

**Al-4,5Cu DÖKÜM ALAŞIMINDA TANE İNCELTME İŞLEMİNİN  
ETKİSİNİN ZAMANLA DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

**Ziya TANYEL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2014  
ANKARA**

Ziya TANYEL tarafından hazırlanan "Al-4,5Cu DÖKÜM ALAŞIMINDA TANE İNCELTME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN ZAMANLA DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ" adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Neşet AKAR .....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kadir KOCATEPE .....

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, G.Ü.

Doç. Dr. Neşet AKAR .....

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Yunus KAYIR .....

Makina Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 17/01/2014

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ziya TANYEL

**Al-4,5Cu DÖKÜM ALAŞIMINDA TANE İNCELTME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN  
ZAMANLA DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Ziya TANYEL**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Ocak 2014**

**ÖZET**

Alüminyum dökümhanelerinde tane inceltici olarak Al-Ti-B türünde master alaşımları içerisinde en çok Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B kullanılmaktadır. Tane inceltme işlemlerinin en ekonomik şekilde yapılabilmesi için optimum tane inceltici miktarı ve ilaveden sonra bekletme zamanı gibi önemli parametrelerin belirlenmesi gerekir. Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işlemleri sırasında bekleme süresi ile tane boyutunun arttığı bilinmektedir. Fakat bekleme süresince karıştırmanın tane boyutuna etkisi ile ilgili herhangi bir çalışma yoktur.

Bu çalışmanın amacı Al - %4,5Cu (A206) alaşımının optimum tane inceltici miktarının tespit edilmesi ve bekleme süresince sıvı metalin sürekli karıştırılması durumunda tane boyutundaki değişikliklerin belirlenmesidir.

%0,05 Ti içeren Al - %4,5Cu (A206) alaşımında karıştırma işlemi yapılmadan alınan spektral analizlerde bekleme süresine bağlı olarak %Ti, %B oranlarının düştüğü ve Ti:B oranının ise yükseldiği tespit edilmiştir.

**%0,05 Ti içeren Al - %4,5Cu (A206) alaşımında karıştırma işlemi yapılarak alınan spektral analizlerde bekleme süresine bağlı olarak %Ti, %B ve Ti:B oranlarında önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.**

**Bekleme süresine bağlı olarak %0,05 Ti oranında A206 alaşımının ısıtma işlem öncesi karıştırma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış durumda mekanik özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.**

**Bekleme süresine bağlı olarak %0,05 Ti oranında A206 alaşımının karıştırma işlemi ile birlikte T6 ısıtma işlemi yapıldıktan sonra, akma dayanımı, çekme dayanımı ve %uzama değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı gözlenirken; karıştırma işlemi yapılmadan uygulanan T6 ısıtma işlemi sonrası ise akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.**

**Bilim Kodu : 710.3.011**

**Anahtar Kelimeler : Al-4,5Cu alaşımı, Tane İnceltme, Katılaşma,  
Mekanik özellikler,**

**Sayfa Adedi : 72**

**Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Neşet AKAR**

**INVESTIGATION OF EFFECT OF GRAIN REFINEMENT CHANGE IN TIME  
FOR Al-4,5Cu ALLOYS**

**(M.Sc. Thesis)**

**Ziya TANYEL**

**GAZİ UNIVERSITY**

**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**January 2014**

**ABSTRACT**

In aluminum foundries, the most common master alloys used as a grain refiner among the Al-Ti-B master alloys is Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B master alloys. To obtain the most economic and effective grain refinement, there are some important parameters such as the optimum addition level of grain refiner and holding time after the addition. It is known that in aluminum alloys, during the grain refinement processes, the grain size increases with the holding time. But there are no studies about the effects of grain refined melt stirring on the size of the grain during the holding time.

The main purpose of this study is to determine the optimum grain refiner level and the grain size in the case of stirring the grain refined liquid metal continuously during holding time.

It is determined that the spectral analysis taken without the stirring process from Al - 4,5Cu (A206) alloy containing 0,05 Ti, Ti, and B rates reduce according to the duration of the holding time while Ti:B ratio increases.

However, in the stirring process no significant changes observed on the Ti, B rates, and Ti:B ratio.

**According to the holding time, no significant changes determined in the mechanical properties of A206 alloy containing %0,05 Ti with or without the stirring process executed as-cast condition.**

**In the case of T6 condition, the stirring of melt during holding time did not produce a reduction on ultimate tensile strength, yield strength, and % elongation of A206 alloy, but non stirred melt reduced the mechanical properties.**

**Science Code : 710.3.011**

**Key Words : Al-4,5Cu alloy, Grain refinement, Solidification,  
Mechanical properties**

**Page Number : 72**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Neşet AKAR**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Doç. Dr. Neşet AKAR'a, çalıőmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen her türlü destek ve imkânı sağlayan Altun Döküm San. A.Ő sahibi Ahmet Cevdet ALTUN'a ve hayatımın her devresinde daima yanımda olup beni destekleyen sevgili aileme sonsuz teőekkürlerimi bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Çekirdeklenme.....	3
2.1.1. Homojen çekirdeklenme.....	3
2.1.2. Heterojen çekirdeklenme .....	3
2.2. Alüminyum ve Alüminyum Döküm Alaşımları .....	6
2.2.1. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi .....	8
2.3. Saf Alüminyum .....	15
2.4. Alüminyum – Bakır Alaşımları .....	15
2.3. Alüminyum – Magnezyum Alaşımları.....	17
2.5. Alüminyum Dökümcülüğünde Tane İnceltme.....	18
2.6.1. Tane incelticiler.....	19
2.6.2. Tane inceltici miktarları .....	20
2.6.3. Tane inceltme eğrileri.....	21

**Sayfa**

2.6.4. Tane inceltme işleminin soğuma eğrisine etkisi .....	22
2.7. Tane İnceltme Mekanizmaları .....	24
2.7.1. Çekirdeklenme teorileri .....	24
2.7.2. Çözünen teorisi .....	31
2.8. Tane İnceltme Testleri .....	33
2.8.1. Alcan testi .....	34
2.8.2. Alcoa testi .....	35
2.8.3. KBI halka testi .....	35
2.8.4. Alüminyum birleşme testi .....	36
2.9. Alüminyum Alaşımlarında Gazlar .....	37
2.10. Alüminyum Alaşımlarında Gaz Giderme Yöntemleri .....	39
2.10.1. İnert gaz ile gaz giderme .....	40
2.10.2. Gaz giderme tabletleri ile gaz giderme .....	40
2.10.3. Döner sistemle gaz giderme .....	41
3. MATERYAL VE METOD .....	43
3.1. Döküm Alaşımları .....	43
3.2. Ergitme ve Döküm .....	43
3.3. Tane İnceltme Deneyleri .....	43
3.4. Metalografik İnceleme .....	46
3.5. Çekme Testi .....	49
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	50
4.1. Tane İnceltme Deney Sonuçları .....	50
4.2. Tane Boyutuna Bekleme Süresi ve Karıştırmanın Etkisi .....	54

	<b>Sayfa</b>
4.3. Tane İnceltme Sırasında Bekleme ve Karıştırmanın Mekanik Özelliklere Etkisi .....	59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	67
5.1 Sonuçlar.....	67
5.2 Öneriler .....	68
KAYNAKLAR .....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	72

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Yüksek sıcaklıklarda bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü.	15
Çizelge 2.2. Farklı Ti ve B oranlarında Al-Ti-B master alaşımları .....	19
Çizelge 3.1. A206 alaşımının nominal kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %)	43
Çizelge 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan A206 alaşımlarının tane inceltme işlemi yapılmadan önceki başlangıç kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %) .....	43
Çizelge 3.3. Elektroliz karışım oranları .....	47
Çizelge 4.1. % Ti miktarına göre hesaplanan ortalama tane boyutları .....	52
Çizelge 4.2. Sürekli karıştırma işlemi sonucunda elde edilen tane boyutları .....	54
Çizelge 4.3. Karıştırma işlemi yapılmadan elde edilen tane boyutları .....	56
Çizelge 4.4. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının dökülmüş halde %Ti, %B ve mekanik özelliklerinin (akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama) değişimi .....	60
Çizelge 4.5. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının T6 halde %Ti, %B ve mekanik özelliklerinin (akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama) değişimi .....	61
Çizelge 4.6. %Ti miktarına bağlı olarak A206 alaşımının mekanik özelliklerin değişimi .....	63

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. r yarıçaplı bir kürenin homojen çekirdeklenmesinde serbest enerji değişimi .....	4
Şekil 2.2. Düzlemsel bir kalıp duvarında kesik kürenin heterojen çekirdeklenmesi .....	5
Şekil 2.3. Homojen ve heterojen çekirdeklenmede oluşan katı serbest enerji değişimi .....	6
Şekil 2.4. Al – Cu denge diyagramı.....	16
Şekil 2.5. Al - %4 Cu alaşımında yaşlandırma işleminin aşamaları .....	16
Şekil 2.6. Al – Mg denge diyagramı .....	17
Şekil 2.7. Ticari saflıkta alüminyuma, eşit oranda titanyum eklenmiş farklı tane incelticilerin karşılaştırılması .....	20
Şekil 2.8. A319 alüminyum alaşımında tane inceltme sonuçları .....	20
Şekil 2.9. Tipik bir tane inceltme eğrisi.....	22
Şekil 2.10. a) Alüminyumun $TiAl_3$ partikülleri üzerinde çekirdeklenerek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi, b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltmiş sıvı Al'un soğuma eğrilerinin gösterimi .....	23
Şekil 2.11. Al-Ti faz diyagramının alüminyum tarafı.....	27
Şekil 2.12. Peritektik hulk teorisi modeli.....	29
Şekil 2.13. Hiper çekirdeklenme teorisi modeli .....	30
Şekil 2.14. Birim hacimdeki parçacık sayısı ile birim hacimdeki tanelerin sayısının değişimi .....	32
Şekil 2.15. Alcan testi kalıbı.....	34
Şekil 2.16. Alcoa testi deney düzeneği .....	35
Şekil 2.17. KBI halka testi kalıbı .....	36

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.18. a) Tane inceltme test kalıbı b)Tane inceltme deney numunesinin seçilen incelenme yüzeyleri .....	37
Şekil 2.19. 1 atm hidrojen basıncında alüminyumda hidrojen çözünürlüğü.....	38
Şekil 2.20. Döner sistemle gaz alma sistemi şematik gösterimi.....	41
Şekil 3.1. Alcan standart tane inceltme deney düzeneği şematik gösterimi .....	46
Şekil 3.2. Tane inceltme deney numunesi ölçüleri ve inceleme yüzeyi.....	46
Şekil 3.3. Çekme testi numunelerinin boyutları.....	49
Şekil 4.1. %Ti miktarı ile ortalama tane boyutu değişimi.....	52
Şekil 4.2. Bekleme süresinin tane boyutuna etkisi .....	57
Şekil 4.3. Bekleme süresince %Ti ve % B değişimi .....	57
Şekil 4.4. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının dökülmüş halde akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama değişimi.....	60
Şekil 4.5. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının T6 ısıtım sonrası akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama değişimi.....	62
Şekil 4.6. A206 alaşımının dökülmüş halde %Ti miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi.....	63
Şekil 4.7. A206 alaşımının T6 halde %Ti miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi .....	64
Şekil 4.8. Çekme cihazından alınan test sonuçları ve gerilme - % uzama eğrisi .....	65
Şekil 4.8. Çekme cihazından test sonuçlarından alınan veriler kullanılarak çizilen dayanım - % uzama eğrisi.....	66

## RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan elektrik rezistanslı ergitme ocağı .....	44
Resim 3.2. Döner sistemli gaz alma ve cüruf giderme cihazı a) genel görünüm ve b) yakın görünüm .....	44
Resim 3.3. Elektrolitik parlatma cihazı .....	47
Resim 3.4. Mikroyapıların görüntülenmesinde kullanılan optik mikroskop ...	48
Resim 3.5. Mikroyapı üzerinden tane boyutu ölçümü.....	48
Resim 3.6. Çekme çubuklarının döküldüğü kokil kalıp makinesi.....	49
Resim 4.1. Tane inceltme yapılmamış A206 alaşımının tane yapısı.....	50
Resim 4.2. A206 alaşımına farklı a) %0,00 b) %0,01 c) %0,02 d) %0,03 e) %0,05 f) %0,10 g) %0,20 h) %0,30 Ti miktarlarında tane inceltici ilavelerinden sonraki tane yapıları.....	51
Resim 4.3. A206 alaşımına %0,05 Ti içerecek şekilde tane inceltici ilave edildikten sonra sürekli karıştırma işlemi yapılarak a)0 dak b) 30 dak. c) 60 dak. d) 90 dak. alınan numunelerin tane yapıları .....	55
Resim 4.4. A206 alaşımına %0,05 Ti içerecek şekilde tane inceltici ilave edildikten sonra karıştırma işlemi yapılmadan a)0 dak. b)30 dak. c)60 dak. d)90 dak. alınan numunelerin tane yapıları .....	56

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$^{\circ}\text{C}$	Celcius
<b>K</b>	Kelvin
$A_{\text{KD}}$	Katı-duvar arayüzey alanı
$A_{\text{KS}}$	Katı-sıvı arayüzey alanı
$S(\theta)$	Şekil faktörü
$\Delta G$	Serbest enerji değişimi
$\Delta G_V$	Hacim serbest enerji değişimi
$\gamma_{\text{KS}}$	Katı-sıvı arayüzey serbest enerjisi
$\gamma_{\text{DK}}$	Duvar-katı arayüzey serbest enerjisi
$\gamma_{\text{DS}}$	Duvar-sıvı arayüzey serbest enerjisi
$\Delta T$	Alt soğuma
$T_m$	Ergime sıcaklığı
<b>dak.</b>	Dakika
<b>mm</b>	Milimetre
<b>s</b>	Saniye
$r^*$	Kritik çekirdek yarıçapı
<b>%</b>	Yüzde
$\mu\text{m}$	Mikro metre
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>ppm</b>	Milyonda bir parçacık (Parts per million)

## 1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları üzerine yapılan tane inceltme çalışmalarının başlangıcı 1930 - 1940'lı yıllara kadar dayanmaktadır. Eski araştırmacılar tane inceltici miktarını belirlemek veya tane incelticinin verimini ölçmek için standart test prosedürü olmadığı için kendi geliştirdikleri test metotlarını kullanıyorlardı. Fakat günümüzde ALCAN testi, ALCOA testi, KBI halka testi ve Alüminyum birleşme testi gibi standart tane inceltme testleri geliştirilmiştir. Bunların içinde ALCAN testi ve ALCOA testleri en yaygın olarak kabul edilen testlerdir [Murty ve ark., 2002].

Tane inceltme işlemi yüksek hızda soğuma, soğuma sırasında sıvının mekanik titreşime maruz bırakılması ve tane inceltici elementlerin ilavesi ile gerçekleştirilir. Bu şekilde katılaşma sırasında daha ince eşeksiz taneler oluşur. Alüminyumda tane inceltme işlemi yaygın olarak sıvı alüminyuma titanyum ve bor elementlerinin ilavesiyle yapılmaktadır. Al-Ti ve Al-Ti-B gibi master alaşımların alüminyuma titanyum ve bor katkısı tablet şeklindeki tuzlardan daha etkilidir.

Alüminyumun tane inceltme mekanizmaları hakkında çeşitli teoriler öne sürülmesine rağmen kesin bir fikir birliği ortaya çıkmamıştır. Easton ve StJohn yakın zamanda mevcut teoriler üzerinde yaptığı değerlendirmede tane inceltme teorisini çekirdeklenme teorisi ve çözünen teorisi olmak üzere iki başlık altında sınıflandırmıştır.

