

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Al-Zn İKİLİ ALAŞIMINDA KATILAŞTIRMA İŞLEM
PARAMETRELERİ İLE DENDRİT MİKRO YAPI
PARAMETRELERİNİN İLİŞKİSİ**

**Tezi Hazırlayan
Emine ACER**

**Tezi Yöneten
Prof. Dr. Mehmet GÜNDÜZ**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2010
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Al-Zn İKİLİ ALAŞIMINDA KATILAŞTIRMA İŞLEM
PARAMETRELERİ İLE DENDRİT MİKRO YAPI
PARAMETRELERİNİN İLİŞKİSİ**

**Tezi Hazırlayan
Emine ACER**

**Tezi Yöneten
Prof. Dr. Mehmet GÜNDÜZ**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP)
Birimi tarafından FBY-10-3053 kodu ile desteklenmiştir.**

**Temmuz 2010
KAYSERİ**

TEŞEKKÜR

Hazırlamaktan büyük zevk aldığım bu yüksek lisans tez çalışmamda, her konuda yardımlarını esirgemeyen ve çalışmalarına yön verip her zaman beni destekleyen, değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Mehmet GÜNDÜZ'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında, bana her konuda yardımda bulunan ve rehberlik eden, laboratuvar tecrübe ve birikimlerini benden esirgemeyen sayın hocam Arş.Gör. Elif YILMAZ'a, aynı laboratuvarı paylaştığım çalışma arkadaşım Coşkun KADIOĞLU'na ve her konuda desteğiyle yanımda olan değerli arkadaşım Harun EROL'a teşekkür ederim. Ayrıca bu tezi hazırlama süresince değerli çalışmalarından büyük ölçüde faydalandığım sayın hocam Dr. Ayşe BERKDEMİR ve katkılarından dolayı sayın hocam Doç. Dr. Hasan KAYA'ya sonsuz teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman bana maddi ve manevi destek olan ve beni hiç yarı yolda bırakmayan aileme de teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Al-Zn İKİLİ ALAŞIMINDA KATILAŞTIRMA İŞLEM PARAMETRELERİ İLE DENDRİT MİKRO YAPI PARAMETRELERİNİN İLİŞKİSİ

Emine ACER

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2010

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet GÜNDÜZ

ÖZET

Katılaştırılan malzemenin mikro yapılarının büyüklükleri ve düzenliliği malzemenin fiziksel, mekaniksel ve elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Mikro yapıların büyüklük ve düzenliliği ise katılaştırma işlem parametreleri (V : katılma hızı, G : sıcaklık gradyenti, C_0 : alaşımın ilk bileşimi) ile değişmektedir. Bu sebepten, katılma işlem parametreleri ile mikro yapı parametreleri arasındaki ilişkiyi, özellikle dendritik mikro yapı parametrelerini (λ_1 : birinci kollar arası mesafe, λ_2 : ikinci kollar arası mesafe, R : dendrit uç yarıçapı) incelemek endüstriyel, teknolojik ve akademik nedenlerden dolayı önemlidir, Al-Zn faz diyagramı mikro yapı parametrelerinin katılaştırma işlem parametreleri ile değişimini incelemek için çok elverişlidir.

Bu çalışmada, Al-Zn alaşımları için katılaştırma işlem parametreleri (V , G , C_0) ile dendritik mikro yapı parametreleri (λ_1, λ_2, R) arasındaki ilişki incelenmiştir. Al-Zn alaşımları iki bileşimde C_0 (7 %ağ.Zn – 20 %ağ.Zn), iki farklı çapta (4mm – 9,5mm), sabit sıcaklık gradyenti (G) altında ve beş farklı katılaştırma hızında V (7,93 – 158,73 μ m/s) doğrusal olarak katılaştırılmıştır.

Birinci bölümde, katılaştırma olayını daha iyi anlayabilmek için katılma, aşırı soğuma ve çekirdeklenme tartışılmıştır. İkinci bölümde, daha önce yapılmış deneysel çalışmalar ve teorik modeller incelenmiştir. Üçüncü bölümde, bu çalışmada kullanılan fırınların özelliklerinden bahsedilmiş ve deney sistemi açık bir şekilde tanıtılmıştır. Bunun yanı sıra, örnek bir deneyin yapılışı anlatılmış, doğrusal katılaştırılan numunenin metalografik incelenmesinde bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde numunelerin, metalografik metodlar kullanılarak hazırlanması, optik mikroskopta incelenmesi, mikro yapıların fotoğraflarının optik mikroskopta çekilmesi ve λ_1 , λ_2 ve R 'nin ölçümlerinin bu fotoğraf üzerinde yapılması anlatılmıştır. Bu ölçümlerden λ_1 , λ_2 ve R

değerleri elde edilmiş ve lineer regrasyon analizi ile C_{01} ve C_{02} için V ile ilişkileri bulunmuştur.

Son olarak, elde edilen deneysel sonuçlar ilgili teorik modeller ve daha önce yapılan benzer deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dendrit, Dendritik Büyütme, Doğrusal Katılaştırma, Birinci Kollar Arası Mesafe, İkinci Kollar Arası Mesafe

**RELATIONSHIP BETWEEN SOLIDIFICATION PROCESSING
PARAMETERS AND DENDRITIC MICROSTRUCTURE PARAMETERS IN
THE Al-Zn BINARY ALLOY**

Emine ACER

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M. Sc. Thesis, July 2010
Thesis Supervisor: Prof. Dr. Mehmet GÜNDÜZ**

ABSTRACT

The scale and regularity of the microstructure of the solidified materials can affect the physical, mechanical and electrical properties of the materials. The scale and regularity of the micro structures change with the solidification processing parameters (V : growth rate, G : temperature gradient, C_0 : initial alloy composition). Therefore, it is important to investigate the relationship between the solidification processing parameters and microstructure parameters, especially dendritic microstructure parameters (λ_1 : primary dendrite arm spacing; λ_2 : secondary dendrite arm spacing and R : dendrite tip radius) because of the industrial, technological and academical reasons. Al-Zn phase diagram is suitable to investigate the variation of the microstructure parameters with the solidification processing parameters. In this work, the relationship between solidification processing parameters (V, G, C_0) and dendritic microstructure parameters (λ_1, λ_2, R) was investigated for Al-Zn alloys. Al-Zn alloy samples with two compositions C_0 (7 wt.% Zn – 20 wt. Zn) and with two different diameters were unidirectionally solidified under constant temperature gradient (G) and at five different growth rates V (7,93 158,73 $\mu\text{m/s}$).

In the first chapter, in order to understand the solidification phenomena, the basic concepts related to the solidification, undercoolings and nucleation were discussed. In the second chapter, the previous experimental works and theoretical models were examined. In the third chapter, features of the furnaces used in this work were described and the experimental systems were explained. Furthermore a sample experiment was discussed and metallographic procedures of directional solidified samples were explained. In the fourth chapter, dendritic microstructure parameters were described and the methods used in the measurement of the dendritic microstructure parameters were explained. Specimens preparations by using metallographic methods, taking the

photographs of the microstructure with optical microscope and the measurements of λ_1 , λ_2 and R were discussed. Finally, the experimental results were compared with the results of the related theoretical models and the previous similar experimental works.

Key words: Dendrit, Dendritic Growth, Directional Solidification, Primary Arm Spacing, Secondary Arm Spacing

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xv
1. BÖLÜM	
GİRİŞ.....	1
1.1. Katılma.....	2
1.1.1. Normal Katılma.....	5
1.1.2. Hızlı Katılma.....	5
1.2. Çekirdeklenme.....	5
1.2.1. Homojen Çekirdeklenme.....	6
1.2.2. Heterojen Çekirdeklenme.....	9
1.3. Alaşımın Katılma.....	10
1.3.1. Düzlemsel Cephede Katılma.....	11
1.3.2. Hüresel Katılma.....	12
1.3.3. Dendritik Katılma.....	13
1.4. Kontrollü Doğrusal Katılma.....	15
1.5. Bölüm Değerlendirmesi.....	16
2.BÖLÜM	
KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	17
2.1.1. Katılma İşlem Parametrelerinin Dendrit Uç Yarıçapına Etkisi.....	18
2.1.2. Katılma İşlem Parametrelerinin Birinci Kollar Arası Mesafeye Etkisi.....	19
2.1.3. Katılma İşlem Parametrelerinin İkinci Kollar Arası Mesafeye Etkisi.....	21
2.2. Katılma İşlem Parametrelerinin Dendritik Mikroyapı Parametrelerine Etkisi: Deneysel Çalışmalar.....	23
2.3. Bölüm Değerlendirmesi.....	23

3. BÖLÜM

DENEYSSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SİSTEMLERİ	24
3.1. Al-Zn Alaşım Seçimi	24
3.2. Deneysel Sistem	26
3.2.1. Vakumlu Eritme-Döküm Fırını	26
3.2.2. Sıcak Döküm Fırını	29
3.2.3. Kontrollü Doğrusal Katılaştırma Fırını	33
3.2.3.1. Isıtıcı Sistem	35
3.2.3.2. Soğutucu Sistem	36
3.2.3.3. Sürücü Sistem	37
3.3. Bir Deneyin Yapılışı	39
3.3.1. Numune Potasının Hazırlanması	39
3.3.2. Numune Potaları Kalıbı Hazırlanması	41
3.3.3. Alaşımın Hazırlanması	43
3.3.4. Numunenin Dökümü	44
3.4. Sıcaklık Gradyentinin Ölçülmesi	47
3.5. Katılaştırma Hızının Ölçülmesi	48
3.6. Kontrollü Doğrusal Katılaştırma Fırınında Bir Deneyin Yapılışı	49
3.7. Metalografik İşlemler	51
3.7.1. Numunenin Kalıplanması	51
3.7.2. Numunenin Zımparalanması	51
3.7.3. Numunenin Mekanik Parlatılması	52
3.7.4. Numunenin Dağlanması	52
3.7.5. Numunenin İncelenmesi	53
3.8. Bölüm Değerlendirmesi	54

4. BÖLÜM

DENEYSSEL SONUÇLAR, YORUM VE TARTIŞMA	55
4.1. Dendritik Mikro Yapı Parametreleri Ve Ölçümleri	55
4.1.1. Dendrit Birinci Kollar Arası Mesafe (λ_1) Ve Ölçülmesi	56
4.1.2. Dendrit İkinci Kollar Arası Mesafe (λ_2) Ve Ölçülmesi	57
4.1.3. Dendrit Uç Eğrilik Yarıçapı (R) Ve Ölçümleri	57
4.2. Ölçülen Mikroyapı Parametreleri Ve Değerlendirilmesi	58

4.2.1. Al-Zn İkili Alaşımlarında V ve C_0 'in R , λ_2 Ve λ_1 'e Etkisi.....	59
4.3. Elde Edilen Sonuçların Literatürdeki Sonuçlarla Karşılaştırılması	69
4.5. SEM Görüntüleri ve EDX Analiz Sonuçları.....	75
4.5. Bölüm Değerlendirmesi	77
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	83
EK 1. Al-Zn Alaşımının Faz Diyagramı.....	83
EK 2. Al-Zn Alaşımına Ait numunelerde Linear Kesişim Ve Alan Hesabı Metodu ile Hesaplanan λ_1 Değerleri Ve İlgili Grafikler.	84
Tablo EK 4.2. Al-% 20ağ.Zn alaşımında sabit G'de λ_1 ve λ_2 'nin V ile değişimi.....	85
EK 3. Elde Edilen Sonuçların Literatürdeki Sonuçlarla Karşılaştırılması.....	88
Tablo EK 4.5 Al-Zn alaşımına ait fiziksel sabitler.....	88
EK 4. Deneysel Sonuçların Teorik Modellerle Karşılaştırılması.....	89
EK 5. Al-Zn alaşımlarına ait EDX analiz sonuçları	94
ÖZGEÇMİŞ	95

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Alüminyum (Al), Çinko (Zn) elementlerinin temel özellikleri.	25
Tablo 4.1 Al-% 7ağ.Zn alaşımında sabit G'de farklı iki çaptaki numunelerde λ_2 'nin V ile değişimi.	62
Tablo 4.2 Al-Zn alaşımında sabit G'de λ_{1or} değerleri.	64
Tablo 4.3 Al-Zn alaşımında sabit G'de λ_{1or} 'nın V ve C_{0-Zn} ile değişimi.	65
Tablo 4.4 Al-Zn alaşımında sabit G'de, λ_l 'in farklı C_0 'da V'ye bağımlılığı.	68
Tablo 4.5. Literatürde λ_1 'in V ve C_0 'a bağımlılığını gösteren teorik modeller.	69
Tablo 4.6. Literatürde λ_2 'nin V ve C_0 'a bağımlılığını inceleyen teorik modeller.	70
Tablo 4.7 Al-Zn alaşımında sabit G'de. λ_2 'nin V'ye bağımlılığı.	71

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Ticari saflıkta alüminyum malzemeye ait bir soğuma eğrisinin şematik gösterimi	3
Şekil 1.2. Katı ve sıvı fazların Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi	4
Şekil 1.3. Aşırı soğumuş sıvıda r yarıçapındaki kürenin homojen çekirdeklenmesinde serbest enerji değişimi	8
Şekil 1.4. Arayüzey enerjisi, σ , düzlemsel çekirdek yüzeyi (n), küresel katı (K), ve sıvı (S) bölgeler arasındaki ilişkiler. Arayüzey bölgeler SK (sıvı-katı), Ns (çekirdek-sıvı), ve nK (çekirdek-katı) indisleriyle gösterilmiştir.	9
Şekil 1.5. Ara yüzeyin (a) Düzlemsel, (b) Hüresel, (c) Hüresel-dendritik (d) Dendritik Büyüme şekilleri, (S: sıvı faz, K: katı faz).....	11
Şekil 1.6. Katılaşma hızı artarken katı-sıvı arayüzey büyüme yapısının hüreselden dendritik yapıya geçişi, $V_a < V_b < V_c < V_d$. (a) Düşük hızlarda büyüyen düzgün hücre, (b) $\langle 001 \rangle$ dendrit yöneliminde büyüyen hüresel-dendrit, (c) Köşeli hücre, (d) Yanal yönde ikinci kollar bulunduran dendrit	14
Şekil 1.7 (a) Birinci kollar arası mesafe λ_1 ve yumuşak bölge derinliği d ; (b) dendrit uç yarıçapı R ve ikinci kollar arası mesafe λ_2 'nin şematik gösterimi. (S: quench edilmiş (ani soğutulmuş) sıvı faz, K: katı faz).....	15
Şekil 2.1. Birinci kollar arası mesafesinin ayarlanma mekanizması	21
Şekil 2.2. Sabit G' 'de doğrusal katılaştırılan Pb-Cd alaşımında λ_1 'in farklı C_0 'da V ile değişimi	23
Şekil 3.1 Vakumlu eritme-döküm fırınının iç yapısı.	27
Şekil 3.2 Vakumlu eritme-döküm fırınının dış görünüşü.	28
Şekil 3.3. Sıcak döküm fırınının iç yapısının şematik gösterimi.	30
Şekil 3.4. Sıcak döküm fırınının dış görünüş fotoğrafı.	31
Şekil 3.5 (a) Alaşımın taşmadan kolaylıkla akmasını sağlayan 65 mm derinlikli grafit pota (b) Grafit potanın üstüne yerleştirilen 4 tane havalandırma deliğine sahip üst dengeleyici (c) Üst dengeleyici, grafit pota ve koruma kapağından oluşan, eriyik alaşımın rahatça kalıba dolması için kullanılan akıtma hunisi.	32
Şekil 3.6. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının şematik gösterimi.	33
Şekil 3.7. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının dış görünüş fotoğrafı.	35
Şekil 3.8. Kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında ısıtıcı sistemi.	36
Şekil 3.9. Soğutucu sistemin yapısı.....	37

Şekil 3.10. Sürücü mil ve fiberglass desteğin görünüşü.....	38
Şekil 3.11. Sürücü sistem bloğunun boyuna ve enine kesitleri.....	39
Şekil 3.12. Grafitlerin işlenmesinde kullanılan (a) Büyük torna ve doğrusal matkap, (b) Küçük torna ve (c) Yönlü matkap	41
Şekil 3.13. (a) Numune potası (b) Sıcak döküm fırınına yerleştirmeden önceki numune kalıbının son hali.....	42
Şekil 3.14. (a) 12,5 mm dış çapına (9,5 mm iç çapına) sahip grafit numune potalarının yapımında kullanılan pirinç destek, cetvel ve değişik ebatlarda matkap uçları (b) 6,15 mm dış çapına (4 mm iç çapına) sahip grafit numune potalarının yapımında kullanılan pirinç destek, cetvel ve kullanılan matkap ucu	43
Şekil 3.15. Al-Zn ikili alaşımını oluşturmada kullanılan metaller.....	44
Şekil 3.16. Eriyik Karıştırıcısı.....	45
Şekil 3.17. (a) Numune potalarının deformasyonu sonucu, katılaştıran metalin numune potasından tamamen kurtulması (b) Numune potaları ile tutucu arasında boşluk kalması halinde numune potaları üzerinde meydana gelen kırıklar	46
Şekil 3.18. Deney sisteminin blok diyagramı.....	50
Şekil 3.19. Numunelerin dağlanmasında kullanılan bazı dağlama malzemeleri.....	53
Şekil 3.20. Görüntü analiz sistemi.....	54
Şekil 4.1.(a) Birinci kollar arası mesafe λ_1 ve yumuşak bölge derinliği d ; (b) dendrit uç yarıçapı R ve ikinci kollar arası mesafe λ_2 'nin şematik gösterimi.....	57
Şekil 4.2 Dendrit uç yarıçapının şematik gösterimi[50].	58
Şekil 4.3. Sabit sıcaklık gradyentinde ($G=2,81 \pm 0,69 \text{ K.mm}^{-1}$) 5 farklı katılaştırma hızlarında Al-%7ağ.Zn alaşımının 4 mm çapındaki numunelerde doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan dendritik yapılar (a_1) $V_1=7,93 \mu\text{m/s}$, (b_1) $V_2=15,87 \mu\text{m/s}$, (c_1) $V_3=39,68 \mu\text{m/s}$, (d_1) $V_4=79,36 \mu\text{m/s}$, (e_1) $V_5=158,73 \mu\text{m/s}$, (burada a_1 , b_1 , c_1 , d_1 ve e_1 boyuna kesitleri, a_2 , b_2 , c_2 , d_2 ve e_2 ise aynı numunenin enine kesitlerini göstermektedir).	60
Şekil 4.4 Sabit sıcaklık gradyentinde ($G=2,81 \pm 0,69 \text{ K.mm}^{-1}$) 5 farklı katılaştırma hızlarında Al-%7ağ.Zn alaşımının 9.5 mm çapındaki numunelerde doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan dendritik yapılar (a_1) $V_1=7,93 \mu\text{m/s}$, (b_1) $V_2=15,87 \mu\text{m/s}$, (c_1) $V_3=39,68 \mu\text{m/s}$, (d_1) $V_4=79,36 \mu\text{m/s}$, (e_1)	

- $V_5=158,73 \mu m/s$, (burada a_1, b_1, c_1, d_1 ve e_1 boyuna kesitleri, a_2, b_2, c_2, d_2 ve e_2 ise aynı numunenin enine kesitlerini göstermektedir)..... 61
- Şekil 4.5. Sabit sıcaklık gradyentinde ($G=4.22 \pm 1,62 \text{ K.mm}^{-1}$) 5 farklı katılaştırma hızlarında Al-%20ağ.Zn alaşımının 4 mm çapındaki numunelerde doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan deditik yapılar (a_1) $V_1=7,93 \mu m/s$, (b_1) $V_2=15,87 \mu m/s$, (c_1) $V_3=39,68 \mu m/s$, (d_1) $V_4=79,36 \mu m/s$, (e_1) $V_5=158,73 \mu m/s$, (burada a_1, b_1, c_1, d_1 ve e_1 boyuna kesitleri, a_2, b_2, c_2, d_2 ve e_2 ise aynı numunenin enine kesitlerini göstermektedir)..... 63
- Şekil 4.6. Al-%7ağ.Zn alaşımının doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 'in katılaştırma hızıyla değişimi 66
- Şekil 4.7 Al-%20ağ.Zn alaşımının doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 'in katılaştırma hızıyla değişimi 66
- Şekil 4.8 Sabit G 'de doğrusal katılaştırılan Al-Zn alaşımında farklı C_0 'da V ile değişimi. 67
- Şekil 4.9. Doğrusal katılaştırılan Al-Zn alaşımının sabit G 'de λ_2 'nin C_{0-Zn} 'de V ile değişimi. 68
- Şekil 4.10. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 verileri ile teorik modellerden elde edilen λ_1 değerlerinin $C_0^{1/4}V^{-1/4}$ ile değişimin karşılaştırılması.(4mm'lik numuneler için) 71
- Şekil 4.11. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 verileri ile teorik modellerden elde edilen λ_1 değerlerinin $V^{-1/2}$ ile değişimin karşılaştırılması. 71
- Şekil 4.12. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 verileri ile Hunt-Lu modelinden elde edilen verilerin karşılaştırılması. 72
- Şekil 4.13. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_2 verilerinin Bouchard-Kirkaldy ve Trivedi-Somboonsuk modeli ile karşılaştırılması. 73
- Şekil 4.14. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 değerlerinin $V^{-0,25}$ ile değişiminin karşılaştırılması. 73
- Şekil 4.15. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 değerlerinin $V^{-0,5}$ ile değişiminin karşılaştırılması. 74

- Şekil 4.16. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 değerlerinin Hunt-Lu modeli ile karşılaştırılması..... 74
- Şekil 4.17. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_2 değerlerinin Bouchard-Kirkaldy ve Trivedi-Somboonsuk modeli ile karşılaştırılması. 75
- Şekil 4.18. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit $G= 4,22 \pm 1,62 \text{ K.mm}^{-1}$ sıcaklık gradyentinde (a) $V=15,87 \mu\text{m/s}$ (b) $V= 158,73 \mu\text{m/s}$ hızlarında doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan katı-sıvı arayüzeyinin SEM görüntüsü..... 76
- Şekil 4.19. Al-%7ağ.Zn sabit $G= 2,81 \pm 0,69$ sıcaklık gradyentinde (a) $V=7,93 \mu\text{m/s}$ (b) $V=39,68 \mu\text{m/s}$ (c) $V=158,73 \mu\text{m/s}$ hızlarında doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan katı-sıvı arayüzeyinin SEM görüntüsü..... 76

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

V	: Katılaştırma hızı
C_0	: Alaşımın ilk bileşimi
λ_1	: Birinci kollar arası mesafe
λ_2	: İkinci kollar arası mesafe
R	: Uç eğrilik yarıçapı
G	: Sıcaklık gradyenti
V	: Kontrol edilebilen büyüme hızı
r^*	: Kritik çekirdek yarıçapı
σ	: Birim yüzey alanı başına düşen serbest enerji artırımını
T_E	: Çözünen metalin erime sıcaklığı
V_S	: Molar hacmi
ΔH	: Entalpi
ΔT	: Sıvıdaki aşırı soğuma
$G_{sıvı}$: Sıvı içerisindeki sıcaklık gradyenti
$G_{katı}$: Katı içerisindeki sıcaklık gradyenti
ΔG	: Serbest enerji değişimi
ΔG_v	: Hacim serbest enerjisi
γ_{KS}	: Yüzey enerjisi
ΔG_n^*	: Aktivasyon enerjisi
θ	: Yüzey ve kristal çekirdek arasındaki temas açısı
$f(\theta)$: Katalizör etkisinin ölçüsü
ΔG_{het}	: Heterojen çekirdeklenme için gerekli serbest enerji
ΔG_{hom}	: Homojen çekirdeklenme için gerekli serbest enerji
N	: Düzlemsel çekirdek yüzeyi
$\Delta G(r)_{het}$: Heterojen çekirdeklenme sırasında serbest enerji değişimi
V_{SC}	: Küresel uç hacmi
A_{KS}	: Katı-sıvı arayüzeysel bölge
A_{nK}	: Çekirdek-katı arayüzeysel bölge
A_{nS}	: Çekirdek-sıvı arayüzeysel bölge
σ	: Arayüzey enerjisi
k	: Çözünen dağınım sabiti

C_K	: Katının çözünen kompozisyonu
C_S	: Sıvının çözünen kompozisyonu
V_C	: Kritik katılma hızı
d	: Yumuşak bölge derinliği
m	: Likudus eğimi
k	: Çözünen dağılım sabiti
D	: Sıvı içerisinde çözünen difüzyon sabiti
Γ	: Gibbs-Thomson sabiti
a_1	: Birinci kollar için kalibrasyon faktörü
a_2	: İkinci kollar için kalibrasyon faktörü
ΔH	: Gizli erime ısısı
fcc	: Yüzey merkezli kübik
hcp	: Hekzagonal kristal yapısı

1. BÖLÜM

GİRİŞ

20. yüzyılın başlarında hızla gelişmeye başlayan katıhal fiziği, çok geniş bir alanı kapsamaktadır. Çünkü katı maddeyi oluşturan atom ve moleküller farklı fiziksel özellikler sergilerler. Çağımızın temel araştırma konularından biri, daha iyi özelliklere sahip ve daha ekonomik malzemelerin üretilmesidir. Bu malzemeleri oluşturan element veya elementlerin değişik oranda birleşmesi ile oluşan alaşımlar genellikle kristal yapıdadır.

Geliştirilen hızlı katılaştırma teknikleri ile birlikte seçilebilecek uygun elementlerle dayanıklı, hafif, enerji tasarrufu sağlayan ve ekonomik özelliklere sahip malzemelerin üretilmesi gündeme gelmiştir. Doğada, bütün bu özelliklere sahip tek bir elemente rastlamak mümkün değildir. Dolayısıyla, elementlerden bileşik veya alaşımlar yaparak, daha iyi özelliklerde ve daha ekonomik malzemeler üretme yoluna gidilmiştir. Doğada en çok bulunan dolayısıyla da ekonomik olan, hafif, yumuşak ve enerji tasarrufu sağlayan elementlerden biri alüminyumdur (Al). Bunun yanı sıra alüminyum yumuşak olduğundan dayanıklı (sert) malzeme üretilmesinde yeterli değildir. Bu nedenle alüminyumdan daha sert, örneğin silisyum (Si), nikel (Ni) ve demir (Fe) gibi elementlerle alaşımlar yapılarak çok daha iyi özelliklere sahip alaşım üretmek mümkündür. Bu yolla bir çok Al esaslı alaşım üretilmekte ve sanayinin birçok kesiminde başarı ile kullanılmaktadır. Böylece Al esaslı alaşımlar sanayide vazgeçilmez bir malzeme olmuştur.

Bu yüksek lisans tez çalışması, Al-Zn metalik alaşımın doğrusal katılaştırılmasında, katılaştırma işlem parametreleri olan, V (katılaştırma hızı), C_0 (alaşımın ilk bileşimi) ile alaşıma ait olan dendritik mikro yapı parametreleri (λ_1 : birinci kollar arası mesafe, λ_2 : ikinci kollar arası mesafe ve R : uç eğrilik yarıçapı) arasındaki ilişkinin incelenmesini

içermektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında, elde edilen deneysel sonuçlar ilgili teorik modellerle ve literatürdeki benzer deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

1.1. Katılaşma

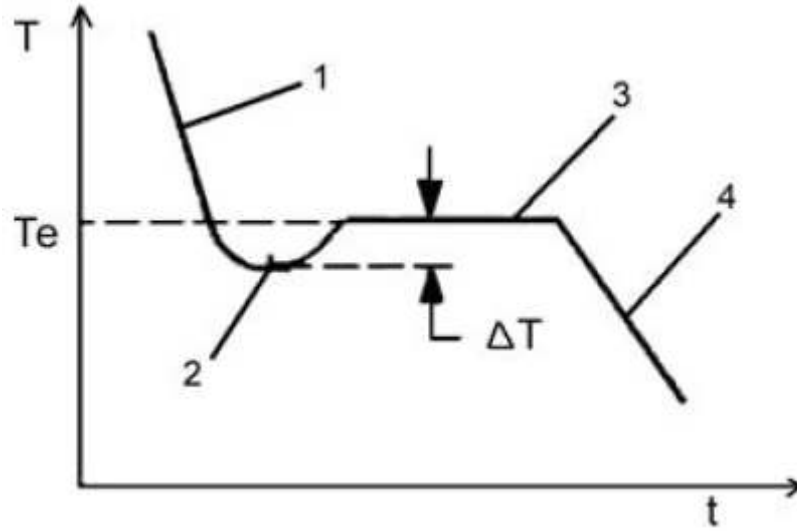
Katılaşma, kristal büyütme ve döküm uygulamalarında önemli rol oynayan bir faz dönüşümüdür. Döküm yöntemi ise bir üretim şeklidir ve bu yöntemde sıvı metal, içine döküldüğü kalıbın şeklini alarak katılaşır[1]. Fakat, döküm işleminde geliştirilen mikro yapılar genellikle döküm kalıbının geometrisinden etkilenir ve bu işlem sırasındaki parametrelerin bazıları bağımsız olarak kontrol edilemez. Son yıllarda, bağımsız olarak kontrol edilebilen büyüme hızı V , sıcaklık gradyenti G ve alaşım kompozisyonu C_0 gibi parametrelerin doğrusal katılaştırma yönteminde kristal büyütmelemlerde önemli gelişmelere ışık tuttuğu görülmektedir [2].

Katılaşma teorileri, mikroyapıyı etkileyen faktörlerin tanımlanabilmesi açısından temel oluşturduğu için, dökümlerin özelliklerinin ve kalitesinin iyileşmesine yardımcı olmaktadır [3].

Metal ve alaşımların mekanik özellikleri, katılaşma sırasında oluşan makro ve mikro yapıya bağlıdır. Doğrusal katılaştırma teknikleri kullanılarak istenilen makro ve mikro yapılar elde edilebilir. Doğrusal katılaştırma yöntemi, kontrollü katılaştırma için kullanılan önemli bir yöntemdir. Doğrusal katılaşma temel olarak uygun yöntemlerle sıcaklık gradyanının dikleştirilmesi, diğer bir söylem ile soğuk-sıcak bölgeler arasındaki sıcaklık farkının yüksek tutulması ile sağlanır. Metallerin sıvıdan katıya geçişleri dört temel adımda incelenebilir. Bu adımlar şunlardır:

- 1- Sıvı faz soğuması
- 2- Alt soğuma, çekirdek oluşumu
- 3- Katılaşma (katı fazın büyümesi)
- 4- Katı fazın soğuması [3].

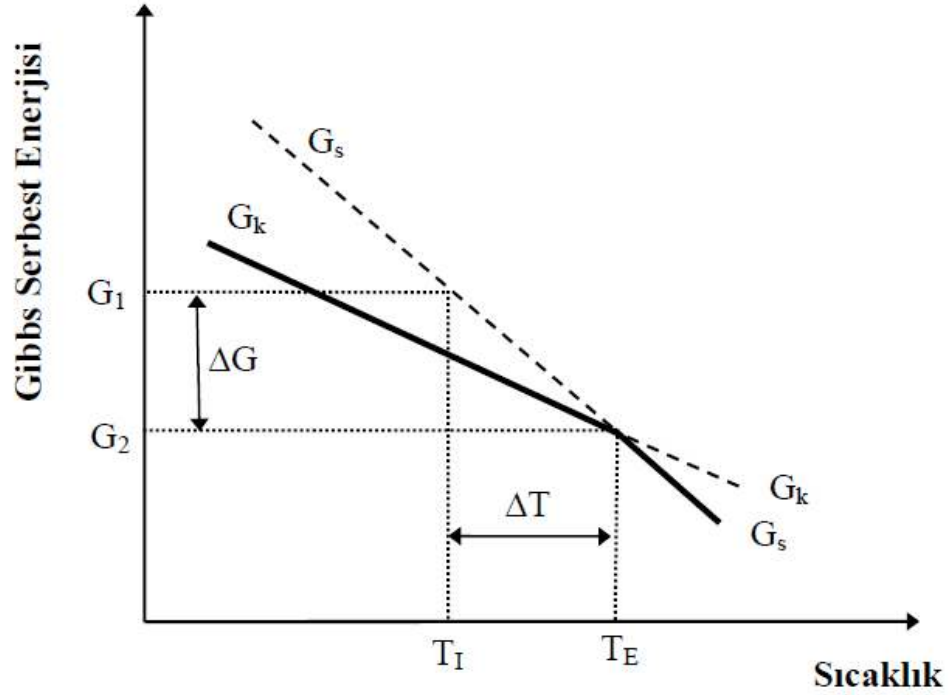
Katılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan bu dört temel adım, Şekil 1.1'deki soğuma eğrisinde görülmektedir.



Şekil 1.1. Ticari saflıkta alüminyum malzemeye ait bir soğuma eğrisinin şematik gösterimi [3].

1 numaralı bölümde, sıvı durumunda soğuma oluşur ve aşırı ısı (superheat) dışarı verilir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte toplam serbest enerji yükselir. 2 numaralı bölümde ise malzemenin katılaşabilmesi için ΔT kadar alt soğuma yaptığı kısım görülmektedir. Saf metallerde, alt soğuma sonucunda, çok sayıda embriyonun bir araya gelerek toplanması ve büyüklüklerinin kritik yarıçapa ulaşması sonucunda çekirdekler oluşur; katılaşma başlar ve toplam serbest enerji düşmeye başlar. 3 numaralı bölümde, sabit sıcaklıkta (erime sıcaklığı, T_E) sıvıdan katıya izotermal dönüşüm gerçekleşir ve atomlar kristal kafeslerindeki yerlerini alırlar. 4 numaralı bölümde ise, katı durumda soğuma gerçekleşir [1].

Katılaşma, saf metalin ve alaşımların katılaşması olmak üzere iki şekilde incelenir. Saf metaller sabit bir sıcaklıkta, alaşımlar ise bir sıcaklık aralığında katılaşır. Ergime sıcaklığının altında katı fazın serbest enerjisinin sıvı faza nazaran daha fazla negatif olması, bu sıcaklıkta katı fazı daha kararlı yapmaktadır. Bu durum, katılaşma olayını oluşturur. Katı ve sıvı fazların Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Katı ve sıvı fazların Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi [4].

