanmış veya dallanmamış levhasallardan oluşan kuru yaprak veya ‘mısır gevreği’ şeklindeki kristallerden oluşan mikroyapılardır.

b) Kesikli Lamelsel (Broken Lamellar) Yapı; Kesikli levhaların oluşturduğu düzenli sayılabilecek mikroyapılardır.

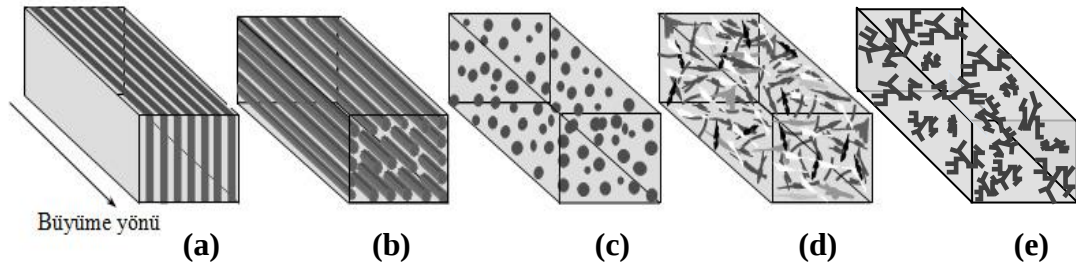
c) Lifli (Fibrous) Yapı; Uzun mesafeler boyunca düzensiz olarak uzanan ve birbiri ile bağlantılı çok ince fiberlerden oluşan mikroyapılardır.

d) Karmaşık Düzenli (Complex Regular) Yapı; Çok küçük bir hacim içerisinde ve genellikle spiral biçimli birbirine paralel düzenli levhalardan oluşan mikroyapılardır.

e) **Çin Yazısı (Chinese Script) Yapı;** Birbirinden ayrı, küçük ve ince bir şekilde dallanmış mikro düzlemler levhalardan oluşan mikroyapılardır.

f) **Yarı Düzenli (Quasi Regular) Yapı;** Erime entropisi yüksek bir ana faz içindeki düzlemsiz fazın levha veya fiber şeklindeki kristallerinden oluşmuş mikroyapılardır. Bu yapı, üçüncü bileşen ilavesi ile veya özel katılaştırma şartlarında elde edilebilir.

Her ne kadar yorum ve tanımlarda bazı farklılıklar olsa da araştırmacılar tarafından ortak olarak benimsenen ötektik yapılar Şekil 1.20’de şematik olarak gösterildiği gibidir [30].



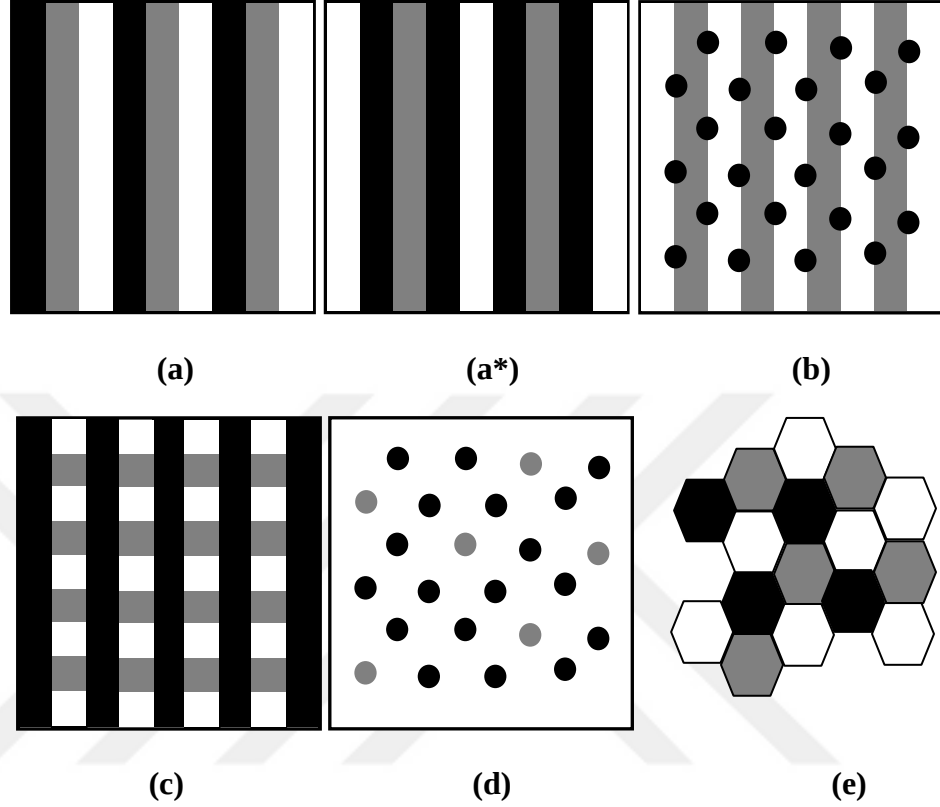
Şekil 1.20. Farklı ötektik yapıların şematik gösterimi

- (a) Lamelsel ötektik (Al-Cu), (b) Çubuksal ötektik (Cu-Cr),
 (c) Küresel ötektik (Cu-CrO), (d) Karmaşık Düzenli ötektik (Al-Si).
 (e) Çin yazısı yapı (Al-Si-Mg)

1.7.3. Üçlü Ötektikler

Üçlü ötektik alaşımların sınıflandırılması ikili ötektik alaşımlara göre oldukça zor ve karmaşıktır. Üçlü ötektik alaşımların bileşen sayısının ikili sistemlere göre daha fazla olması katılaştırma neticesinden sayıca fazla yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Üçlü ötektik alaşımların sınıflandırılması üzerine son yıllarda Ruggerio ve Rutter [82] bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Ruggerio ve Rutter geliştirdikleri yaklaşımda üçlü ötektikler için mümkün durumları kabaca lamelsel ve lifli fazların farklı oluşumları şeklinde tanımlamışlardır. Ruggerio ve Rutter tarafından üçlü alaşımlar için oluşturulan sınıflandırma türleri Şekil 1.21’te verilmektedir. Bu ötektik şekillenim türleri üçlü alaşımı meydana getiren tüm bileşenlerin arayüzey enerjilerin eşit olduğu kabul edilerek oluşturulmuştur. Ayrıca araştırmacılar ikili sistemlere benzer olarak, üçlü ötektik alaşımlarda da ötektik yapıyı oluşturan her bir fazın arayüzey enerjisinin eşit ve hacim

kesirlerinin küçük olması durumunda çubuksal (rod-like) ötektik yapı oluşacağını ifade etmişlerdir.



Şekil 1.21. Doğrusal katılaştırılmış üçlü ötektiklerin sınıflandırılması [86]
 (a-a*) Üçlü lamelsel büyüme, (b) Bir lifli, iki lamelsel büyüme,
 (c) İki lifli, bir lamelsel büyüme, (d) Bir ana faz, iki lifli büyüme, (e) Üçlü lifli büyüme.

Ötektik alaşımların özelliklerinden en iyi şekilde yararlanabilmek için, alaşımlar sabit katılaştırma hızı farklı sıcaklık gradyentlerinde ve sabit sıcaklık gradyenti farklı katılaştırma hızlarında tek yönlü olarak katılaştırılırlar. Ötektik alaşımların tek yönlü katılaştırılması, mekanik ve elektronik özelliklere sahip mikron düzeyinde yapılar oluşmasına sebep olduğu için makine parçasından, elektronik elemanlara kadar teknolojinin birçok alanda uygulanmaktadır [27]. Kraft and Albright [27] tek yönlü katılaştırılmış ötektiklerin mikroyapısal özelliklerini incelemişler ve bazı ötektiklerin, iyi ısısal kararlılık sağladığını ifade etmişlerdir. Graham and Kraft [28] katılma boyunca gelişen lamelsel kusurları tespit etmişler ve bu kusurların mikroyapılar üzerinde kabalaşma, direncini azaltma gibi etkilerinin olduğunu göstermişlerdir.

Bu ve benzeri çalışmalarla kararlı durumdaki ötektik katılaştırmanın deneysel ve teorik incelemeleri hız kazanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucunda bileşim (C), sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırma hızının (V), yapısal kusursuzluk, faz kararlılığı ve lamelsel mesafeler üzerine oldukça önemli etkilerinin olduğu ortaya konulmuştur. Bu nedenle ötektik sistemler için (C_E sabit) G ve V katılaştırma parametreleri değiştirilerek λ_E 'nin değişimini incelemek önem kazanmıştır. Son yıllarda ötektik katılaştırma üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmalar üç veya daha çok bileşenli sistemler üzerinde yoğunlaşmaya başlamıştır.

1.8. Ötektik Katılaştırma İçin Teorik Modeller

İkili ötektik alaşımlarda mikroyapı parametresinin tespiti üzerine Jackson-Hunt (J-H) ve Trivedi-Magnin-Kurz (TMK) tarafından geliştirilmiş iki adet teorik model bulunmaktadır. Ayrıca son zamanlarda Wilde-Froyen-Witusiewicz-Hecht (WFWH) tarafından üçlü ötektik alaşımlardan iki faz büyümesi durumunda mikroyapı parametresinin tespiti üzerine bir teorik model geliştirilmiştir. Bu modeller aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

1.8.1. Jackson-Hunt (J-H) Modeli

Ötektik mesafelerin tespiti üzerine ilk kapsamlı model, Jackson-Hunt [31] tarafından, lamelsel ve çubuksal ötektikler için geliştirilmiştir. İleri sürülen bu modelde, lamelsel veya çubuk (rod) biçimindeki ötektiklerin kararlılığı için gerekli şartlar, alt soğuma (ΔT), katılaştırma hızı (V) ve ötektik mesafe (λ_E) arasındaki ilişkileri oldukça iyi açıklanmaktadır. Alt soğuma (ΔT) için bulunan bağıntı,

$$\Delta T = K_1 \lambda_E V + K_2 / \lambda_E \quad (1.36)$$

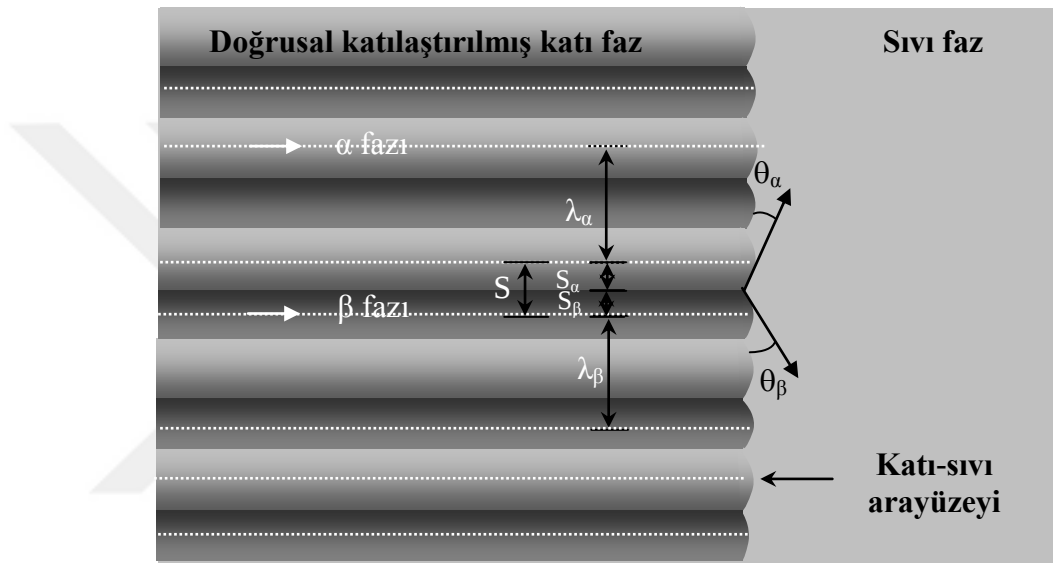
şeklindedir. Burada K_1 ve K_2 sistemin fiziksel parametreleridir ve

$$K_1 = m P C_o / f_\alpha f_\beta D \text{ ve } K_2 = 2m\delta \sum_i \Gamma_i \sin \theta_i / m_i f_i \quad i = \alpha, \beta \quad (1.37)$$

şeklinde ifade edilmektedir [32]. Burada $m = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$ 'dır. m_α ve m_β sırasıyla, ötektik sıcaklıktaki α ve β sıvılık eğrilerinin eğimlerinin büyüklükleridir. C_o , α ve β fazlarının bileşim farkıdır. f_α ve f_β sırasıyla α ve β fazlarının hacim kesirleridir. Γ_i

Gibbs-Thomson katsayılarıdır. θ_i açıları ($i = \alpha, \beta$) ise Şekil 1.22’de gösterilmektedir. δ parametresi lamelsel büyütme için 1’e, çubuksal büyütme için $2\sqrt{f_\alpha}$ ’ya eşittir [32]. Denklem (1.37)’de P ise, Peclet sayısı olarak bilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$P = \begin{cases} 0,3383(f_\alpha f_\beta)^{1,661} & \text{Lamelsel ötektikler için} \\ 0,167 (f_\alpha f_\beta)^{1,25} & 0 \leq f_\alpha \leq 0,3 \text{ Çubuksal ötektikler için} \end{cases} \quad (1.38)$$

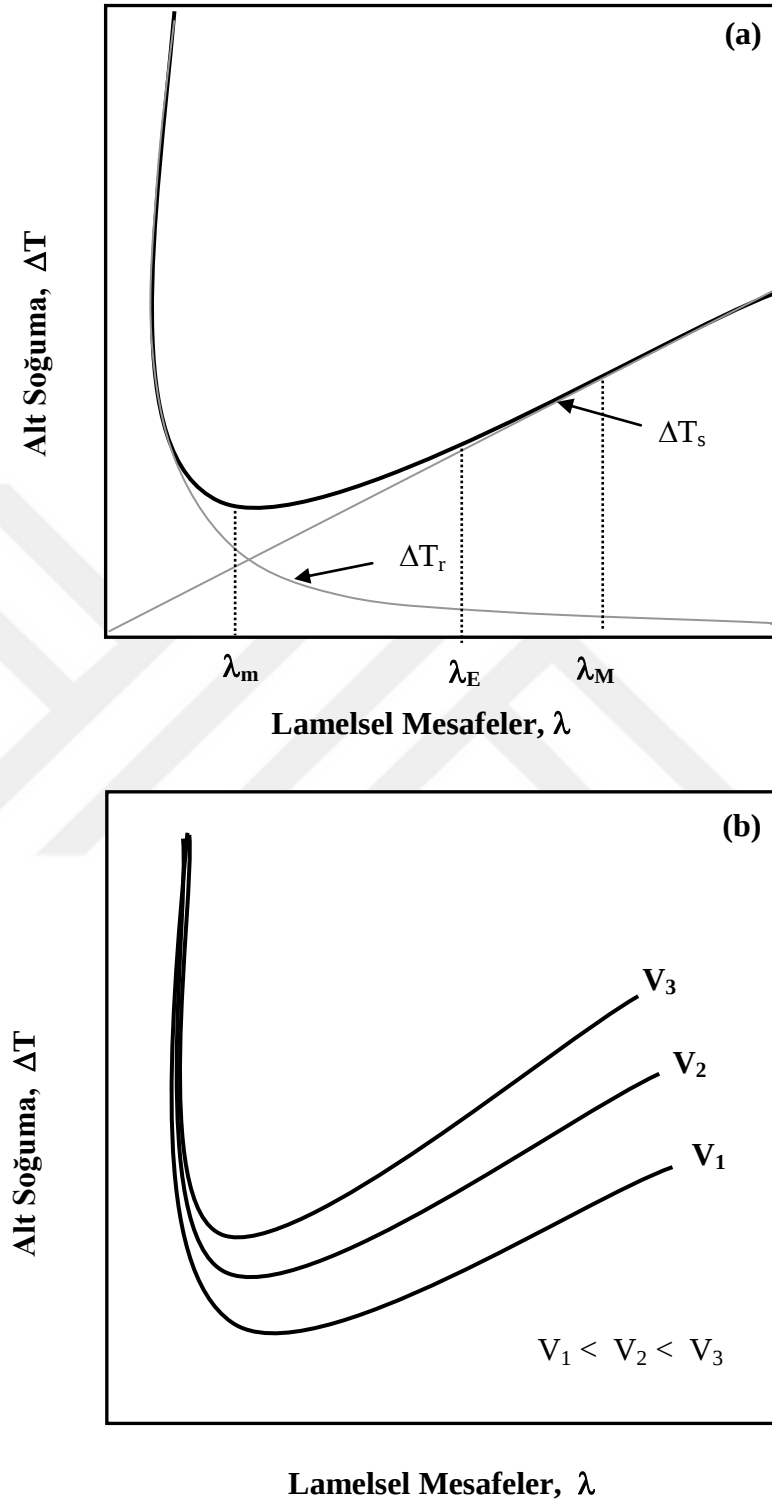


Şekil 1.22. Temas açıları ve ötektik yapının şematik gösterimi.

J-H ötektik mesafelerin hangi şartlarda kararlı olacağını analizini de yaparak, kararlı ötektik mesafe aralığının Şekil 1.23’te gösterildiği gibi, $\lambda_m < \lambda_E < \lambda_M$ şeklinde olduğunu ifade etmişlerdir. Burada λ_E ; ötektik mesafe, λ_m ; minimum ötektik mesafe, λ_M ise maksimum ötektik mesafedir. Jackson-Hunt λ_m ve λ_M ’un hız ile değişimlerini hesaplayarak minimum kararlı mesafe için aşağıdaki bağıntıları çıkarmışlardır.

$$V\lambda_m^2 = \frac{K_2}{K_1} \quad (1.39)$$

$$\Delta T = [2\sqrt{K_1 K_2}] V^{1/2} \quad (1.40)$$



Şekil 1.23. Jackson-Hunt modelinin öngördüğü sabit kayılaştırma hızında alt soğuma ile lamelsel mesafeler arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (a) Eğriliğin ve çözünürlüğün etkisi, (b) Farklı hızlarda alt soğumaya karşı lamelsel mesafelerin değişimi.

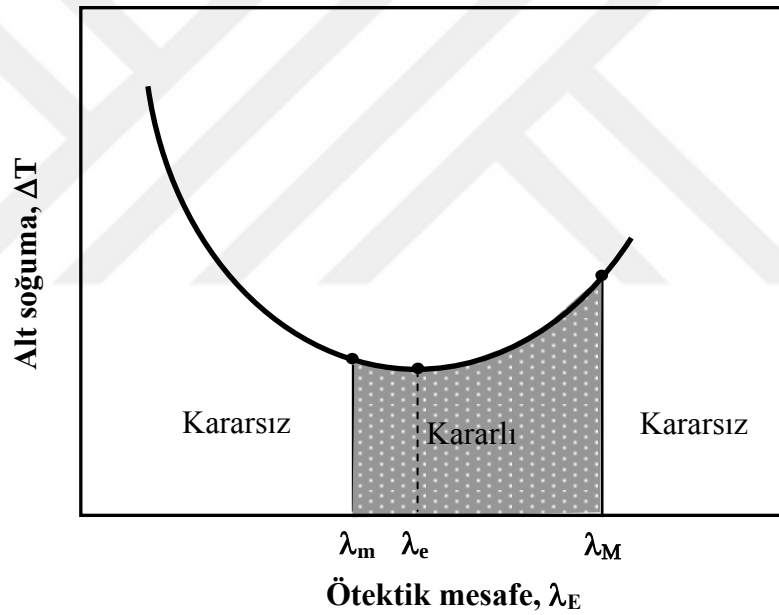
Bu modelin iki önemli sonucu vardır. Bunlar,

1- Verilen bir hız için eğer ötektik mesafe λ_m ve λ_M ile gösterilen alt ve üst limitler arasında ise, bu ötektik mesafe karardır (Şekil 1.24).

2- Eğer ötektik mesafe karardır ise yani λ_m ile λ_M arasında ise aşağıdaki genel ifade yazılır.

$$V\lambda_{Ej}^2 = \text{sabit} \quad j = m \text{ veya } M \quad (1.41)$$

Birçok deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bağıntılar J-H modelinin öngördüğü temel bağıntıları desteklemektedir. Bu yüzden J-H modeli oldukça geniş kabul görmüş bir modeldir.



Şekil 1.24. Sabit hızda ötektik mesafe ile ortalama arayüzey alt soğumasının ilişkisi ve kararlı-kararsız bölgeler [31].

1.8.2. Trivedi-Magnin-Kurz (TMK) Modeli

Jackson-Hunt [31] tarafından ötektik katılaşırma geniş bir şekilde analiz edilip geliştirilmiştir. J-H modeli düşük hız bölgeleri için geliştirildiği için yüksek hız bölgeleri için deneysel sonuçlarla uyum sağlamamaktadır. Trivedi, Magnin ve Kurz (TMK) [33] yüksek hız bölgeleri için J-H modelini genişletmişlerdir. Birçok ötektik sistem yüksek hızlarda (hızlı katılaşırma) büyütülebilmektedir. Bu nedenle dengesel

olmayan etkenler, arayüzey üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. TMK modeline göre hacimsel büyütme oranı;

$$\lambda_E^2 V = \phi^2 K_2 / K_1 \quad (1.42)$$

dır. Burada ϕ ; ötektik mesafenin, extremum mesafeye oranı olarak (λ_E/λ_{ext}) tanımlanmıştır ve;

$$\Delta T / \sqrt{V} = \left(\phi + \frac{1}{\phi} \right) \sqrt{K_1 K_2} \quad (1.43)$$

$$\lambda_E \Delta T = (\phi^2 + 1) K_2 \quad (1.44)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada K_1 ve K_2 sabitleri daha önce J-H modelinde tanımlanmıştır. Bu sabitlerin denklem (1.42)'de yerine yazılmasıyla elde edilen bağıntı,

$$\lambda_E = \phi \left[\frac{2D}{P \Delta C_o V} \sum_i \left(\frac{\Gamma_i \sin \theta_i}{m_i f_i} \right) \right]^{0.5} \quad i = \alpha, \beta \quad (1.45)$$

şeklinde verilir [24]. Burada ΔC_o arayüzeydeki α ve β fazları arasındaki bileşim farkıdır. Denklem (1.45) TMK modelinin öngördüğü lamelsel mesafelerin değerini vermektedir.

1.8.3. Wilde-Froyen-Witusiewicz-Hecht (WFWH) Modeli

Jackson-Hunt modeli ikili alaşım sistemlerinde ötektik büyütme durumunda mikroyapı parametresinin belirlenmesinde oldukça başarılı ve kabul görmüş bir modeldir. İkili ötektik alaşımlar için geliştirilen bu model Wilde-Froyen-Witusiewicz-Hecht (WFWH) tarafından üçlü alaşımlardan tek yönlü katılaştırma neticesinde iki ötektik fazın lamelsel ve düzenli büyümesi durumunda mikroyapı parametresinin belirlenmesi için genişletmiştir [83]. WFWH modeline göre üçlü alaşımdan iki faz büyümesi durumunda $\lambda_E^2 V$ değeri;

$$\lambda^2 V = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin^2(i\pi f_{\alpha})}{i^3 \pi^3}} \left\{ \frac{\Gamma_{\alpha} \sin \theta_{\alpha}}{\left| \frac{m_B^{\alpha}}{D_B} |C_B^{\alpha} + C_B^{\beta}| + \frac{m_C^{\alpha}}{D_C} |C_C^{\alpha} + C_C^{\beta}| \right|} + \frac{\Gamma_{\beta} \sin \theta_{\beta}}{\left| \frac{m_A^{\beta}}{D_B} |C_B^{\alpha} + C_B^{\beta}| + \frac{C_C^{\alpha} + C_C^{\beta}}{D_C} + \frac{m_C^{\beta}}{D_C} |C_C^{\alpha} + C_C^{\beta}| \right|} \right\} \quad (1.46)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada A, B, C alaşımı oluşturan farklı bileşenleri, α ve β ise katılaştırma neticesinde ortaya çıkan fazları temsil etmektedir. WFWH elde ettikleri bu değeri test etmek amacıyla Al-Cu-Ag alaşımını farklı hızlarda tek yönlü katılaştırarak $L \rightarrow \alpha(Al) + \theta(Al_2Cu)$ fazlarının ikili ötektik büyümesini elde ettiler. Bu deneysel çalışmadan elde ettikleri ötektik mesafe değerlerinin teorik olarak geliştirdikleri modelden hesaplanan ötektik mesafe değerlerine oldukça yakın olduğunu tespit ettiler [83]. Ayrıca bu araştırmacılar kararlı durum için J-H modelinin öngördüğü $\lambda_E^2 V = \text{sabit}$ eşitliğinin üçlü alaşımlardan iki faz büyümesi durumu için de başarılı sonuç verdiğini, bu eşitlikteki *sabit* değerin sadece seçilen alaşımın fiziksel sabitlerine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir [83].

1.9. Sertlik

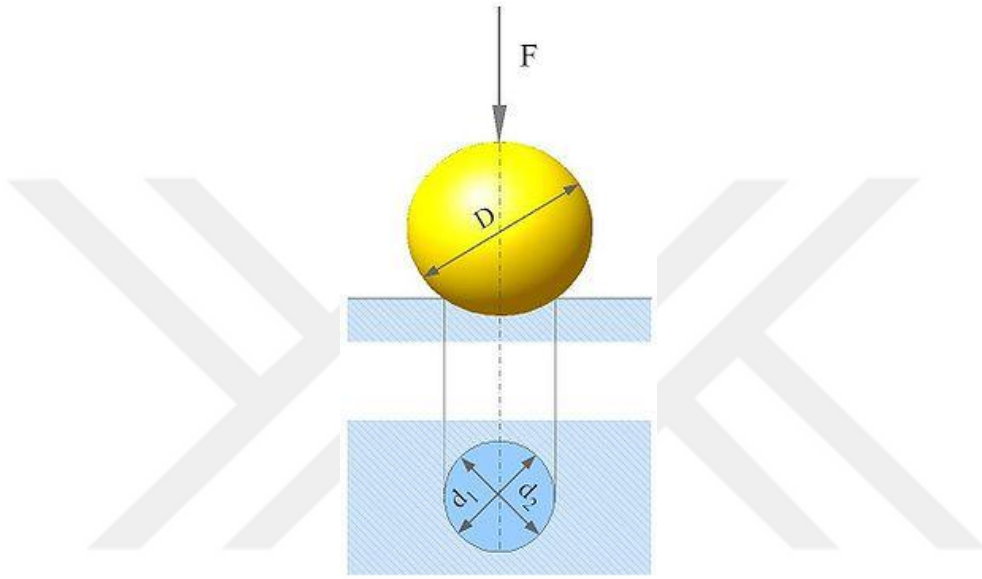
Malzemelerin sertliğinin ölçülmesi endüstride büyük önem taşır. Sertlik, dayanım ve aşınma direncine bağlı bir özelliktir. Bir malzemenin yüzeyine batırılan bir cisme, malzemenin gösterdiği dirence o malzemenin *sertliği* veya *mikrosertliği* denir.

Bir malzeme ne kadar sert ise dayanımı o kadar yüksek ve aşınma direnci o kadar fazladır. Makine elemanlarında kullanılan malzemelerin ömrü, sertlikleriyle yakından ilişkilidir. Ayrıca, sert malzemelerin içyapıları düzensiz ve stresli olduğundan, elektriksel iletkenlikleri de düşüktür. Bu bakımdan malzemelerin sertlikleri ile elektriksel iletkenlikleri arasında yakın bir ilişki vardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört çeşit sertlik ölçme yöntemi vardır. Bunlar,

- a) Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- b) Rockwell sertlik ölçme yöntemi,
- c) Knoop sertlik ölçme yöntemi,
- d) Vickers sertlik ölçme yöntemidir.

1.9.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntemde batıcı uç olarak sertleştirilmiş çelik küre veya tungsten karbür kullanılmaktadır. Kullanılacak kürenin çapı numune kalınlığına ve malzemenin şekline göre seçilir. Yükün uygulanma süresi 10-15 saniyedir. Sertliği ölçülecek numune üzerine batırılan çelik küre, hacmi nedeni ile numune üzerine küresel iz bırakır. Şekil 1.25'te Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.25. Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi.

Numune üzerindeki izin alanı hesaplanarak, Brinell sertlik (H_B) değeri;

$$H_B = \frac{\text{Uygulanan yük (kgf)}}{\text{İz yüzeyi (mm}^2\text{)}} \quad (1.47)$$

$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kgf / mm}^2) \quad (1.48)$$

bağıntısı ile bulunur [34]. Burada F ; numuneye uygulanan yük, D ; baskı küresinin çapı, d ; numune üzerinde oluşan izin çapıdır.

1.9.2. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

Rockwell sertlik ölçme yönteminde, *standart cihaz* ve *yüzeysel cihaz* olmak üzere iki tip sertlik ölçme cihazı kullanılmaktadır. Standart cihazda, 60, 100, 150 kg'lık kütleler kullanılır. Batıcı uç olarak, sert malzemeler için uç kısmında tepe açısı 120° olan, 0.2

mm çapında yuvarlaklaştırılmış elmas koni kullanılırken, yumuşak malzemeler içinde 1/16" (~1.59 mm) çapında sertleştirilmiş çelik bilye kullanılmaktadır. Yüzeysel cihazlar çok ince ve yumuşak malzemeler için kullanılmakla beraber, sertlik ölçümünde 15, 30, 45 g'lık kütleler kullanılır. Uç olarak standart cihazlarda kullanılan çelik bilyeler ve elmas koni yüzeysel cihazlarda da kullanılmaktadır. Rockwell yönteminde sertlik, numuneye batan ucun meydana getirdiği derinlik esas alınarak bulunmaktadır.

Sertlik ölçme cihazının hassasiyeti kontrol edildikten sonra sertliğini ölçmek istediğimiz malzemeye uygun ağırlık ve uç seçilir. Uç, malzemeye önce 10 kg'lık bir kütle ile yük uygulanır. Ön yükleme ile öncelikle malzemeye temas sağlanır. Böylelikle sertlik ölçümünde ön yükleme ile bir başlangıç noktası tespit edilmiş olur. 10 kg'lık yüklemenden sonra cihazın ibresi sıfıra ayarlanarak kalan ağırlıklar yüklenir. Bu durumda ucun, sertliği ölçülen numuneye batması beklenir. Bir süre sonra son yüklenen ağırlık kaldırılarak sertlik değeri göstergeden okunur. Sertlik ölçümünde uç, numuneye ne kadar derin batarsa numunenin o kadar yumuşak olduğu anlamına gelir [10, 34].

1.9.3. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi

Mekaniksel sertlik ölçme yöntemlerinden biri olan Knoop sertlik ölçme yöntemi, özellikle çok ince ve kırılgan malzemelerin mikrosertlik değerlerinin ölçülmesinde kullanılır. Bu yöntemde amaç, sertliği ölçülecek numune üzerinde sadece küçük bir iz bırakılmasıdır. Bir piramit elmas uç, belirli bir kuvvet ve süre kadar uygulanır. Sonuçta numune üzerinde ancak mikroskopla okunabilecek bir iz oluşur. Knoop sertliği H_K veya KHN ile gösterilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir;

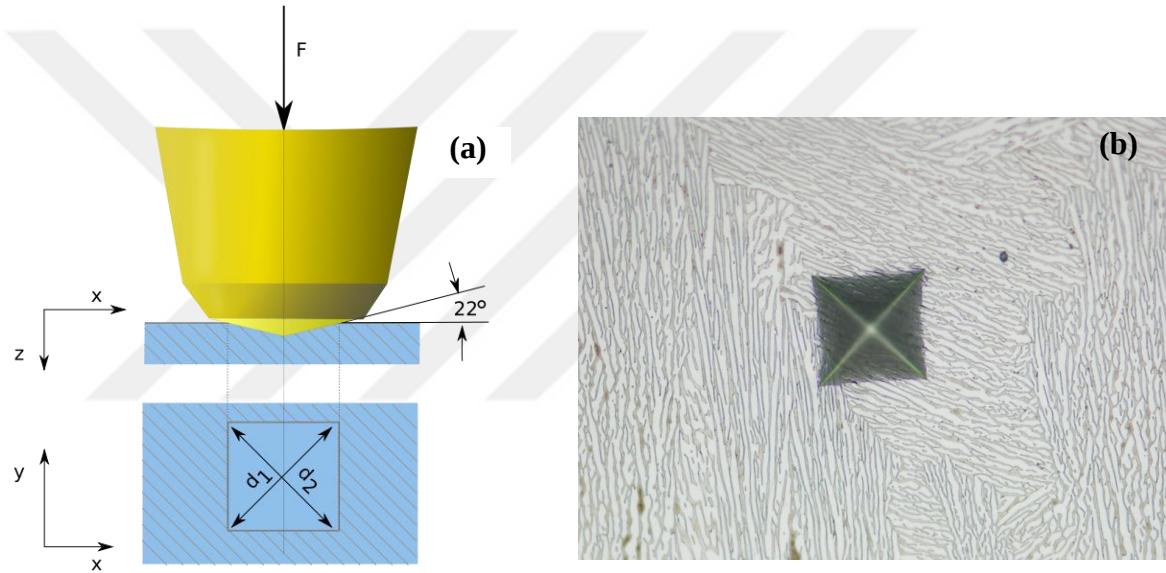
$$H_K = \frac{\text{Uygulanan Yük}}{\text{İz Alanı}} = \frac{P}{C_p L^2} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad (1.49)$$

Burada L ; numune üzerindeki izin eksenel uzunluğu, C_p ; düzeltme faktörü (izin şekline bağlıdır ve genellikle 0.070279 değeri kullanılır) ve P ; uygulanan yük miktarıdır.

H_K genellikle 100'den 1000'e kadar değişen sertlik değerlerini alır. Bu metotla çok küçük boyutlu malzemelerin bile mikrosertlik değerleri ölçülebilmektedir. Bununla beraber numune üzerinde oluşturulan izin boyutu ölçülürken mikroskobun kullanılmasının zor olması, numuneyi hazırlama ve iz uygulama işlemlerinin zaman alması bu metodun zorluklarındandır [84].

1.9.4. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Vickers sertlik ölçümünde kullanılan uç, yüzeyleri arasında 136° açı bulunan bir elmas piramittir. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile bu metotla ölçülebilir. Uygulanan yük 10 g ile 1000 g arasında değişmektedir. Uç, numuneye belli bir kuvveti 5-30 saniye kadar uygulayarak, numune üzerinde kare şeklinde iz oluşturur. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak belirlenir. Şekil 1.26'da Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi ve batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1.26. (a) Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi, (b) Batan ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı.

Vickers sertliği (HV), Brinell sertliğine benzer şekilde, uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile belirlenir.

$$HV = \frac{2F \sin(\theta / 2)}{g \cdot d^2} \quad (kgf / mm^2) \quad (1.50)$$

Burada, F ; uygulanan yük, g ; yer çekim ivmesi, d ($d^2 = d_1 \cdot d_2$); izin alanıdır. Vickers sertliği ile çok ince bölge veya tabakaların bile sertliği hassas bir şekilde ölçülebildiğinden, bu metotla ölçülen sertlik değerleri, mikrosertlik olarak da bilinir [8, 10,34].

1.9.5. Mikroyapı Parametresi, Katılaştırma Hızı ve Sertlik Değerleri Arasındaki İlişki

1950’li yıllarda Hall [85] ve Petch [86] tarafından yapılan tane büyüklüğü ile mikrosertlik ve çekme-dayanım değerleri arasında ilişki kuran birbirinden bağımsız fakat aynı sonuca ulaşılmış çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda;

$$HV = H_o + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1.51)$$

şeklinde bağıntılar elde edilmiştir. Burada d (mm); taneler arası mesafe, k ; bileşime bağlı sabit, H_o (kg/mm²); malzemenin ilk sertlik değeri ve HV (kg/mm²); işlem gördükten sonra malzemenin sertlik değeridir.

Bazı araştırmacılar [87-91] ötektik sistemler üzerine yaptıkları çalışmalarda, Hall-Petch [85,86] tarafından elde edilen bu bağıntılardan faydalanarak d taneler arası mesafe yerine mikroyapı parametresi (λ_E) olan ötektik mesafeleri kullanarak malzemenin sertlik değerini (HV) incelemişlerdir. Ayrıca Hall-Petch [85,86] tarafından elde edilen bu bağıntılar yardımıyla katılaştırma hızının etkisini gözlemleyebilmek için Jackson-Hunt [31] modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ bağıntısından katılaştırma hızını çekip ötektik mesafe (λ_E) değeri yerine koyarak;

$$HV = H_o + k V^{0.25} \quad (1.52)$$

$$HV = H_o + k \lambda_E^{-0.50} \quad (1.53)$$

bağıntılarını elde etmişlerdir. Burada λ_E (mm); lameller arası mesafe, V (mm/s); katılma hızı, k ; bileşime bağlı sabit, H_o (kg/mm²); malzemenin ilk sertlik değeri ve HV (kg/mm²); kontrollü olarak katılaştırılan malzemenin sertlik değeridir. Böylece ötektik sistemler üzerine yapılan çalışmalarda mikrosertlik değerlerini hem ötektik mesafelere bağlı olarak hem de katılaştırma hızına bağlı olarak nasıl değiştiğini inceleyebilmişlerdir.

1.10. Çekme-Dayanım

Dinamometre veya çekme-dayanım test cihazı olarak isimlendirilen alet vasıtasıyla malzemelerin mukavemet özellikleri elde edilir. Çekme-dayanım, malzemeye iki

% 0.2 Uzama mukavemeti; Kuvvetin sabit kalmasına rağmen kalıcı deformasyonun % 0,2 olduğu gerilmenin değerine "% 0.2 uzama mukavemeti" adı verilir ve $R_{p0.2}$ ile gösterilir.

Orantılı mukavemet; Devamlı ve lineer olarak fazlalaşan gerilme ile uzamanın birbirine oranının sabit kaldığı gerilme büyüklüğüne " *orantılı mukavemet* " adı verilir ve σ_0 veya τ_0 ile gösterilir.

Elastiklik modülü; Elastiklik modülü, orantılı mukavemette, gerilmenin uzamaya oranıdır.

Çekme-dayanımı σ ,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.54)$$

eşitliği ile hesaplanır ve birimi N/mm² veya MPa dır. Burada, F çekme kuvveti, A ise malzemenin deformasyona uğramadan önceki kesit alanıdır. Deformasyon (uzama) miktarı ε ,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1.55)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, ΔL anlık alınan deformasyon miktarı, L_0 ise başlangıç uzunluğudur. Bir malzemenin çekme-dayanımı ne kadar yüksek ise o malzeme çekilirken o kadar az süner veya şekil değiştirir. Çekme-dayanım deneyi genellikle yuvarlak veya dikdörtgen kesitli çubuklar üzerinde yapılır.

1.10.1. Mikroyapı Parametresi, Katılaştırma Hızı ve Çekme-Dayanım Değerleri Arasındaki İlişki

Bazı araştırmacılar [92-97] sertlik üzerine yapılan araştırmaların bir benzeri şeklinde ötektik sistemler üzerine yaptıkları çalışmalarda, Hall-Petch [85,86] tarafından elde edilen bağıntıdan faydalanarak d taneler arası mesafe yerine mikroyapı parametresi olan ötektik mesafeleri (λ_E) kullanarak malzemenin çekme-dayanım değerini (σ_C) incelemişlerdir.

$$\sigma_C = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1.56)$$

Ayrıca Hall-Petch [85,86] tarafından elde edilen bu bağıntılar yardımıyla katılaştırma hızının etkisini gözlemleyebilmek için Jackson-Hunt [31] modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ bağıntısından katılaştırma hızını çekip ötektik mesafe (λ_E) değeri yerine koyarak;

$$\sigma_C = \sigma_o + k V^{0.25} \quad (1.57)$$

$$\sigma_C = \sigma_o + k \lambda_E^{-0.50} \quad (1.58)$$

bağıntılarını elde etmişlerdir. Burada λ_E (mm); lameller arası mesafe, V (mm/s); katılama hızı, k ; bileşime bağlı sabit, σ_o (N/mm²); malzemenin ilk çekme-dayanım değeri ve σ_C (N/mm²); kontrollü olarak katılaştırılan malzemenin çekme-dayanım değeridir.

1.11. Elektriksel Özdirenç

Elektriksel yüklerin herhangi bir etki ile bir yönde veya her iki yöndeki hareketi elektriksel iletkenlik olarak tanımlanır. Elektriksel iletkenlik hareketli taneciklere göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırmada hareketli tanecikler elektronlar ise elektronik iletkenlik, iyonlar ise iyonik iletkenlik, her iki tanecik türününse hareketli olduğu iletkenlik türü karma iletkenlik olarak tanımlanmıştır. Bu durumda iletkenlik üçe ayrılır ve Tablo 1.1’de verilen şekilde gruplandırılır.

Bir malzemenin elektrik iletimi iyonik ya da elektronik mekanizmalardan biri ile olur [98]. İyonik ve elektronik iletkenliğe sahip malzemelerin iletkenlik aralıkları Tablo 1.2’de verilmiştir. Yarıiletkenlik, süper iletkenlik ve metalik iletkenliği içine alan elektronik iletkenliğin dışında diğer bir iletkenlik türü iyonların hareketine bağlı olan iyonik iletkenliktir. İyonik iletkenlik özellikle O⁻², N⁻³, Cl⁻, B⁻² gibi anyonlar veya H⁺, Na⁺, Li⁺ gibi katyonların hareketleri ile görülür [98].

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

Tablo 1.1. Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması.

Elektriksel İletkenlik		
Elektronik İletkenlik	İyonik İletkenlik	Karma İletkenlik
Metalik İletkenlik (Au, Cu gibi)	Katı Elektrolitler (Zirkonyum tabanlı katı elektrolit gibi)	(δ -Bi ₂ O ₃ Fazı)
Yarıiletkenlik (Si, Ge, Polimer gibi)	Süper İyonik İletkenlik (SrF ₂)	
Süper İletkenlik (Hg, Al, MgB ₂ gibi)	Hızlı İyon İletkenliği (Tl ₃ Cu ₂ Cl ₅)	

Tablo 1.2. Malzemelerin elektriksel iletkenlik değer aralıkları.

Malzeme	İletkenlik ($\Omega \text{ cm}$) ⁻¹
İyonik İletkenlikler	İyonik Kristaller
	Katı Elektrolitler
	Sıvı Elektrolitler
Elektronik İletkenlikler	Metaller
	Yarıiletkenler
	Yalıtkanlar

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

Sıfır sıcaklıkta (K) sistemin serbest enerjisi potansiyel enerji tarafından baskılanır. Sıcaklık artırıldıkça sistemin düzensizliğinin derecesi olan entropinin artmasından dolayı sistemin serbest enerji dağılımı oldukça belirginleşir. Tablo 1.3'te alışımlarda

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

Sistem artan serbest enerjiyi en aza indirmek ve kararlılığını artırmak için en düşük düzeyde örgü boşluklarına sahip olmalıdır. Bu durum hareketli taneciklerin sürekli örgü kusurlarından hareketi ile gerçekleştirilir [99]. Taneciklerin bu hareketi bir elektrik alan ile yönlendirilerek iletkenlik meydana getirilir. Katı haldeki malzemenin iletkenliği, yük taşıyıcıların konsantrasyonu, kristalin sıcaklığı, iyonun örgü içinde hareket edebilirliği, kristal içindeki kusurun miktarı gibi özelliklerden etkilenir. Örgüde boşluk kusurları normalde iki metotla meydana getirilir. Bunlardan biri kristalin ısıtılması sonucunda meydana gelen örgü kusurlarıdır. Bir diğer yolu ise safsızlık katkılamaştır. Sıcaklık ve safsızlık iyonik iletkenliği büyük oranda etkiler. Safsızlık katkılanmış bileşiklerde yüksek sıcaklıkta bu iki etki de iletkenlikte rol oynar. Düşük sıcaklıklarda, elektriksel iletkenlik oldukça azdır. Bu durumda safsızlık etkisi ile meydana gelen kusurlar daha baskındır. Ancak yüksek sıcaklıklara çıktıkça sıcaklık etkisiyle oluşan kusurlar artacağından katı, karışık tip örgü kusur içermeye başlar. Bu durumda gözlenen iletkenlik türü karışık tip iletkenliktir.

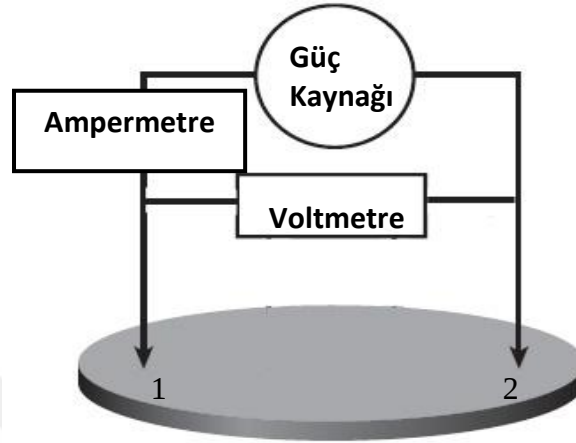
Elektriksel iletkenlik ve öz direnç (dirençlilik) bir malzemenin karakteristik özelliğidir. Bir numunenin elektriksel iletkenliğinin belirlenebilmesi için ölçülen voltaj ve akım şiddeti, hesaplanan öz direnç değeri ile numunenin geometrik yapısı arasındaki ilişki kullanılır. Bu nedenle öz direncin hesaplanmasında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

$$\frac{V}{I} = R \quad (1.59)$$

eşitliğine, geometrik yapıya bağlı olan bir düzeltme faktörü (resistivity correction factor) değeri ilave edilerek öz direnç hesaplanır. Bu düzeltme katsayısı numunenin kalınlığına ve geometrik yapısına, yüzey büyüklüğüne, numune kenar sınırlarının yapısına, kontakların numune üzerinde bulunduğu konuma ve kontakların düzenine bağlı olarak değişir [100].

Malzemelerin öz dirençlerinin belirlenebilmesi için numune içinde elektrik alan oluşturacak bir akım kaynağına, bu elektrik alan nedeniyle numune içinde meydana gelen I elektrik akımının şiddeti ve keyfi seçilen herhangi iki nokta arasında meydana

gelen V potansiyel düşmesinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bir maddenin elektriksel özdirenci, maddenin üzerinden geçen I akımı ve bunun meydana getirdiği V geriliminin oranı ile bulunur.



Şekil 1.28. İki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği.

İki iletken kontak tel ile yapılan elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemine *iki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçümü* denir (Şekil 1.28). Burada direncin belirlenebilmesi için V ve I değerinin doğrudan ölçülmesi yeterlidir.

Bu yöntemle yapılan direnç belirleme ölçümünde elde edilen R değeri ileride de belirteceğimiz şartlara bağlı olarak kontakların direncini de içerir. Bu durumda elde edeceğimiz R direnci ve buna bağlı elde edilen ρ elektriksel özdirenç değeri sadece numuneye ait olmayacaktır. Direncin elde edilmesi numunenin özdirencinin belirlenmesini sağlar. Homojen bir numunenin elektriksel özdirenci belirlenmek istendiğinde malzemenin geometrik özelliklerinin de bilinmesi gereklidir. Elektriksel özdirenç ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir [101]:

$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (1.60)$$

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

Tablo 1.3. Alaşımlarda kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri [100].

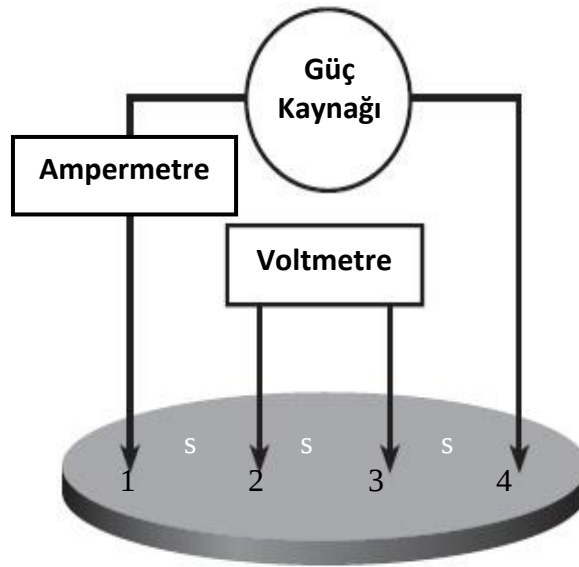
Malzeme	Sembolü	Elektriksel İletkenlik ($\times 10^7 \text{ } (\Omega \text{ m})^{-1}$)
Gümüş	Ag	6.3
Bakır	Cu	5.96
Altın	Au	4.52
Alüminyum	Al	3.77
Magnezyum	Mg	2.26
Tungsten	W	1.89
Molibdenyum	Mo	1.87
Kobalt	Co	1.72
Çinko	Zn	1.66
Nikel	Ni	1.43
İndiyum	In	1.16
Lityum	Li	1.08
Demir	Fe	0.993
Platin	Pt	0.966
Kalay	Sn	0.917
Krom	Cr	0.774
Kurşun	Pb	0.481
Uranyum	U	0.38
Antimon	Sb	0.288
Titanyum	Ti	0.234
Neodyum	Nd	0.157
Cıva	Hg	0.104
Bizmut	Bi	0.0867
Plutonyum	Pu	0.0666
Karbon	C	0.0061
Germanyum	Ge	1.45×10^{-7}
Silikon	Si	2.52×10^{-11}
Selenyum	Se	1.0×10^{-11}
Bor	B	1.0×10^{-11}

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

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

Elektriksel iletkenliğin ölçümünde kullanılan diğer bir yöntem olan *dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik* ölçme tekniğinde, kullanılan kontakların dirençleri ölçümde hesaba girmez ve hesaplanan değer sadece numunenin öz direncidir. Bu amaçla kurulan düzenekte kontaklardan ikisi numune üzerinden akan akımı ölçmek için, diğer ikisi ise herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek için kullanılır. Şekil 1.29'da görüldüğü gibi 1.ve 4. problemlerden akım, 2. ve 3. problemlerden 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.

Kontakların aynı doğrultuda dizilmeleri en avantajlı ölçüm şekli olacaktır. Bu durumda G faktörünün belirlenmesi ve hesabı daha kolaydır. Burada s ardışık kontaklar arası mesafedir (Şekil 1.29). Böyle bir ölçüm düzeneğinde yukarıda yer alan ρ öz direnç denklemindeki G katsayısı numune geometrisine, kontakların numune üzerindeki konumuna ve kontaklar arası s mesafesine bağlıdır. Uygulamada genel olarak yapılan kontak dizilişi $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s$ olan eşit aralıklı düzendir.



Şekil 1.29. Dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği.

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

$$\rho = \frac{V_{23}}{I_{14}} G \quad (1.61)$$

1.12. Isı İletkenliği

Isı enerjisi soğuran malzemelerin iç enerjisi artar ve sıcaklığı yükselir. Bu enerjinin bir kısmı örgü titreşimleriyle kinetik enerjiye, bir kısmı da genleşme yoluyla potansiyel enerjiye dönüşür. Soğurulan ısı enerjisinin büyüklüğü, enerji iletilme hızı (ısı iletkenlik) ve boyutlardaki değişimler (ısı genleşme) malzeme türüne, iç yapıya ve çevre şartlarına bağlı birer ısıl özelliktir. Üzerine kaynar su dökülen camın çatlaması, genleşmesi kısıtlanmış gevrek malzemenin sıcaklık etkisinde kırılması, porselen bardak yerine alüminyum bardakla içilen çayın dudağı yakması gibi uygulamada görülen bir çok olay, ısıl özelliklerle ilgilidir. Özellikle metallerde, ısı iletimi büyük ölçüde elektron hareketi ile sağlanır. Diğer taraftan ısıl enerjinin elektrik akımına dönüşmesi (termoelektrik etki) başka bir ısıl özelliktir [102].

Sıcak bir cisimden soğuğa sıcaklık farkından dolayı aktarılan enerji şeklinde ısı tanımlanmıştır. Bu aktarım işlemi ışıma, konveksiyon (yayılma) ve iletim olmak üzere

üç ayrı şekilde sağlanır. Bunlardan ışıma madde ortamına ihtiyaç duyulmazken konveksiyon ve iletimde ise madde ortamı kullanılır. Işıma (radyasyon) elektromanyetik dalgalar veya fotonlarla gerçekleşen ısı iletimidir. Güneş enerjisinin Dünya'ya ulaşması bu yoldadır. İkinci olarak akışkanlarda olduğu gibi, atomların ve moleküllerin kütle içinde hareketi ile sağlanan konveksiyonla ısı iletimidir. Üçüncüsü atomdan atoma titreşimle veya fononlarla vasıtasıyla gerçekleşen iletimdir. Farklı durumlar için enerji aktarımının hangi oranda hangi metotla gerçekleştiği farklılık göstermektedir. Bu enerji aktarım metotları bilimden endüstriyel uygulamalara büyük önem taşımaktadır. Örneğin; bir döküm veya bir kristal malzeme (mesela metaller, yarı iletkenler veya polimerler) erimiş halden katılaştırılırken, malzeme içinde ısı iletimi katının nihai özellikleri üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olabilir.

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

Isıl iletkenlik (K), malzeme içinde ısı enerjisinin iletim hızını belirler. Tanım olarak ısı akı (j_U), birim alandan birim zamanda geçen ısı enerjidir ve birimi $\text{cal/m}^2\text{s}$ 'dir [102].

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

$$j_U = -K \frac{dT}{dx} \quad (1.62)$$

şeklinde tanımlanır. Bu denklem Fourier Yasası olarak da bilinir. Burada j_U ısı enerji akısı veya birim zamanda birim kesit alandan aktarılan enerji miktarıdır. Denklemdaki (-) işareti ısıнын azalan sıcaklık tarafına doğru gittiğini göstermektedir. Bu denklem ısı enerji transferinin rastgele bir süreç olduğunu belirtir. Enerji basit bir şekilde numunenin bir ucundan girip doğrudan düz bir yol izleyip diğer ucuna ulaşmaz fakat numune içinde sık sık gerçekleşen çarpışmalar neticesinde difüzyona uğrar. Eğer enerji numunede sapmaya maruz kalmadan doğrudan yayılsaydı, ısı akı sıcaklık gradyentine değil numunenin uzunluğuna bağlı olmaksızın sadece numunenin uçları arasındaki ΔT

sıcaklık farkına bağlı olurdu. İletkenlik olayının rastgele doğası, sıcaklık gradyentini ve ortalama serbest yolu ısı akı ifadesine katar.

Gazların kinetik teorisinden yararlanılarak ısı iletkenlik katsayısı ifadesi,

$$K = \frac{1}{3} C v \ell \quad (1.62)$$

şeklinde bulunur burada C birim hacim başına ısı sığası, v ortalama parçacık hızı ve ℓ parçacığın çarpışmalar arasındaki ortalama serbest yoludur. Bu sonuç ilk defa Debye tarafından dielektrik katıların ısı iletkenlik hesabında, C fonon ısı sığası, v fonon hızı ve ℓ ise fonon ortalama serbest yolu olarak alınarak kullanılmıştır.

Burada denklem (1.62)'yi veren basit kinetik teoriyi ele alalım. Parçacık yoğunluğu n olmak üzere bir ortamda x yönünde ilerleyen parçacık akısı $\frac{1}{2}n\langle v_x \rangle$ olur. $\langle v_x \rangle$ ifadesi parçacık hızının ortalama değerini göstermektedir. Denge durumunda bununla aynı büyüklükte ama ters yönde bir akı daha vardır.

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

$$\Delta T = \frac{dT}{dx} l_x = \frac{dT}{dx} v_x \tau \quad (1.63)$$

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

$$j_U = -n\langle v_x^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} = -\frac{1}{3} n\langle v^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} \quad (1.64)$$

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

yazılırsa

$$j_U = -\frac{1}{3} C v \ell \frac{dT}{dx} \quad (1.65)$$

olur. (1.62) denklemi (1.65) denkleminde kullanılırsa (1.62) denkleminde verilen

$K = \frac{1}{3} C v \ell$ elde edilir [103].

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

$$K_{el} = \frac{\pi^2}{3} \frac{nk_B^2 T}{mv_F^2} v_F l = \frac{\pi^2 nk_B^2 T \tau}{3m} \quad (1.66)$$

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

1.12.1. Isıl İletkenliğin Belirlenmesinde Kullanılan Metotlar

Bu kesimde ısı iletkenliğin ölçümü için kullanılan kararlı durum metotları hakkında bilgi verildi. Kararlı durum metotlarında, numune sabit bir sıcaklıkta tutulur ve ısı iletim katsayısı birim alan başına ısı akışının ölçümü ile belirlenir.

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

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

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

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

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

Katıların ısı iletkenliklerinin deneysel ölçüm çalışmaları 18. yüzyılda başlamıştır. Benjamin Franklin [104] 1753 yılında farklı maddelerin ısıyı soğurması ve yaymasıyla ilgili ilk çalışmalara başlamıştır. Metal ve tahta gibi malzemelerin dokunuldukları zaman hissedilen soğukluk derecesine göre ısı yönünden iyi veya zayıf iletkenler olup olmadıklarını incelemeye başlamıştır. Fordyce [105] 1787 yılında mukavva ve demirin iletkenlik güçleriyle ilgili deneylerle bu alandaki çalışmalara öncülük etmiştir. Katıların ısı iletkenliklerinin ölçümlerinde ilk olarak kararlı hal mukayeseli ölçüm metodunu ortaya koyan Franklin olup çalışmaları geliştirerek devam ettiren ise 1789 yılında rapor edildiği üzere Ingen-Hausz'dur [106]. Despretz 1822 yılında bu metodu daha da geliştirmiştir [107]. Despert's'in bu metodu 1853 yılında Wiedeman ve Franz tarafından bazı metallerin ısı iletkenliklerinin tayininde kullanılmış ve Wiedemann-Franz kanunu olarak adlandırılmıştır [108]. Mutlak olarak ilk kararlı hal mutlak metod 1851 yılında Forbes [109-112] tarafından, ilk kararsız hal mutlak metodu ise 1861 yılında Angström [113] tarafından uygulanmıştır. O günlerden bu yana bir grup farklı metod ve onların çeşitleri yıllar geçtikçe geliştirilmiştir. Metodun deneysel gelişimi için birçok araştırma mevcuttur [114-124]. Metodların matematiksel teorileri birçok kitapta anlatılmıştır [124-129].

Lineer ısı akışı metodunda ısı akışının ölçümüne göre mutlak metot ve karşılaştırmalı metot arasında bir ayrım olmaktadır. Mutlak metotta, numunenin ucundaki ısıtıcıdan elektriksel güç girdisini ölçerek numunedeki ısı akış oranı doğrudan tayin edilir.

Numune dışındaki ısı akışı, akı kalorimetresi ve buharlaşma kaybı kalorimetresi ile ölçülebilir. Isı akış hızı, birinci metot kullanılarak bilinen ısı kapasitesine sahip su gibi dolanan sıvının sıcaklık artışı ve akış hızı vasıtasıyla tespit edilirken; ısı akış hızı ikinci metot kullanılarak ise, bilinen buharlaşma ısısına sahip su gibi bir sıvının buharlaşma kayıp hızı yani buharlaşma ısısı vasıtasıyla tespit edilir. Mukayeseli bir metotta ısı akış hızı, genelde aynı ısı akışının gerçekleşeceği ümit edilen numune ile seri olarak yerleştirilen bilinen bir ısıl iletkenliğe sahip bir referans örnek üzerindeki sıcaklık gradyentinden hesaplanır. Ayrıca yukarıda bahsedilen metotlar numune geometrilerine göre de alt başlıklara ayrılabilirler.

1.12.1.1. Kararlı hal metotları

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

A. Lineer Isı Akış Metotları

a. Mutlak Metotlar

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

b. Karşılaştırmalı Metotlar

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

1.12.1.1.1. Lineer ısı akış metotları

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

$$K = \frac{-q\Delta x}{A\Delta T} \quad (1.67)$$

yardımla elde edilir [130,131]. Burada K değeri $(1/2)(T_1+T_2)$ sıcaklığına karşılık gelen ortalama ısı iletkenlik katsayısı, $\Delta T = T_2 - T_1$, q ısı akış hızı, A numunenin kesit alanı ve Δx ise T_1 ve T_2 sıcaklıklarının ölçüldüğü noktalar arasındaki uzaklıktır.