Çekirdeklenme teorilerine göre ergitme potasına katılan tane incelticiler ergiyik içerisinde heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturarak yapının daha ince taneli olmasında rol oynamaktadır. Çözünen teorisi ise sıvı alüminyumda çözünen elementlerin tane inceltme işlemi üzerindeki etkisini ele almaktadır [Murty ve ark., 2002].

Tane inceltme işlemi uygulanmış alüminyum dökümlerinde, tane inceltme işleminin, akışkanlığı artırdığı, daha iyi besleme sağladığı, daha gözeneksiz bir yapı oluşturduğu, mekanik özellikleri iyileştirdiği, yorulma direncini ve sızdırmazlık direncini arttırdığı bilinmektedir.

Tane inceltme işlemi uygulanmış sıvıda bekleme süresine bağlı olarak tane boyutunun arttığı belirlenmiştir. Fakat bekleme süresine bağlı olarak karıştırma işleminin tane boyutuna etkisi ile ilgili herhangi bir çalışma yoktur.

Bu çalışmada Al - %4,5Cu (A206) alaşımına Al<sub>5</sub>TiB tane inceltici %0, %0,01, %0,02, %0,03, %0,05, %0,1, %0,2 ve %0,3 Ti içerecek şekilde ilave edilerek optimum Ti değeri tespit edilmiştir. İlave olarak tane inceltme işlemi uygulanmış sıvıda bekleme süresince sıvı karıştırma işleminin tane inceltme üzerinde etkisi araştırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Çekirdeklenme

Tane çekirdeklenmesi ve tane büyümesi katılaşma sırasında iki önemli mekanizmalardır. Çekirdeklenme, yarı kararlı sıvıdan kristaller oluşturan termal olarak aktive edilmiş bir süreçtir. Çekirdeklenme mekanizmaları homojen ve heterojen olmak üzere ikiye ayrılır.

#### 2.1.1. Homojen çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenmede sıvının kalıp duvarları ile temas etmediği, sıvının içinde çekirdeklenmeyi başlatabilecek herhangi bir katı partikül ve gaz boşluğunun olmadığı kabul edilir. Sıvının her noktasında çekirdeklenme ihtimali aynıdır.

Ergime sıcaklığının ( $T_m$ ) altında  $\Delta T$  sıcaklığında  $G_1$  serbest enerjisine sahip belli bir hacimdeki sıvı atomların bir kısmı bir araya gelerek küçük katı küme oluşturursa sistemin serbest enerjisi  $G_2$ 'ye değişecektir. Eş. 2.1'de  $\Delta G$  deki değişim formülü verilmiştir.

$$\Delta G = G_2 - G_1 \quad (2.1)$$

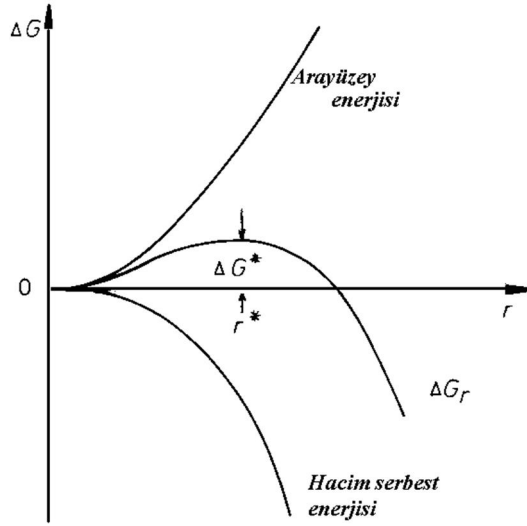
Serbest enerjideki toplam değişim Eş. 2.1'in düzenlenmesiyle Eş. 2.2'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta G = -V_K \Delta G_V + A_{KS} \gamma_{KS} \quad (2.2)$$

Eğer katı-sıvı arayüzey serbest enerjisi izotropik ise oluşan katının şekli küredir. Böylece serbest enerjideki değişim Eş. 2.3'deki gibi olur.

$$\Delta G_T = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{KS} \quad (2.3)$$

Eş. 1.3'de verilen  $\frac{4}{3}\pi r^3$  yarıçapı  $r$  olan küresel embriyonun hacmidir,  $4\pi r^2$  ise küresel embriyonun yüzey alanıdır.  $\Delta G_V$  negatif değişen hacim serbest enerjideki değişim ve  $\gamma$  serbest yüzey enerjisidir. Embriyonun kararlı olması için  $\Delta G_T$  negatif olmalıdır. Küçük katının (embriyonun) oluşması serbest enerji değişimine negatif katkıda bulunur. Fakat katı-sıvı arayüzeyinin oluşmasından dolayı da pozitif bir katkı mevcuttur (Şekil 2.1).



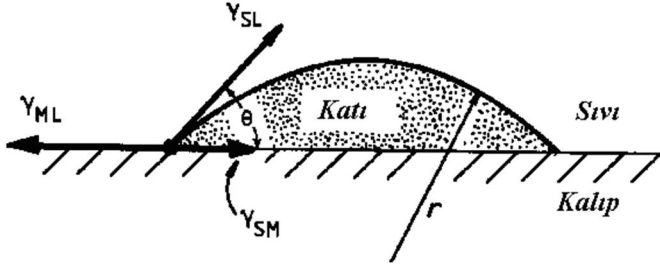
Şekil 2.1.  $r$  yarıçaplı bir kürenin homojen çekirdeklenmesinde serbest enerji değişimi [Porter ve Easterling, 1990]

Eğer oluşan katının yarıçapı ( $r$ ) kritik yarıçaptan ( $r^*$ ) büyük ise kararlı katı partiküller çekirdek adını alır. Katının yarıçapı kritik yarıçaptan küçükse katının ergimesi ile sistem serbest enerjisi düşer. Katının yarıçapı kritik yarıçapa eşit ise çekirdek etrafını saran sıvı ile kararsız dengededir.

### 2.1.2. Heterojen çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenme için kritik büyüklükteki küre embriyonun oluşumu

dikkate alınmıştı. Fakat heterojen çekirdeklenmede çekirdeğin tamamen küre olması gerekli değildir. Eğer, kesik küre şeklindeki embriyonun yüzeyi çekirdekleyici tarafından kararlı duruma getirilirse embriyo, embriyo yüzeyinin genişlemesi ile çekirdek durumuna gelir. Bu şekilde oluşan çekirdek küre şeklindeki çekirdekten çok daha az atom içermektedir.



Şekil 2.2. Düzlemsel bir kalıp duvarında kesik kürenin heterojen çekirdeklenmesi [Porter ve Easterling, 1990]

Şekil 2.2'de üç arayüzey enerji oluşumu vardır.  $\gamma_{KS}$  ve  $\gamma_{DK}$  pozitifdir ve sırasında çekirdeklenme prosesi oluşan arayüzeyden kaynaklanır.  $\gamma_{DS}$  ise kesik kürenin altında duvar-sıvı arayüzeyinin kaybolmasından kaynaklanır ve negatiftir. Heterojen çekirdeklenmede serbest enerji değişim Eş. 2.4'deki gibi olur.

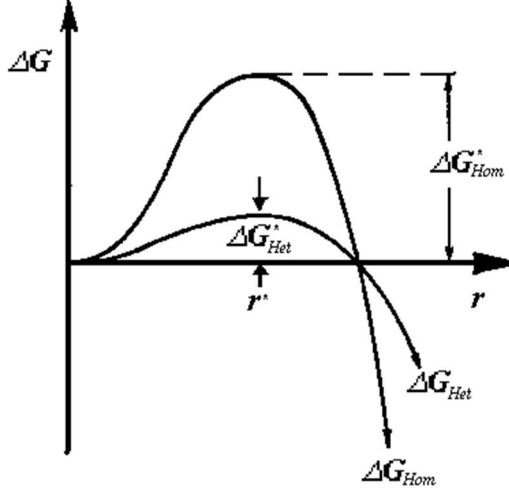
$$\Delta G_{Het} = -V_K \Delta G_V + A_{KS} \gamma_{KS} + A_{KD} \gamma_{KD} - A_{KD} \gamma_{DS} \quad (2.4)$$

Eş. 2.4 ıslatma açısı ( $\theta$ ) ve kesik kürenin yarıçapı dikkate alınarak Eş. 2.5 şeklinde yazılabilir.

$$\Delta G_{Het} = \left\{ -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4 \pi r^2 \gamma_{KS} \right\} S(\theta) \quad (2.5)$$

Kritik çekirdek yarıçapı homojen ve heterojen çekirdeklenmede aynıdır (Şekil 2.3). Yalnız kritik çekirdek hacmi değişir. Bu sebepten çekirdekleyici esas

olarak çekirdeklenmeye karşı gelen arayüzey serbest enerjisini düşürür [Porter ve Easterling, 1990].



Şekil 2.3. Homojen ve heterojen çekirdeklenmede oluşan katı serbest enerji değişimi [Porter ve Easterling, 1990]

## 2.2. Alüminyum ve Alüminyum Döküm Alaşımları

Alüminyumun saf halde kullanımı elektronik ve elektrik endüstrisi dışında yaygın değildir. Alüminyum genellikle bakır, silisyum, magnezyum, çinko ve lityum gibi elementler ile alaşım halinde kullanılır. Alüminyum, döküm alaşımı halinde iken özellikle düşük ergime sıcaklığı, iyi akıcılık, tane yapısı kontrol kabiliyeti, iyi yüzey kalitesi, düşük gaz çözünürlüğü, işlenebilme kabiliyeti ve ısı işlem ile yüksek mekanik özellikler açısından avantaj sağlar. Fakat yüksek hidrojen çözünürlüğü, sıcak yırtılma ve düşük süneklilik açısından da dezavantaj sağlar [Metals Handbook, 1989].

Alüminyum alaşımları, tüm döküm yöntemleri (kum kalıba döküm, kokil döküm, basınçlı döküm, hassas döküm, santrifüj (merkezkaç) döküm, sıkıştırma döküm ve sürekli döküm yöntemi) ile şekillendirilebilme açısından üstün özelliklere sahiptir.

Döküm alüminyum alaşımları Amerikan Alüminyum Birliğine göre;

1xx.x saf alüminyum (%99,0 minimum), 2xx.x bakır (%4-%4,6),  
3xx.x silisyum (%5-%17) bakır ve/veya magnezyumlu, 4xx.x silisyum (%5-  
%12), 5xx.x magnezyum (%4-%10), 7xx.x çinko (%6,2-%7,5), 8xx.x kalay,  
9xx.x diğerleri olarak sınıflandırılır.

Saf alüminyum (1xx.x serisi); 1xx.x serisi alüminyum alaşımlarında 1'den sonraki iki rakam alaşımın saflık seviyesini belirler. Örneğin; 150.0 minimum %99,50 saflığındaki alüminyum tanımlar.

Alüminyum-bakır döküm alaşımları (2xx.x serisi); Bu seri alüminyum alaşımlarına ısı işlem uygulanabilir. Yüksek dayanım, düşük korozyon dayanımı, düşük akıcılık, düşük süneklik özellikleri gösterir. Uygulama alanları; otomotiv ve uçakların silindir kafalarında, dizel motorların pistonlarında, egzoz sistemlerinin parçalarında kullanılır.

Alüminyum-silisyum-bakır/magnezyum döküm alaşımları (3xx.x serisi); Bu serideki alüminyum alaşımlarına ısı işlem uygulanabilir. Yüksek dayanım, düşük süneklik, iyi akıcılık, iyi işlenebilirlik ve iyi aşınma dayanımı gösterir. Bu seride bakır içeren alaşımların korozyon dayanımı düşüktür. Uygulama alanları; otomobil silindir blokları ve kafaları, otomobil jantları, havacılıkta birleştirme elemanları, kompresör veya pompa parçalarında kullanılır.

Alüminyum-silisyum döküm alaşımları (4xx.x serisi); Bu seriye ısı işlem uygulanamaz. Orta dayanım, orta süneklik, iyi aşınma dayanımı, çok iyi döküm özellikleri ve iyi korozyon dayanımı sergiler. Uygulama alanları; pompa gövdeleri, ince kesitli dökümlerde kullanılır.

Alüminyum-magnezyum döküm alaşımları (5xx.x serisi); Bu seriye ısı işlem uygulanamaz. Yüksek korozyon dayanımı, iyi işlenebilirlik, orta derecede döküm özellikleri sergiler. Ayrıca anodize edilerek iyi yüzey görünümü

sağlanabilir. Uygulama alanları; kum kalıba dökülerek elde edilen parçalarda kullanılır.

Alüminyum - çinko döküm alaşımları (7xx.x serisi); Bu serideki alüminyum alaşımlarına ısıtma işlemi uygulanabilir. İyi boyutsal kararlılık, iyi korozyon dayanımı, kötü döküm özellikleri, iyi işlenebilirlik (bakır ilavesi ile) özelliklerine sahiptir. Uygulama alanları; boyutsal kararlılık ve korozyon direnci istenen parçaların üretiminde kullanılır.

Alüminyum-kalay döküm alaşımları (8xx.x serisi); Bu seriye ısıtma işlemi uygulanamaz. Düşük dayanım, çok iyi aşınma direnci ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Uygulama alanları; aşınma dayanımı gerektiren yataklarda kullanılır [Metals Handbook, 1989].

### **2.2.1. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi**

#### Antimon

%0,05 veya üzerinde eklenen antimon ötektiküstü bileşimlerdeki alüminyum-silisyum alaşımlarını ötektik lamelli faz yapısına geçirerek inceltir. Antimonun ötektik yapıyı değiştirmedeki etkisi fosforun bulunmaması ve yeterli bir hızlı katılma hızına bağlıdır. Antimon aynı zamanda sodyum ve stronsiyumla tepkimeye girerek ötektik yapıyı ve dökülebilirlik oranını olumsuz yönde etkileyen kaba intermetalik yapı oluşturur. Antimon, potansiyel zehirlilik ve sağlığa uygunluk açısından bakıldığında, özellikle ortaya çıkardığı antimon hidrür gazı oluşumu ve insanın diğer antimon bileşimlerine maruz kalması sonucu oluşabilecek etkileri açısından bakıldığında ağır metal olarak sınıflandırılmaktadır.

#### Berilyum

Berilyum çok az miktarda eklenmesi oksitlenmeyi azaltır. Magnezyum içeren

alüminyum alaşımlarında inklüzyonların azalmasını sağlar. Araştırmalar sonucunda oksitlenmeyi önlemek için magnezyum miktarı arttıkça daha fazla berilyum miktarına ihtiyaç olduğu görülmüştür. Berilyum yüksek derişim seviyelerinde (>%0,04), demir içrikli intermetalik bileşiklerin yapısını etkileyerek önemli derecede dayanıklılık ve süneklik sağlar. Çözünmez faz yapısı üzerindeki yararlı değişimlerinin yanı sıra, berilyum, bileşimini değiştirerek, Al-Fe-Si bileşindeki magnezyumu uzaklaştırır ve böylece tamamen sertleştirme amaçlı kullanımına olanak sağlar. Ancak berilyum içrikli bileşimler, alaşımların eritme, döküm işlemleri, curuf giderme ve kaynaklama esnasında birtakım çok özel önlemler alınmasını gerektiren sayılı kanserojen bileşiklerden biridir. Standartlara göre maksimum berilyum kaynak elektrotundaki ve kaynak yapılacak metaldeki oranı sırasıyla %0,008 ve %0,010 olarak belirtilmiştir.

### Bizmut

%0,1'den yüksek miktarda bizmut alüminyum döküm alaşımlarının işlenebilirliğini artırır.