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 [5-6]. Bunun sebebi, ilk katı oluşurken yeni bir katı-sıvı ara yüzeyinin oluşumu için büyük miktarda bir enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır.

Katılaşma, çekirdeklenme ve çekirdeklerin büyümesi mekanizmaları ile olur. Dökümlerde katılaşma şeklini ve katılaşma sonucu oluşan yapıyı etkileyen çeşitli faktörler vardır bunlar; alaşımın bileşimi, ısıl koşullar, sıvı içindeki bağımsız çekirdeklenmeler ve büyüme koşullarıdır. Alaşım bileşimi, kristalleşme şeklini etkiler ve tek fazlı, ötektik taneli veya her ikisinin bir arada bulunduğu bir yapının oluşup oluşmayacağını belirler. Aynı zamanda, eriyen alaşım elementinin sıvı ve katı fazlar içindeki dağılımını ve difüzyon katsayısını karakterize ederek yapısal aşırı soğumaya olan eğilimini belirler.

Isısal koşul, döküm içindeki sıcaklık dağılımı ve soğuma hızı, başlangıçtaki sıcaklık koşulları ile metalin ısı özellikleri tarafından belirlenir. Sıvı içindeki bağımsız çekirdeklenme ve büyüme koşulları, çekirdeklenme ve büyüme için mümkün rölatif olasılıklar, sıvı içindeki yabancı parçacıklarının veya alaşım elementlerinin safsızlık şeklinde bulunmasına veya amaçlı olarak ilave edilmiş olmalarına bağlıdır [7].

1.1.1. Normal Katılaştırma

Alaşımaları elde etmek için önce yüksek sıcaklıkta eritilmesi ve homojen hale gelen bu sıvı alaşımın katılaşması gerekir. Bu tür katılaşmaya normal katılaşma denir. Bu katılaşmada kristale dönüştürülecek madde, eritildikten sonra bir pota içinde üstü açık olarak soğumaya bırakılır. Alaşımın tamamen katılaşması için katılaşacak sıvının miktarına bağlı olarak bir kaç saniyeden birkaç güne kadar zaman gerekir. Alaşıma verilen ısı, pota vasıtasıyla kaybedilecek ve alaşım kristale dönüşecektir. Normal katılaşmada sıvı-katı arayüzey direnci ve aşırı ısınım olmaması durumunda hemen tam bir kabuk meydana gelir. Alaşım katılaşınca atomlar en düşük enerji seviyesine gelecektir. Çünkü kristaller, katıların en düşük serbest enerji durumundaki halidir [8].

1.1.2. Hızlı Katılaşma

Alaşımaların hızlı katılaşdırılmasında pek çok teknikler olmasına rağmen çalışma prensipleri, eriyik haldeki alaşımın iyi termal iletkenliğe sahip soğutulmuş bir yüzeye düşürülerek, eriyikten hızlıca ısı transfer edilmesi esasına dayanır. Eriyikten ısı transfer etme hızı 10^6 K/s civarında olursa eriyik aniden sıvı halden katı hale geçer. Hızlı katılaşmada dendritik katılaşan alaşımaların mikro yapısı, soğuma hızının bir fonksiyonudur [9].

1.2. Çekirdeklenme

Bir sıvı, erime sıcaklığından aşağıya soğutulduğunda katılaşma için sürücü kuvvet mevcut olmasına rağmen katılaşma anında başlamaz [10]. Bunun sebebi, sıvı içerisinde “çekirdek” olarak adlandırılan küçük katı parçacıkların oluşumu ile katı-sıvı dönüşümünün başlamasıdır. Çekirdek oluşurken, katı ve sıvı faz arasında bir yüzey meydana gelir ve bu yüzey oluşumu için ilave enerji gereksinimi ortaya çıkar. Bu

arayüzey enerjisi küçük çekirdeklerin oluşumu için engel teşkil eder. Çekirdeklenme katılaştırmanın başlangıç aşamasını oluşturur. Katılaştırmanın gerçekleşebilmesi için sıvı sıcaklığının katılma sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar alt soğuması gerekir. Yeterli alt soğumanın karşılandığı durumda malzemenin kendiliğinden katılması beklenir [3]. Kalıp duvarları, kirlilikler, yabancı maddeler gibi çekirdeklenmeyi teşvik edici unsurlar alt soğumanın düşük olması durumunda da katılma sürecini başlatırlar [1].

1.2.1. Homojen Çekirdeklenme

Bir katı eriyiğinin kendi sıvı eriyiği içindeki yabancı malzemelerin yardımı olmaksızın meydana gelmesi olayına homojen çekirdeklenme denir. Çok küçük taneciklerin toplam serbest enerjisine yüzey enerjisi katkısının oldukça büyük olması sebebiyle homojen çekirdeklenme büyük bir itici güç ister. Bir sıvıyı ΔT kadar aşırı soğuttuğumuzda kritik halde bulunan küresel bir taneciğin “ r^* ” yarıçapı,

$$r^* = \frac{2 \cdot \sigma \cdot T_m \cdot V_s}{\Delta H \cdot \Delta T}$$

şeklinde hesaplanır. Burada,

r^* : Kritik çekirdek yarıçapı

σ : Birim yüzey alanı başına düşen serbest enerji artırımını

T_m : Çözünen metalin ergime sıcaklığı

V_s : Molar hacmi

ΔH : Entalpi

ΔT : Sıvıdaki aşırı soğumadır.

Sıcaklık azaldıkça, sıvı metal içinde belirli sayıda atom bir araya gelip küçük atom demetçikleri oluştururlar. Bunlar tekrar dağılıp sıvı içinde ergirler. Bu atom demetçiklerine embriyon adı verilir. Embriyonlar, sıvı içinde tekrar ergimeyecek kadar büyük bir boyuta eriştiklerinde çekirdek adını alırlar. Yani,

$r < r^*$ Gelişemeyen çekirdek

$r \geq r^*$ Gelişebilir çekirdek

demektir. Zira doğada kendiliğinden gelişen tüm olaylarda serbest enerjinin her zaman daha düşük bir değer olması gerektiğinden $r < r^*$ olan çekirdek gelişmeyip dağılacaktır.

Çünkü doğada kendiliğinden oluşan olayların akış yönü ortaya çıkacak yeni fazın daha düşük serbest enerjili olacak şekilde gelişir. Buna karşılık boyutları $r > r^*$ olan tüm atom birikimlerinin ise gelişerek taneye doğru büyümeleri serbest enerjilerinde bir azalışı gerektiğinden bu olay gerçekleşebilir. Dolayısıyla bu çekirdek yaşayabilir, gelişebilir, taneleşebilir bir çekirdek durumuna gelir [7].

Homojen çekirdeklenmeyi, fazların serbest enerjileri ve sıvı-katı fazlar arasındaki dönüşümlerin nedenleri yönünden incelediğimizde, katı fazın en düşük iç enerjiye sıvı faza göre en düşük entropiye sahip olduğunu dikkate almak gerekir. Denge sıcaklığında iki faz bir arada bulunur. Sıvı ve katı fazların serbest enerjileri birbirine eşittir. Bundan dolayı $G_{\text{sıvı}} = G_{\text{katı}}$ şartı yazılabilir [3,11,12].

Homojen çekirdeklenmede, katı çekirdek sıvı içerisinde safsızlıkla ya da herhangi bir yüzeyle temas olmadan gerçekleşir. Küresel bir çekirdeğin oluşumu için serbest enerji değişimi, hacim ve yüzey serbest enerjilerinin toplamı şeklinde, yani

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \gamma_{KS} \quad (1.1)$$

$$\Delta G_v = \frac{L_v \Delta T}{T_m} \quad (1.2)$$

formunda yazılabilir ki burada ΔG_v denklem (1.1) ile verilen hacim serbest enerjisinin değeri, sıcaklığa bağlıdır ve sistemin sıcaklığının erime sıcaklığının altında olması durumunda negatiftir. Diğer taraftan, yüzey enerjisi γ_{KS} 'nin değeri her zaman pozitiftir. Sıvının aşırı soğumuş olması, ΔG 'nin değerinde bir maksimuma ulaşmasına neden olur. Bu maksimum değer aktivasyon enerjisi olarak kabul edilir ve bir kristal çekirdek oluşturmak için kullanılır. Bu maksimum değer,

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0 \quad (1.3)$$

bağıntısı yardımı ile belirlenir. Dolayısıyla çekirdeklenme için kritik yarıçap ve aktivasyon enerjisi :

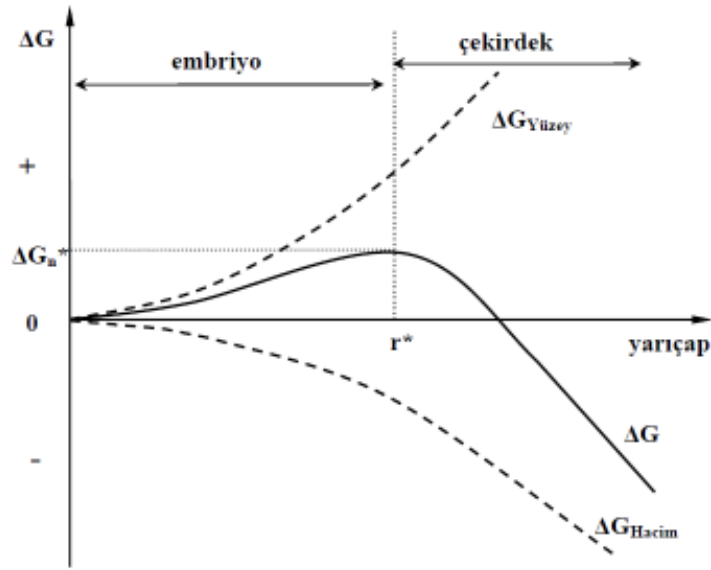
$$r^* = \frac{2\gamma_{KS}}{\Delta G_v} = \left(\frac{2\gamma_{KS} T_m}{L_v} \right) \frac{1}{\Delta T} \quad (1.4)$$

ve

$$\Delta G_n^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3\Delta G_v^2} = \left(\frac{16\pi\gamma_{KS}^3 T_m^2}{3L_v^2} \right) \frac{1}{(\Delta T)^2} \quad (1.5)$$

şeklinde bulunur [13]. ΔG_n^* 'in değeri, ΔT altsoğumanın artması ile azalır.

Denkelem 1.1 Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Katı-svı arayüzey serbest enerjisi r^2 ile artarken hacim serbest enerjisi r^3 ile azaldığından küçük katı tanenin oluşumu genellikle serbest enerjide artışa neden olur. Serbest enerjinin maksimum değerinde (ΔG_n^*) katı kürenin yarıçapı r^* olur. Eğer $r < r^*$ ise sistem serbest enerjisini katının erimesi ile azaltır, buna



Şekil 1.3. Aşırı soğumuş sıvıda r yarıçapındaki kürenin homojen çekirdeklenmesinde serbest enerji değişimi [14].

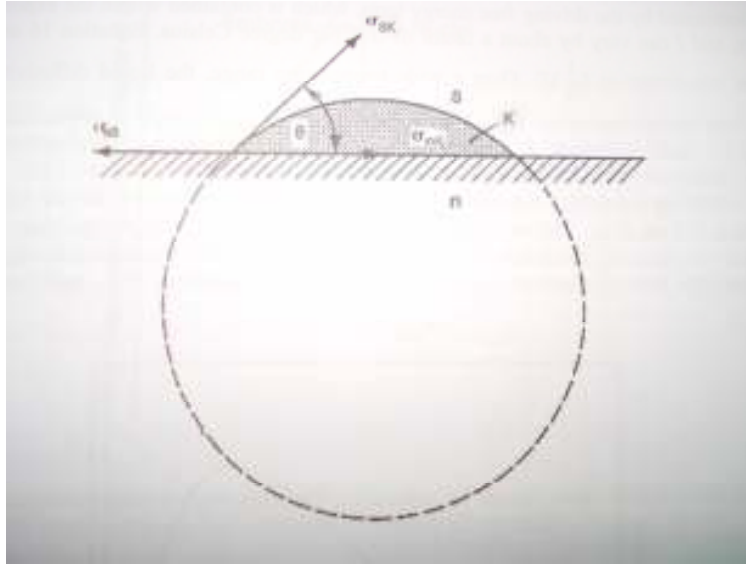
karşın $r > r^*$ ise katı büyürken sistemin serbest enerjisi düşer. Yarıçapı $r < r^*$ olan kararsız parçacıklar küme ya da embriyo, $r > r^*$ olan kararlı parçacıklar çekirdek olarak bilinir, burada r^* 'ye kritik çekirdek yarıçapı denir. $r=r^*$ iken $d\Delta G=0$ olacağından kritik çekirdek çevresindeki sıvı ile (kararsız) dengede olacaktır.

1.2.2. Heterojen Çekirdeklenme

Dökümlerin çoğunluğu, heterojen çekirdeklenme mekanizması ile katılaşır. Heterojen çekirdeklenme için kullanılan teori Turnbull tarafından geliştirilmiştir. Bu teoriye göre yeni bir faz, üzerinde büyüyebileceği yabancı bir parçacık bulabilirse bu parçacığın yarıçapına adapte olarak serbest enerjisini düşürebilir. Yeni faz, kalıp yüzeylerinde veya eriyik içindeki safsızlıkların katı yüzeylerinde çekirdeklenebilir [3]. Heterojen çekirdeklenmede, sıvı içerisinde bulunan safsızlıklar ve kalıp duvarı çekirdeklenme için katalizör görevi yaparak çekirdeklenme için kritik enerji engeli ΔG_n^* 'yi azaltır. Heterojen çekirdeklenmenin gerçekleştiği yüzey ve kristal çekirdek arasındaki ıslatma (temas) açısı θ 'yı dikkate alarak, enerji engelinde bir azalma görürüz [13].

$$\Delta G_{het}^* = \Delta G_{hom}^* f(\theta) = \Delta G_{hom}^* \left[\frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} \right] \quad (1.6)$$

Burada $f(\theta)$ katalizör etkisinin bir ölçüsü olup değeri 0 ile 1 arasında değişir. Denklem 1.5'de görüldüğü gibi heterojen çekirdeklenme yerlerinin olması, çekirdeklenme engelini azaltır ve heterojen çekirdeklenme enerji engeli, homojen çekirdeklenme enerji engelinden $f(\theta)$ kadar daha az olur. Heterojen çekirdeklenmenin şematik gösterimi Şekil 1.4'de verilmiştir.



Şekil 1.4. Arayüzey enerjisi, σ , düzlemsel çekirdek yüzeyi (n), küresel katı (K), ve sıvı (S) bölgeleri arasındaki ilişkiler. Arayüzey bölgeleri SK (sıvı-katı), nS (çekirdek-sıvı), ve nK (çekirdek-katı) indisleriyle gösterilmiştir.

Heterojen çekirdeklenme sırasında serbest enerji değişimi,

$$\Delta G(r)_{het} = V_{KC} \Delta G_V + A_{KS} \sigma_{KS} + A_{nK} \sigma_{nS} - A_{nS} \sigma_{nS} \quad (1.7)$$

ile verilir. Burada V_{SC} küresel uç hacmi, A_{KS} , A_{nK} ve A_{nS} sırasıyla katı-sıvı, çekirdek-katı, ve çekirdek-sıvı ara yüzeysel bölgelerdir [15].

Hacim ve uygun ara yüzeysel bölgeler Şekil 1.4'ün geometrisine göre ifade edildiğinde, heterojen çekirdeklenme için

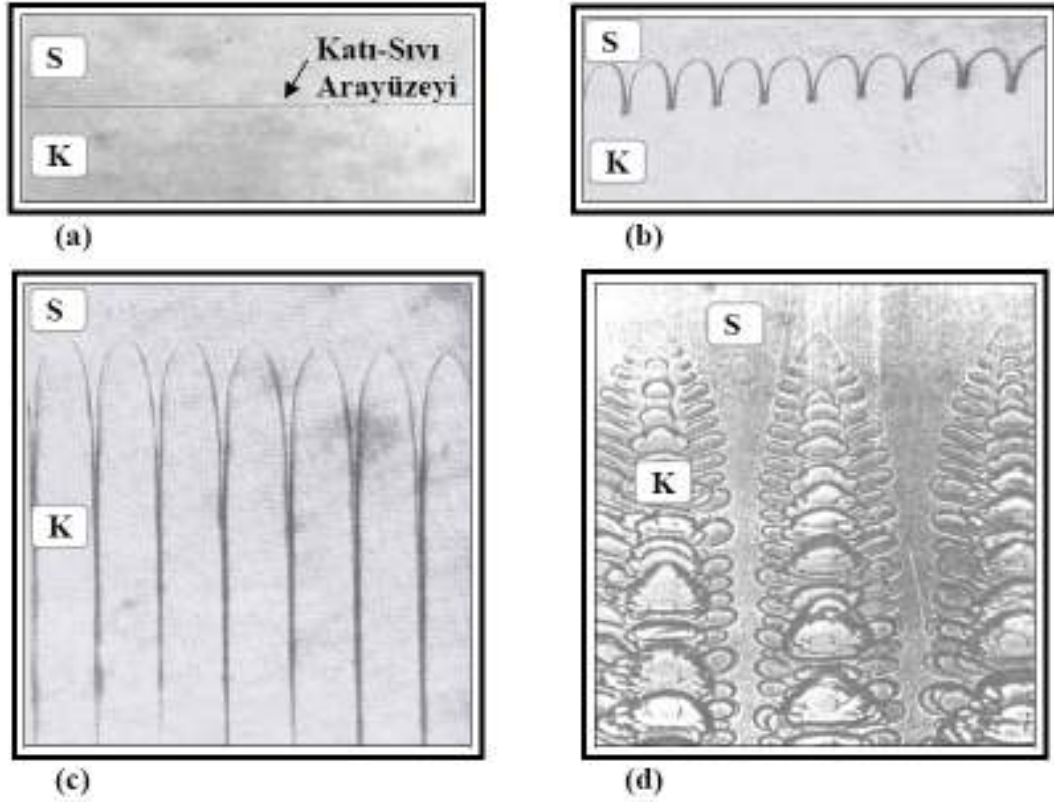
$$\Delta G_{cr} ; \Delta G_{cr}(het) = \frac{16\pi\sigma_{LS}^3}{3\Delta_V^2} \left[\frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} \right] = \Delta G_{cr}(\text{hom})[f(\theta)]$$

Şeklinde olur. Öyleki heterojen çekirdeklenme sırasında homojen çekirdeklenme için $f(\theta)$, şekil faktörü, tarafından değiştirilir. θ değerinin 0° 'den 180° 'ye değişmesinde $f(\theta)$ veya $[\Delta G_{cr}(het)/\Delta G_{cr}(\text{hom})]$ değerleri 0'dan 1.0'a değişir.

1.3. Alaşımların Katılaştırılması

Katılaştırma yapılarına göre alaşımların (organik, metalik, kompozit vs.) katılaşmasını,

- a-) Düzlemsel cephede katılaştırma,
 - b-) Hücrel katılaştırma,
 - c-) Dendritik katılaştırma,
- olmak üzere üç kısımda inceleyebiliriz.



Şekil 1.5. Ara yüzeyin (a) Düzlemsel [16], (b) Hücresel [17], (c) Hücresel-dendritik [17] (d) Dendritik [18] Büyüme şekilleri, (S: sıvı faz, K: katı faz).

1.3.1. Düzlemsel Cephede Katılaştırma

Dengesiz katılaştırma işleminde oluşan katılaştırma mikro yapılarının en önemli iki yanı, farklı fazların oluşumu ve çözünen segregasyon oluşumudur. Bu iki yapıyı ara yüzeydeki sıcaklık ve kompozisyon koşulları belirler. Ara yüzeyin sıcaklığı genellikle denge erime sıcaklığından düşüktür ve ara yüzeyde katı ve sıvının kompozisyonu faz diyagramı ve düzlemsel olmayan ara yüzey için Gibbs-Thomson denklemi ile bulunur [2]. Katılaştırma dengeden çok uzakta gerçekleşmesine rağmen, ara yüzeyde katı-sıvı arasındaki bölgesel dengeye, düşük hızlarda katılan çoğu metalik sistemlerde yaklaşılr. Düzlemsel ara yüzeyde katı ve sıvının denge kompozisyonları oranı,

$$k = \frac{C_K}{C_S} \quad (1.8)$$

çözünen dağılım sabiti k olarak adlandırılır. Kararlı büyüme koşulları altında, ara yüzeyin hızı dışarıdan uygulanan hıza eşitse ve sıvıda konveksiyon yoksa ara yüzeyde sıcaklık ve kompozisyon sabittir. Ara yüzeyde sıcaklık ve kompozisyonun kesin değerleri V büyüme hızı ve G sıcaklık gradyenti gibi işlem parametrelerine ve katı-sıvı ara yüzeyinin yapısına bağlıdır.

Düzlemsel ara yüzeyde büyüme, sadece doğrusal katılma koşulları altında oluşur. Sıvıda konveksiyon olmaksızın, başlangıç ve bitiş kısa geçiş bölgeleri haricinde katının kompozisyonu sabit olur [19]. Numunenin çoğunda katının kompozisyonu homojen olduğundan, düzlemsel cephede katılaştırma oldukça faydalıdır. Düzlemsel cephede büyümenin, sadece düşük hızlarda ve yüksek sıcaklık gradyenti koşulları altında olduğu gözlemlenmiştir.

1.3.2. Hücresel Katılma

Katı-sıvı ara yüzeyi düz olarak ilerleyen bir katılma modelinde, düz ara yüzeyin bozularak dalgalanması halinde ara yüzeyde meydana gelen çıkıntılı büyümesiyle oluşan katılma hücresel tipte katılma denir. Burada etkin olan sıvı içerisindeki sıcaklık gradyenti (G_s) büyüme hızı V alaşım bileşimi C_0 'dır. Hücresel tipte katılma, düzlemsel ara yüzey vererek katılmanın aksine belli bir sıcaklık aralığında olur ve düz ara yüzeyde gren sınırları varsa bunlar yüzeyin bozulmaya başladığı yerleri temsil etmektedir.

Hücresel tipte katılaşmada düzenli hücre mesafeleri büyüme hızı arttıkça da azalmaktadır. Fakat bu azalış sürekli değildir. Büyüme hızı artışlarında hücrelerin parçalanma ve bölünme ihtimalleri de artar. Eğer hücreler, büyüme esnasında bölünmediği takdirde, muhtemel iki mekanizma hücre boyutunun değişmesine sebep olur. Bunlar,

- 1) Hatalarda ilave hücrelerin oluşumu ve hücre büyüklüğünün yeniden düzene girmesi
- 2) Küçük hücrelerin büyümesi

şeklinindedir. Hücresel katılaşmada, hücre oluşumu, yapısal aşırı soğumayı çok düşük bir değere indirecek biçimde kendisi düzenlenmektedir. Bu ayarlamayı yapan mekanizma hücre uçlarındaki büyüme olayıdır. Minimum yapısal aşırı soğuma değeri muhtemel

katı-sıvı ara yüzeyi boyunca eğrilik yarıçapa etkisiyle erime noktasında meydana gelecek farklılıklara aynı derecede olmaktadır. Fakat hücre katılaşmada hücre açılarının eğrilik çapının, açılar sıcaklığına pek büyük bir etkisi yoktur [7].

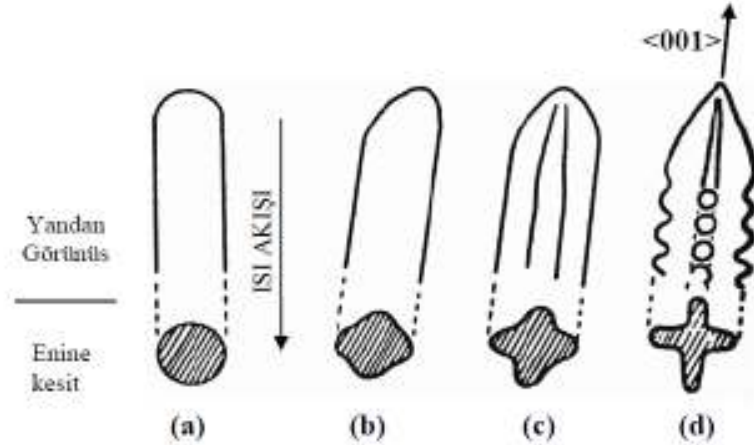
Bir alaşım, düzlemsel ara yüzey kararlılık eşiğinin ötesinde doğrusal katılaştırılırsa hücre katılaşma ara yüzey oluşur [19]. Eşik koşullarının hemen yukarısında oluşan hücre yapısının iki önemli özelliği vardır: ilki, hücrenin boyu oldukça küçüktür ve büyüklüğünün derecesi hücreler arası mesafeyle aynıdır, ikincisi, hücrenin uç bölgesi geniştir ve hücre daha büyük bir uç yarıçapa sahiptir, (Şekil 1.5b). Böylece, ara yüzey önünde çözünen birikir ve bir kısmı da yanal yönde difüze olur. Büyüme koşulları düzlemsel ara yüzey kararlılık koşullarının biraz daha ötesinde ise, hücre katılaşma-dendritik yapı oluşur (Şekil 1.5c). Bu durumda, uç yarıçapı biraz daha keskin olur ve dendrit ucunun şekli parabol benzer. Hücre katılaşma-dendritik terimi bu ara yüzey yapısını tanımlamakta kullanılır. Hücre uç yarıçapı keskinleştikçe yanal yönde daha fazla çözünen taşınır, böylece hücreler arasındaki bölge çözünen daha zengin olur. Bu yanal çözünen taşınması daha geniş iki faz bölgesi oluşturur. Böylece hücre katılaşma-dendritik yapı daha büyük genlik-hücreler arası mesafe oranı ile karakterize edilir. Yanal çözünen taşınmasındaki bu artış aynı zamanda hücre katılaşma-dendritik yapıdaki birinci kollar arası mesafesinin hücre katılaşma-dendritik yapıya göre daha büyük olmasına neden olur.

1.3.3. Dendritik Katılaşma

“Dendrite” kelimesi Yunanca kökenli olup dallanmış yapı anlamına gelir [20, 21]. Alaşımların yapısı, sonlu bir hızda katılaşmalarında halinde ve yapısal aşırı soğuma önlenmediği müddetçe, genellikle sıcaklık gradyanının artırılması ile önlenir ve dendritiktir. Gerçekte, yapısal aşırı soğumanın normal bir katılaşmada önlenmesi pratik olmadığından hemen hemen bütün alaşımlar bu yapıda oluşur. Bu nedenle de dendritik büyüme karakteristiklerini anlamak amacıyla, kontrollü şartlar altında çok çeşitli teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Eğer genel bir tarif yapılacak olunursa, dendritler sabit bileşim eğrileridir denilebilir ve her dendritin yaklaşık ısı akışı yönünde büyüyen parçasına, dendrit birinci kolu, buna dik olarak büyüyen parçasına dendrit ikinci kolu denir. Bu kollara ilaveten daha yüksek düzeyden üçüncü ve dördüncü derece kollarda meydana gelmektedir [7].

Dinamik süreçte büyüyen dendritler oldukça anlaşılması zor bir yapıya sahiptir. Bu karmaşıklık birinci, ikinci ve daha yüksek dereceden kolların varlığından ileri gelmektedir. Büyüme koşulları değiştirilerek, bu karmaşık yapının nasıl katılaştığı ve nasıl çeşitli dendritik mikroyapıların oluştuğu anlaşılabilir [22]. Dendritik yapılar genellikle katılma hızı V 'nin kritik katılma hızı V_C 'den çok çok büyük olması durumunda oluşur. Alaşımda çözünen miktarının artması V_C hızını düşürür, dolayısı ile $V \gg V_C$ olur ve katılaştırılarak üretilen çoğu ticari malzemede dendritik yapı gözlemlenir [19, 23].

Doğrusal katılaştırılan alaşımlarda tanelerin tercihli yönde oluşması, dendritlerin belirli kristalografik doğrultularda oluştuğunu gösterir. Kübik metallerde, dendritin birinci ve ikinci kolların tercihli büyüme yönü $\langle 001 \rangle$ 'dir.



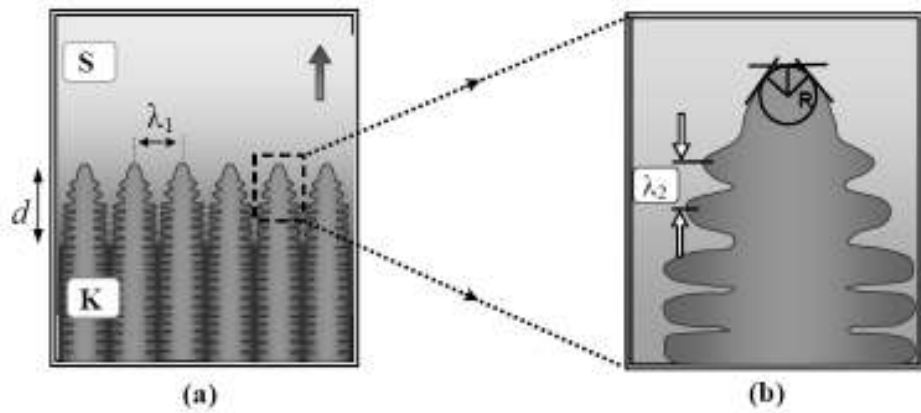
Şekil 1.6. Katılma hızı artarken katı-sıvı arayüzey büyüme yapısının hüreselden dendritik yapıya geçişi, $V_a < V_b < V_c < V_d$. (a) Düşük hızlarda büyüyen düzgün hücre, (b) $\langle 001 \rangle$ dendrit yöneliminde büyüyen hüresel-dendrit, (c) Köşeli hücre, (d) Yanal yönde ikinci kollar bulunduran dendrit [24].

Dendritlerin tercihli büyüme yönü, ara yüzey kinetik anisotropisinin varlığından dolayı oluşur. Buna karşın, hüresel yapılar genellikle ısı akışı yönünde büyürler. Hüresel-dendritik yapılar ise ısı akışı ile $\langle 001 \rangle$ yönü arasındaki bölgede büyürler (Şekil 1.6). Doğrusal katılaştırma yönteminde tanelerin tercihli yönde oluşması demir alaşımlarından mıknatıs üretiminde kullanılır, çünkü manyetik indüksiyon $\langle 001 \rangle$ yönünde daha fazladır [2]. Doğrusal katılaştıran dendritik yapıdaki tek kristalde,

dendritlerin tümü aynı yönelime sahiptir ve bu da malzemenin yüksek sıcaklık özelliklerinin iyileşmesini sağlar [20].

1.4. Kontrollü Doğrusal Katılaştırma

Kontrollü doğrusal katılaştırmada katılaştırma hızı (V), sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırılan malzemenin kompozisyonu (C_0) kontrol edilebilmektedir. V , G , C_0 parametreleri “katılaştırma işlem parametreleri” olarak bilinir. Alaşımın doğrusal katılaştırılmasında katı-sıvı ara yüzeyinin yapısı katılaştırma işlem parametrelerine bağlı olarak düzlemsel, hücresel ya da dendrit olabilir. Sabit G ve C_0 ’da artan V ile ara yüzeyin yapısı düzlemsel \rightarrow hücresel \rightarrow dendritik geçişi görülür [2]. Metalik alaşımların katılaştırılmasında en çok dendritik yapılar görülür. Dendritik yapılarda arayüzey alanının kapsadığı hacime oranı, düzlemsel ya da hücresel yapılara göre daha büyüktür ve bu da ara yüzeyde ısı ve kütle taşınımını daha da kolaylaştırır [25]. Dendritik yapıların oluşumu teorik olarak ısı ve kütle difüzyonu ve kılcallık etkisi ile açıklanmaktadır [26]. Ayrıca katı-sıvı arayüzey enerjisi anisotropisinin de dendritik yapılarda önemli olduğu görülmüştür [27-28]. Dendritik yapılar, bir dendritin dendrit ucu mikroyapı parametreleri (dendrit uç yarıçapı R ve ikinci kollar arası mesafe λ_2) ve çevresel dendrit mikroyapı parametreleri (birinci kollar arası mesafe λ_1 ve yumuşak bölge derinliği d) ile tanımlanırlar [29]. Katı-sıvı arayüzeyinde dendritik yapının şematik gösterimi Şekil 1.7 (a)’da verilmiştir.



Şekil 1.7 (a) Birinci kollar arası mesafe λ_1 ve yumuşak bölge derinliği d ; (b) dendrit uç yarıçapı R ve ikinci kollar arası mesafe λ_2 'nin şematik gösterimi. (S: quench edilmiş (ani soğutulmuş) sıvı faz, K: katı faz).

Doğrusal katılaştırma işleminde, katılaştırma için gerekli olan ısı çekme koşulu kontrollü bir şekilde elde edilebilir.

1.5. Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde çalışmalarımızın temelini oluşturan katılaştırma işlemi ve katılaştırma ile ilgili temel kavramlardan bahsedilerek katılaştırma işleminin faydalarına kısaca değinildi.

2. BÖLÜM

KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde; yapılan çalışmalarla ilgili teorik ve deneysel çalışmalar ele alınacaktır. Dendritik katılaştırma ile ilgili literatürde yer alan, katılaştırma işlem parametreleri (V :katılaştırma hızı, C_0 :alaşım kompozisyonu, G :sıcaklık gradyenti) ile dendritik mikro yapı parametrelerinin (R : dendrit uç yarıçapı, λ_1 birinci kollar arası mesafe ve λ_2 : ikinci kollar arası mesafe) ilişkisini inceleyen çalışmalardan bahsedilecektir.

Katılaştırma işlem parametreleri ile dendritik mikro yapı parametrelerinin ilişkisini inceleyen çeşitli teorik yaklaşımlar yapılmıştır. Dendrit büyüme probleminin analitik çözümünde, genellikle mikro yapı parametreleri birbirinden bağımsız olarak ele alınmıştır [22]. Örneğin, yan kolların varlığının dendrit uç yarıçapını ya da dendrit ucuna yakın bölgeleri etkilemediği kabul edilerek dendrit uç yarıçapı, yan kol bulundurmeyen levha ya da iğne şeklindeki kristalde incelenmiştir. Ayrıca aynı varsayımdan yola çıkılarak izole edilmiş dendrit modeli dikkate alınmıştır [22].