1.12.1.1.1.1. Mutlak metotlar

1.12.1.1.1.1.1. Çubuk (rod) metodu

Bu metot iyi iletkenler ve çok yüksek sıcaklıklar haricindeki tüm sıcaklıklar için uygundur. Aslında bu metot oda sıcaklığının altındaki hemen hemen bütün ölçümlerde kullanılmaktadır. Kullanılan numune oldukça uzun bir çubuk şeklindedir. Bunun sebebi kesin ve doğru bir ölçüm için numune boyunca fark edilebilir bir sıcaklık düşüşü elde edebilmektir. Sabit sıcaklıktaki bir ısı kaynağı çubuğun bir ucuna uygulanır ve ısı, aksel olarak daha düşük sıcaklıktaki bir soğutucuya dokundurulan diğer uca doğru çubuk boyunca akar. Çubuğun radyal ısı alış verişini ihmal edilir. Eşitlik (1.67)' den ısı iletkenliği hesaplamak için çubuğun içine ve dışına doğru olan ısı akış hızının, kesit alanın, çubuk boyunca en azından iki noktadaki sıcaklıkların ve sıcaklık ölçümü yapılan noktalar arası uzaklığın ölçülmesi gereklidir.

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

Yüksek sıcaklıktaki ölçümlerde ısı kaybı çok ciddi bir problem haline gelir çünkü radyant (ısıma) ısı transferi sıcaklıkla hızla artar. Radyal ısı kaybını engellemek için kontrollü koruma ısıtıcısı ile birlikte numunenin etrafında koruma tüpü kullanılabilir. Yalıtım tozu genelde numune çubuğu ve koruma tüpü arasındaki boşlukları

doldurmakta kullanılır. Berget [132,133] 1887 yılında ısı kaybını engellemek için numune etrafında korumalı halka kullanmıştır.

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

Bu metot yüksek sıcaklıklardaki ölçümler için Laubitz [134] ve Flynn [135] tarafından etraflıca tartışılmış ve eleştirilmiştir. Isı kaybı etkileri, ısı temas dirençleri, ısı çiftlerinin zayıf temasları ve sıcaklık sürüklenmesi gibi nedenlerden kaynaklanan sistematik ölçüm hataları ise Bauerle tarafından analiz edilmiştir [136].

Bu metodun değişik bir şekli şu şekilde kullanılmıştır [137-139]. Çubuk numunenin merkezindeki boşluğa ısıtıcı yerleştirilmiştir. Ayrıca her iki ucuna da birer soğutucu yerleştirilmiştir. İki uca doğru oluşan ortalama sıcaklık gradyenti, ısı iletkenlik hesaplamalarında kullanılmıştır.

1.12.1.1.1.2. Levha (disk) metodu

Bu metot zayıf iletkenler örneğin yarıiletkenler için ve düşük iletkenliğe sahip malzemeler mesela sıkılaştırılmış metalik tozlar ve yalıtkanlar için uygundur. Çubuk metoduna benzer bir metottur. Fakat tek farkı numune boyutlarının küçük bir parça haline indirgenmiş olmasıdır. Bu numune geometrisi zayıf iletkenlerin ölçümleri için elverişlidir. Çünkü numunenin küçük olması ısı akışı sırasında daha az ısı kaybına sebep olur ve denge durumu daha kısa zamanda sağlanır. Farklı çeşitlerdeki maddeler için tasarlanmış cihazlarda kullanılan numunelerin boyutları çok çeşitlilik göstermektedir. Yarı iletkenleri ölçmek için yapılmış bir alette kullanılan numune 1 cm genişlikte [140] olabilirken, yalıtkanları veya ısıya dayanıklı maddeleri ölçmek için yapılmış alette kullanılan numune 30cm olabilir [141].

Bu metotta da ısı iletkenliği (1.67) denklemi ile elde edilir. Isı akış hızı, korumalı ısıtıcıya [141-143] elektriksel güç girdisiyle, korumalı su akış kalorimetresi ile [144], buhar kaybı kalorimetresiyle [145-148] ya da ısı akışı tespit cihazı [149] ile tayin edilebilir. Sıcaklık ölçümleri genelde test edilen malzemeye göre numunenin içerisine yerleştirilmiş veya numune yüzeyindeki boşluklara sıkıca monte edilmiş termal çiftlerle ölçülür. Yanal ısı kayıpları korumalı ısıtıcılar kullanılarak veya büyük bir numune üzerindeki küçük bir merkezi alanda çalışma yaparak engellenebilir.

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

1.12.1.1.1.2. Karşılaştırmalı metotlar

Kararlı hal karşılaştırmalı metodu ilk defa Franklin tarafından önerildi ve 1789 yılında Ingen-Hausz [106] tarafından geliştirildi. Bu metotta çubuk şeklinde farklı metaller balmumuyla kaplandı ve hepsi tek taraflı uçlarından sıcak su veya yağ içine konarak ortak bir sıcaklığa getirildi. İyi iletken maddelerde balmumu, daha az iletken maddelere göre çubuk üzerinde çok fazla bir mesafeye kadar eridi. İşte geçmişte yapılan bu deneyde kararlı-hal durumunda çubukların iletkenlik oranının bu mesafenin karesiyle doğru orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. Günümüzde modern karşılaştırmalı metotlar; bölünmüş çubuk metodu ve karşılaştırmalı levha metodu olarak iki şekilde incelenir.

1.12.1.1.1.2.1. Bölünmüş çubuk metodu

Bu metot ilk defa 1878 yılında Lodge [150] tarafından uygulanmış ve sonra Berget [151], Lees [152] ve birçok bilim adamı tarafından da kullanılmıştır. Isı iletkenliği bilinen bir ya da birden fazla referans numune ile ısı iletkenliği bilinmeyen bir numune ard arda yerleştirilir. Hem referans numunesi hem de ısı iletkenliği bilinmeyen numune boyunca aynı ısı akış hızının olduğu kabul edilir. Bu ideal şartlar altında numunenin ısı iletkenliği (1.68) denklemi ile verilir.

$$K = k_r \frac{A_r (\Delta T / \Delta x)_r}{A (\Delta T / \Delta x)} \quad (1.68)$$

Burada r alt indisi referans numunesini belirtmektedir. Bu metot kendi içerisinde iki farklı gruba bölünebilir. Bunlar iyi iletkenlerin ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan uzun-numune çubuk metodu [151,153,154] ve zayıf iletkenlerin ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan kısa-numune çubuk metodu [150,152,155-158] şeklindedir. Karşılaştırmalı metotlar diğerlerine göre daha basit cihazlarla işlem yapabilme, numunenin kolay hazırlanması ve kolay işlem yapabilme özelliklerinden dolayı oldukça avantajlı metotlardır. Dezavantajları arasında ısı çift aralıkları belirlemeden dolayı oluşan ölçüm hataları, referans örneğin iletkenliğindeki belirsizlik ve numune ile referans örnek arasındaki iletkenlik uyumsuzluğu bulunmaktadır. Flynn [135] bölünmüş çubuk metodunun iyi tasarlanmadığını ve bu metotla elde edilen verilerin büyük hatalara yol açabileceğini vurgulamıştır.

1.12.1.1.1.2.2. Levha (disk) metodu

Bu karşılaştırmalı metot zayıf iletkenler ve yalıtkanlar için uygun bir ölçüm metotudur. Genel olarak bölünmüş çubuk metoduna ilke olarak benzerlik gösterir. Fakat burada referans ve ölçüm yapılacak numune düz levhalar (veya diskler) şeklinde sıcak ve soğuk plakalar arasında bulunmaktadır. Christiansen [159] 1881 yılında bu metodu ilk defa kullanarak sıvılar ile havanın ısı iletkenliklerini karşılaştırmıştır. Peirce ve Willson [160] bu metodu, karşılaştırmada cam plakaları referans malzeme olarak, mermer levhaların ısı iletkenliğini ölçmek için kullanmıştır. Sieg [161] ise cihazın yanıl ısı kaybını önlemek için koruma halkasını kullanmıştır.

1.12.1.1.1.2.3. Bileşik metot

Bileşik metot ile hem mutlak hem de karşılaştırmalı metotların özellikleri birleştirilir. Bu metotta referans numunesi ile ölçüm yapılacak numune seri olarak yerleştirilir ve eş zamanlı olarak su akış kalorimetresi [162-164] ile veya ısıtıcının elektrik gücünün ölçülmesiyle ısı akış hızı tayin edilebilir.

1.12.2. Malzemelerde ısı iletkenliği

Metallerde ısı iletimi fononlarla ve elektronlarla sağlanır. Kovalent bağlı ve iyonik bağlı cisimlerde serbest elektron bulunmadığından ısı yalnız fononlarla iletilir. Metallerde en

etkili ısı iletkenlik serbest elektron hareketi ile sağlanır. Yukarıda belirtildiği gibi ısı enerji etkisinde hareket eden elektronlar Fermi seviyesi üstüne çıkarak serbest hale geçer ve sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareket ederek ısı enerji iletirler. (1.62) denkleminde göre elektronların ısı iletkenliği,

$$K_e = \frac{1}{3} C_e l_e v_e \quad (1.69)$$

ile verilir. Benzer şekilde fononların sağladığı iletkenlik,

$$K_f = \frac{1}{3} C_f l_f v_f \quad (1.70)$$

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

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

Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı küçük olduğundan, elektronlar kolaylıkla üst banda geçebilirler ve fononların yanında ısı iletimine önemli katkıda bulunurlar. Bu tür malzemelerin ısı iletkenliği sıcaklıkla artar [102].

Isı iletkenliği yüksek olan bir malzeme sıklıkla yüksek bir elektriksel iletkenliğe sahiptir ve metallerin ısı iletimi iyidir. Bu kuralın istisnası elmadır çünkü çok yüksek bir ısı iletkenliğe sahip olmasına rağmen elektriksel iletkenliği düşüktür. Elmanın ısı iletkenliğinin yüksek olduğu dokunulduğunda soğuk hissedilmesinden de anlaşılabilir. En iyi ısı iletken malzemeler sırasıyla elmas, karbon nanotüpler, gümüş, bakır ve altındır. Bu malzemelere kıyasla çok zayıf ısı iletken malzemelere cam, su ve hava örnek olarak

verilebilir. Elmasın yüksek ısı iletkenliğinden hareketle basit aletler kullanılarak gerçeği sahtesinden ayırt edilebilir [165].

1.13. Ötektik Katılaştırma Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Ötektik katılma olayını açıklayabilmek, mikroyapı parametresi (λ_E) ile katılaştırma parametresi (V) arasındaki ilişkileri bulabilmek için, araştırmacılar tarafından teorik modeller geliştirilmiş ve birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu kesimde bazı ikili ve üçlü ötektik alaşımlar üzerine yapılan katılaştırma çalışmaları, katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametresi, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç değeri arasındaki ilişki-bağıntılar ve bazı alaşımlar için ölçülen ısı iletkenlik değeri verilmiştir.

1.13.1. $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ Tipindeki Bağntılar

Jackson-Hunt [31] modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ bağıntısı var olan teorik modellerin en çok kullanılan bağıntısı olup lamelsel veya rod şeklinde büyüyen alaşımlarda kullanılır. Bu bağıntı birçok ikili ötektik alaşımın farklı metotlarla farklı hızlardaki kontrollü büyütmesi için test edilmiş ve büyük bir uyum tespit edilmiştir. Son yıllarda katılaştırma çalışmaları üç veya daha fazla bileşenli sistemler üzerine yoğunlaşmaya başlamış olup bu sistemler içinde Jackson-Hunt [31] modeli test edilmiştir. Bu bağıntı kullanılarak elde edilen sonuçlar [40,91,166-179] Tablo 1.4'te gösterilmektedir.

1.13.2. $\lambda = kV^n$ ve $\lambda = kG^m$ Tipindeki Bağntılar

Jackson-Hunt [31] modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ bağıntısının bir başka gösterimi olarak tanımlanabilir. Bu ifadeler deneysel verilerin lineer regresyon analizi ile elde edilebilir. Burada k , korelasyon sabiti n ve m ise büyüme hızının üstel değeri'dir. Jackson-Hunt [31] modeli $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ bağıntısından da anlaşılacağı üzere n değeri teorik 0,50 tanımlamışlardır. Araştırmacılar sıcaklık gradyentinin katılaştırma hızına göre mikroyapı parametresi üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle bu tez çalışmasında yalnızca katılaştırma hızının değişiminin mikroyapı parametresi nasıl etkilediği üzerinde durulmuştur. Bu tür bağıntılar kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 1.4'te gösterilmektedir.

Tablo 1.4. Ötektik katılaştırma üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar.

Alaşım	$\lambda^2 V$	$\lambda = kV^{-n}$	Referans
Al-33Cu (% ağı.)	$\lambda^2 V = 156.0 \mu\text{m}^3/\text{s}$	$\lambda = 22.10 V^{-0.39}$	[166]
Zn-7Al-4Cu (% ağı.)	-	$\lambda_{\text{Zn-Al}} = 5.49 V^{-0.42}$ $\lambda_{\text{CuZn}_4} = 35.48 V^{-0.56}$	[167]
Al-13Si (% ağı.)	-	$\lambda = 27 V^{-0.53}$	[168]
Al-1.7Fe (% ağı.)	-	$\lambda = 1.93 \times 10^{-5} V^{0.62}$	[169]
Al-5.7Ni (% ağı.)	$\lambda^2 V = 101.80 \mu\text{m}^3/\text{s}$ $\lambda^2 V = 129.28 \mu\text{m}^3/\text{s}$	$\lambda = 10.76 V^{-0.50}$ $\lambda = 11.61 V^{-0.51}$	[170]
Al-12.6Si (% ağı.)	$\lambda^2 V = 784.98 \mu\text{m}^3/\text{s}$	-	[171]
Al-42.2Nb (% at.)	$\lambda^2 V = 4.19 \times 10^{-7} \text{cm}^3/\text{h}$	-	[172]
Al-10.9Si-4.9Ni (% at.)	-	$\lambda = 0.114 R^{-0.46}$	[166]
Al-3.7Ni-1.5Fe (% ağı.)	$\lambda^2 V = 100 \mu\text{m}^3/\text{s}$ $\lambda^2 V = 7000 \mu\text{m}^3/\text{s}$	-	[40]
Al-11.1Si-4.2Ni (% ağı.)	$\lambda_{\text{Si}}^2 V = 170.52 \mu\text{m}^3/\text{s}$ $\lambda_{\text{Al}_3\text{Ni}}^2 V = 82.01 \mu\text{m}^3/\text{s}$	$\lambda_{\text{Si}} = 12.58 V^{-0.50}$ $\lambda_{\text{Al}_3\text{Ni}} = 7.94 V^{-0.47}$	[173]
Al-30Cu-6 Mg (% ağı.)	$\lambda_{\text{Al}_2\text{CuMg}}^2 V = 93.02 \mu\text{m}^3/\text{s}$ $\lambda_{\text{Al}_2\text{Cu}}^2 V = 195.76 \mu\text{m}^3/\text{s}$	$\lambda_{\text{Al}_2\text{CuMg}} = 3.05 V^{-0.31}$ $\lambda_{\text{Al}_2\text{Cu}} = 6.35 V^{-0.35}$	[174]
Al-17.6Cu-42.2Ag (% ağı.)	$\lambda_{\alpha}^2 V = 131.86 \mu\text{m}^3/\text{s}$ $\lambda_{\beta}^2 V = 28.16 \mu\text{m}^3/\text{s}$ $\lambda_{\gamma}^2 V = 25.52 \mu\text{m}^3/\text{s}$	$\lambda_{\alpha} = 11.22 V^{-0.49}$ $\lambda_{\beta} = 5.21 V^{-0.50}$ $\lambda_{\gamma} = 5.12 V^{-0.50}$	[175]
Al-6.5Ni-1.5Fe (% ağı.)	-	$\lambda_{\text{Al}_3\text{Ni}} = 10.80 V^{-0.53}$ $\lambda_{\text{Al}_9\text{NiFe}} = 40.40 V^{-0.48}$	[176]
Zn-5 Al (% ağı.)	$\lambda^2 V = 69.05 \mu\text{m}^3/\text{s}$	$\lambda = 9.21 V^{-0.53}$	[177]
Ti-49Al (% at.)	-	$\lambda_L = 5.82^{-0.41}$	[178]
Ti-43Al-3Si (% at.)	-	$\lambda = 650.1 V^{-0.44}$ $\lambda_L = 13.2 V^{-0.41}$ $f_v = 16.6 V^{-0.17}$	[91]
Al-12.95Si-4.96Mg (% ağı.)	$\lambda_{\text{Si}}^2 V = 847.69 \mu\text{m}^3/\text{s}$ $\lambda_{\text{Mg}_2\text{Si}}^2 V = 597.5 \mu\text{m}^3/\text{s}$	$\lambda_{\text{Si}} = 29.32 V^{-0.45}$ $\lambda_{\text{Mg}_2\text{Si}} = 19.86 V^{-0.44}$	[179]

1.14. Metalik Alaşımların Mikrosertliklerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Tablo 1.5. Mikrosertlik üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar.

Alaşım	Mikrosertlik	Referans
Al-33Cu (% ağı.)	$HV = 234.05 V^{0.06}$	[95]
Al-1Fe (% ağı.)	$HV = 31 + 13.1\lambda^{-0.5}$	[88]
Al-1.5Fe (% ağı.)	$HV = 31 + 33.1\lambda^{-0.5}$	
Al-3Ni (% ağı.)	$HV = 27 + 104.1\lambda^{-0.5}$	
Al-5Ni (ağı.%)	$HV = 44.8 + 52.3\lambda^{-0.5}$	
	$HV = 66.1V^{0.11}$	[180]
Al-7Ni (% ağı.)	$HV = 309.0(\lambda_1)^{-0.35}$	
	$HV = 114.8(\lambda_2)^{-0.24}$	[89]
Al-12Si (% ağı.)	$HV = H_o + KV^{-0.12}$	
Al-14.6Si (% ağı.)	$HV = 82.79V^{0.11}$	[181]
Al-12.6Si (% ağı.)	$HV = 141 + 1.9\lambda^{-0.5}$	[90]
Zn-3.1 Mg (% ağı.)	$HV = 61 + 0.46\lambda^{-0.5}$	
Zn-5 Al (% ağı.)	$HV = k_1 V^{0.10}$	[182]
Al-17.6 Cu-42.2 Ag (% ağı.)	$HV = k_2 G^{0.13}$	
	$HV = k_3 \lambda^{-0.22}$	
	$HV = 363.1V^{0.10}$	[91]
Ti-43Al-3Si (% at.)	$HV = 257.5 + 0.44\lambda_L^{-0.5}$	
	$HV = 1288.2\lambda^{-0.19}$	
	$HV = 1318.3f_v^{-0.44}$	[178]
Ti-49Al (% at.)	$HV = 313.9V^{0.16}$	
	$HV = 615.6\lambda^{-0.36}$	
	$HV = 794.7V^{0.15}$	[87]
Ti-46 Al-0.5 W-0.5 Si (% at.)	$HV = 398.1\lambda_1^{-0.31}$	
	$HV = 491.5 + 53.4\lambda^{-0.5}$	[177]
Zn-5 Al (% ağı.)	$HV = 14.45\lambda^{-0.24}$	
	$HV = 115.64V^{0.13}$	[167]
Zn-7Al-4Cu (% ağı.)	$HV = 67.60V^{0.07}$	
Al-5.7Ni (% ağı.)	$HV = 66.13 V^{0.10}$	[170]
Al-23.9Cu-1.2Co (% ağı.)	$HV = 184.07 V^{0.05}$	[183]
Al-11.1Si-4.2Ni (% ağı.)	$HV = 72.44V^{0.08}$	[97]
Al-12.95Si-4.96Mg (% ağı.)	$HV = 119.90 V^{0.07}$	[179]
Al-6.5Ni-1.5Fe (% ağı.)	$HV = 42.54 V^{0.07}$	[176]

1.15. Metalik Alaşımların Çekme-Dayanımlarının Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Tablo 1.6. Çekme-dayanım üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar.

Alaşım	Çekme-Dayanım(N/mm ²)	Referans
Al-1.5Fe (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 62.8 + 98.3(\lambda_{\text{C}})^{-0.5}$	[92]
Al- 1.0Fe (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 60.2 + 90.5(\lambda_{\text{C}})^{-0.5}$	
Al- 0.5Fe (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 57.6 + 65.4(\lambda_{\text{C}})^{-0.5}$	
Al- 1Ni (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 71.3 + 200.2(\lambda_1)^{-0.5}$	[93]
	$\sigma_{\text{Ç}} = 52.3 + 188.3(\lambda_2)^{-0.5}$	
Al- 3Ni (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 73.2 + 325.6(\lambda_1)^{-0.5}$	
	$\sigma_{\text{Ç}} = 57.5 + 221.7(\lambda_2)^{-0.5}$	
Al- 5Ni (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 74.1 + 468.5(\lambda_1)^{-0.5}$	
	$\sigma_{\text{Ç}} = 58.3 + 228.6(\lambda_2)^{-0.5}$	
Al- 5Si (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 93 + 45(1/\lambda_2)^{0.5}$	[94]
Al- 9Si (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 111 + 146(1/\lambda_2)^{0.5}$	
Al-33Cu (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 194.08 V^{0.08}$	[95]
Zn-3Al (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 114 + 185(1/\lambda_2)^{0.5}$	[96]
Zn- 4 Al (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 97 + 289(1/\lambda_2)^{0.5}$	
Al-11.1Si-4.2Ni (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 37.15 V^{0.19}$	[97]
Al-30Cu-6Mg (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 480.6 V^{0.14}$	[174]
Al-6.5Ni-1.5Fe (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 105.15 V^{0.14}$	[176]
Al-12.95Si-4.96Mg (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 222.84 V^{0.20}$	[179]
Zn-7Al-4Cu (% ağı.)	$\sigma_{\text{Ç}} = 123.02 V^{0.16}$	[167]

1.16. Metalik Alaşımların Elektriksel Özdirençlerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Tablo 1.7. Elektriksel özdirenç ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar.

Alaşım	Sıcaklık aralığı °C	Elektriksel Özdirenç ($\times 10^{-8} \Omega m$)	Referans
Al-5Si (% ağı.)	25-550	3.85 – 11.14	
Al-7Si (% ağı.)	25-550	4.17 - 12.22	
Al-9Si (% ağı.)	25-550	3.89 – 11.77	
Al-12Si (% ağı.)	25-550	4.25 - 12.44	
Al-5Si-0.6Mg (% ağı.)	25-550	4.10 -11.25	
Al-7Si-0.6Mg (% ağı.)	25-550	4.43 - 12.42	
Al-9Si-0.6Mg (% ağı.)	25-550	4.42 - 12.75	
Al-12Si-0.3Mg (% ağı.)	25-550	4.87 - 13.40	[184]
Al-12Si0.6Mg (% ağı.)	25-550	5.20 - 14.27	
Al-6Si-1Cu (% ağı.)	25-500	5.17 - 11.63	
Al-6Si-3Cu (% ağı.)	25-500	5.61 - 12.55	
Al-9Si-1Cu (% ağı.)	25-500	5.36 - 12.64	
Al-9Si-2Cu (% ağı.)	25-500	5.57 -12.77	
Al-9Si-3Cu (% ağı.)	25-500	5.73 - 13.03	
Al-11Si-1Cu (% ağı.)	25-500	5.55 - 13.16	
Al-11Si-3Cu (% ağı.)	25-500	5.95 - 13.49	
Sn-3Cu (% ağı.)	25-250	9.87 - 21.02	[185]
Pb-25Sn (% ağı.)	25-110	28 - 40.5	[186]
Sn-0.7Cu (% ağı.)		11.14	
Sn-0.7Cu-0.5Zn (% ağı.)		13.05	[187]
Sn-0.7Cu-0.5Bi (% ağı.)		15.68	
Al-11.1Si-4.2Ni (% ağı.)	25	$\rho = 4.57 V^{0.08}$	[97]
Al-5.7Ni (% ağı.)	25	$\rho = 1360 V^{0.07}$	[170]
Al-30Cu-6Mg (% ağı.)	25	$\rho = 28.82 V^{0.11}$	[174]
Al-6.5Ni-1.5Fe (% ağı.)	25	$\rho = 4.13 V^{0.08}$	[176]
Al-12.95Si-4.96Mg (% ağı.)	25	$\rho = 32.31 V^{0.13}$	[179]
Al-23.9Cu-1.2Co (% ağı.)	25	$\rho = 8.6 V^{0.09}$	[183]

1.17. Metalik Alaşımların Isıl İletkenliklerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Tablo 1.8. Metalik alaşımların ısı iletkenlik değeri (W/Km)

Sistem	Alaşımlar	Sıcaklık	Isıl İletkenlik	Ref.
		(K)	(W/Km)	
BiSnAg	Bi-%42.73 ağı. Sn-% 1.03 ağı. Ag	313	25.03	[188]
		333	24.97	
		353	24.58	
		373	23.92	
		393	22.54	
SnAgCu	Sn-%3.5 ağı. Ag-% 0.9 ağı. Cu	313	59.41	
		333	57.57	
		353	57.42	
		373	56.66	
		393	55.64	
		413	53.58	
		433	52.42	
		453	51.96	
InSnAg	In-%48.4 ağı. Sn-% 2.31 ağı. Ag	473	50.52	
		313	77.76	
		333	75.31	
		353	74.72	
SnBiCu	Sn-%42.8 ağı. Bi-%0.04 ağı. Cu	373	71.29	
		313	27.66	
		333	26.00	
		353	24.83	
		373	23.31	
SnSbAg	Sn-%6 ağı. Sb-%5 ağı. Ag	393	21.26	
		313	55.01	
		333	54.91	
		353	53.55	
		373	52.16	
		393	51.50	
		413	49.36	
		433	48.16	
		453	46.02	
Sn-Ag	Sn-%10 ağı. Ag	473	45.65	[189]
		493	42.26	
		313	64.86	
		333	63.94	

Tablo 1.8.'in devamı

	Sn-%10 ağı. Ag	353	63.19	[189]
		373	62.59	
		393	61.95	
		413	59.78	
		433	58.17	
		453	56.75	
Sn-In	Sn-%10 ağı. In	313	80.33	
		333	77.84	
		353	75.44	
		373	74.98	
Sn-Bi	Sn-%10 ağı. Bi	313	38.14	
		333	37.70	
		353	36.56	
		373	35.77	
		393	35.64	
Sn-Cu	Sn-%10 ağı. Cu	313	75.51	
		333	74.15	
		353	73.39	
		373	71.97	
		393	70.69	
		413	69.69	
		433	68.86	
Sn-Sb	Sn-%10 ağı. Sb	453	67.24	
		473	66.01	
		313	70.03	
		333	69.36	
		353	67.51	
		373	65.55	
		393	64.25	
		413	62.79	
		433	60.49	
Sn-Zn	Sn-%10 ağı. Zn	453	59.94	
		473	59.12	
		493	58.84	
		313	62.13	
		333	61.35	
		353	60.40	
		373	59.53	
		393	58.34	
		413	58.10	
		433	57.08	
		453	56.74	

Tablo 1.8.'in devamı

Sn-Bi-In	In-%21.23 at. Bi-%19.04 at. Sn	332.15	29.24	[190]
	Sn-%40.14at. In-%16.11at. Bi	332.15	31.56	[190]
Sn-Pb	Sn-%26.1 at. Pb	456	40.1	[191]
Sn-Sb	Sn-%7.8 at. Sb	518.65	40.50	[192]
	Sn-%41.4 at. Sb	518.65	31.98	[193]
	Sn-%5 at. Sb	518.65	43	[193]
Sn-Zn	Sn-%8.9 ağı. Zn	472	35.74	[194]
Bi-Cd	Bi-%39.7ağı. Cd	413	12.46	[195]
Zn-Cu	Zn-%2.83 at. Cu	695.65	141.6	[196]
	Zn-%12 at. Cu	695.65	136.3	[196]
Bi-Cd	Bi-%54.6 at. Cd	413	12.46	[197]
Al-Zn	Al-%95 ağı. Zn	653	122	[198]
	Al-%84 ağı. Zn	653	133	[198]
	Al-%31.94 at. Cu	821	108.7	[199]
Al-Cu	Al-%3 ağı. Cu	821	143.1	
	Al-% 6 ağı. Cu	821	130.7	
	Al-%15 ağı. Cu	821	116.3	[200]
	Al-%24 ağı. Cu	821	113.1	
	Al-% 33 ağı. Cu	821	111.7	
	Al-%52.5 ağı. Cu	821	107.9	
Al-Cu-Ag	Al-%32.21 at. Cu-% 0.04 at. Ag	775.09	110.64	[201]
		799.35	112.25	[202]
In-Bi	In-%12.4 at. Bi	345.15	32.82	[203]
	In-%33.2 at. Bi	345.15	25.21	[203]
Sn-Cu	Sn-%1.3 at. Cu	500.15	58.90	[196]
Pb-Sb	Pb-%17.5 at. Sb	525.15	26.8	[204]
	Pb-%5.8 at. Sb	525.15	28.7	[204]
Sn-Ag-In	Sn-%4.4 at. Ag-%2.1 at. In	490.65	62.50	[205]
	Ag-%23.7 at. Sn-% 2.1 at. In	490.65	44.48	[205]
Zn-Cd	Zn-%1.3 ağı. Cd	539	77	[206]
	Sn-% 0.09 at. Ag	494	57.70	[207]
		323	89	
		343	86	
		363	83	
		383	82	
	Sn-% 1.5 ağı. Ag	403	77	[208]
		423	75	
		443	72	
		463	70	
		483	69	
	Sn-% 3.5 ağı. Ag	323	98	

Tablo 1.8.'in devamı

Sn-Ag		343	97	[208]
		363	96	
		383	92	
	Sn-%3.5 ağı. Ag	403	90	
		423	90	
		443	89	
		463	87	
		483	84	
		483	84	
	Sn-%3.84 at. Ag	494	83.70	
Sn-In	Sn-%25.63 at. In	391.5	65.90	
Sn-Cu	Sn-% 1.30 at. Cu	500.15	58.90	[209]
Sn-Pb	Sn-%1.45 at. Pb	456	52.30	
	Sn-%26.1 at. Pb	456	40.10	
Sn-Zn	Sn-% 1.0 ağı. Zn	300	79.00	[210]
		500	66.00	
		300	88.34	
	Sn-% 8.9 ağı. Zn	500	72.48	
	Sn-% 15 at. Zn	199	35.74	[211]
	Sn-%2 at. Zn	199	52.60	
Cd-Sn	Cd-%2.5 ağı. Sn	300	34.17	[212]
		500	22.60	
	Cd-%22.5 ağı. Sn	300	37.79	
		500	25.58	
	Cd-%33.5 ağı. Sn	300	41.90	
		500	28.00	
	Cd-%88.0 ağı. Sn	300	46.37	
		500	30.17	
	Cd-%5 at. Zn	373	96.62	
		533	85.28	
	Cd-%26.5 at. Zn	373	91.00	
		533	81.53	
Zn-Cd	Zn-%1.3 at. Cd	373	86.20	[213]
		533	76.94	
Sn-Pb	Sn-%30 ağı. Pb	183–192	50.0	[214]
	Sn-%40 ağı. Pb	183–188	50.0	
Sn-Pb-Ag	Sn-%36 ağı. Pb-%2 ağı. Ag	177–189	50.0	
Zn-Bi-Al		373	46.00	[215]
	Zn-%41.58 ağı. Bi- %0.6ağı. Al	423	44.46	
		473	42.14	
		523	40.59	
Sn-Al-Cu	Sn-%30 ağı. Al- %15ağı. Cu	373	105.25	

Tablo 1.8.'in devamı

Sn-%30 ağ. Al- %15ağ. Cu	423	102.96	[215]
	473	102.08	
	523	101.26	
	573	98.99	
	623	96.89	
	673	94.35	
	723	91.12	
	773	90.78	

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalar neticesinde katılaştırma hızı ile mikroyapı parametresi, mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel öz direnç değerleri arasında farklı bağıntılar elde edildiği, aynı zamanda ısı iletkenlik değerleri için de sadece alaşım sistemlerinde katılaştırma yapmadan sıcaklığa bağlı olarak değişiminin ölçüldüğü görülmektedir. Yapılan bu deneysel çalışmaların tamamında mikroyapı parametresinin azalış ya da büyütme hızının artmasıyla mikrosertlik ve çekme-dayanım değerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametresi arasında belirgin bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Fakat literatürde var olan araştırmalarda elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değerleri için katılaştırma hızına bağlı bir sonuç çıkarmak mümkün değildir. Bu tez çalışmasının amaçlarından biri de elde edilen fiziksel özelliklerin katılaştırma hızına bağlı olarak nasıl değişim sergilediğini göstermektir. Ayrıca bu çalışmaların çoğunda metalik malzemelerin katılaştırılmasında “Bridgman tipi” kontrollü katılaştırma fırını kullanılmış ve numuneler düşey doğrultuda katılaştırılmıştır.

Bir sonraki bölümde ise katılaştırma çalışmalarının gerçekleştirilmesinde kullanılan deney sistemi, kontrollü bir katılaştırma deneyinin yapılışının tüm aşamaları ve ayrıca, mikrosertlik, çekme-dayanımı, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değerlerinin ölçümünde kullanılan cihaz ve sistemler ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2. BÖLÜM

DENEYSEL SİSTEMLER VE BİR DENEYİN YAPILIŞI

Bu çalışmada, Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemleri, sekiz farklı hızda katılaştırılmış ve katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik üzerine etkilerini araştırılıp aralarındaki bağıntılar belirlenmiştir. Böylece ele alınan ötektik alaşım sistemlerinin birçok fiziksel özelliği bir bütün olarak tanımlanmıştır.

Bu bağlamda katılaştırma çalışmalarının gerçekleştirilmesinde kullanılan deney sistemi ve bir kontrollü katılaştırma deneyinin yapılışının tüm aşamaları ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.1. DeneySEL Sistem

Bu tez çalışmasında üç ayrı fırın (vakumlu eritme fırını, döküm fırını ve kontrollü katılaştırma fırını) kullanılmıştır. Bu kesimde, deneylerde kullanılan bu fırınlar ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.1.1. Vakumlu Eritme Fırını

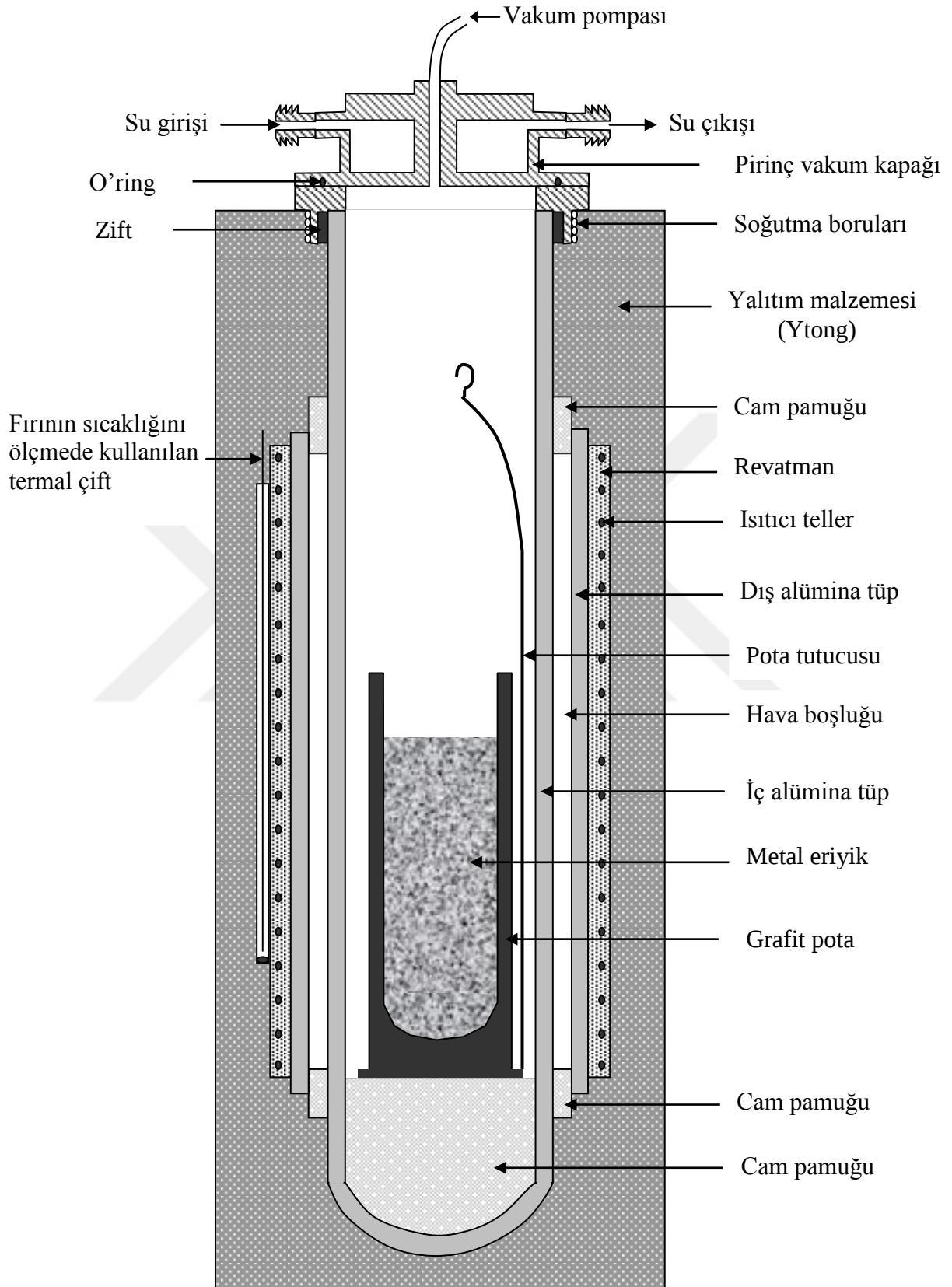
Bu fırın alaşım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Vakumlu eritme fırınının fotoğrafı Şekil 2.1’de verilmiştir. Şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilen vakumlu eritme fırını, iç içe geçmiş iki alümina tüp, vakum pompası, sıcaklık kontrolcüsü, sabit güç vermekte kullanılan varyak ve soğutma sisteminden oluşmaktadır.

İçteki alümina tüpün iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 700 mm olup bir ucu kapalıdır. Bu alümina tüpün içinde vakumlu ortam sağlanır. Dış alümina tüpün ebatları

ise 80 mm × 90 mm × 500 mm olup her iki ucu da açıktır. Dış alümina tüpün etrafına 1.2 mm kalınlığındaki *Kanthal A1* telinden (FeCrAl alaşımından yapılmış tel) 80 sarım sarılmıştır. Isıtıcı telin toplam direnci 28.1 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde, tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Revatman ısındıkça sertleşen iyi bir yalıtım malzemesidir. Fırının ısı kaybını önlemek için alümina tüplerin etrafına gaz beton (Ytong) tuğlası yerleştirilmiştir. Vakumlu ortam oluşturabilmek için bir ucu kapalı alümina tüpün açık ucuna vakum pompasını bağlayacak şekilde pirinçten bir soğutma sistemi yapılmıştır. Vakumlama esnasında hava sızmaması için iç alümina tüp ile pirinç soğutma sisteminin arası zift ile yalıtılmıştır. Fırın ısıtıldığında ziftin erimemesi için ise soğutma sisteminden sürekli su dolandırılmaktadır. Fırının sıcaklığı sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. Vakumlu eritme fırını 1100 °C'ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Eritme işlemi vakum pompası yardımıyla 10^{-3} mbar basınç altında yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Vakumlu eritme fırınının fotoğrafı.



Şekil 2.2. Vakumlu eritme fırınının şematik gösterimi.

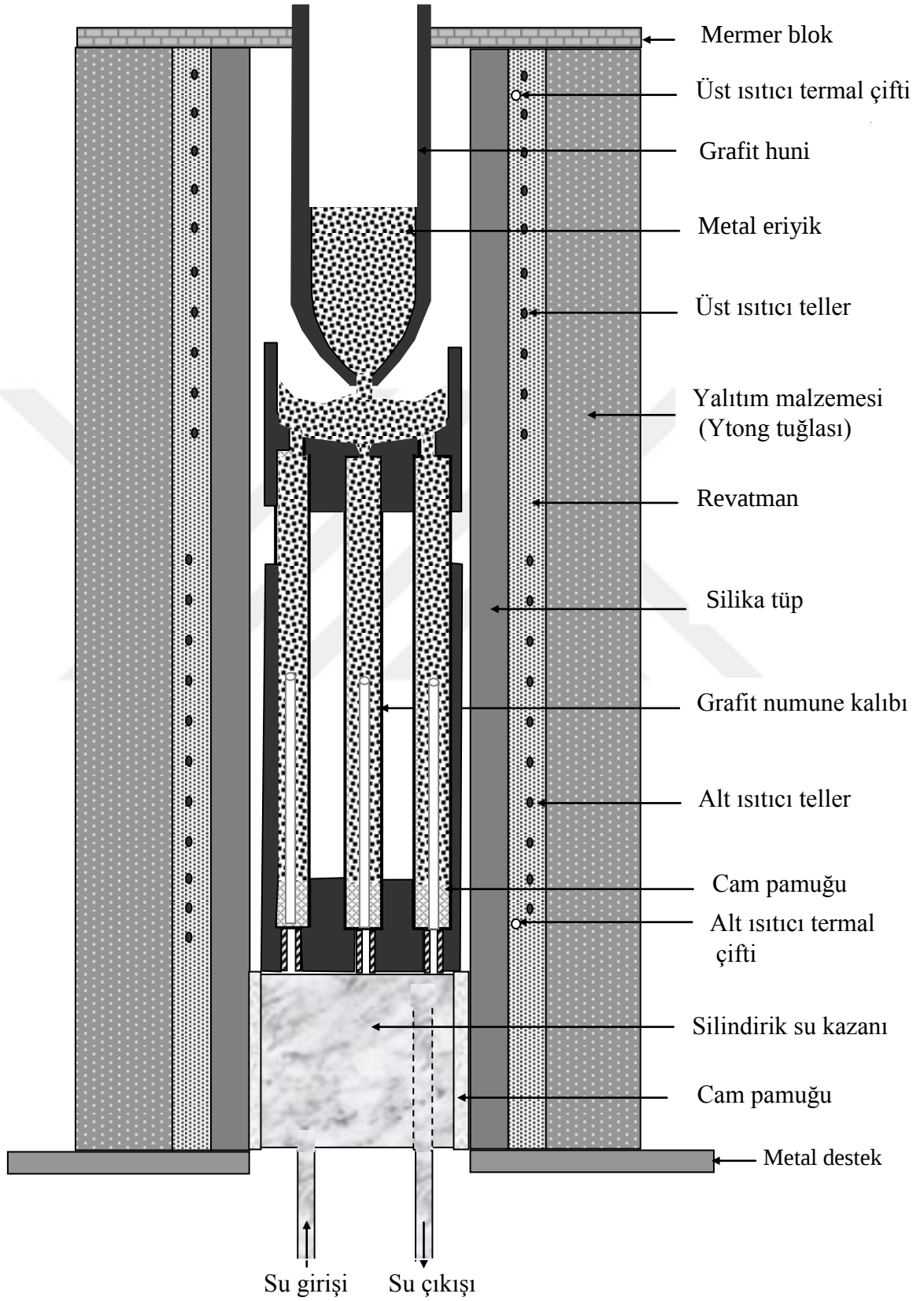
2.1.2. Döküm Fırını

Döküm fırını, eriyik haldeki alaşımın özel numune kalıbı içerisine dökümünün yapılması ve alaşımın kalıp içerisinde tek yönlü (doğrusal) olarak katılaştırılması için kullanılmaktadır. Dökümü yapılan numuneler içerisinde hava boşluğunun kalmaması ve numunelerin tamamen dolması için tek yönlü katılaştırma amacıyla kullanılan döküm fırınının fotoğrafı Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Döküm fırınının fotoğrafı.

Döküm fırını; iki ucu açık alümina, alt ısıtıcı, üst ısıtıcı ve soğutma kazanından oluşmaktadır. İç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 750 mm olan alümina tüpün etrafındaki farklı iki bölgeye ısıtıcı teller sarılarak birbirinden bağımsız iki ısıtıcı bölge oluşturulmuştur. Isıtıcı tel olarak 1.2 mm kalınlığında *Kanthal A1* teli kullanılmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların dirençleri sırasıyla 16.675 Ω ve 9.725 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için ısıtıcıya yakın mesafelere iki adet yalıtılmış *K*-tipi termal çift yerleştirilmiştir. Alümina tüpün alt tarafına 40 mm çapında ve 160 mm uzunluğunda silindirik bir su kazanı yerleştirilmiştir. Alümina tüpün etrafı ise ısı yalıtımı amacıyla gaz beton (Ytong) tuğlası ile kaplanmıştır. Döküm fırını 1100 °C’ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Döküm fırınının şematik gösterimi Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4. Döküm fırınının şematik gösterimi.

2.1.3. Kontrollü Katılaştırma Fırını

Kristal büyütme çalışmalarının yaklaşık % 40'ı Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını ile yapılmaktadır. Özellikle mühendislik alanında gerilime dayanıklı malzeme üretiminde bu fırınlardan yaygın olarak yararlanılmaktadır [5]. Sıcak döküm fırınında elde edilen numunelerin, değişik sıcaklık gradyenti ve hızlarda katılaştırılması, kontrollü katılaştırma fırını yardımıyla yapılmaktadır.

Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilen kontrollü katılaştırma fırınında, değişik katılma hızları elde etmek için kullanılan motor bağlantılı bir sürücü sistem, farklı sıcaklık gradyenti oluşturmak için kullanılan ısıtıcı ve soğutucu sistemler bulunmaktadır. Bu fırında numune tutucusuna yerleştirilen numuneler, sürücü sistem vasıtasıyla sıcak bölgeden soğuk bölgeye çekilirken, kalıp içerisindeki sıvı alaşım, en alt kısımdan başlayarak katılaşmakta ve katı-sıvı arayüzeyi yukarı yönde ilerlemektedir.

Kontrollü katılaştırma fırını 1100 °C sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir. Ayrıca bu fırına takılan numune içerisinde 10 ile 100 °C/cm arasında bir sıcaklık gradyenti elde edilebilmektedir. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını başlıca *ısıtıcı sistem*, *soğutucu sistem* ve *sürücü sistem* olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Şimdi bu kısımları detaylı bir şekilde inceleyelim.

2.1.3.1. Isıtıcı Sistem

Isıtıcı sistem, yüksek sıcaklıklara dayanıklı iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm, uzunluğu 800 mm olan iki ucu açık alümina tüp etrafına 1 mm çapında, toplam direnci 25 Ω olan Cr-Ni tel 300 mm sarılarak yapılmıştır. Alümina tüpün iki ucuna pirinçten yapılmış dairesel kesitli kaideler geçirilmiştir. Alümina tüp ile pirinç kaideler arasındaki boşluk 180 °C'ye dayanıklı zift (black wax) ile doldurulmuş ve böylece numunenin argon atmosferinde kalması sağlanmıştır. Dolgu ziftinin aşırı ısınmasını önlemek ve pirinç kaideyi soğuk tutmak için kaidelerin içerisinden sürekli su dolanımı yapılmıştır. Fırının sıcaklığını kontrol etmek için 0.5 mm çapında yalıtılmış, metal kaplı K-tipi termal çift sıcak bölgenin tam ortasına yerleştirilmiştir. Ayrıca üst bölgede pirinç kapak ile pirinç kaide arasından hava sızmamaları için lastik halka (O'ring) yerleştirilmiştir. Kontrollü katılaştırma fırınının ısıtıcı sistemi ± 0.1 °C hassasiyetinde **2604S Eurotherm** sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmiştir.

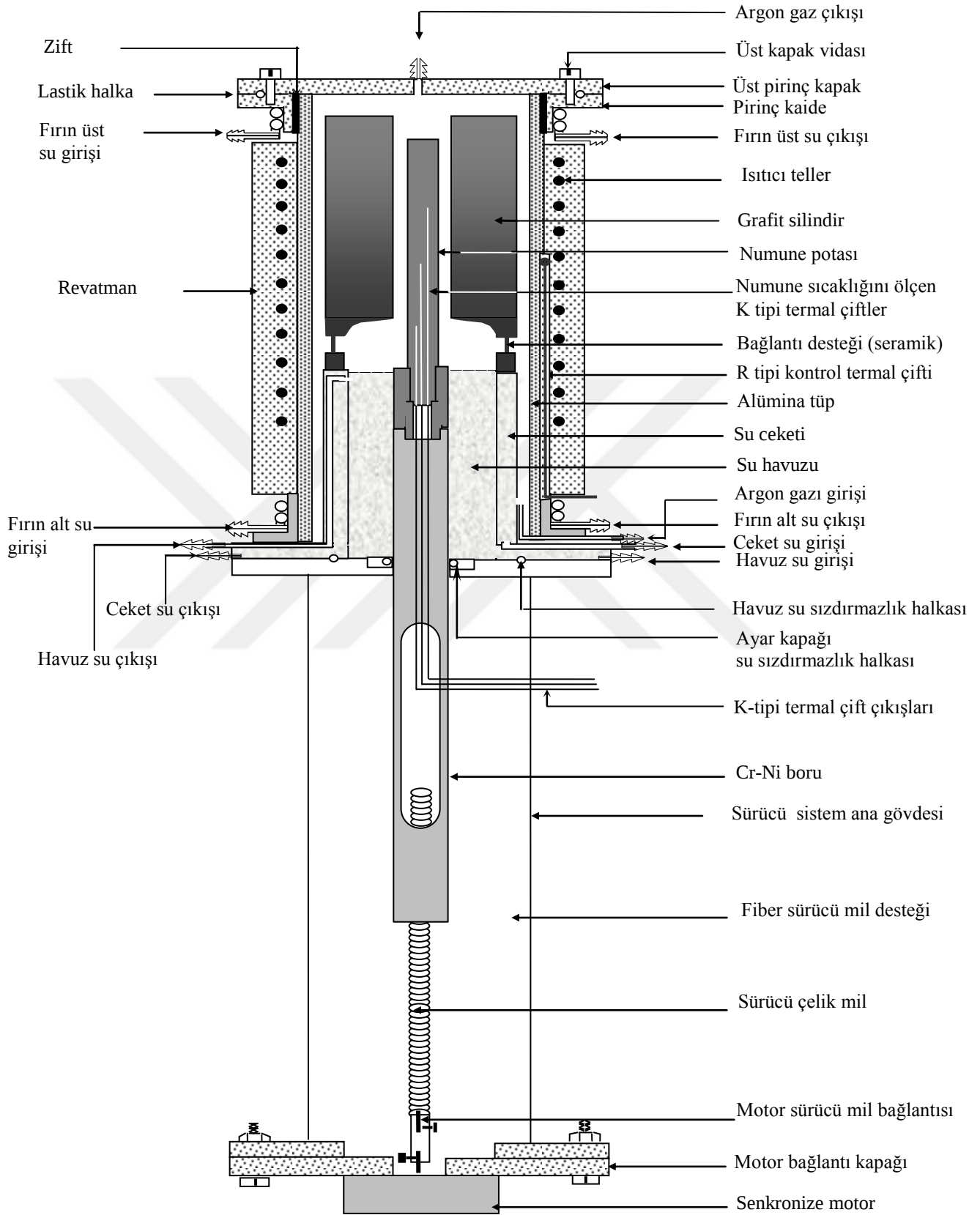
2.1.3.2. Soğutucu Sistem

Soğutma sistemi, fırın içerisinde sıcaklık gradyenti oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Yeterli uzunlukta katılaştırılan numune, aniden soğutma bölgesine (iç su havuzuna) çekilerek ani soğutma (quench) sağlanmaktadır. Soğutucu sistem, 300 mm uzunluğunda 23 ve 33 mm çaplara sahip iç içe geçmiş iki pirinç borudan oluşmaktadır. Pirinç boruların alt kısmı yaklaşık 10 mm kalınlığında, 100 mm çapında dairesel pirinç parçaya kaynatılmıştır. Dolayısıyla soğutucu sistem iç içe geçmiş iki silindirin (iç ve dış silindir) oluşturduğu bir havuzdan yapılmıştır. Numune doğrudan havuza çekilmektedir.

Havuzlardaki suyun sıcaklığı, ± 0.01 °C hassasiyetinde -40 °C ile 200 °C sıcaklık aralığında çalışabilen **PolyScience** dijital kontrollü ısıtmalı/soğutmalı akışkan dolanım sistemi ile kontrol edilmektedir. Dolanım sisteminden gelen akışkan (antifrizli su) ilk olarak havuzun taban kısmından girmekte, havuzda belli bir seviyeye kadar birikmekte ve sonrada fırını terk ederek dolanım sistemine geri dönmektedir. Böylece havuz ve içerisindeki akışkanın sürekli soğuk kalması sağlanabilmektedir. Dolanım sisteminin akışkan tankı 13 L hacminindedir ve bu tank içerisindeki akışkan belli bir sıcaklık aralığında (-40 °C ile 200 °C) hem ısıtılıp hem de soğutulabilmektedir. Ayrıca dolanım sisteminin tankında bulunan akışkanın, fırın içerisinde istenilen hızda dolanımı sağlanabilmekte yani dolanım sisteminin akışkan pompalama hızı ayarlanabilmektedir.

2.1.3.3. Sürücü Sistem

Farklı katılaştırma hızları elde etmek amacı ile kullanılan sürücü sistem, 540 mm boyunda ve 40 mm çapında pirinç gövde içerisinde bulunan, dış çapı 12 mm, iç çapı 10 mm, uzunluğu 650 mm olan Cr-Ni borudan oluşmaktadır. Üzerinde cetvel ölçeği bulunan sürücü sistemin alt kısmında, değişik katılaştırma hızları sağlayan sürücü mile bağlı senkronize motor bulunmaktadır. Pirinç gövde içerisindeki Cr-Ni boru, alt ucundan fiberglastan yapılmış mil yuvasına, üst ucundan da numune tutucusuna sabitleştirilmiştir. Cr-Ni borunun kenarlarından su sızıntılarını önlemek amacıyla lastik halkalar kullanılmıştır. Pirinç gövde içerisine yerleştirilmiş fiberglas, 65 mm uzunluğundadır. Fiberglas'ın bir ucu 12 mm çapındaki Cr-Ni boruya sıkı bir şekilde geçebilmesi için delinmiştir.



Şekil 2.5. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırını [4].

Diğer ucuna ise sürücü milin içinde hareket edebilmesi için 20 mm çapında 30 mm uzunluğunda pirinç blok yerleştirilmiştir. Bu parçanın merkezine 3 mm çapında metrik diş açılmıştır. Sürücü mil çelikten yapılmış olup buna da 3 mm'lik metrik diş açılmıştır. Numune bu çelik mil vasıtasıyla motor devir hızına bağlı olarak, soğuk bölgeye doğru çekilip, düşey doğrultuda kontrollü olarak katılaşması sağlanmaktadır.

2.2. Bir Deneyin Yapılışı

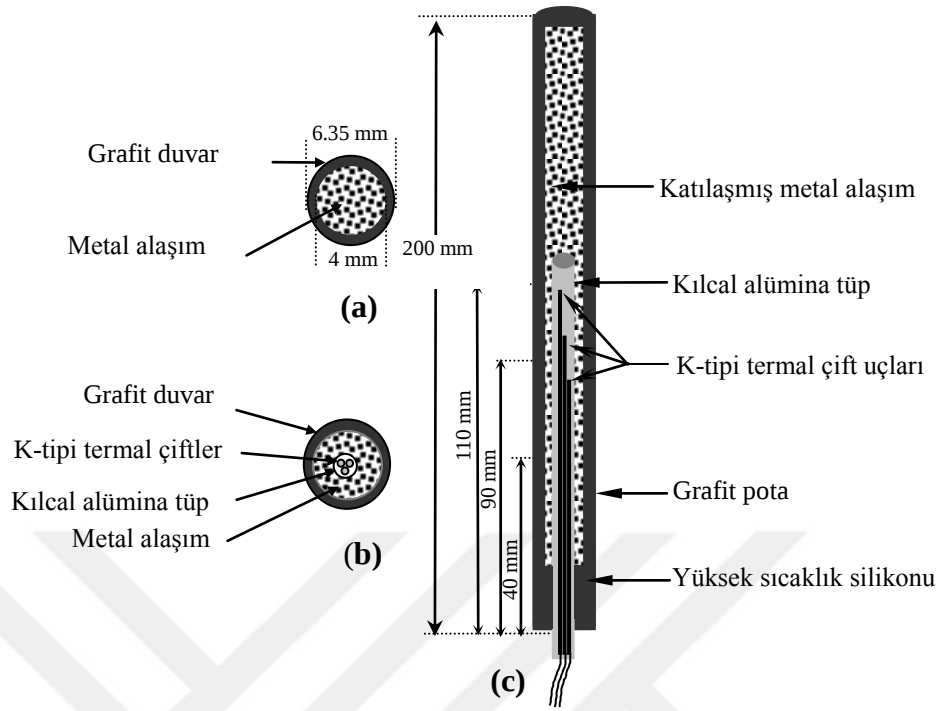
Bir kontrollü katılaştırma deneyi; numunenin hazırlanması, katılaştırma fırınında kontrollü katılaştırılması, metalografik işlemler ve ortaya çıkan mikroyapıların gözlenmesi basamaklarından oluşmaktadır. Şimdi bu basamakların her birini ayrıntılı bir şekilde inceleyelim.

2.2.1. Numunenin Hazırlanması

2.2.1.1. Numune Kalıbının Yapılması

Numune pota ve kalıplarının hazırlanmasında iyi bir ısı iletkenliğine ve kolay işlenebilme özelliklerine sahip olması, metalik alaşımlarla reaksiyona girmemesi nedeniyle grafit tercih edilmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalarda kolay işlenebilen, yüksek ısı iletkenliğe sahip, korozyona karşı dayanımı yüksek ve erime sıcaklığı 1400 °C'ye kadar olan metaller için kullanılabilen **Morgan** marka grafitler kullanılmıştır.

Deneylerde numune kalıbı olarak 200 mm uzunluğunda ve 6.35 mm çapında grafit çubuklar kullanılmıştır. Bu grafit çubuklar delinme esnasında kolayca kırılabilirdikleri için, pirinçten yapılmış kalıbın içine yerleştirilerek 4 mm çapında 220 mm uzunluğunda özel matkap uçları ile tornada delinmiş ve böylelikle içi boş grafit kalıplar elde edilmiştir. Her bir alaşım sistemi için 16 grafit kalıbından 8'i termal çiftsiz, 8'i ise termal çiftli olacak şekilde hazırlanmıştır. Termal çiftsiz olarak hazırlanan numune kalıplarının bir ucu, içerisinde sıvı halde bulunan metal alaşımın sızmasını engellemek için bir uçtan başlayan delme işlemi diğer ucun sonuna kadar getirilmiş ve grafitin diğer ucu kapalı bırakılmıştır. Termal çiftli numune kalıplarının hazırlanmasında ise 1.2 mm dış çapında 0.8 mm iç çapında kılcal alümina tüp kullanılmıştır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, alümina tüp iki ucu delik olan numune kalıbının bir ucundan geçirilip diğer ucu merkezde olacak şekilde yerleştirilerek sızıntı olmaması için etrafı sıkı bir şekilde cam pamuğu ile desteklendi.