### Bor

Bor diğer metallerle birleşerek  $Al_2$  ve  $TiB_2$  gibi boritler meydana getirir.  $TiB_2$  eriyik alüminyumun içindeki  $TiAl_3$  gibi aktif tane inceltim fazları ile etkileşime girerek stabil çekirdeklenme yerleri oluşturur. Metalik boritler makine işlemlerinde takım ömrünü azaltır ve iri taneli partikül halindeyken mekanik özellikler ve süneklik üzerindeki zararlı etkileri ile sakıncalı inklüzyonlar oluşturur. Yüksek bor konsantrasyonu, ocakta tortulaşma, dökümde segregasyon ve inklüzyon riskini artırır.

### Kadmiyum

%0,1'den yüksek olan konsantrasyonlarda işlenebilirliği artırır.

767 °C (1413 °F) da buharlaşma gerçekleştiğinden dolayı gerekli önlemlerin alınması gereklidir.

### Kalsiyum

Kadmiyum zayıf bir alüminyum-silisyum ötektik tamamlayıcıdır. Hidrojen çözünürlüğünü artırır ve çoğunlukla eser miktarda döküm gözeneklerine yol açar. %0,005'den yüksek olan kalsiyum miktarı alüminyum-magnezyum alaşımlarındaki sünekliği olumsuz etkiler.

### Krom

Krom ilavesi çoğunlukla düşük miktarlarda, oda sıcaklığında yaşlandırma ve tane büyümesi oluştuğu bilinen dengesiz termal bileşimlerde uygulanır. Krom genellikle son derece kısıtlı bir katı-durum çözünürlüğü gösteren  $CrAl_7$  bileşimini oluşturur ve bu nedenle tane büyümesini engellemek için yararlıdır. Basıncılı dökümlerdeki bileşimlerde bazen demir, manganez ve krom içeren kirliliklere rastlanır. Fakat kokil dökümlerde çok nadir rastlanmaktadır. Krom bazı alaşımlarda korozyon direncini artırır ve su verme kabiliyetini artırır.

### Bakır

İlk ve en geniş kullanıma sahip olan alüminyum alaşımları %4-10 bakır içerenlerdir. Bakır ısıtılardan önce ve ısıtılardan sonra sertliği ve dayanıklılığı önemli ölçüde artırır. %4 - 6 Cu içeren alaşımlar termal işlemlere son derece güçlü yanıt vermektedir. Bakır genellikle korozyona olan direnci azaltır. Bazı spesifik bileşimlerde ve araç gereçlerde gerilim korozyonu hassaslığı sağlar. Bakır ilavesi aynı zamanda sıcak yırtılma direncini azaltır ve akıcılığı düşürür.

### Demir

Sıcak yırtılma direnci geliştirir. Kalıp yapışmasındaki veya kalıp dökümlerinin lehimlemesindeki eğilimi azaltır. Ancak artan demir beraberinde sünekliliği düşürür. Demir, tepkimeye girerek sıvı alüminyum alaşımlarında çok sayıda çözünmeyen faz oluşturur. Bunların en yaygın olanları  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$ , and  $\alpha-AlFeSi$ ' dur. Bu çözünmeyen fazlar özellikle yüksek sıcaklıklardaki dayanıklılığı yükseltirler. Artan demir içeriği ile birlikte çözünmeyen fazların oranı yükseldikçe döküm faktöründeki akışkanlık ve besleme gibi karakteristik özellikleri olumsuz şekilde etkilenir. Demir tortulaşma evrelerinde manganez, krom ve diğer elementlere eşlik eder.

### Kurşun

Kurşun genellikle alüminyum dökümlerde işlenebilirliği arttırmak için %0,1'den yüksek kullanılır.

### Magnezyum

Isıl işlem uygulanan Al-Si alaşımlarının dayanıklılık ve sertlik gelişiminin temelini oluşturur. Genellikle bakır, nikel ve diğer elementleri içeren daha karmaşık Al-Si alaşımlarında kullanılmaktadır. Sertleştirme aşamasında  $Mg_2Si$  yaklaşık olarak %0,70 Mg'ye tekabül eden bir çözünürlük limiti gösterir. Bunun ötesinde daha ileri bir dayanıklılık limiti veya matris yumuşama oluşmaz. Birinci derece genel dayanıklılık isteyen Al-Si alaşımlarında %0,40 ile %0,070 aralığında magnezyum kullanılır.

Al - Mg alaşımları parlak bir yüzey kaplama ve korozyon dayanıklılığı gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Aynı zamanda dayanıklılık ve yumuşaklık sunan cazip bileşimlerde geniş çapta kullanılmaktadır. Ortak bileşim aralığı %4 - 10 Mg arasındadır ve %7 Mg'dan fazlasını içeren bileşimlere ısıtıl işlem uygulanabilmektedir. Yüksek magnezyum kompozisyonları

dengesizlik ve oda sıcaklığındaki yaşlandırma ısı işlemi özelliklerini desteklemektedir.

### Manganez

Genelde döküm bileşimlerinde safsızlık olarak görülür ve çoğu kokil dökümlerde düşük miktarda olmasına dikkat edilir. Manganez dövme alaşımlarında önemli bir alaşım elementidir. Bu yüzden ikincil döküm bileşimleri yüksek manganez miktarı içerebilir. Pekleşme olmadığında manganez dökme alüminyum alaşımlarda gözle görülür bir yarar sağlamaz. Ancak bazı bulgular yine de %0,5 Mn den fazla içeren alaşımlardaki MnAl' un yüksek hacim oranı dökümün içsel sağlamlığına fayda sağlayabildiğini belirtmiştir. Manganez aynı zamanda kimyasal cilalama ve anotlamadaki tepkiyi değiştirmek için kullanılır.

### Civa

Civa içeren bileşimler özellikle deniz ortamlarında katodik koruma sistemleri için geçici anot malzemesi olarak tasarlanmıştır. Bu deniz suyunda pasifleşmeyen sabit elektronegatif alaşımların kullanımı çevresel nedenlerden dolayı ağır bir şekilde yasaklanmıştır.

### Nikel

Genellikle bakırla birlikte yüksek sıcaklık dayanımını artırmak için kullanılır. Aynı zamanda termal genişleme katsayısını azaltma özelliği vardır.

### Fosfor

$AlP_3$  bileşiminde, fosfor çekirdekleşir ve ötektiküstü Al-Si alaşımlarındaki birincil silisyum fazını inceltir. Çok düşük miktarda fosfor ötektiküstü Al-Si alaşımlarının ötektik yapısını irileştirir.

Fosfor yaygın ötektik düzenleyiciler olan sodyum ve stronsiyumun etkisini azaltır.

### Silisyum

Silisyumun alüminyum alaşımlar üzerindeki olağanüstü etkisi döküm özelliklerini geliştirmektedir. Saf alüminyuma katılan silisyum akışkanlığı, sıcak yırtılma direncini ve besleme özelliklerini önemli ölçüde artırır. Bütün döküm işlemlerinde kullanılan en göze çarpan bileşimler alüminyum-silisyum ailesindedir. Ticari alaşımlarda ötektikaltı ve ötektiküstü aralıklarda yaklaşık %25 Si'a kadar kullanılabilir.

Silisyumun döküm işlemlerinde genel olarak uygulanabileceği en ideal aralık; yavaş soğutma hızlarında ( alçı kalıba döküm, hassas döküm ve kum kalıba döküm gibi ) %5 – 7, kokil dökümler için %7 – 9 ve basınçlı döküm için %8 – 12 'dir. Bu tavsiyelerin nedeni soğutma hızı, akışkanlık ve ötektik üzerindeki besleme miktarının etkisi arasındaki ilişkidir. Silisyum eklenmesi aynı zamanda özgül ağırlık ve termal genişleme katsayısında azalmaya neden olmaktadır.

### Gümüş

Gümüş sınırlı bir aralıkta sadece %0,5 - 1,0 arası konsantrasyonlarda birinci sınıf mukavemetli Al - Cu alaşımlarda kullanılır. Gümüş çökelme sertleşmesi ve gerilimli korozyon direncine katkıda bulunur.

### Sodyum

Alüminyum- silisyum ötektiğini modifiye eder. Alüminyum-magnezyum alaşımlarda varlığı gevrekleşmeye neden olur. Sodyum fosfor ile etkileşime girerek ötektik üzerindeki modifikasyon etkisini ve fosforun birincil silisyum fazındaki etkisini azaltır.

### Stronsiyum

Al – Si ötektiğini modifiye etmek için kullanılır. Etkili bir modifikasyon çok düşük seviyede ilaveyle elde edilir. Fakat genellikle kullanılan geri kazanılan stronsiyum aralığı %0,008 – 0,04'tür. Yüksek ilave miktarı döküm gözenekliliğine neden olur. Özellikle döküm işlemlerinin veya katılaşmanın daha yavaş olduğu kalın kesitli bölgelerde görülür. Gaz giderme verimi de aynı zamanda yüksek stronsiyum seviyelerinde olumsuz etkilenebilir.

### Kalay

Kalay ilavesinin sürtünmeyi önleyici özelliği vardır ve bu yüzden yatak uygulamalarında kullanışlıdır. Döküm alaşımları en fazla %25 Sn içerebilir. Kalay ilavesi aynı zamanda işlenebilirliği arttırmak için kullanılabilir. Kalay bazı alaşım sistemlerinin çökelme sertleşmesini etkileyebilir.

### Titanyum

Çoğu zaman az miktarlardaki bor ilavesiyle ile alüminyum döküm alaşımlarının tane yapısını inceltmek için yaygın olarak kullanılır. Etkili bir tane inceltim için  $TiB_2$  nicel ölçümünden fazla titanyum gerekmektedir. Titanyum çoğu zaman sıcak, gevrek bileşimlerde çatlama eğilimini azaltmak için uygulanan tane inceltme işleminde gereken konsantrasyondan daha yüksek konsantrasyonda kullanılmaktadır.

### Çinko

Çinkonun alüminyuma eklenmesiyle elde edilen önemli faydalar yoktur. Ancak bakır ve/veya magnezyum katımıyla birlikte çinko ısıl işlemleri veya doğal olarak yaşanan bileşimlerin elde edilmesini sağlar. Bu bileşimlerden birkaçı sıklıkla kullanılmaktadır. Çinko aynı zamanda çoğunlukla ikincil kokil ve basınçlı döküm bileşimlerinin içinde bulunur.

### 2.3. Saf Alüminyum

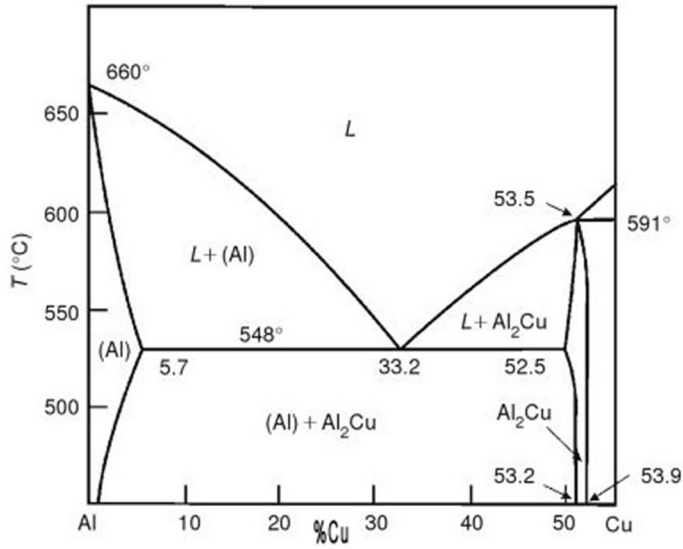
Alüminyum oksidin ergitme - elektrolizi ile üretilen an alüminyum (metalurjik alüminyum örneğin; A199.5) ve metalurjik ya da burada alüminyumdan üç kez elektrolizle rafine edilen çok arı alüminyum (örneğin; A199.99R), atmosferin etkisine, yiyecek ve tatlı madde endüstrisi gibi birçok kimyasal etkiye karşı dayanıklıdır. En önemli arılmayan element demir ve silisyumdur. Gıda endüstrisinde konserve kurulan için alüminyum bantlar (A199.5), süt şişesi kapaklarında rolyeler (A199.5) ve mamullerin paketlenmesinde, paketleme maddelerinde kimyasal ya da mikrobiyolojik etki ile değişiklik kesinlikle istenmediğinden çok fazla kullanılır. A199.5 konsantre nitrik asidin depolanması içinde uygundur ve çok uzun etki sürelerinde de tahribat görülmez. Petrol endüstrisinde de kullanılır. Bunun dışında arı alüminyum için; mutfak ve ev aletlerinde, elektrik iletim malzemesi olarak kablolarda, akım raylarında, kondansatörlerde ve kablo kılıflarında sac ve profil olarak dekorasyon için inşaat ve taşıt imalinde, alüminyum tozu olarak alüminyum boyalarında ve kaplarında kullanılır. [Demircioğlu, 2002].

### 2.4. Alüminyum – Bakır Alaşımları

Bakır, alüminyumla 548°C'de %33,2 bakır içeren bir ötektiğin bulunduğu bir denge diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Ötektik sıcaklığında bakırın ( $\alpha$ ) fazında erirliği %5,7'dir. ( $\alpha$ ) katı fazının limiti 250°C'ye kadar bilinmektedir (Çizelge 2.1). Daha aşağı sıcaklıklarda limit kesin olarak bilinmemektedir. Yüksek sıcaklıklarda bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü artmaktadır [Demircioğlu, 2002].

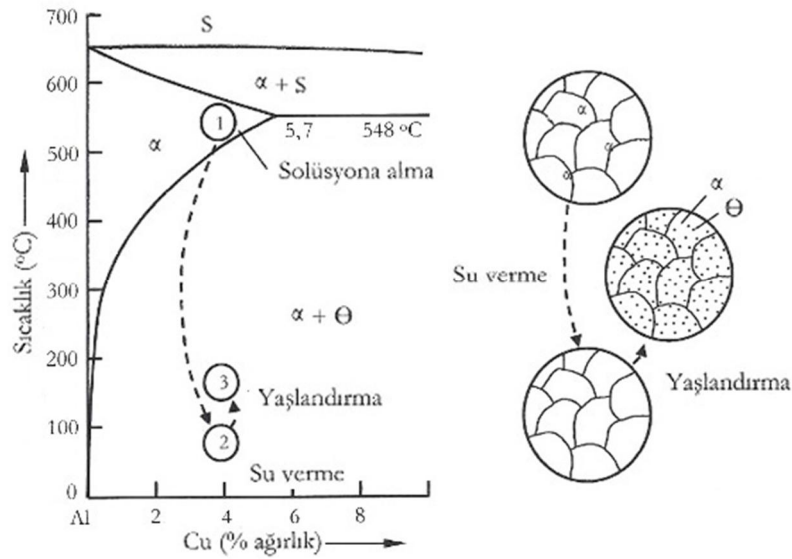
Çizelge 2.1. Yüksek sıcaklıklarda bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü

Sıcaklık (°C)	548	500	450	400	350	300	250
%Bakır	5,65	4,05	2,50	1,40	0,85	0,45	0,1-0,2



Şekil 2.4. Al - Cu denge diyagramı [Zolotorevsky ve ark., 2007]

Alaşımaların sertlik ve mukavemeti, soğuk deformasyon veya uygun ısıl işlemlerle artırılabilir. Yaşlandırma (çökeltme sertleştirme) ısıl işlemi, kısmi katı çözünebilirlik gösteren yani solvus eğrisi içeren ve katı çözünebilirliği artan sıcaklıkla artan veya azalan sıcaklıkla azalan alaşım sistemlerine uygulanabilir [Gündüz, 2012].