Ancak, mevcut teori veya deneysel bulguların çoğu sadece belli durum veya sınırlı sistemler için geçerlidir. Örneğin hamurumsu bölgede hala dendrit birinci ve ikinci kollar arası mesafenin nasıl hesaplanacağı net değildir. Bu sadece katılmış malzemelerde mikro yapıları tahmin etmek için değil aynı zamanda katılaştırma sırasında hamurumsu bölgenin geçirgenliğini belirlemek ve makro segregasyon, gözenek oluşumu gibi olayları modellemek içinde oldukça önemlidir [30].

2.1. Katılaştırma İşlem Parametrelerinin Dendritik Mikroyapı Parametrelerine Etkisi: Teorik Modeller

2.1.1. Katılaştırma İşlem Parametrelerinin Dendrit Uç Yarıçapına Etkisi

Dendrit uç yarıçapı, alaşımın katılaştırılmasından sonra oluşan yapılarda alaşımın fiziksel özellikleri açısından her ne kadar önemli olmasa da, malzemenin fiziksel özelliklerini doğrudan etkileyen mikroyapı parametrelerinden birinci ve ikinci kollar arası mesafeyi kontrol edici özelliği, dendrit uç yarıçapını diğer mikroyapı parametreleri içerisinde en önemli uzunluk skalası yapar. Dendrit uç yarıçapı ile ilgili teoriler geliştirilirken aşağıdaki şu deneysel gözlemler [31] dikkate alınmıştır:

- Kararlı hal büyümesi sırasında dendrit uç yarıçapının sabit kalması,
- Verilen V , G , C_0 değerlerinde tek bir dendrit uç yarıçapının olması,
- Kararlı hal büyümesinde dendrit uç bölgesinin şekil olarak parabole çok yakın olması.

Langer ve Müller-Krumbhaar [32], dendrit uç bölgesine lineer kararlılık analizini uygulayarak marjinal olarak kararlı dendrit uç yarıçapı R ile V ve ΔT_0 arasındaki ilişkiyi

$$VR^2 = \Gamma D / \sigma^* k \Delta T_0 \quad (2.1)$$

şeklinde elde etmiştir. Burada, aşırı soğuma $\Delta T_0 = m C_0 (k-1)/k$ ve σ^* sabit olup değeri yaklaşık 0,025'ye eşittir. Yukarıdaki denklem marjinal kararlılık teorisinin temelini oluşturur ve verilen bir sistemde VR^2 'nin belirli kompozisyon ve sıcaklık gradyentinde sabit değer alması beklenir.

Hunt [33], çözünen difüzyonu, kılcılık etkisi, minimum aşırı soğuma kriterini göz önünde bulundurarak ve dendrit ucunun şeklini parabole benzeterek elde etmiştir. Hunt modelinde R ile V , G , C_0 arasındaki ilişki,

$$R = [2\Gamma D / m(k-1)]^{0.5} C_0^{-0.5} V^{-0.5} \quad (2.2)$$

olarak verilmektedir. Burada m , likudus eğimi; k , çözünen dağılım sabiti; D , sıvı içerisinde çözünen difüzyon sabiti ve Γ , Gibbs-Thomson sabitidir.

Kurz-Fisher [34], marjinal kararlılık kriterini kullanarak ve dendrit ucunun şeklini elipsoide benzeterek R ile V , G , C_0 arasındaki ilişkiyi

$$R = 2\pi [\Gamma D / m(k-1)]^{0.5} C_0^{-0.5} V^{-0.5} \quad (2.3)$$

olarak elde etmiştir.

Trivedi [35], Hunt modelini marjinal kararlılık kriterini kullanarak modifiye etmiştir. Trivedi modelinde R ile V , G , C_0 arasındaki ilişki

$$R = [2\Gamma DL / m(k-1)]^{0.5} C_0^{-0.5} V^{-0.5} \quad (2.4)$$

olarak verilmektedir. Burada L , sabiti küresel harmoniklere bağlı olup kübik malzemeler için değeri 28'dir [36].

2.1.2. Katılaştırma İşlem Parametrelerinin Birinci Kollar Arası Mesafeye Etkisi

Birinci kollar arası mesafeyi (λ_1) katılaştırma işlem parametrelerinin fonksiyonu olarak veren ilk teorik modeli Hunt [37], minimum aşırı soğuma kriteri ile kütle dengesi koşulunu kullanılarak ve dendrit ucunun şeklini parabole benzeterek elde etmiştir. Hunt modelinde λ_1 ile V , G , C_0 arasındaki ilişki

$$\lambda_1 = 2.83 [m(k-1)D\Gamma]^{0.25} C_0^{0.25} V^{-0.25} G^{-0.5} \quad (2.5)$$

ile verilir.

Kurz ve Fisher [34] tarafından ise birinci kollar arası mesafe ile ilgili daha basit model marjinal kararlılık kriterini kullanılarak ve dendrit ucu şekil olarak elipsoide benzetilerek elde edilmiştir. Kurz ve Fisher modelinde λ_1 ile C_0 , V , G arasındaki bağıntı

$$\lambda_1 = 4.3 [m(k-1)D\Gamma / k^2]^{0.25} C_0^{0.25} V^{-0.25} G^{-0.5} \quad (2.6)$$

olarak verilmektedir.

Trivedi [35], Hunt modelini marjinal kararlılık kriterini kullanarak modifiye etmiştir.

Trivedi modelinde λ_1 ile V , G , C_0 arasındaki ilişki,

$$\lambda_1 = 2.83[m(k-1)D\Gamma L]^{0.25} C_0^{0.25} V^{-0.25} G^{-0.5} \quad (2.7)$$

olarak verilmektedir. Burada L harmonik pertürbasyonlara bağlı bir sabittir.

Laxmanan [38] minimum aşırı soğuma kriterini kullanarak λ_1 ile V , G , C_0 arasındaki matematiksel ifadeyi

$$\lambda_1 = 5.66[m(k-1)D\Gamma]^{0.25} C_0^{0.25} V^{-0.25} G^{-0.5}. \quad (2.8)$$

elde etmiştir.

Sıralı dendritlerin kararlılığı Hunt ve Lu [39] tarafından incelenmiş ve nümerik hesaplamalarda verilen deneysel koşullarda birinci kollar arası mesafesinin belirli bir aralıkta kararlı olduğu bulunmuştur (Şekil 2.1). Birinci kollar arası mesafe kararlı değerden küçükse, dendritin elenmesi ile birinci kollar arası mesafe büyür (Şekil 2.1a). diğer taraftan, birinci kollar arası mesafe kararlı değerden büyükse, üçüncü kol uzayarak yeni bir dendrit oluşumu ile birinci kollar arası mesafe küçülür (Şekil 2.1c).

Bu iki limit arasındaki birinci kollar arası mesafe kararlıdır. Minimum aşırı soğuma ya da marjinal kararlılık gibi yaklaşımlara ihtiyaç duyulmadan bulunanan Hunt-Lu modeline göre, birinci kollar arası mesafe λ_1 ile V , G , C_0 arasındaki bağıntı,

$$\lambda_1 = 0.156(\Gamma k)^{a_d+0.4} D^{-a_d} \Delta T^{-a_d+0.2} (1-V_C/V)^{3/4} G^{-0.6} V^{a_d} \quad (2.9)$$

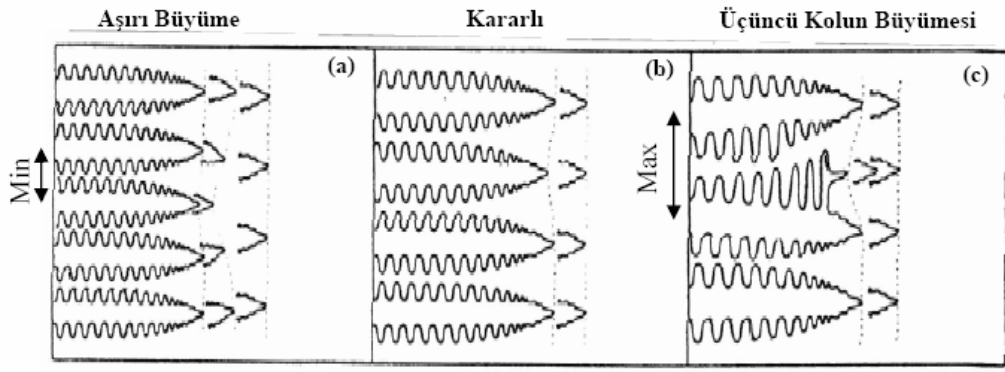
ile verilir. Burada $a_d = -1.131 - 0.1555 \log_{10} \left(\frac{G\Gamma k}{\Delta T_0^2} \right) - 0.7589 \times 10^{-2} \left[\log \left(\frac{G\Gamma k}{\Delta T_0^2} \right) \right]$

ve V_C , ara yüzeyin düzlemselliğinin bozulup hücre sel yapıya geçtiği kritik hız olup değeri

$V_C = GD / \Delta T_0$ ile verilir [40].

Birinci kollar arası mesafe ile ilgili bir diğer teorik model, deneysel sonuçlar kullanılarak kararlı-hal ısı akışı için Bouchard ve Kirkaldy [41] tarafından geliştirilmiştir. Bouchard ve Kirkaldy modelinde λ_1 ile V , G , C_0 arasındaki ilişki olarak verilmektedir. Burada a_1 , birinci kollar için kalibrasyon faktörü, $G_0 \varepsilon$, $600 \times 6 \text{ K cm}^{-1}$ değerine eşit karakteristik bir parametredir.

$$\lambda_1 = a_1 \left(\frac{16C_0^{1/2} G_0 \varepsilon \Gamma D}{(1-k)mGV} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$



Şekil 2.1. Birinci kollar arası mesafesinin ayarlanma mekanizması [39].

Ma ve Sahm [42] ikinci kolların varlığını da hesaba katarak λ_1 ile V , G , ΔT_0 arasındaki bağıntıyı analitik olarak,

$$\lambda_1 = 2\pi(kD\Gamma\Delta T_0)(1-V_c/V)^{3/4} G^{-1/2} V^{-1/4} \quad (2.11)$$

şeklinde elde etmiştir.

2.1.3. Katılaştırma İşlem Parametrelerinin İkinci Kollar Arası Mesafeye Etkisi

Doğrusal olarak katılaştırılan bir malzemede oluşan mikrosegregasyon yapısının periyodikliğini ikinci kollar arası mesafe λ_2 belirler [33]. Bu nedenle, ikinci kollar arası mesafe teknolojik açıdan dendritik katılaştırmada önemli parametrelerden biridir. İkinci kollar dendritin ucuna yakın bölgede başlar. Başlangıçta paraboloidin sinüsoidal

pertürbasyonu olarak belirir. Düzlemsel katı-sıvı arayüzeyin kararsız olmasındaki durum gibi, bu pertürbasyonlar hücre benzeri büyür, bazıları komşuları tarafından elenirken bazıları da birinci kola dik gerçək ikinci kolları oluşturur. İkinci kollar, boyu maksimum $\lambda_1/2$ olana dek büyür ve bu sırada bazıları birbirlerini elimine ederler. İkinci kolların difüzyon alanları komşu dendritlerin kollarının difüzyon alanı ile karşılaşınca büyümeyi durdurur ve kabalaşmaya başlarlar [43]. Kabalaşmanın sonucunda, daha kalın ve daha az kollu yapı oluşur. Dendrit ucuna en yakın λ_2 'nin değeri sabit olurken, $\lambda_2(t)$ uçtan uzaklaştıkça ya da zamanla büyür [19, 44].

Langer ve Müller-Krumbhaar [45], tekil pertürbasyon problemi içermeyen yaklaşık dendrit büyüme modelini kullanarak, dendrit ucuna en yakın ikinci kollar arası mesafe ile dendrit uç yarıçapı arasında sabit bir orantı katsayısı bulunduğunu göstermişlerdir. Ölçekleme kanunu olarak bilinen bu bağıntı

$$\lambda_2 / R = 2,1 \pm 0,03 \quad (2.12)$$

olarak elde edilmiştir.

Trivedi ve Somboonsuk [46] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, başlangıçta oluşan ikinci kollar arası mesafenin sıcaklık gradyentinden bağımsız olduğunu göstermiştir. Buna göre λ_2 sadece V ve C_0 'ın fonksiyonudur. Küçük Peclet sayılarında ölçekleme kanunu da kullanılarak λ_2 ile V , C_0 arasındaki ilişki,

$$\lambda_2 = (8\Gamma DL / kV\Delta T_0)^{1/2} \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir.

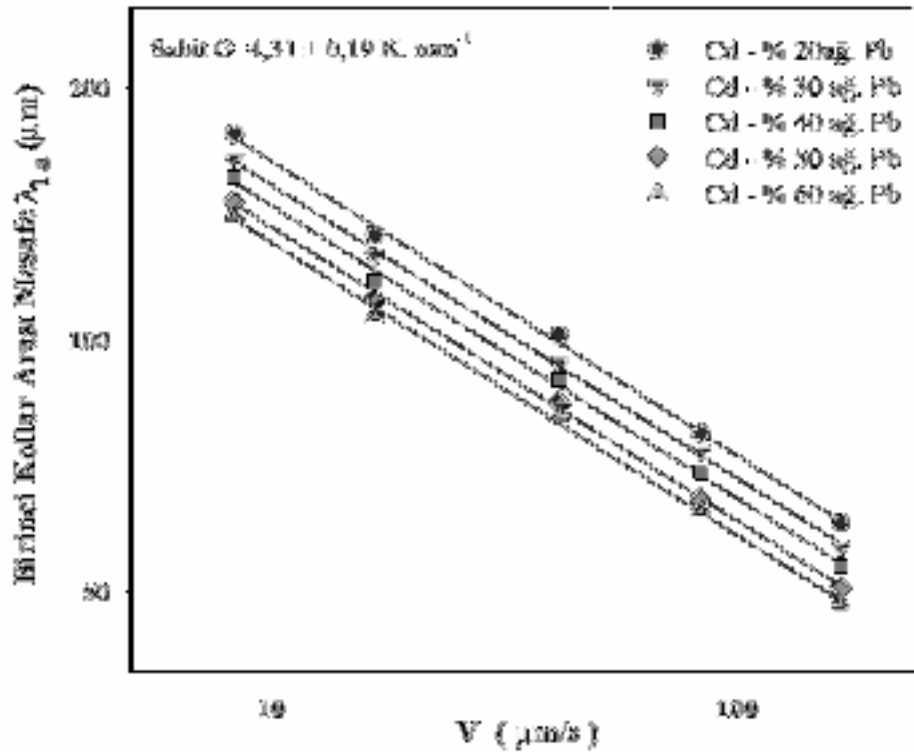
İkinci kollar arası mesafe ile ilgili bir diğer teorik model deneysel sonuçlar kullanılarak kararlı-hal ısı akışı için Bouchard ve Kirkaldy [41] tarafından geliştirilmiştir. Bouchard ve Kirkaldy modelinde λ_2 ile V , C_0 arasındaki ilişki,

$$\lambda_2 = 2\pi a_2 \left(\frac{4\sigma}{C_0(1-k)^2 \Delta H} \left(\frac{D}{V} \right)^2 \right)^{1/3} \quad (2.14)$$

olarak verilmektedir. Burada a_2 , ikinci kollar için kalibrasyon faktörü; σ , katı-sıvı arayüzey enerjisi ve ΔH , gizli erime ısısıdır.

2.2. Katılaşma İşlem Parametrelerinin Dendritik Mikroyapı Parametrelerine Etkisi: Deneysel Çalışmalar

Katılaştırma işlem parametreleri olarak tanımladığımız V , G , C_0 'dan herhangi ikisi sabit tutularak üçüncü parametre değiştirilirse, dendritik mikroyapıların değiştirilen bu parametreye göre nasıl değişeceği lineer regresyon analizinden deneysel olarak bulunabilir [47, 48, 49]. Şekil 2.2 'de Pb-Cd alaşımında λ_1 'in farklı C_0 'da V ile değişimi görülmektedir.



Şekil 2.2. Sabit G 'de doğrusal katılaştırılan Pb-Cd alaşımında λ_1 'in farklı C_0 'da V ile değişimi [50].

2.3. Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde katılaştırma işlem parametreleri ile dendritik mikro yapı parametreleri arasındaki ilişkileri inceleyen teorik ve deneysel çalışmalar kısaca tartışılmıştır.

3. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SİSTEMLERİ

Katılma ve erime, metal veya alaşımların kristal yapı ile kristal olmayan yapı arasındaki dönüşümdür. Kristal yapıda olan katılar erime sıcaklığının üstünde bir sıcaklıkta ısıtılırsa, kristal olmayan yapı olan sıvıya dönüşürler. Benzer şekilde bir sıvı katılma sıcaklığının altında soğutulursa katılma meydana gelir böylece sıvı, kristal yapıya dönüşür [50].

Katılma aynı zamanda bir faz dönüşüm olayıdır. “Katılma işlem parametreleri” olarak bilinen (V , G , C_0) kontrollü doğrusal katılamada birbirinden bağımsız ve hassas olarak kontrol edilebilir. Buna bağlı olarak katılma sonucu oluşan dendritik mikroyapı parametreleri (R , d , λ_1 , λ_2) ile katılma işlem parametreleri arasındaki ilişkiler kontrollü doğrusal katılma tekniği ile incelenebilmektedir. Bu bölümde Al-Zn ikili alaşımında katılma işlem parametreleri ile dendritik mikro yapı parametrelerinin ilişkisini incelemek üzere kurulan deney sistemleri tanıtılacaktır.

3.1. Al-Zn Alaşım Seçimi

Alaşım, bir metal elementin başka metaller ya da herhangi başka elementler ile homojen karışımıdır. Alaşımlar, uygulamaların gerektirdiği fiziksel özelliklere sahip malzemelerin üretilmesini sağlar. Yüksek sıcaklıklar, aşınma, kimyasal etkiler, metal yorgunluğu vb. gibi her türlü etkilere saf metallerin yetersiz kaldığı durumlarda, gerekli olan özellikleri sağlayan niteliklerde alaşımlar kullanılır. Al-Zn esaslı alaşımlar diğer malzemelere göre, pek çok üstünlüklere sahiptir.

Bu üstünlüklerin başında, ideal döküm, ısı işlem özelliğine ve düşük erime noktasına sahip olmaları, döküm sonrası az bir ilave işlem gerektirmeleri, özgün mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, alaşım elementlerinin kolay

ve ucuza temin edilebilmesi gelmektedir. Al ve alaşımları; hafifliği, iyi ısı ve elektrik iletkenliği ve korozyona karşı dayanıklılığı nedeniyle elektrik iletim hatları endüstrisi, gıda endüstrisi, kimya endüstrisi, otomotiv ve gemi endüstrisi, makine ve cihaz yapımı ile mimari ve inşaat yapımında geniş çapta bir kullanım alanına sahiptir. Katılaştıran malzemenin özelliklerini etkileyen mikroyapı parametrelerinin kontrolü, doğrusal katılaştırma yöntemiyle mümkündür. Alüminyuma çinko eklenmesi, artan Zn konsantrasyonu ve ara bileşimlerde aşırı dallanmış yapılar ile büyümenin <100>'dan <110>'a geçmesine neden olur [51]. Dendrit yönelimindeki bu değişme fcc Al-Zn alaşımında alüminyum katı-sıvı arayüzey enerjisinin, çinko konsantrasyonu arttıkça değişimi olarak açıklanır. Bu ise γ anizotropilerinin konsantrasyona bağımlılığından ileri gelir. Al yüzey merkezli kübik (fcc) yapıdadır çinko ise hekzagonal (hcp) kristal yapısına sahiptir, alüminyumdaki bu fcc yapı korunmak suretiyle alüminyum içerisine geniş miktarda (%94'e kadar) çinko eklenebilir. Katılaştırılarak üretilen malzemenin fiziksel ve mekaniksel özellikleri mikro yapı parametreleri (λ_1, λ_2, R)'ne bağlıdır. Bu çalışmada Al-Zn alaşımı, doğrusal katılaştırmada katılaştırma işlem parametreleri ile dendritik mikro yapı parametrelerinin ilişkilerinin incelenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Alüminyum (Al), Çinko (Zn) elementlerinin temel özellikleri.

Adı	Sembölü ve Birimi	Al	Zn
Atom numarası		13	30
Atomik ağırlık	M_w (g/mol)	26,98	65,38
Yoğunluk (katı)	$\rho(k)$ (g/cm ³)	2,70	7,14
Erime noktası	T_m (°C)	660,4	419,5
Kaynama noktası	T_e (°C)	2519	907
Kristal Yapısı		f.c.c*	c.p.h*

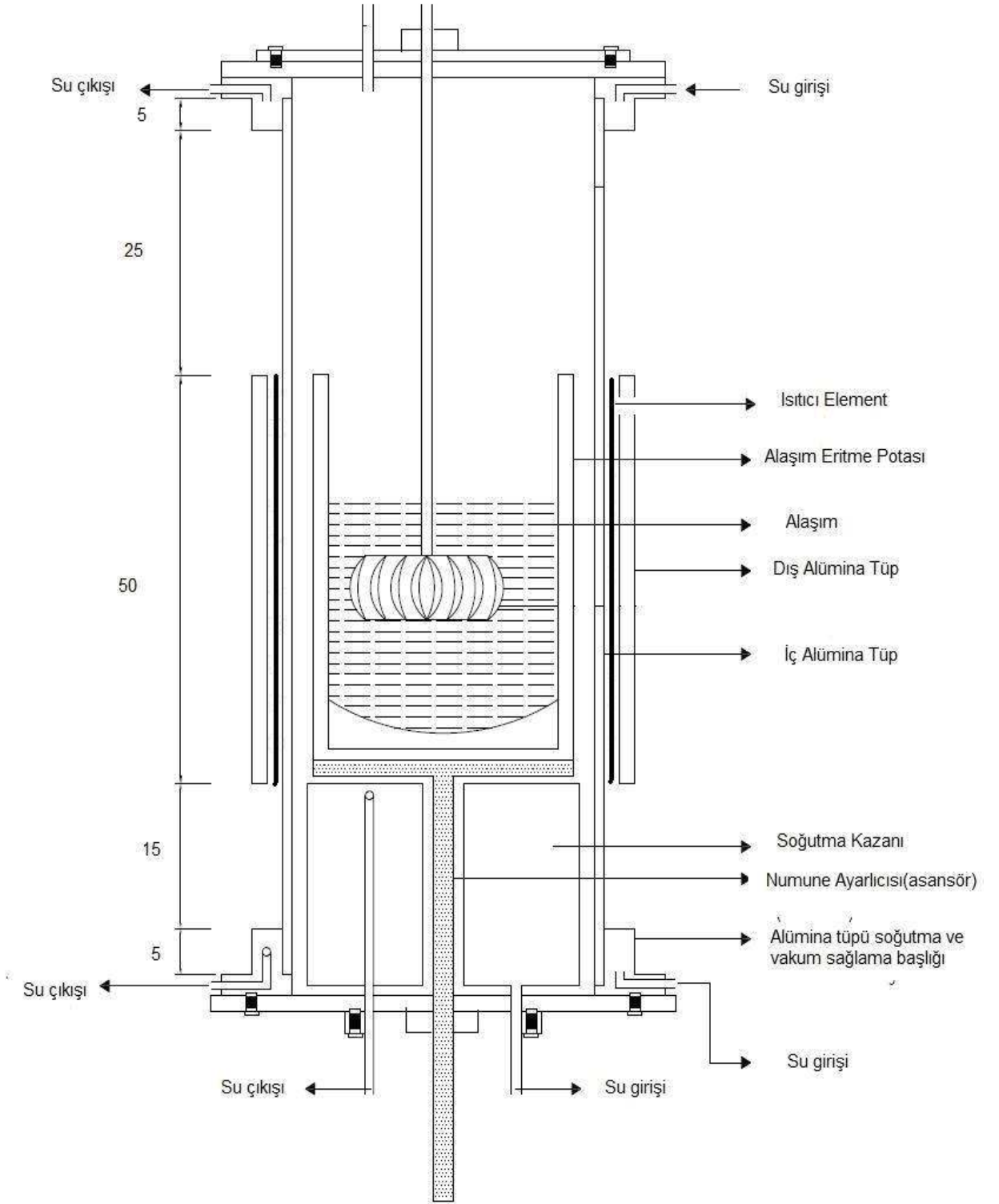
* f.c.c.:yüzey merkezli kübik , h.c.p.:sıkı yapı hekzagonal

3.2. Deneysel Sistem

Al-Zn ikili alaşımının doğrusal katılaştırılmasında vakumlu eritme-döküm fırını, sıcak döküm fırını, ve kontrollü doğrusal (Bridgman tipi) katılaştırma fırını olmak üzere üç ayrı fırın kullanılmıştır. Bu kesimde, deneylerde kullanılan bu fırınlar ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

3.2.1. Vakumlu Eritme-Döküm Fırını

Bu fırın alaşım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Vakumlu eritme-döküm fırını, iç içe geçmiş iki adet iki ucu açık alümina tüp, seramik ısıtıcılar (SiC tip rezistans), sıcaklık kontrol ünitesi, alümina tüpün alt ve üst kısımlarına yerleştirilen pirinç kaide ve kapaklar, sürücü sistem, vakum pompası, çelikten yapılmış soğutma kazanı, fırının dışarı ile ısı alış-verişini engellemek için kullanılan yalıtım malzemesi olan cam pamuğu ve ytonğ tuğlasından oluşmaktadır. Dıştaki ve içteki alümina tüplerin ebatları ise 80 mm x 90 mm x 500 mm ve 50 mm x 60 mm x 1000 mm olup her iki ucu da açıktır. Vakumlu eritme-döküm fırını 6 adet SiC tip rezistans ile ısıtılmakta olup, sıcaklık kontrolü 250 mm uzunluğa sahip ısıtıcı bölgenin ortasına yerleştirilen termal çift ve sıcaklık kontrolcüsü ile sağlanmaktadır. Seramik ısıtıcılar sayesinde vakumlu eritme-döküm fırını 1450°C 'ye kadar ısıtılabilir. Fırının sıcaklığı sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. İç alümina tüpün alt ve üst ucu, vakum tutması için zift ile pirinç kaidelere tutturulmuş ve ziftin erimemesi için pirinç kaidelerin içindeki haznenin içinden su devir daimi sağlanmıştır. Alt pirinç kapağa çelik su soğutma kazanı monte edilmiş ve alümina tüpün içerisine yerleştirilmiştir. Numune taşıyıcı tabla altına monte edilmiş çelik mil, su kazanının ortasından geçirilerek oluşturulan sürücü sistem sayesinde numunenin düşey doğrultuda 25cm yukarıya çıkıp inme hareket kabiliyeti sağlanmıştır. Al-Zn alaşımının eritilmesi vakumlu-eritme döküm fırınında yapılmış ancak döküm işlemi, sıcak döküm fırınında gerçekteştirilmiştir. Böylece vakumlu eritme-döküm fırınındaki sürücü sistem dikkate alınmamıştır. Vakulu eritme-döküm fırınıının iç yapısı ve fırının dış görünüşü sırasıyla Şekil 3.1'de ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Vakumlu eritme-döküm fırınının iç yapısı.



Şekil 3.2 Vakumlu eritme-döküm fırınının dış görünüşü.

Eritme işlemi vakumlu eritme-döküm fırınında kısaca şu şekilde yapılır.

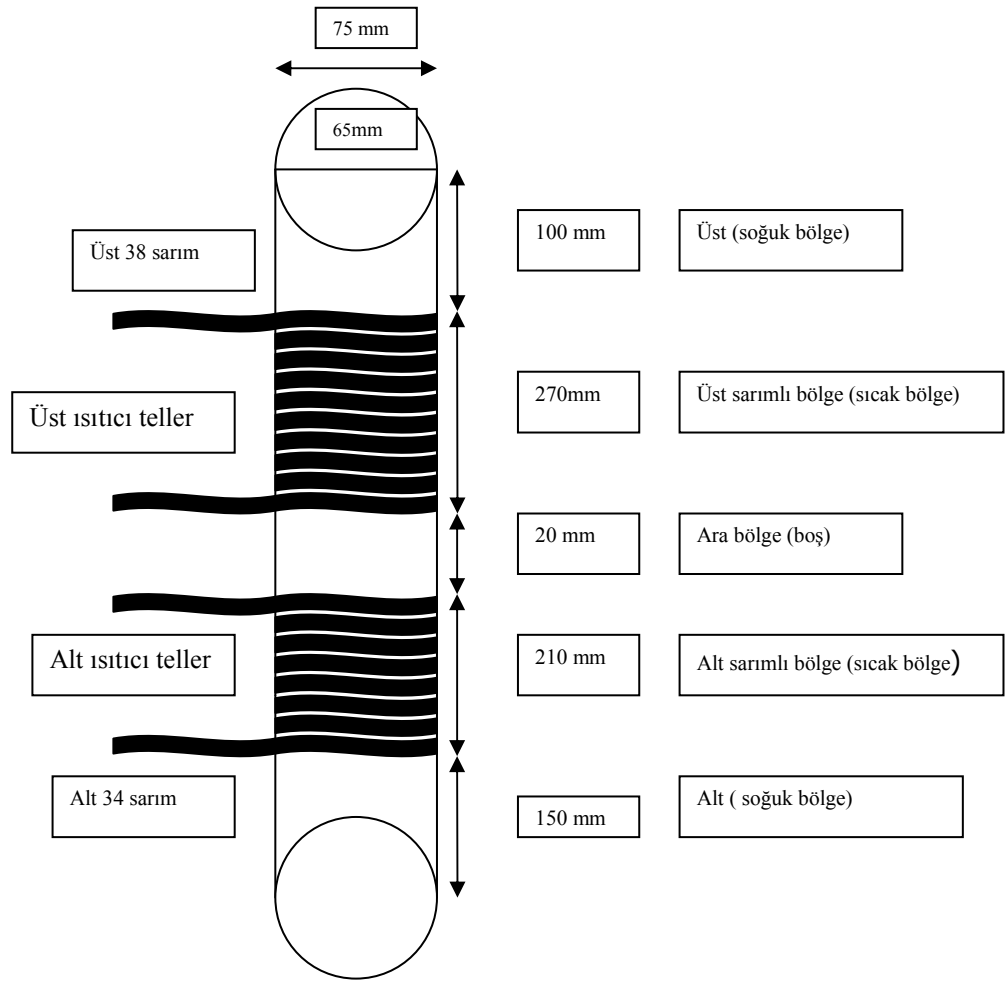
İlk aşamada eriyik alaşım oluşturmak için kullanılacak olan grafit pota fırın ölçülerine ve malzeme miktarına uygun bir şekilde hazırlanır. İyi bir ısı iletkenliğine ve kolay işlenebilme özelliklerine sahip olması, Al ve Zn metalleri ile reaksiyona girmemesi nedeniyle pota yapımında grafit tercih edilmiştir. İstenilen bileşimdeki alaşımı oluşturmak için gerekli metaller hassas terazi kullanılarak tartılır. Çalışılan metaller arasında en az oksitlenen grafit pota içerisine konulup numune kalıbı uygun bir şekilde fırına yerleştirilir. Vakum pompası çalıştırılarak $400^{\circ}C$ 'den itibaren fırın vakumlanır, bu esnada pirinç kaide içerisinden sürekli su geçirilir. Pota içerisindeki metal (alüminyum) eridikten sonra Zn parçaları Al folyoya sarılarak grafit karıştırıcı yardımıyla eriyiğin altına daldırılır. Alaşım bileşenleri eridikten sonra, Al-Zn alaşımında kütle kaybını engellemek için eriyik pota içerisinde fazla tutulmadan 5-6 dakika aralıklarla 2-3 defa karıştırılıp önceden hazırlanmış ve sıcak döküm fırınına yerleştirilmiş olan kalıba dökülür. Sıcak döküm fırınındaki numune kalıbı taşıyıcısı

altındaki hareketli piston sonuna kadar aşağı çekilerek, numune kalıbının elik soğutma kazanı üzerine getirilmesi sağlanır. Böylece, eriyik alttan itibaren yavaş yavaş doğrusal katılaştırılmış olur.

3.2.2. Sıcak Döküm Fırını

Vakumlu eritme-döküm fırınında elde edilen eriyik haldeki alaşımın özel olarak hazırlanmış kalıp içerisine dökümünün yapılması ve alaşımın kalıp içerisinde doğrusal (tek yönlü) olarak katılaştırılması için sıcak döküm fırını kullanılır. Dökümü yapılan numunenin tamamen dolması ve içerisinde hava boşluğunun kalmaması için doğrusal katılaştırma amacıyla kullanılan sıcak döküm fırınının iç yapısı Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

Sıcak döküm fırını, i çapı 65 mm dış çapı 75 mm ve uzunluğu 750 mm olan iki ucu açık alümina tüpün etrafındaki farklı iki bölgeye aralarında 20 mm mesafe kalacak Şekilde ısıtıcı teller sarılarak oluşturulan birbirinden bağımsız iki ısıtıcı bölge, paslanmaz çelikten yapılmış soğutma kazanı, güç kaynağı olarak kullanılan alt ve st olmak üzere iki adet varyak, alümina tüpün alt, orta ve st kısımlarına yerleştirilen üç adet K-tipi termal çift ve yalıtım malzemesi olarak kullanılan ytong tuğladan ve cam pamuğundan oluşmaktadır. Isıtıcı tel olarak 1,0 mm kalınlığında *Kanthal Al* teli kullanılmıştır. Alt ısıtıcının direnci 15 Ω ve st ısıtıcının direnci 18 Ω olarak llmştir. Alt, orta ve st ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için her üç bölgeye üç adet yalıtılmış K tipi termal çift yerleştirilmiştir. Bu fırında iki ayrı bölgede (alt ve st) ısıtıcı tel kullanılmasının sebebi numunenin aşağıdan yukarıya doğru tek yönlü katılaşmasını sağlamaktır. Bu Őekildeki döküm işlemi, özellikle numune içerisinde tek yönlü bir ısı akışı oluşturur ki bu da numune kalıplarının tamamen dolmasını sağlar. Aksi halde hem alt hem de st bölgeden katılaşma başlayacak ve en son katılaşan orta bölgenin büzülmesinden dolayı hem grafit numune potalarının duvarları çatlayacak hem de yer yer boşluklar ihtiva eden kusurlu bir alaşım elde edilecektir ki buda ileriki aşamalarda zorluk çıkarabilecek istenmeyen bir durumdur. Sıcak döküm fırınında daha önceden hazırlanmış ve yerleřtirilmė olan kalıba vakumlu eritme-döküm fırınında elde edilen eriyik dökülmeden önce, numune potalarının sıcaklığı alaşımın erime sıcaklığına kadar ısıtılmalıdır.