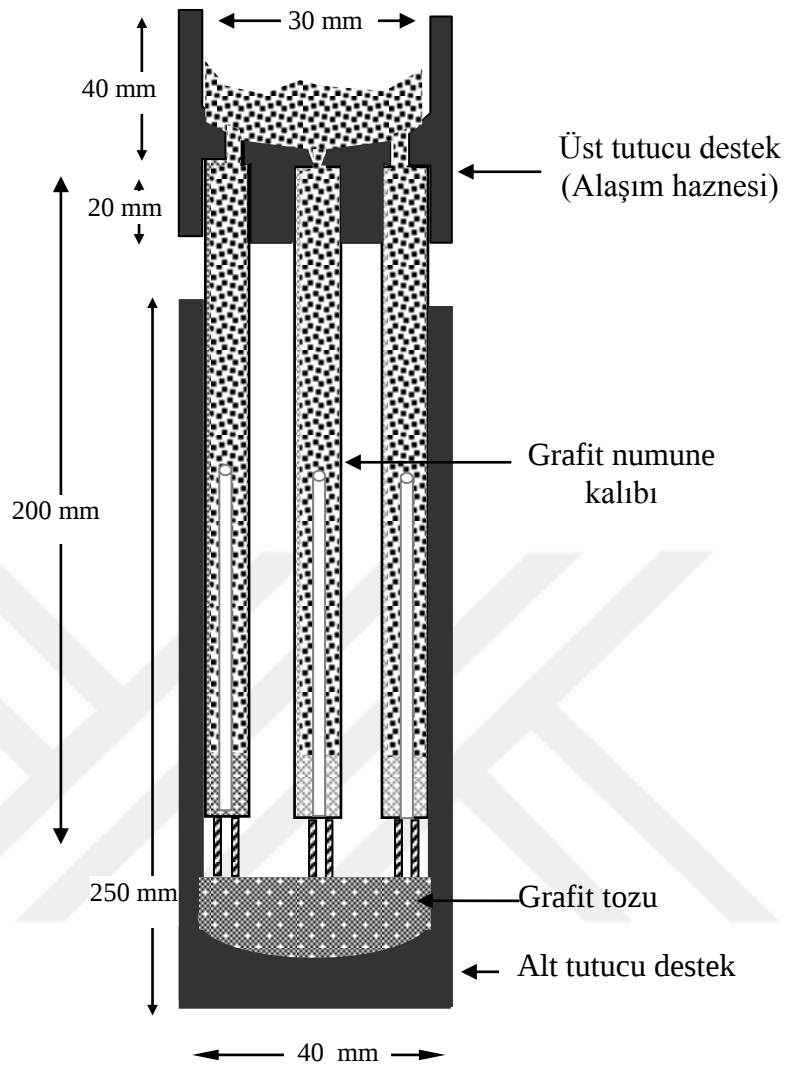


Şekil 2.6. Grafit numune kalıbı (a) Üst enine kesiti, (b) Alt enine kesiti, (c) Yandan görünüşü.

2.2.1.2. Numune Potasının Yapılması

Aynı anda, aynı bileşime sahip alaşımı numune kalıplarına doldurmak amacıyla numune pota kalıbının hazırlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2.7’de verildiği gibi, hazırlanan numune kalıplarından 8 adet numune elde edilebilmektedir. Numune potası, alt ve üst olmak üzere 2 adet grafit destekten oluşmaktadır. Alt destek 40 mm çapında, 250 mm uzunluğunda silindirik biçimli grafit parçadan yapılmış ve içerisine 30 mm çaplı 200 mm uzunluğunda bir ucu kapalı kalacak şekilde delik açılmıştır.

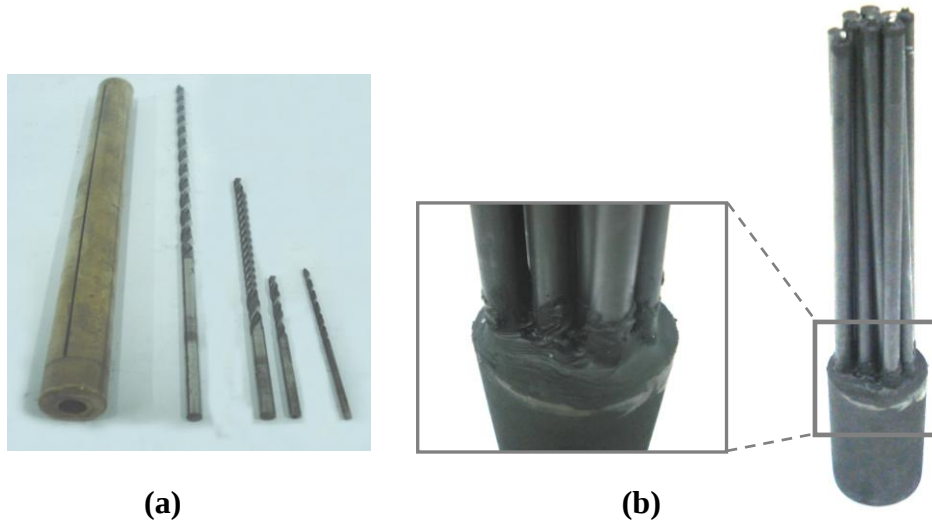
Üst destek yapımı için 60 mm uzunluğunda, 40 mm çapında bir grafit parça kullanılmıştır. Grafit parçanın bir ucu 30 mm çapında matkap ucu kullanılarak 40 mm uzunluğunda delinmiştir. Diğer ucuna ise 3 mm çapında 20 mm uzunluğunda 8 adet delik açılmıştır. Bu delikler 6.35 mm çapındaki matkap ucuyla 15 mm uzunluğunda genişletilmiştir. Önceden hazırlanmış olan numune kalıplarının açık uçları üst destekteki deliklerden geçirilmiştir. Birleşme noktaları 1200 °C’ye dayanıklı karbon katkılı silikon yapıştırıcı ile tutturulmuştur.



Şekil 2.7. Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi.

Şekil 2.8’de ise grafit numune kalıplarının hazırlanmasında kullanılan pirinç blok, matkap uçları (Şekil 2.8.a) ve üst destek ile numune kalıplarının silikon yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmesi (Şekil 2.8.b) verilmektedir. Üst destek ile numune kalıpları arasına sürülen silikonların kuruması için yaklaşık bir gün süreyle beklenmiştir.

Daha sonra önceden hazırlanan alt destek yardımıyla kılavuzlama yapılmıştır. Hazırlanan kalıp döküm fırınına teller yardımıyla indirilmiş böylece kalıp hazırlama işlemleri tamamlanarak alaşım hazırlama basamağına geçilmiştir.



Şekil 2.8. (a) Grafit numune kalıplarının yapımında kullanılan pirinç destek ve değişik ebatlarda matkap uçları, (b) Üst destek ile numune kalıplarının silikon yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmesi.

2.2.1.3. Alaşımın Hazırlanması

İncelenecek olan alaşımların ötektik noktadaki bileşim oranları EK 2 de verilen ikili ve üçlü faz diyagramları yardımıyla tespit edildi [216-218]. Alaşım yapımında kullanılan malzemelerin yüksek saflıkta olmasına özellikle dikkat edildi. Yeterince saf olmayan malzemelerle alaşım hazırlandığında safsızlıklar arayüzeyde birikmekte ve deneysel süreçte arayüzeyde oluşan yapı şekillerini olumsuz etkilemektedir. Alaşım yapımı için alüminyum %99.99, bakır %99.9, çinko %99.99, nikel %99.95 ve titanyum %99.95 saflıkta metaller kullanıldı. Her bir bileşen, uygun oranlarda 0.1 mg'a duyarlı **AND GX-600** tipi hassas terazi ile tartıldı (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Alaşım metallerinin tartılmasında kullanılan hassas terazi.

2.2.1.4. Numune Kalıplarının Doldurulması

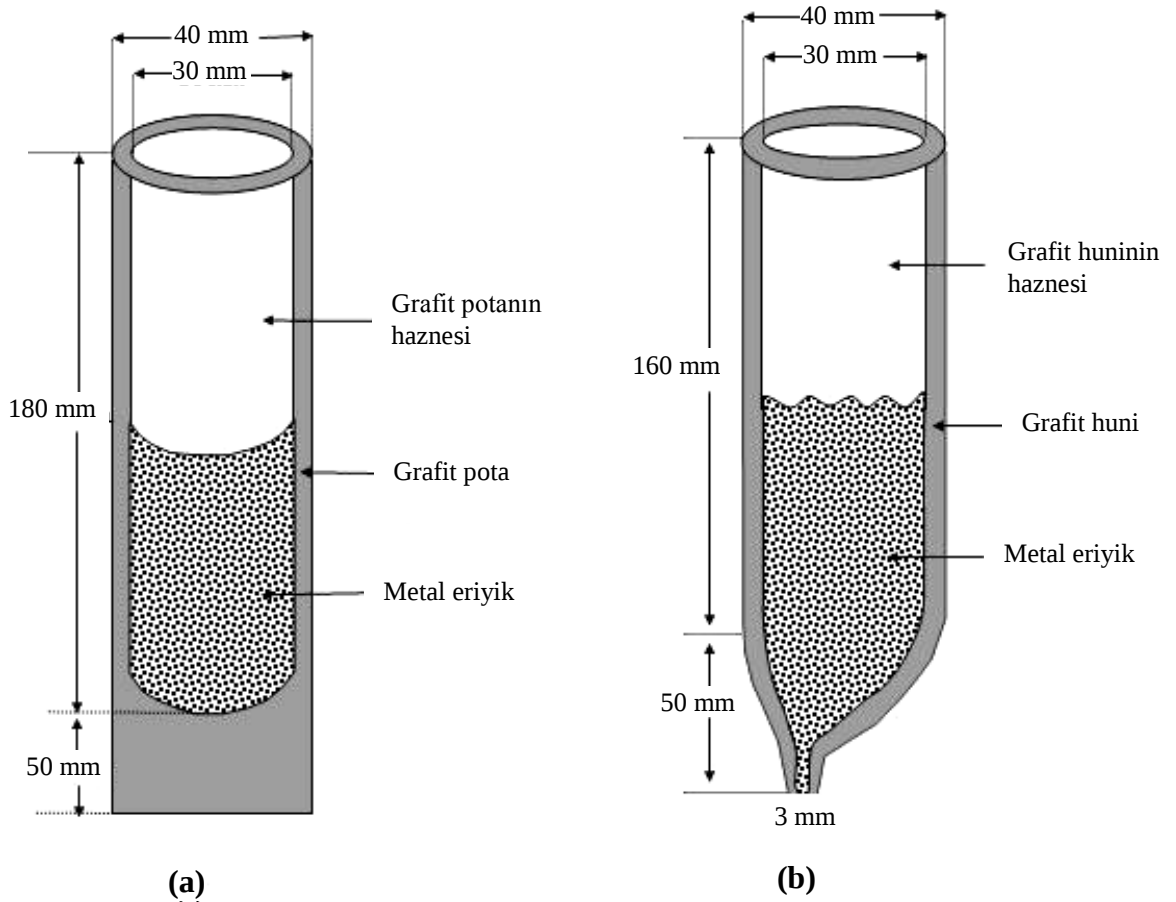
Alaşım hazırlamada kullanılacak metallerin miktarları hassas terazi ile tartıldıktan sonra alaşımın hazırlanması ve hazırlanan alaşımın numune kalıplarına doldurulması aşamalarına geçildi. Erime sıcaklığı dūřuk olan metal altta kalacak şekilde metal malzemeler grafit potaya yerleştirildi. Grafit pota uygun bir engelli tel pota tutucusu yardımıyla vakum fırınına indirildi. Vakum pompası çalıştırılarak fırın vakumlandı. Fırın ısıtılmaya başlamadan önce fırının kapaklarında bulunan ziftin sıcaklığın etkisiyle erimemesi için kapak ilerinden su geçirilerek soğutma yapıldı. Varyak en dūřuk gū durumunda çalıştırıldı ve yaklaşık her 5 dakikada varyağın değeri % 5 artırıldı. Varyağın değerinin artırılmasına fırın istenilen sıcaklığa çıkıncaya kadar devam edildi. Metaller tamamen eridikten sonra vakum kapağı açılarak grafit karıştırıcı çubuk yardımıyla metal eriyik karıştırıldı. Bu işlem 20-25 dakika arayla 4-5 defa tekrarlandı. Böylece eriyik halde metalik l alaşım hazırlanmış oldu.

Vakumlu eritme fırınında alaşım hazırlama işlemleri devam ederken diğer taraftan döküm fırınında dökümün yapılması ve önceden yapılan numune kalıplarına alaşımın doldurulması hazırlıklarına başlandı. Numune potalarıyla desteklenen numune kalıplarının etrafı cam pamuğu ile sarılarak çevresine sarılan tel yardımıyla fıına indirildi. Dökümü kolaylaştırmak amacıyla kalıp üzerine grafitten yapılmış bir huni yerleştirildi. Döküm sırasında sıvı alaşımın dışarıya taşıp fıına sızmasını engellemek için grafit huni ile alümina tüp arasına yüksek sıcaklığa dayanıklı cam pamuğu sıkıştırıldı. Fırının alt ve st ısıtıcılarına g verilerek fırının i bölgesinin ısıyı çekmesi beklendi. Döküm fırınının varyakları yavaş yavaş artırılarak alt ısıtıcının sıcaklığı alaşımın erime sıcaklığının yaklaşık 50 C üzerindeki bir sıcaklığa, st ısıtıcının ise erime sıcaklığının 100-150 C üzerindeki bir sıcaklığa çıkması sağlandı. Burada amaç vakumlu eritme fırınından eriyik halde çıkarılan alaşımın döküm fırınına yerleştirilen numune kalıplarına dolması esnasında akışkanlığını koruması ve bu süreç esnasında katılaşmadan kalıp ilerine tam bir dolum yapmasıdır.

Vakumlu eritme fırınında hazırlanan ve yeterli miktarda karıştırılarak alaşım olduğuna kanaat getirilen eriyik, maşayla sıkıca kavrandı ve vakit geçirilmeden huni yardımıyla numune kalıplarına döküldü. şekil 2.10.a'da vakumlu eritme fırınında alaşımı oluşturacak metalleri içerisinde eritmede kullanılan grafit pota ve şekil 2.10.b'de

döküm fırınında döküm yapmak amacıyla kullanılan grafit huninin şematik gösterimi verilmiştir.

Grafit numune potası üzerine yerleştirilen huni çıkarıldı ve ince bir grafit çubuk ucuna bağlanan alümina tüp ile sıvı alaşım tekrar tekrar karıştırılarak numune kalıpları içerisinde bulunabilecek hava kabarcıklarının dışarıya çıkması sağlandı. Döküm fırınının alt ısıtıcısı kapatıldı, üst ısıtıcı çalışır haldeyken numune kalıbının altında bulunan soğutma kazanından su geçirilerek tek yönlü katılaştırma başlatıldı. Tek yönlü katılaştırmanın amacı numune kalıbının içerisinde hava boşluğu kalmaksızın tamamen doldurulmasıdır. Katılaşma tamamlandıktan sonra üst ısıtıcı da kapatılarak fırının soğuması beklendi. Fırın tamamen soğuduktan sonra, dökümü yapılan grafit numune kalıpları fırından çıkarıldı. Üst ve alt destek kısımları numune kalıplarından ayırt edildi. Böylece her bir numune kalıbının aynı anda aynı tür malzemeyle dolması sağlanarak, numuneler kontrollü katılaştırma fırına yerleştirilecek hale getirildi.



Şekil 2.10. Grafitten yapılmış (a) Pota ve (b) Huninin şematik gösterimi.

2.2.1.5. Termal Çift Seçimi ve Sıcaklık Ölçümleri

Termal çiftler, fırınlarda ısıtılan numunelerin sıcaklığını ölçmek ve kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda yaygın olarak Kromel-Alumel (*K*-tipi) ve Platin-%13 Platin-Rodyum (*R*-tipi) olmak üzere iki tür termal çift kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalara geçmeden önce, deneylerde kullanılacak termal çiftlerin seçimi ve testi yapıldı. Deneyler esnasında sıcaklık ölçümlerini yapabilmek için 0.25 mm çapında 100 cm uzunluğunda, $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında ölçüm yapabilen, *K*-tipi termal çiftler kullanıldı.

Deneylerde kullanılan termal çiftlerin, çapları 0.25 mm olması, deneysel çalışmalarda kolaylık sağlamak ve hassasiyeti artırmaktadır. Bu termal çiftlerin iç tarafındaki kontak noktası seramik tozla yalıtılmış ve yüzeyi metalle kaplanmış olduğu için ayrıca bir yalıtıma ihtiyaç duyulmamaktadır. Kontak uç, sıcaklığı ölçülecek bölgeye yerleştirilirken, diğer uçlar referans sıcaklığında ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de antifrizli su) tutulmaktadır. Bu amaçla **PolyScience** analog kontrollü ısıtmalı/soğutmalı akışkan dolanım sisteminin akışkan tankı kullanılmıştır.

Referans noktasını sabitlemede kullanılan analog dolanım sistemi, tankı içerisinde bulunan akışkanı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle kontrol edebilme özelliğine sahip olup 6 L hacmindedir. Dolayısıyla sıcaklık ölçümünde kullanılan termal çiftlerin bir uçları sıcaklığı ölçülecek bölgeye yerleştirildikten sonra, diğer uçları içerisinde etil alkol bulunan bir cam tüp içerisine yerleştirilerek dolanım sisteminin tankı içerisine sabitlendi. Cam şişe içlerinde etil alkolün kullanılmasının nedeni, ısı iletkenliğinin havanın ısı iletkenliğinden daha yüksek olması ve tank içerisindeki ısıyı termal çift uçlarına daha iyi iletmesindendir. Dolanım sisteminin tankına ise antifrizli su (etilen glikol çözeltisi) doldurularak referans sıcaklığı olan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de akışkanın donması engellendi. Sistemde sıcak bölge ile soğuk bölge arasında bir e.m.k. oluşmakta ve bu oluşan e.m.k. μV mertebesinde hassas ölçüm yapan sıcaklık kaydedicisi yardımıyla okunarak $^{\circ}\text{C}$ birimine dönüştürmektedir. Böylece fırın içerisindeki numune sıcaklığı belirlenmektedir. Kullanılan termal çiftlerin ($-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$) ölçüm aralıkları, deneysel çalışmalardaki ölçüm aralıkları ile uyumlu olduğundan dolayı hassas ve duyarlı bir şekilde ölçümler alınabilmektedir.

Alaşımın erime sıcaklığının tayininde (kalibrasyon), katılaştırma süreci devam ederken numune içerisinde oluşan sıcaklık gradyentinin ölçümünde ve ani soğutma anında ölçüm termal çiftlerinin sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde sıcaklık kaydedicisi (data logger) kullanılmıştır. Kontrollü katılaştırma deneylerinde ölçüm termal çiftlerinin sıcaklık değişimlerinin kaydında **Pico TC-08** model sıcaklık kaydedicisi kullanılmış ve veriler bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Kullanılan sıcaklık kaydedicisinin fotoğrafı Şekil 2.11’de verilmiştir.

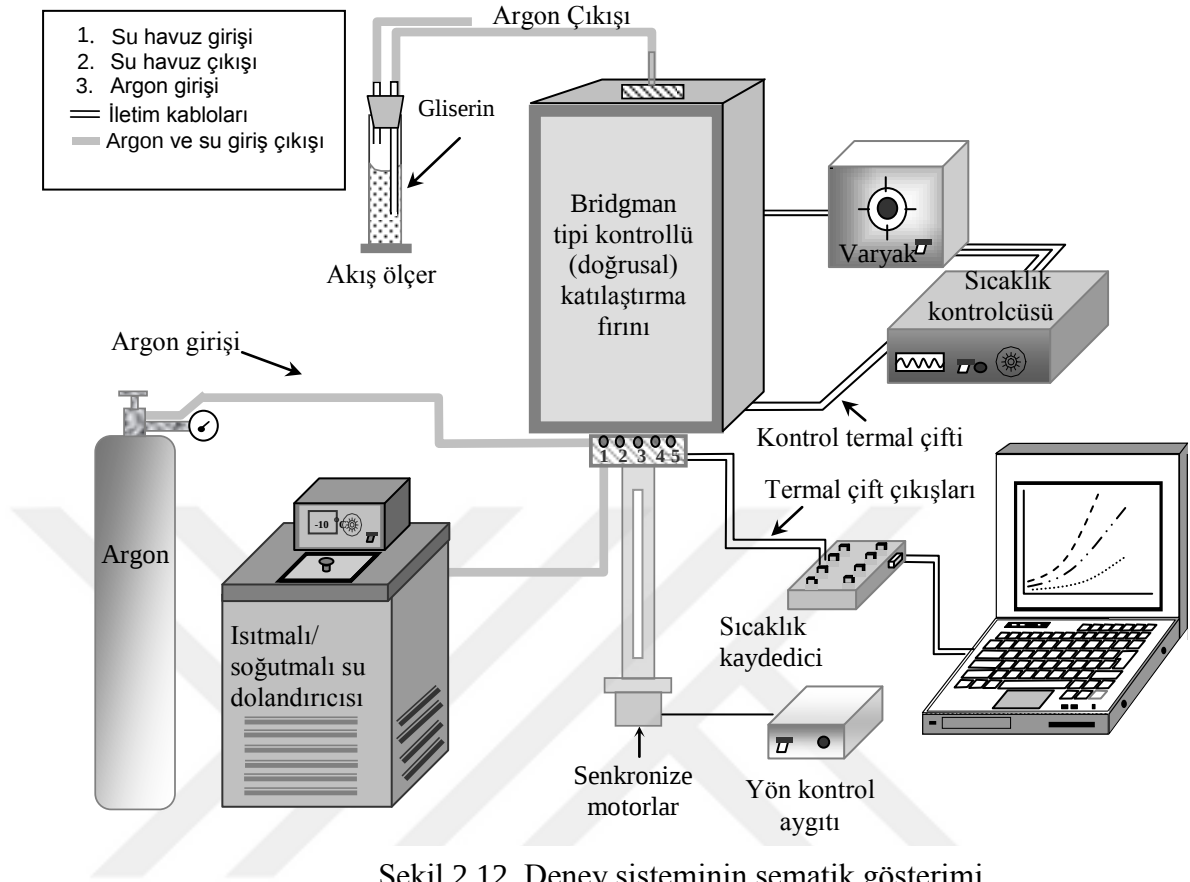


Şekil 2.11. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan sıcaklık kaydedicisi.

2.2.2. Doğrusal Katılaştırma

Kontrollü katılaştırma deney düzeneği; yukarıda ayrıntılı özellikleri anlatılan alaşımla doldurulan grafit numune kalıplarının, kontrollü olarak düşey doğrultuda katılaştırıldığı kontrollü katılaştırma fırını, sıcaklık kontrol ünitesi, varyak, senkronize motor, yön kontrol ünitesi, argon pozitif basınç ünitesi, akış ölçer (flowmeter), su dolanım sistemi, sıcaklık kaydedicisi (data logger) ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Dökümü yapılan numunelerden biri kontrollü katılaştırma fırınının numune tutucusuna yerleştirildi. Termal çift çıkışları 5 terminali bulunan selektöre bağlandı. Fırının bağlantı uçları, içerisinde etil alkolün bulunduğu cam tüp borular içerisine konularak içerisinde 0 °C’de antifrizli su bulunan analog dolanım sisteminin tankının içerisine yerleştirildi. (Burada amaç referans sıcaklığını 0 °C yapmaktır). Şekil 2.12’de bir bütün olarak deney sisteminin şematik görünümü, Şekil 2.13’de ise fotoğrafı verilmiştir.



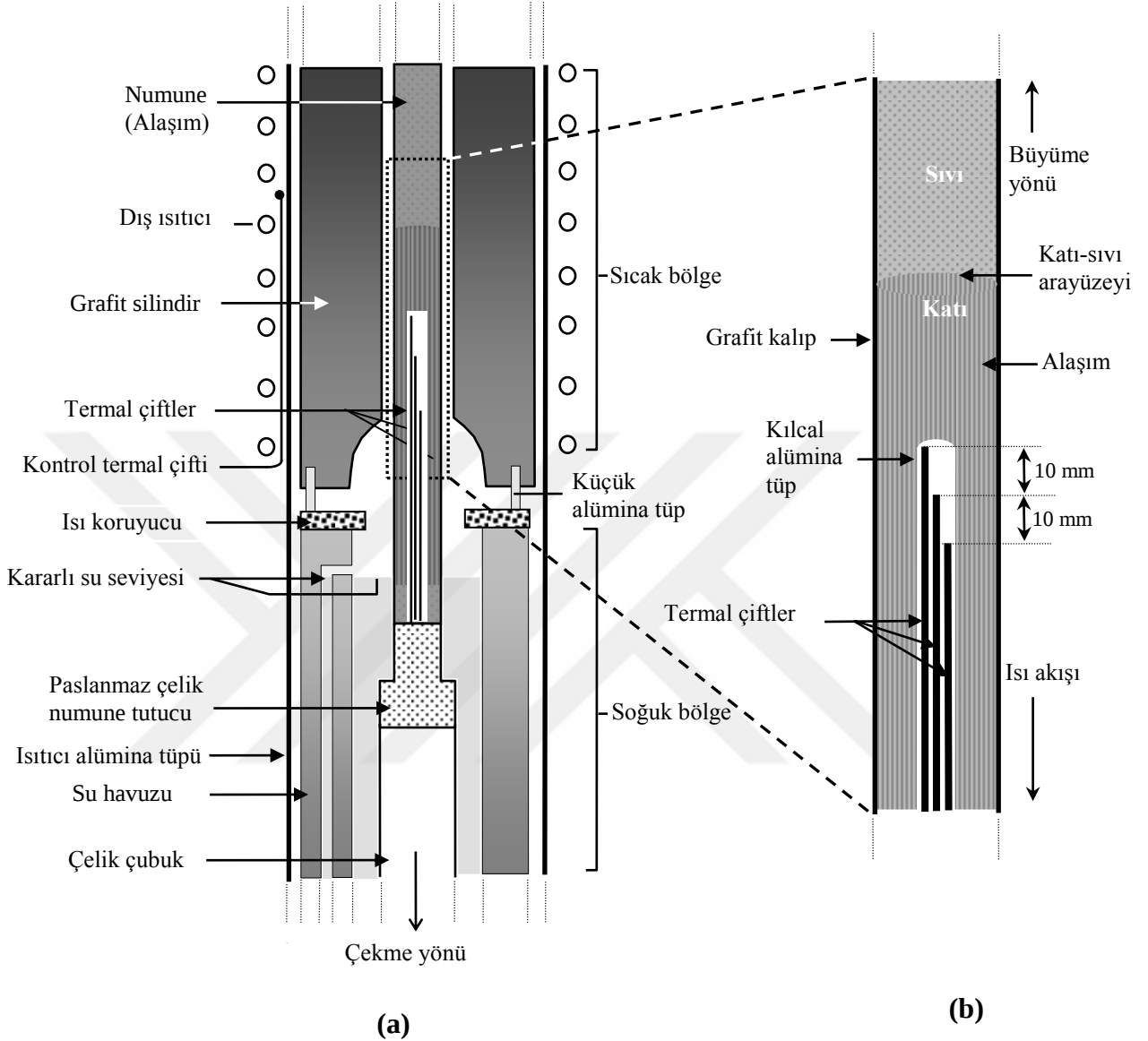
Bu işlemden sonra soğutma havuzu giriş ve çıkış hortumlarının bağlantıları ve istenilen hızdaki senkronize motor bağlantıları yapılarak deney düzeneği kuruldu. Soğutma havuzundaki akışkanın sıcaklığı istenen düzeye geldikten sonra sisteme argon gazı verildi. Burada argon gazı, sıvı haldeki alaşımın katılaşma sürecinde herhangi bir oksidasyona maruz kalmaması amacıyla kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra kontrollü katılaştırma fırını istenilen sıcaklığa ayarlandı. Fırının istenilen sıcaklığa gelişi, sıcaklık kaydedici ve bilgisayar bağlantısı yardımıyla kontrol edildi. Numune üzerindeki sıcaklık akışının kararlı hale gelmesi için yaklaşık 2 saat kadar beklendi. Daha sonra sürücü motor çalıştırılarak deney başlatıldı. Numune yaklaşık 7-10 cm katılaştıktan sonra ani soğutma (quench) yapılarak katılaştırma durduruldu. Ani soğutma işlemi numunenin kontrollü katılaştırılma işlemi devam ederken, hızla soğuk su havuzuna çekilerek o anki haliyle katılaştırılmasıdır.

Bu noktada numuneyi havuza çekme işleminin hızının yüksek olması ve havuzdaki suyun sıcaklığının numune üzerinde denge durumunu bozabilecek bir osilasyon oluşturmaması gereklidir. Bu nedenle ani soğutmanın etkin olabilmesi için çekme işlemi çok hızlı yapıldı ve iç havuzun sıcaklığı hassas bir şekilde kontrol edildi.

Bu işlem 8 farklı katılaşma hızında ikişer adet olmak üzere her bir ötektik sistem için 16 defa tekrarlandı. İkişer adet yapılmasının nedeni ise ilk yapılan deneylerde katılaştırma hızlarını ve malzemenin sıcaklık gradyentini belirlemek için içine termal çiftlerin yerleştirileceği alimüna tüpler konulmasıdır. İçine alümina tüp konulan numunelerden ölçülmesi istenilen özellikler için güvenilir sonuçlar vermeyecektir. Bu nedenle de aynı şartlar altında iki deney yapılmıştır. Kontrollü katılaştırma fırınının iç yapısı ve içine yerleştirilen numunenin ayrıntıları Şekil 2.14’de verilmiştir.

Kararlı ötektik mikroyapıların oluşabilmesi için ötektik bileşim değerine karşılık gelen oranların doğru olarak hesaplanması, tartılması ve deney esnasında katılaştırma şartlarının kararlı olması (yani katılaştırma esnasında konveksiyon etkisinin minimum ve numune üzerinde sıcaklık değişiminin ± 0.1 °C’den büyük olmaması) gerekmektedir.

Ayrıca deney esnasında numunenin katılaştırma hızının ve sıcaklık gradyentinin hassas bir şekilde ölçülmesi ve deney sonucunda oluşan ötektik mikroyapı mesafelerinin hassas okunması deneysel hata oranını minimize etmektedir.



Şekil 2.14. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının içyapısı
(a) Fırının sıcak ve soğuk bölgeleri, (b) Numune kalıbı.

2.2.2.1. Sıcaklık Gradyentinin Ölçülmesi

Kontrollü katılaştırma deneylerinde kontrol parametrelerden birisi sıcaklık gradyentidir. Sıcaklık gradyentinin ölçümü aşağıda özetlenmiştir; Kontrollü katılaştırma fırınına yerleştirilen numune içerisindeki sıcaklık akışı kararlı hale geldikten sonra sürücü motor çalıştırılarak katılaştırma başlatıldı. Deney sisteminde kullanılan Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını düşey olarak tasarlandığından içerisindeki numune aşağıdan yukarıya doğru katılaşmaktadır. Numune içerisindeki kılcal alümina tüpün içine

yerleştirilen üç K-tipi termal çift ve sıcaklık kaydedicisi yardımıyla numunenin sıcaklığı tespit edildi. Numune katılaştırılırken, birinci termal çift katı-sıvı arayüzeyine geldiğinde ikinci ve üçüncü termal çiftlerin sıcaklıkları ölçüldü. Buradan;

$$G_{12} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1}, G_{23} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_3 - T_2}{X_3 - X_2} \text{ veya } G_{13} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_3 - T_1}{X_3 - X_1} \quad (2. 1)$$

denklemleri yardımıyla sıvı içerisindeki sıcaklık gradyenti G_s , üç farklı noktadan ölçüldü. T_1 , T_2 ve T_3 sırasıyla 1., 2. ve 3. termal çiftlerin ölçtüğü sıcaklık, X_1 , X_2 ve X_3 ise sırasıyla 1., 2. ve 3. termal çiftlerin numune tabanına olan uzaklıklarıdır.

Deney esnasında termal çiftler arasındaki mesafelerin değişmemesi ve sıcaklık gradyenti ölçümlerinin daha hassas olabilmesi için kalıp içerisine yerleştirilen termal çiftler numune kalıbı hazırlama sürecinde birbirlerine yapıştırılmış ve yüksek sıcaklık silikonu yardımıyla kalıbın alt kısmına sabitlenmiştir. Deneyler yapılmadan önce ve deneyler tamamlandıktan sonra birbirine tutturulmuş termal çiftler arasındaki mesafelerin fotoğrafları çekilerek **Adobe Photoshop CS2** programı yardımıyla hassas bir şekilde ölçüldü. Termal çiftler arasındaki mesafelerin böyle hassas bir şekilde ölçülmesi sıcaklık gradyenti hesaplamalarında güvenilirliği artırmaktadır.

2.2.2.2. Katılaştırma Hızının Ölçülmesi

Kontrollü katılaştırma deneylerinde kontrol parametrelerinden bir diğeri ise katılaştırma hızıdır. Katılma hızı, sürücü motor vasıtasıyla elde edilen çekme hızından farklıdır. Çekme hızı numunenin soğutucu sisteme doğru çekilme hızı yani motorun çekme hızıdır. Katılma hızı ise numune içerisinde oluşan katı-sıvı arayüzeyinin ilerleme hızıdır. Çekme hızı arttıkça katılma hızı artmakta çekme hızı azaldıkça katılma hızı da azalmaktadır. Farklı sıcaklık gradyentleri için katılaştırma hızını, çekme hızına eşit olarak almak yeterince hassas değildir. Özellikle bu tez çalışması için özel olarak dizayn edilmiş çekme motorunda (Şekil 2.15) katılma hızı neredeyse çekme hızının yarısına hatta daha düşük bir değere denk gelmektedir (Tablo 3.4, Tablo 3.6, Tablo 3.8).

Deneylerde hem çekme hızı hem de katılaştırma hızı hassas bir şekilde ölçülmüş fakat hesaplamalarda sadece katılaştırma hızı kullanılmıştır.



Şekil 2.15. Yüksek katılaştırma hızlarına çıkabilmek için özel olarak dizayn edilmiş çekme motoru fotoğrafı.

Katılma hızı şu şekilde ölçülmüştür; Katılaştırma süreci devam ederken sıcaklık kaydedici tarafından sıcaklık-zaman değişimi sürekli olarak kaydedilmektedir. Katılaştırma işlemi bittiğinde sıcaklık kaydedicinin topladığı veriler yardımıyla ikinci termal çiftin ötektik erime sıcaklığına geldiğindeki süre (t_2) ve üçüncü termal çiftin ötektik sıcaklığına geldiğindeki süre (t_3) saniye cinsinden ölçüldü. İkinci ve üçüncü termal çift arasındaki mesafe önceden bilindiğinden,

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_3 - X_2}{t_3 - t_2} \quad (\mu m / s) \quad (2.2)$$

denklemleri yardımıyla katılaştırma hızı hesaplandı. Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşım sistemleri için katılaştırma hızları birbirlerine çok yakın olması nedeniyle ortalamaları alınarak genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2.2.3. Metalografik İşlemler

Katı-sıvı arayüzeyinde oluşan mikroyapıyı gözlemleyebilmek için numune metalografik işlemlere tabi tutulmalıdır. Bunun için ani soğutulmuş numune kontrollü katılaştırma fırınından çıkarıldı. Numunelerin kesilmesi, zımparalanması, kalıplanması, parlatılması, ultrasonik temizlenmesi ve dağlanması gibi metalografik işlemler sonunda, açığa çıkan mikroyapıların fotoğrafları taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) çekildi. Bu süreçler aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.2.3.1. Numunelerin Kesilmesi

Metal numuneleri istenilen boyutlara kesmede **Struers Minitom** kesme aleti ve 127 mm çaplı, 0.4 mm kalınlığında **Struers** elmas kesici kullanılmıştır. Numunenin boyuna kesitleri arayüzeyi içine alacak şekilde, enine kesitleri ise arayüzeye olabilecek en yakın mesafeden alınmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus kesme esnasında numunede herhangi bir yapı değişiminin oluşmasını engellemektir. Keski kullanarak yapılan kesme işlemlerinde yapıda bozulmalar olabilir. Prensipte olarak, numune yapısında minimum yapı değişimi yapan ve en az ısı oluşturan kesme tekniğinin kullanılması gerekmektedir.

Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınından çıkarılan numunenin grafit kalıbı, numuneye zarar vermeyecek şekilde itina ile çıkarıldı. Numune bir yüzeyinden boyuna parlatılarak arayüzeyin yeri tespit edildi. Daha sonra kesme robotu yardımıyla arayüzeye en yakın katı ve sıvı bölgelerinden parçalar düşük hızda kesildi. Aynı işlem üretilen her bir numune için tekrarlandı. Enine ve boyuna kesitleri alınan numuneler, kalıplamaya ve zımparalamaya hazır hale getirilmiş oldu.

Bu çalışmada enine ve boyuna kesitleri alınan numuneler soğuk kalıplama yöntemi kullanılarak epoksi-resin ile kalıplandı. Numunenin boyutlarına uygun, plastikten yapılmış kalıplar içine numuneler yerleştirildi. Numune, üzerine kalıplama için hazırlanan epoksi-resin karışımının dökülmesi esnasında kaymaması için sabitlendi. Epoksi ve sertleştirici 7/1 oranında karıştırılarak kalıba döküldü ve sertleşmeye bırakıldı. Epoksi-resin yaklaşık 8 saat içerisinde sertleşti. Bu süre sonunda kalıp etrafındaki plastik çıkartılarak zımparalamaya hazır hale getirildi.

Şekil 2.16'da Bridgman kontrollü katılaştırma fırınından çıkarılan numunenin grafit kalıptan çıkarılması, arayüzeyin belirlenmesi, arayüzeyden boyuna ve enine kesitlerin alınması ve epoksi-resin ile kalıplanması sürecinin fotoğrafı verilmiştir.

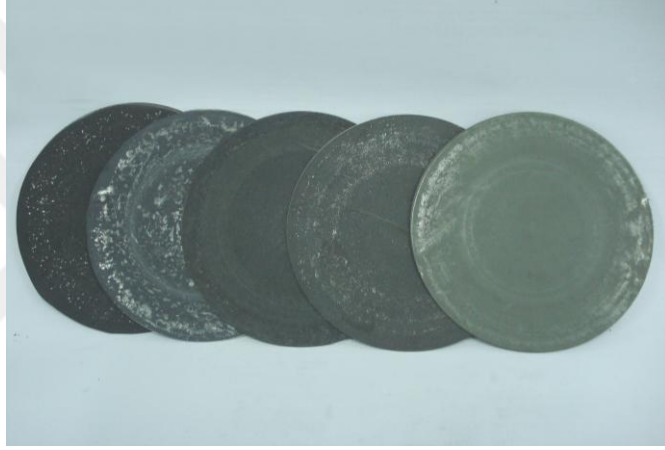


Şekil 2.16. Numune için, numune kalıbının oluşturulmasından epoksi- resin ile kalıplanması sürecine kadar ki her bir aşamanın gösterimi.

2.2.3.2. Numunelerin Zımparalanması

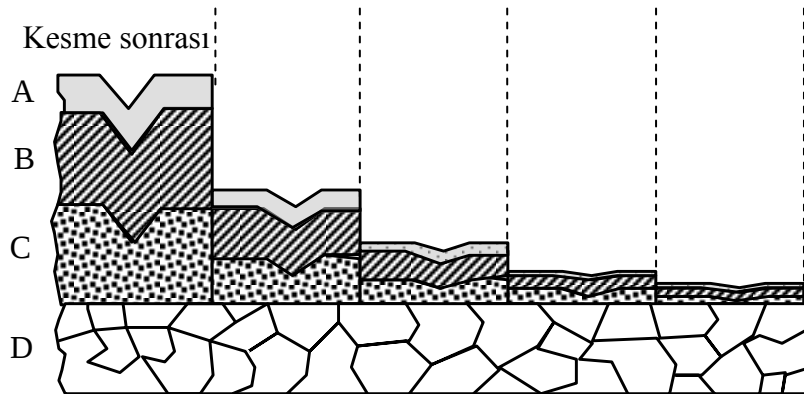
Numunelerin zımparalanması silisyum karbür (SiC) taneleri ve magnetit tozu içeren zımpara kâğıtlarıyla yapıldı. Zımpara kâğıtlarında birim alana düşen tane sayısı (grid) arttıkça mikron cinsinden tane boyutu azalmaktadır. 120-600 gridler kaba, 800-2000 gridler ise ince zımpara olarak sınıflandırılmaktadır.

Numuneler, 120 gridlik zımpara kâğıdından başlayarak 2000 gride kadar, kabadan inceye doğru kademeli olarak zımparalandı. Numunelerin zımparalanmasında kullanılan bazı zımpara kâğıtlarının fotoğrafı Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2.17. Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kâğıtları.

Her bir numune kaba zımparalarla 5-10 dakika, ince zımparalarla ise 15-20 dakika süreyle zımparalandı. Numune yüzeyinde zımparalama işlemiyle oluşan şekil değişikliğinin şematik gösterimi Şekil 2.18’de verilmektedir.



Şekil 2.18. Kesme robotu ile kesilmiş numunedeki yüzey durumu (A, B, C tabakaları zımparalama işlemiyle oluşan şekil değişikliklerini D ise orijinal iç yapıyı göstermektedir) [219].

2.2.3.3. Numunelerin Parlatılması

Zımparalama ve parlatma işlemleri **Struers TegraPol-15** tipi otomatik parlatma robotu ile yapıldı. Otomatik parlatma robotunun fotoğrafı Şekil 2.19’da verilmiştir. Öncelikle parlatma robotun disklerine farklı tane büyüklüklerine sahip zımparalar takıldı. Cihazın su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapması sağlandı. Böylelikle numunenin hem ısınması engellendi hem de homojen bir temas sağlandı.

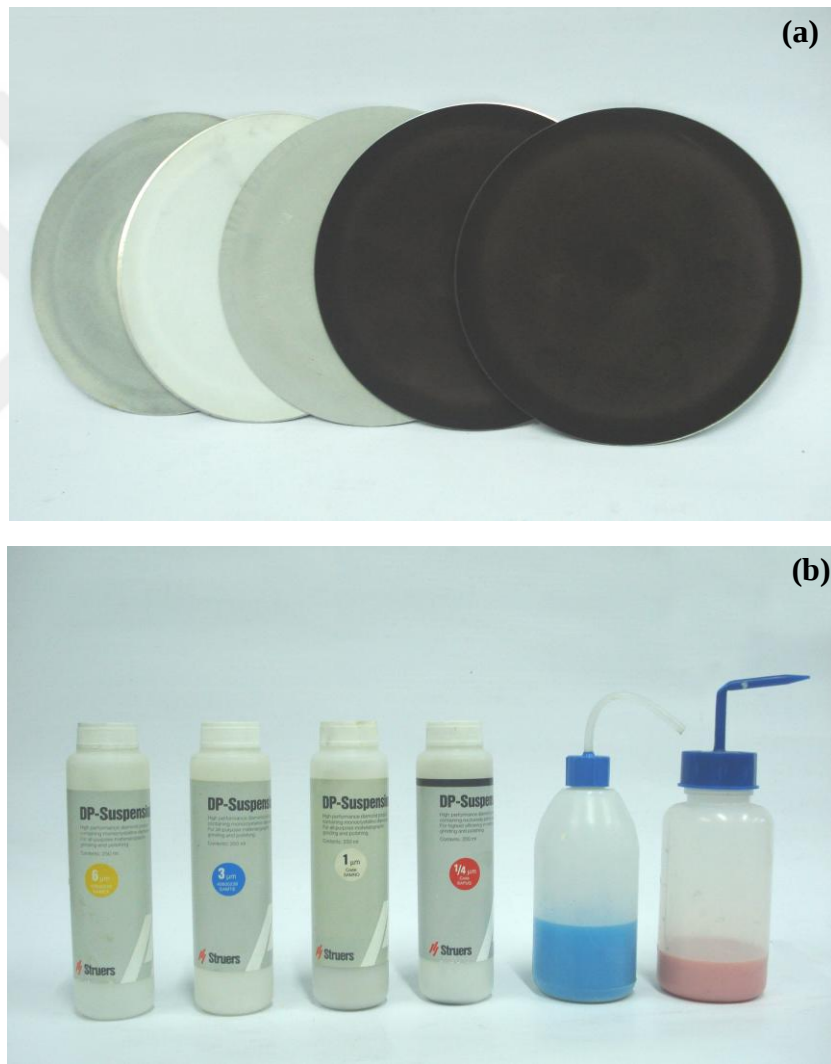
Zımparalamanın düzgün ve itinalı yapılması fotoğraf çekmede odaklama kolaylığı sağlamaktadır. Her bir zımparalama kademesinden sonra numune yüzeyinin düz olmasına ve derin çiziklerin giderilmiş olmasına dikkat edildi. Daha sonra dönüş hızı ve baskı basınç değeri ayarlanabilen otomatik parlatma robotunun disklerine, parlatılacak numuneye uygun parlatma kumaşları takıldı. Kaba ve ince parlatma için farklı tane büyüklüğüne sahip elmas süspansiyonlar kullanıldı.

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



Şekil 2.19. Otomatik parlatma robotu.

6 μm , 3 μm ve 1 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken numune üzerine her numunede farklı olmak üzere kuvvet (20-50 N) uygulandı. 0.25 μm ve 0.05 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken uygulanan kuvvetin büyüklüğü azaltıldı. Numuneler her bir çözelti ile ortalama 10-15 dakika parlatıldı. Parlatma sırasında elmas çözeltinin disk üzerinde homojen dağılmasına dikkat edildi. Her aşama sonunda numune bol damıtık su ile yıkandı. Numunelerin parlatılmasında kullanılan parlatma kumaşları ve parlatma süspansiyonları Şekil 2.20'de verilmektedir.



Şekil 2.20. Numunelerin parlatılmasında kullanılan (a) Kumaşlar ve (b) Süspansiyonlar.

0.05 μm 'lik çözelti ile yapılan parlatma kademesinin sonunda disk üzerine saf su sıkılarak numune iyice temizlendi. Artık numune yüzeyi dağlanmaya hazır duruma

gelmiştir. Tablo 2.1’de bu çalışmada kullanılan çözelti ve kumaşların özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.1. Parlatmada kullanılan çözelti ve kumaşlar.

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

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

2.2.3.4. Numunelerin Dağlanması

Her ne kadar parlatma sonucunda numunenin yüzeyi düzgün, pürüzsüz ve ayna gibi parlak olsa da numune yüzeyinde kontrast oluşturmada 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 [219]. Kimyasal dağlama ise numunenin yüzeyine uygun bir çözelti uygulanarak yapılmaktadır. Dağlama işleminde en önemli nokta metalik malzeme için uygun dağlama çözeltisini seçmektir.

Bu çalışmada, numunelerin tane sınırlarını ve mikroyapı özelliklerini ortaya çıkarmak için numune yüzeyine uygun bir reaktif tespit edilerek kimyasal dağlama tekniği

uygulandı. Kimyasal dağlama işlemi; yüzeyi istenen kalitede temizlenmiş ve pürüzsüz hale getirilmiş numunenin, dağlama çözeltisine uygun sürelerde daldırılmasıyla yapılmaktadır. Dağlama işlemi sonunda parlatılmış yüzey, çözeltinin etkisiyle renk değiştirir ve donuklaşır. Dağlamanın yeterli olup olmadığına mikroskopla numuneye bakılarak karar verilir. Dağlama neticesinde katı bölge matlaşırken sıvı bölge sedefsi bir renge dönüşür. Dağlama, tane sınırlarının açığa çıkarılması, fazların tayin edilmesi ve dislokasyonların belirlenmesi gibi durumlarda yapılmaktadır [219].

Bu çalışmada Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemleri için metalografi kitaplarından faydalanarak uygun dağlayıcı çözeltileri hazırlandı. Çözelti bileşenlerinin oranları değiştirilerek mikroyapıyı en iyi ortaya çıkaran dağlayıcı tespit edildi. Al-Cu-Ni ve Al-Cu-Ti alaşımları, alüminyum alaşımları için sıkça kullanılan Keller dağlayıcısı [1.5ml Hidroklorik asit (HCl), 1ml Hidroflorik asit (HF), 2.5 ml Nitrik asit (HNO₃), 95ml su (H₂O)] ile 30-45 saniye ve Zn-Al-Cu alaşımı ise 10 ml HF ve 90 ml H₂O ile hazırlanan çözeltiyle 45-60 saniye kadar dağlandı.

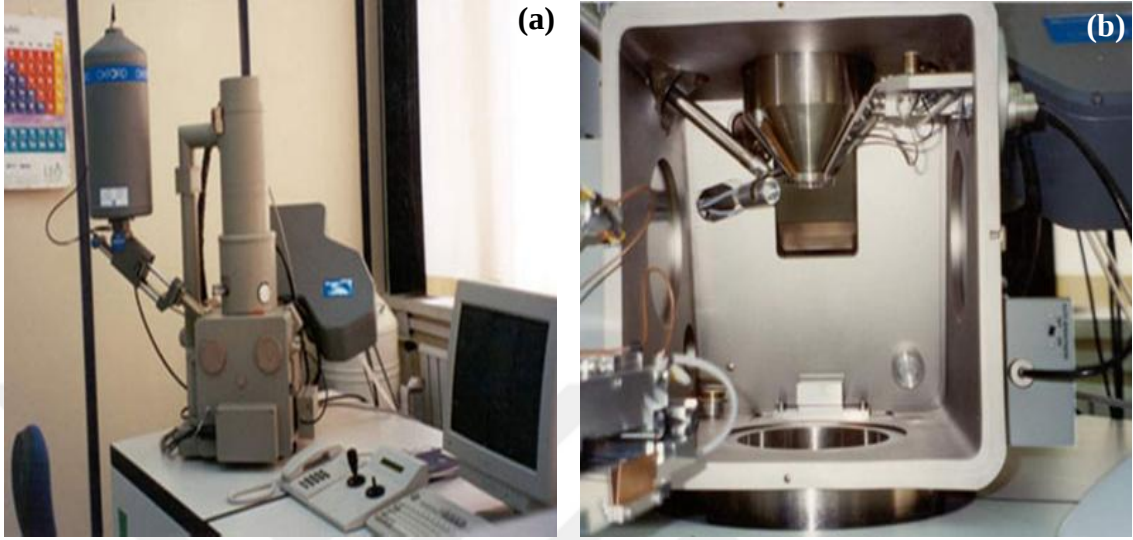
2.2.4. Mikroyapılar

Üretilen her bir numunenin uygun bölgelerinden kesitler alınıp soğuk kalıplama yöntemiyle kalıplandıktan sonra metalografik işlemlere tabi tutuldu ve uygun dağlayıcılarla dağlandı. Üretilen her bir numunenin mikroyapı fotoğrafları taramalı elektron mikroskobuyla (*SEM*) çekildi.

Numunelerin *SEM* fotoğraflarının çekilmesinde **LEO 440** marka bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobu (*SEM*) kullanıldı. Bu mikroskop, 40 kV hızlandırma voltajlı ve Secondary-Backscattered elektron detektörüne sahip $\times(5-300\ 000)$ kat büyütme kapasitelidir. Ayrıca farklı fazların tane yönelimini tespit edebilme özelliği bulunmaktadır. Şekil 2.21’de kullanılan *SEM* mikroskobunun fotoğrafı verilmektedir.

SEM ile fotoğraf çekimine geçmeden önce, parlatılmış ve dağlanmış olan numuneler, kaplama ünitesine yerleştirildi ve yüzeyleri yaklaşık 10-40 nm inceliğinde Au-Pd tabaka ile kaplanarak vakum altına alındı. Burada elektron demetinin yüzeyden daha iyi saçılması ve görüntünün daha iyi kontrast ve netliğe sahip olması amaçlanmıştır. Bu işlemten sonra gümüş tabaka ile kaplanmış numuneler, *SEM*’in vakum haznesi içindeki

numune tablası kısmına yerleştirilerek numunelerin uygun bölümlerinden farklı büyütme oranlarında fotoğrafları çekildi.

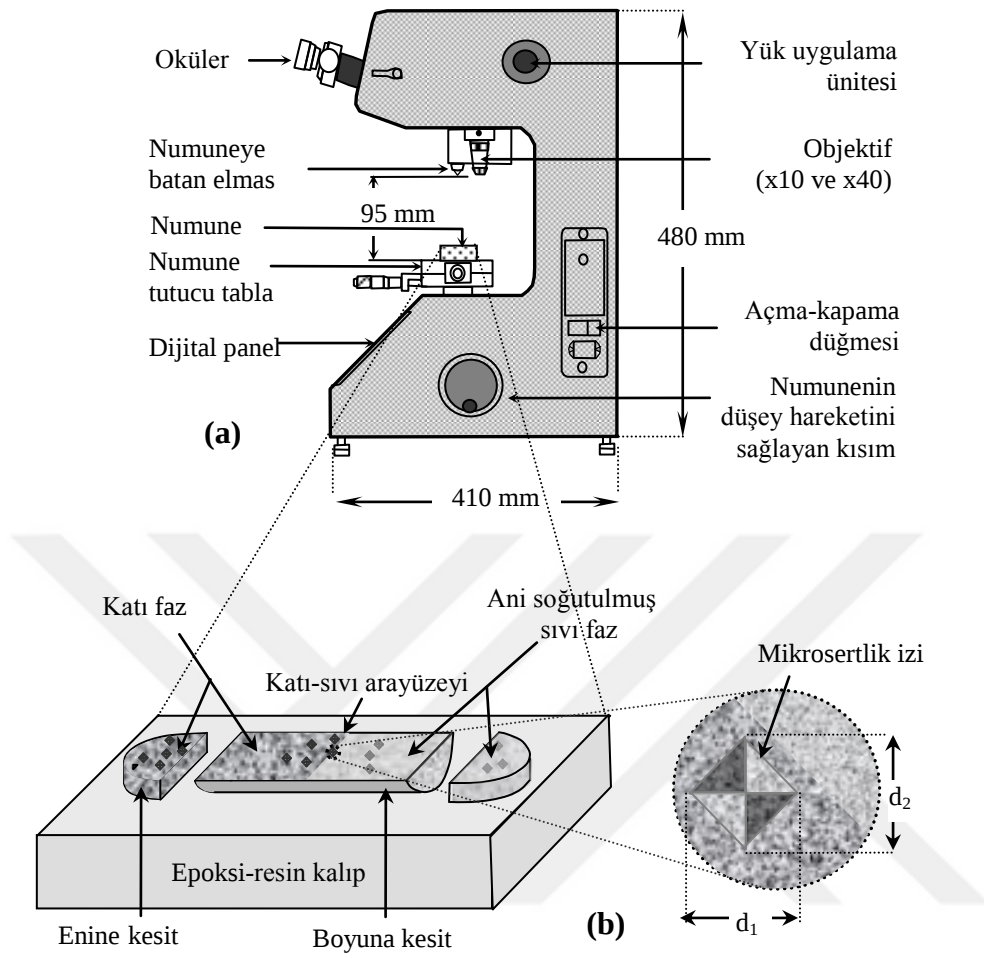


Şekil 2.21. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) fotoğrafı
(a) Dıştan görünüş, (b) İçten görünüş.

2.3. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları optik görüntü sistemi ve *SEM* mikroskobuyla çekildikten sonra mikrosertlik ölçümlerine geçildi. Mikrosertlik ölçümlerinde, şematik yapısı Şekil 2.22’de verilen **Future Tech FM-700** model dijital mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g ve 1000 g’lık yük uygulayabilen, %5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak mikrosertlik değerini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Kendi üzerinde fotoğraf çekme ünitesi olup $\times 200$, $\times 500$ ve $\times 1000$ büyütme değerlerindeki objektiflerle fotoğraf çekebilme özelliklerine sahiptir.

Sekiz farklı katılaştırma hızında katılaştırılan numuneler sırasıyla ölçüm cihazına bağlanarak, her bir numunenin enine kesitinden ve boyuna kesitinin katı-sıvı arayüzeyine yakın katı kesitinden 8-12 adet mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Ölçülen mikrosertlik değerleri kullanılarak, katılaştırma hızının (V) ve mikroyapı parametresi (λ_E) değerleri ile mikrosertlik (HV) değerleri arasındaki ilişki ve bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle 3. Bölüm’de verilmiştir.



Şekil 2.22. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının şematik gösterimi, (b) Numune üzerinde cihazın bıraktığı izin detayları.



Şekil 2.23 Mikrosertlik ölçüm cihazının fotoğrafı.

2.4. Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi

Sekiz farklı hızda katılaştırılan numunelerin her birinden ikişer adet yapılmıştır. Çünkü çekme-dayanım testi için en az 50 mm uzunluğunda düzgün katılaşmış kesite ihtiyaç duyulmuştur. Böylece mikroyapı belirlenmesi ve elektriksel özellikler için ilk numune kullanılırken aynı şartlar altında katılaştırılan ikinci numuneler çekme-dayanım testi için kullanılmıştır.

Farklı katılaştırma hızlarında hazırlanan 4 mm çaplı ve en az 50 mm uzunluğundaki kontrollü katılaştırılmış numuneler **Shimadzu** marka çekme-dayanım cihazının çeneleri arasına sıkıca yerleştirildikten sonra 1 mm/dak hızlarında çekilerek gerilme-uzama eğrileri elde edilmiştir (Şekil 2.24). Böylece elde edilen eğrilerden her bir numunenin çekme-dayanım değeri belirlenerek katılaştırma hızı ve mikroyapıyla değişimi tanımlanmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle 3. Bölüm’de verilmiştir.



Şekil 2.24. Çekme-dayanımı ölçüm cihazının fotoğrafı.

2.5. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi

Hazırlanan ötektik kompozisyondaki her bir alaşımın mikroyapıya bağlı elektriksel özdirenç değerlerinin ölçümünde dört nokta iletkenlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Ölçümler için **Keithley 2400** marka programlanabilir güç kaynağı , **Keithley 2700** marka multimetre ve **Protherm** marka kül fırınından faydalanılmıştır (Şekil 2.25).

Ölçümlerde gümüş tellerin çubuk şekilli numunelere doğrudan teması (kontak) sağlandı. Ölçümler, her bir numune için oda sıcaklığında saniyede bir kez olmak üzere 50 defa ölçüm alınarak yapıldı. Elde edilen ölçüm sonuçlar grafiklerle 3. Bölüm’de verilmiştir.



Şekil 2.25. Elektriksel iletkenlik ölçüm düzeneği.

2.6. Entâlpî ve Öz Isı Ölçülmesi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı malzemelerin termofiziksel karakterizasyonunda kullanılmaktadır. Bu teknik, incelenen numuneye ait bir fiziksel özelliğin sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldüğü veya bir tepkimede soğurulan ya da açığa çıkan ısıнын izlendiği yöntemleri içeren bir analiz tekniğidir. Özellikle erime, kristallenme, faz geçişi, camısı geçiş gibi özellikler doğrudan ölçülmekte, entalpi (ΔH) ve öz ısı (C_p) ise elde edilen eğrilerden hesaplanmaktadır. Diferansiyel taramalı kalorimetre ile birçok malzemenin; entalpi, kristalleşme sıcaklığı, camısı geçiş sıcaklığı, ısı kararlılık, saflık ve curie sıcaklığı gibi özellikleri incelenebilmektedir.

Herhangi bir zamanda numuneye olan ısı akışı, $q/t =$ ısı akışıdır. Numunenin birim zamandaki sıcaklık değişimi ise, $\Delta T/t =$ ısıtma hızıdır. Isı akışını, ısıtma hızına böldüğümüz zaman, $Q/\Delta T$ değerini, yani ısı sığasını (C_p) elde ederiz.

Bu tez çalışmasında endüstriyel uygulamalar için büyük önem arz ettiğinden dolayı çalışılan malzemelerin entalpileri (ΔH) ve özısı değişimleri (ΔC_p) de belirlendi. Bu işlem için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC - Perkin Elmer Diamond modeli) kullanıldı. Şekil 2.26’da bu termal analizde kullanılan Diferansiyel taramalı kalorimetre DSC’nin fotoğrafı verilmektedir. Termal analiz için sabit atmosfer basıncı ve nitrojen

soğutması altında 200-1000 K sıcaklık aralığı, 10 K/dak. ısıtma hızı değerleri kullanıldı. Elde edilen ölçüm sonuçlar grafiklerle 3. Bölüm’de verilmiştir.



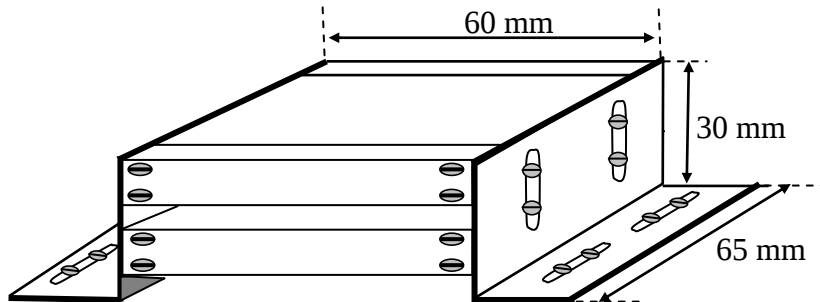
Şekil 2.26. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı.