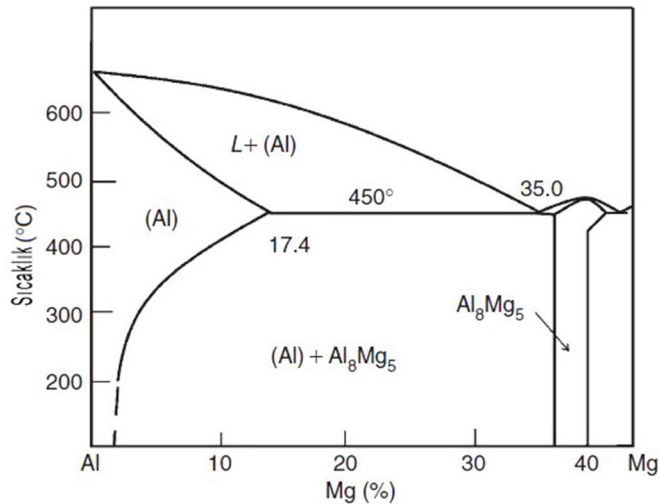


Şekil 2.5. Al - %4 Cu alaşımında yaşlandırma işleminin aşamaları [Gündüz, 2012]

Yaşlandırma işleminin aşamalarını detaylı olarak açıklamak için Al - %4 Cu alaşımı incelenebilir. Bu alaşımın yaşlandırma işlemi aşamaları Şekil 2.5'de şematik olarak gösterilmektedir. Yaşlandırma sertleştirme için, alaşım tek fazlı ( $\alpha$ ) bir yapı elde etmek amacıyla ötektik sıcaklıkla solvüs çizgisi arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır (1 noktası) ve alaşımdaki bütün fazların tek faz içerisinde çözünmeleri sağlanıncaya kadar bu sıcaklıkta bekletilir. Bu işleme çözündürme (solüsyona alma) işlemi denilir. Çözündürme işleminden sonra alaşım hızlı soğutulur (su verme) aşırı doymuş katı çözelti elde edilir. Aşırı doymuş katı çözeltinin kararlı hale getirilebilmesi için 130-190 °C arasında yapay olarak yapılan yaşlandırma işlemi sonucunda alaşım çökeltme sertleşmesine maruz kalır [Gündüz, 2012].

## 2.5. Alüminyum – Magnezyum Alaşımları

Magnezyum, alüminyumla 437°C'de %67,7 Mg ve 450°C'de %35 Mg içeren iki ötektik ihtiva eden bir denge diyagramı yapar (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Al - Mg denge diyagramı [Zolotorevsky ve ark., 2007]

Oda sıcaklığında magnezyumun içindeki alüminyumda çözünürlüğü %1,9'dur. Al – Mg alaşımları Al–Cu alaşımında olduğu gibi, ısıtım uygulanacak alaşımlardan istenen karakteristik bir katı eriyiğe sahiptir.

Alüminyum alaşımlarında %8'in üstünde magnezyum, alaşımın ısıtılma özelliklerini iyileştirir. Bunun altında magnezyum içeren alaşımlar ısıtılma için uygun değildirler. Ancak bakır ve silisyum gibi bazı alaşım elementleri içeriyorsa ısıtılma işlemi uygulanabilir. Al-Mg alaşımları deniz suyuna karşı oldukça dayanıklıdır [Demircioğlu, 2002].

## 2.6. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme

Tane inceltme, eritme sırasında yapılan geniş aşılama yöntemlerinden bir tanesidir ve döküm tane yapısının farklılaştırılmasını sağlar. Bu şekilde katılaşma sırasında daha ince eşeksenli taneler oluşur [Metals Handbook, 1989]. Döküm alaşımlarının tane boyutu sıvı metal içerisindeki çekirdek sayısına ve alt soğumaya bağlıdır. Hızlı soğutma genellikle daha küçük tane boyutunu sağlamaktadır [Brown, 1999].

Sıvı alüminyum alaşımlarına eklenen bazı elementler küçük tanelerin oluşumu için çekirdekleri sağlayabilir. İntermetalik faz parçacıkları içeren tane incelticiler heterojen çekirdeklenmeye yardımcı olur. En yaygın tane inceltici olarak kullanılan titanyum özellikle bor ile birlikte güçlü bir çekirdekleştirici etkiye sahiptir [Metals Handbook, 1989].

Alüminyum alaşımlarında ince taneli yapı mikroçekmeyi, sıcak yırtılmayı ve hidrojen kaynaklı gaz boşluklarını en aza indirerek döküm parçanın sağlamlığını teşvik eder.

Jones ve Pearson alüminyumda etkili bir tane inceltme işlemi için tane boyutunun 220  $\mu\text{m}$ 'nin altında olması gerektiğini belirtmişlerdir [Jones ve Pearson, 1976].

Etkili bir tane inceltme işlemi besleme kabiliyetini artırma, kopma dayanımını artırma, mekanik özellikleri geliştirme, basınç sızdırmazlık direncini artırma, ısıtılma işlemlere daha iyi yanıt verme ve kimyasal, elektrokimyasal, mekanik

işlemler sonrası daha iyi görünüm verme avantajları sağlar [Brown, 1999].

Yeniden ergitme, sıvı durumda bekletme, çok yüksek sıcaklıklar ve temizleme gibi işlemlerin sonucunda tane inceltmenin etkisi kaybolmaktadır.

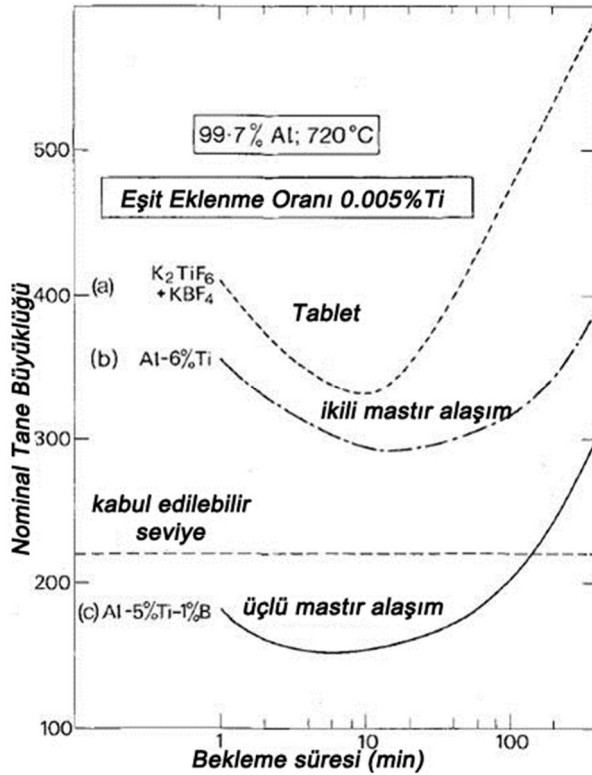
### 2.6.1. Tane İncelticiler

Tüm alüminyum alaşımları uygun bir tane incelticiyle tamamen eşeksenli ve ince taneli yapıda katılaştırılabilir. Alüminyumda kullanılan en yaygın tane incelticiler Al-Ti ve Al-Ti-B master alaşımlarıdır. Al-Ti master alaşımları genellikle %3 ile %11 arası titanyum içermektedir [Metals Handbook, 1989]. Al-Ti-B master alaşımları ise %2,5 ile %11 arası titanyum ve %0,1 ile %2,5 arasında bor içermektedir (Çizelge 2.2). Al-Ti-B master alaşımlarında Ti:B oranı 1 ile 50 arasındadır [Mwamba, 2005].

Çizelge 2.2. Farklı Ti ve B oranlarında Al-Ti-B master alaşımları

Tür	% Ti	% B	Ti:B
Al2.5Ti2.5B	2,5	2,5	1
Al3TiB serisi	3	1,0	3
	3	0,5	6
	3	0,2	15
	3	0,1	30
Al5TiB serisi	5	1,0	5
	5	0,5	10
	5	0,2	25
	5	0,1	50

Al-Ti ve Al-Ti-B gibi master alaşımların alüminyuma titanyum ve bor katkısı tablet şeklindeki tuzlardan daha etkilidir. Üçlü master alaşımların ikili master alaşımlardan daha üstün olması borun Al-Ti master alaşımlarının tane inceltme performansını açığa çıkaran önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir (Şekil 2.7).



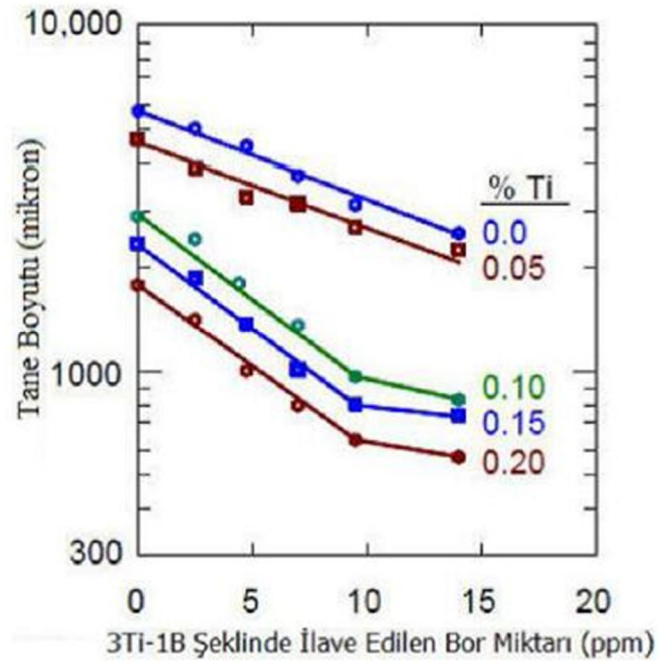
Şekil 2.7. Ticari saflıkta alüminyuma, eşit oranda titanyum eklenmiş farklı tane incelticilerin karşılaştırılması [Jones ve Pearson, 1976].

### 2.6.2. Tane inceltici miktarları

Pratikte, tane incelticilerin en çok etkili oldukları şart, ilavenin dökümden çok az önce yapılmasıdır. Normal döküm sıcaklıklarında kabul edilen ilave miktarları %0,05-0,15 Ti, 0,04 B veya %0,01-0,08 arası Ti ile birlikte %0,003 B'dur. %0,003-0,008 arası B ilave etmek yüksek Si içeren alaşımlarda tercih edilmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda %0,03 Ti ile birlikte %0,01 B kullanılması önerilir. Tane incelticilerin bu oranlardan fazla ilave edilmesi, özellikle karmaşık alaşım sistemlerinde intermetalik bileşiklerin yer çekimi segregasyonunu meydana getirir. Borun fazla ilavesi sonucunda istenmeyen kalıp reaksiyonları oluşabilir ve boridlerin fırının tabanından dışarı sızmasına yol açabilir [Metals Handbook, 1989].

Pasciak ve Sigworth [Pasciak ve Sigworth, 2001] tarafından A319 alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmalarından alınan diğer bir sonuç Şekil 2.8'de

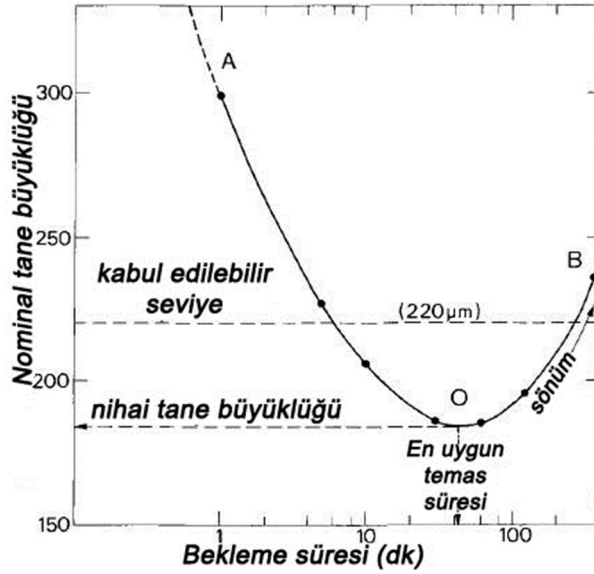
gösterilmiştir. Buna göre tane inceltici olarak bor miktarı arttırılsa bile titanyum ilave etmeksizin etkili bir tane inceltme yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.8. A319 alüminyum alaşımında tane inceltme sonuçları [Pasciak ve Sigworth, 2001].

### 2.6.3. Tane inceltme eğrileri

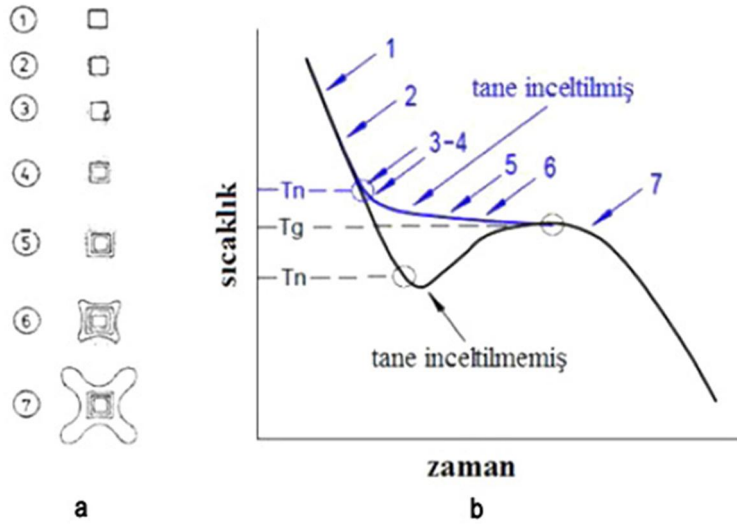
Tipik bir tane inceltme eğrisi iki ayrı bölümden oluşur (Şekil 2.9). Tane inceltici ekledikten sonra, ilk olarak tane boyutu zamanla küçülür (AO çizgisi). O noktasında tane boyutu minimum seviyeye ulaşarak “nihai tane boyutu” dediğimiz hali alır. Bu nokta genellikle tane incelticinin temas süresini verir. O noktadan sonra fazladan tutulduğunda sadece tane boyutunda artışa sebep olur. Yukarı doğru çıkan OB çizgisi de “sönüm” olarak bilinir [Murty ve ark., 2002].



Şekil 2.9. Tipik bir tane inceltme eğrisi

#### 2.6.4. Tane inceltme işleminin soğuma eğrisine etkisi

Backerud [Backerud, 1983] katı  $TiAl_3$  partikülleri üzerinde alüminyumun çekirdeklenecek büyümesini ve bu yolla tane inceltme mekanizmasını Şekil 2.10.a'da gösterilen şema ile açıklamıştır. Sigworth ve Kuhn [Sigworth ve Kuhn, 2007] bu şemayı Şekil 2.10.b'de gösterilen başka bir şematik soğuma eğrisi ile ilişkilendirerek açıklamışlardır. Buna göre, tane inceltici olarak ilave edilen titanyum içeren mastır alaşımı içerisinde çok sayıda  $TiAl_3$  intermetalik bileşiği bulunmaktadır. Dökümden birkaç dakika önce tane inceltici mastır alaşımı ilave edildiğinde milyonlarca mikroskobik  $TiAl_3$  partikül sıvı metal içerisine dağılmaktadır.