Şekil 3.3. Sıcak döküm fırınının iç yapısının şematik gösterimi.

Aksi takdirde eriyik alaşımın numune kalıbı içerisine dolmadan, üst kısımda aniden soğuyarak katılaşması söz konusu olabilir. Sıcak döküm fırınının dış görünüşü Şekil 3.4. 'de verilmiştir. Dökümün yapılacağı grafit numune kalıbı, yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kalarak deformasyon oluşumunu önlemek amacıyla sıcak döküm fırını belli bir sıcaklığa geldikten sonra fırının içerisine yavaş yavaş sıcak bölgeye gelecek şekilde yerleştirilir. Fırının istenilen sıcaklığa ulaşip ulaşmadığı yerleştirilen termal çiftlerin multimetre yardımıyla ölçülen değerlerinin gözlenmesiyle kontrol edilir.



Şekil 3.4. Sıcak döküm fırınının dış görünüş fotoğrafı.

Sıcak döküm fırınında döküm işlemi kısaca şu şekildedir:

Önceden hazırlanan kalıba eriyik alaşımın rahatça dolması için kalıbın üst kısmına grafit huni yerleştirilir. Kullanılan huninin resmi Şekil.3.5’de verilmiştir.

Döküm yapılırken alaşımın taşması halinde fırına dolmasını engellemek için grafit huni ile alümina tüp arası yüksek sıcaklığa dayanıklı cam pamuğu ile desteklenir. Ayrıca kalıbın fırın içerisinde dengeli bir şekilde durmasını sağlamak amacıyla kalıbın alt kısmına grafitten yapılmış dengeleyici konur. Alt ısıtıcının sıcaklığının alaşımın erime sıcaklığına, üst ısıtıcının ise erime sıcaklığının $50-100^{\circ}C$ üzerindeki bir sıcaklığa çıkması beklenir. Vakumlu eritme-döküm fırınında hazırlanan ve yeterli miktarda karıştırılarak homojen hale getirilen eriyiğin bulunduğu pota, maşayla sıkıca tutulur ve zaman geçirilmeden huni yardımıyla numune kalıbına dökülür.



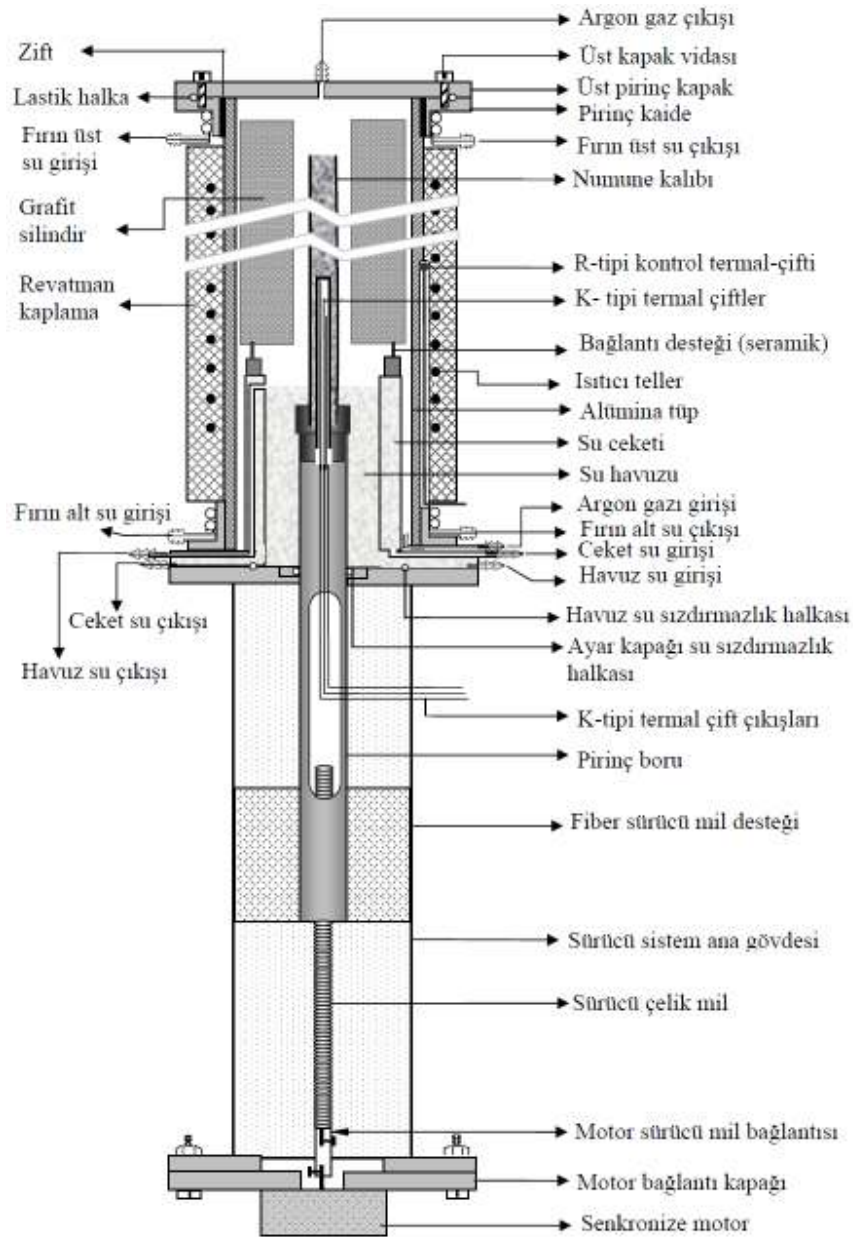
Şekil 3.5 (a) Alaşımın taşmadan kolaylıkla akmasını sağlayan 65 mm derinlikli grafit pota (b) Grafit potanın üstüne yerleştirilen 4 tane havalandırma deliğine sahip üst dengeleyici (c) Üst dengeleyici, grafit pota ve koruma kapağından oluşan, eriyik alaşımın rahatça kalıba dolması için kullanılan akıtma hunisi.

Döküm yapıldıktan sonra kalıp üzerine konulan huni alınır ve alaşımın hava kabarcığı oluşmadan katılaşması için eriyik bir ucu kapatılmış alümina çubuk ile zaman zaman karıştırılır. Numunenin aşağıdan yukarıya doğru doğrusal olarak katılaştırılması için önce alt ısıtıcı tamamen kapatılır ve alt soğutma kazanından su geçirilir. Alttan katılaşma devam ederken üst ısıtıcının varyağı da yavaş yavaş azaltılır. Katılaşma tamamlandıktan sonra üst ısıtıcı da tamamen kapatılarak numunenin kendiliğinden soğuması sağlanır. Numunenin doğrusal olarak katılaştırılmasındaki amaç numunede hava boşluğu olmadan kalıbın tamamen dolmasını sağlamaktır. Numune soğuduktan sonra döküm fırınından çıkarılır.

3.2.3. Kontrollü Doğrusal Katılaştırma Fırını

Doğrusal katılaştırma ve tek kristal üretimi konusunda en çok kullanılan sistem Bridgman tipi düzeneklerdir.

Dökümlerde birçok teknik kullanılmasına rağmen Bridgman metodu özellikle mühendislik alanında çekme gerilimine dayanıklı malzeme (jet motorlarının türbin kanatçıkları, mil yatakları) üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının şematik gösterimi.

Büyük boyutlardaki dökümlerde ısı akışını kontrol etmek çok zor olduğu için kontrollü doğrusal katılaştırma yöntemi daha çok çapı 200 mm'den daha küçük olan malzemelerin katılaştırılmasında kullanılmaktadır. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında, vakumlu eritme-döküm fırını ve sıcak döküm fırını yardımıyla elde edilen numunelerin, farklı katılaştırma hızları ve sıcaklık gradyentlerinde katılaştırılması yapılmaktadır, kontrollü doğrusal katılaştırma fırını bu amaçla tasarlanmıştır. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının şematik gösterimi Şekil 3.6'da verilmiştir.

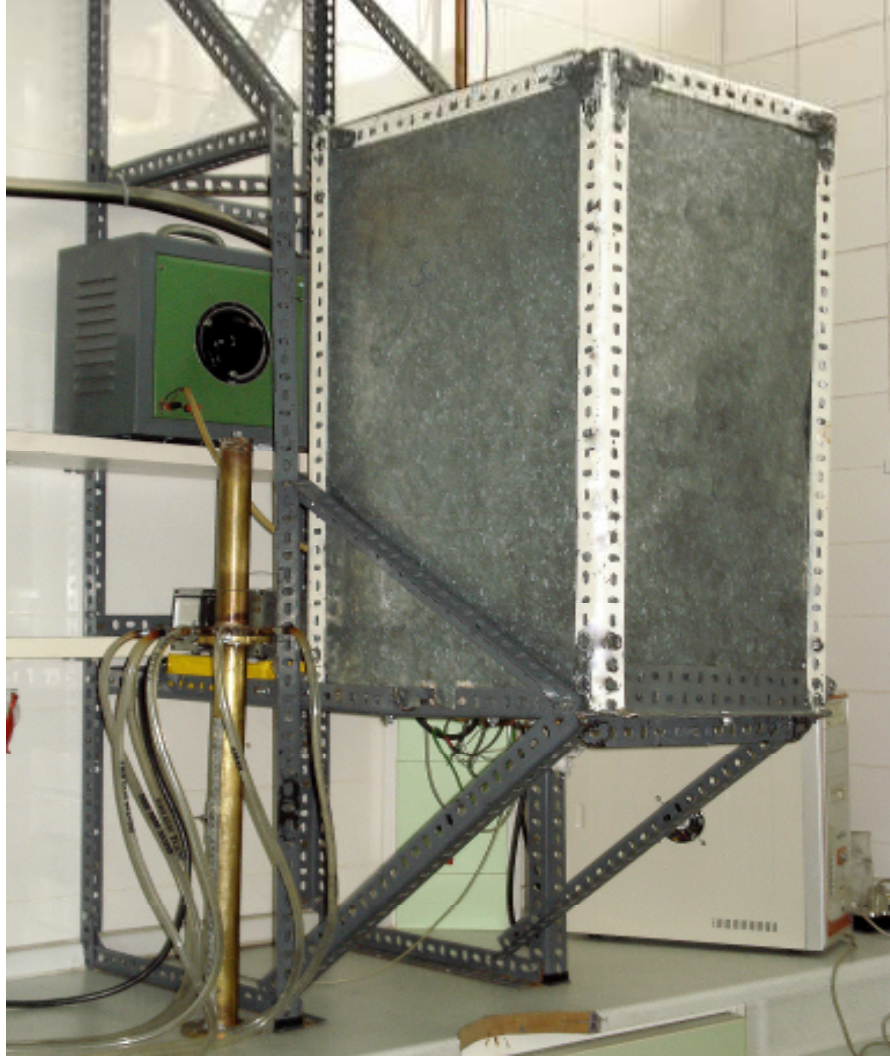
Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında motor bağlantılı sürücü sistem kullanılarak farklı katılma hızları, ısıtıcı ve soğutucu sistem kullanılarak ise farklı sıcaklık gradyentleri elde edilmiştir. Bu fırında bulunan numune tutucusuna numuneler, numunenin en üst kısmı havuz seviyesine gelecek şekilde yerleştirilir. Daha sonra sürücü sistem üzerinde +17 seviyesinden başlayarak 2'lik motor yardımıyla sabit hızla yukarı doğru numunenin alt ucunun seviye suyu hizasına kadar itilir. Bu esnada seviye suyu açılarak havuzun dolması sağlanır ve numune dolu havuzdan geçirilir. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının dış görünüş fotoğrafı Şekil 3.7'de verilmiştir.

Bu yolla numune üst kısmından başlanarak en alt kısmına kadar su içerisinde geçirilmiş ve homojen olarak soğutulmuş olur.

Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırını,

- 1.) Isıtıcı sistem,
- 2.) Soğutucu sistem,
- 3.) Sürücü sistem

olmak üzere üç kısımda ele alınabilir.

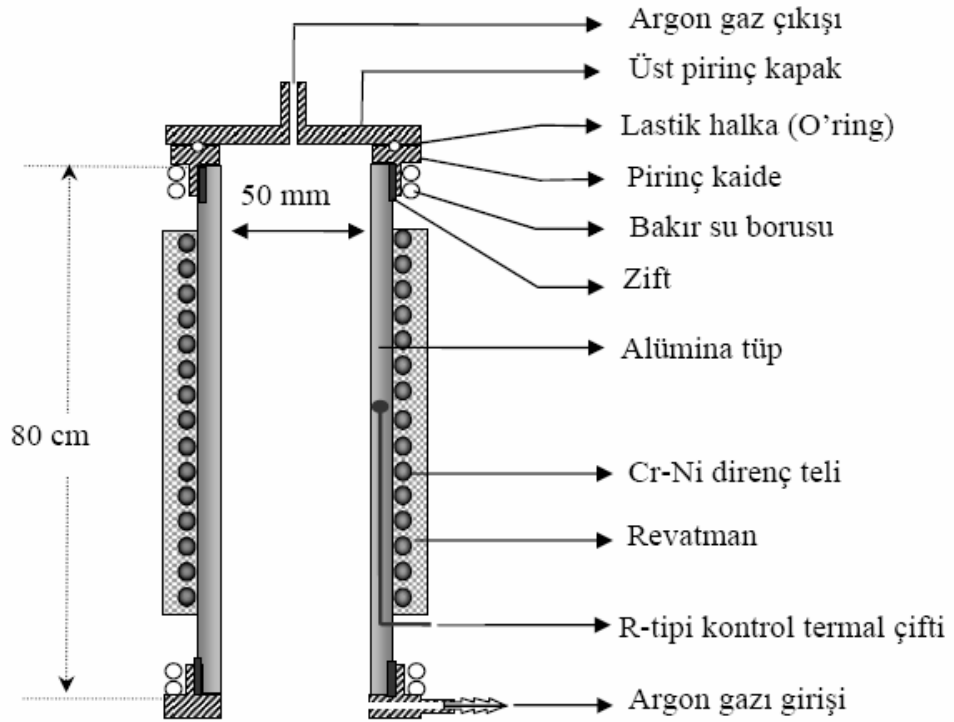


Şekil 3.7. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınının dış görünüş fotoğrafı.

3.2.3.1. Isıtıcı Sistem

Doğrusal katılaştırma fırınında yer alan ısıtıcı sistem fırının üst bölgesine yerleştirilmiş olup, yüksek sıcaklıklara dayanıklı alümina tüpün etrafına sarılmış yaklaşık 1100°C 'ye dayanıklı 1mm çapında, $1.326 \Omega\cdot\text{m}$ öz dirence sahip Cr-Ni ısıtıcı Kanthal A1 telinden oluşmaktadır. İç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 800 mm olan iki ucu açık bu alümina tüpün etrafı üstten ve alttan 20'şer cm mesafe kalacak şekilde ısıtıcı teller ile sarılmıştır. Isıtıcı telin toplam direnci yaklaşık 25Ω 'dur. Tellerin birbiriyle temasını önlemek ve arasında eşit miktarda mesafe sağlamak amacıyla 6 mm çapında seramik boncuklar kullanılmıştır. Oksitlenmesini önlemek için ise tellerin üzeri revatman ile

sıvanmıştır. Alümina tüpün iki ucuna pirinçten yapılmış dairesel kesitli kaideler geçirilerek ve aradaki boşluk 250°C 'ye dayanıklı zift ile doldurularak numunenin argon atmosferinde kalması sağlanmıştır. Alümina tüp ile kaideler arasındaki ziftin aşırı ısınarak erimesini engellemek ve pirinç kaideleri soğuk tutmak için kaideler üzerinden sürekli olarak su geçirilmiştir. Üst kısımda pirinç kapak ile pirinç kaide arasına hava sızdırmasını önlemek için lastik halka (O'ring) yerleştirilmiştir. Fırının sıcaklık kontrolü, $\pm 1^{\circ}\text{C}$ hassasiyetindeki Eurotherm 815S tipi sıcaklık kontrolcüsü ile yapılmıştır. Isıtıcı sistem Şekil 3.8'de verilmiştir.

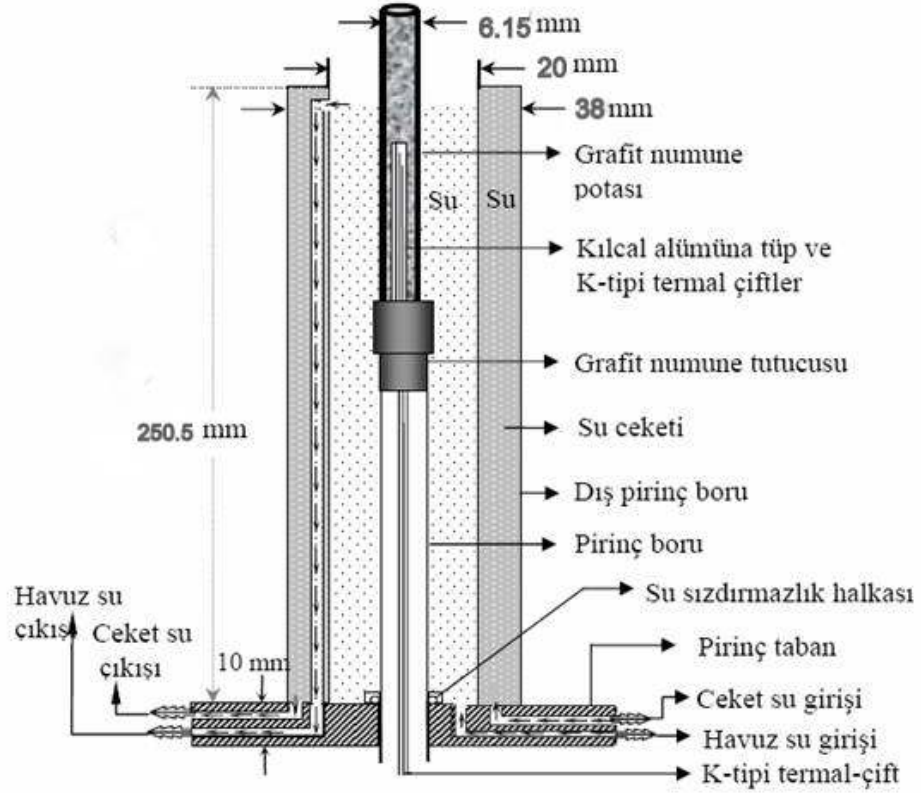


Şekil 3.8. Kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında ısıtıcı sistemi.

3.2.3.2. Soğutucu Sistem

Fırın içerisinde sıcaklık gradyenti oluşturmak için ısıtıcı sistem yanında bir de soğutucu sistem tasarlanmıştır. Soğutucu sistemin diğer bir görevi de yeterince katılaştırılan numunenin aniden su havuzuna çekilerek quench (ani katılaştırma) yapılmasını sağlamaktır. Soğutucu sistem, 250,5 mm uzunluğunda 20 ve 38 mm çaplara sahip iç içe geçmiş silindir şeklinde iki pirinç borudan oluşmaktadır. Soğutucu sistem konum

olarak, ısıtıcı sistem ile sürücü sistem arasında yer alır. Soğutucu sistemin alt kısmı yaklaşık 10 mm kalınlığında, 100 mm çapında dairesel pirinç parçaya kaynatılmıştır. Sistemin soğutulması su ile yapılmaktadır. Sürekli soğutma için iki su girişi ve iki de su çıkışı vardır. İç içe geçmiş pirinç borular arasında su ceket, içteki boruda ise numuneyi soğutmakta kullanılan su seviye kontrollü su havuzu bulunmaktadır. Numune aşağı çekildikçe su seviyesinde değişme olmaması için iç borudan dışarı su çıkış yolu yapılmış sürekli olarak belli bir ritimde su takviyesi yapılarak su seviyesi bu çıkıştan gözlenmiştir.



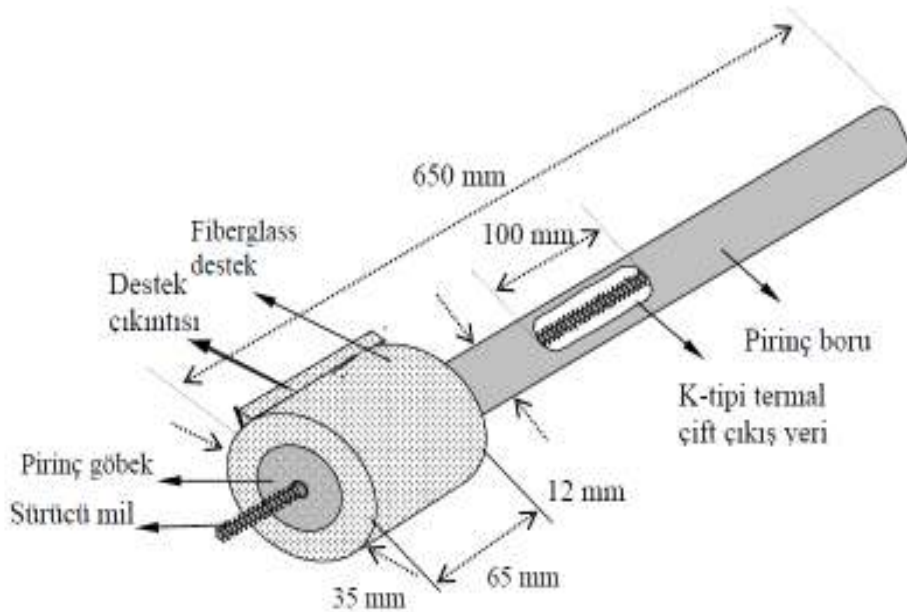
Şekil 3.9. Soğutucu sistemin yapısı.

Su ceketini numuneyi soğutan suyun (havuz suyu) sıcaklığının sabit tutulması ve dolayısıyla ani katılaştırmayı sağlamak için yapılmıştır. Soğutucu sistemin yapısı, Şekil 3.9'da verilmiştir.

3.2.3.3. Sürücü Sistem

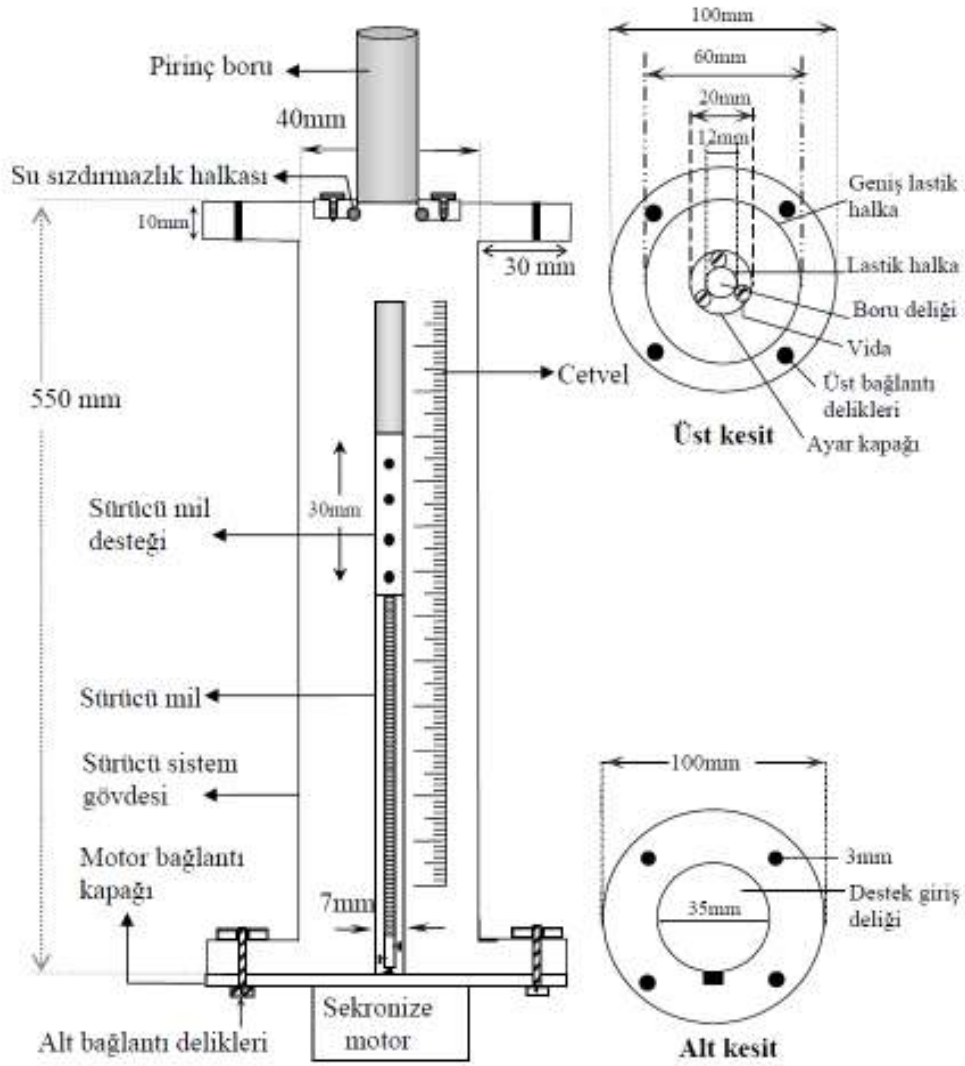
Farklı katılaştırma hızları elde etmek amacı ile tasarlanan sürücü sistem; 550 mm boyunda ve 40 mm çapında pirinç gövde içerisinde bulunan, dış çapı 12 mm, iç çapı 10

mm, uzunluğu 650 mm olan pirinç borudan oluşmaktadır. Çapı 40 mm olan pirinç gövdenin üzerine istenilen katılaştırma mesafelerini ayarlamak için cetvel ölçeği yerleştirilmiştir. Pirinç gövdenin alt kısmında ise değişik çekme hızı sağlayan sürücü mile bağlantılı senkronize motor bulunmaktadır. Şekil 3.10'da pirinç boru içindeki sürücü milin fiberglassdan yapılmış mil yuvasına yerleştirilmiş şekli görülmektedir. Pirinç gövde içerisindeki pirinç boru alt ucundan, fiberglassdan yapılmış mil yuvasına yerleştirilmiş ve üst ucuna da numune tutucusu yerleştirilmiştir. 12 mm dış çaplı pirinç borunun kenarlarından su sızıntısını önlemek için lastik halka (O'ring) kullanılmıştır. Fiberglassdan yapılmış olan mil yuvası, 65 mm uzunluğunda olup, bir ucu 12 mm çapındaki pirinç borunun sıkı bir şekilde girmesi ve sabitlenmesi için delinmiştir. Diğer ucuna ise, 3 mm çapında, 300 mm uzunluğunda olan sürücü milin içinde hareket edebilmesi için 20 mm çapında 30 mm uzunluğunda pirinç blok yerleştirilmiştir. Bu parçanın merkezine 3 mm çapında dış açılmıştır.



Şekil 3.10. Sürücü mil ve fiberglass desteğin görünüşü.

Pirinç mil vasıtasıyla numune tutucusuna yerleştirilmiş olan numune, motor devir hızına bağlı olarak, aşağıya doğru (soğuk bölgeye doğru) çekilerek düşey yönde doğrusal olarak katılaştırılmaktadır. Dakikada devir sayıları 1, 2, 5, 10, 20 devir/dk olan beş ayrı senkronize motor kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Sürücü sistem bloğunun boyuna ve enine kesitleri.

3.3. Bir Deneyin Yapılışı

3.3.1. Numune Potasının Hazırlanması

Deneylerde numune kalıplarını hazırlamak için, iyi işlenebilme özelliği ve metallerle reaksiyona girmemesi özelliğinden dolayı grafit kullanılmıştır. Al-Zn alaşımında 6,15 mm dış çapına (4 mm iç çapına) ve 12,5 mm dış çapına (9,5 mm iç çapına) sahip olmak üzere iki farklı çapta numune kalıpları hazırlanarak deneyler yapılmıştır. 6,15 mm çapındaki numunelerde ve 9,5 mm çapındaki numunelerde 150 mm'lik boy tercih edilmiştir. Bu grafit çubuklar delinme sırasında kolayca kırılılabildikleri için pirinçten

yapılmış kalıbın içine yerleştirilerek 4 mm çapında, 220 mm uzunluğunda özel matkap uçları ile tornada delinmiş ve 4 mm çapında 150 mm uzunluğunda içi boş grafit silindir elde edilmiştir. Daha sonra bu grafit numune potalarının içerisine kontrollü doğrusal katılaştırma fırınına uygun olarak, numune eksenine paralel olacak şekilde, bir adet kılcal alümina boru (iç çapı 0,8 mm, dış çapı 1,2 mm ve boyu 100 mm) alttaki grafit numune tutucunun merkezine sıkıca yerleştirilmiştir. Numune içerisine alaşım dolunca termal çiftlerin bu metal alaşımı ile doğrudan temasını engellemek için kılcal alümina tüpün bir ucu oksijen kaynağı ile kapatılmıştır. Kılcal alümina tüpün altta kalan diğer ucu ise termal çiftlerin girebilmesi için açık bırakılmıştır. Kalıbın üzerine yerleştirilen pota ilk 15-20 deney için Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında eritme-döküm-kontrollü katılaştırma işlemleri beraber yapılyorken eritme potası olarak, daha sonra ise vakumlu eritme-döküm fırını ve sıcak döküm fırını kullanılarak elde edilen numunenin kalıp içerisinden taşmaması amacıyla kullanılmıştır. Ancak boyutlarında değişiklik yapılarak amaca uygun hale getirilmiştir. 12,5 mm 'lik numuneler için yine benzer olarak 12,5 mm çapına uygun pirinç tutucu ve matkap uçları kullanılarak kalıplar hazırlanmıştır. Grafitlerin işlenmesinde kullanılan cihazlar Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Grafitlerin işlenmesinde kullanılan (a) Büyük torna ve doğrusal matkap, (b) Küçük torna ve (c) Yönlü matkap.

3.3.2. Numune Potaları Kalıbı Hazırlanması

Döküm yapılacak numune potalarından en az 2'li ve en fazla 10'lu olmak üzere 2'li, 3'lü, 7'li ve 10'lu kalıplar hazırlanmıştır. Farklı sıcaklık gradyentinde yada farklı hızlarda kullanılacak olan bu numunelerin hepsinin aynı bileşime sahip olmaları için Al-Zn alaşımlarının dökümünde potalara aynı anda aynı bileşimden döküm yapabilmek amacıyla numune potaları kalıbı tasarlanmıştır. Alt destek 38 mm çapında, 25,5-30 mm uzunluğunda silindir biçiminde grafit parçadan yapılmış ve içerisine 6,15 mm çaplı 20

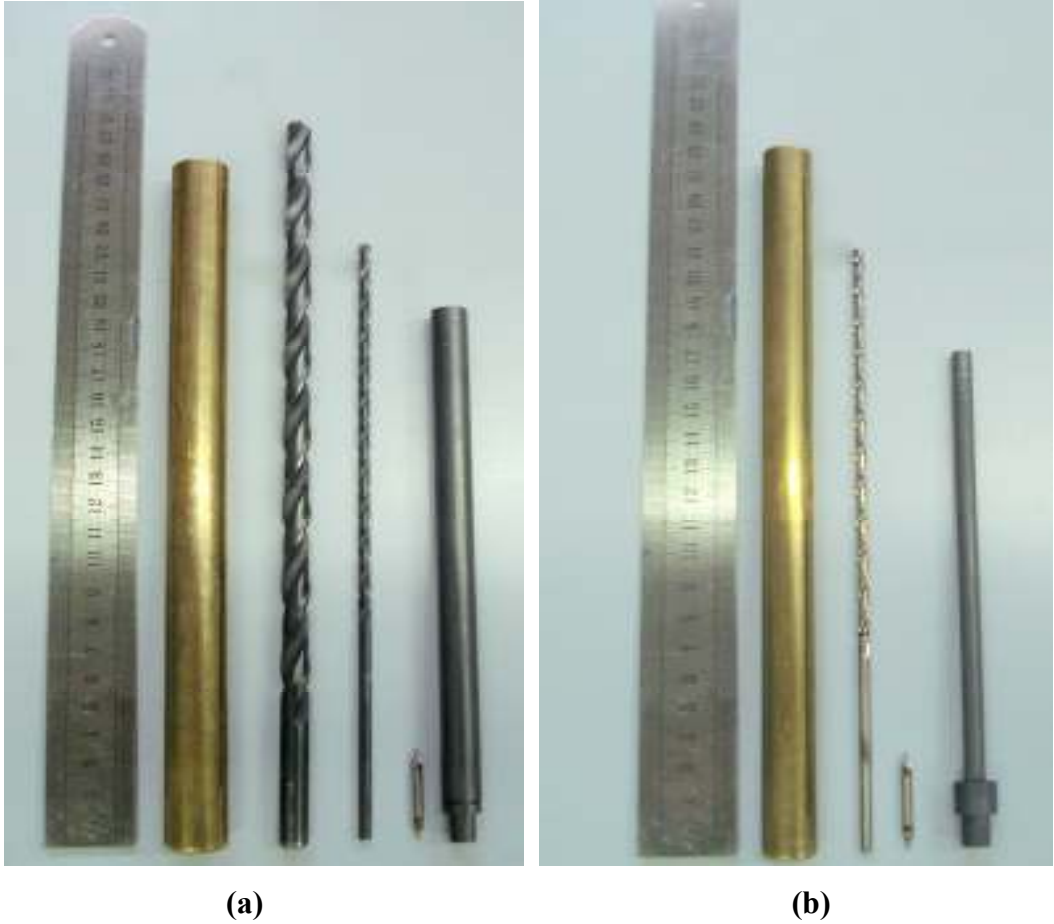
mm uzunluğunda 10 adet delik açılmıştır. Bu deliklerin 10 mm'lik kısmı 6,15 mm çapındaki matkap ucuyla genişletilmiştir. Üst destek de benzer olarak 65,5 mm uzunluğunda, 38 mm çapında bir grafit parça kullanılarak bir ucu 30 mm'lik matkap ucu ile 40 mm delinmiştir. Diğer ucuna ise 4 mm çapında 15-20 mm uzunluğunda 10 adet delik açılmıştır. Açılan deliklerin 10 mm'lik kısmı yine aynı şekilde 6,15'lik matkap uçlarıyla genişletilmiştir. Alt ve üst desteğin simetrik olmasına dikkat edilmiştir. Hazırlanan numune potaları alt ve üst desteğe uygun olarak sıkıca yerleştirilmiş ayrıca bağlantı kısımları 1200°C'ye dayanıklı karbon katkılı silikon yapıştırıcı ile yapıştırılarak alaşımın sızma ihtimaline karşı tedbir alınmıştır. Sıcak döküm fırınına yerleştirmeden önceki numune kalıbının son hali Şekil 3.13'de verilmiştir. Ayrıca grafit numune kalıplarının hazırlanmasında kullanılan pirinç blok, matkap uçları ve hazırlanmış numune potaları Şekil 3.14'de verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.13. (a) Numune potası (b) Sıcak döküm fırınına yerleştirmeden önceki numune kalıbının son hali.