2.7. Lineer Isı Akış Sistemi

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

2.7.1. Isıtıcı Sistem

Şekil 2.27’de görüldüğü gibi ısıtıcı sistem 2 adet ana gövde, 4 adet kapak ve 2 adet gövde tutucusu olmak üzere sekiz parçadan meydana gelmektedir. Isıtıcı sistem; yüksek sıcaklık iletimi, oksitlenmeye dayanıklılık ve kolay işlenebilir olması nedeniyle pirinç malzemeden yapıldı. Bu sistem 45 mm boyunda, 60 mm eninde ve 6 mm kalınlığında iki pirinç gövdeden oluşmaktadır.



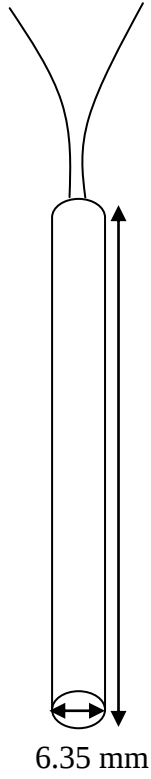
Şekil 2.27. Isıtıcı sistemin genel görünümü [188]

Şekil 2.28’de görüldüğü gibi gövdelerin ön kısmına pirinç malzemeden yapılmış; 60 mm eninde 65 mm boyunda 30 mm kalınlığında; ısıtıcı elementler için üst ve alt ısıtıcı sistemler oluşturuldu. Üst ve alt ısıtıcı sistemlerin her birinin içine 2 adet, 7 mm çapında delikler açılarak ısıtıcı yatağı oluşturuldu. Isıtıcı sistemin sıcaklığını termal çiftle ölçmek için alt ısıtıcı sistemin ısıtıcı elementleri arasına 1.5 mm çapında 35 mm uzunluğunda bir delik açıldı. Isıtıcı sistemin numuneye temas etmesi ve homojen bir ısı dağılımı sağlanması için ısıtıcı sistemin alt ve üst yüzeyleri parlatıldı.

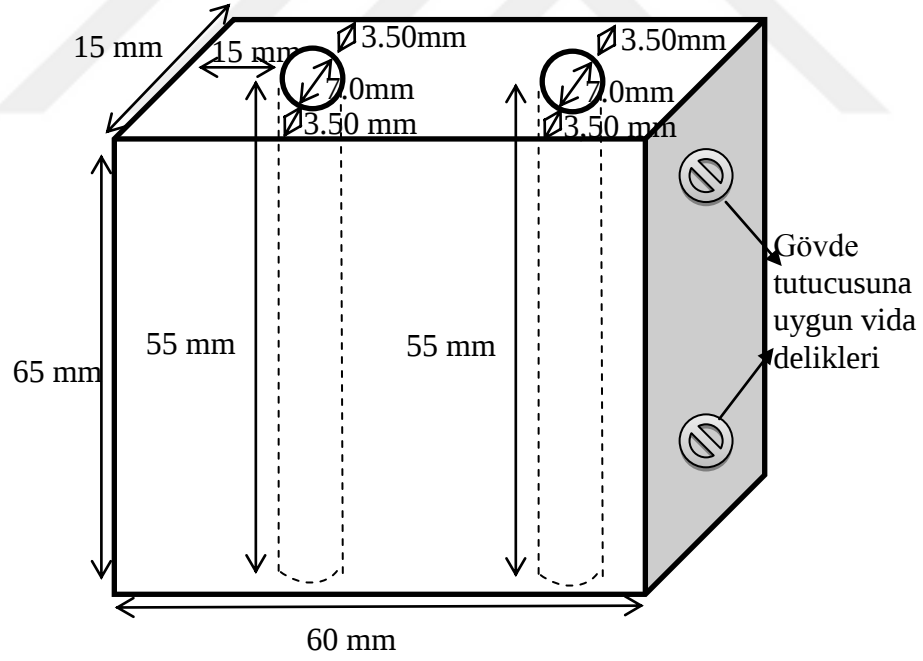
Isıtıcı gövdelerini sabit tutmak ve gövdeler arasındaki düşey mesafeyi numune kalınlığına göre ayarlayabilmek için sağ ve sol tutuculara kaydırılabilir vida yuvaları açıldı [220]. Isıtıcı blok 5 mm kalınlığında, 130 mm eninde ve 310 mm boyunda metal bir tabla üzerine yerleştirildi. Tabla olarak metal kullanılmasının nedeni ise yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasıdır. Isıtıcı sistemin sıcaklığı 2704 tipi Eurotherm sıcaklık kontrolcüsü ile ± 0.01 K aralığında kontrol edildi. Isıtıcı sistemle 673 K sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir.

2.7.2. Soğutucu Sistem

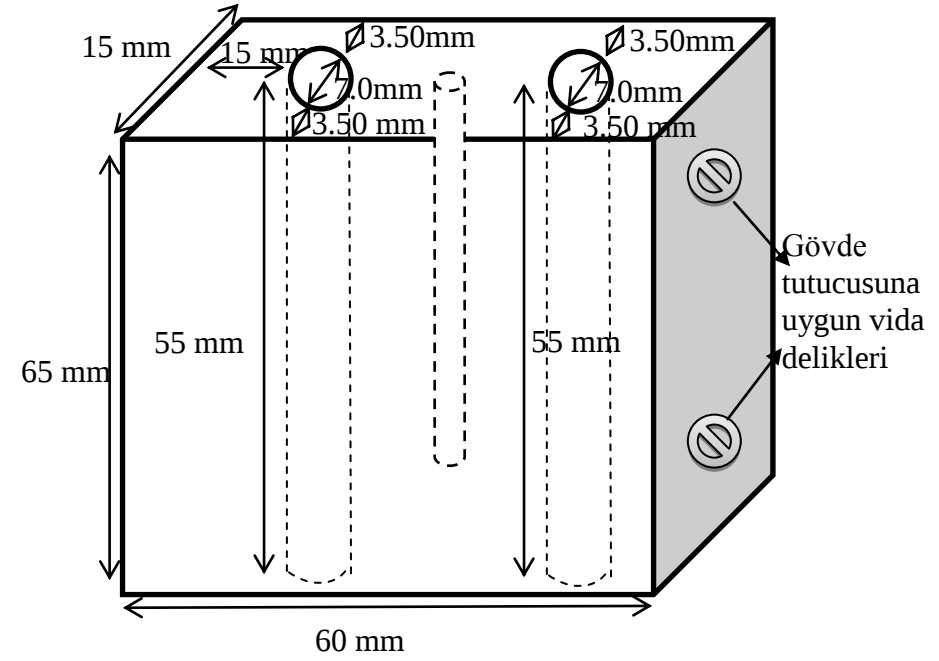
Soğutucu sistem, ısıtıcı sisteme benzer şekilde pirinç malzemeden yapılmış olup 2 adet soğutucu gövde ve 2 adet gövde tutucusu olmak üzere 4 parçadan ibarettir (Şekil 2.29.a). Şekil 2.29.b’de gösterildiği gibi soğutucu gövde, 65 mm uzunluğunda, 60 mm eninde ve 6 mm kalınlığında 2 tane pirinç bloktan yapılmıştır ve her bir bloğa 5 mm çapında su giriş ve çıkış kanalı açılmıştır. Ayrıca homojen soğutma elde edebilmek için 4 mm çapında ve birbirine paralel 4 tane kanal açıldı. Su kanallarının yüksek basınca dayanabilmesi ve suyu sızdırmaması için kanal girişleri kaynak ile kapatıldı. Sadece su giriş ve çıkış delikleri açık bırakılmak suretiyle bu deliklere 3 mm çapında 8 cm uzunluğunda pirinç borular kaynak edildi. Alt ve üst soğutucu blokların numune tutucusuna tam temasının sağlanması için soğutucu sistemin temas noktaları parlatma setinde parlatıldı. Su geçişini sağlamak amacıyla alt soğutucu bloğun çıkışı ile üst soğutucu bloğun girişi hortum ile bağlandı. Bu şekilde su devir-daimi yapılarak sistem homojen olarak soğutulmakta ve incelenecek numunenin sabit bir sıcaklık gradyentinde tutulması sağlanmaktadır.



Isıtıcı Element



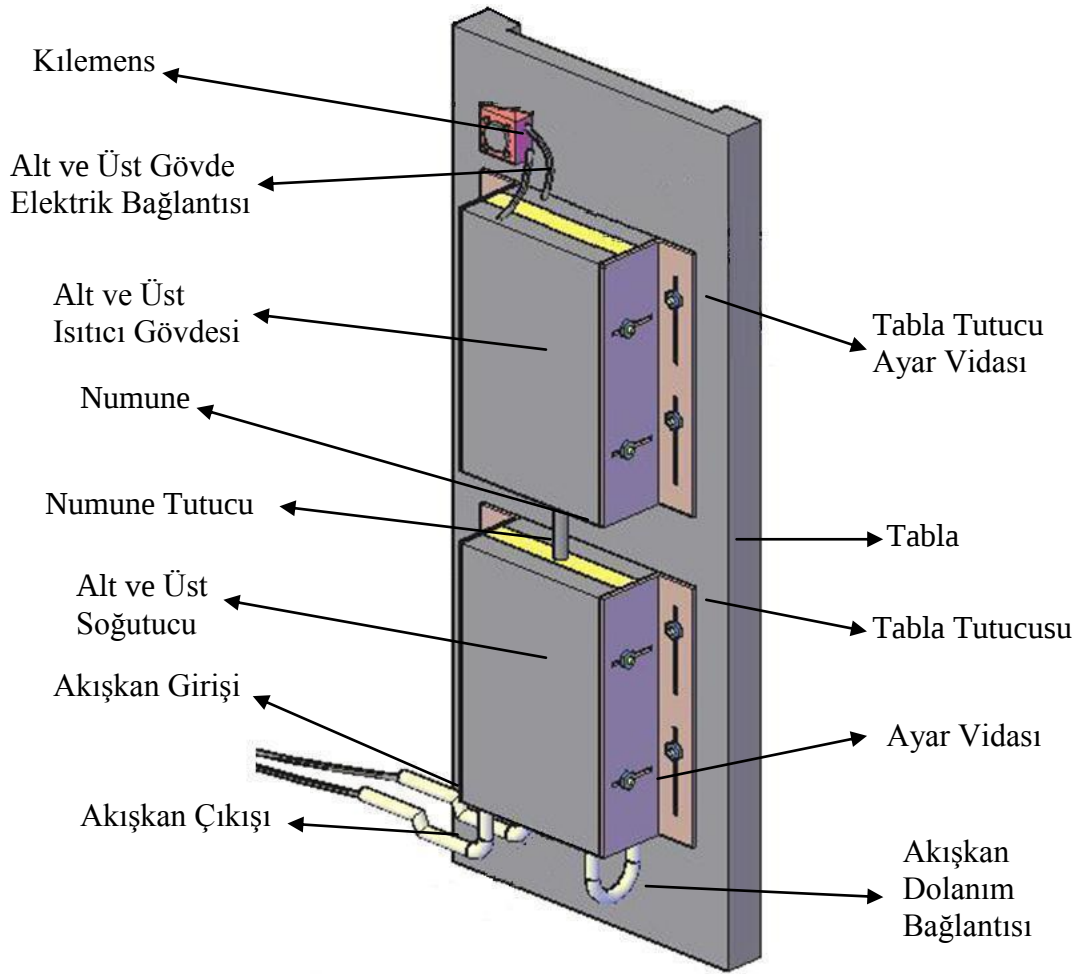
(a)



(b)

Şekil 2.28. Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı

Soğutucu sistemin sıcaklığı 9702 model PolyScience tipi dijital su dolanım sistemi ile kontrol edildi. Kullandığımız su dolanım sistemi; 13 litre su kapasitesine sahip olup 233 K (-40°C) ile 473 K (200°C) arasında sıcaklık kontrolü yapabilmektedir. $\pm 0,01$ K sıcaklık hassasiyetine sahip dijital LCD grafik özelliğine sahiptir. Su dolanım sistemi; 12-25 litre/dakika pompalama hızına ve 8-18 litre/dakika emme hızına sahiptir [220].

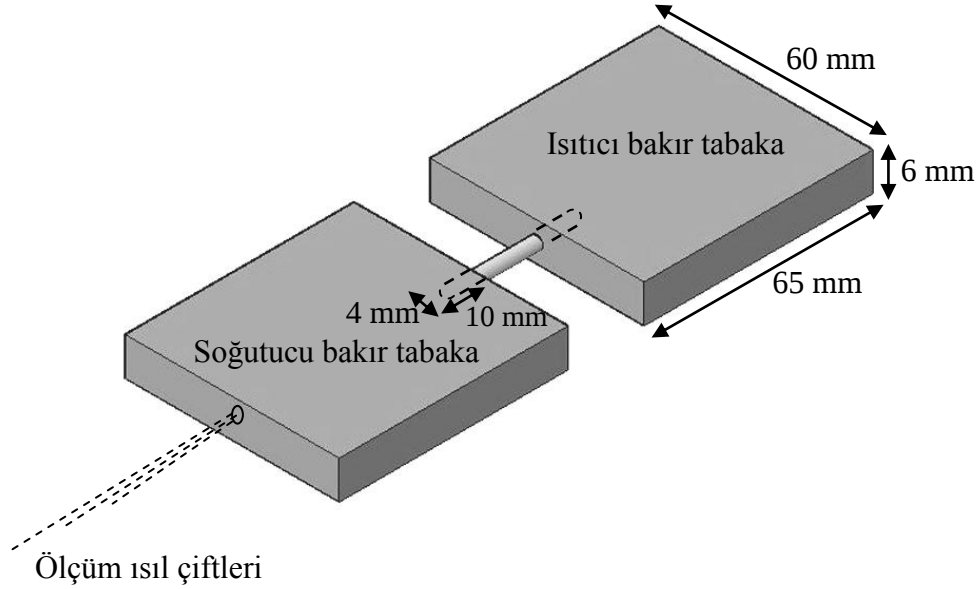


Şekil 2.30. Soğutucu-ısıtıcı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü [188].

2.7.3. Numune Tutucu

Numune tutucu Şekil 2.31’de gösterildiği gibi 60 mm boyunda 65 mm eninde 6 mm yüksekliğinde iki bakır tabakadan oluşur. Burada bakır tercih edilmesinin nedeni erime noktasının ve iletkenliğinin yüksek olmasıdır. Numune tutucu malzemeyi sıcak ve soğuk sistemler arasına yerleştirmek ve numune içinde iyi bir ısı iletimi elde etmek için kullanılmıştır. Numune tutucularına malzemeyi yerleştirmek için 10 mm derinliğinde ve

4 mm çapında iki delik açılmıştır. Isıl çiftlerini numuneye yerleştirmek için de soğutucu bakır tabaka arkasına 3 mm çapında bir delik açılmıştır.



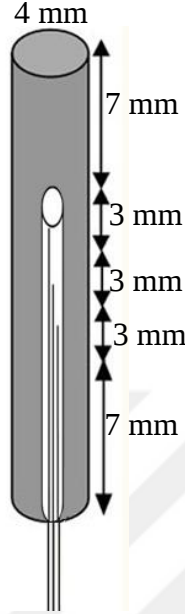
Şekil 2.31. Numune tutucunun şematik gösterimi [188]

2.7.4. Numunenin Lineer Isı Akış Sistemine Yerleştirilmesi

23 mm uzunluktaki numunenin her iki ucu sıkıca 10 mm uzunluktaki soğuk ve sıcak bakır numune tutucu tabakalardaki iki deliğin içine yerleştirildi. Böylece numune içinde doğrusal bir sıcaklık gradyenti elde etmek ve radyal ısı kaybını önlemek için ısıtıcı ve soğutucu sistemler arasında 3 mm' lik bir kısım açıkta kaldı. Bakır tabakalar sonra soğutucu ve ısıtıcı sistem içine yerleştirildi. Sonrasında, ısı çiftler Şekil 2.31'de olduğu gibi soğutucu sistemdeki 3 mm lik boşluğa yerleştirildi. Numunenin farklı üç bölümündeki sıcaklık, Şekil 2.32'de gösterildiği gibi hazırlanan numune içine yerleştirilen ısı çiftleriyle ölçüldü.

Burada termal çiftler hakkında genel bir bilgi vermek faydalı olacaktır. Termal çiftler fırınların ve ısıtılan maddelerin sıcaklıklarının hassas bir biçimde ölçülmesinde ve sıcaklık kontrolü yapan aletlerde kullanılır. Termal çift; iki farklı iletken telden oluşan ve sıcaklık ölçümünde kullanılan iletken tel çiftidir. En yaygın kullanılan termal çiftler Chromel – Alümel (K tipi) ve Platin – Platin %13 Rodyum (R tipi) termal çiftlerdir.

Düşük sıcaklıklarda K tipi termal çiftlerinin, yüksek sıcaklıklarda ise R tipi termal çiftlerinin kullanılması daha uygundur [220].

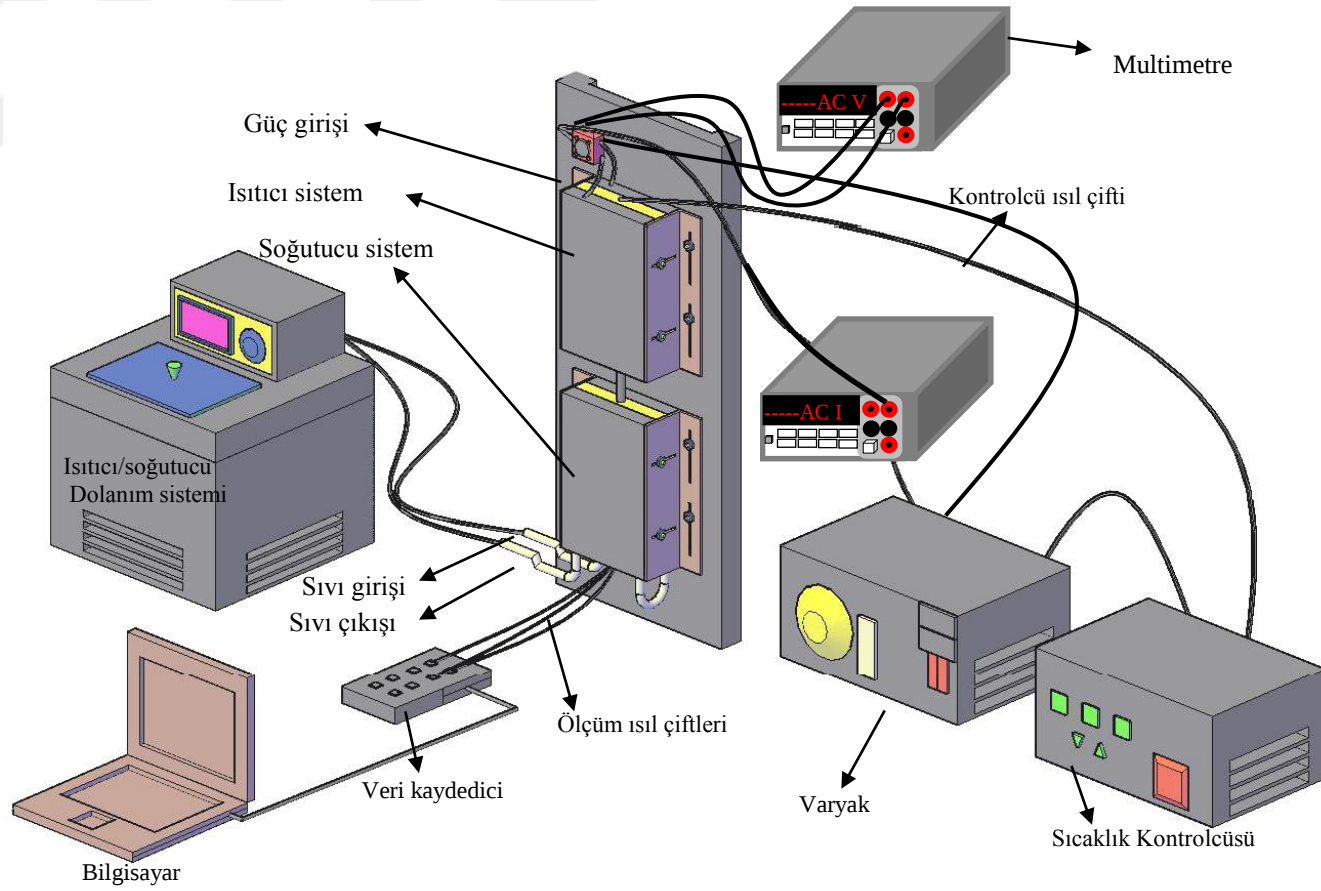


Şekil 2.32. Numunenin ve ısıl çiftlerin konumlarının şematik çizimi



Şekil 2.33. Numunelerin ısıl iletkenlik, katılaştırma hızı ve soğuma eğrisi ölçümünde kullanılan termal çiftler [221].

Üç ısıl çift 3 mm aralıklarla yerleştirilip ve ölçüm esnasında kaymamaları için bantla masaya sabitlendi. Isıtıcı ve soğutucu sistemler aralarında 3 mm olacak şekilde bir metal tabaka üzerine yerleştirildikten sonra metal tabaka, ısı iletimi üzerine konveksiyon etkisini azaltmak ve numune içine doğru sabit bir doğrusal sıcaklık gradyenti elde etmek için, ısıtıcı sistem üstte soğutucu sistem altta olacak biçimde Şekil 2.34'te gösterildiği gibi düşey olarak sabitlendi.



Şekil 2.34. Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü [188].

Isıl çiftleri numune içine yerleştirmeden önce, ısıl çiftler arasındaki uzaklığı (ΔX) ölçmek için ısıl çiftlerin konumlarının optik mikroskopla fotoğrafları alındı. Sonra bütün ısıl çiftler birlikte dış çap 1.2 mm $\times$ iç çap 1.0 mm $\times$ uzunluk 16 mm ebatlarındaki doğrusal katılaştırılmış numunelerin içindeki alümina tüplerin içine yerleştirildi ve daha sonra ısıl çiftlerin uçları veri kaydedici (data logger) ve bilgisayardan oluşan ölçme ünitesine bağlandı.

2.7.5. Lineer Isı Akış Sisteminde Bir Deneyin Yapılışı

Isıl iletkenlik katsayısının hassas bir şekilde ölçülebilmesi sıcaklık kontrolünün çok iyi olmasıyla mümkündür, bu yüzden ısıtıcı sistemin sıcaklığı ± 0.01 K hassasiyetle Eurotherm 2604 tipi sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilir ve soğutucu sistemin sıcaklığı ise ± 0.01 K hassasiyetle Poly Science digital 9702 model ısıtma/soğutma dolaşım banyosu ile sabit tutulur. Numune her sıcaklık için en az yaklaşık iki saat boyunca kararlı halde tutulur. Hareketsiz ısıl çiftlerin sıcaklıkları *Pico TC-08* veri-kaydedici ile ısıtma boyunca kaydedilir ve iki ısıl çift arasındaki sıcaklık farkı ΔT veri-kaydedici kayıtlarından okunur. Potansiyel farkı ve akım AC olarak *Hewlett-Packard 34401-A* tipi multimetre ile ölçülür ve not edilir. Deneye başlamadan önce soğutucu Poly Science digital 9702 model ısıtma/soğutma dolaşım banyosu açılarak 278 K sıcaklıkta soğutucu sistemin sıcaklığı sabitlendi. Isıtıcı sisteme güç sağlayan varyak en düşük seviyesinde açılıp yavaş yavaş ısıtıldı. Isıtıcı sistem kontrolcüsünde set sıcaklığı 323 K (50° C) olarak ayarlandı ve sabit bir sıcaklık gradyenti için sistemin kararlı hale gelmesi beklendi. Kararlı hale gelince veri-kaydedici ile 3 farklı noktanın sıcaklıkları ölçülerek kaydedildi. Benzer şekilde doğrusal katılaştırılan Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşımları için ayrı ayrı bütün katılaştırma hızlarındaki numuneler 323 K (50° C) sıcaklığına kadar ısıtılıp sistem kararlı hale geldikten sonra gerekli ölçümler alındı ve böylece her bir alaşımın farklı katılaştırma hızlarında ısıl iletkenlikleri lineer ısı akış sistemi ile elde edildi.

Bu bölümde deneysel sistem ve düzenekler tanıtıldıktan sonra bir deneyin yapılış aşamaları, numune üzerinde yapılan metalografik işlemler ile mikroyapı, mikrosertlik, çekme dayanım, elektriksel iletkenlik ve lineer ısı akış sisteminde ısıl iletkenlik ölçümünün nasıl yapıldığı kısaca anlatıldı. Bir sonraki bölümde bu tez çalışması kapsamında Al-Cu-Ni (Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.)), Al-Cu-Ti (Al-%33 Cu-%0.1 Ti

(ağ.) ve Zn-Al-Cu (Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.)) ötektik alaşım sistemleri üzerine yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde verilecektir.



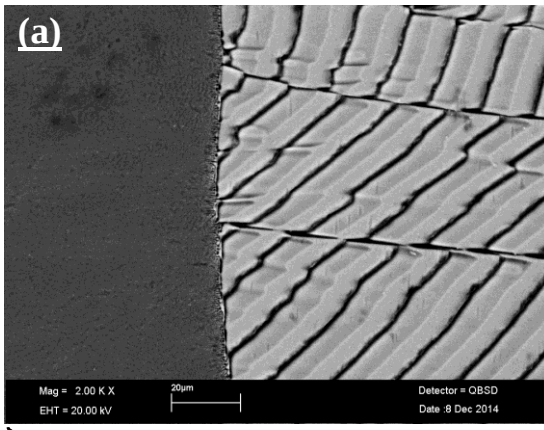
3. BÖLÜM

BULGULAR

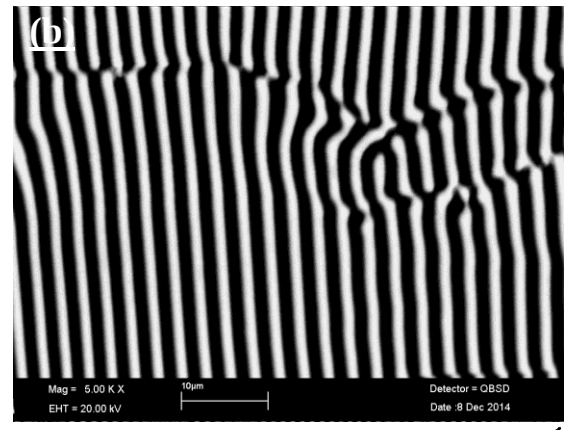
Bu bölümde çalışılan Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.), Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) ve Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) alaşımların kompozisyonlarını belirlemek için kullanılan faz diyagramları EK-1 de verilmiştir ve bu kompozisyonlardaki ötektik alaşım sistemleri için yapılan kontrollü katılaştırma deneylerinden elde edilen mikroyapılardan ötektik mesafe ölçümleri yapılmış ve bu sonuçların katılaştırma parametresi olan katılaştırma hızına göre değişimleri incelenmiştir. Katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısı iletkenlik üzerine etkileri araştırılıp aralarındaki bağıntılar belirlenmiş, sonuçlar tablo ve grafiklerle verilmiştir. Ayrıca, çalışılan alaşımların öz ısı, entalpi ve erime sıcaklığı değerleri de elde edilmiştir.

3.1. Ötektik Alaşımlarda Gözlenen Mikroyapılar

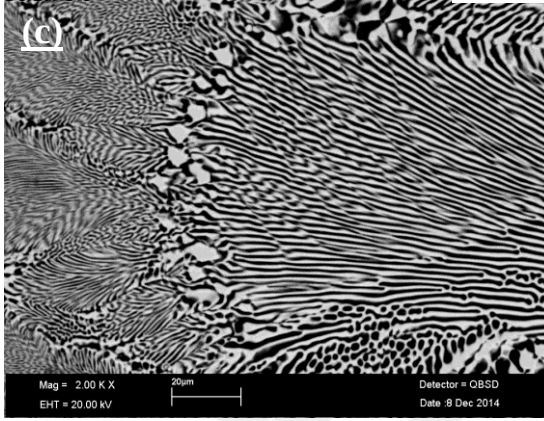
Kontrollü katılaştırma fırınında farklı katılaştırma parametrelerinde üretilen her bir numunenin hem optik hem de *SEM* fotoğrafları farklı büyütmelerde çok sayıda çekilmiştir. Katılaştırma deneyleri neticesinde alaşımların mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde öncelikle optik mikroskop kullanılmış ancak optik mikroskobun büyütmesinin yetersiz kaldığı, fazları ayırt edemediği durumlarda özellikle yüksek katılaştırma hızlarında fazların net bir biçimde belirlenmesi için bütün katılaştırma hızlarında alaşımların *SEM* mikroskobu ile fotoğrafları çekilmiştir. Bu kapsamda; sabit sıcaklık gradyenti ($G_{AlCuNi} = 4.93 \text{ K/mm}$, $G_{AlCuTi} = 6.45 \text{ K/mm}$, $G_{ZnAlCu} = 3.67 \text{ K/mm}$) farklı katılaştırma hızlarında kontrollü katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşımlarının *SEM* mikroskoplarıyla çekilen mikroyapı fotoğraflarından bazı örnekler Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3’de verilmiştir.



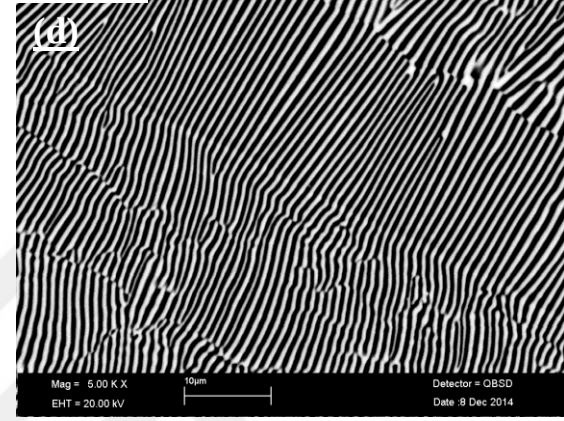
(a) boyuna kesit



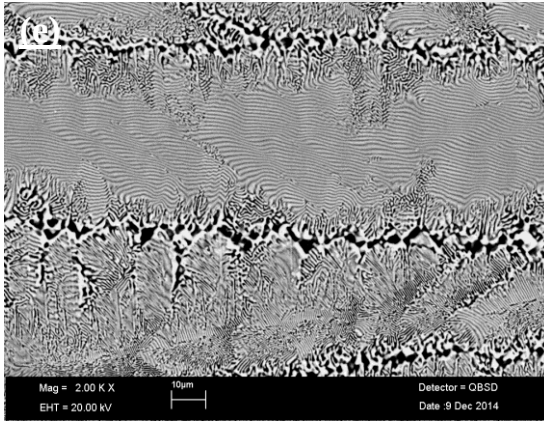
(b) enine kesit

[V= 9.25 $\mu\text{m s}^{-1}$]

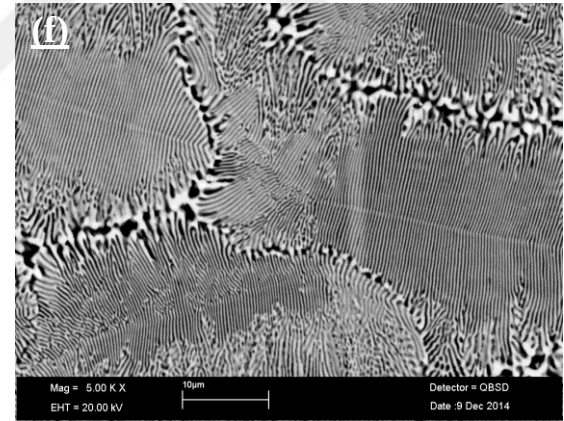
(c) boyuna kesit



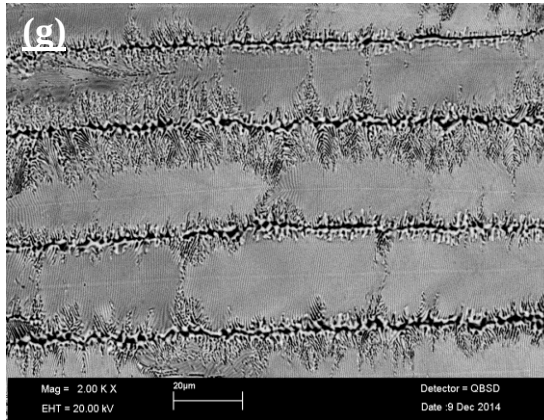
(d) enine kesit

[V=94.35 $\mu\text{m s}^{-1}$]

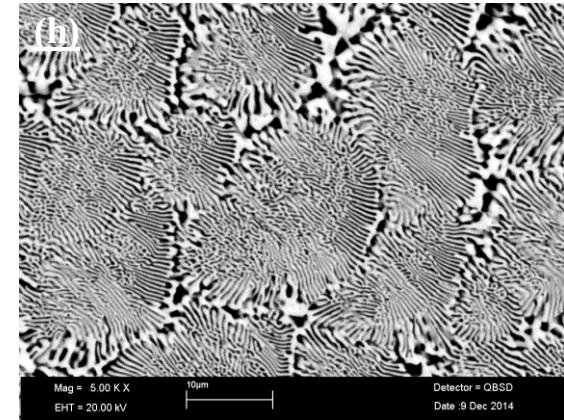
(e) boyuna kesit



(f) enine kesit

[V=1024.45 $\mu\text{m s}^{-1}$]

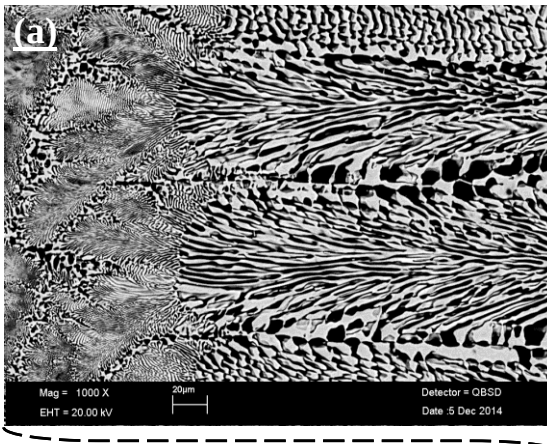
(g) boyuna kesit



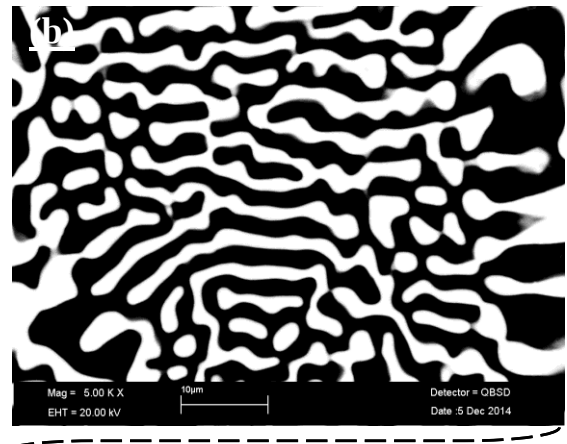
(h) enine kesit

[V=2056.68 $\mu\text{m s}^{-1}$]

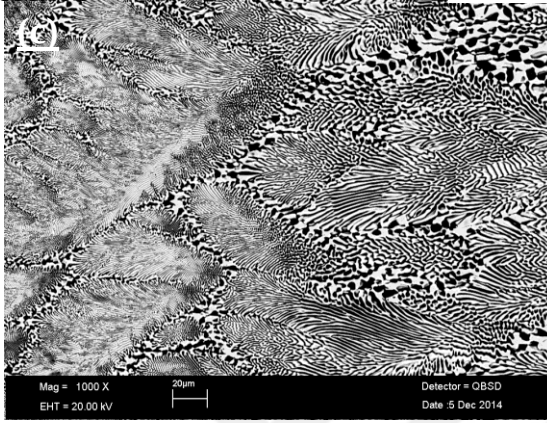
Şekil 3.1. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=9.25\text{-}2056.68 \mu\text{m/s}$) doğrusal katılaştırılmış Al-% 32.5 Cu-% 1 Ni (ağ.) ötektik alaşımının düşük ve yüksek katılaştırma hızlarında çekilen bazı SEM fotoğrafları.



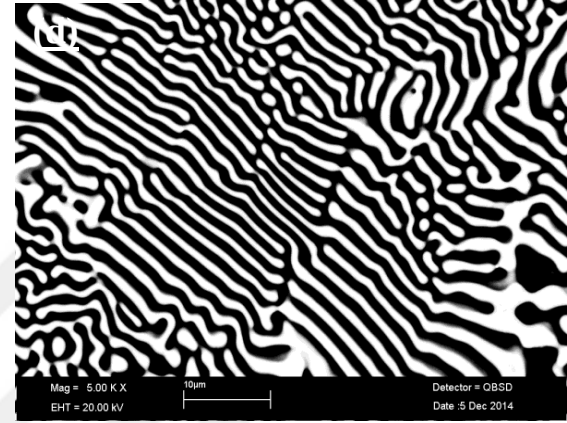
(a) boyuna kesit



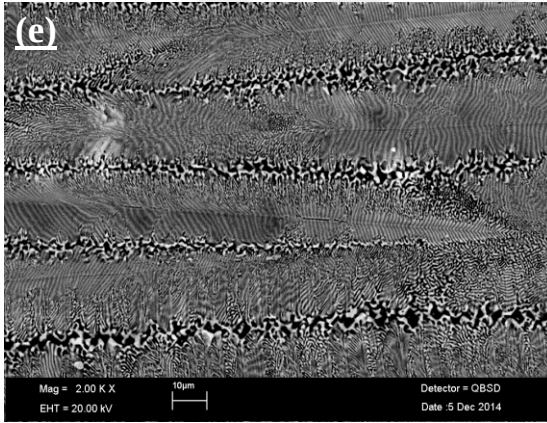
(b) enine kesit

[V= 8.58 $\mu\text{m s}^{-1}$]

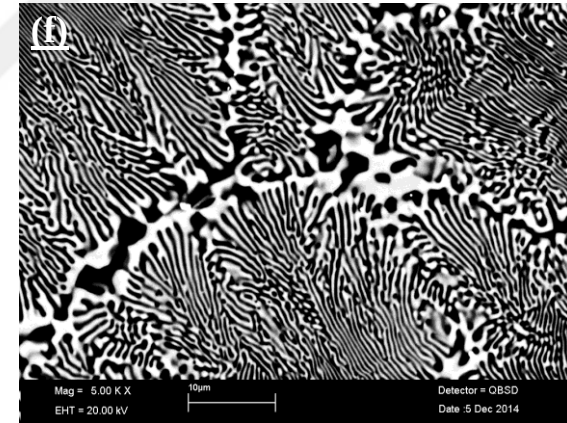
(c) boyuna kesit



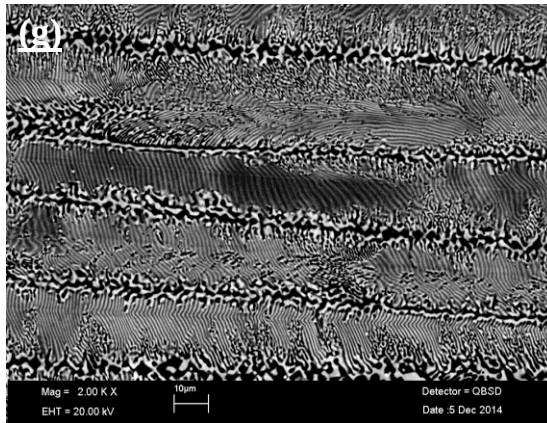
(d) enine kesit

[V=42.85 $\mu\text{m s}^{-1}$]

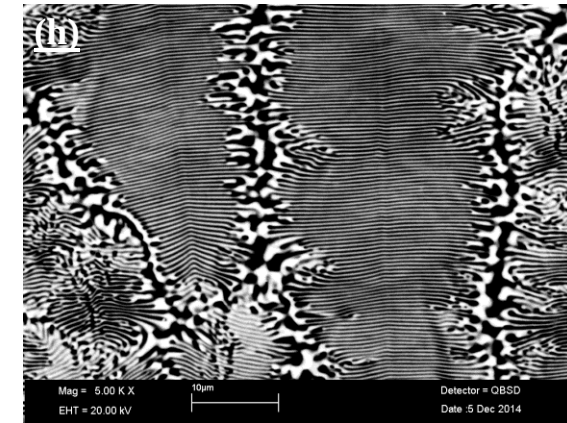
(e) boyuna kesit



(f) enine kesit

[V=1018.16 $\mu\text{m s}^{-1}$]

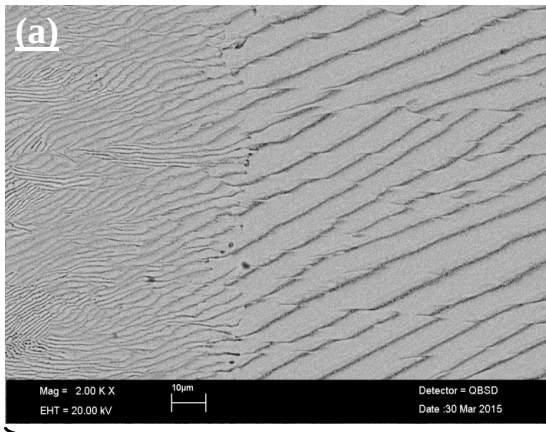
(g) boyuna kesit



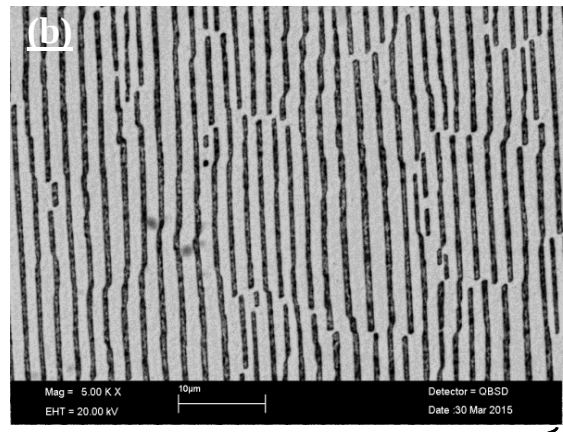
(h) enine kesit

[V=2038.65 $\mu\text{m s}^{-1}$]

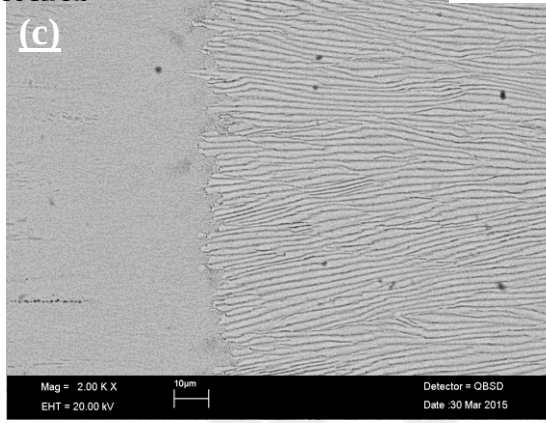
Şekil 3.2. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.58-2038.65 \mu\text{m/s}$) doğrusal katılaştırılmış Al-% 33 Cu-% 0.1 Ti (ağ.) ötektik alaşımının düşük ve yüksek katılaştırma hızlarında çekilen bazı SEM fotoğrafları.



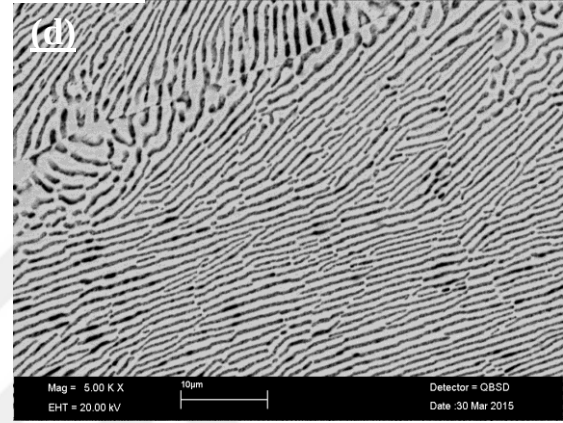
(a) boyuna kesit



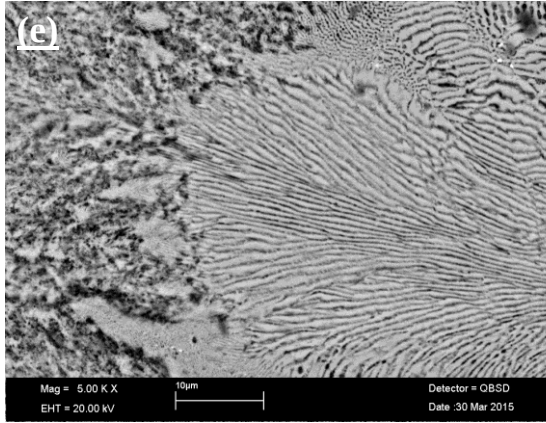
(b) enine kesit

[V= 8.45 $\mu\text{m s}^{-1}$]

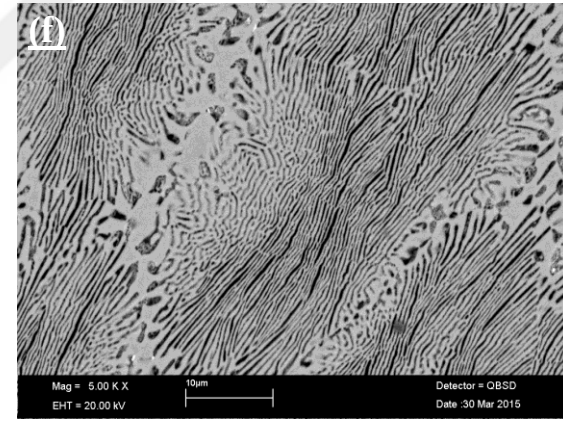
(c) boyuna kesit



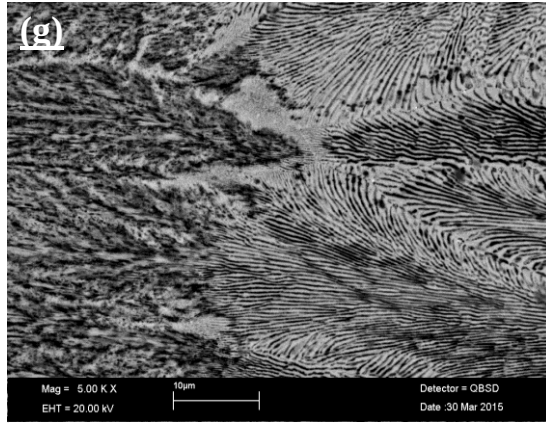
(d) enine kesit

[V=86.14 $\mu\text{m s}^{-1}$]

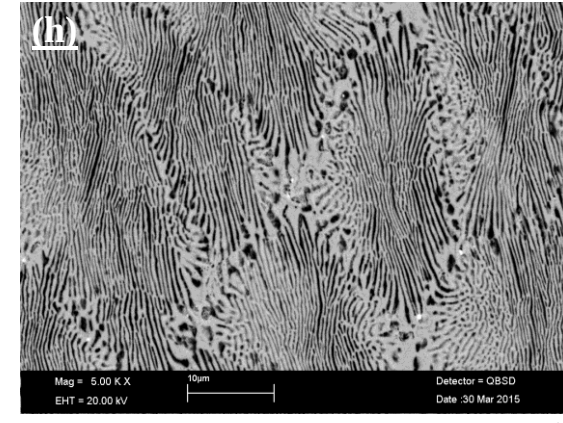
(e) boyuna kesit



(f) enine kesit

[V=1032.47 $\mu\text{m s}^{-1}$]

(g) boyuna kesit



(h) enine kesit

[V=2087.15 $\mu\text{m s}^{-1}$]

Şekil 3.3. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.45\text{-}2087.15 \mu\text{m/s}$) doğrusal katılaştırılmış Zn-% 5 Al-% 0.5 Cu (ağ.) ötektik alaşımının düşük ve yüksek katılaştırma hızlarında çekilen bazı SEM fotoğrafları.

3.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi

Her bir ötektik sistem için yapılan katılaştırma deneyleri neticesinde faz diyagramlarında da tanımlandığı gibi bazı fazlar birbirinden ayrılmıştır. İncelenen ötektik alaşımlarda belirginleşen her bir fazın nokta bileşim analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda yukarıda verilen mikroyapı fotoğraflarından Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşımlarında gri ve siyah olmak üzere iki farklı fazın ötektik büyüdüğü gözlemlendi.

Şekil 3.1’de verilen mikroyapı fotoğraflarından Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.) ötektik alaşımının kontrollü katılaştırılması neticesinde siyah ve gri olmak üzere iki farklı fazın ötektik büyüdüğü gözlemlendi. Yapılan EDX analizleri sonucunda Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bu fazların;

- *Siyah lamelsel fazın Al(α) çözelti fazı (Al-%8.56Cu (ağ.))*
- *Gri lamelsel fazın Al₂Cu intermetalik fazı (Al-%54.01Cu (ağ.))*

olduğu belirlendi (Şekil 3.4).

Şekil 3.2’de verilen mikroyapı fotoğraflarından Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) ötektik alaşımının kontrollü katılaştırılması neticesinde siyah ve gri olmak üzere iki farklı fazın ötektik büyüdüğü gözlemlendi. Yapılan EDX analizleri sonucunda Şekil 3.2’de gösterildiği gibi bu fazların;

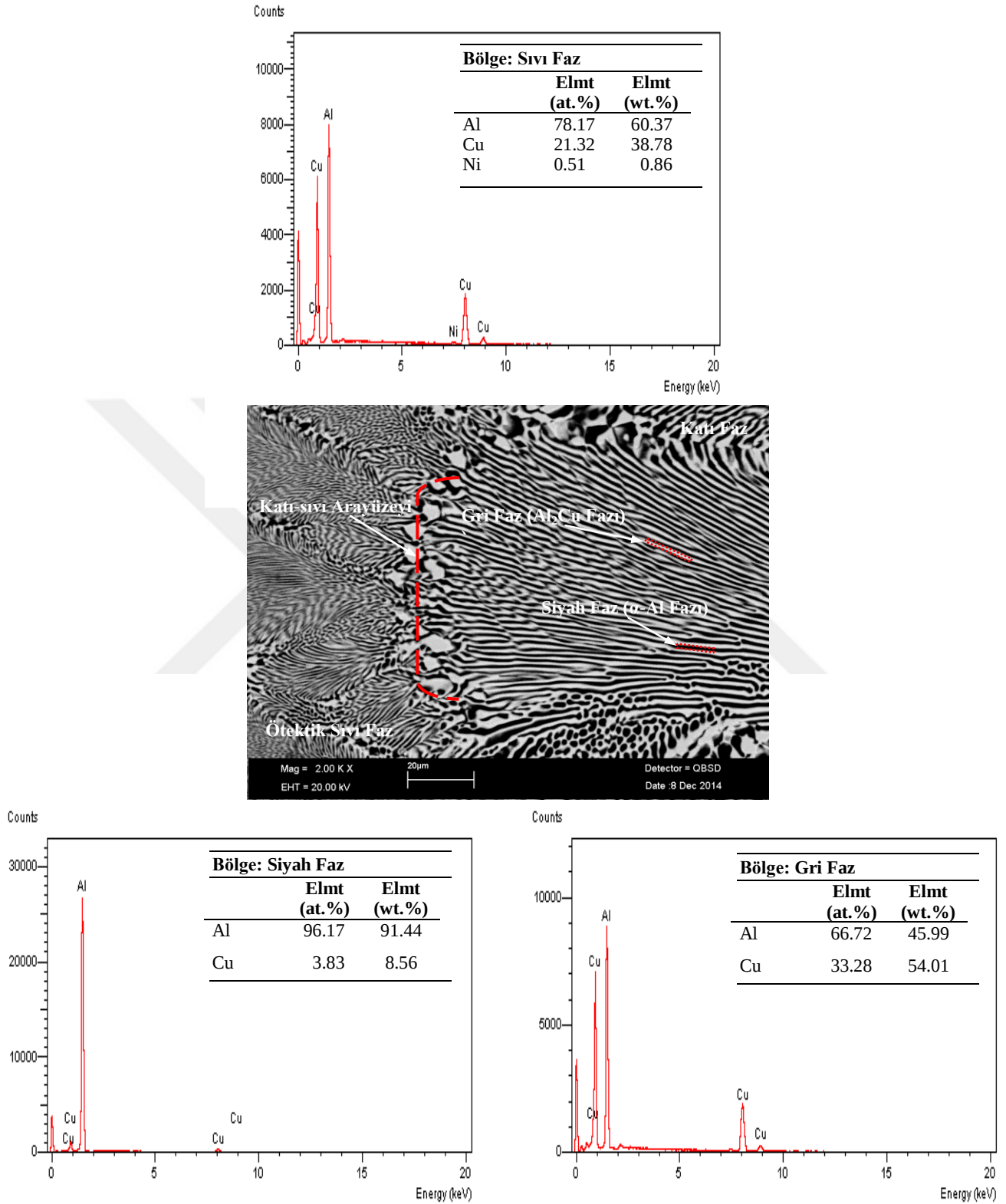
- *Siyah lamelsel fazın Al(α) çözelti fazı (Al-%6.32Cu (ağ.))*
- *Gri lamelsel fazın Al₂Cu intermetalik fazı (Al-%52.42Cu (ağ.))*

olduğu belirlendi (Şekil 3.5).

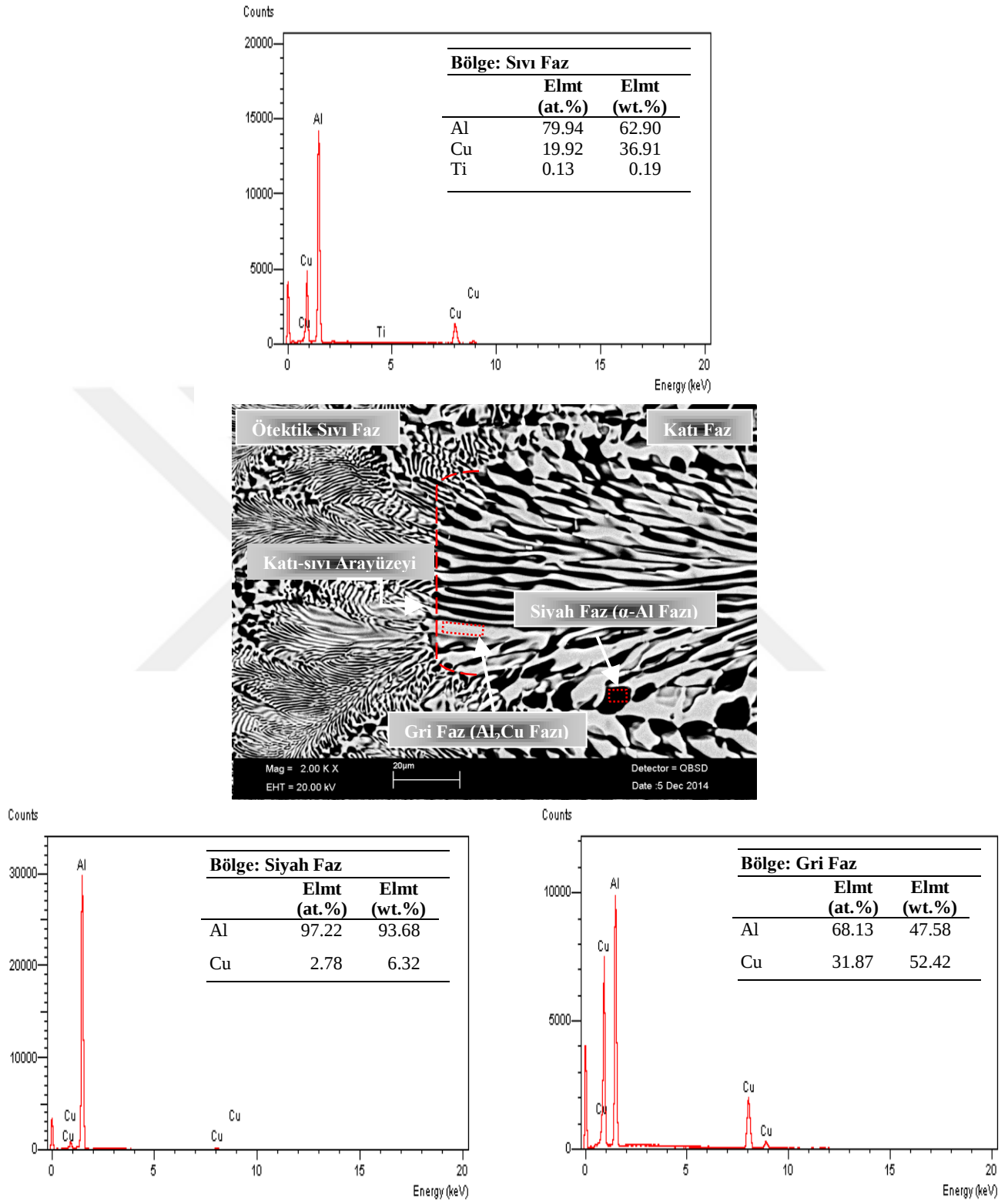
Şekil 3.3’de verilen mikroyapı fotoğraflarından Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) ötektik alaşımının kontrollü katılaştırılması neticesinde siyah ve gri olmak üzere iki farklı fazın ötektik büyüdüğü gözlemlendi. Yapılan EDX analizleri sonucunda Şekil 3.3’de gösterildiği gibi bu fazların;

- *Siyah lamelsel fazın Al(α) çözelti fazı (Al-%24.72Zn (ağ.))*
- *Gri lamelsel fazın Zn(η) çözelti fazı (Al-%97.38Zn--%1.78Cu (ağ.))*

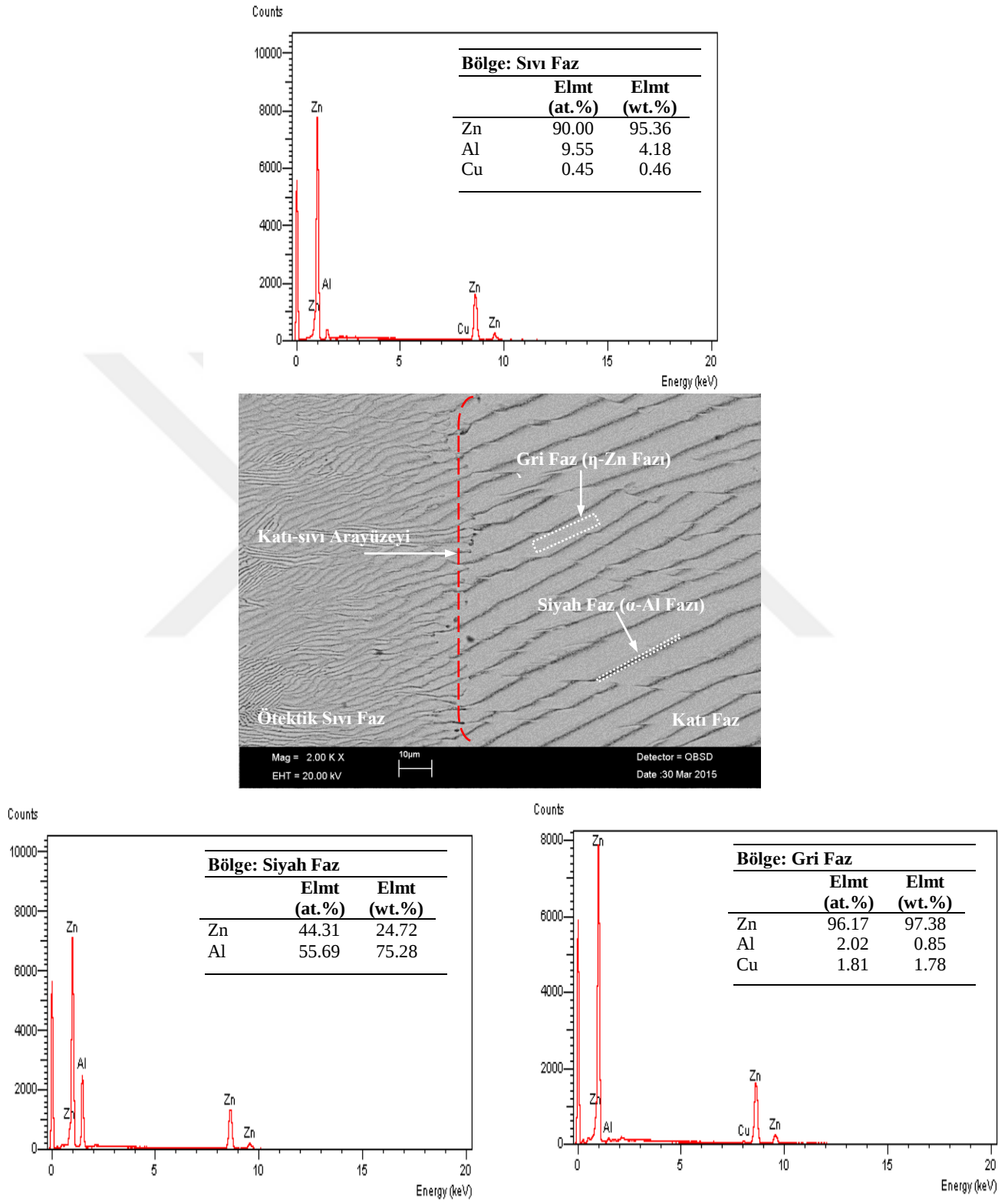
olduğu belirlendi (Şekil 3.6).