Şekil 2.10. a) Alüminyumun TiAl<sub>3</sub> partikülleri üzerinde çekirdeklenecek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi, b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı Al'un soğuma eğrilerinin gösterimi [Sigworth ve Kuhn, 2007]

Bunlardan bir tanesini Şekil 2.10.a'da şematik olarak 1 ile gösterilen parçacık olduğunu varsayabiliriz. TiAl<sub>3</sub> sıvı alüminyum ile temas ettikten sonra çözünmeye başlar. Bunun sonucu partikül çevresinde partikül ile temas eden alüminyum titanyumca zenginleşmeye başlayacaktır. Bu olay Şekil 2.10.a'da 2 nolu skeç ile temsil edilmektedir. Bu anda Şekil 2.11'de verilen faz diyagramından görüleceği gibi ilk önce partikül etrafında titanyumca zengin sıvı ana metale göre daha yüksek likidüs sıcaklığına sahip olması nedeni ile katılaşmaya başlayacaktır. Böylece Şekil 2.10.a'da 3 nolu skeç ile gösterildiği gibi partikül yüzeylerinde ilk katı çekirdeklenme başlamış olacaktır. Aynı şekilde 4 ve 5 ile işaretlenen skeçlerde gösterildiği gibi partikül etrafındaki çözülmüş titanyumca zengin alüminyumu tüketerek büyümeye devam edecek ve büyüme bu sıvı tükenince duracaktır. Metal soğumaya devam ederken bu kez çekirdekler etrafında dentritik büyüme başlayacak ve 6-7 noktalarında gösterildiği gibi devam edecektir. Şekil 2.10.b ayrıca TiAl<sub>3</sub> partiküllerinin tane inceltme etkisini soğuma eğrisine yansıtması açısından da önemlidir. Tane inceltici ilave edilmemiş bir dökümün soğuma eğrisi incelendiğinde çekirdekleşmenin kendiliğinden oluşabilmesi için sıvının T<sub>g</sub> (büyüme) sıcaklığı altında bir T<sub>n</sub> (çekirdekleşme) sıcaklığına kadar birkaç

derecelik alt soğuma gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Buna karşılık tane inceltici ilave edilmiş bir dökümün soğuma eğrisi ise  $T_g$  sıcaklığının hemen üzerinde 3-4 noktalarında alüminyumun çekirdeklenebildiğini göstermektedir. Buna göre basit bir termal analiz yöntemi ile alüminyum dökümünde etkili bir tane inceltme gerçekleşip gerçekleşmediği kolayca anlaşılabilir.

## 2.7. Tane İnceltme Mekanizmaları

Al-Ti-B master alaşımlarının eklenmesinden sonra oluşan alüminyum tane inceltme mekanizmaları halen bir tartışma konusudur. Bu konuda çeşitli tane inceltme mekanizmaları öne sürülmüştür fakat kesin bir fikir birliği ortaya çıkmamıştır. Mekanizmaların üzerinde yapılan ilk çalışmalar Glasson, Emley ve McCartney tarafından incelenmiştir. Easton ve StJohn yakın zamanda mevcut çalışmaları incelemiş ve onları çekirdeklenme teorisi ve çözünen teorisi olmak üzere iki başlık altında sınıflandırmıştır.

Çekirdeklenme teorileri alüminyumun heterojen çekirdeklenmesini ele almaktadır. Çözünen teorisi ise sıvı alüminyumda çözünen elementlerin tane inceltme işlemi üzerindeki etkisini ele almaktadır. Şimdiye kadar tane inceltme mekanizması üzerinde uygulanabilen teoriler altı grupta incelenebilir: Bunlar karbür/borür teorisi, faz diyagramı/peritektik teorisi, peritektik hulk teorisi, hiper çekirdeklenme teorisi, çift çekirdeklenme teorisi ve çözünen teorisi [Murty ve ark., 2002].

### 2.7.1. Çekirdeklenme teorileri

#### Karbür/Borür teorisi

Karbür teorisi ilk olarak Cibula tarafından ortaya atılmış, Jones ve Pearson tarafından desteklenmiştir. Bu teoriye göre Al-Ti master alaşımının tane inceltme etkisi hiçbir karbon eklentisi yapılmasa dahi TiC çekirdeğinin varlığına bağlıdır. Bu teoriyi desteklemek için öne sürülen görüşte çok düşük

miktarlardaki karbon seviyelerinin, TiC oluşumunu desteklemek için oldukça yeterli olduğu belirtilmiştir. Alüminyum eriyiğinin içerisindeki TiC'ün kararlılığı üzerinde hala görüş ayrılığı olmasına rağmen Banerji ve Reif alüminyum için etkili bir tane inceltici olabilecek Al–Ti–C master alaşımını üretmişlerdir. Cisse Rapp, Zheng, Mohanty ve Gruzleski' de aynı şekilde TiC'ün alüminyum için iyi bir çekirdekleştirici olduğunu belirtmişlerdir. Banerji ve Reif, Al–Ti–C master alaşımlarının tane inceltici olarak faydaları üzerinde yaptıkları çalışmalarda kristalleşme merkezlerinin titanyum ve karbonca zengin olduğunu göstermişlerdir. Bu Cibula'nın TiC'ün alüminyum için muhtemel çekirdekleştirici olduğu görüşünü desteklemiştir. Ancak TiC parçacıklarının sıvı alüminyuma direkt olarak katımı verimsiz bir tane inceltme sonucu vermektedir.  $AlB_2$ ,  $TiB_2$  ve  $(Al, Ti)B_2$  gibi boritler tane inceltici olarak kullanıldığında Al–Ti–B master alaşımlarının içinde bulunurlar [Murty ve ark., 2002].

Cibula, Jones ve Pearson, titanyum ve borun birlikte tuz veya master alaşım biçiminde sıvıya ilave edildiğinde  $TiB_2$  parçacıklarının sıvı alüminyumda dağılarak alüminyum için çekirdeklenme merkezi görevi gördüğünü öne sürmüşlerdir.

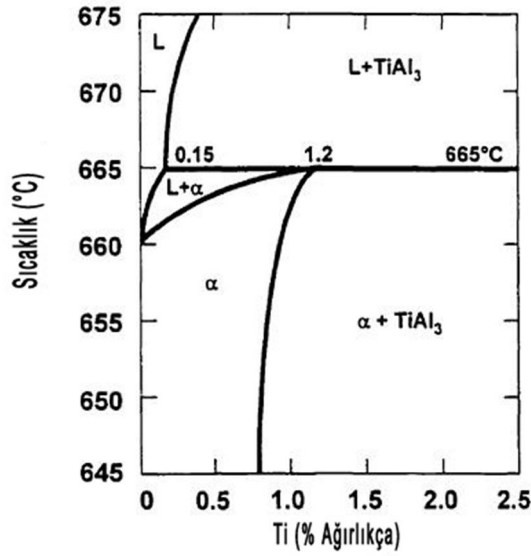
Bir grup araştırmacı Al–Ti–B master alaşımlarıyla tane inceltme yapıldığında, alüminyum tanelerinin merkezinde borür kümeleri ve yığınları meydana geldiğini belirtmiştir. Nötron ile aktifleştirilmiş bor özışınçiziminde, çekirdeğin hem titanyum hem de bor içerdiği görülmüştür. Ancak Marcantonio, Mondolfo, Maxwell ve Hellawell  $TiAl_3$ 'ün varlığında TiC veya  $TiB_2$ 'ye nazaran alüminyumun çekirdeklenmesinde çok az veya hiç altsoğuma gerektirmediğini ve böylece  $TiAl_3$ 'ün, TiC veya  $TiB_2$ 'ye nazaran daha iyi bir çekirdekleştirici olduğunu göstermişlerdir. Davies ve arkadaşlarına göre  $TiB_2$  sıvı alüminyumda düşük arayüzey enerjisine sahip olduğundan alüminyum için etkili bir çekirdekleştirici değildir. Davies ve arkadaşları alüminyum tanelerinin içindeki  $TiAl_3$  bileşiğini inceleyerek bunun çekirdeklendirici olduğunu belirtmiştir. Ayrıca Davies, Amberg ve Kobayashi bu görüşü

alüminyum ve  $TiAl_3$  arasındaki çok yönlü yönelim ilişkilerinin varlığına yönelik kanıt sunarak desteklemiştir.  $TiB_2$  ve alüminyum arasında hiçbir yönelim ilişkisi bulunamamış ve mastır alaşımlarda borürler tane sınırlarına doğru toplanırken alüminitlerin alüminyum tanelerinin ortasında kaldığı gözlemlenmiştir [Murty ve ark., 2002].

Mohanty ve Gruzleski borürlerin tane sınırlarına itildiğini onaylamışlardır. Son zamanlarda ikili Al–B master alaşımları ile yapılan alüminyum tane inceltme çalışmaları,  $AlB_2$ 'nin alüminyum için etkili bir çekirdekendirici olmadığını öne süren herhangi bir tane inceltici göstermemiştir. Buna karşın  $TiAl_3$  bileşiğinin alüminyum için etkili bir çekirdekendirici olduğu bilinmektedir. Al–Ti master alaşımları ötektiküstü konsantrasyonlarda kullanıldığında iyi bir tane inceltme işlemi gözlemlenmiştir [Murty ve ark., 2002].

#### Faz diyagramı/Peritektik teorisi

Bir grup araştırmacı, ilk olarak Crossley ve Mondolfo tarafından öne sürülen  $TiAl_3$ 'ün peritektik reaksiyon sonucu alüminyum çekirdeklediği görüşünü desteklemiştir. Marcantonio ve Mondolfo,  $TiAl_3$ ,  $ZrAl_3$ ,  $VAI_{10}$ ,  $NiAl_3$ ,  $CrAl_7$ ,  $AlB_2$  gibi bazı alüminitlerin alüminyum için iyi bir çekirdekendirici olduğunu belirtmişlerdir. Marcantonio ve Mondolfo bu alüminitlerin her birinde düşük veya sıfıra yakın altsoğutmanın mümkün olduğu çekirdeklenmeler üzerinde düşük atomik yer değiştirmeler ile en az bir yönelim ilişkisi olduğunu gözlemlenmiştir.  $CrAl_7$  bileşiğinde bu tarz bir ilişki saptanamamıştır. Bu Cibula ve Eborall'ın  $CrAl_7$  bileşiğinin düşük bir çekirdekendirici olduğu görüşüyle uyumaktadır [Murty ve ark., 2002].



Şekil 2.11. Al-Ti faz diyagramının alüminyum tarafı [Sigworth, 1984].

Peritektik teorisinin en büyük problemlerinden biri Al-Ti ikili faz diyagramına göre sıvı alüminyumun peritektik sıcaklıkta %0,15Ti içermesinin gerekli olduğudur (Şekil 2.11). Fakat alüminyumun Al-Ti-B master alaşımları ile yapılan tane inceltme işlemi sırasında, master alaşım şeklinde katılan Ti miktarı genellikle %0,01'dir. Bu miktar peritektik reaksiyonun oluşması için gereken miktardan oldukça azdır. Bu problemi önlemek amacıyla Delamore ve Smith  $TiAl_3$  ün muhtemelen hiçbir peritektik reaksiyon olmaksızın alüminyum ile heterojen çekirdeklenme sağlayabileceğini öne sürmüşlerdir. Ancak çoğu araştırmacı peritektik reaksiyonun oluşabilmesi için borun sıvı metalde peritektik bileşimde değişiklik meydana getirerek titanyum oranının düşürmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Marcantonio ve Mondolfo %0,05 Ti, %0,01 B, ve  $659,5^{\circ}C$  de üçlü bir ötektiğin varlığını öne sürmüşlerdir [Murty ve ark., 2002].



Ancak bu görüş diğer araştırmacılar tarafından desteklenmemiş ve tane inceltme işlemleri daha düşük konsantrasyonlarda incelenmiştir. Maxwell ve Hellawell Al-Ti-B sisteminde aşağıdaki gibi %0,0001 B ve %0,15 Ti'un sıvı

bileşimde üçlü bir peritektik reaksiyon olduğunu öne sürmüşlerdir.



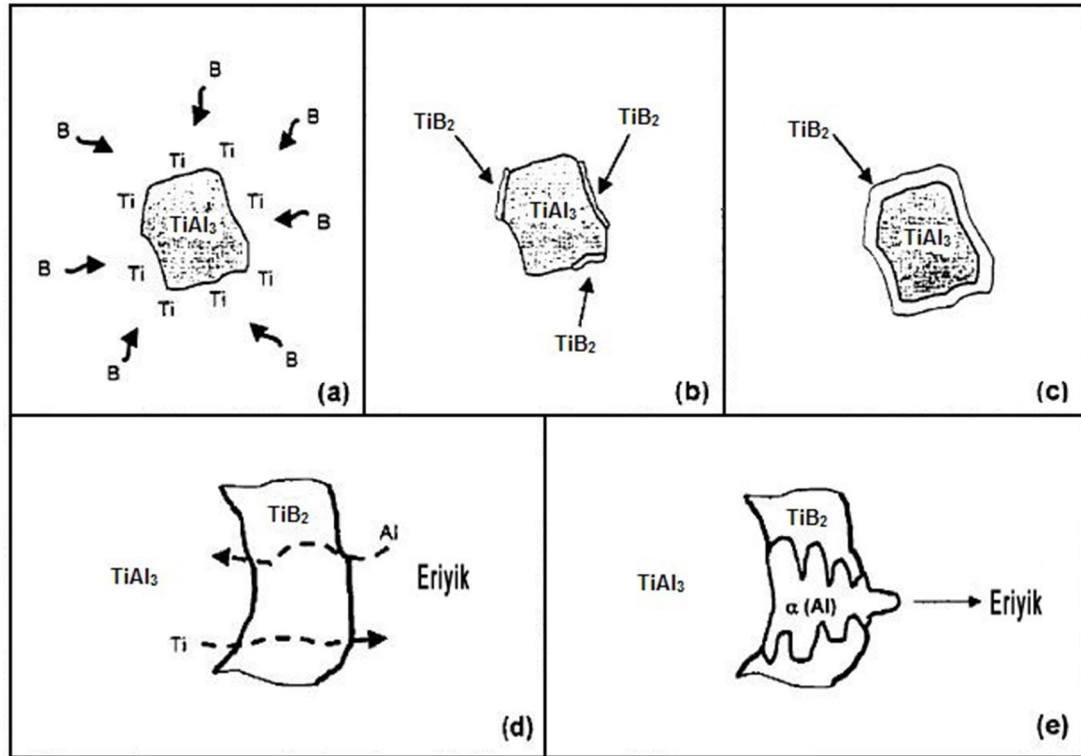
Bir grup araştırmacı Al–Ti–B faz diyagramının alüminyumca zengin kısmını incelemiş ve borun Al–Ti faz diyagramını önemli şekilde etkilemediğini kanıtlamışlardır.

Yukarıda sözü geçen araştırmalar Al–Ti–B master alaşımında bulunan  $\text{TiAl}_3$  parçacıklarının alüminyum eriyiğe katıldıktan sonra çözündüğünü varsaydığından dolayı alüminyumun katılma esnasındaki peritektik reaksiyon sayesinde çekirdeklenmesi için uygun değildir. Eğer  $\text{TiAl}_3$  parçacıkları alüminyum eriyikte peritektik sıcaklığa erişinceye kadar ( $665^\circ\text{C}$ ) çözünmeseydi eriyiğin içerisinde yeterli sayıda  $\text{TiAl}_3$  parçacıkları sağlanması durumunda peritektik reaksiyona dahil olarak tane inceltimi gerçekleştirilirdi. Durum böyle olsa bile Al–Ti–B master alaşımında Al–Ti alaşımı üzerindeki yüksek tane inceltme veriminin açıklanması gerekir. Borun yüzeyde alüminitler ile boritler olmak üzere ikili parçacıklar oluşturarak  $\text{TiAl}_3$ 'ün çözünme oranını düşürdüğü şeklindeki öneriler vardır. Borun Al–Ti alaşımının tane inceltme verimi üzerindeki etkisi henüz net olarak bilinmemektedir [Murty ve ark., 2002].

### Peritektik hulk teorisi

Hulk teorisi yakın zamanda Backerud ve Dong tarafından öne sürülmüş, Vader ve meslektaşları tarafından desteklenmiştir. Bu teori  $\text{TiAl}_3$  bileşiğini  $\text{TiB}_2$  bileşiğinden daha iyi bir çekirdeklendirici olarak tanımlarken, boritin alüminitlerin çözünme oranını nasıl yavaşlattığını açıklamaya çalışır. Alüminit, borit kabuğunun içinde peritektik bileşime yakın olan sıvı hücreden ayrılarak çözünür. Ancak bazı araştırmalar eriyikteki bora rağmen alüminitlerin yüksek sıcaklıklarda çözünmekte olduklarını gösterdi. Bu teori şematik olarak Şekil 2.12'de verilmiştir. Peritektik hulk teorisi savına karşı

Mayes ve arkadaşları, geçirmeli elektron mikroskopu ile yaptıkları araştırmaları sayesinde  $TiAl_3$  parçacıklarının ortasında  $TiB_2$ 'nin varlığını saptamışlardır [Murty ve ark., 2002].