Şekil 3.14. (a) 12,5 mm dış çapına (9,5 mm iç çapına) sahip grafit numune potalarının yapımında kullanılan pirinç destek, cetvel ve değişik ebatlarda matkap uçları (b) 6,15 mm dış çapına (4 mm iç çapına) sahip grafit numune potalarının yapımında kullanılan pirinç destek, cetvel ve kullanılan matkap ucu.

3.3.3. Alaşımın Hazırlanması

Çalışılacak olan alaşımın bileşim oranları faz diyagramı yardımıyla tespit edildi. Kullanılacak olan numune potalarının boyutları göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapıldı ve hassas terazi yardımıyla alaşımı oluşturacak malzemeler tartıldı. Saf olmayan malzemelerle alaşım hazırlandığında safsızlıklar deneysel süreçte ara yüzeyde oluşan yapıları olumsuz etkileyeceğinden alaşım yapımında kullanılan malzemelerin yüksek saflıkta olmasına özellikle dikkat edildi. Al-Zn ikili alaşımını hazırlamada alüminyum %99.99, çinko %99.99 saflıktaki metaller kullanıldı. Al-Zn alaşımını oluşturmak için kullanılan metaller Şekil 3.15' de verilmiştir.



(a) Çinko (Zn)

(b) Alüminyum (Al)

Şekil 3.15. Al-Zn ikili alaşımını oluşturmada kullanılan metallere.

3.3.4. Numunenin Dökümü

Al-Zn alaşımının dökümü için vakumlu eritme-döküm fırını ve sıcak döküm fırını olmak üzere iki farklı fırın kullanılmıştır. Eritme işlemi vakumlu eritme-döküm fırınında, döküm işlemi ise sıcak döküm fırınında yapılmıştır. İlk aşamada döküme hazırlanan Al-Zn alaşım sisteminin eritilmesi için vakumlu eritme fırınının vakum pompası çalıştırılmıştır. Fırın sıcaklık kontrolcüsünde sıcaklık ayarı yapılmış ve fırının kademeli olarak yavaş ısınması sağlanmıştır. Fırındaki sıcaklık kontrol ünitesinde istenilen sıcaklık ayarlandıktan sonra vakum kapağının aşırı ısınarak ziftlerin erimemesi için su vanası açılmıştır. İstenilen sıcaklığa ulaşıncaya ikili alaşımı oluşturan metallere alüminyum ilk olarak grafit eritme potasının haznesine yerleştirilmiş ve vakumlu ortamda eritilmesi sağlanmıştır. Daha sonra eriyik alüminyum içerisine çinko taneleri alüminyum folyoya sarılmış olarak eklenmiştir. Erimiş haldeki metalik alaşım Şekil 3.16'da gösterilen eriyik karıştırıcısı ile sağa sola ve yukarı aşağı hareketlerle karıştırılmıştır.

Eriyik karıştırıcısı, üzerinde çeşitli boyutlarda delikler bulunan 25 mm çapında ve 10 mm boyunda disk şeklinde bir grafit parça ile buna tutturulan 6.15 mm çapında çubuk şeklindeki grafit parçadan oluşmaktadır. Karıştırma işlemi 5-6 dakika aralıklarla 3-4 kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.16. Eriyik Karıştırıcısı.

Alaşımı oluşturan metallerin vakumlu eritme fırınında eritilmesi sırasında, daha önce hazırlanan toplam 10 adet numune potasından oluşan grafit pota kalıbı, alt ve üst kısımları telle sabitlenerek sıcak döküm fırını belirli bir sıcaklığa ulaştıktan sonra içerisine yerleştirilmiş ve dökümün güvenli olabilmesi için döküm hunisi numune kalıbının ağız kısmına gelecek şekilde yerleştirilerek alümina tüple huninin etrafı cam pamuğu ile dikkatli bir şekilde desteklenmiştir. Sıcak döküm fırınının sıcaklığı ayarlanırken, alt ısıtıcı sıcaklık değerinin en az kullanılan alaşım sisteminin erime sıcaklığında, üst ısıtıcının sıcaklık değerinin ise alaşım sisteminin erime sıcaklığının biraz üzerinde olmasına ($\sim 50^{\circ}C$) dikkat edilir. Vakumlu eritme-döküm fırınında eritilmiş olan alaşım sıcak döküm fırınındaki kalıba bekletilmeden dikkatli bir şekilde dökülmüştür. Numune kalıplarının tam olarak dolması ve içerisinde hava boşluğu kalmaması için bir ucu kapatılmış alümina çubuk ile alaşım kontrol edilmiş ve kalıpların tam dolduğundan emin olunduktan sonra, alt ısıtıcı varyağı kapatılarak, soğutma suyu açılmış ve numune potaları içindeki alaşımın aşağıdan yukarıya doğru katılaşması sağlanmış olur. Kalıp içerisindeki sıvı alaşımın üst kısmında katılaşp katılaşmadığı kontrol edilmiştir. Böylece üst kısmında tamamen katılaşmasından sonra üst ısıtıcının da varyağı kapatılarak sistem kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Yapılan bu işlemlerden sonra elde edilen numuneler sabit sıcaklık gradyenti altında farklı hızlarda kontrollü doğrusal katılaştırma deneylerinde kullanılmıştır. İki ayrı kompozisyonda iki farklı çaptaki numuneler için döküm yapılmıştır.

Numune kalıpları hazırlanırken alt ve üst tutucular ile numune potaları arasında belirlenen ölçülere uygun olarak çalışılmıştır. Çalışmalar süresince numune potalarının boylarının eşit olmasına ve numune potaları ile tutucular arasında boşluk kalmamasına

özellikle dikkat edilmiştir. Hazırlanan numune potaları ile üst tutucu arasında boşluk kaldığı takdirde besleme için bırakılan alanın bu boşluk ile birleşerek metalin bu kısımda katılaşmasıyla numune potalarının duvarlarını kırdığı görülmüştür. Ayrıca kalıplar ve numune potaları hazırlandıktan sonra sıcak döküm fırınında uzun süre kalması durumunda, pota ve kalıpların aşırı sıcaklığa maruz kalarak deforme olduğu, kalıpların kırılabilirliklerinin arttığı ve bu sebeple katılaştıran metalin numune potalarını kırarak kolaylıkla potadan ayrıldığı gözlenmiştir. Bu durumun ise kontrollü doğrusal katılaştırma için istenmeyen bir durum olduğu bilinmektedir. Bütün bu olumsuzluklarla karşılaşmamak için; hesaplamalar hassas olarak yapılmış, numune pota ve kalıpları hazırlanmadan önce milimetrik kağıt üzerine çizimleri yapılarak çalışmalarda hem kolaylık sağlanmış hemde başarı oranı artırılarak çalışmaların güvenilirliği sağlanmıştır. Çalışmalar süresince bu noktalara dikkat edilmediği takdirde sıcak döküm fırınından çıkarılan kalıbın kontrollü doğrusal katılaştırma deneyi için uygun olmayacağı görülmüştür. Tecrübe edilen örnekler Şekil 3.17’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.17. (a) Numune potalarının deformasyonu sonucu, katılaştıran metalin numune potasından tamamen kurtulması (b) Numune potaları ile tutucu arasında boşluk kalması halinde numune potaları üzerinde meydana gelen kırıklar.

3.4. Sıcaklık Gradyentinin Ölçülmesi

Sıcaklık gradyenti kontrollü katılaştırma deneylerinde kontrol edilebilen parametrelerden birisidir. Sistemin sıcaklık gradyenti, termal çiftler, Pico TC-08 marka sekiz termal çift girişli Data Logger ve bilgisayar aracılığıyla ölçülmüştür. Sıcaklık gradyenti ölçme sistemine geçmeden önce termal çiftlerden kısaca bahsetmek faydalı olacaktır. Termal çiftler genellikle birisi saf diğeri alaşımdan yapılmış birbirinden farklı olan iki telden oluşmaktadır. Termal çiftler endüstride, fırınların ve maddelerin sıcaklıklarının ölçülmesinde ve ayrıca sıcaklık kontrolü yapan alet ve fırınlarda kullanılır. Chromel-Alümel (K tipi), Platin-Platin %13 Rodyum (R tipi) ve % 90 Platin-%10 Rodyum (S tipi) termal çiftler en yaygın olarak kullanılanlarıdır. Düşük sıcaklıklarda Chromel-Alümel (K tipi), yüksek sıcaklıklarda ise Platin-Platin %13 Rodyum (R tipi) ve %90 Platin-% 10 Rodyum (Stipi) tipi termal çiftlerin kullanılması daha uygundur.

Bu çalışmada 0.50 mm kalınlığında, yalıtımlı Chromel-Alümel (K tipi) termal çift kullanılmıştır. Kullanılmadan önce her bir termal çiftlerin sağlamlığı ohmmetre ile test edilmiş ve herbir termal çiftin kalibrasyonu yapılmıştır. Termal çiftlerin bir uçları aralarında 10 mm mesafe olacak şekilde sabitlenmiş ve bu uçlar sıcaklığı ölçülecek bölgeye yerleştirilirken diğ er uçlar sıcaklığı referans aldığı noktada (buz-su karışım sıcaklığında) tutulmuştur. Her bir termal çiftin kalibrasyonu yapıldıktan sonra buz-su karışımı kullanılmadan deneylere devam edilmiştir. Alaşımın üç farklı noktasından sıcaklık ölçümü yapabilmek amacıyla numune içine yerleştirilen alümina tüp içerisine uçları arasında 10 mm'lik mesafe olacak şekilde üç adet termal çift yerleştirilmiştir. En aşağıdaki termal çift aşağıdan itibaren en az 60 mm alaşımın içerisinde olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Termal çiftlerin diğ er uçları ise yalıtımlı kablolarla bağlanarak, bağlantı noktaları 0°C'yi referans almak üzere buz-su karışımının içerisinde bulunan etil alkol dolu cam borulara yerleştirmiştir. Yalıtımlı kabloların diğ er uçlarına daha önceden lehimlenen soketler, termal çiftlerin bağlı olduğu üç farklı noktadan sıcaklık ölçümü yapabilmek ve bu ölçümleri kaydedebilmek için bilgisayarla bağlantısı kurulmuş Data Logger'a bağlanmıştır. Bağlantısı yapılan bu Data Logger ve bilgisayar yardımıyla bütün termal çiftlerin ölçtüğü sıcaklık değerleri anında kaydedilebilmiştir. En alttaki, ortadaki ve en

üstteki termal çiftlerin ölçtüğü sıcaklıklar sırasıyla T_1 , T_2 ve T_3 olarak isimlendirilmiştir. Termal çiftler arası mesafeler de bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir ölçüm için, termal çiftler arası sıcaklık farkının termal çiftler arası mesafeye bölünmesiyle G_{12} , G_{23} ve G_{13} olarak isimlendirilen üç farklı sıcaklık gradyenti,

$$G_{12} = \frac{\Delta T_{12}}{\Delta X_{12}} = \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1} \quad (3.1)$$

$$G_{23} = \frac{\Delta T_{23}}{\Delta X_{23}} = \frac{T_3 - T_2}{X_3 - X_2} \quad (3.2)$$

$$G_{13} = \frac{\Delta T_{13}}{\Delta X_{13}} = \frac{T_3 - T_1}{X_3 - X_1} \quad (3.3)$$

denklemleriyle bilgisayar tarafından hesaplanarak elde edilmiştir.

Burada G_{12} , katı-sıvı arayüzeyinin konumu X_1 ve arayüzeyin sıcaklığı T_1 , sıvı içerisindeki bir noktanın konumu X_2 ve bu noktanın sıcaklığı T_2 olduğu haldeki sıcaklık gradyentidir. Benzer şekilde G_{23} ; katı-sıvı arayüzeyinin konumu X_2 ve arayüzeyin sıcaklığı T_2 , sıvı içerisindeki bir noktanın konumu X_3 ve bu noktanın sıcaklığı T_3 iken hesaplanan sıcaklık gradyenti ve G_{13} ; katı-sıvı arayüzeyinin konumu X_1 ve arayüzeyin sıcaklığı T_1 , sıvı içerisindeki bir noktanın konumu X_3 ve bu noktanın sıcaklığı T_3 iken hesaplanan sıcaklık gradyentidir.

3.5. Katılaştırma Hızının Ölçülmesi

Deneyde kontrol edebildiğimiz bir diğer parametre de katılaştırma hızı V 'dir. Bahsedilen bu katılaştırma hızı, sürücü motor aracılığıyla elde edilen çekme hızından farklı olabilir. Çekme hızı numunenin soğuk bölgeye doğru çekilme hızıdır. Katı-sıvı ara yüzeyin ilerleme hızı ise katılaştırma hızıdır. Çekme hızı arttıkça katılaştırma hızı artmakta, çekme hızı azaldıkça katılaştırma hızı da buna paralel olarak azalmaktadır. Sürücü sistem üzerine yerleştirilen ölçüm cetvelinden faydalanılarak katılaştırma hızının hassas bir şekilde ölçülebilmesi sağlanmıştır. Buna göre, numunenin katılaştırılmaya başladığı nokta (X_A) ve katılaştırılmanın sona erdirildiği nokta (X_B) cetvel üzerinden belirlenerek kaydedilmiş ve cetvel üzerinde yer alan bir gösterge yardımıyla, ilk konum

X_A' dan ikinci konum X_B' ye ulaşılması için geçen süre (t_B-t_A) kronometreyle ölçülmüştür. Böylece çekme hızı,

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_B - X_A}{t_B - t_A} \quad (3.4)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Ayrıca 30-40 mm katılaştırma işlemi yapıp, kararlı katılaştırma işlemi sağlandıktan sonra ölçümler tekrarlanmıştır. Katılaştırma esnasında kontrol altında tutulan bir diğer parametre olan katılma hızının (V) pico ile ölçülmesi, kontrollü doğrusal katılma başlatıldıktan sonra ara yüzeyin birinci ve ikinci termal çiftte geldiğinde geçen zamanın saniye cinsinden hesaplanması, aynı zamanda birinci ve ikinci termal çiftler arasındaki mesafenin önceden bilinmesiyle,

$$V_{12} = \frac{\Delta X_{12}}{\Delta t_{12}} = \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} \quad (3.5)$$

$$V_{23} = \frac{\Delta X_{23}}{\Delta t_{23}} = \frac{X_3 - X_2}{t_3 - t_2} \quad (3.6)$$

$$V_{13} = \frac{\Delta X_{13}}{\Delta t_{13}} = \frac{X_3 - X_1}{t_3 - t_1} \quad (3.7)$$

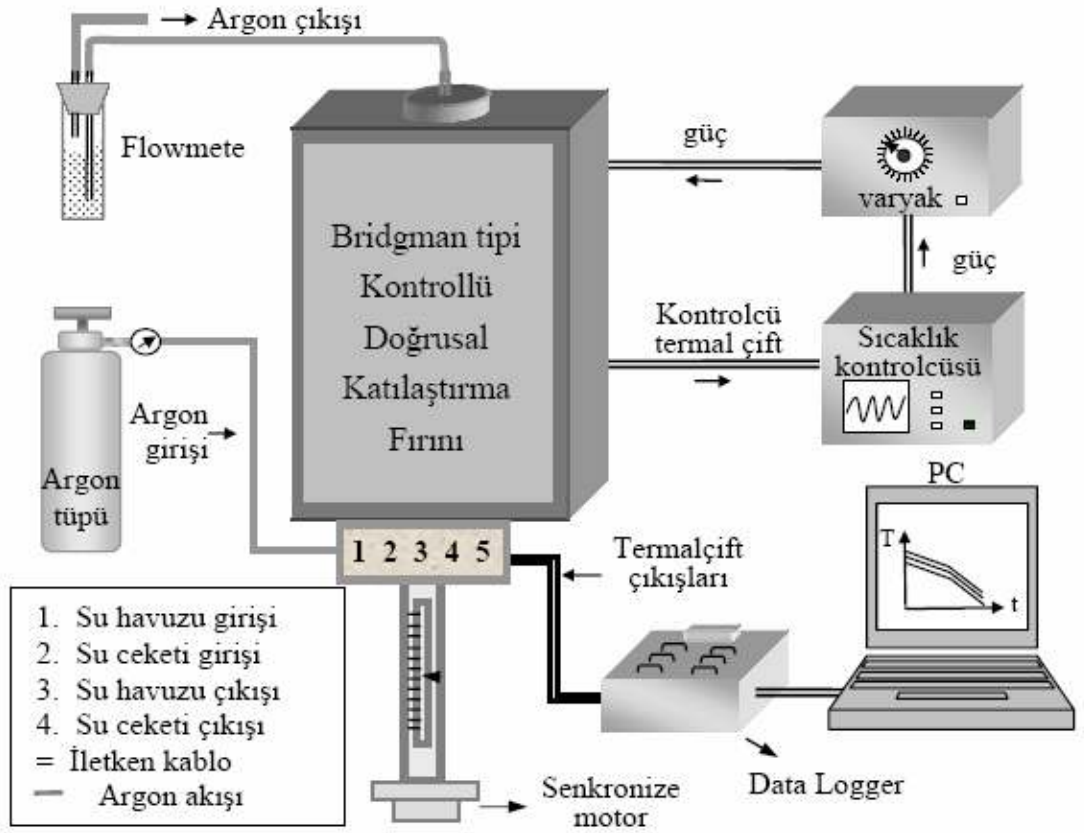
şeklinde üç farklı tarzda $\mu\text{m/s}$ cinsinden hesaplanmıştır.

3.6. Kontrollü Doğrusal Katılaştırma Fırınında Bir Deneyin Yapılışı

Kontrollü doğrusal katılaştırmada deney sistemi Şekil 3.18'de görüldüğü gibi kontrollü doğrusal katılaştırma fırını, sıcaklık kontrol ünitesi (Euroterm 815 S), varyak, senkronize motor, hız kontrol ünitesi, argon akış sistemi, Data Logger, bilgisayar, termal çiftler ve kronometreden oluşmaktadır.

Öncelikle grafit potalara dökümü yapılan numunelerden biri alınarak, alt tarafındaki kılcal alümina boruların içerisine üç adet 0,50 mm çapında yalıtımlı K-tipi termal çift yerleştirilmiştir. Daha sonra bu grafit pota içerisindeki alaşım, numune tutucusuna yerleştirilerek sürücü ve soğutucu sistem vidalarla birbirine bağlanmıştır. Burada ısının

homojen bir şekilde numuneye etkimesi için numunenin, soğutucu sistem üzerinde bulunan grafit silindirin ekseninde konumlanmasına özen gösterilmiştir. Numune fırın içerisine yerleştirildikten sonra termal çift çıkışları yalıtımlı kablolarla bağlanarak, bağlantı uçları, içerisinde buz-su karışımı bulunan termos içindeki etil alkolün bulunduğu cam tüp borular içerisine yerleştirilmiştir (referans sıcaklığını 0°C yapmak için). Yalıtımlı kabloların soketlere lehimlenmiş diğer uçları ise bilgisayar bağlantısı yapılmış Data Logger'a bağlanmıştır.



Şekil 3.18. Deney sisteminin blok diyagramı.

Daha sonra soğutma havuzu ve soğutma ceketinin giriş ve çıkış hortumlarının bağlantıları ve istenilen hızdaki senkronize motorun bağlantısı yapılarak deney düzeneği kurulmuştur. Bu aşamadan sonra kontrollü doğrusal katılaştırma fırını istenilen sıcaklığa ayarlanmış ve fırına güç veren varyak kademe kademe artırılmıştır. Bu esnada, seviye suyu açılarak havuzun dolması sağlanmıştır. 2'lik motor kullanılarak numune aşağıdan yukarı doğru dolu havuzun içerisine itilerek numune homojen olarak üstten eritilmiştir. Daha sonra istenilen katılaştırma hızı belirlenerek 2'lik motor çıkartılmış ve yerine

istenilen hızı sağlayacak senkronize motor takılmıştır. Gerekli durumlarda sistemin kararlı hale gelmesi beklenilmiş ve kararlı hale geldiğinde motor çalıştırılarak doğrusal katılaştırma deneyi başlatılmıştır. Numune istenildiği kadar katılaştırılarak “quench“ işlemiyle deney tamamlanmıştır. Bu işlemler devam ederken eşzamanlı olarak her bir termal çiftten ölçülen sıcaklıkların kaydedilmesi sağlanmıştır. Böylece sıcaklık gradyantlerinin bilgisayar tarafından hesaplanması sağlanmıştır.

3.7. Metalografik İşlemler

Numunenin metalografik işlemleri katılaştırılan numunenin kalıplanması, zımparalanması, mekanik olarak parlatılması ve dağlanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu işlemler, detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

3.7.1. Numunenin Kalıplanması

Numune, Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında istenildiği kadar katılaştırıldıktan sonra motor bağlantı vidaları sökülerek aniden su havuzu içine çekilir ve “quench” yapılır. Fırından çıkarılan numune grafit çubuktan ayırt edildikten sonra, zımparalanarak katı-sıvı ara yüzeyi mikroskop yardımı ile tespit edilmiştir. 4 mm çapında 150 mm uzunluğunda elde edilen doğrusal katılaştırılmış numunelerde katı-sıvı arayüzeyi, numunenin altından yaklaşık 90,5-120 mm yukarıda gözlemlenmiştir. Katı-sıvı arayüzeyi belirlenen numunedan quench noktası açıkça görülecek şekilde boyuna ve enine kesitler alınarak uygun kalıplara parlatılacak yüzeyleri alta gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Daha sonra soğuk kalıplama malzemesi (Epoxy-resin) uygun miktarlarda hazırlanarak kalıp kutusuna dökülmüş ve katılaşmaya bırakılmıştır.

Numunelerin enine ve boyuna kesitlerinin kalıplanmasının sebebi, zımparalama ve parlatma sırasında numuneyi elle tutmada kolaylık sağlamak içindir. Numunelerin birbirine karışmaması için kalıplama işlemi sırasında uygun kodlamalar yapılmıştır.

3.7.2. Numunenin Zımparalanması

Numune uygun bir şekilde el testeresi ya da minitom kesme aletiyle kesildikten sonra oluşan pürüzleri gidermek için öncelikle zımparalama işlemine tabi tutulur.

Zımparalama işlemi kaba ve ince zımparalama olmak üzere iki aşamada yapılır. Numune öncelikle 120, 240, 360, 600, 1000 ve 2400 gridli zımpara kağıtları ile her birinde 3-5 dakika olmak üzere zımparalanır. Her kademenin numune yüzeyinde oluşturduğu şekil bozukluğu ve çizikleri en aza indirmek amacı ile grid numarası küçük olandan büyük olana doğru zımparalama yapılmıştır. Zımparalama işlemi sırasında numune yüzeyinin ısınmasını önlemek ve numune yüzeyi ile zımpara arasında daha iyi bir temas sağlamak amacıyla su soğutması kullanılmıştır. Zımparalama sırasında numunenin her bölgesine eşit kuvvet uygulanmalıdır. Aksi takdirde numune zımparalanırken farklı bölgelerine elle farklı kuvvet uygulanırsa numune yüzeyi homojen bir şekilde düzgünleştirilmez ve mikro yapının mikroskoptaki görüntüsü net olmaz.

3.7.3. Numunenin Mekanik Parlatılması

Numunenin zımparalama işleminden sonra parlatma aşamasına geçilmiştir. Parlatma işlemi, dönüş hızı ayarlanabilen mekanik parlatma aletinde yapılmıştır. Numunelerin parlatılmasında üzerine parlatma kumaşları yapıştırılmış 200 mm çapında yuvarlak diskler kullanılmıştır. Parlatma kumaşları parlatılacak numunenin özelliğine göre seçilmiştir. Parlatma sırasıyla 6, 3 ve 1 µm tane büyüklüğüne sahip Struers marka elmas pastalar kullanılarak yapılmıştır. Her bir pasta için ayrı disk kullanılmıştır. Numune ile parlatma kumaşı arasında iyi bir temas olması ve nem miktarının ayarlanması için yağlayıcı kullanılmıştır.

3.7.4. Numunenin Dağlanması

Numune zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçtikten sonra pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Bu durumda numune her bölgesinden ışığı eşit şekilde dağıttığından dolayı numunedeki mikroyapılar mikroskop altında ayırt edilemez. Bu nedenle yapıda kontrast oluşturulması gerekir. Mikroyapının ortaya çıkarılabilmesi için uygulanan yöntem genel olarak dağlama (etching) denilmektedir. Dağlama elektrolitik veya kimyasal olabilir. Bu çalışmalarda kimyasal dağlama işlemi yapılmıştır. Al-Zn alaşımında, 5 ml H_2O , 5 ml HF, 30 ml HNO_3 ve 60 ml HCl çözeltisinden oluşan dağlayıcı kullanılmıştır. Kimyasal dağlama numunenin yüzeyine uygun bir çözelti tatbik edilerek

yapılmaktadır. Numunelerin dağlanmasında kullanılan bazı kimyasal dağlama malzemelerinin fotoğrafları Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. Numunelerin dağlanmasında kullanılan bazı dağlama malzemeleri.

Kimyasal dağlama işleminde önemli olan nokta uygun dağlama çözeltilisini seçmek ve dağlama süresini tespit edebilmektir. Genellikle dağlama işlemi numuneyi dağlama çözeltilisine daldırarak yapılmaktadır. Dağlama işlemi sonunda parlatılmış yüzey çözeltilinin etkisi ile matlaşır. Bu durum dağlamanın gerçekleşmiş olduğunu gösterir. Dağlamanın yeterli olup olmadığına mikroskopla bakılarak karar verilir. Dağlama, tane sınırlarının açığa çıkarılması, fazların tayin edilmesi ve dislokasyonların belirlenmesi gibi iŐlemlerde kullanılmaktadır.

3.7.5. Numunenin İncelenmesi

Doğrusal katılaştırılan numunenin tüm metalografik işlemleri tamamlandıktan sonra mikroyapıların incelenmesi Olympus BH2 marka optik mikroskop, buna bağlı LG Honeywell marka renkli CCD kamera ve Hauppauge Win TV programı yüklü bir bilgisayardan oluşan görüntü analiz sistemi ile yapılmıştır. Görüntü analiz sisteminin fotoğrafı Şekil 3.20’de görülmektedir. Mikroyapıları incelenecek numuneler lam üzerine sabitlenerek mikroskop tablasına yerleştirilmiştir. Kamera ile bilgisayara aktarılan mikroyapı görüntüleri Hauppauge Win TV programı yardımıyla incelenmiş ve uygun yerler farklı objektiflerle (x2.5, x5, x10, x20) fotođraflanmıŐtır. Çekilen dijital fotoğraflar Adobe Photoshop programında açılmış ve bu fotoğraflardan dendritik

mikroyapı parametreleri ölçülmüştür. Ayrıca numunelerin boyuna kesitlerinden elde edilen mikroyapılar taramalı elektron mikroskobu (SEM)'de fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 3.20. Görüntü analiz sistemi.

3.8. Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde Al-Zn ikili alaşımında katılaştırma işlem parametreleri (V, G, C_0) ile dendritik mikro yapı parametreleri (λ_1, λ_2, R) nin nasıl değiştiğini incelemek amacı ile kurulan deney sisteminin özellikleri tanıtılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan vakumlu eritme-döküm fırını, sıcak döküm fırını ve kontrollü doğrusal katılaştırma fırınları hakkında bilgi verilmiştir. Numune hazırlama aşamaları üzerinde durulmuştur. Kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında bir deneyin yapılış aşamaları ve numune üzerinde yapılan metalografik işlemler anlatılmıştır.

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR, YORUM VE TARTIŞMA

Al-Zn ikili alaşımının sabit sıcaklık gradyentinde, beş farklı katılaştırma hızı ve iki farklı alaşım kompozisyonunda doğrusal katılaştırılması yapılmıştır. Doğrusal katılaştırılan alaşımların quench edilmiş (ani olarak katılaştırılmış) katı-sıvı ara yüzeyinden çekilen fotoğraflardan, λ_1 (birinci dendrit kolları arası mesafe), λ_2 (ikinci dendrit kolları arası mesafe) ve R (dendrit uç eğrilik yarıçapı) olarak karakterize edilen dendrit mikro yapı parametrelerinin ölçümü yapılmıştır. Takip edilen aşamaların öncelikli amacı, G (sıcaklık gradyenti), V (katılaştırma hızı) ve C_0 (alaşım bileşimi) gibi katılaştırma işlem parametrelerini kontrolümüz dahilinde değiştirerek, malzemenin mekanik özelliklerine iyi derecede etki eden mikro yapı parametrelerinin kontrolünü sağlamak ve istenilen özellikte malzeme üretiminde çalışmalara yön vermek olduğu için katılaştırma işlem parametrelerinin kontrol edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu bölümde öncelikle mikro yapı parametrelerinin fiziksel anlamlarının ne olduğu ve nasıl ölçüldüğü konusunda bilgi verilecek ardından katılaştırma işlem parametreleri ile dendrit mikro yapı parametrelerinin nasıl değiştiğini veren deneysel sonuçlar gösterilecektir. Çalışmalar sonunda elde edilen deneysel veriler, ilgili teorik modellerle [33-41] ve literatürdeki benzer deneysel çalışmaların sonuçları [52,53, 54] ile karşılaştırılacaktır.

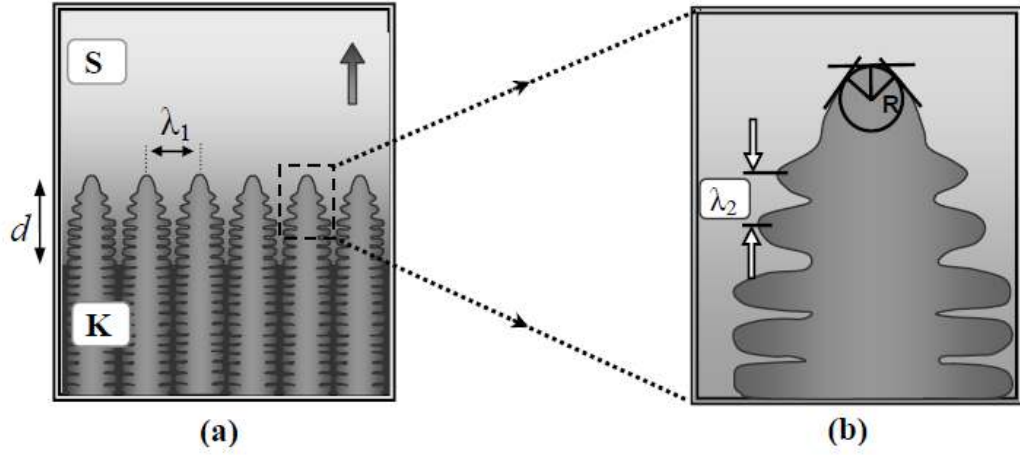
4.1. Dendritik Mikro Yapı Parametreleri Ve Ölçümleri

“Dendrite” kelimesi Yunan’ca kökenli olup dallanmış yapı anlamına gelir [21, 22]. Dendritik yapılar ise, λ_1 (birinci dendrit kolları arası mesafe), λ_2 (ikinci dendrit kolları arası mesafe), R (dendrit uç eğrilik yarıçapı) ve d (yumuşak bölge derinliği) parametreleri ile karakterize edilir. Burada R ve λ_2 dendrit ucu mikroyapı

parametreleri, λ_1 ve d ise çevresel dendrit mikroyapı parametreleri olarak adlandırılır. Kontrollü katılaştırma fırını kullanılarak Al-Zn ikili alaşımında elde edilen numunelerin tamamının öncelikle optik mikroskopta ve daha sonra SEM mikroskobunda görüntüleri alınmış ve ölçümleri yapılmıştır.