Şekil 3.4. Al-Cu-Ni ötektik alaşımının kimyasal bileşim analizi (EDX); Siyah faz (Al(α) çözelti fazı), gri faz (Al₂Cu intermetalik fazı) ve ani soğutulmuş ötektik sıvı faz.



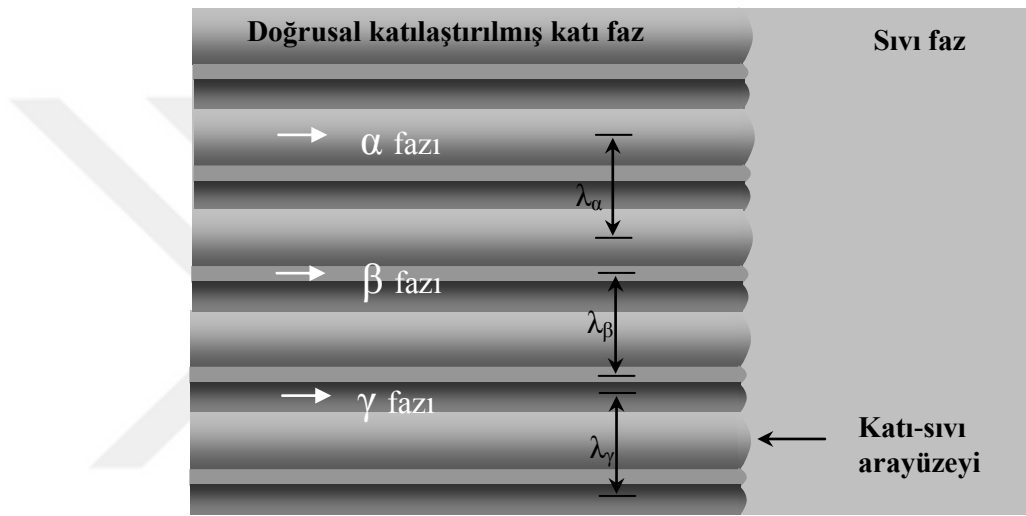
Şekil 3.5. Al-Cu-Ti ötektik alaşımlarının kimyasal bileşim analizi (EDX); Siyah faz ($Al(\alpha)$ çözelti fazı), gri faz (Al_2Cu intermetalik fazı) ve ani soğutulmuş ötektik sıvı faz.



Şekil 3.6. Zn-Al-Cu ötektik alaşımasının kimyasal bileşim analizi (EDX); Siyah faz (Al(α) çözelti fazı), gri faz (Zn (η) çözelti fazı) ve ani soğutulmuş ötektik sıvı faz.

3.3. Ötektik Mesafelerin Ölçülmesi

Ötektik mesafe λ_E , Şekil 3.7’de verildiği gibi en yakın α - α , β - β veya γ - γ fazlarının merkezleri arasındaki uzaklıktır. Başka bir ifadeyle ötektik mesafe λ_E , α , β ve γ fazlarının toplam genişliğidir. Fakat katılaştırma neticesinde fazların dizilim periyodu her zaman sıralı düzenli olmayabilir. Bu nedenle düzenli simetriye sahip olmayan mikroyapılarda ötektik mesafe olarak sadece α , β ve γ fazları arasındaki mesafeler (λ_α , λ_β , λ_γ) ölçülebilmektedir.



Şekil 3.7. Ötektik mikroyapılar arası mesafelerin gösterimi (boyuna kesit).

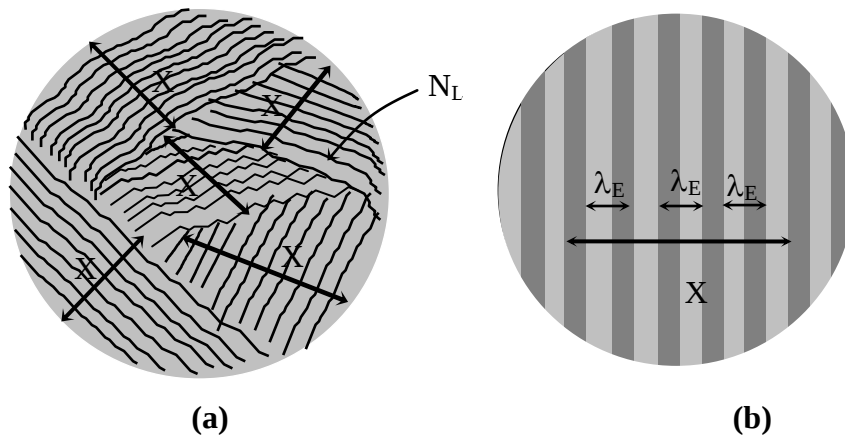
Ötektik mesafe ölçümlerinin daha hassas yapılabilmesi amacıyla ötektik sistemlere ait mikroyapıların fotoğrafları mikroskopta büyük objektiflerle çekildi. Numunelerin mikroyapılarının çekildiği objektifler numune ebatlarını farklı oranlarda büyütürük görüntülediği için, her bir objektifin düzeltme çarpanı hesaplandı ve **Adobe Photoshop CS2** programı yardımıyla ölçülen mikroyapı değerleri ile çarpılarak gerçek ötektik mikroyapı değerleri tespit edildi. Bu tez çalışmasında daha güvenilir olduğu için numunelerin enine kesitlerinden alınan ölçümler değerlendirildi. Ayrıca sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla farklı katılaştırma parametrelerinde üretilen her bir numune üzerinden çok sayıda (her bir numune için yaklaşık 30) ölçüm alınarak ortalama değerler hesaplandı. Ötektik mesafelerin ölçümünde Şekil 3.8’de gösterildiği gibi kesişim (intercept) metodu [222] kullanıldı. Ötektik mesafeler,

$$\lambda_E = \frac{X}{N_L - 1} \quad (3.1)$$

ifadesi ile hesaplandı. Burada X , lamellerin toplam genişliği, N_L ise toplam lamel sayıdır.

3.3.1. Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu Ötektik Alaşımlarında Mikroyapıların Ölçümü

Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.), Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) ve Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) ötektik alaşımları doğrusal katılaştırıldığında iki fazın lamelsel (ötektik) formda büyüdüğü gözlenmiştir. Bu tez çalışmasındaki alaşım sistemlerinde düzenli bir yapı söz konusudur. Ancak alışılmışın dışında yüksek katılaştırma hızları kullanıldığı için yüksek katılaştırma hızlarında düzenli yapı Şekil 3.1-3' den de görüldüğü gibi yerini düzensiz hücresel ötektik büyümeye bırakmıştır. Ayrıca çalışılan alaşımların ötektik mikroyapıları α ve β fazlardan oluşmaktadır. Ötektik mikroyapıların hesaplanmasında SEM mikroskopuyla çekilen farklı büyütmelerdeki fotoğraflar kullanıldı. Farklı bölgelerden çok sayıda ölçüm alınarak verilerin istatistiksel güvenilirliği artırıldı. Şekil 3.9'da Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşımları için ötektik mesafelerin ölçümünde kullanılan örnek fotoğraflar ve ölçümler verilmiştir.

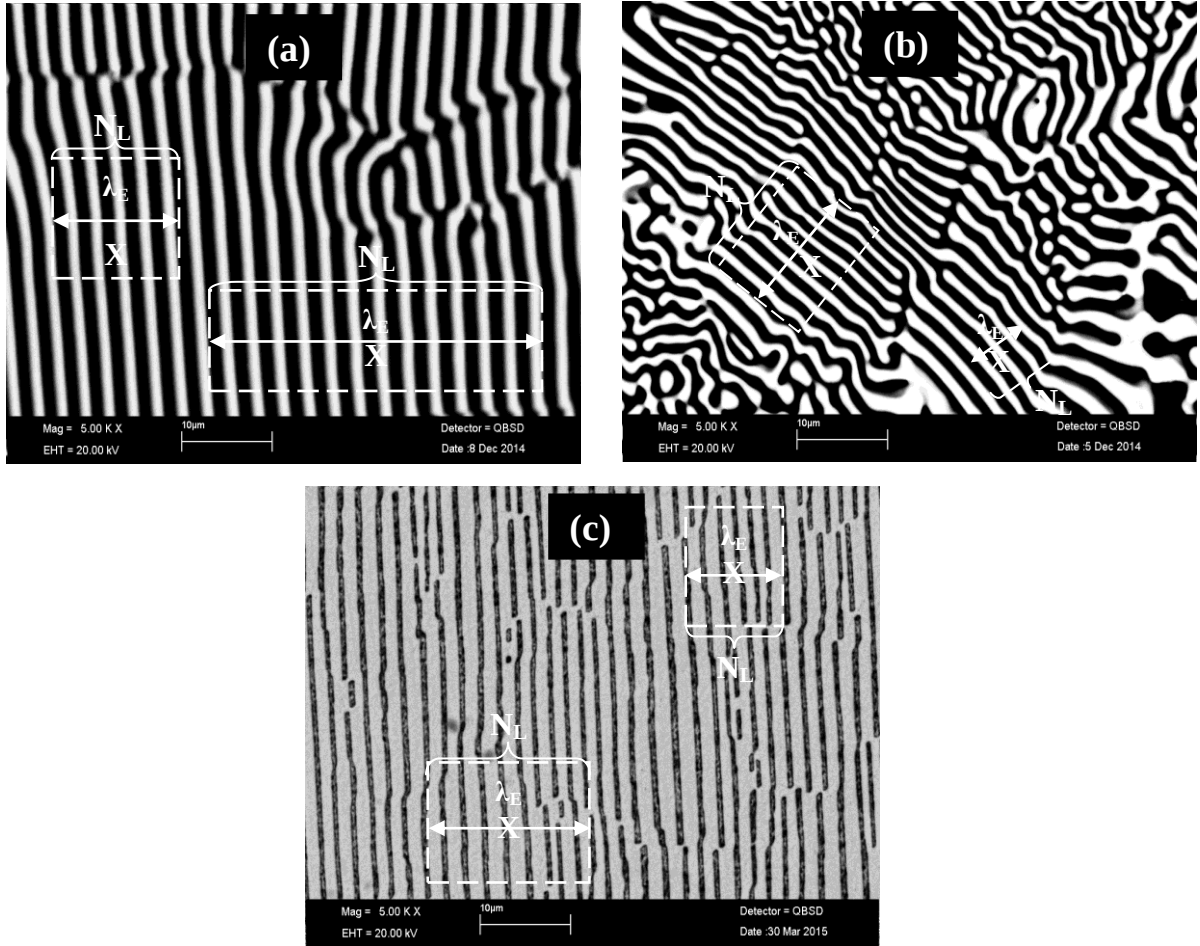


Şekil 3.8. Düzenli ötektiklerde lamelsel mesafelerin ölçümü
(a) Geniş bölge görüntüsü (enine kesit),
(b) Dar bölge görüntüsü (enine kesit).

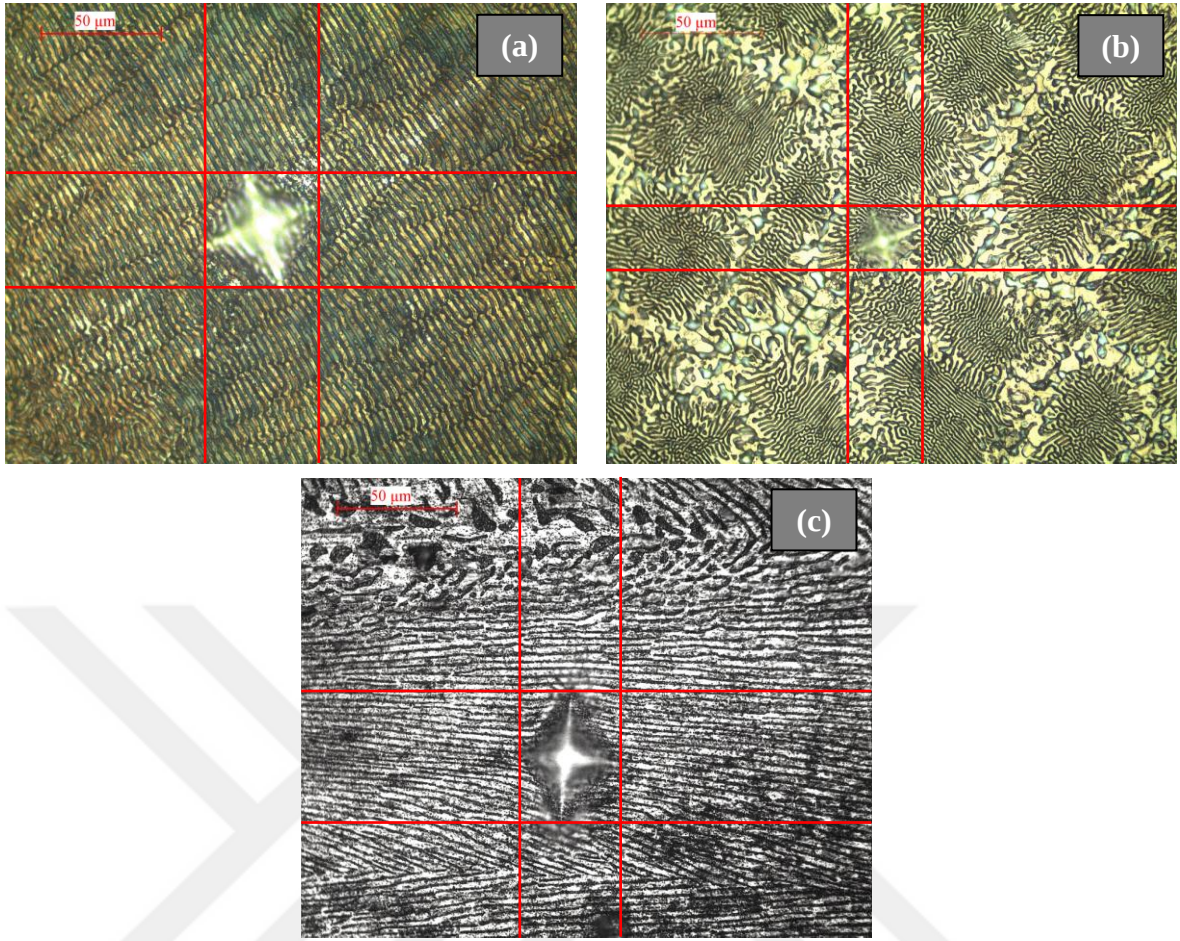
3.4. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mikroyapı ölçümleri yapıldıktan sonra, 2. Bölüm'de anlatıldığı gibi Vickers sertlik ölçme yöntemi ile mikrosertlik

değerlerinin ölçümüne geçilmiştir. Her bir numune, mikrosertlik test cihazına takılarak, 10 ve 25 g'lık kütlelerle, boyuna kesitteki katı-sıvı arayüzeyinin katı bölgelerinden ve katılaştırılan bölgenin enine kesitinden mikrosertlik değerleri, kg/mm^2 cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen mikrosertlik değerleri değişen katılaştırma hızı ve ötektik mesafe değerlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. İstatistiksel güvenilirliği artırmak için her bir kesit üzerinde en az 25 ölçüm alınarak ortalamaları hesaplanmıştır. Şekil 3.10'da doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemlerinde boyuna veya enine kesitten alınan mikrosertlik ölçümleri esnasında sertlik ölçüm cihazının numunelerde oluşturduğu izleri gösteren optik mikroskop ile çekilmiş birer örnek fotoğraf verilmektedir.



Şekil 3.9.(a) Al-Cu-Ni, (b) Al-Cu-Ti ve (c) Zn-Al-Cu alaşımları için ötektik mikroyapı mesafelerinin ölçümünün alınmış olduğu bölgeden örnek ölçümler ve SEM görüntüleri.



Şekil 3.10. Doğrusal katılaştırılmış ötektik (a) Al-Cu-Ni (b) Al-Cu-Ti (c) Zn-Al-Cu alaşımlarına ait optik mikroskop ile çekilmiş örnek sertlik iz fotoğrafları.

3.5. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mikroyapı ölçümleri ve sertlik değerlerinin belirlenmesinden sonra, 2. Bölüm’de anlatıldığı gibi çekme-dayanım testine geçilmiştir. Her bir numune en az 50 mm uzunluğunda kesilerek, çekme-dayanım test cihazına çeneleri arasında sıkıştırıldıktan sonra, 10 mm/dak’lık hızlarda çekme yapılarak kopması sağlanmış ve çekme-dayanım değerleri, N/mm^2 cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen çekme-dayanım değerleri değişen katılaştırma hızı ve ötektik mesafe (λ_E) değerlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir.

3.6. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Elektriksel Öz direnç Değerlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerden 20 mm uzunluğunda kesilerek 2. Bölüm’de anlatıldığı gibi elektriksel öz direnç ölçümü yapılmıştır. Her bir numune, oda

sıcaklığında kül fırını içine yerleştirilip dört gümüş telin numuneye tamamen temas ettiği belirlendikten sonra elektriksel öz direnç değerleri Ωm cinsinden ölçülmüştür. İstatistiksel güvenilirliği artırmak için her bir numune üzerinde en az 50 ölçüm alınarak ortalamaları hesaplanmıştır. Ölçülen elektriksel öz direnç değerleri değişen katılaştırma hızı ve ötektik mesafe (λ_E) değerlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir.

3.7. Doğrusal Katılaştırılmış Ötektik Alaşımların Isıl İletkenlik Değerlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mekanik ve elektriksel özellikleri elde edildikten sonra, 2. Bölüm’de anlatıldığı gibi ısı iletkenlik değerleri ölçümüne geçilmiştir. Bu tez çalışmasında ilk defa doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemleri için, katı fazdaki alaşımların ısı iletkenliklerinin bulunmasında kullanılan en yaygın tekniklerden birisi olan lineer ısı akış metodu kullanıldı.

Bu metotta çubuk numune, ısı akışı eksenel yönde olacak şekilde bir ucundan ısıtıcı sistemle ısıtılırken diğer ucundan da soğutucu sistem vasıtasıyla soğutulur ve numune üzerinde sabit bir sıcaklık gradyenti oluşturulur. Daha sonra numune, belirlenen sıcaklıkta kararlı hale gelmesi için beklenir. Kararlı durumda numune üzerindeki farklı noktalara ait sıcaklıklar zamana bağlı olarak sıcaklık kaydedicisi yardımıyla bilgisayar kaydedilir. Numune içindeki termal çiftlerin konumlarının üstten görünüşü ve termal çiftlerin boyuna konumları Şekil 2.34.’te gösterildi. Bu çalışmada ısı iletkenliği ölçmek için kullandığımız numune kalıbının şematik gösterimi ise Şekil 2.6.’da verildi.

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

$$K = -\frac{Q \Delta X}{A \Delta T} \quad (3.2)$$

ile ifade edilir. Burada K katının ısı iletkenliği, Q ısı akış hızı veya numune boyunca akan güç girişi, A numunenin kesit alanı, $\Delta X = X_2 - X_1$ uzunluğu T_1 ve T_2

sıcaklıklarının ölçüldüğü noktalar arasındaki uzaklık ve $\Delta T = T_2 - T_1$ ise X_2 ve X_1 noktaları arasındaki sıcaklık farkıdır.

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

$$Q = Q_{NV} - Q_{NY} \quad (3.3)$$

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

$$Q_{NY} = V_{NY} \cdot I_{NY} \quad (3.4)$$

ve

$$Q_{NV} = V_{NV} \cdot I_{NV} \quad (3.5)$$

bağıntılarından bulundu.

Eşitlik 3.2'den ısı iletkenliği tespit etmek için; numunenin kesit alanını, çubuk boyunca en az iki noktanın sıcaklığını, sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı noktalar arası uzaklığı ve giriş gücünü tespit etmek gereklidir. Kesit alanını (πr^2) tespit etmek için çubuk numunenin yarıçapı optik mikroskopla ölçüldü. Alaşımların katı fazının ısı iletkenlik katsayısının ölçümünde biri kontrolcü ve diğer üç tanesi ise sıcaklık ölçümü için olmak üzere 4 adet K tipi termal çift kullanıldı. Isıl çiftlerin sıcaklıkları *Pico TC-08* veri-kaydedici ile bilgisayara aktararak ısıtma boyunca kaydedildi ve iki ısıl çift arasındaki sıcaklık farkı ΔT veri-kaydedici kayıtlarından tutuldu. İki ısıl çift arasındaki uzaklık ısıl çiftlerin konum fotoğrafından ölçüldü.

Doğrusal katılaştırılmış numunelerde sıcaklığın artması mikroyapıyı değiştireceğinden dolayı katı fazların ısı iletkenlikleri 50°C (323 K) sıcaklığında ölçüldü. Sıcaklığın kararlı hale gelmesi için en az iki saat beklenilerek *Hewlett Packard 34401-A* model multimetre ile ısıtıcı sistem üzerindeki potansiyel düşüşü ile ısıtıcıdan geçen akım ölçüldü ve güç girişi hesaplandı.

Isınma boyunca arzu edilen bütün ölçümler tamamlandıktan sonra, numune lineer ısı akış sisteminden çıkarıldı. Numunenin boyuna kesiti, ölçümlerde hataya sebep olmayacağından emin olmak için gözeneklilik, çatlaklık ve döküm hataları açısından incelendi.

Tablo 3.1.'de deneysel sistemin hata payının tespitinde kullanılan alüminyum çubuk numuneye ait deneysel veriler görülmektedir.

Tablo 3.1. Farklı sıcaklıklarda alüminyum çubuk numune üzerindeki güç akışını tespit etmek için tipik deneysel veriler.

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

I_{NY} : Numune yokken ısıtıcıdan geçen akım,

I_{NV} : Numune varken ısıtıcıdan geçen akım,

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

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

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

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

Q : Numune üzerinden geçen güç.

Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşımlarının 50°C (323 K)'deki ısı iletkenlik değerleri eşitlik 3.2'den, Q , ΔX , A ve ΔT ölçülen değerleri kullanılarak tespit edildi ve bu alaşımlar için deneysel veriler kaydedildi ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen ısı iletkenlik değerleri Tablo 3.2.'de verildi. Bu verilerden faydalanılarak üçlü ötektik alaşımların ısı iletkenlik değerlerinin değişen katılaştırma hızı ve ötektik mesafe (λ_E) değerlerine göre değişimi ayrı ayrı incelenmiştir.

Tablo 3.2. Doğrusal katılaştırılmış alaşımların 50°C (323K)'deki ısı iletkenliğin katılaştırma hızına bağı olarak değişiminden elde edilen deneysel veriler

Al-32.5 ağı. % Cu-1 ağı. % Ni				Al-33 ağı. % Cu-0.1 ağı. % Ti			
Hız	Q	ΔT	K	Hız	Q	ΔT	K
($\mu\text{m/s}$)	(W)	(K)	(W/Km)	($\mu\text{m/s}$)	(W)	(K)	(W/Km)
9.25	1.56	1.59	235.64	8.58	2.23	2.25	236.04
46.40	1.53	1.59	229.82	42.85	0.64	0.66	232.39
94.35	1.59	1.69	225.18	83.42	1.50	1.55	230.74
162.85	1.45	1.57	220.87	164.15	1.59	1.69	224.02
496.72	1.50	1.76	204.46	490.81	1.56	1.68	221.43
1024.45	1.42	1.67	202.61	1018.16	1.38	1.57	209.80
1532.54	2.23	2.67	199.57	1497.42	2.23	2.64	202.24
2056.68	2.27	2.77	195.92	2038.65	1.58	1.89	199.82

Zn-5 ağı. % Al-0.5 ağı. % Cu			
Hız	Q	ΔT	K
($\mu\text{m/s}$)	(W)	(K)	(W/Km)
8.45	2.83	4.84	139.49
41.32	2.30	4.09	133.97
86.14	3.12	5.75	129.66
166.58	2.36	4.51	124.92
465.36	1.43	2.79	122.05
1032.47	1.53	3.09	118.36
1544.62	2.33	4.85	114.89
2087.15	0.65	1.42	110.23

Tablo 3.3. Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerine ait diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen veriler.

Alaşıım (%ağı.)	T _{pik} (K)	Alan (mJ)	ΔH (J/g)	C _p (J/gK)
Al-32.5Cu-1Ni	831.53	3056.52	235.63	0.283
Al-33Cu-0.1Ti	837.13	5785.08	222.69	0.266
Zn-5Al-0.5Cu	660.54	677.17	113.89	0.172

3.8. Erime Sıcaklığı, Entalpi ve Özısı Değerlerinin Ölçülmesi

Bu tez çalışmasında üretilen alaşımların entalpileri (ΔH) ve öz ısı değişimleri (ΔC_p) 2. bölümde anlatıldığı gibi diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerinin termal özellikleri 10 K/dak. ısıtma hızında 300-1000 K sıcaklık aralığında incelenmiştir ve elde edilen sonuçlar ise Tablo 3.3'te verilmektedir.

3.9. Doğrusal Katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu Ötektik Alaşımlarının Ötektik Mesafe, Mikrosertlik, Çekme-Dayanım, Elektriksel Özdirenç ve Isıl İletkenlik Değerlerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi

Sekiz farklı hızda doğrusal katılaştırılan Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu üçlü ötektik alaşımları için ölçülen, ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısı iletkenlik değerleri Tablo 3.5, Tablo 3.7 ve Tablo 3.9'da verilmiştir. Ayrıca sırasıyla Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemlerine ait farklı katılaştırma hızlarında büyütülen numunelerin ötektik mesafelerinin, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısı iletkenlik değerlerinin değişimlerinin logaritmik grafikleri verilmiştir. Bu deneysel verilerden yararlanarak elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve aralarındaki bağıntılar, lineer regresyon analizi (EK-2) ile tespit edilmiştir. Ayrıca mikrosertlik, çekme-dayanım ve elektriksel özdirenç değerleri için Bölüm 1'de de anlatıldığı gibi Hall-Petch tipi bağıntıları da elde edilmiştir.

3.9.1. Al-Cu-Ni Ötektik Alaşımının İncelenmesi:

Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.) alaşımının doğrusal katılaştırılması ve metalografik işlemler sonrası çekilen SEM fotoğraflarında ana faz üzerinde fazların lamelsel (ötektik) formda büyüdüğü gözlenmiştir. Bu tez çalışmasında yüksek katılaştırma hızlarına çıkabilmek için özel olarak dizayn edilmiş çekme motorunda (Şekil 2.15), Al-Cu-Ni ötektik alaşım sistemi için uygulanan gerilime karşılık gelen yüksek çekme hızları ve katılaştırma hızı değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.5'de Al-Cu-Ni ötektik alaşım sistemi için sabit sıcaklık gradyentinde, farklı katılaştırma hızlarında üretilen numunelerden ölçülen ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısı iletkenlik değerleri verilmiştir. Al-Cu-Ni ötektik alaşım sistemi için elde edilen verilerle

lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen parametreler arası bağıntılar ise Şekil 3.11-25’de verilmiştir.

Şekil 3.11 incelendiğinde katılaştırma hızı arttıkça ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 3.11’den de görüldüğü gibi alınan ölçümler incelendiğinde sabit sıcaklık gradyentinde ($G = 4.93 \text{ K/mm}$) katılaştırma hızı arttıkça λ_E , sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.48, 0.30 ve 0.39 üstel değerleriyle azalmaktadırlar.

Al-Cu-Ni ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen mikrosertlik değerleri Şekil 3.12’de verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerleri, sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.08, 0.06 ve 0.07 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.13’de verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için sırasıyla 0.16, 0.18 ve 0.17 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.

Bazı araştırmacılar sertlik, çekme-dayanım ve elektriksel öz direnç değerlerini ifade ederken Hall-Petch [85,86] denklemlerini kullanmaktadırlar. Hall-Petch [85,86] denklemlerinde katılaştırma hızı ve ötektik mesafelere göre üsteller sabit olup katsayılar değişmektedirler. Bu bağıntıyı kullanan araştırmacılarla elde ettiğimiz değerleri kıyaslayabilmek için bu tez çalışmasında lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen parametreler arası bağıntılar yanında sertlik, çekme-dayanım ve elektriksel öz direnç değerleri için Hall-Petch [85,86] şeklinde de bağıntılar elde edilmiştir. Bu kapsamda mikrosertlik değerleri için, katılaştırma hızı sıfıra giderken alaşımın teorik olarak alacağı mikrosertlik değeri olarak tanımlanan H_0 değerleri kıyaslanacaktır. Şekil 3.14’te verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik mikrosertlik değerleri (H_0) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 103.3, 144.2 ve 124.4 kg/mm^2 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.15’de verilen grafik incelendiğinde artan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik mikrosertlik değerlerinin (H_0) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 105.5, 119.8 ve 109.1 kg/mm^2 olduğu görülmüştür.

Al-Cu-Ni ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen çekme-dayanım değerleri Şekil 3.16'da verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak çekme-dayanımı sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.09, 0.07 ve 0.08 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.17'de verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak çekme-dayanım değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.19, 0.22 ve 0.20 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.

Şekil 3.18'de verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik çekme-dayanım değeri (σ_0) değerlendirildiğinde sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 125.7, 191.4 ve 158.8 N/mm² olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.19'da verilen grafik incelendiğinde azalan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik çekme-dayanım değerleri (σ_0) değerlendirildiğinde sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 130.7, 151.4 ve 133.6 N/mm² olduğu görülmüştür.

Al-Cu-Ni ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen elektriksel öz direnç değerleri Şekil 3.20'de verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel öz direnç değeri sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.14, 0.15 ve 0.12 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.21'de verilen logaritmik değişim grafiği logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak elektriksel öz direnç değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.29, 0.52 ve 0.31 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir. Şekil 3.22'de verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik elektriksel öz direnç değeri (ρ_0) değerlendirildiğinde tüm katılaştırma hızları için 4.94×10^{-8} Ω m olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.23'de verilen grafik incelendiğinde azalan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik elektriksel öz direnç değeri (ρ_0) tüm katılaştırma hızları için 4.26×10^{-8} Ω m olduğu görülmüştür.

Al-Cu-Ni ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen ısı iletkenlik değerleri Şekil 3.24'te verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.022, 0.029 ve 0.037 üstel

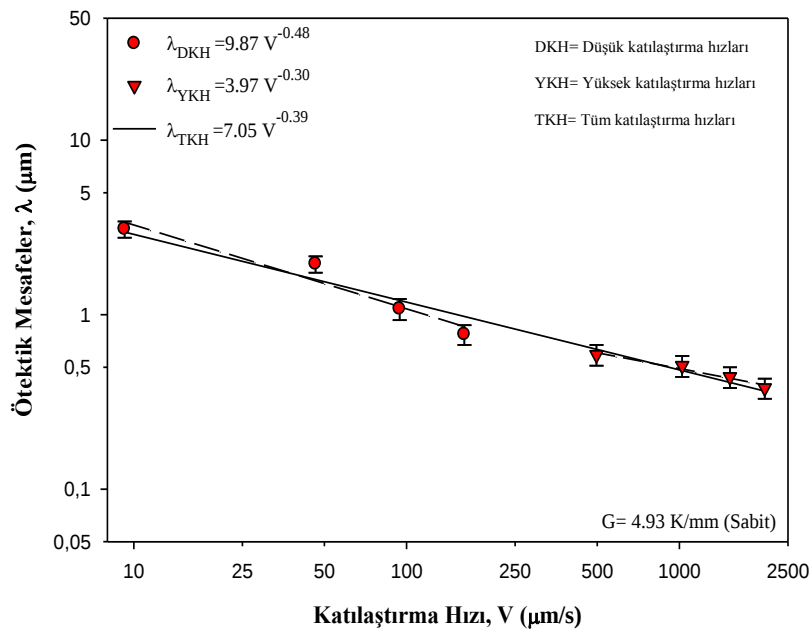
değerleri ile azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.25’de verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak ısı iletkenlik değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.045, 0.098 ve 0.091 üstel değerleriyle arttığı görülmektedir.

Şekil 3.26’da ise Al-Cu-Ni ötektik alaşım sistemine ait çekme-dayanım değerlerinden faydalanılarak bilimsel ve teknolojik uygulamalar için özellikle malzeme mühendisliği alanında sıkça rastlanan çekme-dayanım ve uzama (%) grafiği verilmektedir.

Son olarak Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.) alaşımının entalpi, öz ısı ve erime sıcaklığı değerleri sırasıyla, 235.63 J/g, 0.283 J/gK, 831.53 K olarak elde edilmiş ve ısı akışı-sıcaklık eğrisi Şekil 3.27’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Yüksek katılaştırma hızları için dizayn edilmiş çekme motorunda uygulanan gerilime karşılık gelen çekme hızı ve Al-Cu-Ni ötektik alaşımı için numune üzerindeki katılaştırma hızı değerleri.

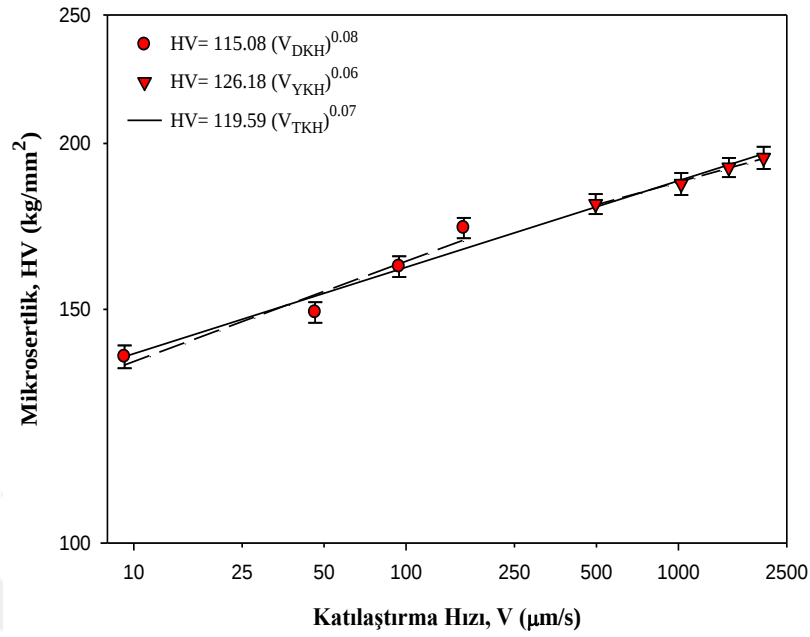
Uygulanan Gerilim (DC Volt)	Çekme Hızı ($\mu\text{m/s}$)	Katılaştırma Hızı ($\mu\text{m/s}$)
1.0	1034.58	496.72
2.1	2112.83	1024.45
2.9	3086.15	1532.54
3.8	4246.26	2056.68



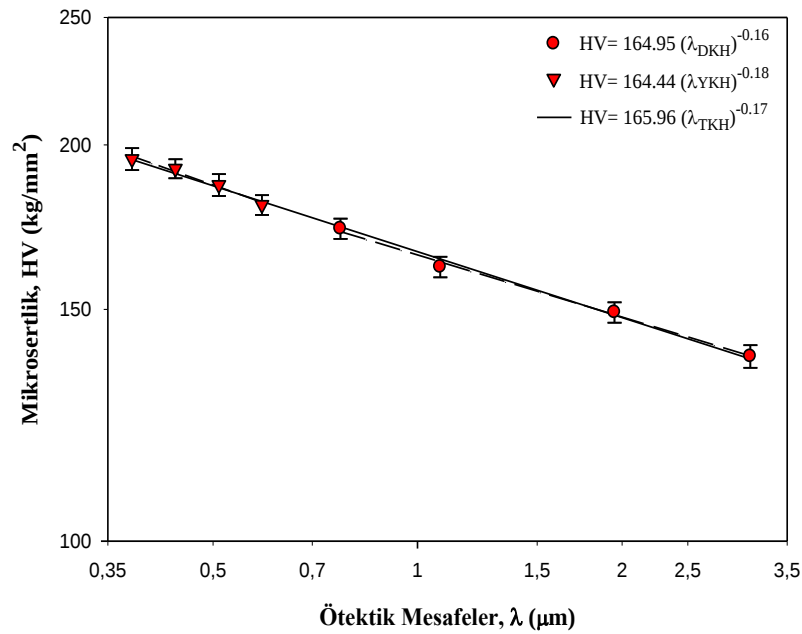
Şekil 3.11. Sabit sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.

Tablo 3.5. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılan Al-Cu-Ni ötektik alaşımının ötektik mesafe, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısı iletkenlik değeri.

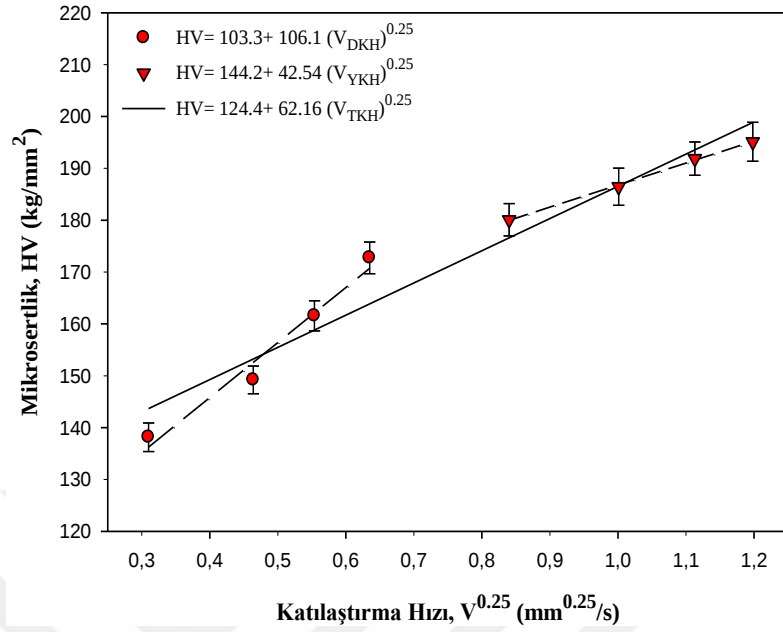
Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.)						
Katılaştırma Parametreleri		Ötektik Mesafe	Mikrosertlik	Çekme- Dayanım	Elektriksel Özdirenç	Isıl İletkenlik
G (K/mm)	V (μm/s)	λ_E (μm)	HV (kg/mm ²)	σ_C (N/mm ²)	$\rho \times 10^{-8}$ (Ωm)	K _k (W/Km)
4.93	9.25	3.09 ± 0.33	138.15 ± 2.74	181.96	4.57	235.64
	46.40	1.95 ± 0.21	149.21 ± 2.66	204.83	5.36	229.82
	94.35	1.08 ± 0.15	161.55 ± 2.91	217.43	6.01	225.18
	162.85	0.77 ± 0.10	172.74 ± 3.05	241.02	6.97	220.87
	496.72	0.59 ± 0.08	180.08 ± 3.12	252.15	7.29	204.46
	1024.45	0.51 ± 0.07	186.46 ± 3.58	265.86	7.65	202.61
	1532.54	0.44 ± 0.06	191.87 ± 3.21	273.47	8.38	199.57
	2056.68	0.38 ± 0.05	195.12 ± 3.75	278.21	9.12	195.92



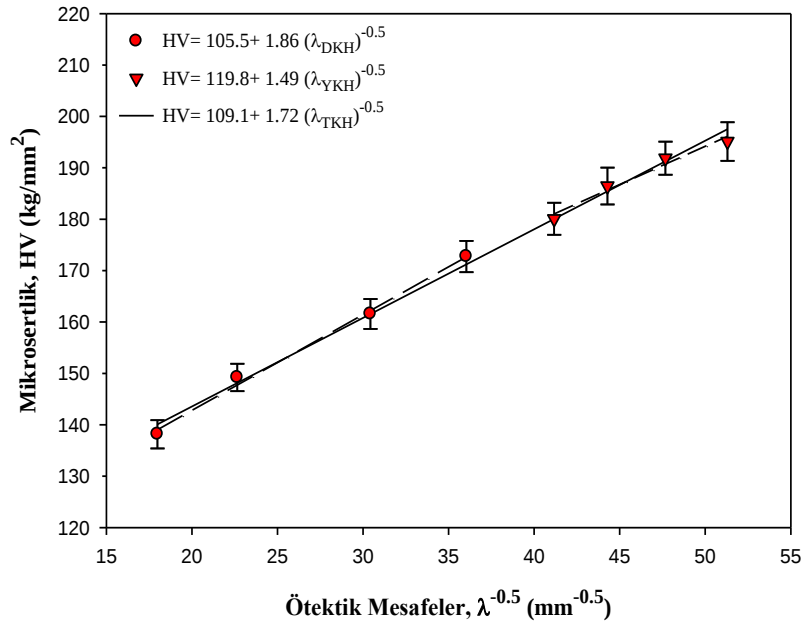
Şekil 3.12. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



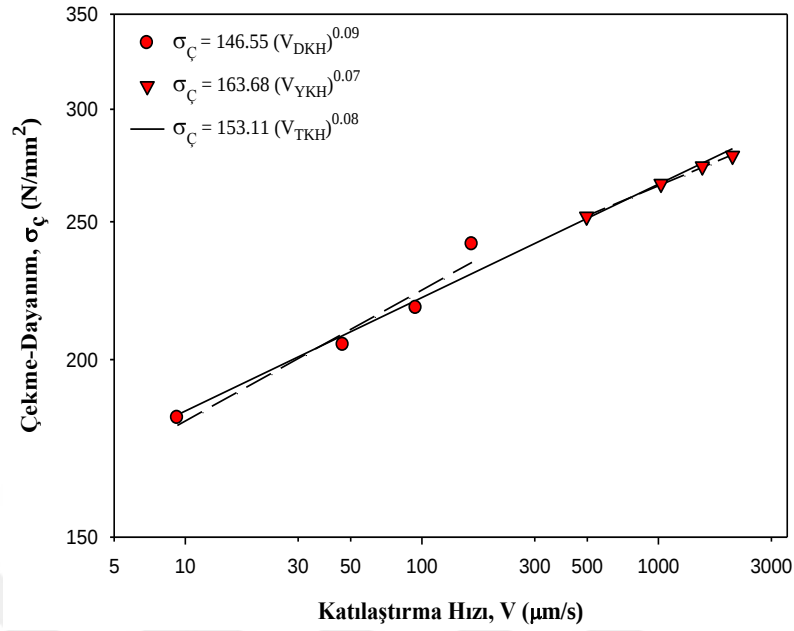
Şekil 3.13. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



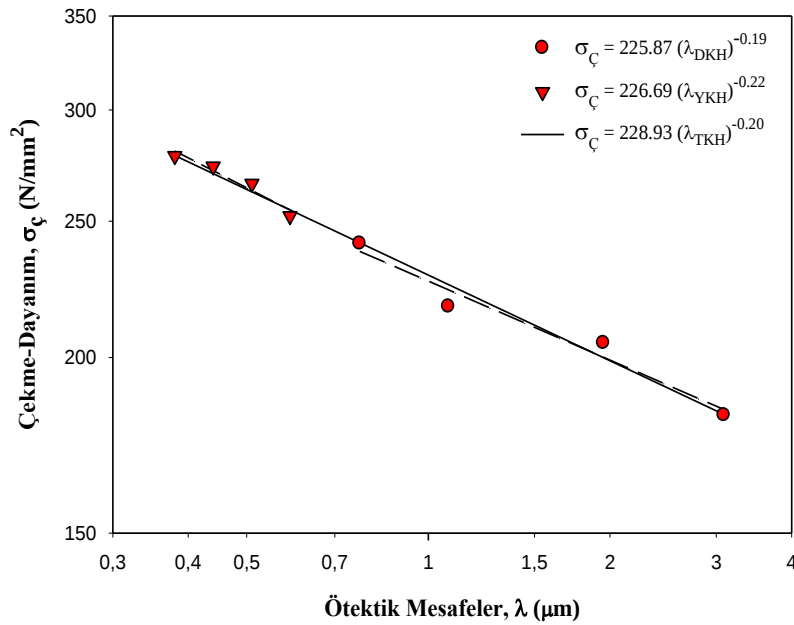
Şekil 3.14. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



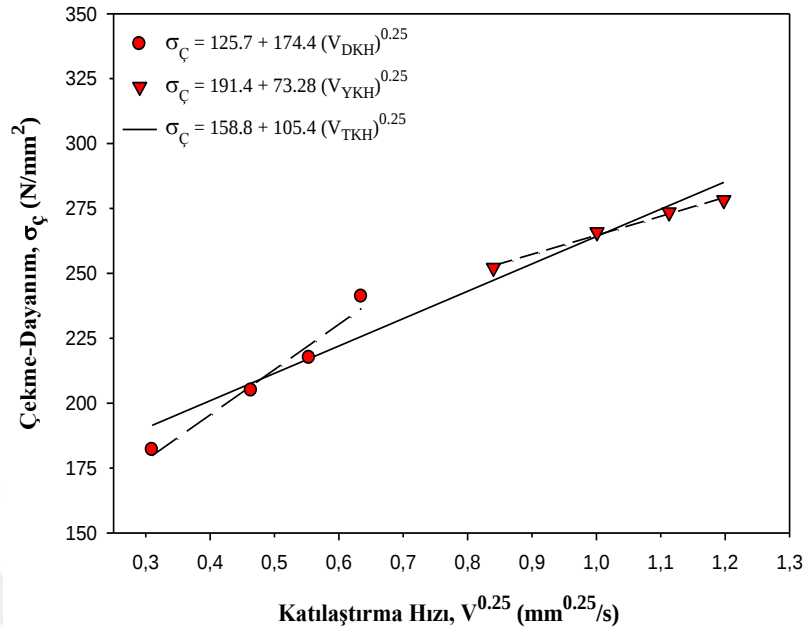
Şekil 3.15. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



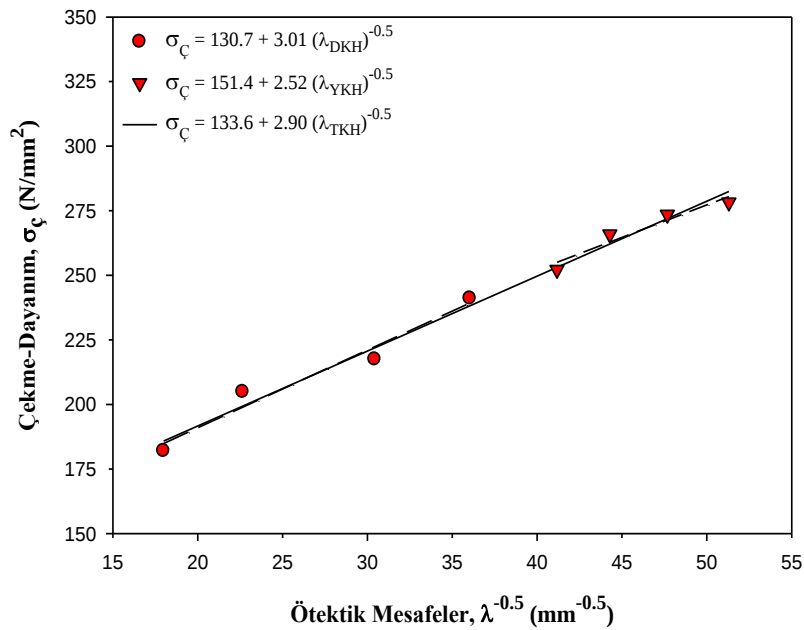
Şekil 3.16. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



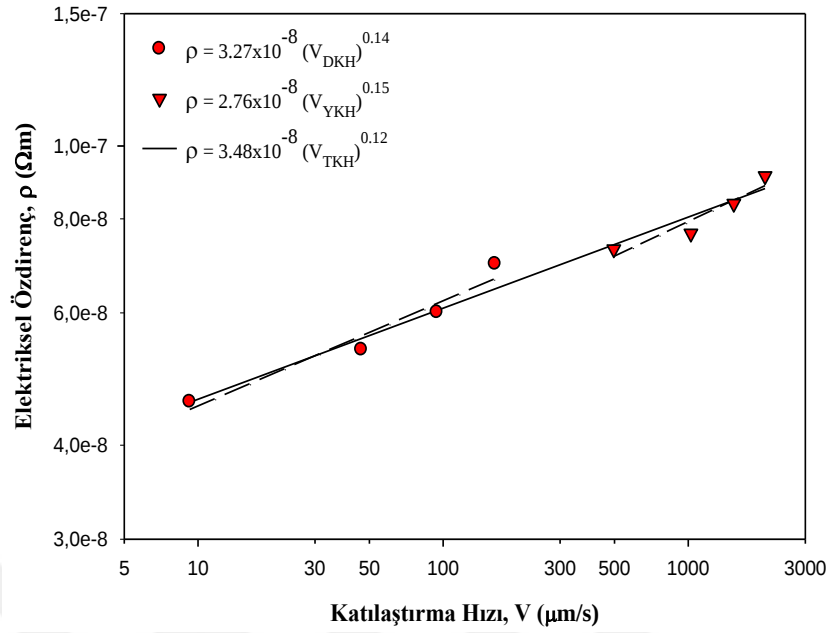
Şekil 3.17. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



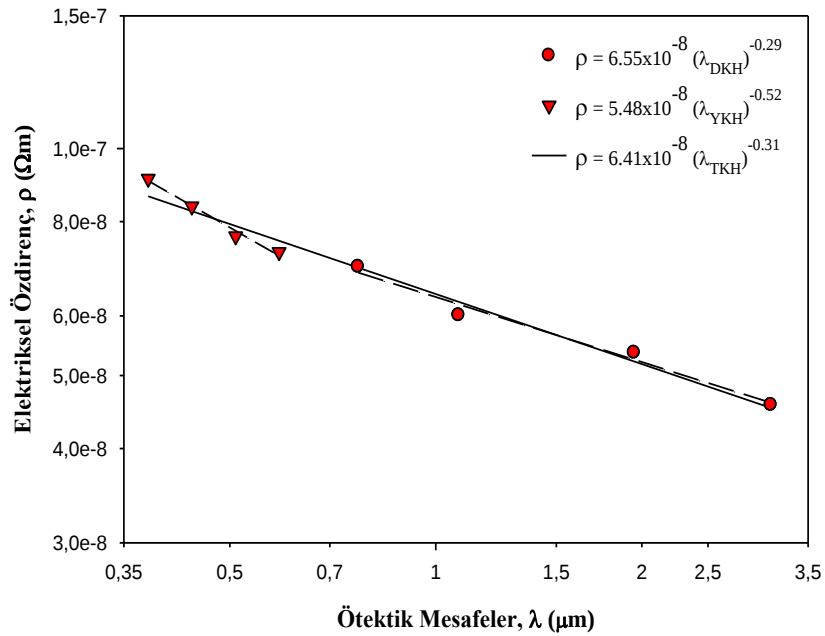
Şekil 3.18. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



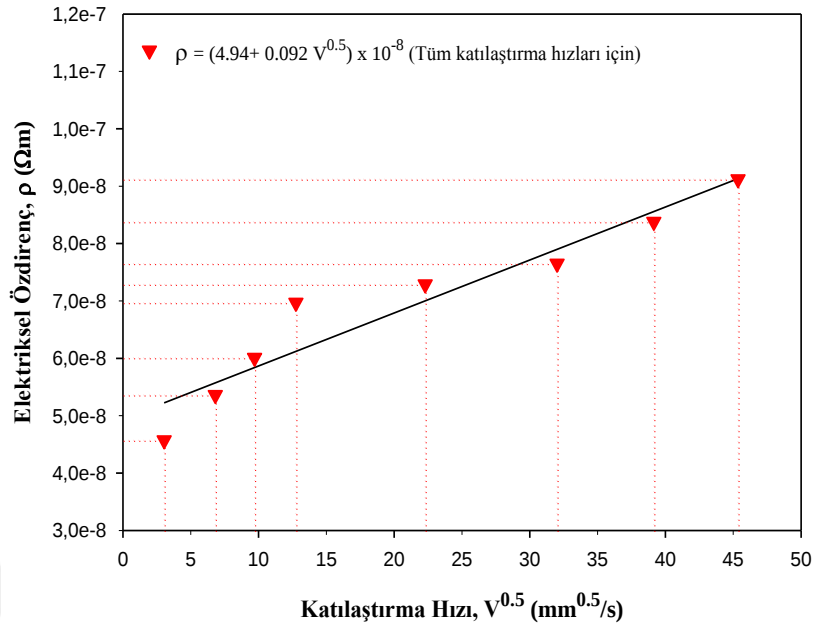
Şekil 3.19. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



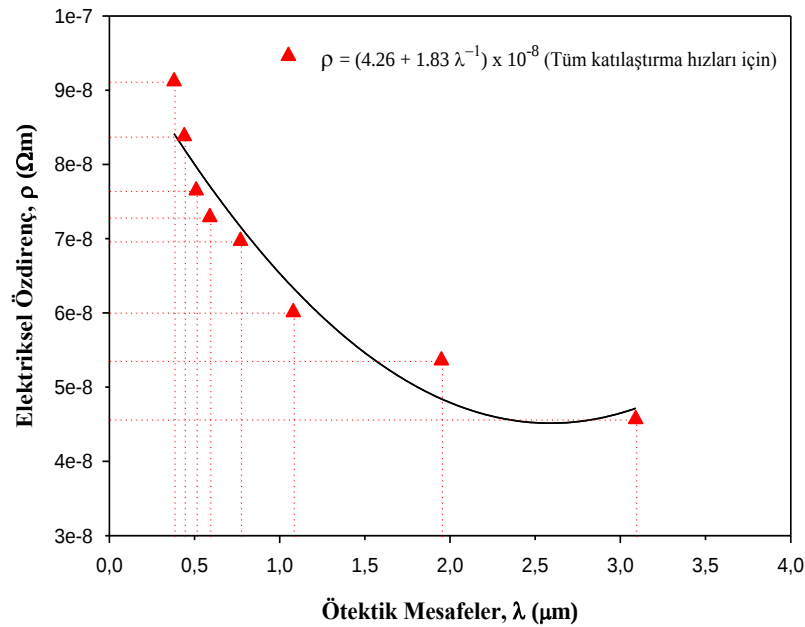
Şekil 3.20. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



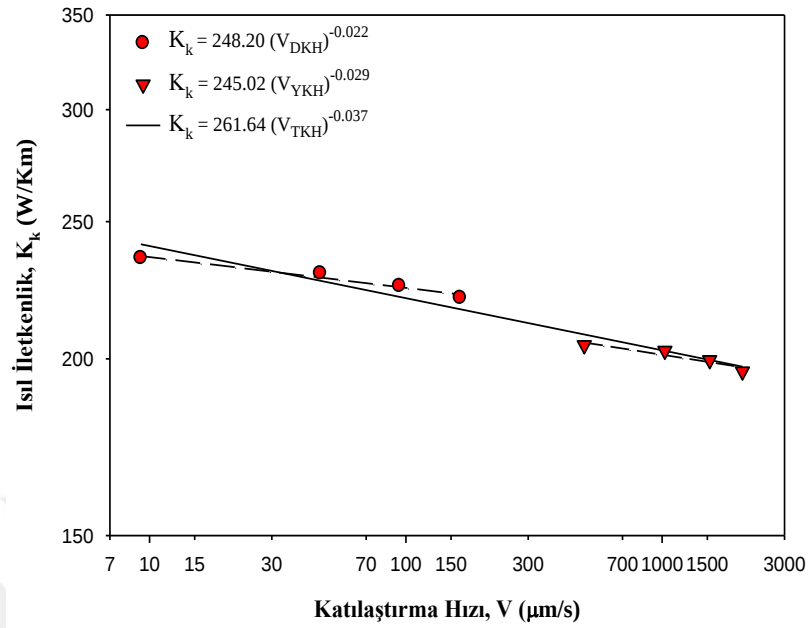
Şekil 3.21. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



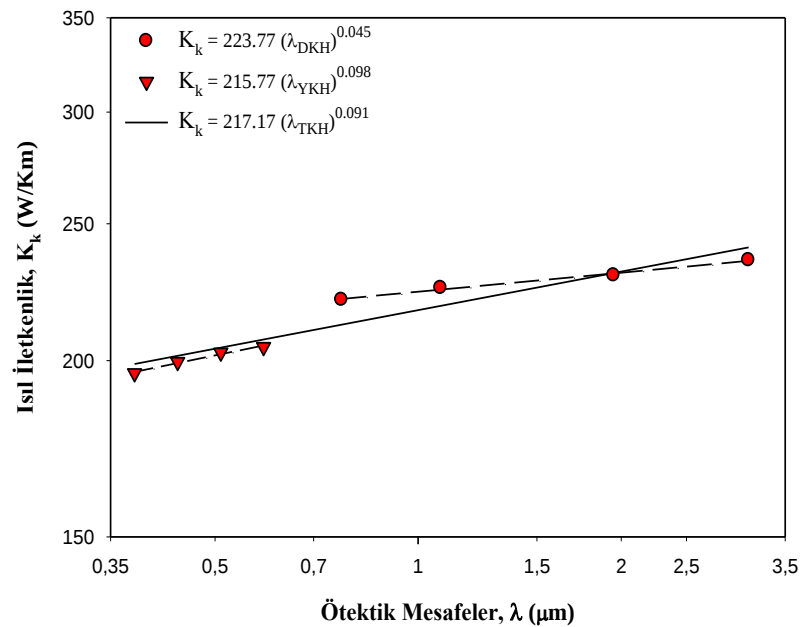
Şekil 3.22. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı.



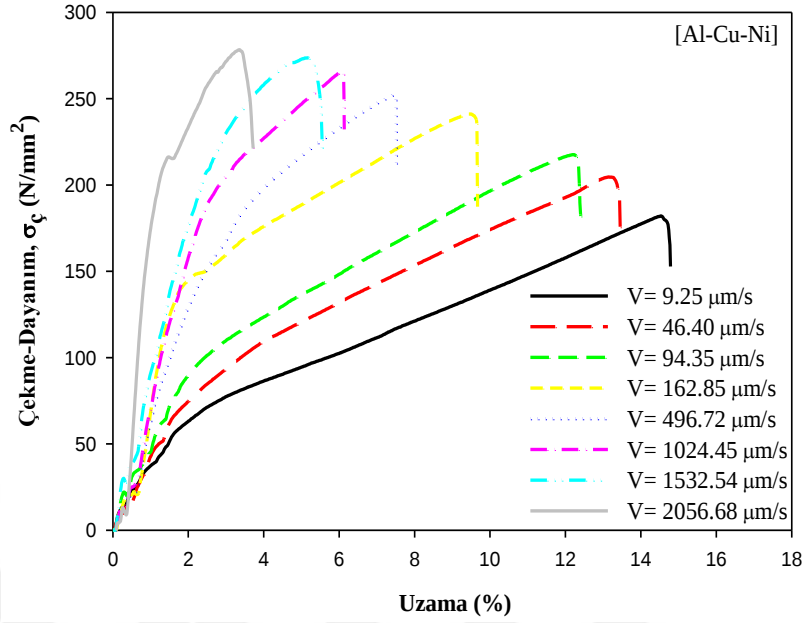
Şekil 3.23. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı.