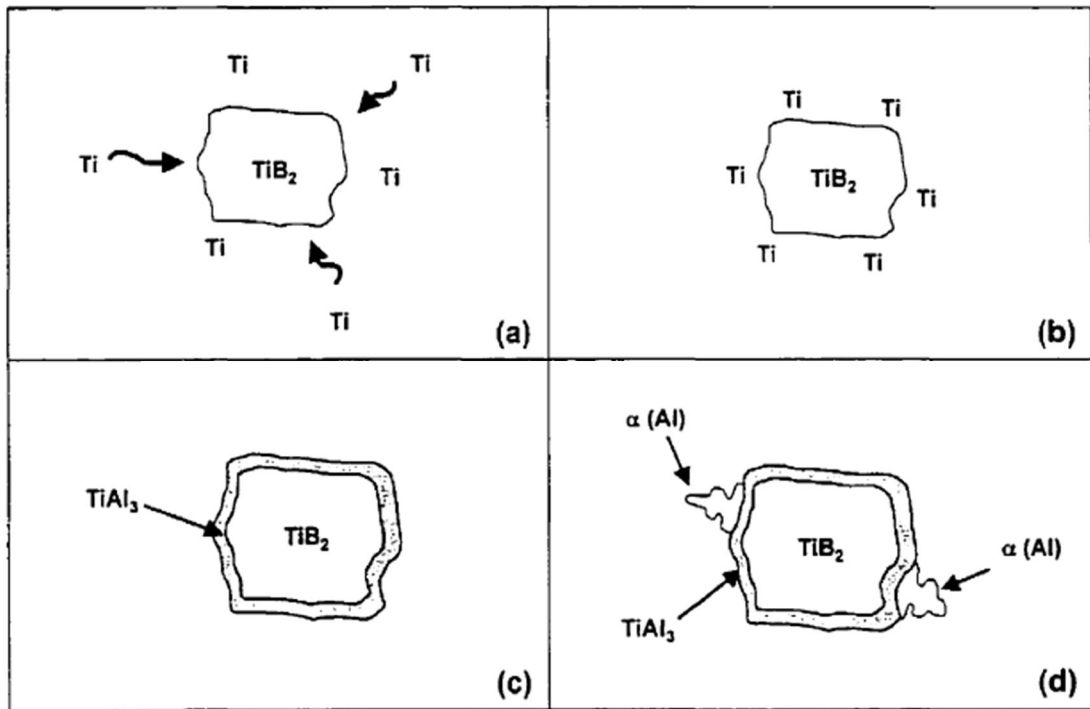
Şekil 2.12. Peritektik hulk teorisi modeli [Ibarra, 1999]; a)  $TiAl_3$ 'ün kısmi çözünmesi ve  $TiAl_3$ 'e B'nin difüzyonu, b)  $TiB_2$ 'nin çözünebilirliği artırılır, c)  $TiAl_3$  üzerinde  $TiB_2$ 'nin koruyucu tabaka oluşturması, d) Al ve Ti'nin koruyucu tabaka boyunca eş zamanlı büyümesi, e) Çekirdek ve  $\alpha$ -Al'un büyümesi

Johnson ve arkadaşları tane inceltme veriminin az miktarda sıvı metalin dökülmesi ve katılaşması sırasında dahi değişmediğini belirtmişlerdir. Eğer peritektik hulk teorisi doğru ise artan miktarlarda yapılan döküm ve katılaştırma işlemi sonrasında tane inceltme verimi düşer. Bu da titanyumun hulkun dışına difüzyonuna neden olur ve peritektik reaksiyon gerçekleşmez. Bu teori sönme sonrası sıklıkla tavsiye edilen çökmüş parçacıkların karıştırılması işlemindeki tane inceltmenin geri kazanımını açıklamamaktadır. Ayrıca bazı durumlarda alüminyum tanelerinin içerisinde borit kabukları

bulunmuştur.

### Hiper çekirdeklenme teorisi

Hiper çekirdeklenme teorisi Jones tarafından öne sürülmüş ve çok az miktardaki titanyum ve borun tane inceltme işlemi üzerindeki büyük etkisi dolayısıyla bu isimle ifade edilmiştir. Bu teori çözünmüş  $TiB_2$ 'de Ti atomlarının sıvı arayüzeyindeki oranına bağlı olarak ayrışma eğilimi olduğunu belirtmektedir. Böylece  $TiAl_3$  ince katmanı borür üzerinde çökelir ve peritektik reaksiyon sonucu  $\alpha$ -alüminyum çekirdeklenir. Bu teori şematik olarak Şekil 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.13. Hiper çekirdeklenme teorisi modeli [Ibarra, 1999]; a) Eriyikte yoğun Ti miktarı b)  $TiB_2$ -Sıvı metal yüzeyinde ayrışan Ti, c)  $TiB_2$  üzerinde  $TiAl_3$  tabakasının oluşumu, d) Peritektik reaksiyonla  $\alpha$ -Al çekirdeklenmesi

Bu teori ile ilgili asıl problem, Jones'un iddia ettiği test edilmesi zor olan mekanizma için deneysel bir kanıt bulunmamasıdır. Elementlerin

arayüzeylerde ayrıştıkları doğrudur fakat bu çekirdeklenmedeki önemli değişiklikleri açıklayamamaktadır.  $TiB_2$  ilavesinin kimyasal potansiyel ve aktifleşmede değişikliğe neden olabileceğini iddia etmiştir. Bu özellikler sabit olduklarından dolayı termodinamik olarak geçersiz gözükmemektedir [Sigworth, 1996].

### Çift çekirdeklenme teorisi

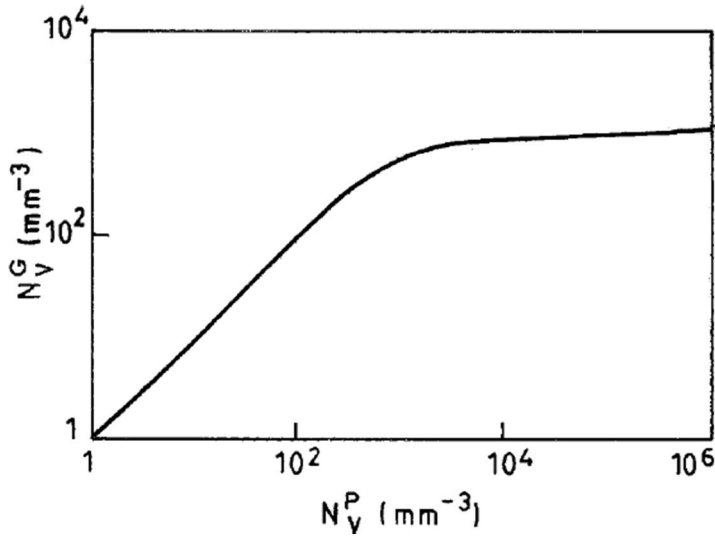
Bu teori ilk olarak Mohanty tarafından sunulmuş, Schumacher, Greer ve iş arkadaşları tarafından desteklenmiştir. Mohanty ve arkadaşları alüminyum eriyiğe direk olarak katılan farklı titanyum konsantrasyonlarında  $TiB_2$  parçacıklarının tane inceltme işlemindeki etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Alüminyum eriyiğin içerisindeki titanyum eksikliğinde,  $TiB_2$  bileşiğinin çekirdeklenme yeri olarak hareket etmeyip tane sınırlarına doğru itilmekte olduğunu belirtmişlerdir [Murty ve ark., 2002].

Schumacher ve Greer Al–Ti–B master alaşımına metalik cam ( $Al_{85}Ni_5Y_8Co_2$ ) eklemiş ve boritlerin  $TiAl_3$  tabakası ve sonrasında alüminyum ile çevrildiklerini gözlemlemişlerdir. Böylece bulguları Mohanty'nin teorisini desteklemiştir. Kearns'in son çalışmasında Schumacher ve Greer'in sonuçlarını destekleyici niteliktedir. Shumacher ve arkadaşları  $TiB_2$  yüzeyleri üzerindeki çekirdeklenme durumlarını direk olarak gözlemlemiş ve  $\alpha$ -Al çekirdeklenmesinin sadece ince bir  $TiAl_3$  tabakasına sahip  $TiB_2$  façetalarında (0001) oluştuğunu bildirmişlerdir. Ancak bu tarz bir arayüzey oluşumu için gereken nedenler henüz kesinlik kazanmamıştır [Murty ve ark., 2002].

### **2.7.2. Çözünen teorisi**

Johnson ve arkadaşları tarafından öne sürülen bu teori, hem çekirdeklendiricilerin hem de ayrışmakta olan çözünen maddelerin tane inceltme işlemini etkilediğini öne sürmektedir. Ayrışmanın (segregasyonun) derecesi tane inceltici faktör (GRF) cinsinden ölçülür. Aslında çözünen

maddelerin tane inceltici faktör olarak ele alınması çok öncelere dayanmaktadır. Titanyumun tane inceltme işlemlerindeki yeri ayrışmaya karşı olan kuvvetli eğilimine dayanmaktadır.



Şekil 2.14. Birim hacimdeki parçacık sayısı ( $N_v^P$ ) ile birim hacimdeki tanelerin sayısının ( $N_v^G$ ) değişimi [Murty ve ark., 2002]

Maxwell ve Hellawell hacim başı tane adedi arttıkça ( $N_v^G$ ) hacim başı birim parçacıklarının da ( $N_v^P$ ) yalnızca kritik bir değere kadar artacağını ve Şekil 2.14'de görüldüğü üzere bu değer in ötesinde doyuma ulaşacağını belirtmiştir. Bu da ( $N_v^P$ ) kritik değerinden sonra, eklenen partiküllerin etkili bir çekirdeklenme yeri oluşturmayacağı anlamına gelmektedir. Tane inceltme oranı yapısal altsoğutma parametresi (GRF), m likidüs eğrisi,  $C_0$  eriyikteki çözünüğün konsantrasyonu ve  $k$  ( $=C_S/C_L$ ,  $C_S$  ve  $C_L$  sırasıyla arayüzeydeki çözünen katı ve sıvı konsantrasyonlar) denge dağılma katsayısı olmak üzere  $mC_0(k-1)$  ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Bu parametre büyük olduğunda, büyüme oranı (ve dolayısıyla yayılan gizli ısı) küçük olacak ve böylece çok sayıdaki alt katmanların çekirdeklenme yeri olarak hareket etmesine olanak sağlayacaktır. Tane inceltme katsayısı küçük olduğu zaman da bunun tam zıttı olacaktır. Bu nedenle  $N_v^P$  kritik değeri büyük ölçüde tane inceltme katsayısına dayanmaktadır [Murty ve ark., 2002].

Titanyum, zirkonyum ve kromun peritektik bileşimlerdeki tane inceltici katsayıları sırasıyla 31; 5 ve 0,5'dir. Bu da açıkça belirtmektedir ki titanyum, zirkonyum ve kromdan çok daha iyi bir tane inceltici (etkili tane inceltici) elementtir. %0,01 Ti ilavesinde tane inceltme katsayısı 2,1 iken, %0,001 bor ilavesinde 0,02'dir. Bu da borun titanyum kadar etkili bir tane inceltici elementi olmadığını göstermektedir. Alaşımda birçok element bulunması durumunda tane inceltme katsayısı her bir elementin tane inceltme katsayısının tek tek toplanması sonucu belirlenir. Bu da çözünenler ile üçlü veya daha fazla bileşenlerin etkileşimlerinin göz ardı edildiği anlamına gelmektedir [Murty ve ark., 2002].

Johnson, Maxwell ve Hellawell eriyiğin içerisinde bir miktar titanyum bulunduğunda  $TiB_2$ 'nin alüminyum için iyi bir alt tabaka olabilmesi açısından yeterli aşırı soğutma sağlayacağını dolayısıyla  $TiB_2$  bileşiğinin iyi bir çekirdekleyici olduğunu iddia etmişlerdir. İlave elementlerin etkileri üzerine son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda bu öneriyi destekler niteliktedir. Alüminyumun Al-B master alaşımları ile sağlanan verimsiz tane inceltme işlemi aynı master alaşımlar ile yapılan tane inceltme işlemlerinin verimli olduğu Al-Si alaşımları durumunun nedeni silisyum tarafından sağlanan tane inceltici faktör olarak belirtilebilir [Murty ve ark., 2002].

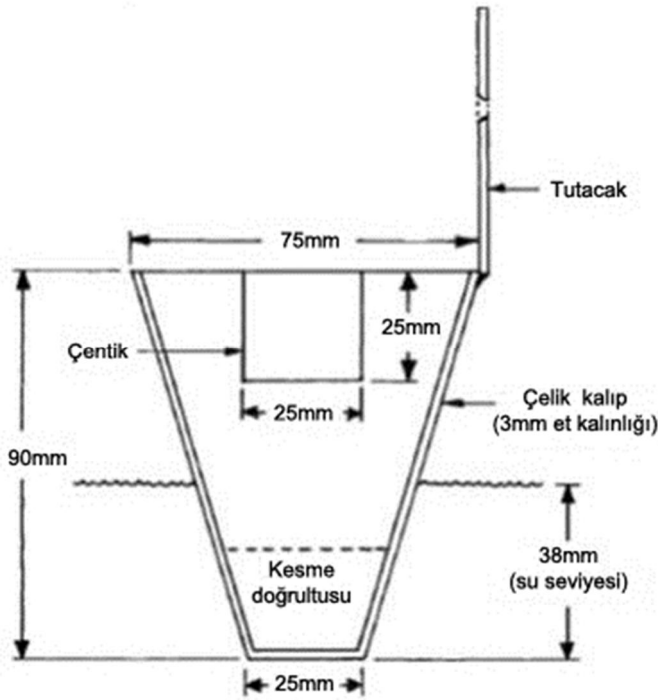
## 2.8. Tane İnceltme Testleri

Alüminyum ve alaşımları üzerine yapılan tane inceltme çalışmalarının başlangıcı 1930 - 1940'lı yıllara kadar dayanmaktadır. Bu zaman içerisinde, birçok araştırmacı, alüminyum ve alaşımlarının tane inceltmedeki karakteristik özelliklerini Zr, B, Nb, V, W, Ta ve Cr gibi bazı elementler ekleyerek incelemişlerdir. Ne yazık ki tane inceltme ölçüsünü belirlemek veya tane incelticinin verimini ölçmek için standart test prosedürleri yoktur. Bu yüzden eski araştırmacılar karşılaştırma amaçlı test döküm çubukları yapmış ve yüzey kesitlerinden tane yapılarını ölçmüşlerdir. 1970'li yıllarda Kanada alüminyum şirketi günümüzde "Alcan Testi" adı verilen tane inceltme testini

geliştirmiştir. Sonrasında bu testi takiben “Alcoa Testi”, “KBI halka testi” ve “Alüminyum birleşme testi” gibi diğer tane inceltme testleri geliştirilmiştir. Alcan ve Alcoa testleri daha popüler ve genellikle kullanılan testlerdir [Murty ve ark., 2002].