4.1.1. Dendrit Birinci Kollar Arası Mesafe (λ_1) Ve Ölçülmesi

Dendrit birinci kollar arası mesafe Şekil 4.1' de gösterildiği gibi en yakın iki dendrit gövdesinin merkezden merkeze olan mesafesi olarak tanımlanır. λ_1 'in ölçümü, alan hesabı metodu [48] ve lineer kesişim metodu [49] olmak üzere iki farklı yoldan yapılmıştır. Lineer kesişim metodu ve alan hesabı metodu ile bulunan sonuçlar ve ilgili grafikler Ek-2'de verilmiştir. Alan hesabı metoduyla numunenin enine kesitinden çekilen fotoğraflardan ölçülen birinci kollar arası mesafe $\lambda_1 = (1/M)(A/N)^{0.5}$ bağıntısı kullanılarak hesaplanır [48]. Burada M , büyütme faktörü; A , ölçüm yapılan alan ve N , A alanı içerisindeki dendrit gövde sayısıdır. Birinci kollar arası mesafenin ölçümünde kullanılan fotoğraflar numunenin farklı bölgelerinden çekilmiştir. λ_1 quench ara yüzeyine olan uzaklığa bağlı değildir ancak, dendritler arasında sıvı fazın fazla olması birinci kollar arası mesafenin daha sağlıklı bir şekilde ölçülmesine imkan sağladığı için ölçüm yapılan enine kesitin arayüze olan uzaklığının $\leq 2000 \mu\text{m}$ olmasına özen gösterildi. Doğrusal katılaştırılarak elde edilen numunelerin boyuna kesitlerindeki çok sayıda fotoğraf alınmıştır. Şekil 4.1 (a)' da görüldüğü gibi lineer kesişim metoduyla numunenin boyuna kesitinden çekilen fotoğraflardan birinci kollar arası mesafe λ_1 ölçümü, komşu iki dendrit gövdesinin merkezinden merkezine olacak şekilde yapılmıştır.



Şekil 4.1.(a) Birinci kollar arası mesafe λ_1 ve yumuşak bölge derinliği d ; (b) dendrit uç yarıçapı R ve ikinci kollar arası mesafe λ_2 'nin şematik gösterimi.

Enine kesitten alınan fotoğraflardan çok sayıda λ_1 ölçümü yapılabildiği için birinci kollar arası mesafenin ölçümünde alan hesabı metodu lineer kesişim metoduna göre daha çok tercih edilmekte ve daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.

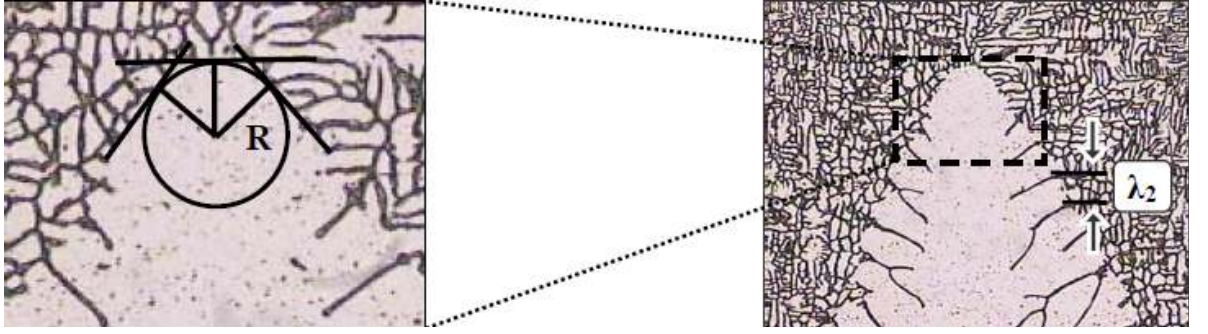
4.1.2. Dendrit İkinci Kollar Arası Mesafe (λ_2) Ve Ölçülmesi

İkinci kollar arası mesafe (λ_2) dendritin ucuna yakın bölgede başlar. İkinci kollar arası mesafe λ_2 , Şekil 4.1(b)'de görüldüğü gibi, ana dendrit gövdesinden yana doğru büyüyen ikinci kollar arasındaki mesafedir. İkincil kolların difüzyon alanları komşu dendritlerin kollarının difüzyon alanları ile karşılaşınca büyümeyi durdururlar ve kabalaşmaya başlarlar. Kabalaşma nedeniyle ikinci kollar arası mesafe, dendrit ucundan dendrit köküne doğru incelendiğinde sabit değildir. Bu nedenle λ_2 ölçümü, sadece dendrit ucundaki ilk kabalaşma olmayan ikici kollar arasında yapılmıştır.

4.1.3. Dendrit Uç Eğrilik Yarıçapı (R) Ve Ölçümleri

Alaşım katılaştırıldıktan sonra, dendrit uç yarıçapı malzeme özelliğini etkilemez. Ancak dendritik yapıda oluşan diğer mikroyapıları belirlemesi açısından dendrit uç yarıçapı oldukça önemlidir. Diğer tüm mikroyapılar dendrit uç yarıçapı ile orantılı olmasının yanı sıra mikroyapıların gelişiminide kontrol eder [34]. Şekil 4.2' de şematik olarak

gösterilen bir dendrit yapısında görüldüğü gibi uç kısım, parabolik şekle sahiptir. Bu uç kısma birkaç noktadan tegetler çizilip, tegetlerin eğri ile temas noktalarından çizilen diklerin kesim noktası, o uç eğrisine ait çemberin merkezini vermektedir. Çizilen çemberin yarıçapı R , dendrit uç yarıçapı olarak bilinir.



Şekil 4.2 Dendrit uç yarıçapının şematik gösterimi[50].

Bu tez çalışmasında, dendrit uç yarıçapı Al-%7ağ.Zn alaşımında 4mm'lik numunelerde $V=15.87 \mu m/s$, $V=79.36 \mu m/s$ ve $V=158.73 \mu m/s$ için, 9,5 mm'lik numunelerde ise, $V=7.93 \mu m/s$ ve $V=15.87 \mu m/s$ için R ölçümü yapılmış diğer numunelerde yapılmamıştır.

4.2. Ölçülen Mikroyapı Parametreleri Ve Değerlendirilmesi

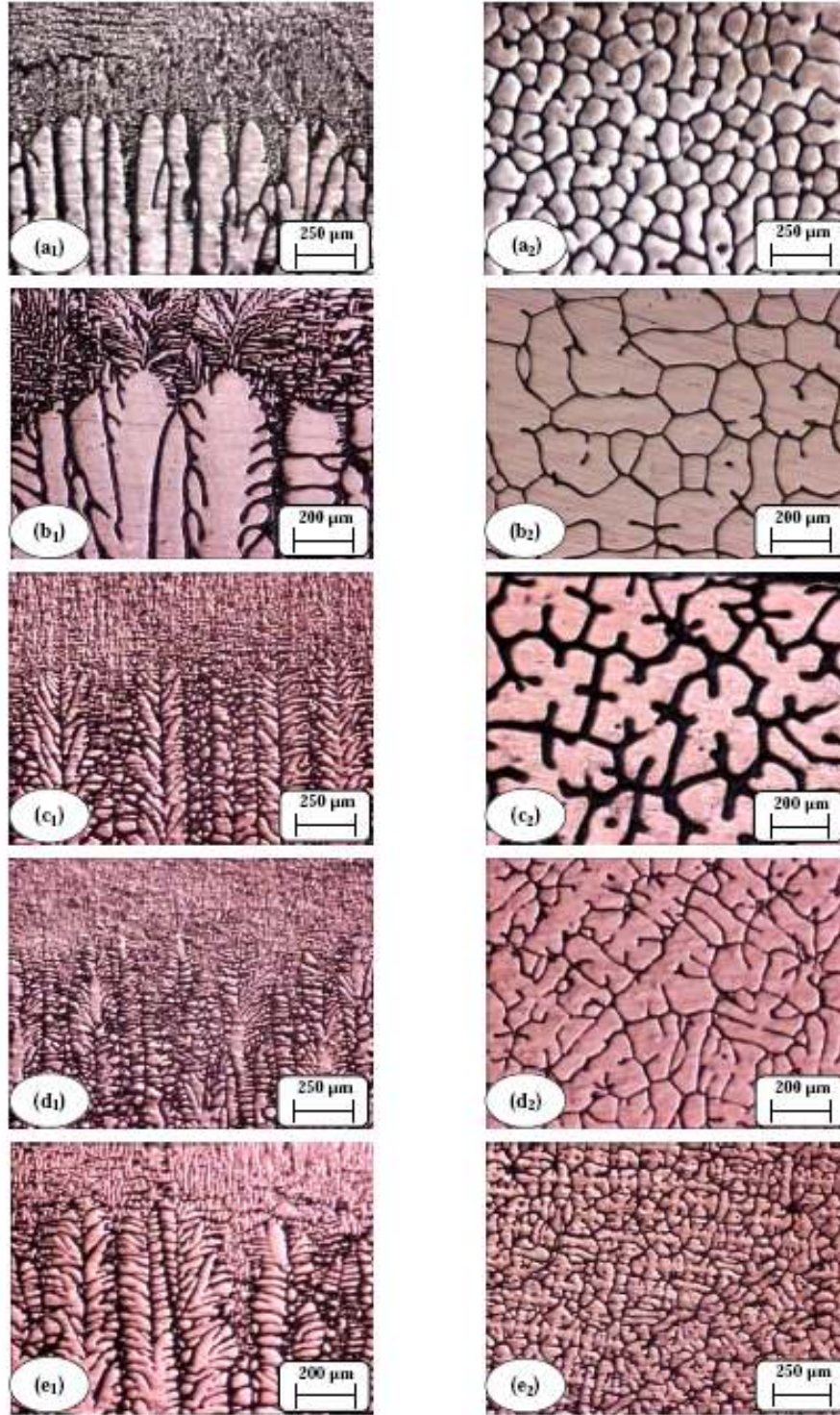
Al-Zn ikili alaşımının iki farklı kompozisyonda ve beş farklı katılaştırma hızında doğrusal olarak katılaştırılmasıyla elde edilen numunelerde oluşan dendritlerin mikroyapı parametrelerini ölçmek için numune gerektiği kadar (60mm-90mm) katılaştırıldıktan sonra quench edilmiş ve katı- sıvı arayüzeyini belirgin hale getirmek amacıyla sırasıyla kalıplama, zımparalama, parlatma ve dağlama gibi metallografik işlemler uygulanmıştır. Bu işlemlerin ardından metal mikroskopunda farklı objektiflerle (2.5x, 5x, 10x, 20x) numunenin enine ve boyuna kesitinden çok sayıda fotoğraf çekilmiştir. Her bir objektife ait büyütme faktörü, M , aynı objektif ile çekilen gratikula fotoğrafında belirli bir mesafenin ölçülmesi ile bulunmuştur. Adobe Photoshop programı kullanılarak mikroyapı parametrelerinin ölçümü yapılmıştır. Mikro yapıların gerçek değeri, çekilen fotoğraf üzerinde iki nokta arasındaki mesafenin mm cinsinden ölçülmesi ve fotoğraf çekimi yapılan objektife ait büyütme faktörüne bölünmesiyle elde

edilmiş ve birimi μm 'ye çevrilmiştir. Dendrit mikroyapı parametrelerinin ölçümü yapılan dijital fotoğraflardan bazıları Şekil 4.3-4.5'de gösterilmiştir.

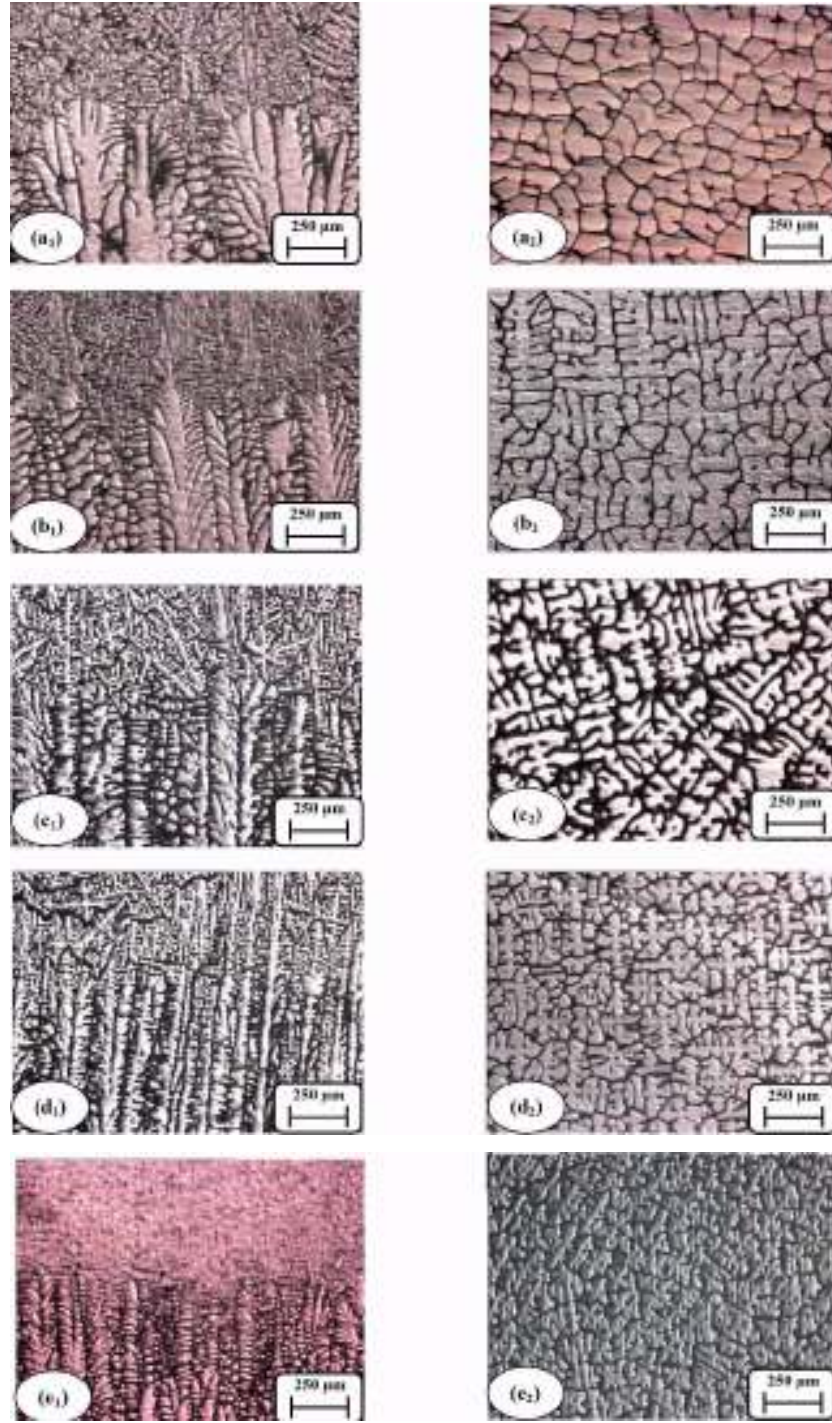
4.2.1. Al-Zn İkili Alaşımlarında V ve C_0 'ın R , λ_2 Ve λ_1 'e Etkisi

Sabit sıcaklık gradyentlerinde ($G=2,81 \pm 0,69 \text{ K.mm}^{-1}$ ve $G=4,22 \pm 1,62 \text{ K.mm}^{-1}$) iki farklı kompozisyonda (Al-%7ağ.Zn ve Al-%20ağ.Zn) ve her kompozisyonda beş ayrı katılma hızında ($V=7,93-158,73 \mu\text{m/s}$) olmak üzere toplam 15-20 adet Al-Zn ikili alaşımına ait numune doğrusal katılaştırılmıştır. Al-Zn ikili alaşımlarının quench edilmiş katı-sıvı arayüzeyinden çekilen fotoğraflarda R , λ_1 ve λ_2 dendrit mikroyapı parametrelerinin ölçümleri yapılmıştır. R , λ_1 ve λ_2 ölçümleri yapılan dijital fotoğraflardan bazıları Şekil 4.3-5'de gösterilmiştir. Mikroyapı parametrelerinin ölçüm sonuçları Tablo 4.3'de verilmiştir. Al-%7ağ.Zn alaşımında $V = 7,93 \mu\text{m/s}$ katılma hızında elde edilen numunelerde, hücrel-dendritik yapı geçişi gözlemlendiğinden bu numunelerde R , λ_2 ölçümü yapılmamıştır. Ayrıca $V=79,36 \mu\text{m/s}$ ve $V=158,73 \mu\text{m/s}$ katılma hızlarında elde edilen numunelerde, dendritik mikroyapıların oldukça küçük olması ve dendrit ucunda quench anında küçüğe olsa büyümenin olması nedeni ile sağlıklı R ölçümü yapılamayacağı için bu numunelerde R ölçümü yapılmamıştır.

Bu tez çalışmasında, ayrıca 12,5mm dış çapına (9.5mm iç çapına) sahip numunelerde de katılaştırma işlem parametreleri (V, C_0, G) ile dendrit mikroyapı parametreleri ($\lambda_1, \lambda_2, d, R$) 'nin değişimi incelenmiş ve 6,15 mm dış çapına (4 mm iç çapına) sahip numunelerle karşılaştırılması yapılmıştır.



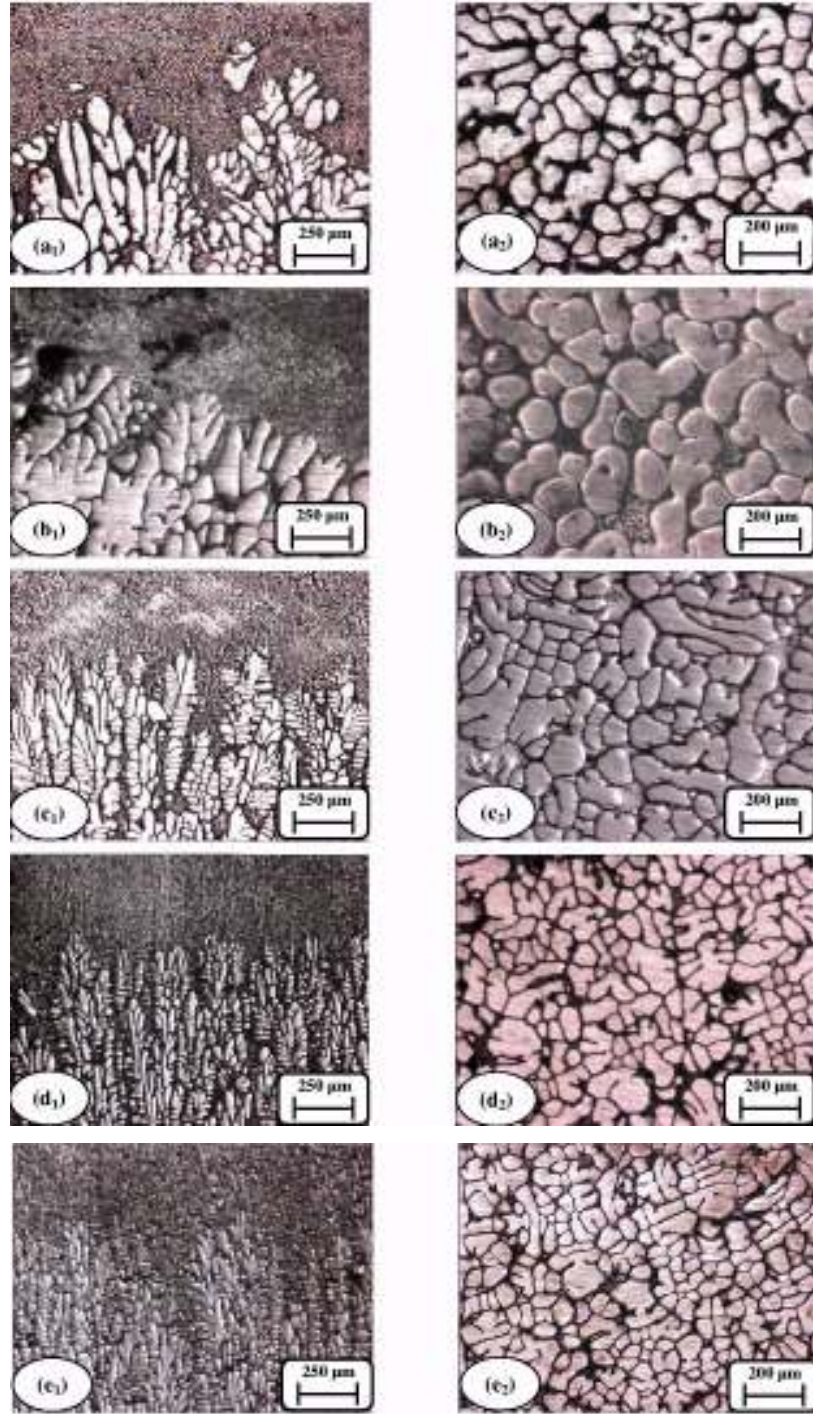
Şekil 4.3. Sabit sıcaklık gradyentinde ($G=2,81 \pm 0,69 \text{ K.mm}^{-1}$) 5 farklı katılaştırma hızlarında Al-%7ağ.Zn alaşımının 4 mm çapındaki numunelerde doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan dendritik yapılar (a_1) $V_1=7,93 \mu\text{m/s}$, (b_1) $V_2=15,87 \mu\text{m/s}$, (c_1) $V_3=39,68 \mu\text{m/s}$, (d_1) $V_4=79,36 \mu\text{m/s}$, (e_1) $V_5=158,73 \mu\text{m/s}$, (burada a_1, b_1, c_1, d_1 ve e_1 boyuna kesitleri, a_2, b_2, c_2, d_2 ve e_2 ise aynı numunenin enine kesitlerini göstermektedir).



Şekil 4.4 Sabit sıcaklık gradyentinde ($G=2,81 \pm 0,69 \text{ K.mm}^{-1}$) 5 farklı katılaştırma hızlarında Al-%7ağ.Zn alaşımının 9.5 mm çapındaki numunelerde doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan dedritik yapılar (a_1) $V_1=7,93 \mu\text{m/s}$, (b_1) $V_2=15,87 \mu\text{m/s}$, (c_1) $V_3=39,68 \mu\text{m/s}$, (d_1) $V_4=79,36 \mu\text{m/s}$, (e_1) $V_5=158,73 \mu\text{m/s}$, (burada a_1 , b_1 , c_1 , d_1 ve e_1 boyuna kesitleri, a_2 , b_2 , c_2 , d_2 ve e_2 ise aynı numunenin enine kesitlerini göstermektedir).

Tablo 4.1 Al-% 7ağ.Zn alaşımında sabit G'de farklı iki çaptaki numunelerde λ_2 'nin V ile değişimi.

Alaşım (Al- %7ağ Zn)	4mm'lik numuneler	9.5mm'lik numuneler
Hızlar ($\mu m/s$)	(λ_2) (μm)	(λ_2) (μm)
V₁=7.93	(Hücresel şekil 4.1 a)	38.31 ± 5.19
V₂=15.87	35.54 ± 10.41	34.91 ± 12.76
V₃=39.68	25.66 ± 7.32	27.48 ± 6.50
V₄=79.36	20.14 ± 4.67	20.98 ± 5.19
V₅=158.73	17.79 ± 3.69	16.82 ± 3.25



Şekil 4.5. Sabit sıcaklık gradyentinde ($G=4.22 \pm 1,62 \text{ K.mm}^{-1}$) 5 farklı katılaştırma hızlarında Al-%20ağ.Zn alaşımının 4 mm çapındaki numunelerde doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan dedritik yapılar (a_1) $V_1=7,93 \mu\text{m/s}$, (b_1) $V_2=15,87 \mu\text{m/s}$, (c_1) $V_3=39,68 \mu\text{m/s}$, (d_1) $V_4=79,36 \mu\text{m/s}$, (e_1) $V_5=158,73 \mu\text{m/s}$, (burada a_1, b_1, c_1, d_1 ve e_1 boyuna kesitleri, a_2, b_2, c_2, d_2 ve e_2 ise aynı numunenin enine kesitlerini göstermektedir).

Tablo 4.2 Al-Zn alaşımında sabit G'de λ_{1or} değerleri.

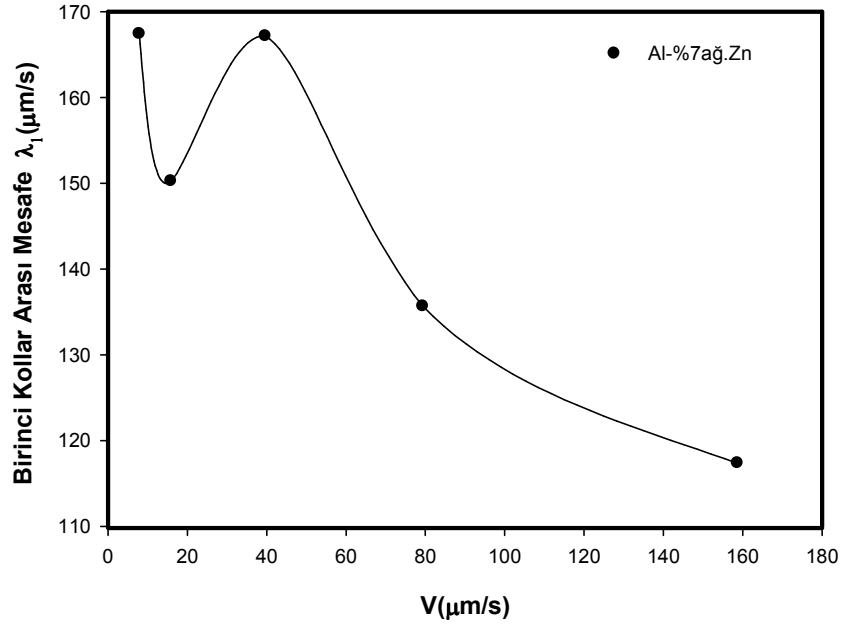
Alaşım $\lambda_1(\mu\text{m})$ Hız ($\mu\text{m/s}$)	Al-%7ağ.Zn	Al-%20ağ.Zn
	$\lambda_{1or}(\mu\text{m})$	$\lambda_{1or}(\mu\text{m})$
7,93	167,41 \pm 7,39	153,07 \pm 22,13
15,87	150,25 \pm 3,34	137,83 \pm 4,24
39,68	167,16 \pm 3,14	107,75 \pm 0,41
79,36	135,66 \pm 7,50	88,24 \pm 12,90
158,73	117,38 \pm 18,20	76,79 \pm 18,24

λ_{1or} : Numunenin enine kesitinde alan hesabı ve lineer keşişim metodu ile hesaplanan λ_1 değerlerinin ortalama değeridir.

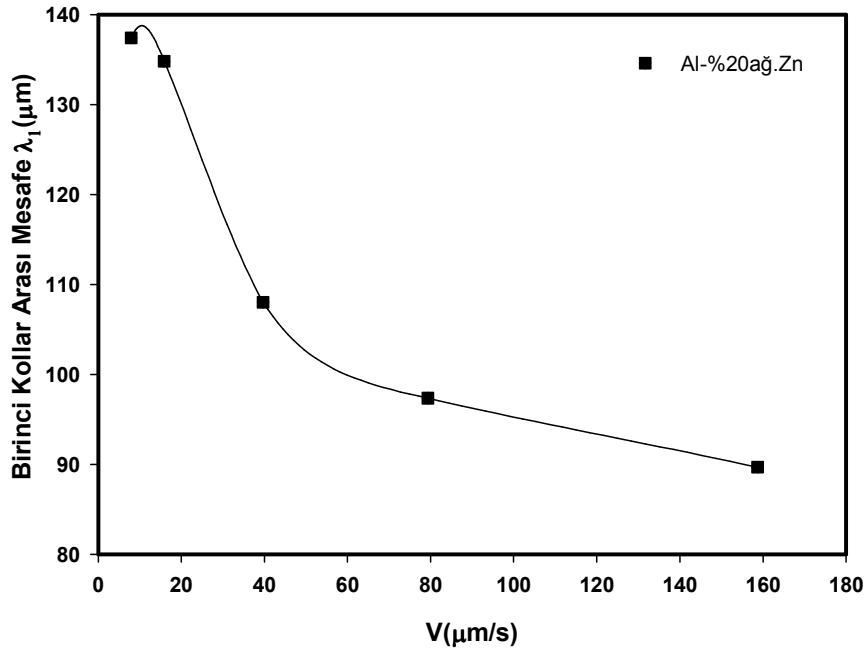
Tablo 4.3 Al-Zn alaşımında sabit G'de λ_{1or} 'nın V ve C_{0-Zn} ile değişimi

Alaşım	Al-%7 ağ Zn				Al-%20 ağ Zn	
	4mm		9.5mm		4mm	
Çap						
$\lambda_1(\mu m)$						
$\lambda_2(\mu m)$	$\lambda_{1or}(\mu m/s)$	$\lambda_2(\mu m)$	$\lambda_{1or}(\mu m/s)$	$\lambda_2(\mu m)$	$\lambda_{1or}(\mu m/s)$	$\lambda_2(\mu m)$
V ($\mu m/s$)						
V₁=7.93	167,418±7,39	Hücresele	199,97±3,33	38.31 ± 5.19	153,075±22,13	Hücresele
V₂=15.87	150,255±3,34	34.54 ± 10.41	160,83±4,93	34.91 ± 12.76	137,83±4,24	50.78 ± 18.88
V₃=39.68	167,169±3,14	25.66 ± 7.32	169,54±8,72	27.48 ± 6.5	107,75±0,41	27.45 ± 3.33
V₄=79.36	135,662±7,50	20.14 ± 4.67	130,75±8,37	20.98 ± 5.19	88,24±12,90	21.50 ± 1.00
V₅=158.73	117,385±18,20	17.79 ± 3.69	114,07±15,60	16.82 ± 3.25	76,79±18,24	18.53 ± 2.59

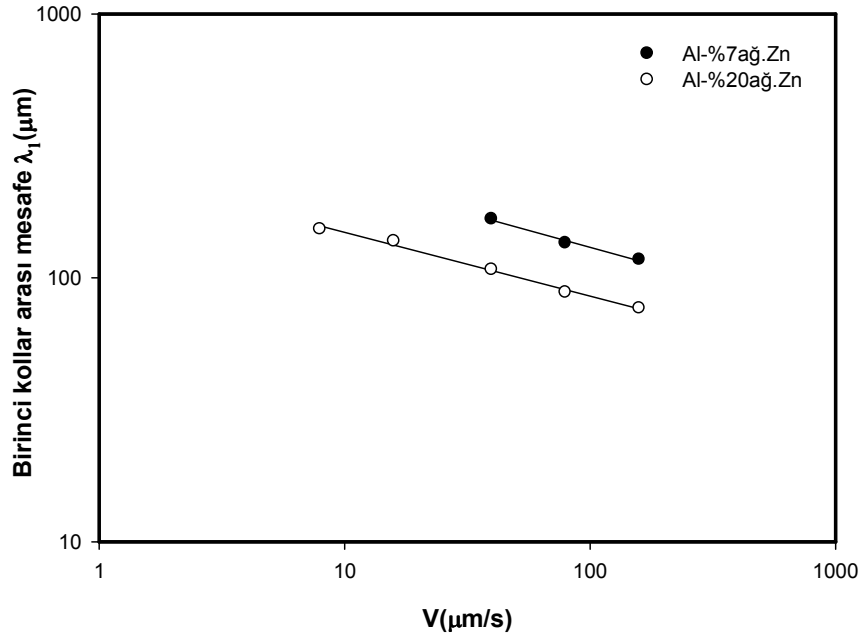
λ_{1or} : Numunenin enine kesitinde alan hesabı ve lineer kesişim metodu ile hesaplanan λ_1 değerlerinin ortalama değeridir.



Şekil 4.6. Al-%7ağ.Zn alaşımının doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 'in katılaştırma hızıyla değişimi (4mm'lik numuneler için).

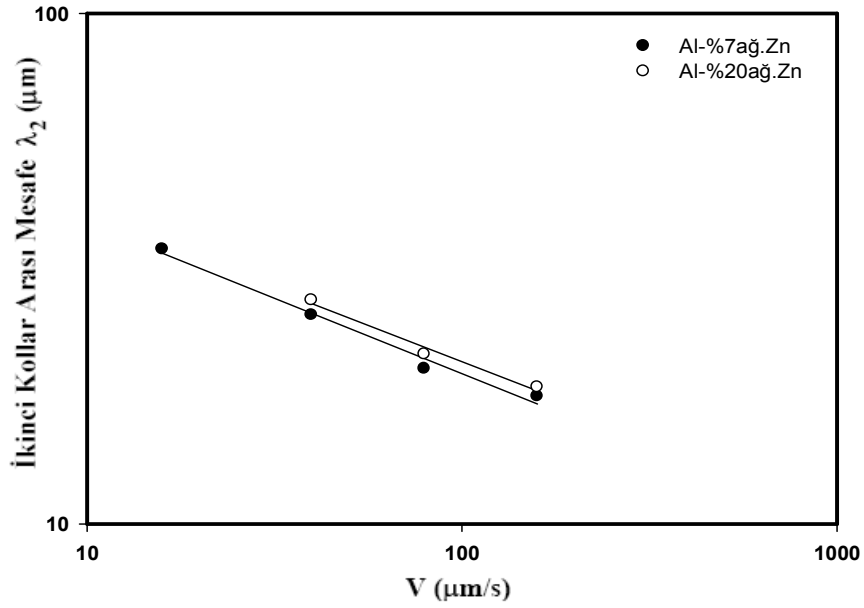


Şekil 4.7 Al-%20ağ.Zn alaşımının doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 'in katılaştırma hızıyla değişimi (4mm'lik numuneler için).



Şekil 4.8 Sabit G 'de doğrusal katılaştırılan Al-Zn alaşımında farklı C_0 'da V ile değişimi. (4mm'lik numuneler için)

Al-Zn ikili alaşımında katılaştırma işlem parametreleri ile mikroyapı parametrelerinin değişimi logaritmik grafiklerde verilmiştir. Şekil 4.6 Al-%7ağ.Zn alaşımında katılaştırma hızı ile birinci kollar arası mesafe (λ_1) 'nin değişimi, Şekil 4.7'de ise Al-%20ağ.Zn alaşımında katılaştırma hızı ile birinci kollar arası mesafe (λ_1)'nin değişimi verilmiştir. Ancak Al-%7ağ.Zn alaşımına ait mikro yapı parametrelerinde $V=7,93 \mu\text{m/s}$ ve $V=15,87 \mu\text{m/s}$ hızları için hücrel-dendritik geçişi olduğundan logaritmik grafiklere dahil edilmemiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.9. Doğrusal katılaştırılan Al-Zn alaşımının sabit G' de λ_2 'nin C_{0-Zn} 'de V ile değişimi.