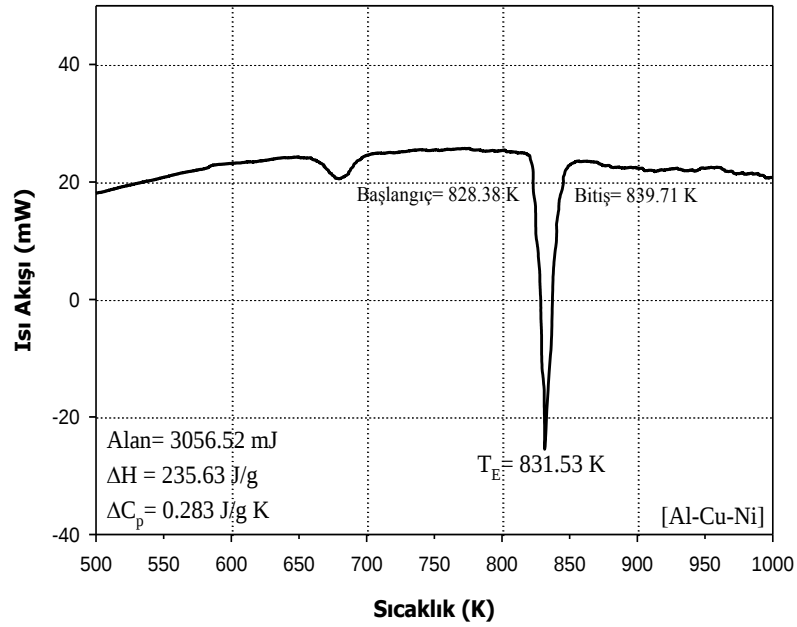
Şekil 3.24. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımasının ısı iletkenlik değ erlerinin katılaştırma hızları ile değ işimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



Şekil 3.25. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımasının ısı iletkenlik değ erlerinin ötektik mesafelerle değ işimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



Şekil 3.26. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanım ve uzama (%) eğrileri.



Şekil 3.27. Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.) ötektik alaşımı için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen ısı akışı-sıcaklık eğrisi.

3.9.2. Al-Cu-Ti Ötektik Alaşımının İncelenmesi:

Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) alaşımının doğrusal katılaştırılması ve metalografik işlemler sonrası çekilen SEM fotoğraflarında ana faz üzerinde fazların lamelsel (ötektik) formda büyüdüğü gözlenmiştir. Bu tez çalışmasında yüksek katılaştırma hızlarına çıkabilmek için özel olarak dizayn edilmiş çekme motorunda (Şekil 2.), Al-Cu-Ni ötektik alaşım sistemi için uygulanan gerilime karşılık gelen yüksek çekme hızları ve katılaştırma hızı değerleri Tablo 3.6’da verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.7’de Al-Cu-Ti ötektik alaşım sistemi için sabit sıcaklık gradyentinde, farklı katılaştırma hızlarında üretilen numunelerden ölçülen ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değerleri verilmiştir. Al-Cu-Ti ötektik alaşım sistemi için elde edilen verilerle lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen parametreler arası bağıntılar ise Şekil 3.28-44’te verilmiştir.

Şekil 3.28 incelendiğinde katılaştırma hızı arttıkça ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 3.28’den de görüldüğü gibi alınan ölçümler incelendiğinde sabit sıcaklık gradyentinde ($G = 6.45 \text{ K/mm}$) katılaştırma hızı arttıkça λ_E , sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.49, 0.31 ve 0.41 üstel değerleriyle azalmaktadırlar.

Al-Cu-Ti ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen mikrosertlik değerleri Şekil 3.29’da verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerleri, sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.06, 0.05 ve 0.05 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.30’da verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için sırasıyla 0.11, 0.17 ve 0.12 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.

Al-Cu-Ti ötektik alaşımı için elde edilen Hall-Petch [85,86] şeklindeki bağıntılara ve Şekil 3.31’de verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik mikrosertlik değerleri (H_0) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 136.9, 163.3 ve 154.2 kg/mm^2 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.32’de verilen grafik incelendiğinde artan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik mikrosertlik değerlerinin (H_0) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 142.3, 138.4 ve 144.7 kg/mm^2 olduğu görülmüştür.

Al-Cu-Ti ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen çekme-dayanım değerleri Şekil 3.33'te verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak çekme-dayanımı sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.10, 0.06 ve 0.08 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.34'te verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak çekme-dayanım değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.20, 0.20 ve 0.19 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.

Şekil 3.35'te verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik çekme-dayanım değeri (σ_0) değerlendirildiğinde sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 102.3, 170.4 ve 137.6 N/mm² olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.36'da verilen grafik incelendiğinde azalan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik çekme-dayanım değerleri (σ_0) değerlendirildiğinde sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 113.8, 136.6 ve 121.5 N/mm² olduğu görülmüştür.

Al-Cu-Ti ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen elektriksel öz direnç değerleri Şekil 3.37'de verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel öz direnç değeri sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.14, 0.12 ve 0.13 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.38'de verilen logaritmik değişim grafiği logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak elektriksel öz direnç değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.28, 0.39 ve 0.31 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir. Şekil 3.39'da verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik elektriksel öz direnç değeri (ρ_0) değerlendirildiğinde tüm katılaştırma hızları için 6.51×10^{-8} Ω m olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.40'ta verilen grafik incelendiğinde azalan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik elektriksel öz direnç değeri (ρ_0) tüm katılaştırma hızları için 5.77×10^{-8} Ω m olduğu görülmüştür.

Al-Cu-Ti ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen ısı iletkenlik değerleri Şekil 3.41'de verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.016, 0.075 ve 0.032 üstel

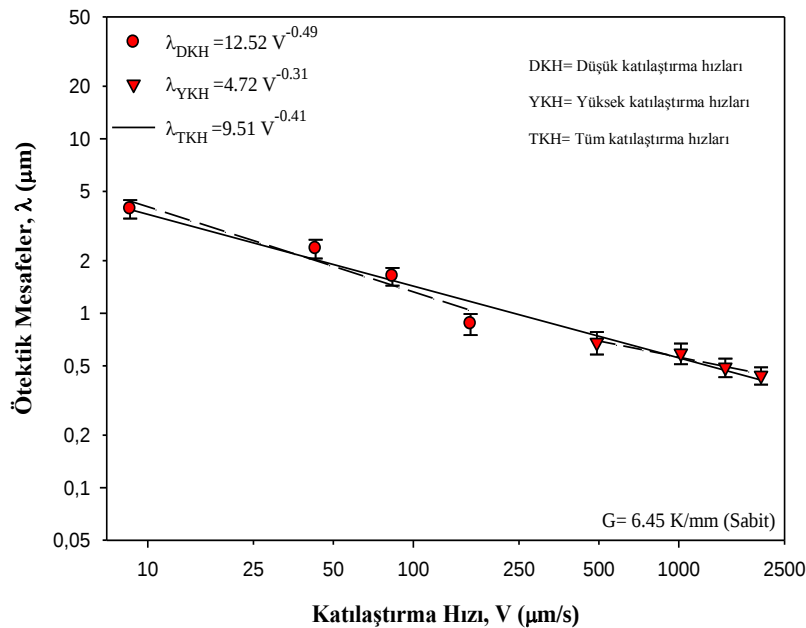
değerleri ile azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.42’de verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak ısı iletkenlik değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.034, 0.233 ve 0.073 üstel değerleriyle arttığı görülmektedir.

Şekil 3.43’te ise Al-Cu-Ti ötektik alaşım sistemine ait çekme-dayanım değerlerinden faydalanılarak bilimsel ve teknolojik uygulamalar için özellikle malzeme mühendisliği alanında sıkça rastlanan çekme-dayanım ve uzama (%) grafiği verilmektedir.

Son olarak Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) alaşımının entalpi, öz ısı ve erime sıcaklığı değerleri sırasıyla, 222.69 J/g, 0.266 J/gK, 837.13 K olarak elde edilmiş ve ısı akışı-sıcaklık eğrisi Şekil 3.44’te verilmiştir.

Tablo 3.6. Yüksek katılaştırma hızları için dizayn edilmiş çekme motorunda uygulanan gerilime karşılık gelen çekme hızı ve Al-Cu-Ti ötektik alaşımı için numune üzerindeki katılaştırma hızı değerleri.

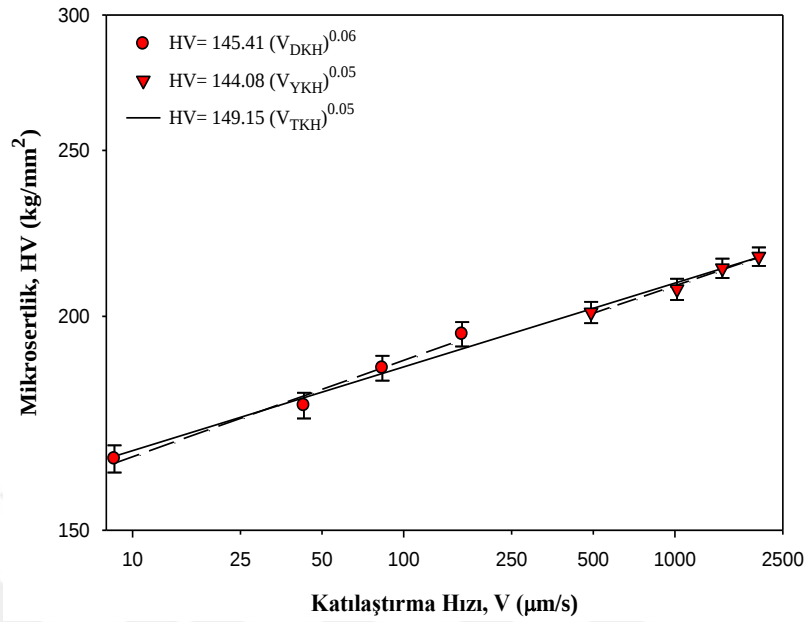
Uygulanan Gerilim (DC Volt)	Çekme Hızı ($\mu\text{m/s}$)	Katılaştırma Hızı ($\mu\text{m/s}$)
1.0	1012.26	490.81
2.1	2085.47	1018.16
2.9	3057.53	1497.42
3.8	4174.32	2038.65



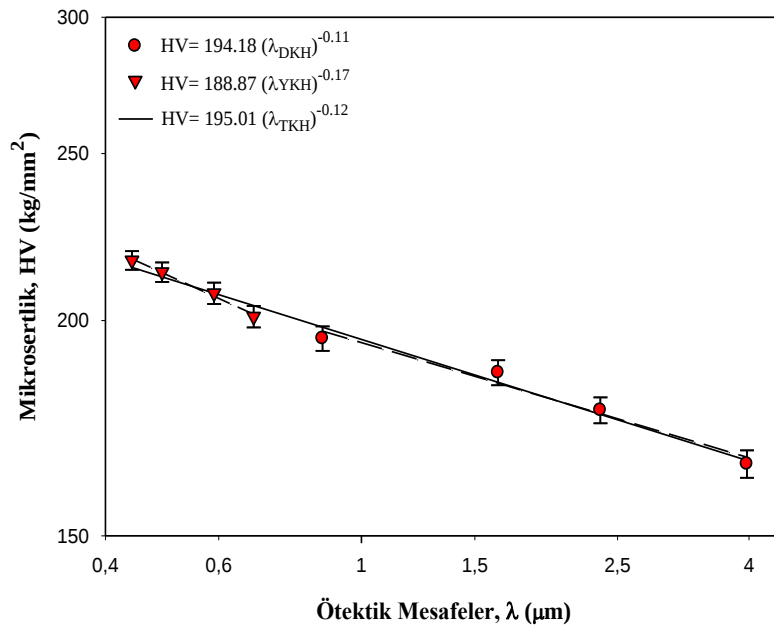
Şekil 3.28. Sabit sıcaklık gradyanında doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.

Tablo 3.7. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılan Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ötektik mesafe, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısı iletkenlik değeri.

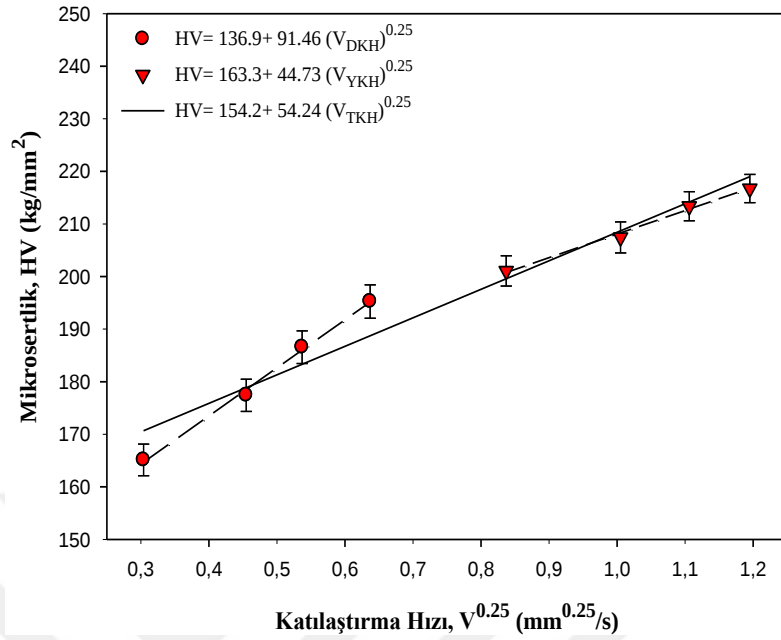
Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.)						
Katılaştırma Parametreleri		Ötektik Mesafe	Mikrosertlik	Çekme- Dayanım	Elektriksel Özdirenç	Isıl İletkenlik
G (K/mm)	V (μm/s)	λ_E (μm)	HV (kg/mm ²)	σ_C (N/mm ²)	$\rho \times 10^{-8}$ (Ωm)	K _k (W/Km)
6.45	8.58	3.97 ± 0.48	165.12 ± 3.01	151.05	5.91	236.04
	42.85	2.35 ± 0.29	177.41 ± 3.06	177.18	7.18	232.39
	83.42	1.63 ± 0.19	186.56 ± 3.11	192.21	7.89	230.74
	164.15	0.87 ± 0.12	195.25 ± 3.18	204.66	9.02	224.02
	490.81	0.68 ± 0.10	201.07 ± 2.89	218.54	10.14	221.43
	1018.16	0.59 ± 0.08	207.44 ± 2.95	223.35	10.78	209.80
	1497.42	0.49 ± 0.06	213.38 ± 2.76	232.78	11.35	202.24
	2038.65	0.44 ± 0.05	216.74 ± 2.69	237.97	12.11	199.82



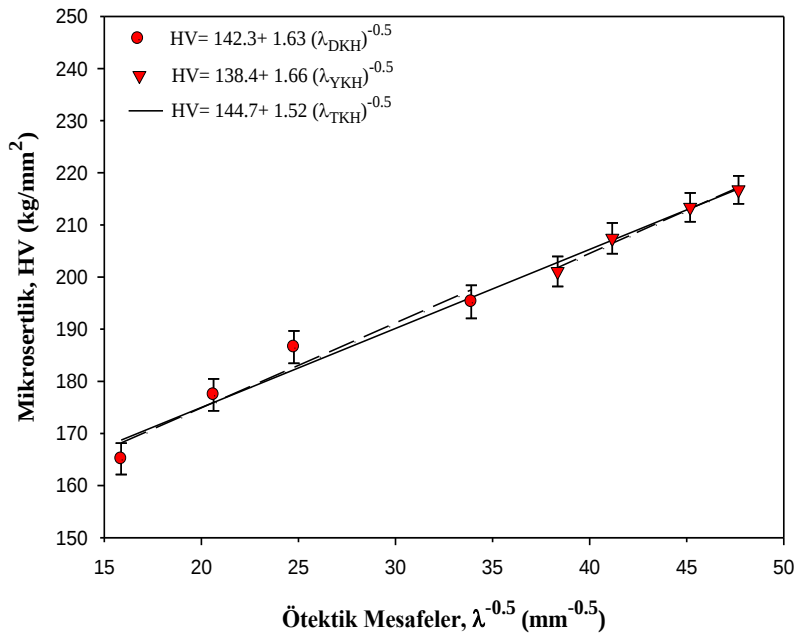
Şekil 3.29. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



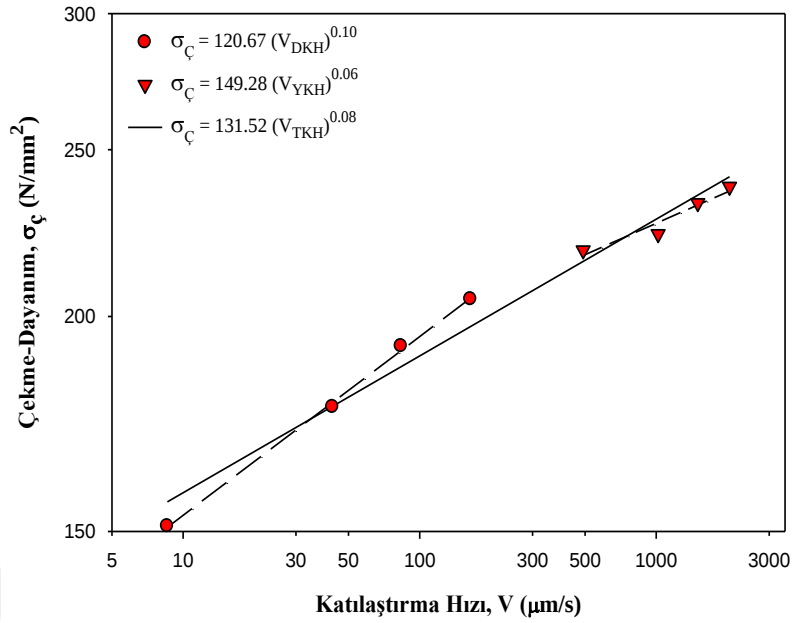
Şekil 3.30. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



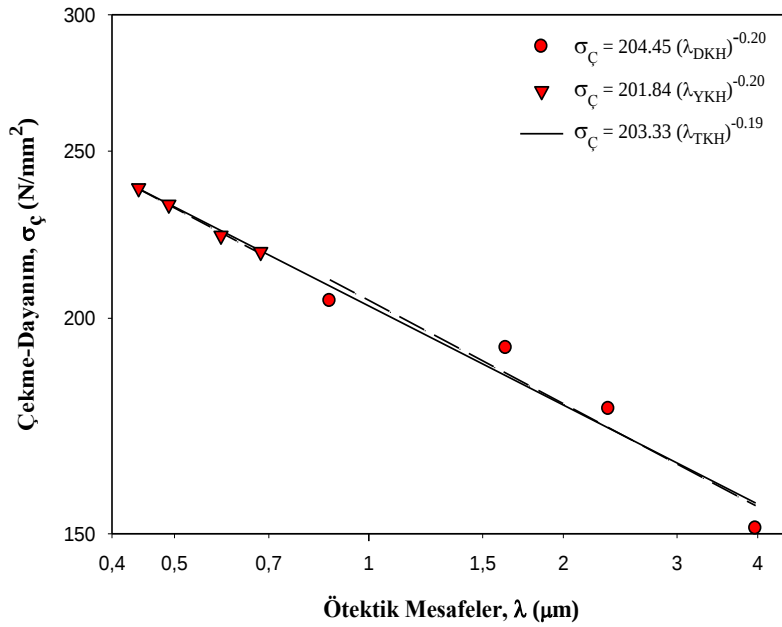
Şekil 3.31. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımasının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



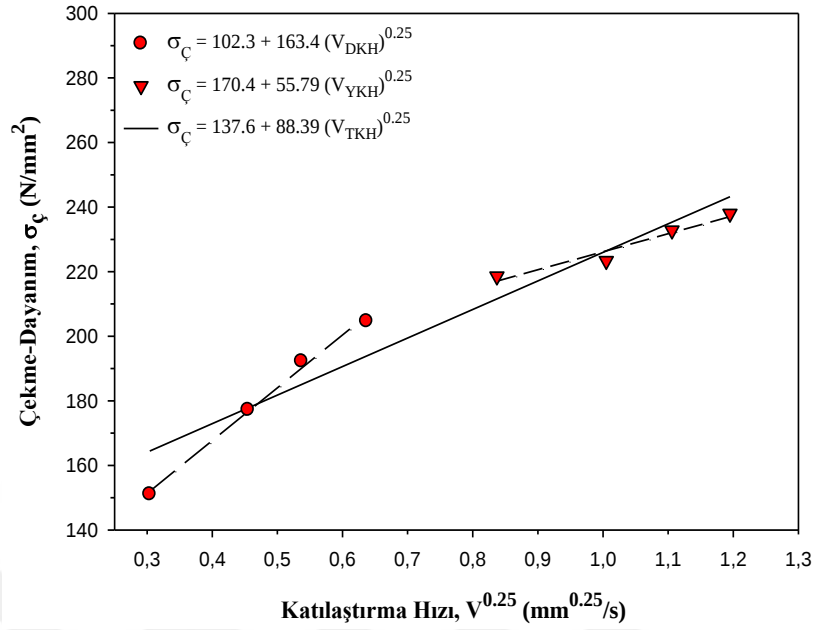
Şekil 3.32. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaışının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



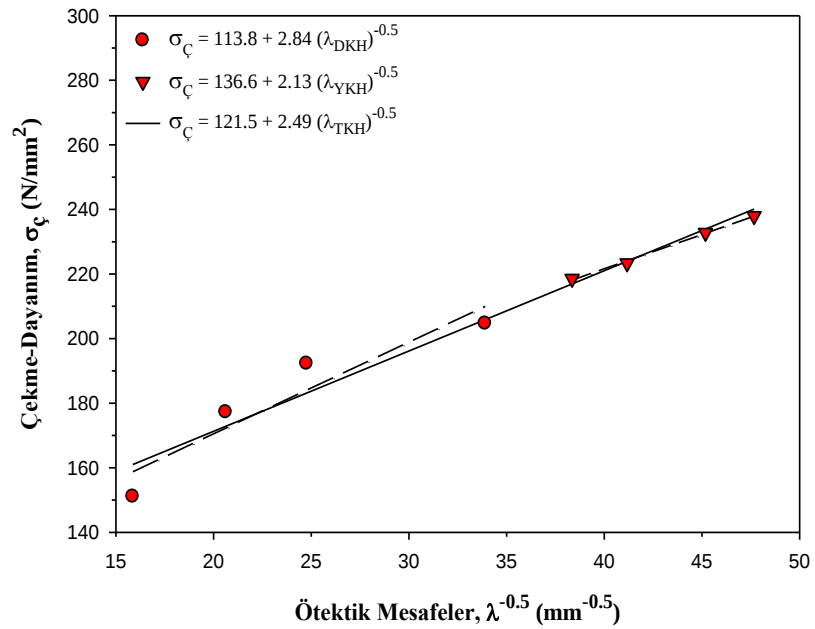
Şekil 3.33. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımasının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



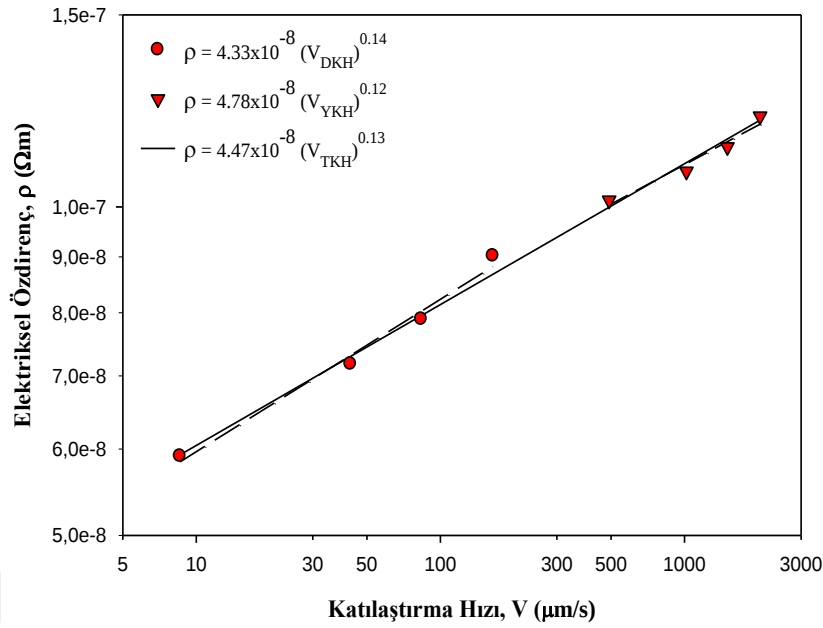
Şekil 3.34. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımasının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



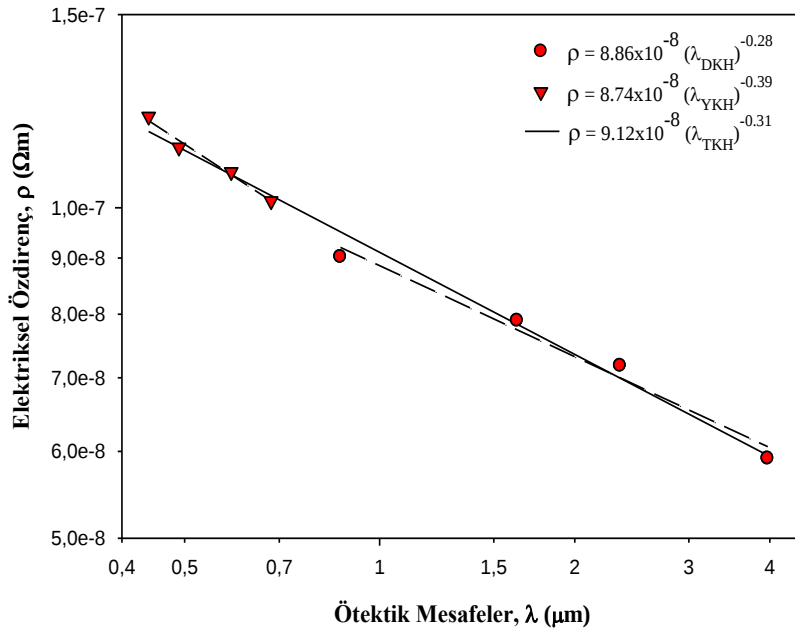
Şekil 3.35. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



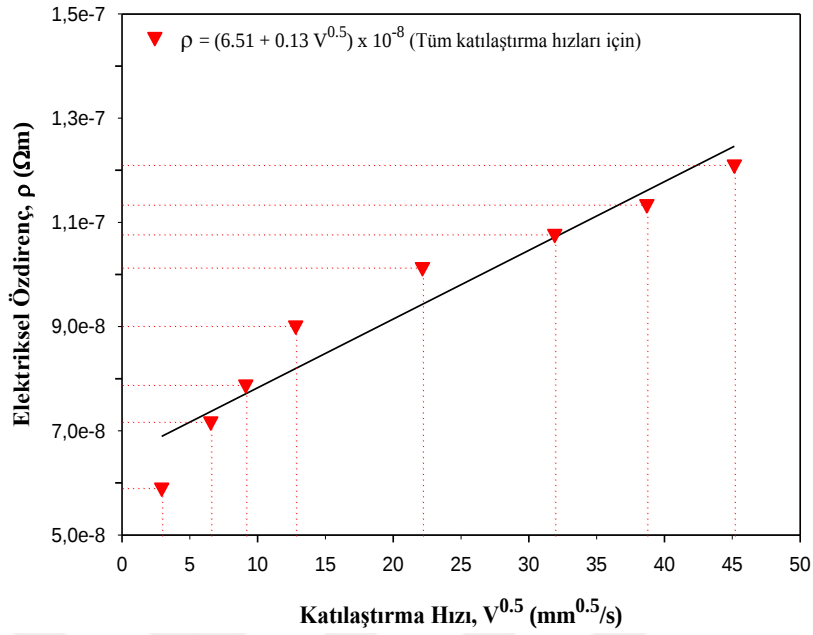
Şekil 3.36. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



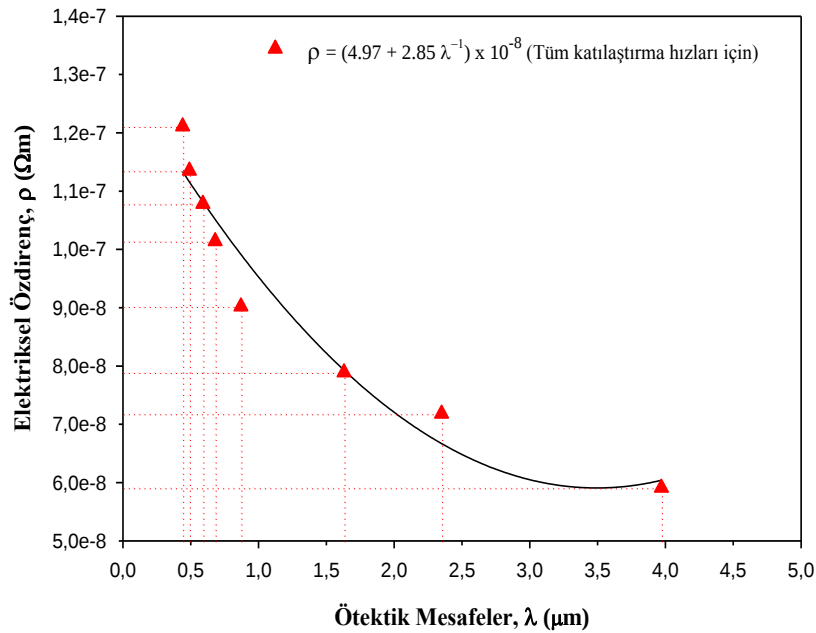
Şekil 3.37. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



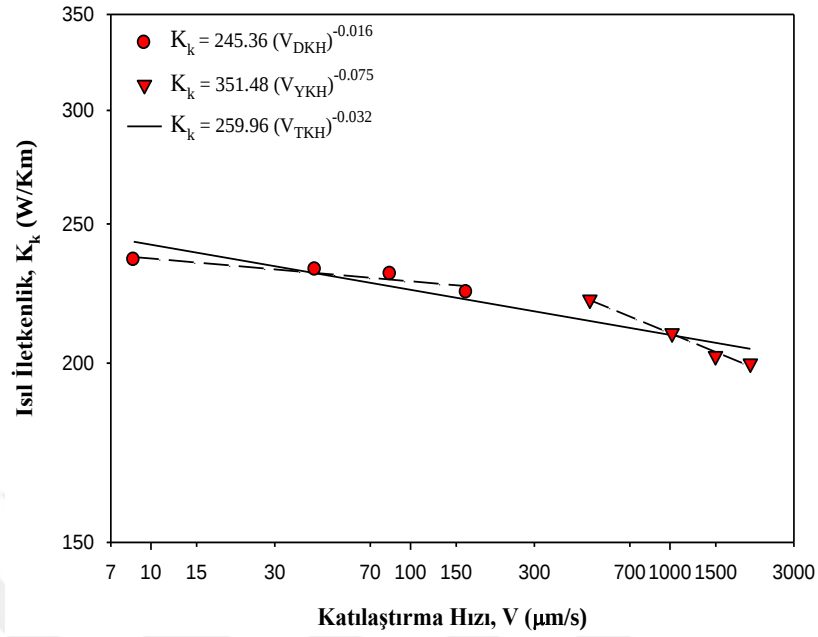
Şekil 3.38. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



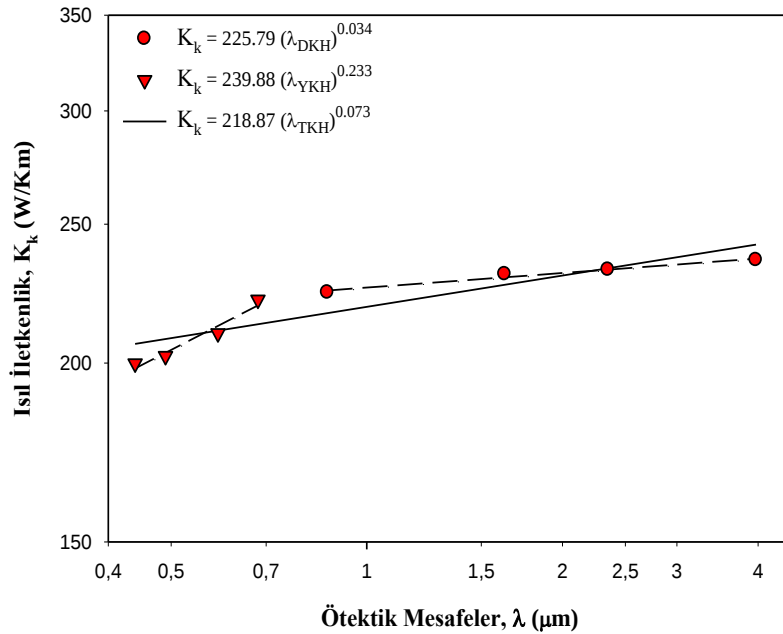
Şekil 3.39. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı.



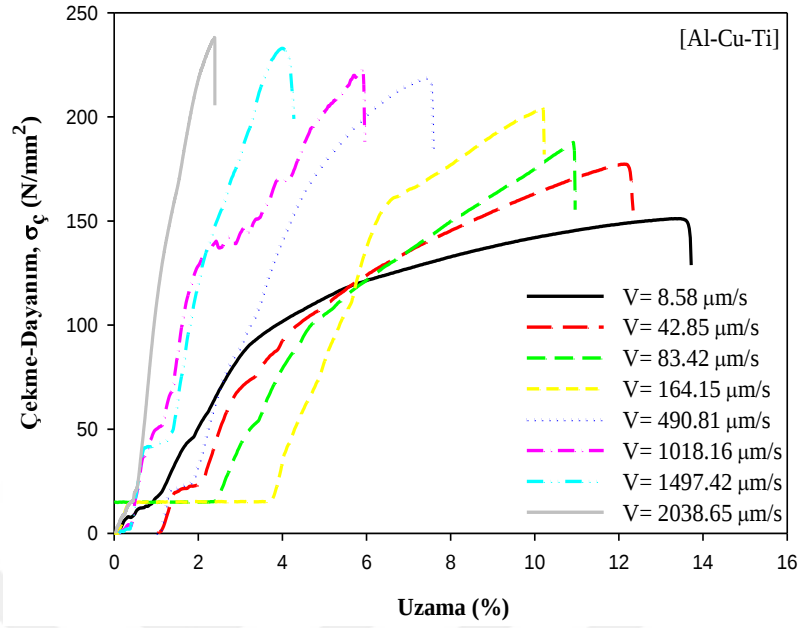
Şekil 3.40. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı.



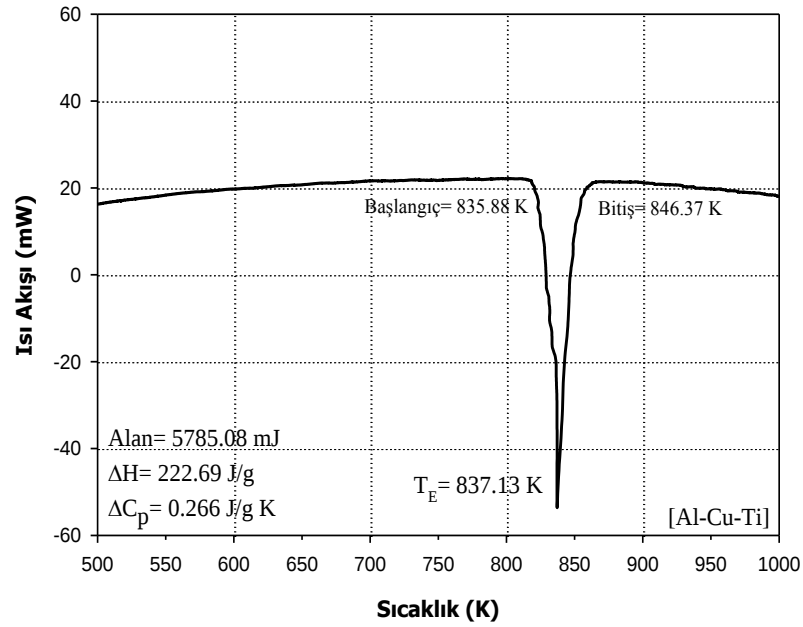
Şekil 3.41. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ısı iletkenlik değ erlerinin katılaştırma hızları ile değ işimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



Şekil 3.42. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ısı iletkenlik değ erlerinin ötektik mesafelerle değ işimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



Şekil 3.43. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanım ve uzama (%) eğrileri.



Şekil 3.44. Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) ötektik alaşımı için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen ısı akışı-sıcaklık eğrisi.

3.9.3. Zn-Al-Cu Ötektik Alaşımının İncelenmesi:

Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) alaşımının doğrusal katılaştırılması ve metalografik işlemler sonrası çekilen SEM fotoğraflarında ana faz üzerinde fazların lamelsel (ötektik) formda büyüdüğü gözlenmiştir. Bu tez çalışmasında yüksek katılaştırma hızlarına çıkabilmek için özel olarak dizayn edilmiş çekme motorunda (Şekil 2.), Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemi için uygulanan gerilime karşılık gelen yüksek çekme hızları ve katılaştırma hızı değerleri Tablo 3.8’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.9’da Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemi için sabit sıcaklık gradyentinde, farklı katılaştırma hızlarında üretilen numunelerden ölçülen ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik değerleri verilmiştir. Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemi için elde edilen verilerle lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen parametreler arası bağıntılar ise Şekil 3.45-61’de verilmiştir.

Şekil 3.45 incelendiğinde katılaştırma hızı arttıkça ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 3.45’ten de görüldüğü gibi alınan ölçümler incelendiğinde sabit sıcaklık gradyentinde ($G = 3.67 \text{ K/mm}$) katılaştırma hızı arttıkça λ_E , sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.47, 0.29 ve 0.38 üstel değerleriyle azalmaktadırlar.

Zn-Al-Cu ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen mikrosertlik değerleri Şekil 3.46’da verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerleri, sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.08, 0.06 ve 0.07 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.47’de verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için sırasıyla 0.17, 0.21 ve 0.18 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.

Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için elde edilen Hall-Petch [85,86] şeklindeki bağıntılara ve Şekil 3.48’de verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik mikrosertlik değerleri (H_0) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 59.33, 82.99 ve 72.27 kg/mm^2 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.49’da verilen grafik incelendiğinde artan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik mikrosertlik değerlerinin (H_0) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 58.15, 64.84 ve 62.32 kg/mm^2 olduğu görülmüştür.

Zn-Al-Cu ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen çekme-dayanım değerleri Şekil 3.50'de verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak çekme-dayanımı sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.11, 0.06 ve 0.08 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.51'de verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak çekme-dayanım değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.23, 0.20 ve 0.22 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.

Şekil 3.52'de verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik çekme-dayanım değeri (σ_0) değerlendirildiğinde sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 87.1, 155.7 ve 123.1 N/mm² olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.53'te verilen grafik incelendiğinde azalan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik çekme-dayanım değerleri (σ_0) değerlendirildiğinde sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 84.3, 123.5 ve 99.5 N/mm² olduğu görülmüştür.

Zn-Al-Cu ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen elektriksel öz direnç değerleri Şekil 3.54'te verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel öz direnç değeri sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.06, 0.10 ve 0.07 üstel değerleri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.55'te verilen logaritmik değişim grafiği logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak elektriksel öz direnç değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.13, 0.37 ve 0.18 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir. Şekil 3.56'da verilen grafik incelendiğinde artan katılaştırma hızına bağlı olarak teorik elektriksel öz direnç değeri (ρ_0) değerlendirildiğinde tüm katılaştırma hızları için 8.52×10^{-8} Ω m olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.57'de verilen grafik incelendiğinde azalan λ_E değerlerine bağlı olarak teorik elektriksel öz direnç değeri (ρ_0) tüm katılaştırma hızları için 7.89×10^{-8} Ω m olduğu görülmüştür.

Zn-Al-Cu ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen ısı iletkenlik değerleri Şekil 3.58'de verilen logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için, 0.036, 0.064 ve 0.040 üstel

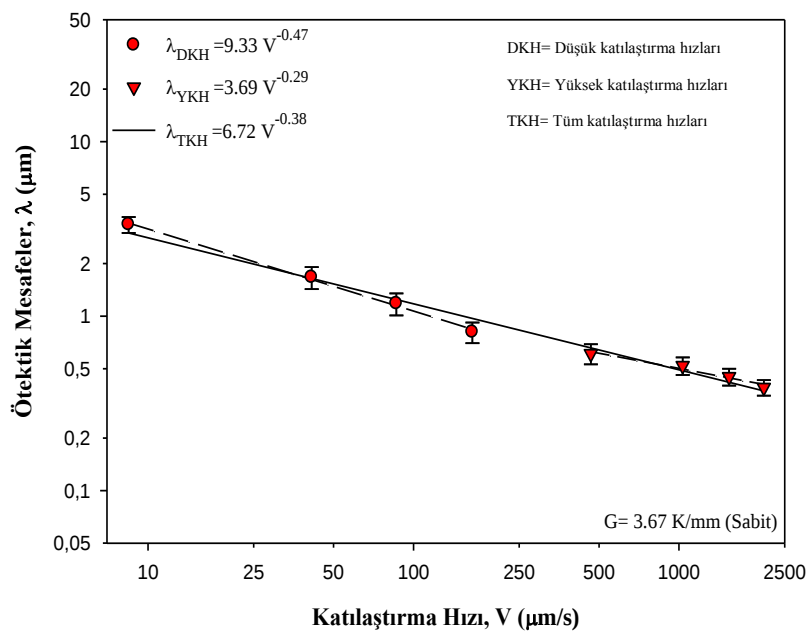
değerleri ile azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.59’da verilen logaritmik değişim grafiği artan λ_E değerlerine bağlı olarak ısı iletkenlik değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.077, 0.225 ve 0.104 üstel değerleriyle arttığı görülmektedir.

Şekil 3.60’ta ise Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemine ait çekme-dayanım değerlerinden faydalanılarak bilimsel ve teknolojik uygulamalar için özellikle malzeme mühendisliği alanında sıkça rastlanan çekme-dayanım ve uzama (%) grafiği verilmektedir.

Son olarak Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) alaşımının entalpi, öz ısı ve erime sıcaklığı değerleri sırasıyla, 113.89 J/g, 0.172 J/gK, 660.54 K olarak elde edilmiş ve ısı akışı-sıcaklık eğrisi Şekil 3.61’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Yüksek katılaştırma hızları için dizayn edilmiş çekme motorunda uygulanan gerilime karşılık gelen çekme hızı ve Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için numune üzerindeki katılaştırma hızı değerleri.

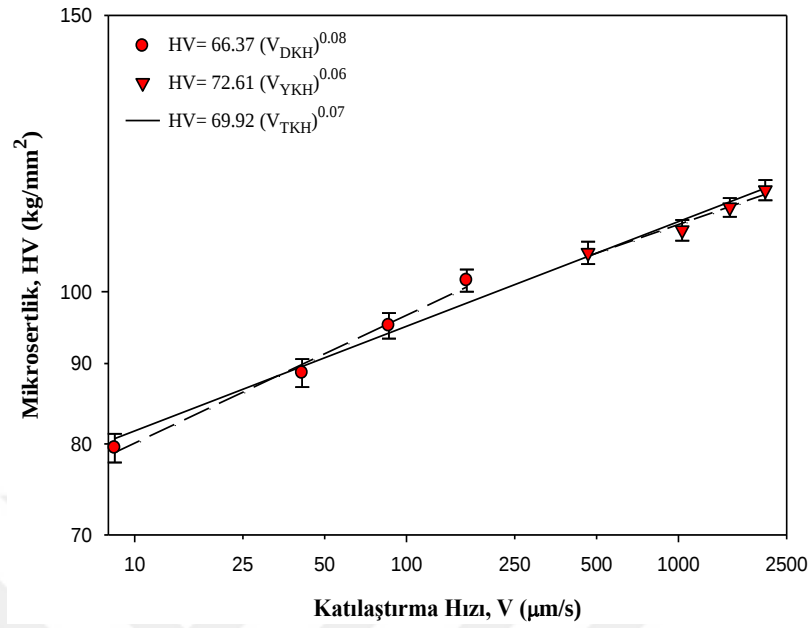
Uygulanan Gerilim (DC Volt)	Çekme Hızı ($\mu\text{m/s}$)	Katılaştırma Hızı ($\mu\text{m/s}$)
1.0	994.32	465.36
2.1	2097.45	1032.47
2.9	3112.23	1544.62
3.8	4275.57	2087.15



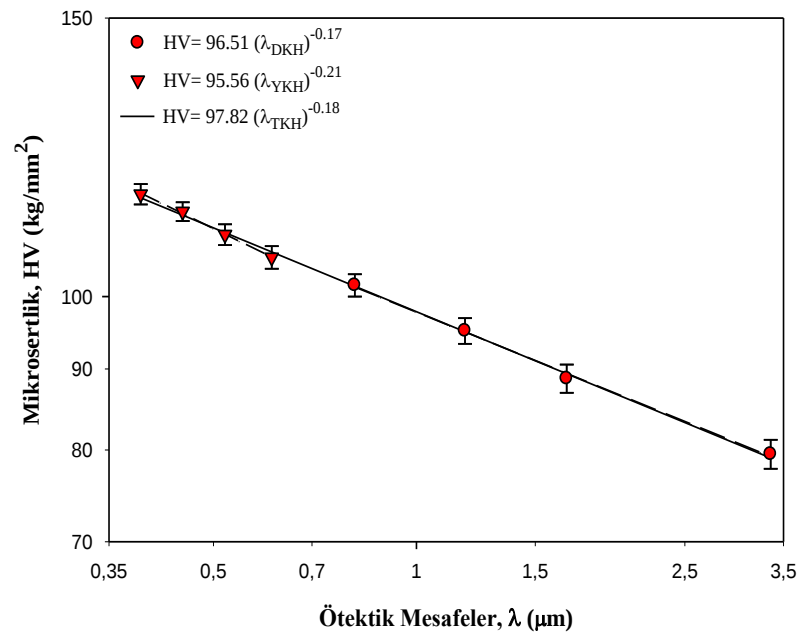
Şekil 3.45. Sabit sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.

Tablo 3.9. Sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılan Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ötektik mesafe, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç ve ısı iletkenlik değeri.

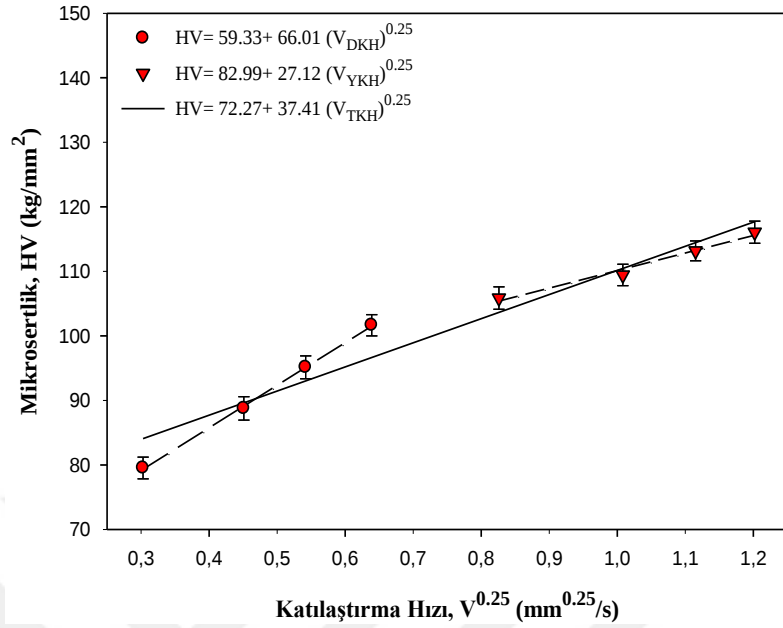
Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.)						
Katılaştırma Parametreleri		Ötektik Mesafe	Mikrosertlik	Çekme- Dayanım	Elektriksel Özdirenç	Isıl İletkenlik
G (K/mm)	V (μm/s)	λ_E (μm)	HV (kg/mm ²)	σ_C (N/mm ²)	$\rho \times 10^{-8}$ (Ωm)	K _k (W/Km)
3.67	8.45	3.35 ± 0.35	79.52 ± 1.68	136.89	8.36	139.49
	41.32	1.67 ± 0.24	88.76 ± 1.82	153.78	8.89	133.97
	86.14	1.18 ± 0.17	95.13 ± 1.78	176.84	9.63	129.66
	166.58	0.81 ± 0.11	101.65 ± 1.65	188.10	9.96	124.92
	465.36	0.61 ± 0.08	105.87 ± 1.74	197.56	10.62	122.05
	1032.47	0.52 ± 0.06	109.44 ± 1.66	204.58	10.98	118.36
	1544.62	0.45 ± 0.05	113.18 ± 1.54	212.45	11.82	114.89
	2087.15	0.39 ± 0.04	116.07 ± 1.72	215.76	12.43	110.23



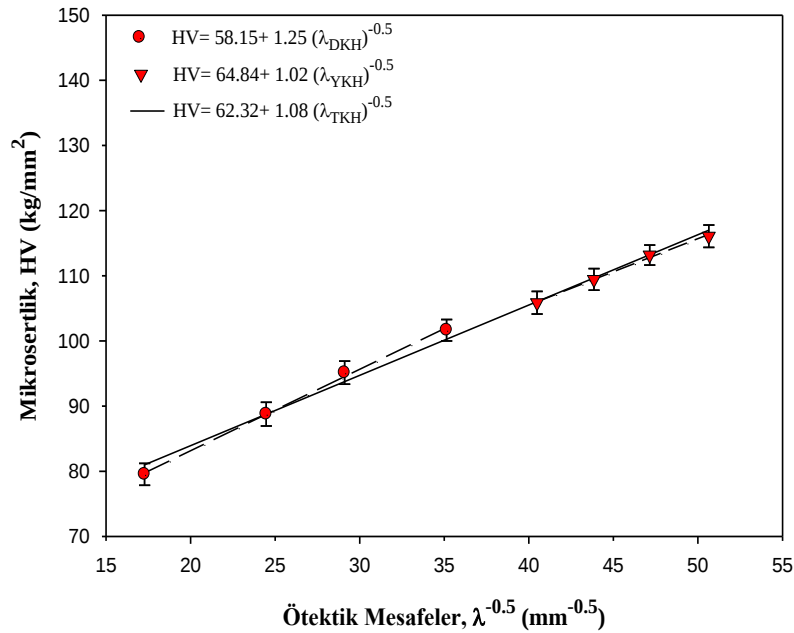
Şekil 3.46. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



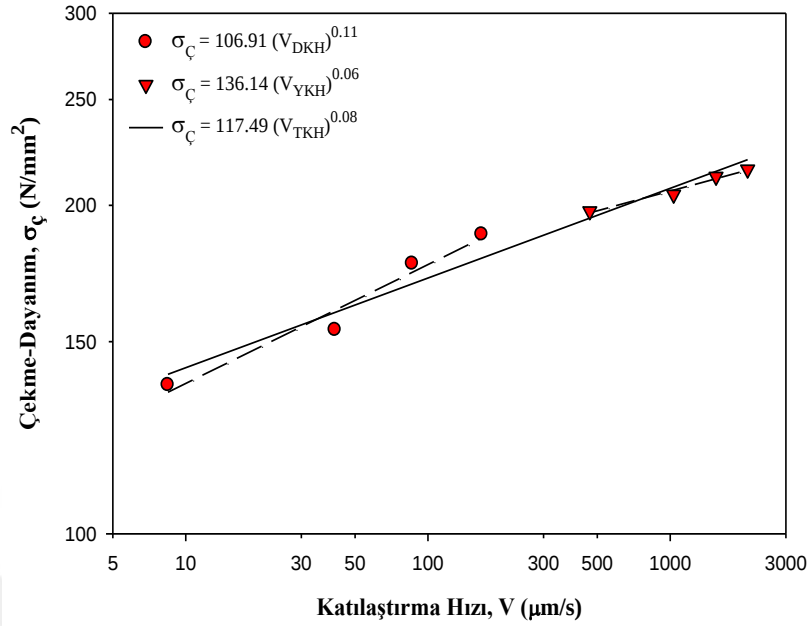
Şekil 3.47. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



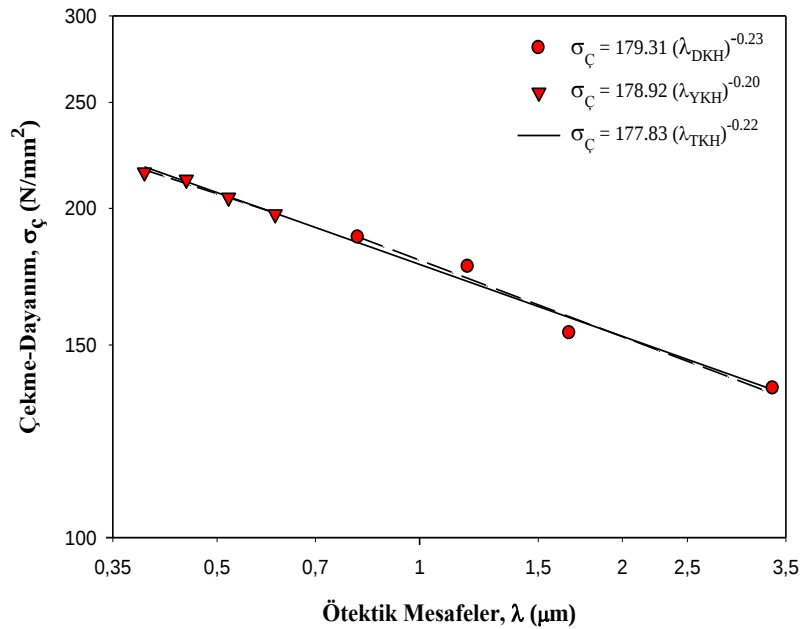
Şekil 3.48. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



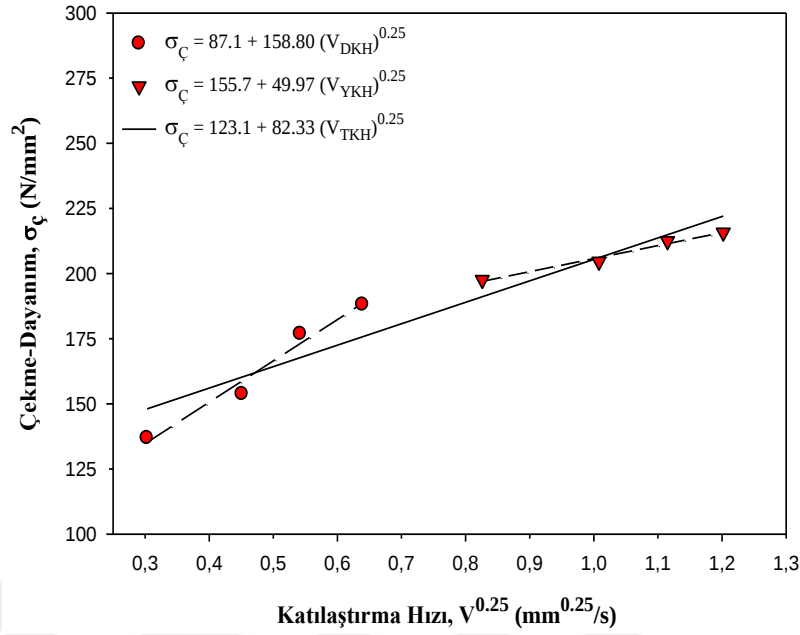
Şekil 3.49. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



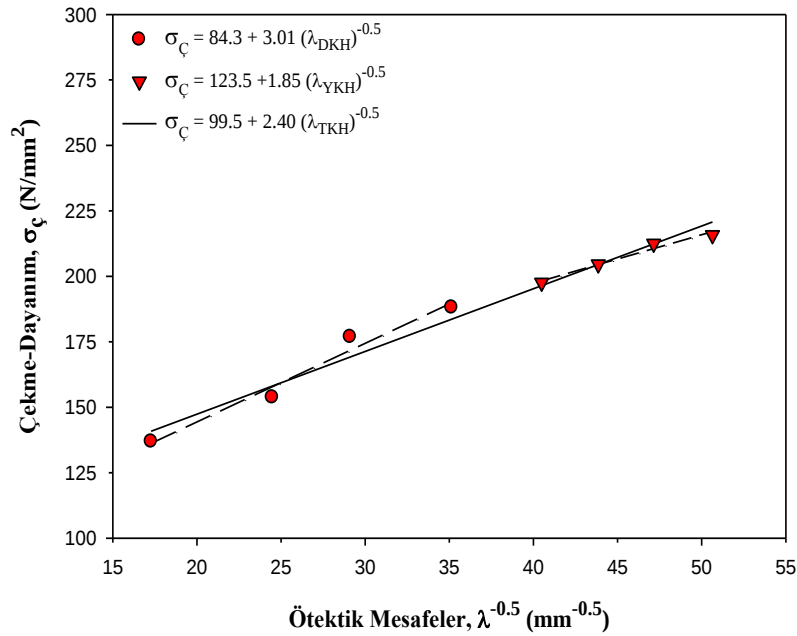
Şekil 3.50. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



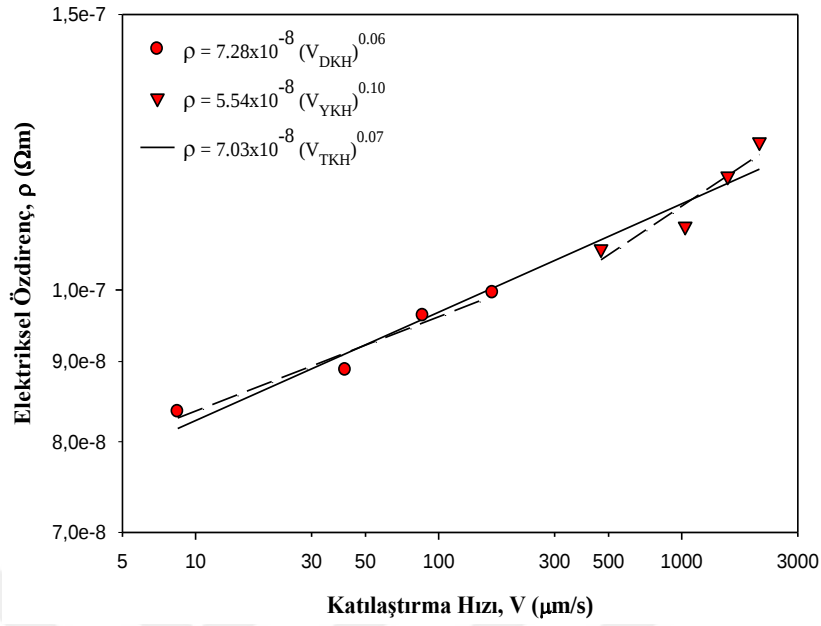
Şekil 3.51. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



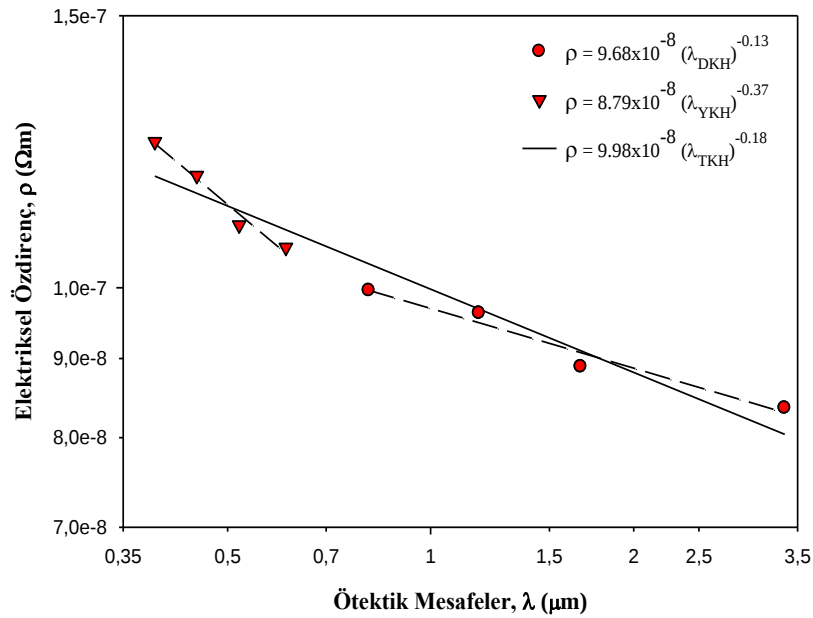
Şekil 3.52. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



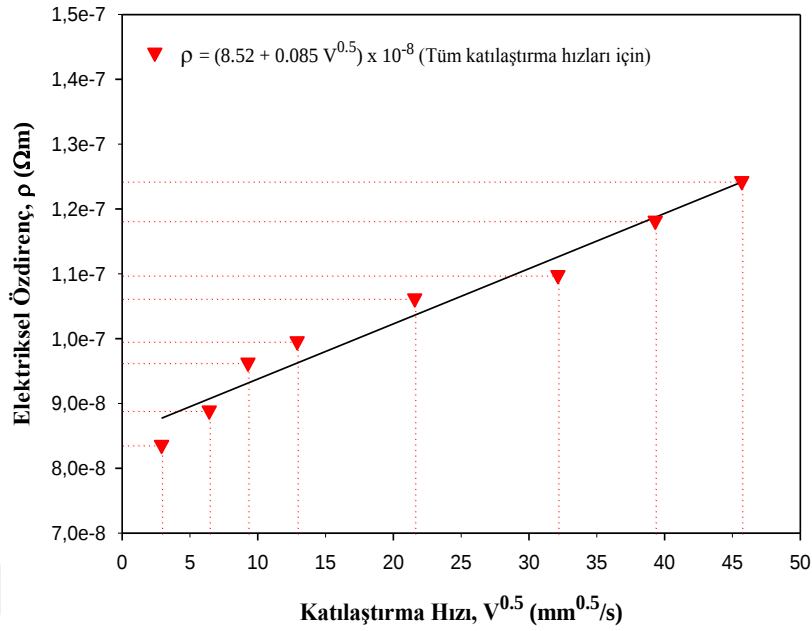
Şekil 3.53. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının çekme-dayanım değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen Hall-Petch tipi bağıntıları.