### 2.8.1. Alcan testi

Alcan testi prosedürü, alüminyum ve alaşımlarının dökümünde en çok kullanılan yöntem olan kokil kalıba döküm esnasında oluşan katılaşma oranını baz alacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu yüzden Alcan testi diğer tane inceltme testleri arasında en çok kullanılan test prosedürü olmuştur. Bu testte, tane inceltici eriyik alüminyuma eklenerek mekanik şekilde 30 saniye karıştırılır. Tane inceltme deney numuneleri yönlü katılaşmayı sağlamak amacıyla koni biçimindeki çelik kalıplar vasıtasıyla (Şekil 2.15) alınarak tabanı sürekli akan su ile soğutulur [Murty ve ark., 2002].

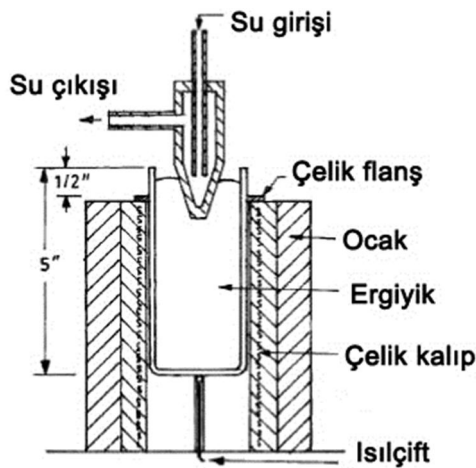


Şekil 2.15. Alcan testi kalıbı [Murty ve ark., 2002]

Soğuyan test numuneleri, dipten 25 mm enlemesine kesilir. Makroyapı / mikroyapı kesilen yüzeyden incelenir. Laboratuvar tarzı testlerde küçük miktardaki eriyiklerde 1 kg gibi Alcan testi kullanılamaz çünkü bu testin başlangıcı için gereken alüminyum eriyiğın en az 10 kg ağırlığında olması gerekmektedir.

### 2.8.2. Alcoa testi

Alcoa testinde yönlü katılaşma önceden ısıtılmış elik kalıba dökülen eriyik alüminyumun içine su ile soğutulmuş bakır yerleştirilerek yapılır (şekil 2.16).



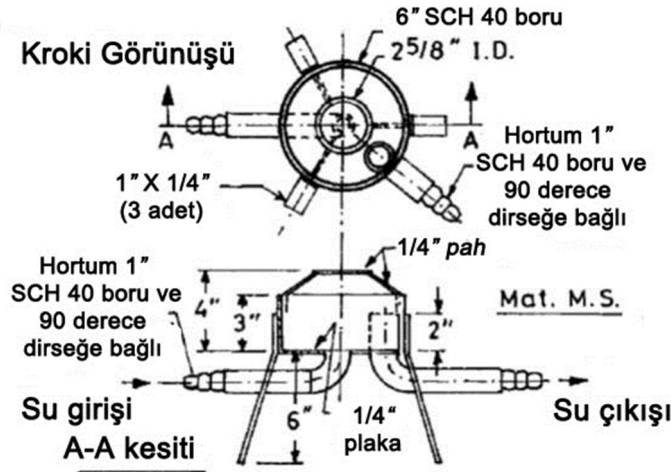
şekil 2.16. Alcoa testi deney duzeneği [Murty ve ark., 2002]

Alcan testinde olduğu gibi hızlı soğutma düşüncesine dayanılarak yapılmıştır. Yüksek soğuma oranlarına sahip olmaları, dökümün tane büyüklüğündeki inceltme, tane incelticinin gerçek tane inceltme değerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır [Murty ve ark., 2002].

### 2.8.3. KBI halka testi

KBI halka testinde hızlı soğutma kullanılmaz. Tane inceltici eriyik alüminyuma eklenir, sonrasında silisli tuğlanın üzerinde bulunan 75 mm çapında ve 25

mm yüksekliğindeki çelik halka kalıba boşaltılır. Bu testte döküm açık havada, çelik kalıp ve silisli tuğla kullanılarak üç aşamada soğutulur (Şekil 2.17). Bu test tarzı basit ve göz alıcı gözükse de dökümün tüm alt yüzeyinin parlatılması pahalıya ve zaman kaybına mal olmaktadır [Murty ve ark., 2002].



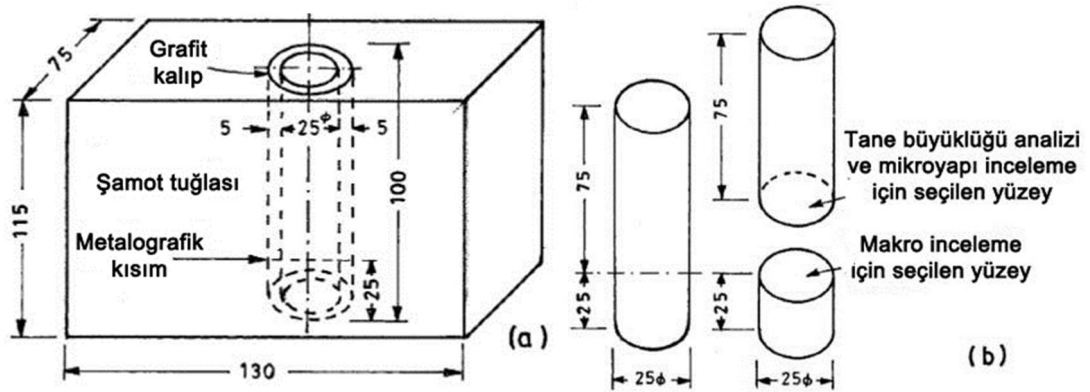
Şekil 2.17. KBI halka testi kalıbı [Murty ve ark., 2002]

#### 2.8.4. Alüminyum birleşme testi

Boone ve Wallwork tarafından bulunan bu test, tane inceltilmiş eriyiği ayarlanmış kepçe ile alıp su tankına boşaltarak soğutma şeklinde gerçekleşir. Bu testte de Alcan ve Alcoa testinde olduğu gibi hızlı soğumanın getirmiş olduğu problemler tane inceltme değerlerine müdahale etmektedir.

Tane incelticilerin performansını belirlemek için kullanılan testlerin birçoğu yüksek soğuma oranı yüzünden tane incelticilerin performansının belirlenmesini etkilemektedir. Soğuma oranının etkilerinden kaçınmak ve tane incelticinin gerçek performansını ortaya çıkarmak adına Chakravorty, Chakraborty ve Rao tarafından şamot tuğlası ile çevrili silindirik grafit kalıbı (25 x 100 mm) kullanılarak yapılan basit bir test prosedürü geliştirilmiştir (Şekil 2.18). Bu metot çok düşük soğuma şartları sağlayıp, başlangıçta kullanılan eriyik metalin az miktarda kullanılmasını sağlar. Bu yüzden tane

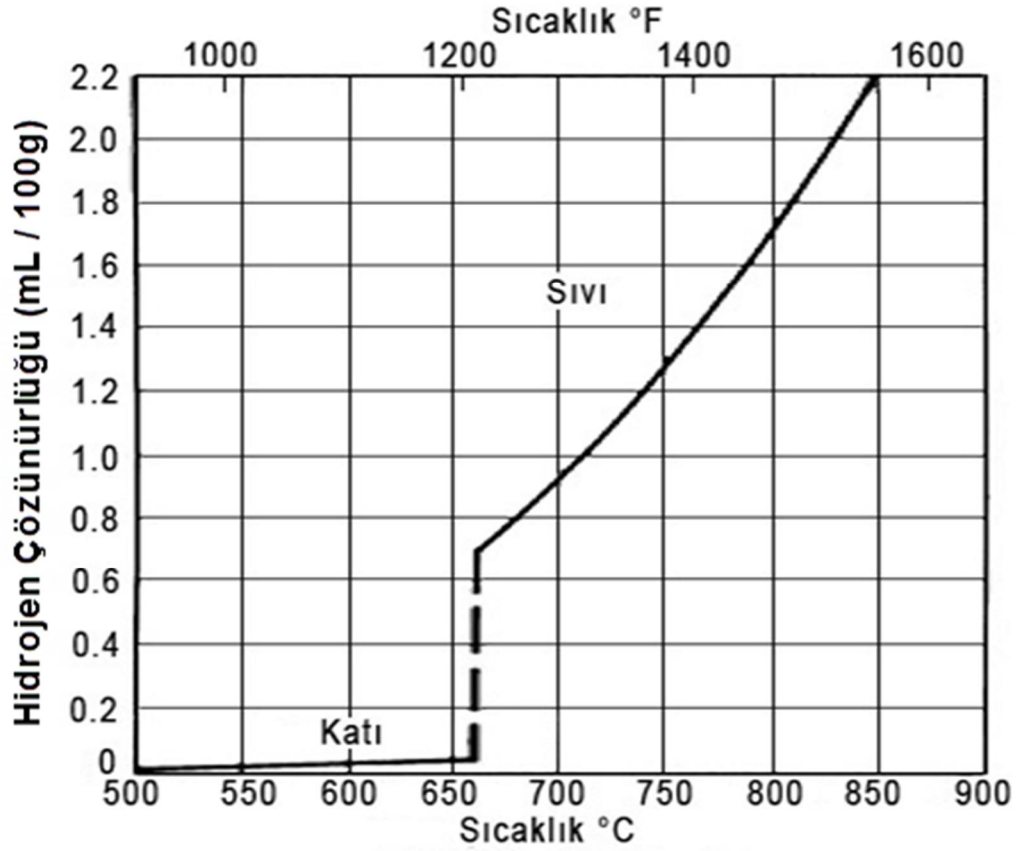
incelticinin performansının laboratuvar ortamında incelenmesi imkânı doğurup, tane incelticinin performansının tam olarak belirlenmesini sağlar [Murty ve ark., 2002].



Şekil 2.18. a) Tane inceltme test kalıbı b) Tane inceltme deney numunesinin seçilen incelenme yüzeyleri [Murty ve ark., 2002]

## 2.9. Alüminyum Alaşımlarında Gazlar

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarında çözünebilen tek gaz hidrojenidir. Hidrojenin çözünürlüğü, sıcaklık ve basıncın karekökü ile orantılı olarak değişir. Şekil 2.19'da hidrojen çözünürlüğünün sıvı halde katı haldekenden çok daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Saf alüminyumun katılaşma sıcaklığının hemen altında ve üstünde hidrojen çözünürlüğü sırasıyla 0,034 ve 0,65 mL/g'dır. Bu değerler alaşım içeriği ile az miktarlarda da olsa değişmektedir [Metals Handbook, 1989].



Şekil 2.19. 1 atm hidrojen basıncında alüminyumda hidrojen çözünürlüğü [Metals Handbook, 1989]

Ergimiş alüminyumun soğuması ve katılaşması sırasında çözünmüş hidrojen sıvı metalden giderilemezse katı durumda düşük çözünürlükten dolayı döküm parçada gaz boşlukları meydana getirecektir [Metals Handbook, 1989].

Gaz boşlukları, alüminyum ve alaşımlarında, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve işlenebilme özellikleri üzerinde negatif etkiye sahiptir [Brown, 1999].

Sıvı alüminyumda hidrojen kaynakları fırın atmosferi, nemli şarj malzemeleri, nemli tabletler (flakslar), nemli fırın kaplaması (refrakter malzemeler), nemli döküm araçları ve hidrojen içeren fırın yakıtının yanması sonucu çıkan gazdır.

Sievert kanunu gazların çözünme reaksiyonu dikkate alınarak metal içerisindeki gazların çözünürlüğünü tahmin etme kuralıdır. Bu kurala göre metal içerisindeki iki atomlu basit gazların ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  gibi) çözünürlüğü kısmi basıncının karekökü ile orantılıdır. Örneğin hidrojen metal içerisinde çözünürken Eş.2.8'deki reaksiyon sonucu atomlarına ayrılır [Gupta, 2003].



Bu işlem için denge sabitinin (k) formülü Eş. 2.9'da verilmiştir.

$$k = \frac{C_H^2}{P_{H_2}} \quad (2.9)$$

Burada  $C_H$  metal içerisindeki atomik hidrojen gazı konsantrasyonu,  $P_{H_2}$  ise çözeltinin içerisinde dengedeki kısmi hidrojen gazı basıncını belirtir [Gupta, 2003]. Eş. 2.9'un düzenlenmesiyle metal içerisindeki atomik hidrojen gazı konsantrasyonu Eş. 2.10 şeklinde yazılabilir.

$$C_H = k\sqrt{P_{H_2}} \quad (2.10)$$

Bu kanuna göre sadece gazın kısmi basıncını azaltarak, metal içerisinde çözünen gazın miktarını azaltmak mümkündür. Kısmi gaz basıncının düşük tutulması sıvı metalin vakum ortamında katılaştırılması veya katılaşma sırasında sıvı metal içerisindeki asal gaz geçirilerek yapılabilir [Gupta, 2003].

## 2.10. Alüminyum Alaşımlarında Gaz Giderme Yöntemleri

Alüminyumdan gaz gidermek için birkaç yöntem vardır. En basit yöntem; metalin daha düşük sıcaklıklarda belli bir zaman boyunca bekletilerek, hidrojen çözünürlüğünün daha düşük olduğu bu sıcaklıkta doğal olarak gaz gidermenin sağlanmasıdır. Döküm koşullarının da, katılaşma esnasında

hidrojenin kendiliğinden eriyikten atılmasını sağlayacak tarzda olması, arzu edilen bir durumdur.

Alüminyum alaşımlarında inert gaz ile gaz giderme, gaz giderme tabletleri ile gaz giderme ve döner sistemle gaz giderme yöntemleri kullanılarak gaz giderme işlemleri yapılır. Fakat ne var ki, bu sayılanların hiçbirini sürekli olarak yapmak mümkün değildir [Demircioğlu, 2002].

### **2.10.1. İnert gaz ile gaz giderme**

Ergimiş alüminyum alaşımlardan gaz gidermenin en kolay yolu, bir tüp veya boru içerisinden inert gazının veya gaz karışımının eriyik içinden geçirilmesidir [Demircioğlu, 2002].

İnert gaz, hidrojenin daha düşük olan kısmi basıncından faydalanarak, eriyik içerisinde kendi kabarcığına hidrojeni katmaktadır. Bu kabarcık büyüyerek eriyik içerisinde yükselmekte ve atmosfere açılarak eriyikten ayrılmaktadır.

### **2.10.2. Gaz giderme tabletleri ile gaz giderme**

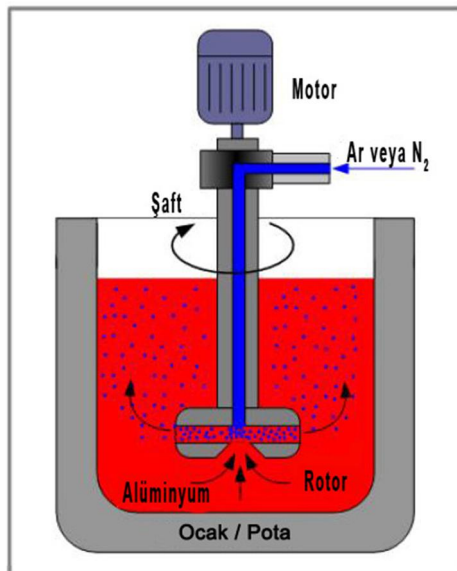
Tabletler sıvı metale daldırıldığında kimyasal olarak reaksiyona girer ve ortama  $Cl_2$  ve  $CO_2$  gibi gazlar verirler. Sistemde reaksiyonlar sonucu  $AlCl_3$  gaz kabarcıkları oluşur. Eğer bu gaz kabarcıkları banyo dibinde gerçekleşirse yüzeye doğru ilerlerken hidrojen kabarcıklarını yukarı doğru taşırlar. Bu tabletler çok hızlı çözündüklerinden dolayı gaz giderme işlemi sırasında çok az kontrol edilebilir. Çoğu kimyasal gaz gidericiler klor bazlı karışımlardır. En popüler gaz giderici hegzakloretan ( $C_2Cl_6$ )'dır [Ertan ve ark., 2002].