Al-%20ağ.Zn alaşımında $V = 7,93 \mu m/s$ ve $V = 15,87 \mu m/s$ hızları için yapılar hücresele yakın olduğundan λ_2 değerleri ölçülmemiştir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9).

Tablo 4.4 Al-Zn alaşımında sabit G' de, λ_1 'in farklı C_0 'da V 'ye bağımlılığı.

C_0 (Al-%Xağ.Zn)	λ_1 'in V 'ye bağımlılığı ($\lambda_1 = k_i V^{-a}$)		
	Bağıntı	Sabit(k)	Korelasyon sabiti(r)
7	$\lambda_1 = k_1 V^{-0,25}$	$k_1 = 416,86 \mu m^{1,25} s^{-0,25}$	$r = 0,989$
20	$\lambda_1 = k_2 V^{-0,24}$	$k_2 = 257,03 \mu m^{1,24} s^{-0,24}$	$r = 0,992$

4.3. Elde Edilen Sonuçların Literatürdeki Sonuçlarla Karşılaştırılması

Tablo 4.5’de λ_1 ’in V ve C_0 ile değişimini inceleyen teorik modellerde yer alan V ve C_0 ’ a ait üstel değerler verilmiştir. Tablo 4.4’de ise bu çalışmada elde edilen üstel değerler yer almaktadır. λ_1 ’ in V ’ye üstel bağımlılığında Al-%7ağ.Zn alaşımı için hesaplanan 0,25 üstel değeri teoriden beklenen Hunt, Kurz ve Fisher, Trivedi ve Laxmanan -0,25 [33,39] değeri ile kıyaslandığında bu modellerle birebir uyduğu görülmektedir. λ_1 ’ in V ’ye üstel bağımlılığında Al-%20ağ.Zn alaşımı için hesaplanan 0,24 üstel değeri de yine Hunt, Kurz ve Fisher, Trivedi ve Laxmanan teorik modelleriyle kıyaslandığında bu modellerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5. Literatürde λ_1 ’in V ve C_0 ’ a bağımlılığını gösteren teorik modeller.

Bağıntı	Teorik Model	Kaynak
$\lambda_1 \propto V^{-0,25} G^{-0,5} C_0^{0,25}$	$\lambda_1 = 2.83 [m(k-1)D\Gamma]^{0,25} C_0^{0,25} V^{-0,25} G^{-0,5}$	Hunt[33]
	$\lambda_1 = 4.3 [m(k-1)D\Gamma / k^2]^{0,25} C_0^{0,25} V^{-0,25} G^{-0,5}$	Kurz ve Fisher[34]
	$\lambda_1 = 2.83 [m(k-1)D\Gamma L]^{0,25} C_0^{0,25} V^{-0,25} G^{-0,5}$	Trivedi[35]
	$\lambda_1 = 5.66 [m(k-1)D\Gamma]^{0,25} C_0^{0,25} V^{-0,25} G^{-0,5}$	Laxmanan[38]
$\lambda_1 \propto V^{a_d} G^{-0,6}$ ($-0,58 \leq a_d \leq -0,34$)	$\lambda_1 = 0.156(\Gamma k)^{a_d+0,4} D^{-a_d} \Delta T_0^{-a_d+0,2} (1-V_c/V)^{3/4} G^{-0,6} V^{a_d}$ $a_d = -1.131 - 0.1555 \log_{10} \left(\frac{G\Gamma k}{\Delta T_0^2} \right) - 0.7589 \times 10^{-2} \left[\log_{10} \left(\frac{G\Gamma k}{\Delta T_0^2} \right) \right]$ $V_c = GD/\Delta T_0$	Hunt ve Lu [39]
$\lambda_1 \propto V^{-0,5} G^{-0,5} C_0^{0,25}$	$\lambda_1 = a_1 \left(\frac{16C_0^{1/2} G_0 \epsilon \Gamma D}{(1-k)mGV} \right)^{1/2}$	Bouchard ve Kirkaldy[41]
	$\lambda_1 = 2\pi(kD\Gamma\Delta T_0)(1-V_c/V)^{3/4} G^{-1/2} V^{-1/4}$ $V_c = GD/\Delta T_0$	Ma ve Sahm[42]

Tablo 4.6. Literatürde λ_2 'nin V ve C_0 'a bağımlılığını inceleyen teorik modeller.

Bağıntı	Teorik Model	Kaynak
$\lambda_2 \propto V^{-0,5} C_0^{-0,5}$	$\lambda_2 = (8\Gamma DL / kV \Delta T_0)^{1/2}$	Trivedi ve Somboonsuk[18]
$\lambda_2 \propto V^{-2/3} C_0^{-1/3}$	$\lambda_2 = 2\pi a_2 \left(\frac{4\sigma}{C_0(1-k)^2 \Delta H} \left(\frac{D}{V} \right)^2 \right)^{1/3}$	Bouchard ve Kirkaldy[41]

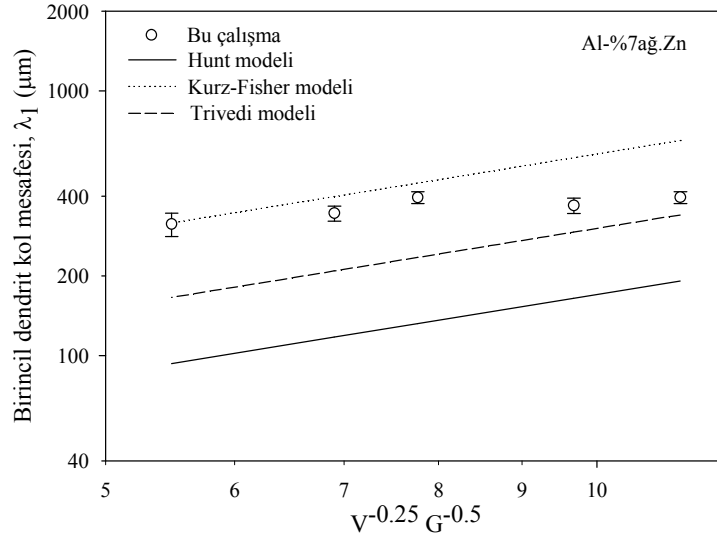
Tablo 4.7 Al-Zn alaşımında sabit G 'de. λ_2 'nin V 'ye bağımlılığı.

λ_2 'nin V 'ye bağımlılığı ($\lambda_2=k_j V^{-b}$)			
C_0 (Al-%Xağ.Zn)	Bağıntı	Sabit(k)	Korelasyon sabiti(r)
7	$\lambda_2=k_5 V^{-0,29}$	$k_5=75,85\mu\text{m}^{1,29} \text{s}^{-0,29}$	$r_5= 0,985$
20	$\lambda_2=k_6 V^{-0,28}$	$k_6=75,85\mu\text{m}^{1,28} \text{s}^{-0,28}$	$r_6= 0,980$

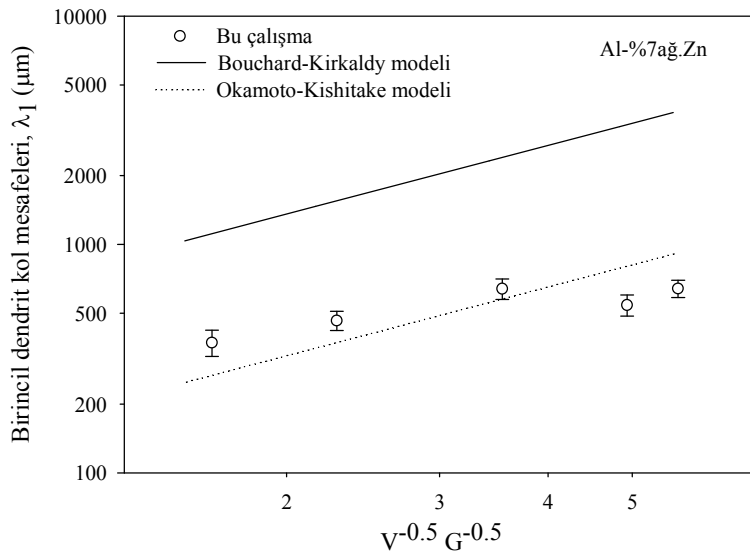
Tablo 4.7'de verilen Al-%7ağ.Zn alaşımına ait λ_2 'nin V 'ye üstel bağımlılığı incelendiğinde teoriden beklenen Trivedi ve Somboonsuk modeline göre -0,50 [18] - 0,29 değeri küçük, Bouchard ve Kirkaldy modeline göre -2/3[41] değeri için yine küçük bulunmuştur. Al-%20ağ.Zn alaşımına ait λ_2 'nin V 'ye üstel bağımlılığı incelendiğinde ise aynı şekilde Trivedi ve Somboonsuk modeline göre -0,50 [18] - 0,28 değeri teoriden beklenen değerden küçük bulunmuştur. Bouchard ve Kirkaldy modeline göre -2/3[41] değerinden -0,28 değeri küçük bulunmuştur.

4.4. Deneysel Sonuçların Teorik Modellerle Karşılaştırılması

Teorik modellerin hesaplamasında kullanılan Al-Zn ait termofiziksel değerler Ek'de verilmiştir. Şekil 4.10 görüldüğü gibi deneysel sonuçlarla Trivedi Modeli [46] ve Kurz-Fisher Modeli [34] karşılaştırıldığında bu iki modelin arasında bir değerde Hunt Modelinden [33] ise biraz yüksek bulunduğu görülmektedir.

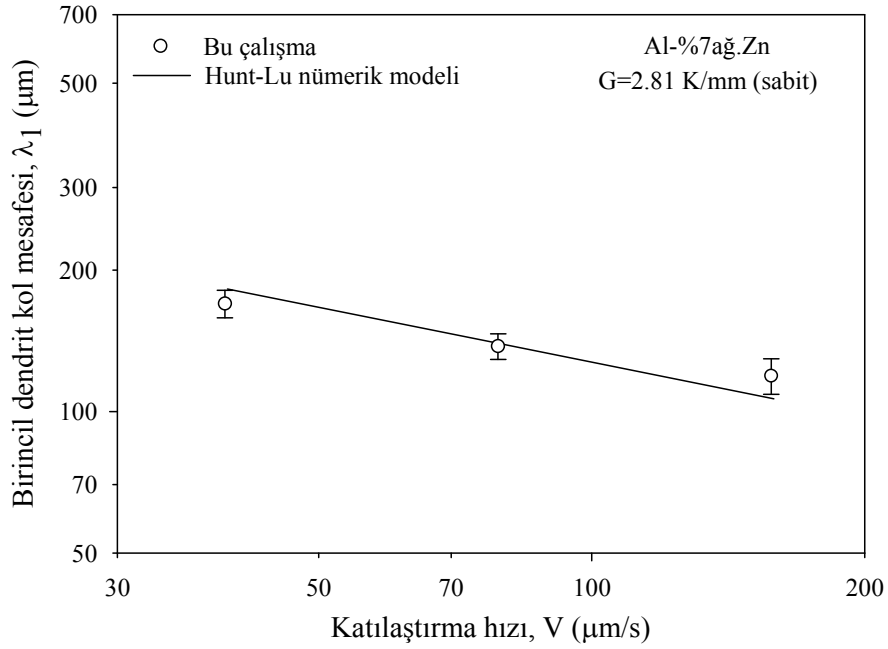


Şekil 4.10. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 verileri ile teorik modellerden elde edilen λ_1 değerlerinin $C_0^{1/4}V^{-1/4}$ ile değişimin karşılaştırılması.(4mm'lik numuneler için)



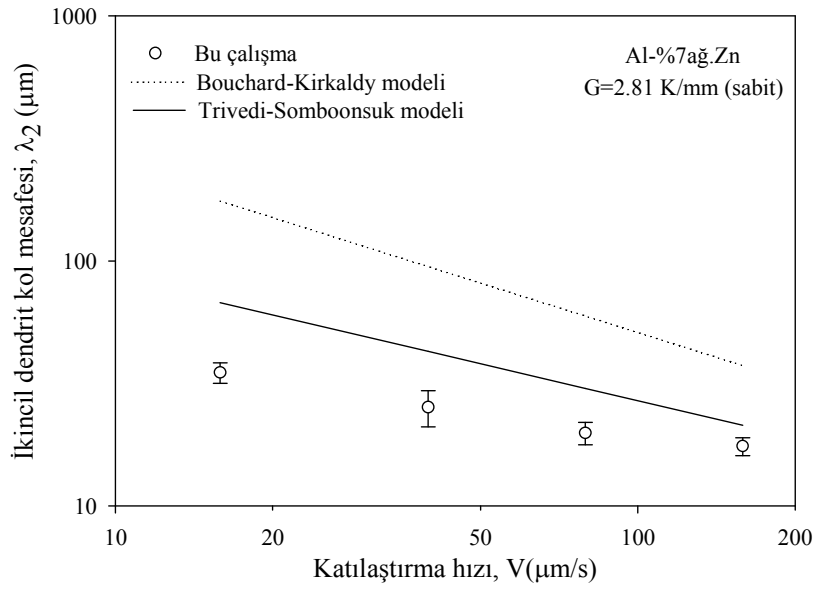
Şekil 4.11. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 verileri ile teorik modellerden elde edilen λ_1 değerlerinin $V^{-1/2}$ ile değişimin karşılaştırılması.

Şekil 4.11’de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar Bouchard-Kirkaldy [41] modelinden küçük bulunmuştur. Okamoto-Kishitake [49] modeline göre sapmalar olmakla birlikte deneysel sonuçlar bu modele göre uyumludur.



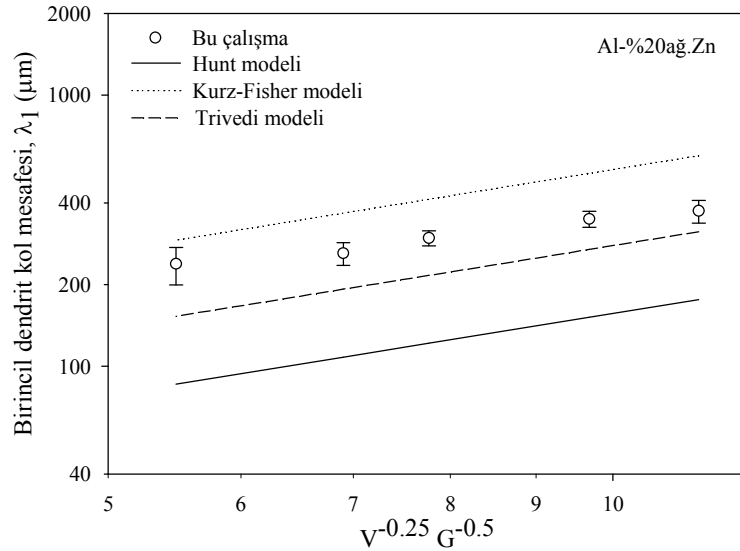
Şekil 4.12. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 verileri ile Hunt-Lu [39] modelinden elde edilen verilerin karşılaştırılması.

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi Al-%7ağ.Zn alaşımına ait deneysel veriler ile Hunt-Lu [39] modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında elde edilen deneysel verilerin bu model ile oldukça uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



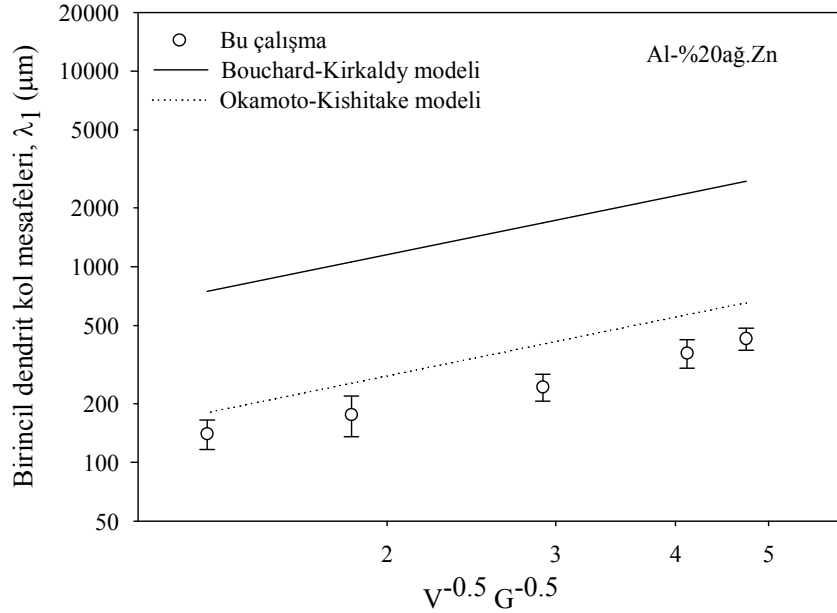
Şekil 4.13. Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_2 verilerinin Bouchard-Kirkaldy [41] ve Trivedi-Somboonsuk [46] modeli ile karşılaştırılması.

Şekil 4.13'de görüldüğü gibi Al-%7ağ.Zn alaşımından elde edilen λ_2 değerleri Bouchard-Kirkaldy [41] modeline göre çok küçük, Trivedi-Somboonsuk [46] modeline göre küçük bulunmuştur.



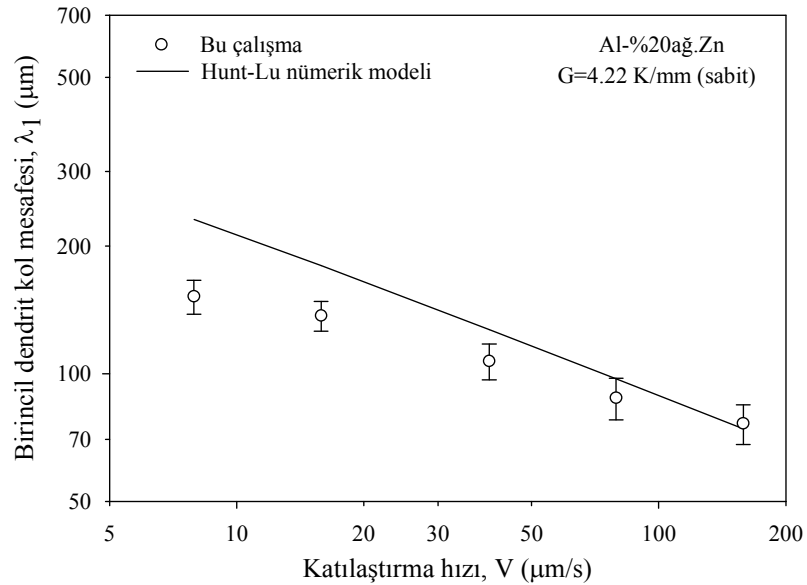
Şekil 4.14. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 değerlerinin $V^{-0.25} G^{-0.5}$ ile değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 4.14'de görüldüğü gibi elde edilen λ_1 değerleri Kurz-Fisher [34] ve Trivedi [46] modellerinin arasında bir değerdedir. Hunt [33] modeline göre ise biraz yüksek bulunmuştur.



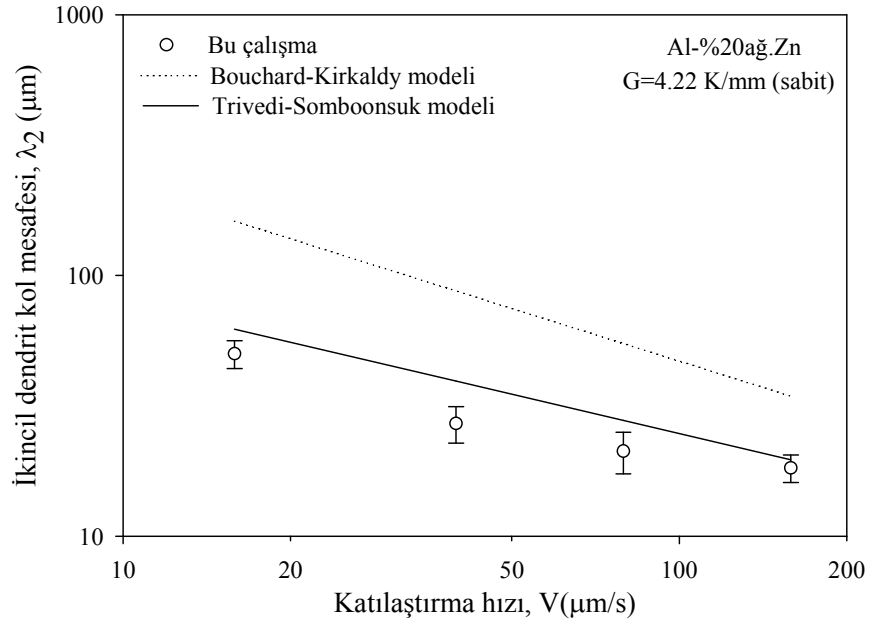
Şekil 4.15. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 değerlerinin $V^{-0.5}$ ile değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 4.15'de görüldüğü gibi elde edilen λ_1 değerleri Bouchard-Kirkaldy [41] ve Okamoto-Kishitake [49] modeline göre bulunan sonuçlardan küçük bulunmuştur.



Şekil 4.16. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G 'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_1 değerlerinin Hunt-Lu [39] modeli ile karşılaştırılması.

Şekil 4.16'da görüldüğü gibi Al-%20ağ.Zn alaşımından elde edilen λ_1 değerleri Hunt-Lu [39] modeli ile karşılaştırıldığında sapmalar olmakla birlikte bu model ile uyumludur.

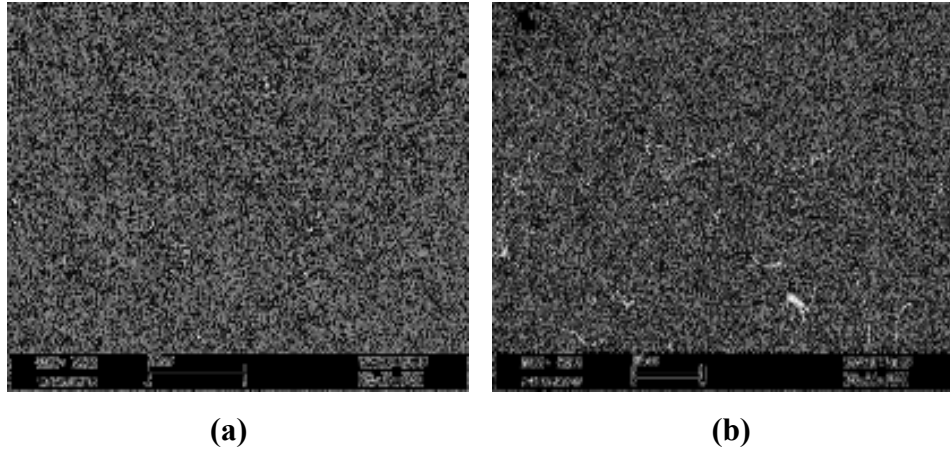


Şekil 4.17. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G' de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen λ_2 değerlerinin Bouchard-Kirkaldy [41] ve Trivedi-Somboonsuk [46] modeli ile karşılaştırılması.

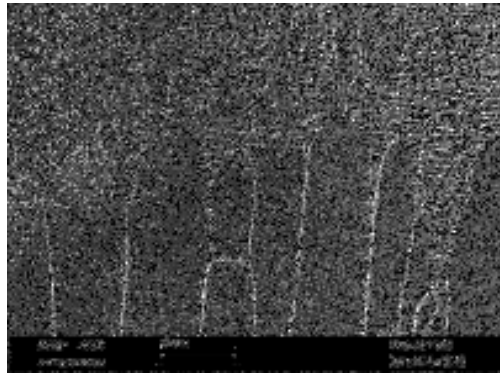
Şekil 4.17'de görüldüğü gibi elde edilen deneysel λ_2 değerleri Bouchard-Kirkaldy [41] modeline göre küçük, Trivedi-Somboonsuk [46] modeli ile karşılaştırıldığında bu modele göre sapmalar olmakla birlikte uyumludur.

4.5. SEM Görüntüleri ve EDX Analiz Sonuçları

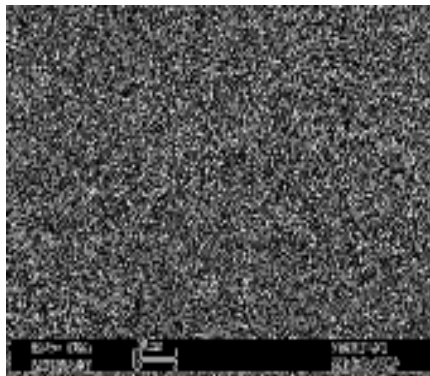
Al-Zn alaşımına ait numuneler Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Tungsten filamentli LEO 440 model 117 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve enerji dağıtıcı X-ışını spektrometresi (EDX) ile elemental analizi yapılmıştır.



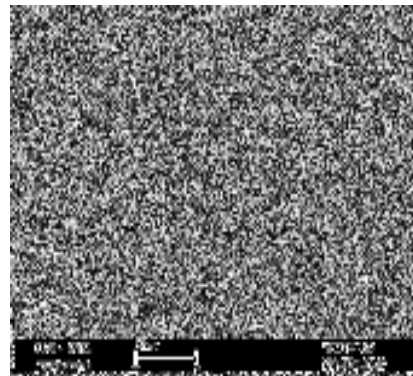
Şekil 4.18. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit $G= 4,22 \pm 1,62 \text{ K.mm}^{-1}$ sıcaklık gradyentinde (a) $V=15,87 \text{ } \mu\text{m/s}$ (b) $V= 158,73 \text{ } \mu\text{m/s}$ hızlarında doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan katı-sıvı arayüzeyinin SEM görüntüsü.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.19. Al-%7ağ.Zn sabit $G= 2,81 \pm 0,69$ sıcaklık gradyentinde (a) $V=7,93 \text{ } \mu\text{m/s}$ (b) $V=39,68 \text{ } \mu\text{m/s}$ (c) $V=158,73 \text{ } \mu\text{m/s}$ hızlarında doğrusal katılaştırılmasıyla oluşan katı-sıvı arayüzeyinin SEM görüntüsü.

4.5. Bölüm Değerlendirmesi

Sabit sıcaklık gradyentinde $G(2,81 \pm 0,69 \text{ K. mm}^{-1} - 4,22 \pm 1,62 \text{ K. mm}^{-1})$, 2 farklı alaşım kompozisyonunda ve her kompozisyonda 5 farklı katılma hızında $V (7,93 - 158,73 \text{ } \mu\text{m/s})$ olmak üzere toplam 15-20 adet Al-Zn ikili alaşımına ait numune doğrusal katılaştırılmıştır. Numunenin doğrusal katılaştırılmış katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan dendritlerin fotoğrafları optik mikroskobunda çekilmiştir. Çekilen fotoğraflardan λ_1 , λ_2 ve R ölçümleri yapılmıştır.

GENEL SONUÇLAR

Al-%7ağ. Zn alaşımının 4 mm çaplı 9,5 mm farklı ve Al-%20ağ. Zn alaşımlarının 4mm çaplı numuneleri sabit sıcaklık gradyenti ve farklı hızlarla katılaştırılmıştır.(V= 8 μ m/s-160 μ m/s)

Mikroyapı parametrelerinin (λ_1 , λ_2) katılaştırma hızına göre değişimi tablolar ve grafikler halinde verilmiştir. Bu tablo ve grafiklerden;

- 1- V=8 μ m/s katılaştırma hızında Al-% 7ağ. Zn alaşımında 4mm çaplı numunede hücreli yapı elde edilirken 9,5mm çaplı numunede dendritik yapı elde edilmiştir.
- 2- Katılaştırma hızı $V_1= 8\mu\text{m/s}$ ' den $V_2=20\mu\text{m/s}$ ' ye kadar artarken λ_1 değerleri azalmış ve $V_2=20\mu\text{m/s}$ 'den $V_3=40\mu\text{m/s}$ 'ye kadar artarken λ_1 değerleride artmıştır, ve $V_3=40\mu\text{m/s}$ 'den sonra artan V değerleri ile λ_1 değerleri azalmıştır ki buda literatürdeki sonuçlarla uyumludur.
- 3- Artan katılaştırma hızı ile λ_2 değerlerinin sürekli azaldığı görülmüştür.
- 4- λ_1 değerleri küçük çaplı numunelerde, düşük hızlarda daha küçük olmasına rağmen λ_2 değerlerinin farklı çaptaki numuneler için aynı kaldığı görülmektedir yani numune çapının λ_2 üzerine etkisinin olmadığı görülmektedir.
- 5- Bizim Al-Zn alaşımları deneylerimizde elde ettiğimiz bu sonuçların daha iyi irdelenebilmesi için elbette daha çok deneyin yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. A.S.M. Handbook, Mechanical Testing, 8:479-480 (1992)
2. Kurz, W., Fisher, D., Fundamentals of Solidification, Trans. Tech. Publications, Aedermannsdorf, Switzerland, 1989.
3. Tüzünalp, K.K., Alüminyum Alaşımlarının Yönlü Katılaşması ve Süreç Parametrelerinin İrdelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-93 (2002)
4. Porter, D.A., Easterling, K.E., Phase Transformation in Metals and Alloys, Van Nostrand and Reinhold, 1-17, 217-223, New York, 1984.
5. Turnbull, D., Formation of Crystal Nuclei in Liquid Metals, Journal of Applied Physics, 21, 1022-1029, 1950
6. Turnbull, D., Isothermal Rate of Solidification of Small Droplets of Mercury and Tin, Journal of Chemical Physics, 18, 768-775, 1950
7. Atalay, G. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Malzemesi Ve İmalat Teknolojisi Programında Hazırlanan Yüksek Lisans Tezi
8. Başaran, M. 1976. Döküm ve Katılaştırma Tekniği. İ. T. Ü.
9. Jones, H. 1982. Rapid Solidification of Metal and Alloys The Institution of Metallurgist. London. 337-351s
10. Campbell, J., Casting, Butterworth-Heinemann, 2nd Ed., Oxford, Boston, 2003
11. Xu, H., Effect of Self-Generated Thermal Field On Spatio-Temporal Growth of Hierarchical Structures During Polymer Crystallization , The Graduate Faculty of The University of Akron, 15-24 (2004)
12. Leaksonen, A., Talanquer, V., Oxtoby, D.W., Nucleation, measurements, theory, and atmospheric applications, Annu. Rev. Phys. Chem, 461-489 (1995)
13. Stafenescu, D.M., ASM Handbook V.15: Casting, ASM International, 1998.
14. Porter, D.A., Easterling, K.E., Phase Transformations in Metals and Alloys, Chapman and Hall, 2nd Ed., London, 1992
15. J.H. Perepezko, Mater. Sci. Eng., Vol 65, 1984, p 125
16. Jackson, K.A., Hunt, J.D., Transparent Compounds That Freeze Like Metals, Acta Metall., 13, 1212-1215, 1965

17. Eshelman, M.E., Seetharaman, V., Trivedi, R., Cellular Spacings-I. Steady-State Growth, *Acta Metall.*, 36, 1165-1174, 1988.
18. Trivedi, R., Somboonsuk, K., Constrained Dendritic Growth and Spacing, *Mater. Sci. Eng.*, 65, 65-74, 1984
19. Trivedi, R., Sekhar, J.A., Mazumdar, J., (Eds.), *Principles of Solidification and Materials Processing*, V.1, p. 33, Trans. Tech. Publications, Aedermannsdorf, Switzerland, 1990
20. Glicksman, M.E., Marsh, S.P., The Dendrite, p.1077-1119, *Handbook of Crystal Growth*, Ed. Hurle, D.T.J., Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands, 1993.
21. Galenko, P.K., Zhuravlev, V.A., *Physics of Dendrites: Computational Experiments*, World Scientific, Singapore, 1994.
22. Billia, B., Trivedi, R., Pattern Formation in Crystal Growth, p.901-1061, *Handbook of Crystal Growth*, Ed. D.T.J. Hurle, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands, 1993.
23. Glicksman, M.E., Lowengrub, J.S., Li, S.W., Li, X.R., A Deterministic Mechanism for Dendritic Solidification Kinetics, *JOM*, 59, 27-34, 2007.
24. Flemings, M.C., *Solidification Processing*, Mc Graw-Hill, New York, 1974.
25. Herlach, D., in: Emmerich, H., Nestler, B., Schreckenberg, M., (Eds.), *Interface and Transport Dynamics*, p.26, Springer, Berlin, 2003
26. Trivedi, R., Kurz, W., Dendritic Growth, *Int. Mater. Rev.*, 39, 49-74, 1994.
27. Gonzales, F., Rappaz, M., Dendrite Growth Directions in Aluminum-Zinc Alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, 37A, 2797-2806, 2006
28. Deschamps, J., Georgelin M., Pocheau, A., Crystal Anisotropy and Growth Directions in Directional Solidification, *Europhys. Lett.*, 76, 291-297, 2006.
29. Berkdemir, A., Gündüz, M., Effect of Growth Rate and Mg Content on Dendrite Tip Characteristics of Al-Cu-Mg Ternary Alloys, *Appl. Phys. A*, DOI1007/s00339-009-5140-3 (Baskıda), 2009.
30. Asta, M., C. Beckermann, A. Karma, W. Kurz, R. Napolitano, M. Plapp, G. Purdy, M. Rappaz, R. Trivedi, Solidification microstructures and solid-state parallels: Recent developments. Future direction. *Acta Materialia*, 2008, 941-971