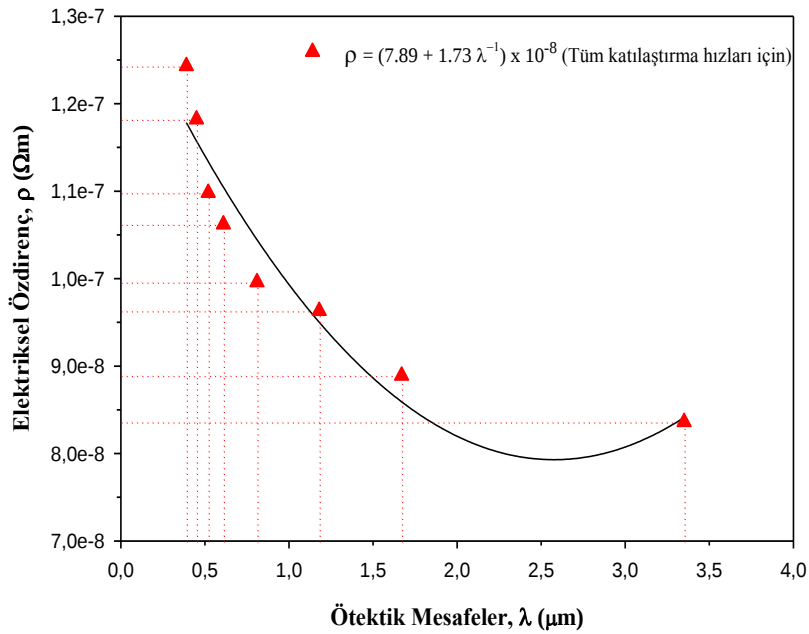
Şekil 3.54. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



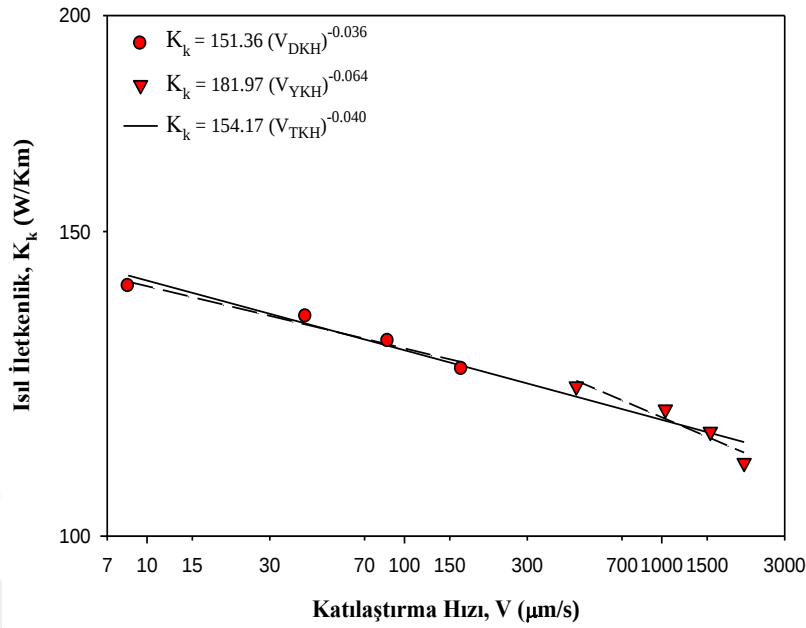
Şekil 3.55. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



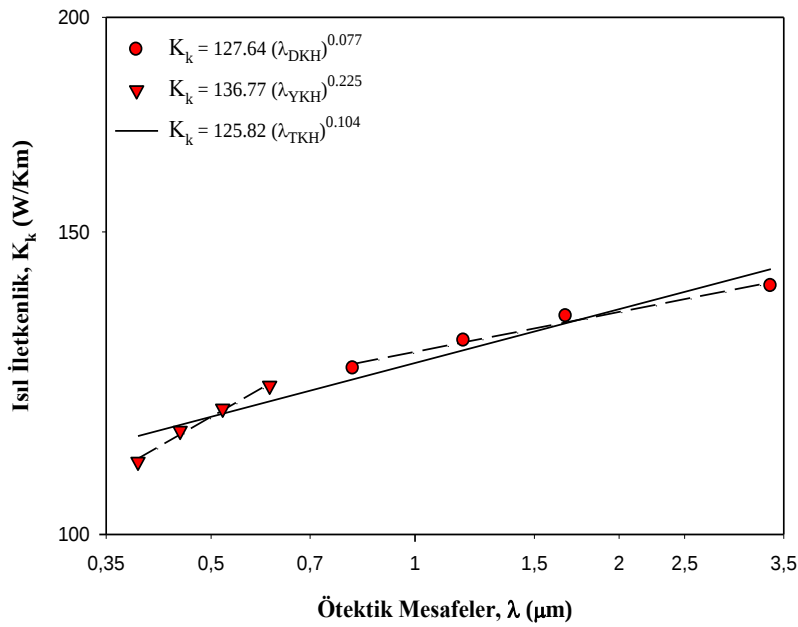
Şekil 3.56. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızları ile değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı.



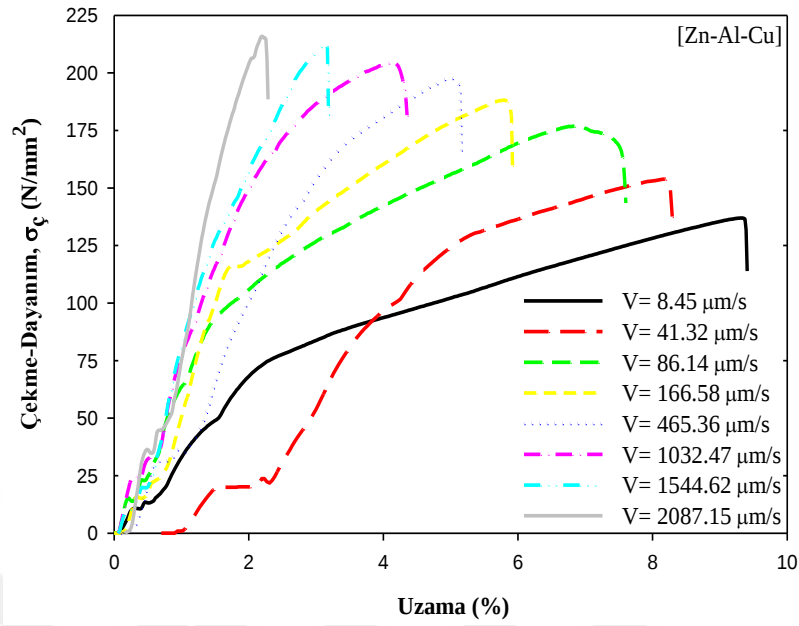
Şekil 3.57. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen Hall-Petch tipi bağıntısı.



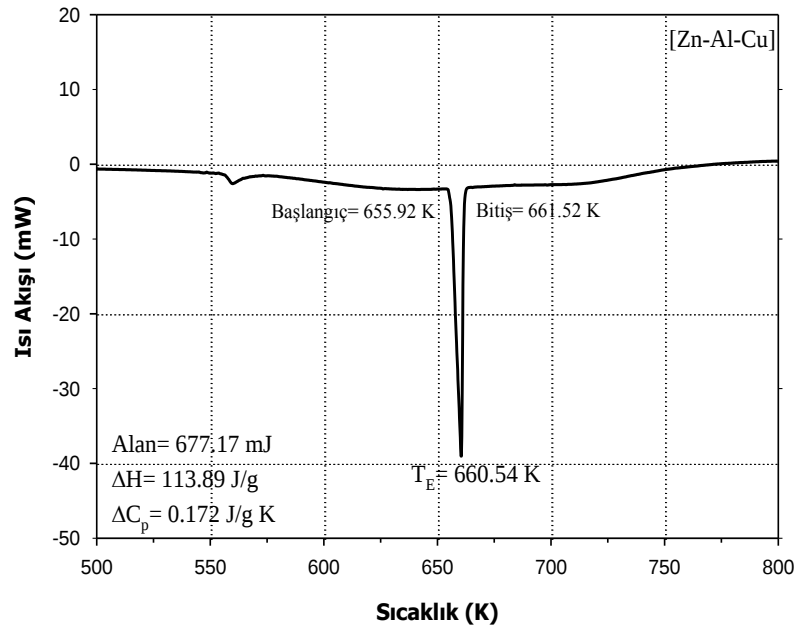
Şekil 3.58. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ısı iletkenlik değ erlerinin katılaştırma hızları ile değ işimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



Şekil 3.59. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ısı iletkenlik değ erlerinin ötektik mesafelerle değ işimi ve farklı hız aralıkları için elde edilen bağıntılar.



Şekil 3.60. $G=3.67 \text{ K/mm}$ sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanım ve uzama (%) eğrileri.



Şekil 3.61. Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) ötektik alaşımı için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazından elde edilen ısı akışı-sıcaklık eğrisi.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir önceki bölümde Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.), Al-%33 Cu-%0.1 Ti (ağ.) ve Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) ötektik alaşım sistemleri için yapılan kontrollü katılaştırma deneylerinden elde edilen mikroyapılardan ötektik mesafe ölçümleri yapılmış ve katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel öz direnç ve ısı iletkenlik üzerine etkilerini araştırılıp aralarındaki bağıntılar belirlenmiştir. Bu bölümde ise elde edilen deneysel sonuçların yorumlanması ve literatürdeki benzer deneysel çalışmalarla kıyaslanması yapılarak gelecekte daha ne tür çalışmaların yapılabileceği belirtilecektir.

4.1. Deneysel Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması

4.1.1. Ötektik Mesafelerin Literatürle Karşılaştırılması

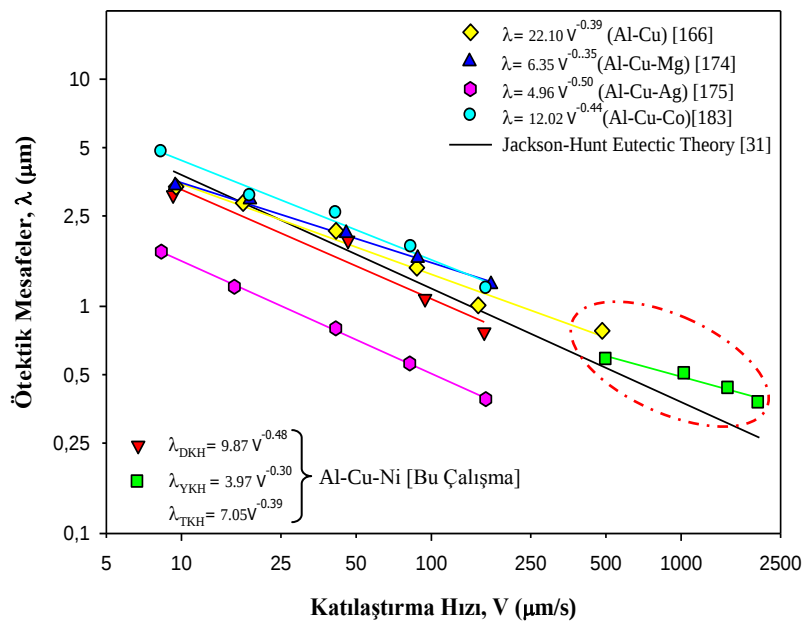
Bu tez çalışmasında yapılan Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerine ait kontrollü katılaştırma deneylerinden elde edilen verilerin lineer regresyon analiziyle belirlenen katılaştırma hızının mikroyapıya etkisini veren sonuçlar Tablo 4.1’te verilmiştir. Benzer ötektik alaşımlar üzerine yapılmış literatürde yer alan bazı çalışmalar Tablo 4.2’de özetlenmiştir.

Tablo 4.1 ve 4.2’ de verilen katılaştırma hızı ile ötektik mesafeler arasındaki ilişkiyi gösteren veriler dikkate alındığında bu tez çalışmasında incelenen Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemlerinin üstel değerleri düşük katılaştırma hızları için hem kendi aralarında hem de literatürdeki ötektik alaşım sistemleriyle yakın uyum içerisindedir. Ancak Tablo 4.1’de yüksek katılaştırma hızları için verilen üstel değerler (0.30, 0.31, 0.29), literatürdeki benzer alaşım sistemlerindeki üstel değerlerden ve Jackson-Hunt [31] ötektik teorisinin öngördüğü (0.50) üstel değerden oldukça küçüktür. Şekil 4.1 ve 4.2’ ve 4.3’te bu çalışmada elde edilen ötektik mesafelerin katılaştırma hızı

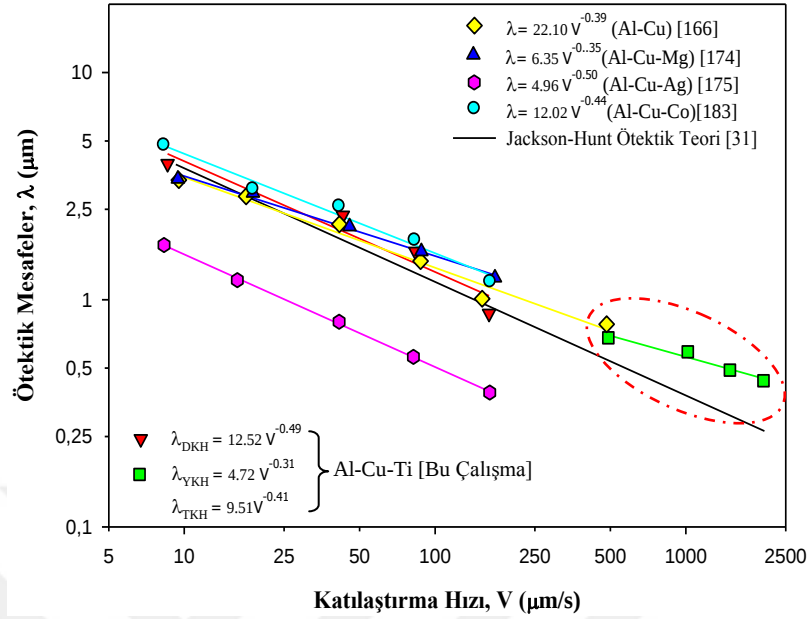
ile değişimi ve literatürdeki bazı ötektik alaşımların deneysel sonuçları ile Jackson-Hunt [31] ötektik teorisinin hem Al-33 Cu (% ağı.) ötektik alaşımı hem de Zn-5Al (ağı.) ötektik alaşımı için öngördüğü ötektik mesafelerin mukayesesi gösterilmektedir. Bu grafikler ve sonuçlar; Jackson-Hunt [31] ötektik teorisinin üçlü ötektik alaşımlarda çok yüksek katılaştırma hızlarında deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığını açıkça göstermektedir.

Tablo 4.1. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu alaşımları için katılaştırma deneylerinden farklı katılaştırma hızları için elde edilen bazı bağıntılar.

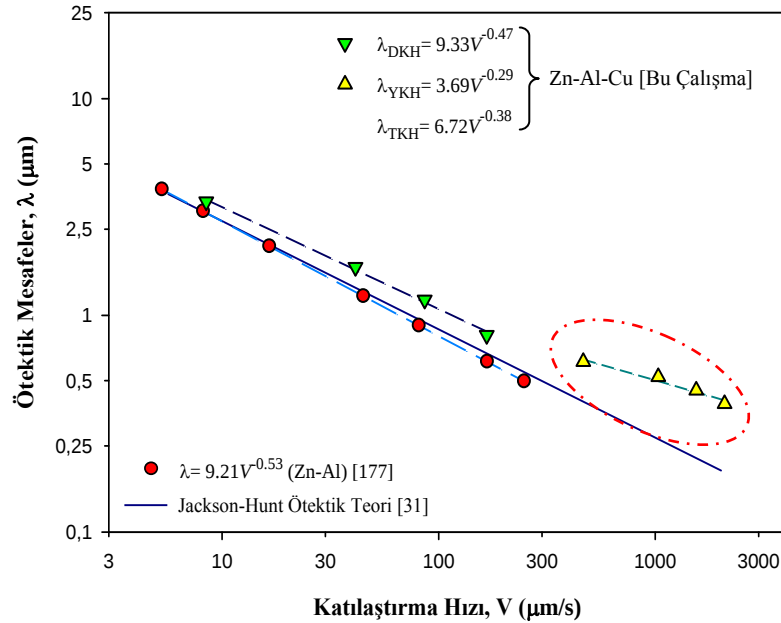
Alaşım (% ağı.)	Erime Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık Gradyenti (K/mm)	Katılaştırma Hızı Aralığı ($\mu\text{m/s}$)	Hacimsel Büyütme Oranı ($\mu\text{m}^3/\text{s}$)	Katılaştırma hızının ötektik mesafeye bağıllığı(μm)
Al-32.5Cu- 1 Ni	558.53	4.93	9.25-162.85	117.84	$\lambda_{(DKH)} = 9.87V^{-0.48}$
			496.72-2056.68	258.27	$\lambda_{(YKH)} = 3.97V^{-0.30}$
			9.25-2056-68	188.06	$\lambda_{(TKH)} = 7.05V^{-0.39}$
Al-33Cu- 0.1Ti	564.13	6.45	8.58-164.15	179.44	$\lambda_{(DKH)} = 12.52V^{-0.49}$
			490.81-2038.65	333.90	$\lambda_{(YKH)} = 4.72V^{-0.31}$
			8.58-2038.65	256.67	$\lambda_{(TKH)} = 9.51V^{-0.41}$
Zn-5Al- 0.5Cu	387.54	3.67	8.45-166.58	109.83	$\lambda_{(DKH)} = 9.33V^{-0.47}$
			465.36-2087.15	270.65	$\lambda_{(YKH)} = 3.69V^{-0.29}$
			8.45-2087.15	190.24	$\lambda_{(TKH)} = 6.72V^{-0.38}$



Şekil 4.1. $G=4.93$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin farklı büyütme hız aralıkları ile değişimi ve literatürdeki bazı Al-Cu esaslı ötektik alaşımların deneysel sonuçları ile Al-33 Cu (% ağı.) ötektik alaşımı için Jackson-Hunt [31] ötektik teorisinin öngördüğü ötektik mesafelerin değişimi.



Şekil 4.2. $G=6.45$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ti ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin farklı büyütme hız aralıkları ile değişimi ve literatürdeki bazı Al-Cu esaslı ötektik alaşımların deneysel sonuçları ile Al-33 Cu (% ağırlık) ötektik alaşımı için Jackson-Hunt [31] ötektik teorisinin öngördüğü ötektik mesafelerin değişimi.



Şekil 4.3. $G=3.67$ K/mm sıcaklık gradyentinde doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımının ötektik mesafelerinin farklı büyütme hız aralıkları ile değişimi ve Zn-5Al (ağırlık) alaşımı için literatürdeki deneysel sonuçları [177] ile Jackson-Hunt [31] ötektik teorisinin öngördüğü ötektik mesafelerin değişimi.

Tablo 4.2. Doğrusal katılaştırılmış Al ve Zn esaslı ikili ve üçlü alaşımlarda ötektik katılaştırma üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar.

Alaşım (% ağı.)	Katılaştırma Hızı Aralığı ($\mu\text{m/s}$)	Hacimsel Büyütme Oranı ($\mu\text{m}^3/\text{s}$) (λ^2V)	Katılaştırma hızının ötektik mesafeye bağıllığı(μm)	Kaynaklar
Al-33Cu	9.5-483.2	156.0	$\lambda = 22.10V^{-0.39}$	[166]
Zn-5Al	5.3-250	69.05	$\lambda = 9.21V^{-0.53}$	[177]
Al-12.6Si	8.3-498.7	784.98	$\lambda = 23.44V^{-0.46}$	[171]
Al-5.7Ni	8.32-483.25	101.80	$\lambda = 10.76V^{-0.50}$	[170]
		129.28	$\lambda = 11.61V^{-0.51}$	
Al-30Cu-6Mg	9.43-173.30	195.76	$\lambda_{Al_2Cu} = 6.35V^{-0.35}$	[174]
		93.2	$\lambda_{Al_2CuMg} = 3.05V^{-0.31}$	
Al-17.6Cu-42.2Ag	8.30-165.15	131.86	$\lambda_{Al_2Cu} = 4.96V^{-0.50}$	[175]
Al-23.9Cu-1.2Co	8.30-166.60	-	$\lambda = 12.02V^{-0.44}$	[183]
Al-11.1Si-4.2Ni	4.60-243.33	170.52	$\lambda_{Si} = 12.58V^{-0.50}$	[173]
		82.01	$\lambda_{Al_3Ni} = 7.94V^{-0.47}$	
Al-12.95Si-4.96Mg	8.64-165.20	847.69	$\lambda_{Si} = 29.32V^{-0.45}$	[179]
		597.5	$\lambda_{Mg_2Si} = 19.86V^{-0.44}$	
Al-6.5Ni-1.5Fe	8.25-164.80	-	$\lambda_{Al_3Ni} = 10.80V^{-0.53}$	[176]
		-	$\lambda_{Al_3NiFe} = 40.40V^{-0.48}$	
Zn-7Al-4Cu	11.62-230.77	-	$\lambda_{Zn-Al} = 5.49V^{-0.42}$	[167]
		-	$\lambda_{CuZn_4} = 35.48V^{-0.56}$	

4.1.2. Mikrosertlik Değerlerinin Literatürle Karşılaştırılması

Sabit sıcaklık gradientinde ve farklı katılaştırma hızlarında doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu üçlü ötektik alaşım sistemlerine ait mekanik özelliklerden mikrosertlik değerleri için elde edilen bağıntılar Tablo 4.3'te ve literatürde yer alan benzer çalışmalar ise Tablo-1.5'te verilmiştir. Tablo 4.3'deki deneysel sonuçlara bakıldığında Al-Cu-Ni ve Al-Cu-Ti ötektik alaşımlarının tüm katılaştırma hızları için mikrosertliklerinin hıza bağlı üstel değerleri (0.07 ve 0.05), literatürdeki kompozisyonu Al [97, 170, 176, 179] ve Al-Cu [95, 182, 183] esaslı olan alaşımların üstel değerleri [(0.7-0.10) ve (0.05-0.10)] ile çok küçük bir farklılık olmakla birlikte uyum içerisinde. Bu farklılığın Al-Cu ötektik alaşımına ilave edilen Ni ve Ti katkı elementlerinden ve katılaştırma hızlarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Zn-Al-Cu ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için mikrosertliklerinin hıza bağlı üstel değeri

ise (0.07), literatürdeki kompozisyonu Zn-5Al (% ağı.) [90, 167, 177] olan alaşımların üstel değerlerinin [(0.10-0.13)] neredeyse yarısı kadar küçüktür. Fakat bu tez çalışmasındaki kompozisyonu Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağı.) olan alaşımın üstel değeri olan 0.05, literatürdeki kompozisyonu Zn-%7 Al-%4 Cu (ağı.) [167] olan alaşımın mikrosertliklerinin hıza bağlı üstel değeri olan 0.07 ile uyum içerisinde. Buradan şunu söyleyebiliriz; ilk kıyaslamadaki farklılıkta Zn-Al ötektik alaşımına ilave edilen Cu katkı elementinin etkisi ancak ikinci kıyaslamadaki farklılıkta ise alaşımı oluşturan elementlerin aynı olmasına rağmen yüksek katılaştırma hızlarının varlığı daha etkin olmaktadır. Son olarak ise beklenildiği gibi tüm bu ilave edilen elementlerin alaşımların sertlik değerini katılaştırma hızına bağlı olarak artırdığı açıkça görülmektedir.

Tablo 4.3. Doğrusal katılaştırılmış alaşımlarda mikrosertlik değerlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafelere bağlılığı.

Alaşım (% ağı.)	Mikrosertlik için Elde Edilen Bağlılıklar(kg/mm ²)	Kaynaklar
Al-32.5Cu-1Ni	$HV = 115.08(V_{DKH})^{0.08}$ $HV = 103.30 + 106.10(V_{DKH})^{0.25}$ $HV = 126.18(V_{YKH})^{0.06}$ $HV = 144.20 + 42.54(V_{YKH})^{0.25}$ $HV = 119.59(V_{TKH})^{0.07}$ $HV = 124.40 + 62.16(V_{TKH})^{0.25}$ $HV = 164.95(\lambda_{DKH})^{-0.16}$ $HV = 105.50 + 1.86(\lambda_{DKH})^{-0.5}$ $HV = 164.44(\lambda_{YKH})^{-0.18}$ $HV = 119.80 + 1.49(\lambda_{YKH})^{-0.5}$ $HV = 165.96(\lambda_{TKH})^{-0.17}$ $HV = 109.10 + 1.72(\lambda_{TKH})^{-0.5}$	[Bu çalışma]
Al-33Cu-0.1Ti	$HV = 145.41(V_{DKH})^{0.06}$ $HV = 136.90 + 91.46(V_{DKH})^{0.25}$ $HV = 144.08(V_{YKH})^{0.05}$ $HV = 163.30 + 44.73(V_{YKH})^{0.25}$ $HV = 149.15(V_{TKH})^{0.05}$ $HV = 154.20 + 54.24(V_{TKH})^{0.25}$ $HV = 194.18(\lambda_{DKH})^{-0.11}$ $HV = 142.30 + 1.63(\lambda_{DKH})^{-0.5}$ $HV = 188.87(\lambda_{YKH})^{-0.17}$ $HV = 138.40 + 1.66(\lambda_{YKH})^{-0.5}$ $HV = 195.01(\lambda_{TKH})^{-0.12}$ $HV = 144.70 + 1.52(\lambda_{TKH})^{-0.5}$	[Bu çalışma]
Zn-5Al-0.5Cu	$HV = 66.37(V_{DKH})^{0.08}$ $HV = 59.33 + 66.01(V_{DKH})^{0.25}$ $HV = 72.61(V_{YKH})^{0.06}$ $HV = 82.99 + 27.12(V_{YKH})^{0.25}$ $HV = 69.92(V_{TKH})^{0.07}$ $HV = 72.27 + 37.41(V_{TKH})^{0.25}$ $HV = 96.51(\lambda_{DKH})^{-0.17}$ $HV = 58.15 + 1.25(\lambda_{DKH})^{-0.5}$ $HV = 95.56(\lambda_{YKH})^{-0.21}$ $HV = 64.84 + 1.02(\lambda_{YKH})^{-0.5}$ $HV = 97.82(\lambda_{TKH})^{-0.18}$ $HV = 62.32 + 1.08(\lambda_{TKH})^{-0.5}$	[Bu çalışma]

4.1.3. Çekme-Dayanım Değerlerinin Literatürle Karşılaştırılması

Aynı zamanda bu tez çalışmasındaki Tablo 4.4'te verilen Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşımlarına ait çekme-dayanım değerleri ve Tablo 1.6'daki literatür çalışmalarına bakıldığında, Al-Cu-Ni ve Al-Cu-Ti ötektik alaşımlarının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanımlarının hıza bağlı üstel değerlerinin (0.08), hem literatürdeki kompozisyonu Al [97, 176, 179] esaslı olan alaşımların üstel değerlerinin (0.14-0.20) ve hem de Al-Cu [174] esaslı olan alaşımın üstel değerinin (0.14) neredeyse yarısı kadar küçük olduğu ancak kompozisyonu Al-33Cu (% ağırlık) [95] olan ötektik alaşımın üstel değeri ile (0.08) uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebinin katılaştırma hızlarının farklılığından olmasının yanı sıra Al-Cu ötektik alaşımına ilave edilen Ni ve Ti katkı elementlerinden kaynaklandığını ve bileşim farkının daha etkin olduğunu söylemek mümkündür. Zn-Al-Cu ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için çekme-dayanımının hıza bağlı üstel değeri ise (0.08), literatürdeki kompozisyonu Zn esaslı [167] olan alaşımın üstel değerinin (0.16) neredeyse yarısı kadar küçüktür. Bu uyumsuzluğun sebebinin de alaşımı oluşturan elementlerin aynı olmasına rağmen ötektik alaşım kompozisyonlarının farklılığı ve özellikle yüksek katılaştırma hızlarından kaynaklandığı ve beklenildiği gibi bu ilave edilen elementlerin alaşımların çekme-dayanım değerlerini katılaştırma hızına bağlı olarak arttırdığı açıkça görülmektedir.

Bu sonuçların literatürle kıyaslanmasının yanında, Al-Cu-Ni alaşımının çekme-dayanım değeri Al-Cu-Ti alaşımının çekme-dayanım değerinden daha büyük olduğu görülmektedir (Tablo 3.5 ve Tablo 3.7). Bu durum literatürde de ifade edildiği gibi; daha sert olan (Ni elementine göre) Ti elementinin Al-Cu ötektik alaşımının sertlik değerini daha fazla arttırdığı (Al-Cu-Ni alaşımına göre) fakat çekme-dayanım değerini daha az arttırması ve daha yumuşak olan (Ti elementine göre) Ni elementinin Al-Cu ötektik alaşımının sertlik değerini daha az arttırdığı (Al-Cu-Ti alaşımına göre) fakat çekme-dayanım değerini ise daha fazla arttırması gerektiği beklentisi ile oldukça uyumludur. Ayrıca yine bu tez çalışmasında incelenen Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağırlık) ötektik alaşımın sertlik değerleri 79.52-116.07 kg/mm² aralığında ve çekme değerleri ise 136.89-215.76 N/mm² aralığındadır. Benzer katılaştırma şartları altında doğrusal katılaştırılan ve literatürdeki kompozisyonu bu ötektik alaşıma en yakın olan Zn-%7 Al-%4 Cu (ağırlık) [167] ötektik alaşımın sertlik değerleri ise 84.34-99.84 kg/mm² aralığında ve çekme değerleri 176.55-285.43 N/mm² aralığındadır. Her iki alaşım için bu değerlere

ve kompozisyonlara bakıldığında, Zn-%7 Al-%4 Cu (ağ.) alaşımında; daha sert olan Zn (Al elementine göre) miktarındaki azalışın ve daha yumuşak olan Al (Zn elementine göre) miktarındaki artışın, sertlik değerini Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) alaşımına göre daha az artırması ve çekme-dayanım değerini daha fazla arttırması beklentisi ile oldukça güçlü bir uyum içerisinde. (Not: Bu yorum Zn ve Al elementlerinin alaşımların kompozisyonlarının % 95'ten fazlasını oluşturduğu için bu iki elementin miktarlarındaki değişimin Cu elementindeki değişimden daha etkin olması gerektiği düşünülerek yapılmıştır.)

Tablo 4.4. Doğrusal katılaştırılmış alaşımlarda çekme-dayanım değerlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafelere bağlılığı.

Alaşım	Çekme-Dayanım için Elde Edilen Bağlıntılar(N/mm ²)		Kaynaklar
Al-32.5Cu-1Ni	$\sigma_{\zeta} = 146.55(V_{DKH})^{0.09}$	$\sigma_{\zeta} = 125.70 + 174.40(V_{DKH})^{0.25}$	[Bu çalışma]
	$\sigma_{\zeta} = 163.68(V_{YKH})^{0.07}$	$\sigma_{\zeta} = 191.40 + 73.28(V_{YKH})^{0.25}$	
	$\sigma_{\zeta} = 153.11(V_{TKH})^{0.08}$	$\sigma_{\zeta} = 158.80 + 105.40(V_{TKH})^{0.25}$	
	$\sigma_{\zeta} = 225.87(\lambda_{DKH})^{-0.19}$	$\sigma_{\zeta} = 130.70 + 3.01(\lambda_{DKH})^{-0.5}$	
	$\sigma_{\zeta} = 226.69(\lambda_{YKH})^{-0.22}$	$\sigma_{\zeta} = 151.40 + 2.52(\lambda_{YKH})^{-0.5}$	
	$\sigma_{\zeta} = 228.93(\lambda_{TKH})^{-0.20}$	$\sigma_{\zeta} = 133.60 + 2.90(\lambda_{TKH})^{-0.5}$	
Al-33Cu-0.1Ti	$\sigma_{\zeta} = 120.67(V_{DKH})^{0.10}$	$\sigma_{\zeta} = 102.30 + 163.40(V_{DKH})^{0.25}$	[Bu çalışma]
	$\sigma_{\zeta} = 149.28(V_{YKH})^{0.06}$	$\sigma_{\zeta} = 170.40 + 55.79(V_{YKH})^{0.25}$	
	$\sigma_{\zeta} = 131.52(V_{TKH})^{0.08}$	$\sigma_{\zeta} = 137.60 + 88.39(V_{TKH})^{0.25}$	
	$\sigma_{\zeta} = 204.45(\lambda_{DKH})^{-0.20}$	$\sigma_{\zeta} = 113.80 + 2.84(\lambda_{DKH})^{-0.5}$	
	$\sigma_{\zeta} = 201.84(\lambda_{YKH})^{-0.20}$	$\sigma_{\zeta} = 136.60 + 2.13(\lambda_{YKH})^{-0.5}$	
	$\sigma_{\zeta} = 203.33(\lambda_{TKH})^{-0.19}$	$\sigma_{\zeta} = 121.50 + 2.49(\lambda_{TKH})^{-0.5}$	
Zn-5Al-0.5Cu	$\sigma_{\zeta} = 106.91(V_{DKH})^{0.11}$	$\sigma_{\zeta} = 87.10 + 158.80(V_{DKH})^{0.25}$	[Bu çalışma]
	$\sigma_{\zeta} = 136.14(V_{YKH})^{0.06}$	$\sigma_{\zeta} = 155.70 + 49.97(V_{YKH})^{0.25}$	
	$\sigma_{\zeta} = 117.49(V_{TKH})^{0.08}$	$\sigma_{\zeta} = 123.10 + 82.33(V_{TKH})^{0.25}$	
	$\sigma_{\zeta} = 179.31(\lambda_{DKH})^{-0.23}$	$\sigma_{\zeta} = 84.30 + 3.01(\lambda_{DKH})^{-0.5}$	
	$\sigma_{\zeta} = 178.92(\lambda_{YKH})^{-0.20}$	$\sigma_{\zeta} = 123.50 + 1.85(\lambda_{YKH})^{-0.5}$	
	$\sigma_{\zeta} = 177.83(\lambda_{TKH})^{-0.22}$	$\sigma_{\zeta} = 99.50 + 2.40(\lambda_{TKH})^{-0.5}$	

4.1.4. Elektriksel Özdirenç Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında elektriksel özdirenç oda sıcaklığında ölçülmüş ve katılaştırma hızına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Sekiz farklı katılaştırma hızlarında doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu üçlü ötektik alaşım sistemlerine ait elektriksel özdirenç değerleri için elde edilen bağıntılar Tablo 4.5'te ve literatürde yer alan benzer çalışmalar ise Tablo-1.7'de verilmiştir. Çeşitli araştırmacılar farklı yöntemlerle alaşımların elektriksel özdirençlerini ölçmüşlerdir. Genellikle araştırmacılar elektriksel özdirencin sıcaklıkla değişimini incelemişlerdir (Tablo 1.7). Literatürde sayıları az olmasına rağmen bazı araştırmacılar da benzer katılaştırma şartları altında farklı ötektik alaşım sistemleri için elektriksel özdirencin katılaştırma hızına bağlılığını ifade eden bağıntılar elde etmişlerdir (Tablo 1.7). Tablo 4.5'teki deneysel sonuçlara bakıldığında Al-Cu-Ni ve Al-Cu-Ti ötektik alaşımlarının tüm katılaştırma hızları için elektriksel özdirençlerinin hıza bağlı üstel değerleri (0.12 ve 0.13), literatürde yer alan Al-Cu-Mg [174] (0.11), Al-Ni-Fe [176] (0.12) ve Al-Si-Mg [179] (0.13) alaşımlarının üstel değerleri ile çok küçük farklılık olmakla birlikte oldukça uyumludur. Fakat Tablo 1.7'de geriye kalan diğer Al-esaslı alaşımlar [97, 170, 183] için elde edilen (0.07), (0.08) ve (0.09) üstel değerlerinin ise neredeyse iki katı kadar büyüktür. Buradaki farklılığın sebebinin de yine yukarıda bahsedildiği gibi yüksek katılaştırma hızlarının etkin olmasının yanı sıra her ne kadar hepsi Al-esaslı alaşımlar olsa da ötektik alaşımlara ilave edilen farklı katkı elementlerinden kaynaklı olarak bileşim farkının elektriksel özdirenç değerleri için de ortaya çıktığını söylemek mümkündür. Ayrıca, bu sonuçlara bakıldığında, Al-Cu-Ti alaşımının elektriksel özdirenç değeri Al-Cu-Ni alaşımının elektriksel özdirenç değerinden daha büyük olduğu görülmektedir (Tablo 3.5 ve Tablo 3.7). Başka bir deyişle; elektriksel özdirenç değeri daha büyük olan (Ni elementine göre, $\rho = 6.93 \times 10^{-8}$) Ti elementinin Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerini daha fazla arttırdığı (Al-Cu-Ni alaşımına göre) fakat elektriksel özdirenç değeri daha küçük olan (Ti elementine göre, $\rho = 42 \times 10^{-8}$) Ni elementinin Al-Cu ötektik alaşımının elektriksel özdirenç değerini daha az arttırması (Al-Cu-Ti alaşımına göre) gerektiği beklentisi ile oldukça uyumludur.

Son olarak Tablo 4.5 ve 1.7'deki deneysel sonuçlara bakıldığında Zn-Al-Cu ötektik alaşımının tüm katılaştırma hızları için elektriksel özdirencinin hıza bağlı üstel değeri (0.07), literatürde yer alan bazı Al-esaslı alaşımlar [97, 170, 183] için elde edilen (0.07),

(0.08) ve (0.09) üstel değerleri ile çok küçük bir farklılık olmakla birlikte oldukça uyumludur. Tablo 1.7’de verilen farklı çalışmalarda [174, 176, 179] elektriksel öz direncinin hıza bağlı üstel değerleri ise (0.11), (0.12) ve (0.13) olarak elde edilmiştir. Bu farklılığın sebebi; en başta alaşımı oluşturan elementlerden kaynaklanıyor olması ve bu tez çalışmasında alaşımı katılaştırmada kullanılan katılaştırma hızı aralığının çok geniş olması olarak ifade edilebilir.

Tablo 4.5. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımların elektriksel öz direnç değerlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafeye bağlılığı.

Alaşım (% ağı.)	Katılaştırma Hız Aralığı ($\mu\text{m/s}$)	Elektriksel Öz direnç için Elde Edilen Bağlıntılar($\Omega\cdot\text{m}$)
Al-32.5Cu-1Ni	9.25-162.85	$\rho = 3.27 \times 10^{-8} V^{0.14}$ $\rho = 6.55 \times 10^{-8} \lambda^{-0.29}$
	496.72-2056.68	$\rho = 2.76 \times 10^{-8} V^{0.15}$ $\rho = 5.48 \times 10^{-8} \lambda^{-0.52}$
	9.25-2056.68	$\rho = 3.48 \times 10^{-8} V^{0.12}$ $\rho = 6.41 \times 10^{-8} \lambda^{-0.31}$ $\rho = (4.94 + 0.092V^{0.5}) \times 10^{-8}$ $\rho = (4.26 + 1.83\lambda^{-1}) \times 10^{-8}$
	8.58-164.15	$\rho = 4.33 \times 10^{-8} V^{0.14}$ $\rho = 8.86 \times 10^{-8} \lambda^{-0.28}$
	490.81-2038.65	$\rho = 4.78 \times 10^{-8} V^{0.12}$ $\rho = 8.74 \times 10^{-8} \lambda^{-0.39}$
	8.58-2038.65	$\rho = 4.47 \times 10^{-8} V^{0.13}$ $\rho = 9.12 \times 10^{-8} \lambda^{-0.31}$ $\rho = (6.51 + 0.13V^{0.5}) \times 10^{-8}$ $\rho = (5.77 + 2.84\lambda^{-1}) \times 10^{-8}$
Zn-5Al-0.5Cu	8.45-166.58	$\rho = 7.28 \times 10^{-8} V^{0.06}$ $\rho = 9.68 \times 10^{-8} \lambda^{-0.13}$
	465.36-2087.15	$\rho = 5.54 \times 10^{-8} V^{0.10}$ $\rho = 8.79 \times 10^{-8} \lambda^{-0.37}$
	8.45-2087.15	$\rho = 7.03 \times 10^{-8} V^{0.07}$ $\rho = 9.98 \times 10^{-8} \lambda^{-0.18}$ $\rho = (8.52 + 0.085V^{0.5}) \times 10^{-8}$ $\rho = (7.89 + 1.73\lambda^{-1}) \times 10^{-8}$

4.1.5. Isıl İletkenlik Değerlerinin Literatürle Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında ilk defa Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu üçlü ötektik alaşım sistemlerine ait kontrollü katılaştırma deneylerinden elde edilen numunelerde her bir katılaştırma hızı için 323 K (50 °C) sıcaklığında katı fazın ısı iletkenlik (K_k) değerleri

elde edilmiş ve bu verileri kullanarak farklı katılaştırma hızlarının ve mikroyapının ısı iletkenliğe etkisini veren sonuçlar lineer regresyon analiziyle belirlenmiştir (Tablo 4.6).

Tablo 4.6. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımların ısı iletkenlik değerlerinin farklı katılaştırma hızları ve ötektik mesafeye bağlılığı.

Alaşım (% ağı.)	Katılaştırma Hız Aralığı ($\mu\text{m/s}$)	Isıl İletkenlik için Elde Edilen Bağıntılar(W/Km)
Al-32.5Cu-1Ni	9.25-162.85	$K_k = 248.20 V^{-0.022}$ $K_k = 223.77 \lambda^{0.045}$
	496.72-2056.68	$K_k = 245.02 V^{-0.029}$ $K_k = 215.77 \lambda^{0.098}$
	9.25-2056.68	$K_k = 261.64 V^{-0.037}$ $K_k = 217.17 \lambda^{0.091}$
Al-33Cu-0.1Ti	8.58-164.15	$K_k = 245.36 V^{-0.016}$ $K_k = 225.79 \lambda^{0.034}$
	490.81-2038.65	$K_k = 351.48 V^{-0.075}$ $K_k = 239.88 \lambda^{0.233}$
	8.58-2038.65	$K_k = 259.96 V^{-0.032}$ $K_k = 218.87 \lambda^{0.073}$
Zn-5Al-0.5Cu	8.45-166.58	$K_k = 151.36 V^{-0.036}$ $K_k = 127.64 \lambda^{0.077}$
	465.36-2087.15	$K_k = 181.97 V^{-0.064}$ $K_k = 136.77 \lambda^{0.225}$
	8.45-2087.15	$K_k = 154.17 V^{-0.040}$ $K_k = 125.82 \lambda^{0.104}$

Tablo 3.5, Tablo 3.7 ve Tablo 3.9’da lineer ısı akış metodu kullanılarak Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu üçlü ötektik alaşım sistemleri için elde edilen ısı iletkenlik verilerine bakacak olursak; bu değerlerin (K_k) katılaştırma hızı (V) arttıkça azaldığı ve ötektik mesafeler (λ_E) azaldıkça arttığı açıkça görülmektedir. Bu sonucu şu şekilde yorumlayabiliriz;

Wiedemann-Franz kanunu metallerin ısı iletkenliğinin elektriksel iletkenliğe elektronik katkısının oranıdır ve bu oran sıcaklıkla doğru orantılıdır.

$$\frac{K_e}{\sigma} = LT \quad (4.1)$$

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

$$L = \frac{K}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.44 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2} \quad (4.2)$$

Alaşımların ısı iletkenliğinin ana kaynağı bilinmekte fakat pratikte bu durumu yorumlamak için yeterince bilgi yoktur. Denklem (4.1)'den görüleceği gibi, Lorenz sayısının değişmediği göz önüne alınarak, eğer metallerin sabit bir sıcaklıkta elektriksel iletkenliği artıyor veya azalıyorsa, ısı iletkenliğinde aynı şekilde artması veya azalması gerekmektedir. Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ötektik alaşımları için elde edilen elektriksel özdirenç değerlerinin artan katılaştırma hızına bağlı olarak sırasıyla 4.57-9.12 Ωm , 5.91-12.11 Ωm , 8.36-12.43 Ωm aralıklarında artarak devam ettiği ölçülmüştür. Bu sebeple Wiedemann-Franz kanunu uyarınca; elektriksel özdirencin artması elektriksel iletkenliği azaltacak ve dolayısıyla sonuç olarak ısı iletkenliği azaltacaktır. O halde, Tablo 3.5, Tablo 3.7 ve Tablo 3.9'da bu tez çalışmasındaki üçlü ötektik alaşımlar için verilen ısı iletkenlik değerlerinin katılaştırma hızı arttıkça azalması beklentisi ile oldukça uyumlu olarak elde edilmiştir. Ancak Tablo 4.6'da verilen üstel değerler için kıyas yapmak mümkün görünmemektedir. Sebebi ise; daha önce literatürde doğrusal katılaştırılan alaşımlarda katılaştırma hızına bağlı olarak, lineer ısı akış metodu ile ısı iletkenlik ölçümüne rastlanmamıştır. Buradaki kıyaslamanın ilerleyen zamanlarda yapılması beklenen çalışmalar ile daha sağlıklı bir şekilde yapılacağı öngörülmüştür.

Genel bir özet yapacak olursak bu tez çalışmasında, Al-%32.5 Cu-%1 Ni (ağ.), Al-%33 Cu-%0.1(ağ.) Ti ve Zn-%5 Al-%0.5 Cu (ağ.) ötektik alaşım sistemleri, Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını yardımıyla, sabit sıcaklık gradyenti (G) ve düşük ve yüksek olmak üzere çok geniş bir katılaştırma hızı aralığında (V) doğrusal olarak katılaştırılmış, katılaştırma parametresine (V) bağlı olarak mikroyapı parametresi (λ_E), mikrosertlik (HV), çekme-dayanım (σ_C) elektriksel özdirenç (ρ) ve ısı iletkenlik (K_k) değerlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Ayrıca, çalışılan alaşımların öz ısı, entalpi ve erime sıcaklığı değerleri de elde edilmiştir. Yapılan araştırmalardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

4.2. Sonuç ve Öneriler

Deneyisel çalışmalarda elde edilen verileri ve teorik modelleri kullanarak varılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Al-CuNi ve Al-Cu-Ti ötektik alaşımları doğrusal olarak kontrollü katılaştırılması neticesinde siyah ve gri olmak üzere iki farklı fazın ötektik büyüdüğü gözlemlendi. Yapılan EDX analizleri sonucunda bu fazların;

- *Siyah lamelsel fazın Al(α) çözelti fazı*
- *Gri lamelsel fazın Al₂Cu intermetalik fazı*

Zn-Al-Cu ötektik alaşımı doğrusal olarak kontrollü katılaştırılması neticesinde siyah ve gri olmak üzere iki farklı fazın ötektik büyüdüğü gözlemlendi. Yapılan EDX analizleri sonucunda bu fazların;

- *Siyah lamelsel fazın Al(α) çözelti fazı*
- *Gri lamelsel fazın Zn(η) çözelti fazı*

olduğu gözlemlenmiştir

2. Her bir ötektik alaşım için düşük katılaştırma hızlarının ($\sim 8.0-170.0 \mu\text{m/s}$) artan değerlerine göre mikroyapı parametresi (λ_E)'nin değerleri Jackson-Hunt [41] modelinin öngördüğü üstel ifadeyle uyumlu şekilde azalmaktadır. Yani numune bu katılaştırma hızları aralığında ne kadar hızlı katılaştırılırsa mikroyapısı da aynı oranda küçülmektedir. Ancak yüksek katılaştırma hızları ($\sim 170.0-2100.0 \mu\text{m/s}$) için her bir ötektik alaşımın üstel ifadeleri Jackson-Hunt [31] modelinin öngördüğü 0.50 değerinden oldukça uzaktır. Bu sonuçlardan; yüksek katılaştırma hızları aralığında numunenin katılaştırılmasının mikroyapıyı aynı oranda küçültmediği sonucu gözlemlenmiştir. Diğer bir deyişle; ikili ötektik alaşımlar için ifade edilen Jackson-Hunt [31] modeli, üçlü ötektik alaşımlarda belirli bir katılaştırma hızı aralığında geçerli iken yüksek katılaştırma hızlarında geçerli olmamaktadır.

3. Al-Cu-Ni alaşım sistemi için katılaştırma hızı arttıkça ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. Sabit sıcaklık gradyentinde (4.93 K/mm) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için λ_E sırasıyla 0.48, 0.30 ve 0.39 üstel değerleriyle azalmaktadırlar.

4. Al-Cu-Ti alaşım sistemi için katılaştırma hızı arttııa ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. Sabit sıcaklık gradyentinde (6.45 K/mm) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için λ_E sırasıyla 0.49, 0.31 ve 0.41 üstel değerleriyle azalmaktadırlar.
5. Zn-Al-Cu alaşım sistemi için katılaştırma hızı arttııa ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. Sabit sıcaklık gradyentinde (3.67 K/mm) sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için λ_E sırasıyla 0.47, 0.29 ve 0.38 üstel değerleriyle azalmaktadırlar.
6. Al-Cu-Ni alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerleri, sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.08, 0.06 ve 0.07 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.16, 0.18 ve 0.17 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
7. Al-Cu-Ti alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerleri, sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.06, 0.05 ve 0.05 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.11, 0.17 ve 0.12 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
8. Zn-Al-Cu alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerleri, sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.08, 0.06 ve 0.07 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.17, 0.21 ve 0.18 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
9. Al-Cu-Ni alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak çekme-dayanım değerleri, sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.09, 0.07 ve 0.08 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak çekme-dayanım değerlerinin sırasıyla düşük, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.19, 0.22 ve 0.20 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.

10. Al-Cu-Ti alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak çekme-dayanım değerleri, sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.10, 0.06 ve 0.08 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak çekme-dayanım değerlerinin sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.20, 0.20 ve 0.19 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
11. Zn-Al-Cu alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak çekme-dayanım değerleri, sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.11, 0.06 ve 0.08 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak çekme-dayanım değerlerinin sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.23, 0.20 ve 0.22 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
12. Al-Cu-Ni alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleri, sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.14, 0.15 ve 0.12 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerlerinin sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.29, 0.52 ve 0.31 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
13. Al-Cu-Ti alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleri, sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.14, 0.12 ve 0.13 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerlerinin sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.28, 0.39 ve 0.31 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
14. Zn-Al-Cu alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleri, sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.06, 0.10 ve 0.07 üstel değerleri ile artmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerlerinin sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.13, 0.37 ve 0.18 üstel değerleriyle azaldıkları görülmektedir.
15. Al-Cu-Ni alaşım sistemi için artan katılaştırma hızına bağlı olarak ısı iletkenlik değerleri, sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.022, 0.029 ve 0.037 üstel değerleri ile azalmaktadır. Artan λ_E değerlerine bağlı olarak ısı iletkenlik değerlerinin sırasıyla dūřuk, yüksek ve tüm katılaştırma hızları için 0.045, 0.098 ve 0.091 üstel değerleriyle arttığı görülmektedir.

16. Al-Cu-Ti alařım sistemi için artan katılařtırma hızına baėlı olarak ısı iletkenlik deėerleri, sırasıyla dūřuk, yūysek ve tūm katılařtırma hızları için 0.016, 0.075 ve 0.032 ūstel deėerleri ile azalmaktadır. Artan λ_E deėerlerine baėlı olarak ısı iletkenlik deėerlerinin sırasıyla dūřuk, yūysek ve tūm katılařtırma hızları için 0.034, 0.233 ve 0.073 ūstel deėerleriyle arttıėı gōrūlmektedir.
17. Zn-Al-Cu alařım sistemi için artan katılařtırma hızına baėlı olarak ısı iletkenlik deėerleri, sırasıyla dūřuk, yūysek ve tūm katılařtırma hızları için 0.036, 0.064 ve 0.040 ūstel deėerleri ile azalmaktadır. Artan λ_E deėerlerine baėlı olarak ısı iletkenlik deėerlerinin sırasıyla dūřuk, yūysek ve tūm katılařtırma hızları için 0.077, 0.225 ve 0.104 ūstel deėerleriyle arttıėı gōrūlmektedir.
18. Al-Cu-Ni alaşım sistemi için entalpi, ūz ısı ve erime sıcaklığı değerleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı kullanılarak sırasıyla $\Delta H = 235.63 \text{ J/g}$, $\Delta C_p = 0.283 \text{ J/g K}$ ve 831.53 K olarak elde edilmiştir.
19. Al-Cu-Ti alaşım sistemi için entalpi, ūz ısı ve erime sıcaklığı değerleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı kullanılarak sırasıyla $\Delta H = 222.69 \text{ J/g}$, $\Delta C_p = 0.266 \text{ J/g K}$ ve 837.13 K olarak elde edilmiştir.
20. Zn-Al-Cu alaşım sistemi için entalpi, ūz ısı ve erime sıcaklığı değerleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı kullanılarak sırasıyla $\Delta H = 113.89 \text{ J/g}$, $\Delta C_p = 0.172 \text{ J/g K}$ ve 660.54 K olarak elde edilmiştir.

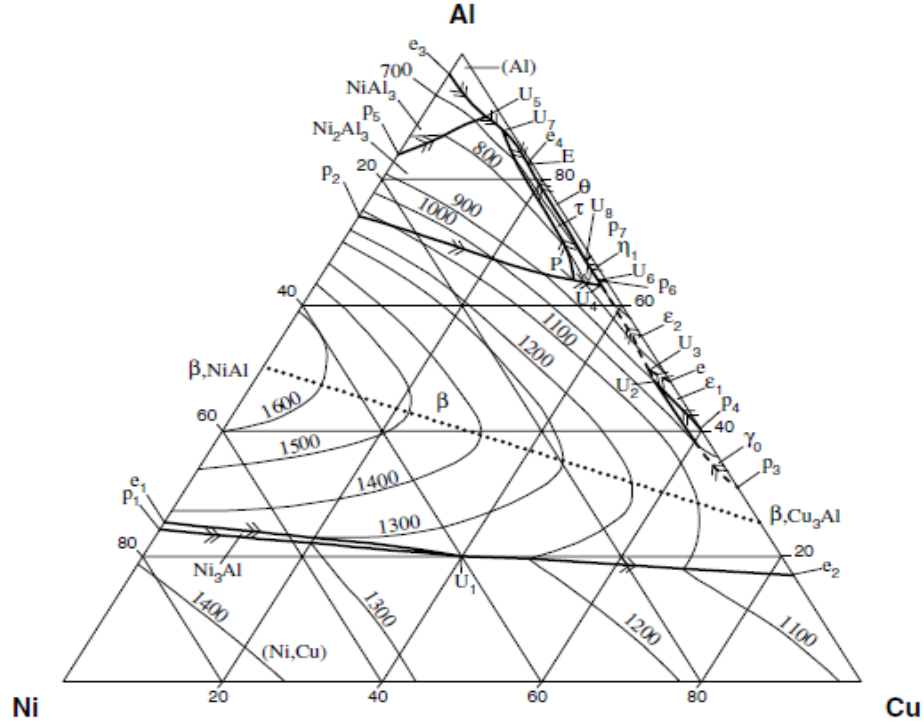
Sonuç olarak bu tez çalıřmasında; Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu ūtektik alařımları sistemleri sabit sıcaklık gradiyenti ve geniř bir katılařtırma hızı aralıėında olmak ūzere farklı hızlarda katılařtırıldıėında mikroyapısının, mikrosertliėinin, çekme-dayanımının elektriksel ūzdirencinin ve ısı iletkenliklerinin deėiřtiėi, katılařtırma hızının artmasıyla ūtektik lamelsel mesafenin kūūldūėı ve bu kūūlmenin dūřuk ve yūysek katılařtırma hızları için farklı olduėu gōzlenmiřtir. ūtektik lamelsel mesafedeki kūūlmenin ise malzemenin aynı zamanda mekaniksel, elektriksel ve termal ūzelliklerini etkilediėi tespit edilmiřtir.

Bu tez çalışmasında, yapılan çalışmaların yanı sıra sonraki çalışmalarda;

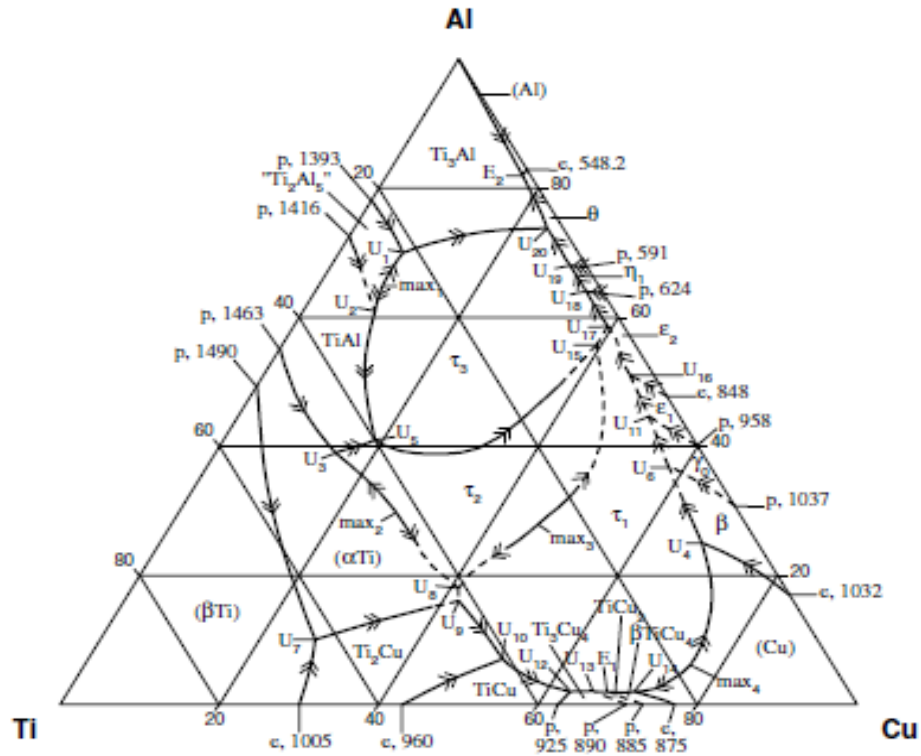
- ✓ Doğrusal katılaştırma yapılan alaşımlara ait bu tez çalışmasında ölçülen özelliklerinden başka ilave fiziksel ve kimyasal özelliklerin eklenmesi (elastik enerjisi, korozyon direnci, basma testi vb.)
- ✓ Doğrusal katılaştırılan alaşımlar aynı zamanda ısıtıl işlem uygulanabilen malzemeler olmasından dolayı belirli şartlarda yapılan ısıtıl işlemlerin (tavlama, yaşlandırma) malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması ve her bir numuneden ölçülen parametreler arasındaki bağıntıların ortaya konulması
- ✓ Ayrıca sabit veya değişken bir manyetik alan altında katılaştırma yapılarak malzemenin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerine olan etkisinin araştırılması
- ✓ Ayrıca düşük voltajlı (6-30 Dc volt) ve yüksek akımlı bir elektrik gerilimi altında katılaştırma yapılarak malzemenin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerine olan etkisinin araştırılması
- ✓ Isıl iletkenliğin doğrusal katılaştırılan alaşımların kristal yapılarına göre değişim göstermesi konularının da çalışılması planlanmaktadır.