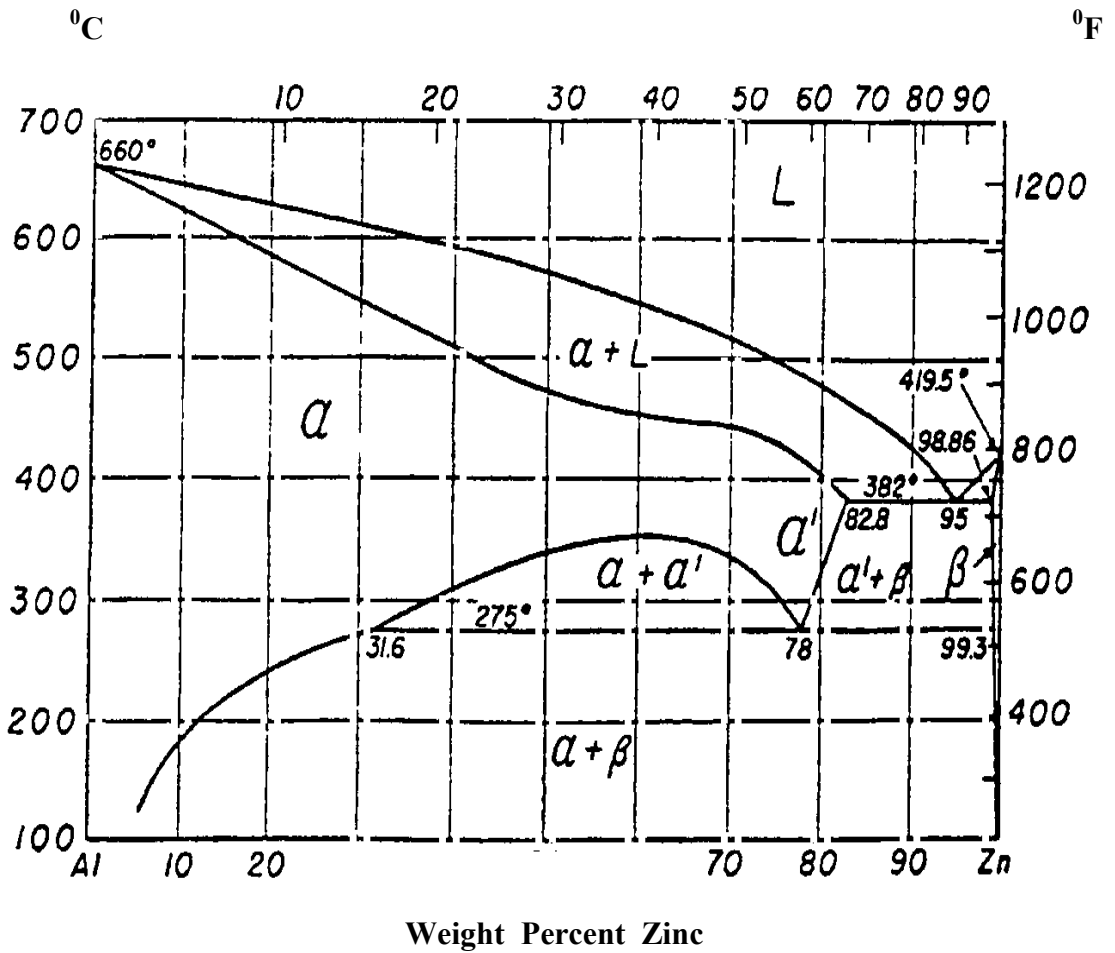
31. Trivedi, R., Somboonsuk, K., Dynamical Studies of Dendritic Growth, *Acta Metall.*, 33, 1051-1060, 1984.
32. Langer, J.S., Müller-Krumbhaar, H., Theory of Dendritic Growth-I. Elements of a Stability Analysis, *Acta Metall.*, 26, 1681-1687, 1978.
33. Hunt J.D., *Solidification and Casting of Metals*, p.3, The Metals Society, London, 1979
34. Kurz, W., Fisher, D.J., Dendrite Growth at the Limit of Stability: Tip Radius and Spacing, *Acta Metall.*, 29, 11-20, 1981.
35. Trivedi, R., Interdendritic Spacing: Part II. A Comparison of Theory and Experiment, *Metall. Trans. A*, 15A, 977-982, 1984.
36. Huang, S.C., Glicksman, M.E., Overview 12: Fundamentals of Dendritic Solidification- II Development of Sidebranch Structure, *Acta Metall.*, 29, 717-734, 1981
37. Hunt, J.D., Pattern Formation in Solidification, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2, 147-155, 2001.
38. Laxmanan, V., Dendritic Solidification II-A Model for Dendritic Growth Under an Imposed Thermal Gradient, *Acta Metall.*, 33, 1023-1037, 1985.
39. Lu, S.Z., Hunt, J.D., A Numerical Analysis of Dendritic and Cellular Array Growth: The Spacing Adjustment Mechanism, *J. Cryst. Growth*, 123, 17-34, 1992.
40. Tiller, W.A., Jackson, K.A., Rutter, J.W., Chalmers, B., The Redistribution of Solute Atoms During the Solidification of Metals, *Acta Metall.*, 1 (4), 428-437, 1953.
41. Bouchard, D., Kirkaldy, J., Prediction of Dendrite Arm Spacings in Unsteady and Steady-state Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys, *Metall. Mater. Trans. B*, 28B, 651-663, 1997.
42. Ma, D., Sahm, P.R., Primary Spacing in Directional Solidification, *Metall. Mater. A*, 29A, 1137-1149, 1998.
43. Kurz, W., Fisher, D., *Fundamentals of Solidification*, Trans. Tech. Publications, Aedermannsdorf, Switzerland, 1989.
44. Giummarra, C., LaCombe, J.C., Koss, M.B., Frei, J.E., Lupulescu, A.O., Glicksman, M.E., Sidebranch Characteristics of Pivalic Acid Dendrites

- Grown Under Convection-free and Diffuso-convective Conditions, *J. Cryst. Growth*, 274, 317-330, 2005.
45. Müller-Krumbhaar, H., Langer, J.S., Sidebranching Instabilities in a Two dimensional Model of Dendritic Solidification, *Acta Metall.*, 29, 145-157, 1981.
 46. Trivedi, R., Somboonsuk, K., Constrained Dendritic Growth and Spacing, *Mater. Sci. Eng.*, 65, 65-74, 1984.
 47. Gündüz, M., Çadırlı, E., Directional Solidification of Aluminium-Copper Alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 327, 167-185, 2002.
 48. McCartney, D.G., Hunt, J.D., Measurements of Cell and Primary Dendrite Arm Spacings in Directionally Solidified Aluminium Alloys, *Acta Metall.*, 29, 1851-1863, 1981.
 49. Okamoto, T., Kishitake, K., Dendritic Structure in Unidirectionally Solidified Aluminum, Tin, and Zinc Base Binary Alloys, *J. Cryst. Growth*, 29, 137-146, 1975.
 50. Berkdemir, A., Dendritik Katılaştırmada Katılaştırma Parametrelerinin Yapı Parametrelerine Etkisi , Doktora Tezi , Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2010.
 51. Gündeş, A., Kahraman Maraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı Al-Ni-Si Alaşımlarının Hızlı Ktılaştırma ile Üretilmesi ve Fiziksel, Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
 52. Miyata, Y., Suzuki, T., Uno, J.I., Cellular and Dendritic Growth: Part I. Experiment, *Metall. Trans. A*, 16A, 1799-1805, 1985.
 53. Liu, S., Lu, S.Z., Hellawell, A., Dendritic Array Growth in the Systems NH₄Cl- H₂O and [CH₂CN]₂-H₂O: Dendrite Tip Behavior and the Origin of Side Arm Evolution, *J. Cryst. Growth*, 234, 751-758, 2002.
 54. Tian, H., Stefanescu, D.M., Dendritic Growth During Directional Solidification of Hypoeutectic Fe-C-Si alloys, *Metall. Trans. A*, 23A, 681-687, 1992.

EKLER

EK 1. Al-Zn Alaşımının Faz Diyagramı [1]

Atomic Percent Zinc



[1] Battelle PNNL MST Handbook, U.S. Department of Energy, Pacific Northwest Laboratory

EK 2. Al-Zn Alaşımına Ait numunelerde Lineer Kesişim Ve Alan Hesabı Metodu ile Hesaplanan λ_1 Değerleri Ve İlgili Grafikler.

Tablo EK 4.1. Al-%7ağ.Zn alaşımında sabit G'de farklı iki çaptaki numunelerde λ_1 'in V ile değişimi.

Alaşım (Al- %7ağ Zn)	4mm'lik Numuneler		9.5mm'lik Numuneler	
	Lineer kesişim metodu (λ_1) (μm)	Alan hesabı metodu (λ_1) (μm)	Lineer kesişim metodu (λ_1) (μm)	Alan hesabı metodu (λ_1) (μm)
$V_1=7.93$	162.206 ± 19.19	172.67 ± 11.19	202.33 ± 61.42	197.62 ± 3.15
$V_2=15.87$	152.62 ± 23.53	147.89 ± 9.28	157.34 ± 32.06	164.32 ± 15.23
$V_3=39.68$	164.948 ± 38.46	169.39 ± 10.78	163.37 ± 21.82	175.71 ± 15.70
$V_4=79.36$	130.354 ± 34.03	140.97 ± 4.83	124.83 ± 36.01	136.68 ± 0.75
$V_5=158.73$	104.51 ± 24.26	130.26 ± 8.13	103.04 ± 14.62	125.11 ± 7.37

Tablo EK 4.2. Al-% 20ağ.Zn alaşımında sabit G'de λ_1 ve λ_2 'nin V ile değişimi.

Alaşım (Al- %20ağ Zn)	4mm'lik Numuneler	
	Lineer kesişim metodu (λ_1) (μm)	Alan hesabı metodu (λ_1) (μm)
$V_1=7.93$	168.73 ± 49.69	137.42 ± 3.86
$V_2=15.87$	140.83 ± 19.18	134.83 ± 14.32
$V_3=39.68$	107.46 ± 22.93	108.04 ± 21.49
$V_4=79.36$	79.123 ± 22.36	97.37 ± 3.19
$V_5=158.73$	63.89 ± 18.43	89.69 ± 3.15

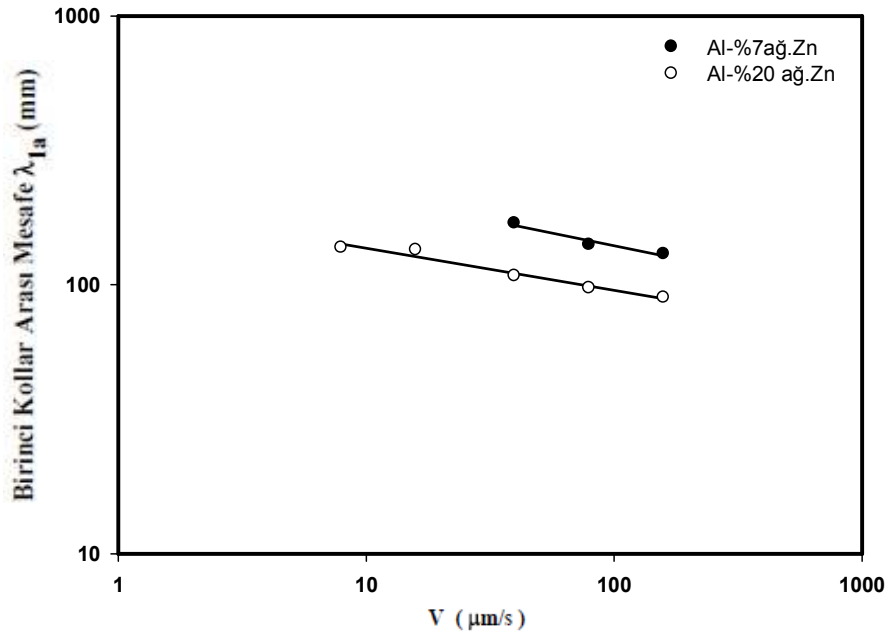
Tablo IRK 4.3. Al-Zn alevsuzunda eskitir C₁de λ_{1a} , λ_{2a} için V ve C₂de λ_{1b} , λ_{2b} için V ve C₂de λ_{1c} , λ_{2c} ile değerlendirilmiştir

Alaşım		Al-%7 ağı Zn				Al-%20 ağı Zn				
Çap		Armut		9,5mm		Armut		4mm		
λ_2 (μm)		λ_1 (μm)		λ_2 (μm)		λ_1 (μm)		λ_2 (μm)		
V_1 (mm/s)	λ_{1a}	182.206	172.67	110resol	202.33	197.62	38.31	168.73	137.42	110resol
	λ_{2a}	± 19.19	± 11.19		± 61.42	± 13.57	± 5.19	± 49.69	± 3.86	
V_2 15.87	λ_{1a}	132.62	147.89	34.54	137.34	164.32	34.91	140.83	134.83	50.78
	λ_{2a}	$+ 23.53$	$+ 9.28$	$+ 10.41$	$+ 32.06$	$+ 15.23$	$+ 12.76$	$+ 19.18$	$+ 14.32$	$+ 18.88$
V_3 39.68	λ_{1a}	164.944	169.39	35.66	163.37	175.71	27.48	167.46	108.04	27.45
	λ_{2a}	$+ 38.46$	$+ 10.78$	$+ 7.32$	$+ 21.82$	$+ 15.70$	$+ 6.5$	$+ 22.93$	$+ 21.49$	$+ 3.33$
V_4 79.36	λ_{1a}	130.354	140.97	20.14	124.83	136.68	20.98	79.123	97.37	21.50
	λ_{2a}	± 34.03	± 4.83	± 4.67	± 36.01	± 0.75	± 5.19	± 22.36	± 3.19	± 1.00
V_5 158.73	λ_{1a}	104.51	130.26	17.79	103.04	125.11	16.82	63.89	89.69	18.53
	λ_{2a}	± 24.26	± 8.13	± 3.69	± 14.62	± 7.37	± 3.25	± 18.43	± 3.15	± 2.59

λ_{1a} alan metodu, λ_{1b} linear kesişim metodu kullanılarak ölçülmüştür.

Tablo EK 4.4 Al-Zn alaşımında sabit G 'de, λ_l 'in farklı C_0 'da V 'ye bağımlılığı.

C_0 (Al- %Xağ.Zn)	λ_{1a} 'in V 'ye bağımlılığı ($\lambda_{1a}=k_1V^{-a}$)			(λ_{1l}) 'in V 'ye bağımlılığı ($\lambda_{1l}=k_1V^{-a}$)		
	Bağıntı	Sabit(k)	Korelasyon sabiti(r)	Bağıntı	Sabit(k)	Korelasyon sabiti(r)
7 20	$\lambda_{1a}=k_1V^{-0,189}$	$k_1=331,13 \mu m^{1,189} s^{-0,189}$	$r_1=0,949$	$\lambda_{1l}=k_3V^{-0,329}$	$k_3=549,54 \mu m^{1,329} s^{-0,329}$	$r_3=0,999$
	$\lambda_{1a}=k_2V^{-0,156}$	$k_2=194,98 \mu m^{1,156} s^{-0,156}$	$r_2=0,965$	$\lambda_{1l}=k_4V^{-0,330}$	$k_4=338,84 \mu m^{1,330} s^{-0,330}$	$r_4=0,992$

Şekil EK 4.1 Sabit G 'de doğrusal katılaştırılan Al-Zn alaşımında farklı C_0 'da V ile değişimi.

EK 3. Elde Edilen Sonuçların Literatürdeki Sonuçlarla Karşılaştırılması

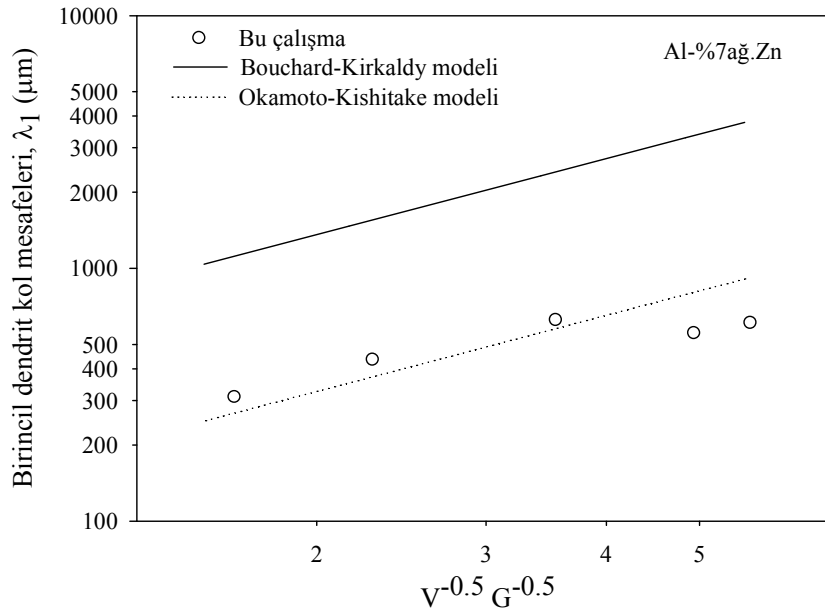
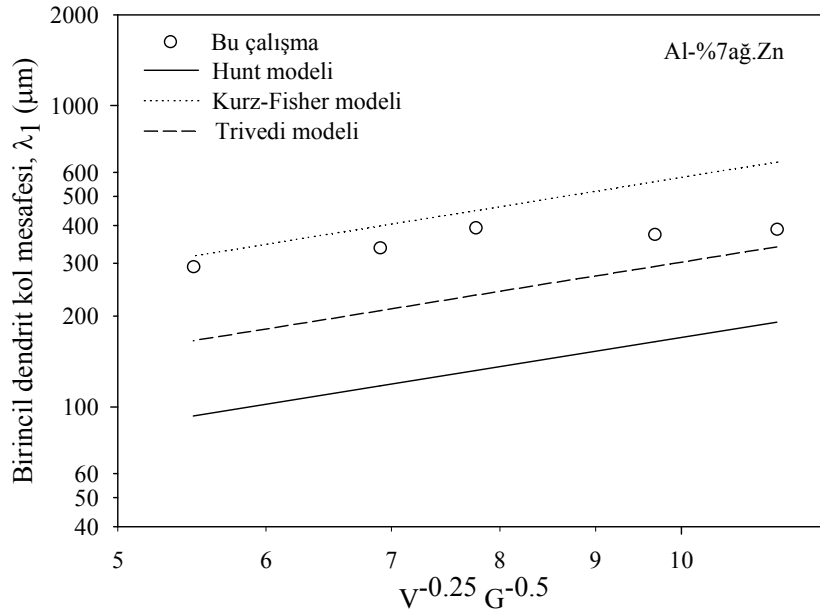
Bu çalışmada λ_1 ' in V 'ye üstel bağımlılığında Al-%7ağ.Zn alaşımı için alan hesabı yöntemi ile elde edilen -0,18 ve Al-%20ağ.Zn alaşımı için yine alan hesabı yöntemi ile elde edilen -0,15 değerleri, teoriden beklenen Hunt, Kurz ve Fisher, Trivedi ve Laxmanan -0,25 [33,39] değerinden düşük bulunmuş, lineer kesişim yöntemine göre Al-%7ağ.Zn alaşımında hesaplanan -0,32 değeri ve aynı şekilde Al-%20ağ.Zn alaşımında hesaplanan -0,33 değerleri teoriden beklenen değerden büyük bulunmuştur

Tablo EK 4.5 Al–Zn alaşımına ait fiziksel sabitler

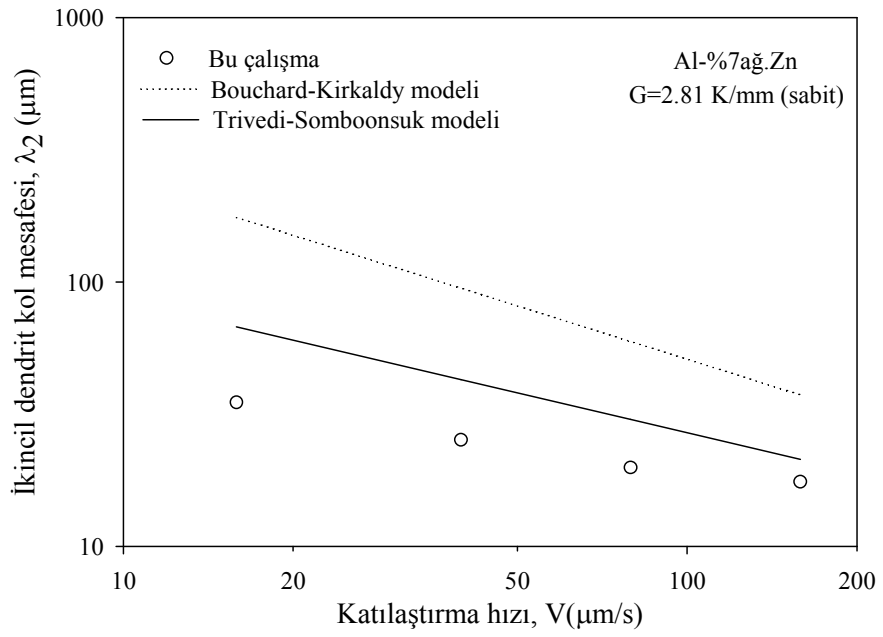
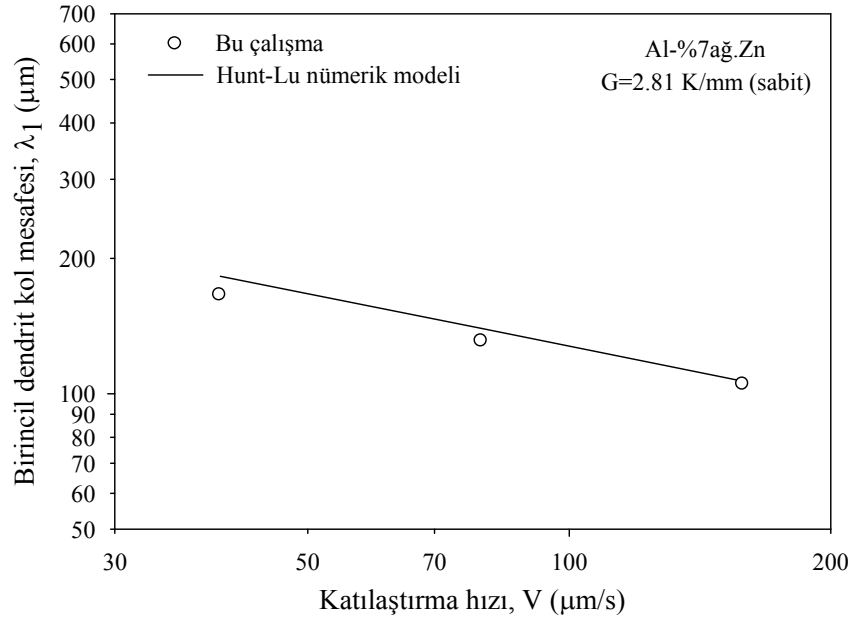
Özellik	Sembol	Birim	Değer	Kay.
Erime Noktası	T_m	K	658	2
Bileşim	C_0	(% wt)	7 and 20	
Sıvıılık Eğimi	m_L	K (% wt)	-7.52	2
Gibbs-Thomson Sabiti	Γ	$\mu\text{m.K}$	0.049	3
Difüzyon Sabiti (liq.)	D_L	$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$	3500	3
Denge Dağılım Sabiti	k		0.2	3
Harmonik Pertürbasyonlar	L	mJ/m^2	10	4
Birinci Kollar-Kalibrasyon Faktörü	a_1	-	250	5
Karakteristik Parametre	$G_0\epsilon$	K/cm	600x6	5
İkinci Kollar-Kalibrasyon Faktörü	a_2	-	9	5

- Hansen M. In Constitution of Binary Alloys, McGraw–Hill, New York, 1958
- Ares A E, Schvezov C E. Influence of solidification thermal parameters on the columnar to-equiaxed transition of aluminium-zinc and zinc-aluminium alloys, Metall Mater Trans A, 2007, 38: 1485–1499
- Trivedi R, Interdendritic spacing: part II. A comparison of theory and experiment, Met Trans A, 1984, 15: 977–982
- Rocha O L, Siqueira C A, Garcia A. Heat flow parameters affecting dendrite spacings during unsteady-state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys, Metall Mater Trans A, 2003, 34: 995–1006

EK 4. Deneysel Sonuçların Teorik Modellerle Karşılaştırılması

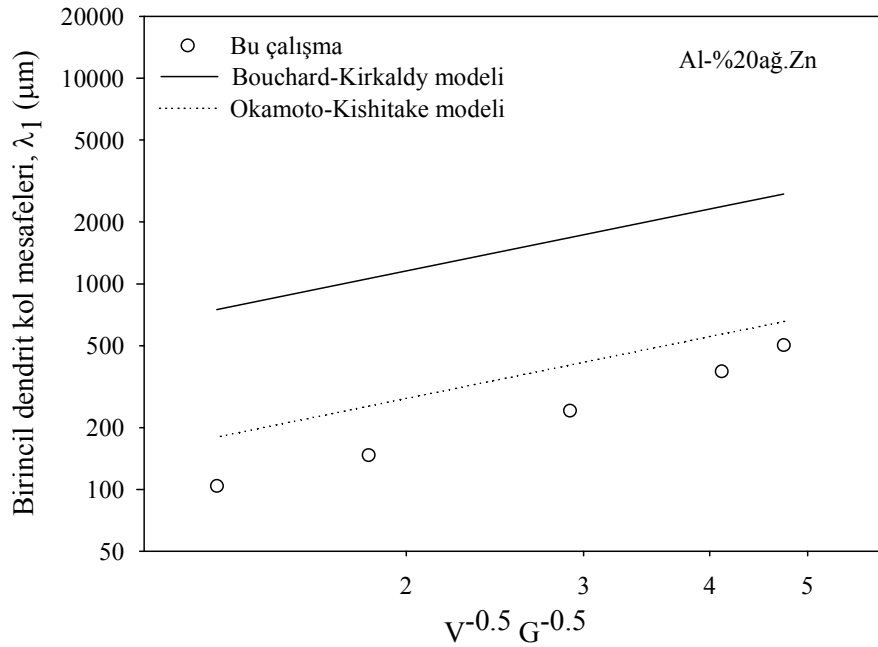
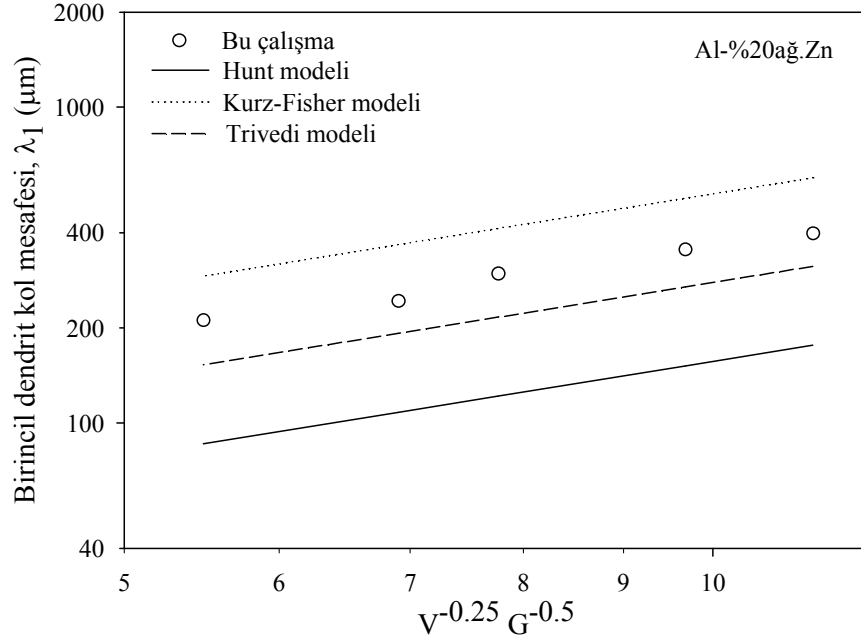


Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G ($2,8 \pm 0,69$)'de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 değerlerinin Hunt modelinden elde edilen λ_1 değeri ile karşılaştırılması yapıldığında bu modelden yüksek olduğu görülmüştür. Ancak Trivedi ve Kurz-Fisher modeline göre kıyaslanması yapıldığında bu iki modele göre hesaplanan λ_1 değerlerinin arasında bir değerde olduğu görülmüştür.

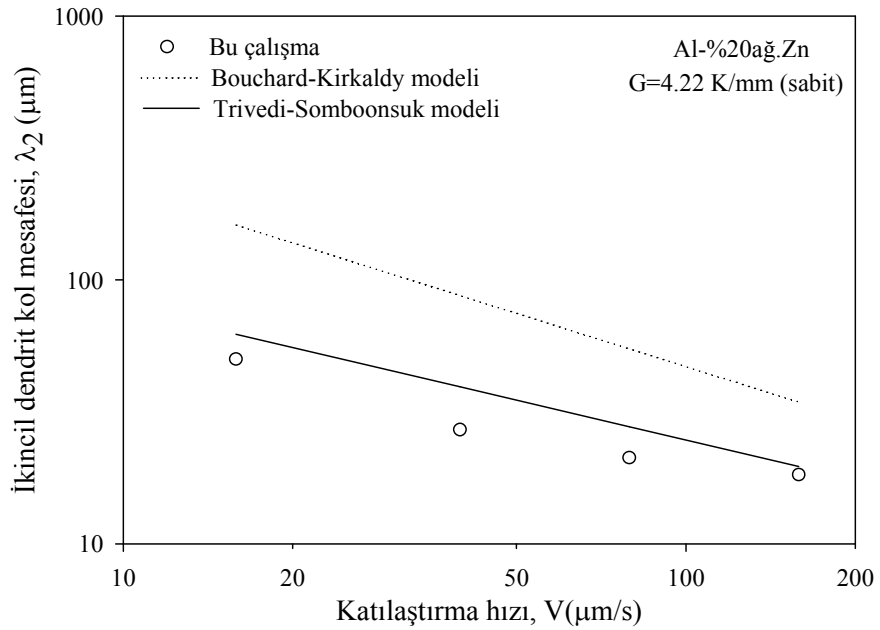
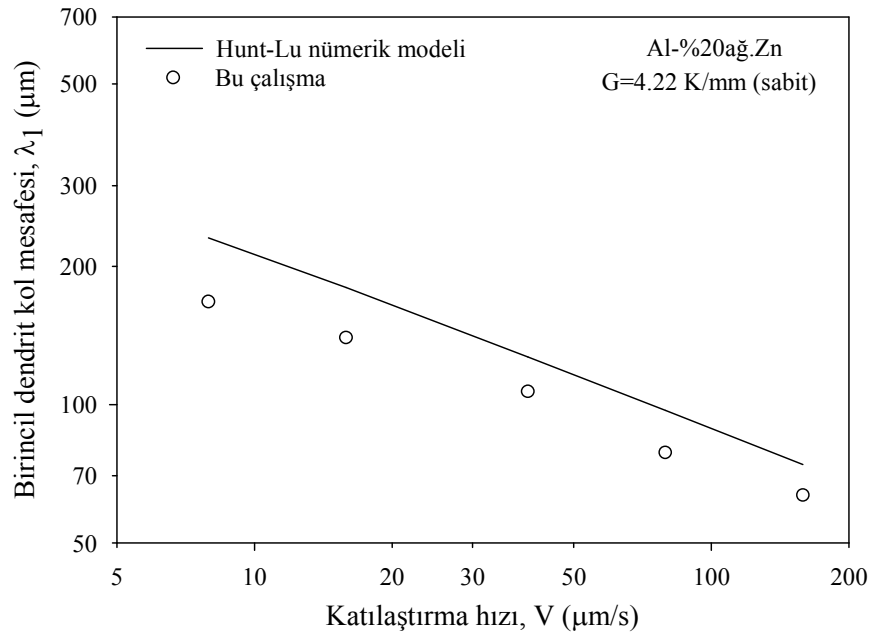


Al-%7ağ.Zn alaşımının doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_1 değerlerinin Hunt-Lu numeric modeline göre hesaplanan λ_1 değerleri ile karşılaştırılması yapıldığında bulunan sonuçların bu modele çok yakın olduğu görülmektedir.

Al-%7ağ.Zn alaşımının sabit G ($2,8.±0,69$)’de doğrusal katılaştırılması ile elde edilen deneysel λ_2 değerlerinin ise Bouchard-Kirkaldy modelinden hesaplanan λ_2 değerleri ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen deneysel değerlerin küçük, Trivedi-Somboonsuk modeline göre yine teorik modellere göre elde edilen sonuçlardan küçük olduğu görülmektedir.



Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G ($4,22 \pm 1,62$)'de doğrusal katılaştırılmasıyla elde edilen deneysel λ_1 değerleri Hunt modeli ile karşılaştırıldığında bu modelden hesaplanan λ_1 değerlerinden yüksek, bununla birlikte Kurz-Fisher modeli ve Trivedi modellerinden elde edilen λ_1 değerlerinin arasında olduğu görülmüştür. Okamoto-Kishitake modeline göre kıyaslandığında bu modele göre küçük, Bouchard-Kirkaldy modeline göre ise çok daha küçük olduğu görülmüştür.



Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G'de doğrusal katılaştırılması sonucunda elde edilen λ_1 değerleri Hunt-Lu nümerik modelinden elde edilen λ_1 değerleri ile kıyaslanadığında bu modele göre biraz küçük olduğu görölmüştür. Al-%20ağ.Zn alaşımının sabit G'de doğrusal katılaştırılması sonucunda elde edilen λ_2 değerleri Trivedi-Somboonsuk modeline göre kıyaslandığında küçük, Bouchard-Kirkaldy modeline göre ise çok küçük olduğu görölmektedir.

EK 5. Al-Zn alaşımlarına ait EDX analiz sonuçları

Tablo EK 4.6 Al-Zn alaşımına ait EDX analiz sonuçları.

$C_0(\text{Al-}\%X\text{ağ.Zn})$	$C_k(\text{katı faz})$	$C_s(\text{sıvı faz})$
Al-%7ağ.Zn	Al-%(5,32 \pm 1,84)ağ.Zn	Al-%(8,77 \pm 0,94)ağ.Zn
Al-%20ağ.Zn	Al-%(16,63 \pm 3,67)ağ.Zn	Al-%(21,42 \pm 4,24)ağ.Zn

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Emine ACER

Doğum Yeri : Develi/KAYSERİ

1985 yılında Kayseri'nin Develi ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Ömer Mavi İlköğretim Okulu'nda, orta ve lise öğrenimini ise Develi Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Erciyes Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı ve aynı yıllar içerisinde Erciyes Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü yandal eğitimi aldı. 2008 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında tezli yüksek lisans eğitimine başladı.

Adres: Erciyes Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü
38039 Kayseri – TÜRKİYE

E-posta: minefizikci@hotmail.com