EKLER

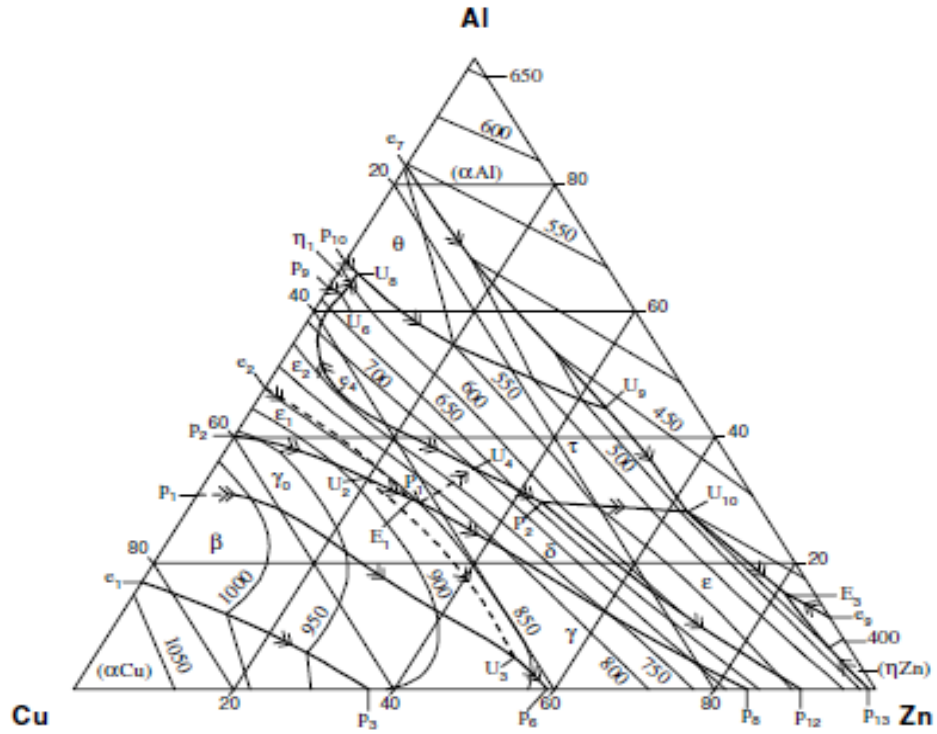
EK 1. Al-Cu-Ni, Al-Cu-Ti ve Zn-Al-Cu Alaşım Sistemlerine Ait Faz Diyagramları [216-218].



Şekil . Al-Cu-Ni alaşım sistemine ait faz diyagramı (% at.) [216].



Şekil . Al-Cu-Ti alaşım sistemine ait faz diyagramı (% at.) [217].



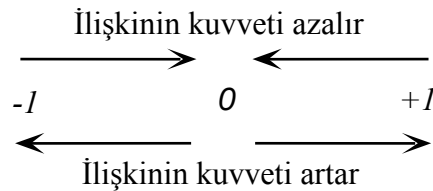
Şekil . Zn-Al-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramı (% at.) [218].

EK 2. Regrasyon Analizi [223]

İki değişken arasındaki, değişim ilişkisini gösteren ölçü korelasyon katsayısıdır ve r harfi ile gösterilir. Korelasyon katsayısı,

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right)\left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)}}$$

ile ifade edilir. Değişkenler arasındaki ilişki pozitif ise işareti artı, negatif ise eksi olur. Korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında herhangi bir değer alabilir ($-1 \leq r \leq +1$). Her iki yönde de 0'dan ± 1 'e yaklaştıkça ilişkinin kuvveti artar. -1 veya +1'den 0'a yaklaştıkça ilişkinin kuvveti azalır, sıfır değerini aldığı anda kaybolur.



İki değişken arasında belirgin bir ilişki olduğunda bu ilişki, dağılım grafiğindeki noktalar arasından geçen uygun bir doğru ile tanımlanabilir. Bu doğruya regrasyon doğrusu denir ve matematiksel bir denklem ile gösterilebilir. Bu denklemede regrasyon denklemi denir. Regrasyon katsayısı,

$$\text{Regrasyon Katsayısı} = \frac{\sum_{xy}}{\sum_{x^2}} = \frac{\frac{\sum_x \sum_y}{n}}{\frac{(\sum_x)^2}{n}}$$

ile ifade edilir. Regrasyon doğrusunu çizmeden önce doğrusallıktan sapma değerinin kontrolünün yapılması gerekir. Eğer doğrusallıktan sapma önemli ise iki değişken arasında ilişki doğrusal değildir. Başka bir ifadeyle ilişki $y=a+bx$ doğrusal denklemi ile ifade edilemez. Bu nedenle regrasyon doğrusu çizilemez. Burada x; bağımsız değişken, y; bağımlı değişken, a; doğrunun y eksenini kestiği nokta, b ise regrasyon katsayısıdır (eğim).

KAYNAKLAR

1. Thornton, P.A, 1985, Fundamentals of Engineering Materials, **Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs**, 171-173.
2. Gündüz, M., 1984, The Measurement of The Solid-Liquid Energy, Ph. Oxford University, D Thesis, Oxford.
3. Onaran, K., 1986, Malzeme Bilimi, Çağlayan Basımevi, İstanbul.
4. Çadırılı, E., 1997, İkili Metalik Alaşımlarda Doğrusal Katılaştırma, Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri.
5. Kaya, H., 2001, İkili Ötektik Alaşımların Doğrusal Katılaştırılması ve Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara.
6. Eshelman, M.A., Seetharaman, V., Trivedi, R., 1988, Cellular spacings-I. steady state growth, **Acta Metallurgica**, **36**, 1165-1174.
7. Easterling, K., 1990, Tomorrow's Materials, Ins. Metals Monograph, London.
8. Askeland, D.R., 1990, The Science and Engineering of Materials, Chapman and Hall, London.
9. Çadırılı, E., Gündüz, M., 2000, The dependence of lamellar spacing on growth rate and temperature gradient in the lead-tin eutectic alloy, **Journal of Materials Processing Technology**, **97**, 74-81.
10. Colling, D.A., 1995, Industrial Materials, Metals and Alloys, Prentice - Hall Inc., Ohio.
11. Yılmaz, F., 1985, Alaşımlar, **İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi**, **54**, 43-111.
12. Porter, D.A., Easterling, K.E., 1984, Phase Transformation in Metals and Alloys, Van Nostrand and Reinhold, New York, 1-17, 217-223.
13. Davies, G.J., 1973, Solidification And Casting, John Wiley and Sons, New York.
14. Rutter, J.W., Chalmers B., 1953, Prismatic substructure formed during solidification metals, **Canadian Journal of Physics**, **31**, 15-39.

15. Jones, H., Kurz, W., 1981, Relation of interphase spacing and growth temperature to growth velocity in Fe-C-(Fe-Fe₃C) eutectic alloys, **Z. Metallkunde**, **4**, 792-797.
16. Verhoeven, D.J., 1975, Fundamentals of Physical Metallurgy, New York.
17. Woodruff, D.P., 1973, The Solid- Liquid Interface, Cambridge Solid State Science series, London.
18. Elliott, R., 1983, Eutectic Solidification Processing Crystal Crystalline and Glassy Alloys, Butterworths, London.
19. Clark, D.S., 1959, Engineerin Metals and Process, Ohio University, Ph. D. Thesis, Ohio.
20. Flemings, M.C., 1974, Solidification Processing, Mc Graw Hill, NewYork.
21. Hunt, J.D, Jackson, K.A., 1966, Binary eutectic solidification, **Transactions of the Metallurgical Society**, **236**, 843-852.
22. Scheil, E., 1959, On Eutectic Crystallization, Geisserei Tech. Wiss. 24, 1313.
23. Chadwick, G.A., 1962, Decanted interfaces and growth forms, **Acta Metallurgica**, **10**, 1-12.
24. Croker, M.N., Fidler, R.S., Smith, R.W., 1971, The cellular growth of Bi-Pb₂Bi eutectic, **Journal of Crystal Growth**, **11**, 121-131.
25. Croker, M.N., Baragar, D., Smith, R.W., 1975, Anomalous eutectic growth II, **Journal of Crystal Growth**, **30**, 198-212.
26. Elliott, R., 1977, Eutectic solidification, **International Metals Reviews**, **22**, 161-186.
27. Kraft, R.W., Albright, D.L.A., 1961, Microstructure of unidirectionally solidified Al-CuAl₂ eutectic, **Transactions of the Metallurgical Society**, **221**, 95-102.
28. Graham, L.D., Kraft, R.W., 1966, Coarsening at of eutectic micro structure at eveleated temperatures, **Transactions**, **236**, 94-102.
29. McLean, M., 1983, Directionally Solidified Materials for High Temperature Service, The Metals Society, Britain.
30. Haasen, P., 1974, Physical Metallurgy, Cambridge University Press, Cambridge.
31. K.A. Jackson, J.D.Hunt, 1966, Lamellar and eutectic growth, **Transactions of the Metallurgical Society**, **236**, 1129-1142.

32. Stefanescu, D.M., Abbaschian, G.J., Bayuzick, R.J., 1988, Solidification Processing of Eutectic Alloys, The Metallurgical Society, Inc., Ohio.
33. Trivedi, R., Magnin, P., Kurz, W., 1987, Theory of eutectic growth under rapid solidification conditions, **Acta Metallurgica**, **35**, 971-980.
34. Weissbach, W., 1993, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Çev.: Anık, S., Anık, E., Vural, M., Birsen Kitapevi, İstanbul.
35. Turnbull, D., 1950, Formation of crystal nuclei in liquid metals, **Journal of Applied Physics**, **21**, 1022-1029.
36. Turnbull, D., 1950, Isothermal rate of solidification of small droplets of mercury and tin, **Journal of Chemical Physics**, **18**, 768-775.
37. Burden, M.H., Hunt, J.D., 1974, Cellular and dendritic growth II, **Journal of Crystal Growth**, **22**, 109-116.
38. Flemings, M.C., 1976, Döküm ve Katılaştırma Tekniği, Çev.: Başaran, M., İTÜ Matbaası, İstanbul.
39. Zemskov, V.S., Belaya, A.D., Kozhemyakin, G.N., Lyuttsau, V.G. and Kostyukova, Y.P., 1985, Growth of single crystals of bismuth-antimony alloys by Czochralski method, **J. Cryst. Growth**, **71**, 243-245.
40. Gündüz, M., Çadırılı, E., 2002, Directional Solidification of Aluminium-Copper Alloys, **Materials Science and Engineering A**, **327**, 167-185.
41. Volmer, M., Weber, A., 1926, Keimbildung in übersättigten Gebilden, **Journal of Physical Chemistry**, **119**, 227.
42. Becker, R., Döring, W., 1953, Kinetics Behandlung der Keimbildung in übersättigte Dämpfen, **Annual Physics**, **24**, 719.
43. Turnbull, D., Cech, R.E., 1950, Microscopic Observation of The Solidification of Small Metal Droplets, **Journal of Applied Physics**, **21**, 804-810.
44. Turnbull, D., 1950, The supercooling of aggregates of small metal particles, **Journal of Metals**, **188**, 1144-1148.
45. Turnbull, D., 1949, The Subcooling of Liquid Metals, **Journal of Applied Physics**, **20**, 817.
46. Turnbull, D., 1950, Kinetics of Heterogeneous Nucleation, **Journal of Chemical Physics**, **18**, 198-203.

47. Turnbull, D., Fisher, J.C., 1949, Rate of Nucleation in Condensed System, **Journal of Chemical Physics**, **17**, 71-73.
48. Turnbull, D., 1952, Kinetics of Solidification of Supercooled Liquid Mercury Droplets, **Journal of Chemical Physics**, **20**, 411-424.
49. Turnbull, D., 1952, Nucleation Catalysis, **Industrial and Engineering Chemistry**, **44**, 1292.
50. Miyazawa, Y., Pound, G.M., 1974, Homogeneous Nucleation of Crystalline Gallium from Liquid Gallium, **Journal of Crystal Growth**, **23**, 45.
51. Skripov, V.P., 1977, Homogeneous Nucleation in Metals and Amorphous Films, in *Crystal Growth and Materials*, (Ed. E. Kaldis and H. Schell) 327, North Holland, Amsterdam.
52. Stowell, M.J., 1970, The Solid-Liquid Interfacial Free Energy of Lead from Supercooling Data, **Philosophical Magazine**, **22**, 1-6.
53. Herlach, D.M., 1994 Non-equilibrium Solidification of Undercooled Metallic Metals, **Materials Science and Engineering: R: Reports**, **12**, 177-272.
54. Mullins, W.W., Sekerka, R.F., 1963, Morphological Stability of a Particle Growing by Diffusion or Heat Flow, **Journal Applied Physics**, **34**, 323-329.
55. Jackson, K.A., Hunt, J.D., 1965, Transparend Compounds That Freeze Like Metals, **Acta Metallurgica**, **13**, 1212-1215.
56. Trivedi, R., 1980, Theory of Dendritic Growth During The Directional Solidification of Binary Alloys, **Journal of Crystal Growth**, **49**, 219-232.
57. Voorhees, P.W., 2006, *Utilization of Space*, AIAA , Springer.
58. Edwards, L., Endean, M., 1990, *Manufacturing with Materials*, The Open University Press, Hong Kong.
59. Sharp, R.M., Hellawell, A., 1971, Solute Distributions At-Non Planar Solid-Liquid Growth Fronts II, **Journal of Crystal Growth**, **11**, 77-91.
60. Miyata, Y., Suzuki, T., Uno, I.J., 1985, Cellular and Dendritic Growth. I. Experiment, **Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science**, **16A**, 1799-1805.
61. Taha, M.A., 1979, Some Observations on The Dendritic Morphology and Dendrite Arm Spacings, **Metall Science**, **9**, 9-12.

62. Klaren, C.M., Verhoeven, J.D., Trivedi, R., 1980, Primary Dendrite Spacing of Lead Dendrites in Pb-Sn and Pb-Au Alloys, **Metallurgical and Materials Transactions**, **11A**, 1853-1861.
63. Mason, J.T., Verhoeven, J.D., Trivedi, R., 1982, Primary Dendrite Spacing: I Experimental Studies, **Journal of Crystal Growth**, **59**, 516-524.
64. Spittle, A., Lloyd, D.M., 1979, Solidification and Casting of Metals, The Metals Society, London.
65. Mc.Cartney, D.G., Hunt, J.D., 1981, Measurement of Cell and Primary Dendrite Arm Spacings in Directionally Solidified Aluminium Alloys, **Acta Metallurgica**, **29A**, 1851-1863.
66. Glicksman, M.E., Koss, M.B., 1994, Dendritic Growth velocities in Microgravity, **Physical Review Letters**, **73(4)**, 573-576.
67. Koss, M.B., Lacombe, J.C., Tennenhouse, L.A., Glicksman, M.E., Winsa, E.A., 1999, Dendritic Growth Tip Velocities and Radii of Curvature in Microgravity, **Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science**, **30(12)**, 3177-3190.
68. Trivedi, R., Kurz, W., 1994, Dendritic Growth, **International Material Review**, **39**, 49-74.
69. Mullins, W.W., Sekerka, R.F., 1964, Stability of a Planar Interface During Solidification of a Dilute Binary Alloy, **Journal of Applied Physics**, **35**, 444-451.
70. Han, S.H., Trivedi, R., 1994, Primary Spacing in Directionally Solidified Alloys, **Acta Metallurgica**, **42**, 25-41.
71. Pan, Q.Y., Huang, W.D., Lin, X., Zhou, Y. H., 1997, Primary Spacing Selection of Cu-Mn Alloy under Laser Rapid Solidification Condition, **Journal of Crystal Growth**, **181**, 109-116.
72. Weidong, H., Xingguo, G., Yaohe, Z., 1993, Primary Spacing Selection of Constrained Dendritic Growth, **Journal of Crystal Growth**, **134**, 105-115.
73. Ding, G.L., Huang, W.D., Huang, X., Lin, X., Zhou, Y.H., 1996, On Primary Dendritic Spacing During Unidirectional Solidification, **Acta Metallurgica**, **44**, 3705-3709.

74. Ding, G.L., Huang, W., Lin, X., Zhou, Y., 1997, Prediction of Average Spacing for Constrained Cellular/Dendritic Growth, **Journal of Crystal Growth**, **177**, 281-288,
75. Lu, S.Z., Hunt, J.D., 1992, A Numerical Analysis of Dendritic and Cellular Array Growth: The Spacing Adjustment Mechanisms, **Journal of Crystal Growth**, **123**, 17-34.
76. Warren, J.A., Langer, J.S., 1993, Prediction of Dendritic Spacings in a Directional Solidification Experiment, **Physical Review: E**, **47**, 2702-2712.
77. Makkonen, L., 2000, Spacing in Solidification of Dendritic Arrays, **Journal of Crystal Growth**, **208**, 772-778.
78. Walker, D.J., Mullis, A.M., 2001, A Mechanism for The Equalisation of Primary Spacing During Cellular and Dendritic Growth, **Journal of Material Science**, **36**, 865-869.
79. Çadırılı, E., Karaca, I., Kaya, H., Maraşlı, N., 2003, Effect of Growth Rate and Composition on The Primary Spacing, The Dendrite Tip Radius And Mushy Zone Depth in The Directionally Solidified Succinonitrile-Salol Alloys, **Journal of Crystal Growth**, **255**, 190-203.
80. Çadırılı, E., Maraşlı, N., Bayender, B., Gündüz, M., 2000, Dependency of the Microstructure Parameters on the Solidification Parameters for Camphene, **Materials Research Bulletin**, **35(6)**, 985- 995.
81. Çadırılı, E., Gündüz, M., 2000, The Directional Solidification of Pb-Sn Alloys, **Journal of Materials Science**, **35**, 3837-3848.
82. Ruggiero, M.A., Rutter, J.W., 1997, Origin of Microstructure in the 332 K Eutectic of The Bi-In-Sn System, **Materials Science and Technology**, **13**, 5-11.
83. De Wilde, J, Froyen, L, Witusiewicz, V.T., Hecht, U., 2005, Two-Phase Planar and Regular Lamellar Coupled Growth Along The Univariant Eutectic Reaction in Ternary Alloys: An Analytical Approach and Application to The Al-Cu-Ag System, **Journal of Applied Physics**, **97**, 113515-113524.
84. Knoop, F., Peters, C.G., Emerson, W.B., 1939, A Sensitive Pyramidal-Diamond Tool for Indentation Measurements, **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, **23**, 39-61.

85. Hall, E.O., 1951, The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results, **Proc. Phys. Soc. Lond. Sect. B** **64**, 747-753.
86. Petch, N.J., 1953, The cleavage strength of polycrystals, **J. Iron. Steel. Inst.** **174**, 25-31.
87. Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. and Fu, H., 2010, Dependency of microhardness on solidification processing parameters and microstructure characteristics in the directionally solidified Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy, **Journal of Alloys and Compounds**, **504**, 60-64.
88. L.Silva, B., Garcia, A., Spinelli, J.E., 2012, The effects of microstructure and intermetallic phases of directionally solidified Al-Fe alloys on microhardness, **Materials Letters**, **89**, 291-295.
89. Khan, S., Ourdjini, A., Hamed, Q.S., Alam Najafabadi, M.A., Eliot, R., 1993, Hardness and Mechanical Property Relationship in Directionally Solidified Aluminium- Silicon Eutectic Alloys with Different Silicon Morphologies, **Journal of Materials Science**, **28**, 5957-5962.
90. Liu, H.Y., Li, Y., Jones, H., 1998, Thermal stability of the α Zn-Mg₂Zn₁₁ and α Zn- β Al eutectics obtained by Bridgman growth, **J. Mater. Sci.**, **33**, 1159-1164.
91. Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J., Fu, H., 2010, The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Ti-43Al-3Si alloy, **Journal of Alloys and Compounds**, **506**, 593-599.
92. Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., 2010, The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys, **Mater. Chem. Phys.**, **119**, 272-278.
93. Cante, M.V., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., 2010, The correlation between dendritic microstructure and mechanical properties of directionally solidified hypoeutectic Al-Ni alloys, **Met. Mater. Int.**, **16**, 39-49.
94. Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Osorio, W.R. and Garcia, A., 2006, Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings, **Mater. Sci. Eng. A.**, **421**, 245-253.
95. E. Çadırlı, 2013, Effect of Solidification Parameters on Mechanical Properties of Directionally Solidified Al-Rich Al-Cu Alloys, **Met. Mater. Int.**, **19**, 411-422.

96. Osorio, W.R. and Garcia, A., 2002, Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification conditions, **Mater. Sci. Eng. A.**, **325**, 103-111.
97. U. Büyük, 2012, Physical and Mechanical Properties of Al–Si–Ni Eutectic Alloy, **Met. Mater. Int.**, **18**, 933-938.
98. Kane, P.F., Larrabee, G.B., 1970, Characterization of Semiconductor Materials, McGraw Hill Book Co., U.S.A., 4.
99. Kumar, P.P., Yashonath, S., 2006, Ionic Conduction in the Solid State, **J. Chem.Sci.**, **118 (1)**, 135-154.
100. Caignan, A.G., Holt, E.M. 2002, New 1,4-dihydropyridine Derivates with Hetero , Saturated B Rings, **Journal of Chemical Crystallography** **32**, 315-323.
101. Yamashita, M., 1987, Resistivity Correction Factor for the Four-Probe Method, **J.Phys. E: Sci. Instrum.**, **20**, 1454-1456.
102. Onaran, K., Malzeme Bilimi, 8. Baskı, s. 100-104, 168, 171-173, 178-182, İTÜ, 2000
103. Kittel, C., Introduction to Solid State Phys. 8th Ed., s.114, 121, 122, 141-145, 147-152, John Wiley & Sons Inc., 2005.
104. Franklin, B., Meteorological Observations (written in reply to Cadwallader Colden, Nov. 19, 1753 and read at the Royal Society of London, Nov, 4, 1756), in The Writings of Benjamin Franklin (Smyth, A. H., ed.), Vol. III (1750-59), The Macmillan Co., *New York*, 186-8, 1905.
105. Fordyce, G., An Account of an Experiment on Heat, *Phill. Trans. Roy. Soc. (London)*, 77, 310—7, 1787.
106. Ingen-Hausz, J., On Metals as Conductors of Heat, **J. de Physique**, **34**, 68, 380, 1789.
107. Despretz, C., On the Conductivity of Several Solid Substances, **Ann. Chim. Phys.**, **19**, 97-106, 1822.
108. Wiedemann, G., Franz, R., The Thermal Conductivity of Metals, **Ann. Physisc**, **89**, 497-531, 1853.
109. Forbes, J.D., On the Progress of Experiments on the Conduction of Heat, Undertaken at the Meeting of the British Association at Edinburgh in 1850, *Britt. Assoc. Adv. Sci. Rept. Ann. Meeting*, **21**, 7-8, 1851.

110. Forbes, J.D., On Experiments on the Laws of the Conduction of Heat, Brit. Assoc. Adv. Sci., **Rept. Ann. Meeting, 22**, 260-1, 1852.
111. Forbes, J. D., Experimental Inquiry into the Laws of the Conduction of Heat in Bars and into the Conducting Power of Wrought Iron, **Trans. Roy. Soc. Edinburg, 23**, 133-46, 1864.
112. Forbes, J. D., Experimental Inquiry into the Laws of the Conduction of Heat in Bars. Part II. On the Conductivity of Wrought Iron, Deduced from the Experiments of 1851, **Trans. Roy. Soc. Edinburg, 24**, 73-110, 1865.
113. Angström, A. J., A New Method of Determining the Thermal Conductivity of Solids, **Ann. Physik, 2**, 114, 513-30, 1861.
114. Thomson, W. (Lord Kelvin), Heat, in Encyclopedia Britannica, Vol. 11, 9th Ed., 1880; reprinted in Mathematical and Physical Papers, Vol. 3, Cambridge University Press, 113-235, 1890.
115. Preston, T., the Theory of Heat, 719 pp., 1894; 4th Ed. (J. R. Cotter, ed.), Macmillan Co., Ltd., London, 836 pp., 1929.
116. Chwolson, O. D., Thermal Conductivity, in Traite de Physique (Translated into French by Davaux, E. and reviewed and augmented by the author), Vol. 3, Chap. VII, Librairie Scientifique A. Hermann et Fils, Paris, 320-408, 1909.
117. Schofield, F. H., Conduction of Heat, in A dictionary of Applied Physics (Glazebrook, R., ed.), Vol. 1, The Macmillan Co., New York, 429-66, 1922 (reprinted 1950).
118. Ingersoll, L. R., Methods of Measuring Thermal Conductivity in Solids and Liquids, **J. Optical Soc. Am., 9**, 495-501, 1924.
119. Griffiths, E., A Survey of Heat Conduction Problems, **Proc. Phys. Soc. (London), 41**, 151-79, 1929.
120. Partington, J. R., Thermal Conductivity of Solids, in An Advanced Treatise on Physical Chemistry, Vol. III, Longmans, Green and Co., London, 410-61, 1952.
121. Seibel, R. D., Survey and Bibliography on the Determination of Thermal Conductivity of Metals at Elevated Temperatures, Watertown Arsenal Lab. Rept. No. WAL 821/9, 1-65, 1954. (AD 51 228)
122. Kingery, W.D., Property Measurements at High Temperatures, John Wiley and Sons, Inc., New York, 416 pp., 1959.

123. Slack, G. A., Heat Conduction in Solids, Experimental, in Encyclopedic Dictionary of Physics (Thewlis, J., editor-in-chief), Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, 601-6, 1961.
124. Tye, R. P., Thermal Conductivity, Vol. 1 and 2, Academic Press, London, 422 pp. and 353 pp., 1969.
125. Carslaw, H.S., Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, 1946; 2nd Ed., 510 pp., 1959.
126. Ingersoll, L.R., Zobel, O. J., Ingersoll, A. C., Heat Conduction, McGraw Hill, New York, 1948; 2nd Ed., University of Wisconsin Press, 325 pp., 1954.
127. Jakob, M., Heat Transfer, Vol. 1, John Wiley and Sons, Inc., New York, 758 pp., 1949.
128. Schneider, P.J., Conduction Heat Transfer, Addison Wesley Publ. Co., Cambridge, Mass., 395 pp., 1955.
129. Arpaci, V. S., Conduction Heat Transfer, Addison Wesley Publ. Co., Reading, Mass., 550 pp., 1966.
130. 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.
131. Taylor, R. E., et al, Evaluation of Direct Electrical Heating Methods for the Determination of Thermal Conductivity at Elevated Temperatures , Air Force Materials Laboratory Techn. Rept. AFML-TR-68-227, 1-74, 1968
132. Berget, A., Measurement of the Thermal Conductivity of Mercury, of Its Absolute Value, **Compt. Rend.**, **105**,224-7, 1887.
133. Berget. A., Thermal Conductivity of Mercury and Certain Metals., **J. Phys. (Paris)**, **2**,7,503-18, 1888.
134. Laubitz, M. J., Measurement of the Thermal Conductivity of Solids at High Temperatures by Using Steady-State Linear and Quasi-Linear Heat Flow, in Thermal Conductivity (Tye, R. P., ed), Vol. 1, Chap. 3, Academic Press, London, 111-83, 1969.
135. Flynn, D. R., Thermal conductivity of Ceramics, in Mechanical and Thermal Properties of Ceramics (Wachtman, J. B., Jr., ed), **NBS Spec. Publ**, **303**, 63-123, 1969.

136. Bauerle, J. E., Thermal Conductivity, Section 10.1 in Thermoelectricity: Science and Engineering (Heikes, R.R. and Ure, R.W., Jr., eds.), Interscience Publishers, New York, 285-311, 1961.
137. Honda, K. and Simidu, T., On the Thermal and Electrical Conductivities of Carbon Steels at High Temperatures, Sci. Repts. Tohoku Univ., 1, 6, 219-33, 1917.
138. Schofield, F. H., The Thermal and Electrical Conductivities of Some Pure Metals, **Proc. Roy. Soc. (London)**, **A107**, 206-27, 1925.
139. Powell, R. W., The Thermal and Electrical Conductivities of Metals and Alloys: I. Iron from 0 to 800 C, **Proc. Phys. Soc. (London)**, **46**, 659-78, 1934.
140. Goldsmith, H. J., The Thermal Conductivity of Bismuth Telluride, **Proc. Phys. Soc. (London)**, **B69**, 203-9, 1956.
141. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by Means of the Guarded Hot Plate, ASTM Designation: C177-63, in 1967 Book of ASTM Standards, Part 14, 17-28, 1967.
142. Poensgen, R., A Technical Method for Investigating the Thermal Conductivity of Slabs of Material, **VDI Zeitschrift**, **56** (41), 1653-8, 1912.
143. Jakob, M., Measurement of the Thermal Conductivity of Liquids, Insulating Materials and Metals, **VDI Zeitschrift**, **66**, 688-93, 1922.
144. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Refractories, ASTM Designation: C201-47 (1958), in 1967 Book of ASTM Standards, Part 13, 170-7, 1967.
145. Wilkers, G. B., Thermal Conductivity, Expansion, and Specific Heat of Insulators at Extremely Low Temperatures, **Refrif. Eng.** **52** (1), 37-42, 1946.
146. Schröder, J., A Simple Method of Determining the Thermal Conductivity of Solids, **Philips Tech. Rev.**, **21** (12), 357-61, 1959-60.
147. Schröder, J., Apparatus for Determining the Thermal Conductivity of Solids in the Temperature Range from 20 to 200 C, **Rev. Sci. Instr.**, **34** (6), 615-21, 1963.
148. ASTM, Tentative Method of Test for Thermal Conductivity of Insulating Materials at Low Temperatures by Means of the Wilkes Calorimeter, ASTM Designation: C420-62T, in 1967 Book of ASTM Standards, Part 14, 172-9, 1967.

149. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by Means of the Heat Flow Meter, ASTM Designation: C518-67, in 1967 Book of ASTM Standards, Part 14, 230-8, 1967.
150. Lodge, O. J., On a Method of Measuring the Absolute Thermal Conductivity of Crystals and Other Rare Substances. Part I, **Phil. Mag.**, **5**, 5,110-7, 1878.
151. Berget, A., Measurement of the Coefficients of Thermal Conductivity of Metals. **Compt. Rend.**, **107**, 227-9. 1888.
152. Lees, C. H., On the Thermal Conductivities of Crystals and Other Bad Conductors, **Phil. Trans. Roy. Soc. (London)**, **A183**, 481-509, 1892.
153. van Dusen, M. S. and Shelton, S. M., Apparatus for Measuring Thermal Conductivity of Metals up to 600 C, **J. Res. Natl. Bur. Stand.**, **12**, 429-40, 1934.
154. Powell, R. W., The Thermal and Electrical Conductivity of a Sample of Acheson Graphite from 0 to 800 C. **Proc. Phys. Soc. (London)**, **49**, 419-25, 1937.
155. Francel, J., Kingery, W. D., Apparatus for Determining Thermal Conductivity by a Comparative Method. Data for Pb, Al₂O₃, BeO, and MgO, **J. Am. Ceram. Soc.** **37**, 80-4, 1954.
156. Stuckes, A. D., Chasmar, R. P., Measurement of the Thermal Conductivity of Semiconductors, **Rept. Meeting of Semiconductors (Phys. Soc., London)**, 119-25, 1956.
157. ASTM, Standard Method of Test for Thermal Conductivity on Whiteware Ceramics, ASTM Designation: C408-58, in 1967 Book of ASTM Standards, Part 13, 348-52, 1967.
158. Mirkovich, V. V., Comparative Method and Choice of Standards for Thermal Conductivity Determinations, **J. Am. Ceram. Soc.**, **48** (8), 387-91, 1965.
159. Christiansen, C., Some Experiments on Heat Conduction, **Ann. Physik**, **3**, 14, 23-33, 1881.
160. Peirce, B. O., Wilson, R. W., On the Thermal Conductivities of Certain Poor Conductors. I, **Proc. Am. Acad. Arts and Sci.**, **34** (1), 1-56, 1898.
161. Sieg, L. P., An Attempt to Detect a Change in the Heat Conductivity of a Selenium Crystal with a Change in Illumination, **Phys. Rev.**, **6**, 213-8, 1915.

162. Powell, R. W., The Thermal and Electrical Conductivities of Metals and Alloys: II. Some Heat –Resistant Alloys from 0 to 800 C, **Proc. Phys. Soc. (London)**, **48**, 381-92, 1936.
163. Powell, R. W. And Hickman, M. J., The Physical Properties of a Series of Steels. 3. Thermal Conductivity and Electrical Resistivity, **Iron and Steel Institute**, **Special Report No. 24**, 242-51, 1939.
164. Powell, R. W., Tye, R. P., The Thermal and Electrical Conductivities of Some Nickel-Chromium (Nimonic) Alloys, **The Engineer**, **209**, 729-32, 1960.
165. Pickover, C., Laws and Science and the Great Minds Behind Them- Archimedes to Hawking, s. 212, 219, 230, 360, Oxford University Press, 2008.
166. Çadırlı, E., Ülgen, A., Gündüz M., 1999, Directional solidification of the aluminum-copper eutectic alloy, **Materials Transactions**, **40**, 989-996.
167. Büyük, U., Engin S., Maraşlı N., 2015, Directional solidification of Zn-Al-Cu eutectic alloy by the vertical bridgman method, **J. Min. Metall. Sect. B-Metall.**, **51**, 67 -72.
168. Hosch, T., England, L.G. and Napolitano, R.E., 2009, Analysis of the high growth-rate transition in Al-Si eutectic solidification, **J. Mater. Sci.**, **44**, 4892-4899.
169. Hirai, M., Sato, T., Ohiro, G., 1977, Interfacial Stability of α (Al - Rich Solid Solution)-Liquid interface of Unidirectionally Solidified Al-FeAl₃ Eutectic Alloy, **Journal of Crystal Growth**, **38**, 340-352.
170. Kaya, H., Büyük, U., Çadırlı, E, Maraşlı, N., 2010, Unidirectional solidification of aluminium–nickel eutectic alloy, **Kovove Mater** **48(5)**, 291–300.
171. Gündüz, M., Kaya, H., Çadırlı, E., Özmen, A., 2004, Interflake spacings and undercoolings in Al–Si irregular eutectic alloy, **Mater Sci Eng A**, **369**, 215–229.
172. Rios, C.T., Milenkovic, S., Ferrandini, P.L. and Caram, R., 2005, Directional solidification, microstructure and properties of the Al₃Nb-Nb₂Al eutectic, **Journal of Crystal Growth**, **275**, 153-158.
173. Büyük, U., Engin, S., Maraşlı, N., 2011, Microstructural characterization of unidirectional solidified eutectic Al–Si–Ni alloy, **Material Characterization**, **62**, 844-851.

174. Y. Kaygısız., 2014, Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum Esaslı Çoklu Alaşımların Yapı Parametreleri İle Mekanik, Termal ve elektriksel Özelliklerinin Büyütme Hızına Bağlılığının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri 93-114.
175. Böyük U., Maraşlı N., Kaya H., Çadırlı E., Keşlioğlu K., 2009, Directional solidification of Al-Cu-Ag alloy, **Appl Phys A**, **95**, 923–932.
176. S. Engin, U. Böyük, N Maraşlı, 2016, The effects of microstructure and growth rate on microhardness, tensile strength, and electrical resistivity for directionally solidified Al-Ni-Fe alloys, **Journal of Alloys and Compounds** **660**, 23-31.
177. Engin, S., Böyük, U., Kaya, H., Maraşlı, N., 2011, Directional solidification and physical properties measurements of the zinc-aluminum eutectic alloy, **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, **18**, 659-664
178. Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J., Fu, H., 2012, Effect of growth rate on microstructure parameters and microhardness in directionally solidified Ti–49Al alloy, **Materials Design**, **34**, 552–558.
179. Y. Kaygısız, N. Maraşlı, 2015, Microstructural, mechanical and electrical characterization of directionally solidified Al–Si–Mg eutectic alloy, **Journal of Alloys and Compounds**, **618**, 197–203.
180. Kaya, H., Böyük, U., Çadırlı, E., Maraşlı, N., 2013, Influence of Growth Rate on Microstructure, Microhardness, and Electrical Resistivity of Directionally Solidified Al-7 wt% Ni Hypo-Eutectic Alloy, **Metals and Materials International**, **19**, 1, 39-44.
181. Kaya H., Çadırlı E., Gündüz M. and Ülgen A., 2003, Effect of the temperature gradient, growth rate, and the interflake spacing on the microhardness in the directionally solidified Al-Si eutectic alloy, **J. Mat. Eng. and Perf.**, **12(5)**, 544–551.
182. Böyük, U., Maraşlı, N., Çadırlı, E., Kaya, H. and Keşlioğlu, K., 2012, Variations of microhardness with solidification parameters and electrical resistivity with temperature for Al-Cu-Ag eutectic alloy, **Curr. Appl. Phys.**, **12**, 7-10.
183. Çadırlı E., Yilmazer E., Şahin M., Kaya H., 2015, Investigation of the Some Physical Properties of the Directionally Solidified Al–Cu–Co Ternary Eutectic Alloy, **Trans Indian Inst Met.**, TP 2907.

184. Brandt, R., and Neuer, G., 2007, Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Pure Aluminum and Aluminum Alloys up to and above the Melting Temperature, **International Journal of Thermophysics**, **28**, 5, 1429-1446.
185. Çadırılı, E., Büyük, U., Engin, S., Kaya, H., Maraşlı, N and Arı, M., 2010, Investigation of microhardness and thermo-electrical properties in the Sn-Cu hypereutectic alloy, **J. Mater. Sci- Mater. El.**, **21**, 468-474.
186. Kamal, M. and Gouda, E.S., 2007, Effect of cooling speed on structure and properties of rapidly solidified Pb-25wt. % Sn alloy, **Radiat. Eff. Defect. S.**, **162**, 691-696.
187. El-Ashram, T. and Shalaby, R.M., 2005, Effect of rapid solidification and small additions of Zn and Bi on the structure and properties of Sn-Cu eutectic alloy, **J. Electron. Mater.**, **34**, 212-215.
188. Aksöz, N., Metalik Alaşımların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi, Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 2013.
189. Demir, M., İkili Kurşunsuz Lehim Alaşımlarının Isı İletiminin Ölçümü, Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 2013.
190. Rosenthal , D., Friedmann, N. E., Thermal Diffusivity of Metals at High Temperatures, **J. Appl. Phys.**, **25**(8), 1059-60, 1954.
191. 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.
192. Hsu, S. T., Theory of a New Apparatus for Determining the Thermal Conductivities of Metals, **Rev. Sci. Instr.**,**28** (5), 333-6, 1957.
193. Hsu, S. T., Determination of Thermal Conductivities of Metals by Measuring Transient Temperatures in Semi-Infinite Solids, **Trans. ASME**, **79**, 1197-1203, 1957.
194. 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.
195. 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.
196. 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.

197. Kaygısız, Y., et al, Thermal Conductivity and interfacial energies of solid Sn_3Sb_2 in the Sn-Sb peritectic system, **Thermochimica Acta**, **520**, 25-32, 2011.
198. Mhiaoui, S., Sar, F. Gasser, J.G., **J. Non-Cryst. Solids** **353**, 3628,2007.
199. 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.
200. Erol, M., et al, Solid–liquid interfacial energy of bismuth in the Bi–Cd eutectic system, **Scripta Materialia**, **51**, 131–136, 2004.
201. Kaygısız, Y., et al, Experimental determination of solid–solid and solid–liquid interfacial energies of solid ϵ (CuZn_5) in the Zn–Cu alloy, **Journal of Alloys and Compounds** **487**, 103–108, 2009.
202. 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.
203. Keşlioğlu, K., Maraşlı, N., Short communication Solid–liquid interfacial energy of the eutectoid β phase in the Al–Zn eutectic system, **Materials Science and Engineering, A** **369**, 294–301, 2004.
204. 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.
205. Witusiewicz, V.T., et al, **J. Alloy. Compd.**, **387**, 217, 2005.
206. Ocak, Y., et al, Interfacial energies of solid CuAl_2 in the CuAl_2 - Ag_2Al pseudo binary alloy, **Thin Solid Films**, **518**, 4322-4327, 2010.
207. Akbulut, S., et al, Interfacial energy of solid In_2Bi intermetallic phase in equilibrium with In–Bi eutectic liquid at 72 °C equilibrating temperature, **Materials Characterization**, **59**,1101-1110, 2008.
208. Kaygısız, Y., et al, Thermal conductivity and interfacial energies of solid Sn in the Sn-Cu alloy, **Chemical Physics Letters**, **484**, 219-224, 2010.
209. 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.

210. Ocak, Y., et al, Experimental determination of thermal conductivity and solid-liquid interfacial energy of solid Ag₃Sn intermetallic in the Sn-Ag-In ternary alloy, **Intermetallics**, **18**, 2250-2258, 2010.
211. 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.
212. Mc Cartney, D.G., D. Phil. Thesis, University of Oxford, London, UK 85, 1981.
213. 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**, **2**, No.1, January, 2010.
214. 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.
215. Arı, M., et al, Thermo-electrical characterization of Sn-Zn alloys, **Materials Characterization**, **59**, 757-763, 2008.
216. Materials Science and International Team, MSIT®, Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series / Editor in Chief: W. Martienssen Group IV: Physical Chemistry Volume 11A2, Ternary Alloy Systems Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data, (Aluminum-Copper-Nickel) pp. 104-126, 2003.
217. Materials Science and International Team, MSIT®, Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series / Editor in Chief: W. Martienssen Group IV: Physical Chemistry Volume 11A2, Ternary Alloy Systems Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data, (Aluminum-Copper-Titanium) pp. 156-173, 2003.
218. Materials Science and International Team, MSIT®, Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series / Editor in Chief: W. Martienssen Group IV: Physical Chemistry Volume 11A2, Ternary Alloy Systems Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data, (Aluminum-Copper-Zinc) pp. 182-205, 2003.
219. Geçkinli, A.E., 1989, Metalografi, I. Kısım, İTÜ Kütüphanesi.
220. Bayram Ü., 2011, NeopentilGlikol-Dikamfor Sisteminde Katı-Sıvı Arayüzey Enerjisi ve Termal İletkenliğin Ölçümü, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

221. Engin, S., 2013, Kontrollü katılaştırılan çok bileşenli ötektik alaşımların, mekanik ve elektriksel özelliklerinin katılaştırma parametrelerine bağlılığının incelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
222. Ourdjini, A., Liu, J., Elliot, R., 1994, Eutectic Spacing Selection in The Al-Cu System, **Materials Science and Technology**, **10**, 312-318.
223. Sümbüloğlu K., Sümbüloğlu V., Biyoistatistik, Haliboğlu Yayınevi, İstanbul, 1987.



ÖZGEÇMİŞ VE YAYIN LİSTESİ

Adı, Soyadı: Ümit BAYRAM

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 1 Kasım 1986, SİVAS

Medeni Durumu: Evli, 2 Çocuk Babası

Tel: +90 352 207 66 66 (33140) - 0507 392 2274

Fax: +90 352 437 5271

E-mail: umitbayram@erciyes.edu.tr, umitbayram14@gmail.com

Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü C Blok 38039

Melikgazi/KAYSERİ

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü	Cumhuriyet Üniversitesi	2004-2008
Y.Lisans (Tezli)	Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü	Erciyes Üniversitesi	2008-2011
Doktora	Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü	Erciyes Üniversitesi	2011-2017

Yüksek Lisans Tezi Başlığı (Tez Önerisi) ve Tez Danışmanı:

Yüksek Lisans Tezi Başlığı: Neopentilglükol-Dikamfor Sisteminde Katı-Sıvı Arayüzey Enerjisi ve Termal İletkenliğin Ölçümü.

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Doktora Tezi Başlığı (Tez Önerisi) ve Tez Danışmanı:

Doktora Tezi Başlığı: Kontrollü Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum İçerikli Çoklu Ötektik Alaşımların Yapı Parametreleri ile Mekanik, Elektrik ve Termal Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Görevler:

Unvanı	Görev Yeri	Ay/Yıl
Arş. Gör.	Erciyes Üniversitesi (50/d)	Şubat 2011- Eylül 2017
İş Güvenliği Uzmanı (C Sınıfı)	Erciyes Üniversitesi Gevher Nesibe Hastanesi (Görevlendirme)	Temmuz 2016- Ekim 2016

Araştırma Alanları

- a. Durum yoğunluğu, faz dengesi ve faz geçişleri
- b. Isıl İşlem
- c. Fiziksel Metalurji
- d. Metalik Malzemeler
- e. Mekanik Özellikler
- f. Fiziksel Özellikleri
- g. Yoğun maddenin termal özellikleri
- h. Doğrusal katılaştırma
- i. Katı-sıvı arayüzey enerjileri
- j. Termal İletkenlik
- k. Elektriksel İletkenlik

Üniversiteler Arası Kurul Bilim Alanı Bilgileri

1. Fen Bilimleri ve Matematik Temel Alanı
 - a) Fizik
 - b) Yoğun Madde Fiziği
 - c) Malzeme Bilimi

Web Of Science Araştırma Alanları

- 1) Physics, Condensed Matter
- 2) Physics, Applied
- 3) Materials Science, Characterization & Testing
- 4) Metallurgy & Metallurgical Engineering

Projelerde Yaptığı Görevler:

Tamamlanan Projeler:

1) “Organik Alaşımların Termofiziksel Özelliklerinin Tespiti”

Proje No: **FBY-10-2954**, 2010-2012. Bütçesi:5.000 TL

Destekleyen Kuruluş: Erciyes Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi.

Projedeki Görevi: **Yardımcı Araştırmacı**

2) “Metalik ve Organik Alaşımların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi”

Proje No: **2012/5**, Bütçesi: 20.000TL

Destekleyen Kuruluş: Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi.

Projedeki Görevi: **Yardımcı Araştırmacı**

3) “Çoklu Organik Alaşımların Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Ölçümü”

Proje No: **FBY-11-3775**, 2011. Bütçesi: 5.000 TL

Destekleyen Kuruluş: Erciyes Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi.

Projedeki Görevi: **Yardımcı Araştırmacı**

4) “İkili organik malzemelerin ısı iletiminin sıcaklıkla değişimi”

Proje No: **NEÜADP13F15**, 2013. Bütçesi: 20.000 TL

Destekleyen Kuruluş: Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi.

Projedeki Görevi: **Yardımcı Araştırmacı**

5) “Doğrusal Katılaştırılmış Çinko-Alüminyum Esaslı Üçlü Ötektik Alaşımların Yapı Parametreleri İle Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi”

Proje No; **FYL-2013-4841**, Bütçesi; 6.000 TL

Destekleyen Kuruluş: Erciyes Üniversitesi Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi.

Projedeki Görevi: **Yardımcı Araştırmacı**

6) “In-Bi İntermetalik Fazların Isı İletkenlik Değerlerinin Ölçümü”

Proje No; **NEÜADP15F18**, Bütçesi; 30.000 TL

Destekleyen Kuruluş: Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi.

Projedeki Görevi: **Yardımcı Araştırmacı**

7) “Kontrollü Doğrusal Katılaştırılmış Alüminyum İçerikli Çoklu Ötektik Alaşımların Yapı Parametreleri İle Mekanik, Elektrik ve Termal Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlılıklarının İncelenmesi”

Proje No; **FDK-2013-4741**, Bütçesi; 15.000 TL

Destekleyen Kuruluş: Erciyes Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi.

Projedeki Görevi: **Yardımcı Araştırmacı**

Yabancı Dil Bilgileri:

Sınav Adı	Sınav Yabancı Dili	Sınav Tarihi	Notu
YDS (Yabancı Dil Bilgisi Seviye Tespit Sınavı)	İngilizce	7 Eylül 2014	61.250
YÖKDİL (Yükseköğretim Kurumları Yabancı Dil Sınavı)	İngilizce	9 Temmuz 2017	70.000

Katıldığı lisans düzeydeki laboratuvar dersleri:

Akademik Yıl	Bölüm	Dersin Adı
2011-2017	Fizik	Mekanik Fizik Laboratuvarı-I
		Elektrik ve Manyetizma Laboratuvarı-II
		Optik Laboratuvarı-III
		Modern Fizik Laboratuvarı-IV
		Mekanik Fizik Uygulama
	Astronomi ve Uzay Bilimleri	Mekanik Fizik Laboratuvarı-I
		Elektrik ve Manyetizma Laboratuvarı-II
		Optik Laboratuvarı-III
		Modern Fizik Laboratuvarı-IV
2014-2017	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Mekanik Fizik Laboratuvarı-I
		Elektrik ve Manyetizma Laboratuvarı-II
	Makine Mühendisliği	Mekanik Fizik Laboratuvarı-I
		Elektrik ve Manyetizma Laboratuvarı-II
	Malzeme Bilimi ve Mühendisliği	Mekanik Fizik Laboratuvarı-I
		Elektrik ve Manyetizma Laboratuvarı-II

Bilimsel Organizasyonlardaki Görevleri

- ✓ Düzenleme Kurulu Üyesi, FENBİLKON-3 Eğitim Sempozyumu 2011

Ödüller-Burslar

- ✓ Yüksek Öğrenim Kredi ve Yurtlar Kurumu, Yüksek Lisans Eğitimi Bursiyeri (2009-2010)
- ✓ 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı (2013-1) TÜBİTAK-BİDEB, Nisan 2013-2016.
- ✓ T.C. Milli Eğitim Bakanlığı (MEB), Yurt Dışına Lisansüstü Öğrenim Görmek Üzere Gönderilecek Öğrencileri Seçme ve Yerleştirme (YLSY) 2015-1 Resmi Burslu Öğrenci

- ✓ Erciyes Üniversitesi Bilimsel Teşvik Ödülü, 2013 (1- Başvuru No:2200, 2- Başvuru No:2201, 3- Başvuru No:3248, 4- Başvuru No:3249).
- ✓ Erciyes Üniversitesi Bilimsel Teşvik Ödülü, 2014 (1- Başvuru No:6441).
- ✓ Erciyes Üniversitesi Bilimsel Teşvik Ödülü, 2015 (1- Başvuru No:15551).
- ✓ TÜBİTAK-UBYT Bilimsel Yayın Teşvik Ödülü, 2012 (1- Başvuru No:266584, 2- Başvuru No:269673).
- ✓ TÜBİTAK-UBYT Bilimsel Yayın Teşvik Ödülü, 2013 (1- Başvuru No:293113, 2- Başvuru No:300675, 3- Başvuru No:300676).

Sertifika, Kurs ve Eğitimler

- ✓ C Sınıfı İş Güvenliği Uzmanlığı Belgesi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, 12.06.2013, Belge No: 17095
- ✓ TÜBİTAK-2237 Proje Eğitimi Etkinliklerini Destekleme Programı, Fizikçilere Yönelik Araştırma Projesi Hazırlama Eğitimi, 15-17 Aralık 2013, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Katılımcı Belgesi
- ✓ 21. İstatiksel Fizik Günleri, 19-21 Haziran 2014, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Katılımcı Belgesi.

YAYIN LİSTESİ-A

A.Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan SCI ve SCI-Expanded İndeksli makaleler:

- A.[1] **Ü. Bayram**, S.Aksöz, N. Maraşlı, “Solid–liquid interfacial energy of neopentylglycol solid solution in equilibrium with neopentylglycol–(D) camphor eutectic liquid” **Journal of Crystal Growth**, 338 (2012) 181-188 (DOI:10.1016/j.jcrysgro.2011.11.005). (WOS: 000299720400035).
- A.[2] **Ü. Bayram**, S. Aksöz, N. Maraşlı,”Dependency of thermal conductivity on the temperature and composition of (D)-camphor in the neopentylglycol–(D)-camphor alloys” **Thermochimica Acta** 531 (2012) 12-20 (DOI:10.1016/j.tca.2011.12.021) (WOS: 000301309700003).
- A.[3] A. Özer, **Ü. Bayram**, S. Aksöz, N. Maraşlı ”Solid-liquid interfacial energy of neopentylglycol solid solution in equilibrium with succinonitrile-neopentylglycol-aminomethylpropanediol liquid” **Journal of Crystal Growth** 364 (2013) 34-39 (DOI:10.1016/j.jcrysgro.2012.11.064) (WOS: 000314164500007).
- A.[4] **Ü. Bayram**, S. Aksöz, N. Maraşlı, “Solid-liquid interfacial energy of aminomethylpropanediol solid solution in equilibrium with aminomethylpropanediol neopentylglycol- D Camphor eutectic liquid” **Thermochimica Acta**, 554 (2013) 48-53 (DOI:10.1016/j.tca.2012.12.013) (WOS: 000315006800007).
- A.[5] **Ü. Bayram**, E.Öztürk, S.Aksöz, N.Maraşlı, “The measurements of thermal conductivity variations with temperature for organic analog of nonmetal-nonmetal system; urea-4-bromo-2-nitroaniline” **Metallurgical and Materials Transactions A** 44A (2013) 4051-4058 (DOI:10.1007/s11661-013-1751-6) (WOS: 000322321600008).
- A.[6] **Ü. Bayram**, A.Özer, S.Aksöz, N.Maraşlı “Solid-liquid interfacial energy of solid neopentylglycol solution in equilibrium with neopentylglycol-aminomethylpropanediol eutectic liquid” **Metallurgical and Materials Transactions A** 44A (2013), 4042–4050 (DOI:10.1007/s11661-013-1760-5) (WOS: 000322321600007).

- A.[7] N. Aksöz, E. Öztürk, **Ü. Bayram**, S.Aksöz, S.Kervan, N.Maraşlı, “Thermal conductivity variation with temperature for lead– free ternary eutectic solders” **Journal of Electronic Materials**, 42 (2013) 3573–3581 (DOI:10.1007/s11664-013-2748-z) (WOS:000326697100030).
- A.[8] **Ü. Bayram**, S. Aksöz, N. Maraşlı, “Temperature dependency of thermal conductivity of solid phases for fatty acids” **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 118 (2014) 311-321 (DOI:10.1007/s10973-014-3968-z) (WOS: 000342213500034).
- A.[9] P. Ata, Y. Karamazı, **Ü. Bayram**, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “Solid-liquid interfacial energy of solid succinonitrile in equilibrium with succinonitrile-(D)camphor-aminomethylpropanediol eutectic liquid” **International Journal of Thermophysics**, 37 (2016) 1-13 (DOI: 10.1007/s10765-015-2008-y) (WOS: 000368053200003).
- A.[10] Y. Karamazı, **Ü. Bayram**, P. Ata, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “Dependence of microstructural, mechanical and electrical properties on growth rates in the directional solidified Zn–Al–Bi eutectic alloy” **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 26 (2016) 2320-2335 (DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64354-6) (WOS: 000386345500007).
- A.[11] **Ü. Bayram**, K. Keşlioğlu, S. Aksöz, N. Maraşlı “Thermal Conductivity of Solid Phases for Naphtol, Camphene, Salol, and Bezil” **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, 30 (2016) 730-736 (DOI: 10.2514/1.T4758) (WOS: 000387338000011).
- A.[12] **Ü. Bayram**, Y. Karamazı, P. Ata, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “Dependence of microstructure, microhardness, tensile strength and electrical resistivity on growth rates for directionally solidified Zn–Al–Sb eutectic alloy” **International Journal of Materials Research**, 107 (2016) 1005-1015 (DOI: 10.3139/146.111424) (WOS: 000387884000004).

YAYIN LİSTESİ-B

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (*Proceedings*) basılan bildiriler:

- B.[1]** Ü. Bayram, S. Aksöz, Y. Ocak, N. Maraşlı, K. Keşlioğlu “Interfacial Energy Of Solid NPG in the NPG-Dc Eutectic System” **Türk Fizik Derneği, 27. Uluslararası Fizik Kongresi**, 14-17 September 2010, İstanbul, Turkey (**Poster Presentation**).
- B.[2]** Ü. Bayram, S. Aksöz, N. Maraşlı, “Dependency of Thermal Conductivity on the Temperature and Composition of D-Camphor in the Neopentylglycol-D-Camphor Alloys” **TFD 28. Uluslararası Fizik Kongresi**, 06-09 September 2011, Bodrum, Turkey (**Poster Presentation**).
- B.[3]** Ü. Bayram, S. Aksöz, E. Öztürk, N. Maraşlı “The Measurement of Thermal Conductivity Variation with Temperature for Solid Materials” **TFD 29. Uluslararası Fizik Kongresi**, 05-08 September 2012, Bodrum, Turkey (**Poster Presentation**).
- B.[4]** Ü. Bayram, E. Öztürk, S. Aksöz, N. Maraşlı “Solid-liquid interfacial energy of solid aminomethylpropanediol solution in equilibrium with aminomethylpropanediol-neopentylglycol-D camphor liquid” **Advanced Materials World Congress, AMWC 2013**, 16-19 September 2013, İzmir Institute of Technology, İzmir, Turkey (**Poster Presentation**).
- B.[5]** Ü. Bayram, Y. Karamazı, P. Ata, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “Solid-Liquid Interfacial Energy of Solid Succinonitrile in Equilibrium with Succinonitrile- (D) Camphor-Aminomethylpropanediol Eutectic Liquid” **9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union – BPU9**, 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (**Poster Presentation**).
- B.[6]** Ü. Bayram, Y. Karamazı, P. Ata, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “Dependence of Microstructural, Mechanical and Electrical Properties on Growth Rates in the Directional Solidified Zn-Al-Bi Eutectic Alloy” **9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union – BPU9**, 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (**Oral Presentation**).

- B.[7]** Ü. Bayram, P. Ata, Y. Karamazı, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “Dependence of Microstructure, Microhardness, Tensile Strength and Electrical Resistivity on High Growth Rates for Directional Solidified Zn-Al-Sb Eutectic Alloy” **9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union – BPU9**, 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (*Poster Presentation*).
- B.[8]** S. Aksöz, P. Ata, Ü. Bayram, Y. Altıntaş, E. Öztürk, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “The Measurements of Electrical and Thermal Conductivity Variations with Temperature and Phonon Component of the Thermal Conductivity in the In-Bi Intermetallic Alloys” **9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union – BPU9**, 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (*Oral Presentation*).
- B.[9]** Pınar Ata Esener, Ümit Bayram, Sezen Aksöz, Kâzım Keşlioğlu, Necmettin Maraşlı “The Effect of Growth Rate on Microstructure and Microhardness in The Al-Si-Ti Ternary Alloy” **International Conference on Materials Science and Technology, IMSTEC'16**, 6-8 April 2016, Nevşehir, Turkey (*Oral Presentation*).
- B.[10]** Sezen Aksöz, Yasin Karamazı, Pınar Ata Esener, Ümit Bayram, Kâzım Keşlioğlu, Necmettin Maraşlı “Influence of Growth Rate on Microstructure, Microhardness, Tensile Strength and Electrical Resistivity of Directionally Solidified Al-Cu-Ti Eutectic Alloy” **International Conference on Materials Science and Technology, IMSTEC'16**, 6-8 April 2016, Nevşehir, Turkey (*Poster Presentation*).
- B.[11]** P.A. Esener, Y. Altıntaş, Ü. Bayram, E. Öztürk, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı “Effects of Bi of Zn Elements Microstructures and Thermal Conductivity of Sn-Bi-Zn Solder”, **TFD 32. Uluslararası Fizik Kongresi**, 06-09 September 2016, Bodrum, Turkey (*Poster Presentation*).