Flakslar hidroskopik malzemelerdir, bu nedenle kuru ortamlarda muhafaza edilmelidir. Aksi takdirde sıvı metalden hidrojen gidermek yerine sıvı metale hidrojen kaynağı olacaktır.

Genelde flakslar, sıvı metale daldırılmış borular vasıtasıyla azot veya argon gazı ile beraber sisteme gönderilirler. Dolayısı ile dipten verilen flaks kimyasal olarak reaksiyona girerek sıvının yüzeyine doğru çıkmaya başlar. Flaks kompozisyonu ayarlanarak aynı zamanda metalik olmayan inklüzyonların alımı, modifikasyon ve/veya tane inceltme işlemleri yapılabilir. Yöntemin avantajı dipten verildiği için flaksın çok daha fazla sıvı hacmi ile temasının sağlanmasıdır [Ertan ve ark., 2002].

### 2.10.3. Döner sistemle gaz giderme

Döner sistemle gaz giderme yönteminde, asal gaz (Ar, N<sub>2</sub>) rotor ve şafttan oluşan bir tüp yardımıyla sıvı alüminyumun altından geçirilmektedir (Şekil 2.20). Geçirilen gaz kabarcıkları, ergimiş metalin yüzeyine çıkarken döner rotor vasıtasıyla daha da küçük parçalara bölünürler. Çözülmüş hidrojen sıvı alüminyumdan asal gaz kabarcıklarına geçer ve büyüyerek eriyik içerisinde ayrılır.



Şekil 2.20. Döner sistemle gaz alma sistemi şematik gösterimi

Döner sistemle gaz alma işleminin süresi, gaz akış debisi, dönüş hızı, rotorun daldırma derinliği, rotor ve temizleme araçlarının geometrisi, ilk hidrojen

düzeyi, alaşımın bileşimi, ergimiş metal sıcaklığı ve nem gibi birçok parametreye bağlıdır. İnert gaz kabarcıklarının boyutu gaz alma işleminde büyük bir etkiye sahiptir. Sabit üfleme boruları 20 - 50 mm çapta kabarcık üretirler ve verimsizdirler. Gözenekli üfleme boruları ise 10 - 30 mm arası kabarcık üretirken döner gaz alma sistemi gaz akış debisi, dönme hızı ve rotor geometrisine bağlı olarak 5 - 15 mm arası çok etkin kabarcık üretebilmektedir [Kezkiç, 2010].

Modern döner gaz alma cihazları gaz alma işlemi sırasında temizleme flaksının ergimiş metale otomatik olarak enjeksiyonunu sağlayarak eş zamanlı olarak gaz alma ve temizleme işlemini gerçekleştirir. Bu yöntemin flaks miktarını kontrol edebilme, daha iyi karışma sonucu yüksek flaks etkisi ve daha az curuf oluşumu avantajları vardır [Neff, 2002].

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Döküm Alaşımları

Deneyisel çalışmalarda kullanılan döküm alaşımları yeni SiC pota içerisinde ve % 100 saf külçeden hazırlanmıştır. A206 alaşımının standart değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. A206 alaşımının nominal kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %) [Metals Handbook, 1989]

Alaşım	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%B	%Ti	%Al
A206.0	0,05	0,1	4,2-5,0	0,2-0,5	0,15-0,35	0,1	-	0,15-0,3	Kalan

Bu çalışma kapsamında iki farklı zamanda alaşım hazırlanmıştır. Hazırlanan bu alaşımların tane inceltme işlemi yapılmadan önceki başlangıç kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneyisel çalışmalarda kullanılan A206 alaşımlarının tane inceltme işlemi yapılmadan önceki başlangıç kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %)

Deney No	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%B	%Ti	%Al
1	0,041	0,175	4,510	0,281	0,214	0,098	0,001	0,000	94,646
2	0,039	0,107	4,610	0,353	0,199	0,084	0,002	0,007	94,574

#### 3.2. Ergitme ve Döküm

Alaşımların ergitme işlemi, SiC pota içerisinde Resim 3.1'de verilen 600 kg Al ergitme kapasitesine sahip yer tipi rezistans ısıtmalı ergitme ocağında yapılmıştır.



Resim 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan elektrik rezistanslı ergitme ocağı

Döküm alaşımları, belli miktarda tartıldıktan sonra elektrik rezistanslı ergitme ocağının içinde bulunan silisyum karbür pota içerisine yerleştirilmiştir. Döküm alaşımları pota içerisine yerleştirildikten sonra 720°C'ye ayarlanmış ocağın kapağı kapatılmış ve metalin ergimesi beklenmiştir. Sıvı metalin atmosferle ilişkisini kesmek için üzerine FOSECO marka COVERAL GR 6512 tipi örtü tozu atılmıştır.

Döküm öncesi sıvı metalin gaz alma işlemi Resim 3.2'de görülen Doğuş Makine'ye ait DTS 3437 GI-MA model gaz alma ve cüruf giderme cihazı ile 10 dak. süre ile 2 lt./dak. debide Argon gazı, grafit başlıklı döner bir sistemle sıvı metal içerisine üflenmiştir.



Resim 3.2. Döner sistemli gaz alma ve cüruf giderme cihazı a) genel görünüm ve b) yakın görünüm

Sıvı metal sıcaklığı, ergitme ocağında K tipi ısıtıcı çift (termokupl) ile sürekli olarak takip edilmiş ve döküm esnasında daldırma tipi ısıtıcı çift ile ölçülmüştür.

### 3.3. Tane İnceltme Deneyleri

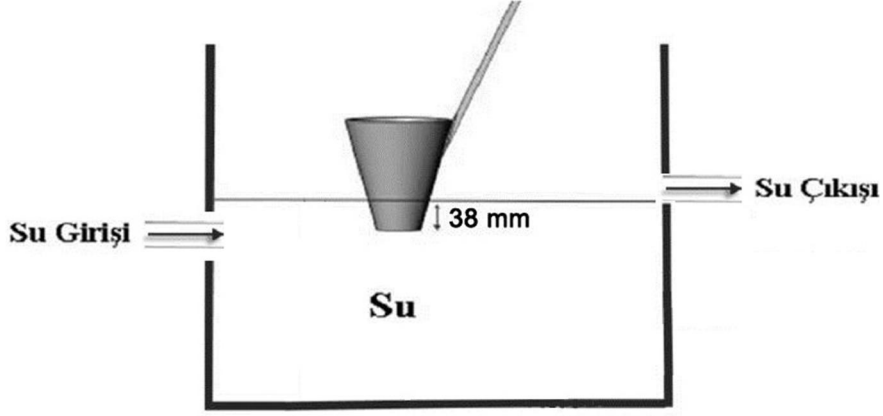
A206.0 alaşımlarına tane inceltme işlemi çubuk şeklindeki Al5Ti1B tane inceltici alaşımı ilavesi ile gerçekleştirilmiştir. İlave edilecek çubuk şeklindeki Al5Ti1B tane inceltici tartılarak 730 °C'deki sıvı metal içerisine atılmıştır. Daha sonra 10 dak. beklenmiş ve gaz giderme işlemine tabii tutulmuştur.

Deney 1'de optimum tane boyutunu belirlemek için sıvı alaşım içerisinde Ti oranı %0, %0,01, %0,02, %0,03, %0,05, %0,1, %0,2 ve %0,3 olacak şekilde Al5TiB bileşiği ilave edilmiştir. Sıvı metal sürekli olarak gaz alma ve cüruf giderme cihazı ile gaz vermeden karıştırılmıştır.

Deney 2'de %0,05 Ti ilave edildikten 10 dak. sonra 10 dak süre ile gaz giderme işlemi yapılmıştır. Gaz giderme işleminden sonra alaşım gaz alma ve cüruf giderme cihazı ile gaz vermeden 90 dak. süre ile sürekli olarak karıştırılmış ve 0. dak., 30. dak., 60 dak. ve 90. dakikalarda çekme testi, tane ölçümü için (ALCAN Testi) numuneler alınmış ve eş zamanlı olarak sürekli Spekolab marka cihaz ile spektral analiz testi ile kimyasal kompozisyon kontrol edilmiştir. Daha sonra pota içerisinde sıvı halde bekleyen alaşım 10 dak. boyunca gaz giderme işlemine tabii tutulmuş ve gaz giderme işleminden sonra 90 dak. süre ile karıştırma işlemi durdurulmuş ve 0. dak., 30. dak., 60 dak. ve 90. dakikalarda çekme testi, tane ölçümü için (ALCAN Testi) numuneler alınmış ve eş zamanlı olarak sürekli spektral analiz testi ile kimyasal kompozisyon kontrol edilmiştir.

Tane inceltme deneyleri ALCAN tane inceltme deney standartlarına göre yapılmıştır [Murty ve ark., 2002]. Sıvı metal, dip çapı 25 mm, üst çapı 70 mm, yüksekliği 90 mm olan ve 3 mm metal bir paslanmaz çelik sacdan yapılmış potanın içinde, yüksekliği sabit sürekli su akan bir kaba tabandan 38 mm

daldırılarak katılaştırılmıştır(Şekil 3.1).

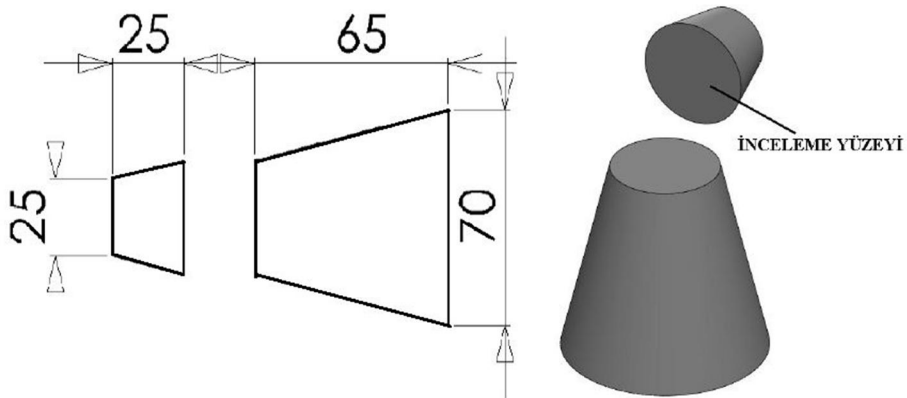


Şekil 3.1. Alcan standart tane inceltme deney düzeneği şematik gösterimi

### 3.4. Metalografik İnceleme

Bu çalışmada, optik mikroskoptan alınan mikroyapı resimleri üzerinden görüntü analizi teknikleri kullanılarak tane boyutu ölçümleri ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Metalografik inceleme amacıyla numuneler Şekil 3.2'de görüldüğü gibi kesilmiştir. Sırasıyla 220, 400, 800 ve 1200 grit su zımparaları ile zımparalamanın ardından 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  ve 0,5  $\mu\text{m}$  keçeler ile parlatma işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.2. Tane inceltme deney numunesi ölçüleri ve inceleme yüzeyi

Parlatılan yüzeyler temizlendikten ve kurutulduktan sonra Resim 3.3'de görülen Struers marka elektrolitik parlatma cihazı ile elektrolit yardımı ile yüzeyleri ince oksit filmi ile kaplanmıştır. Elektrolitin kimyasal karışım oranları Çizelge 3.3'de verilmiştir. Elektroliz işlemi 25°C'de, 39 Volt akım altında ve 10 s sürede yapılmıştır.



Resim 3.3. Elektrolitik parlatma cihazı

Çizelge 3.3. Elektroliz karışım oranları

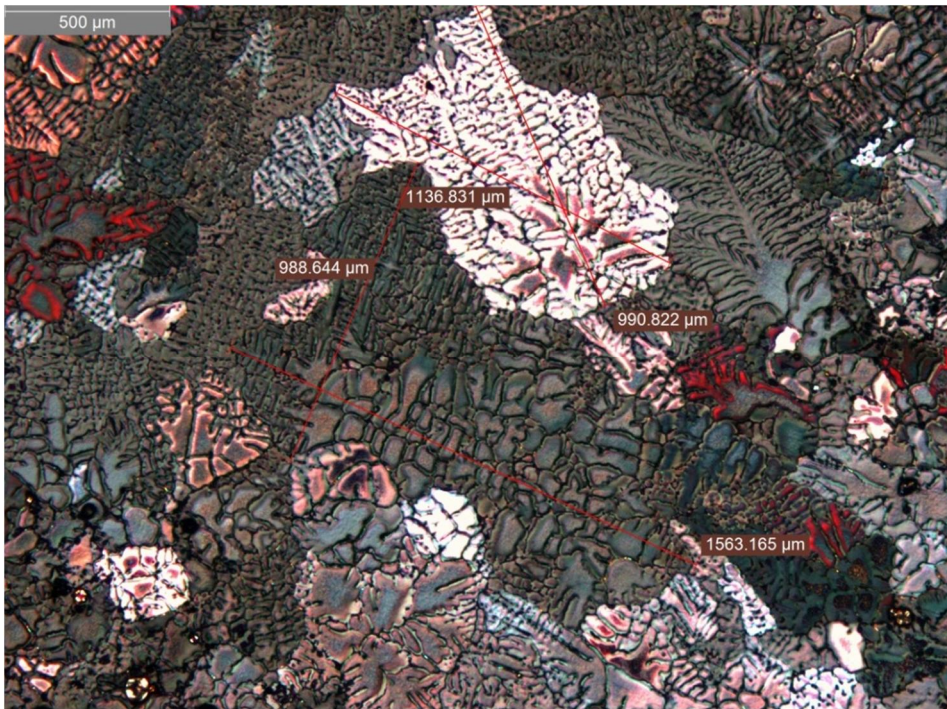
Madde	Miktar(%)
HClO <sub>4</sub> (Perklorik asit)	5
2-Butoxyethanol	15
Ethanol	60
Saf su	20

Mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M marka optik mikroskop (Resim 3.4) kullanılmıştır.



Resim 3.4. Mikroyapıların görüntülenmesinde kullanılan optik mikroskop

Tane ölçümleri optik mikroskop ile polarize ışık altında gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin farklı bölgelerinden yaklaşık 100 adet net olarak görülebilen tanelerin eni ve boyu ölçülerek ortalamaları alınmıştır (Resim 3.5).



Resim 3.5. Mikroyapı üzerinden tane boyutu ölçümü

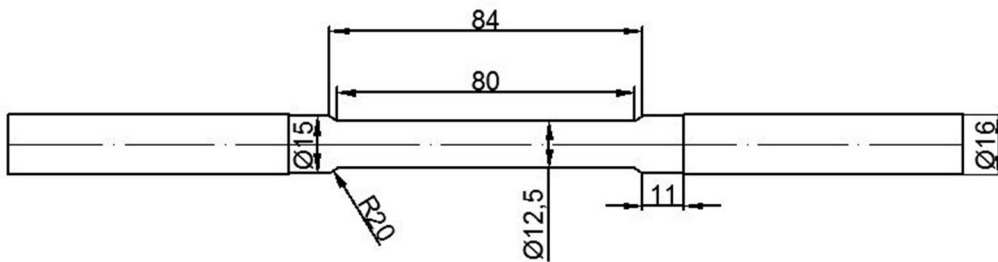
### 3.5. Çekme Testi

45° açıyla yatırılmış kokil kalıpla çekme testi için numunelerin dökümü gerçekleştirilmiştir (Resim 3.6).



Resim 3.6. Çekme çubuklarının döküldüğü kokil kalıp makinesi

Dökülen numuneler tornada işlendikten sonra TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun hale getirilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Çekme testi numunelerinin boyutları

Çekme testi oda sıcaklığında 10 mm/dak. hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numunelerinin yarısına T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu amaçla numuneler, 525 °C'de 4 saat çözündürme, suverme yapılmış ve bu işleme müteakip 155 °C'de 4 saat yaşlandırma ısıl işlemine tabii tutulmuştur.

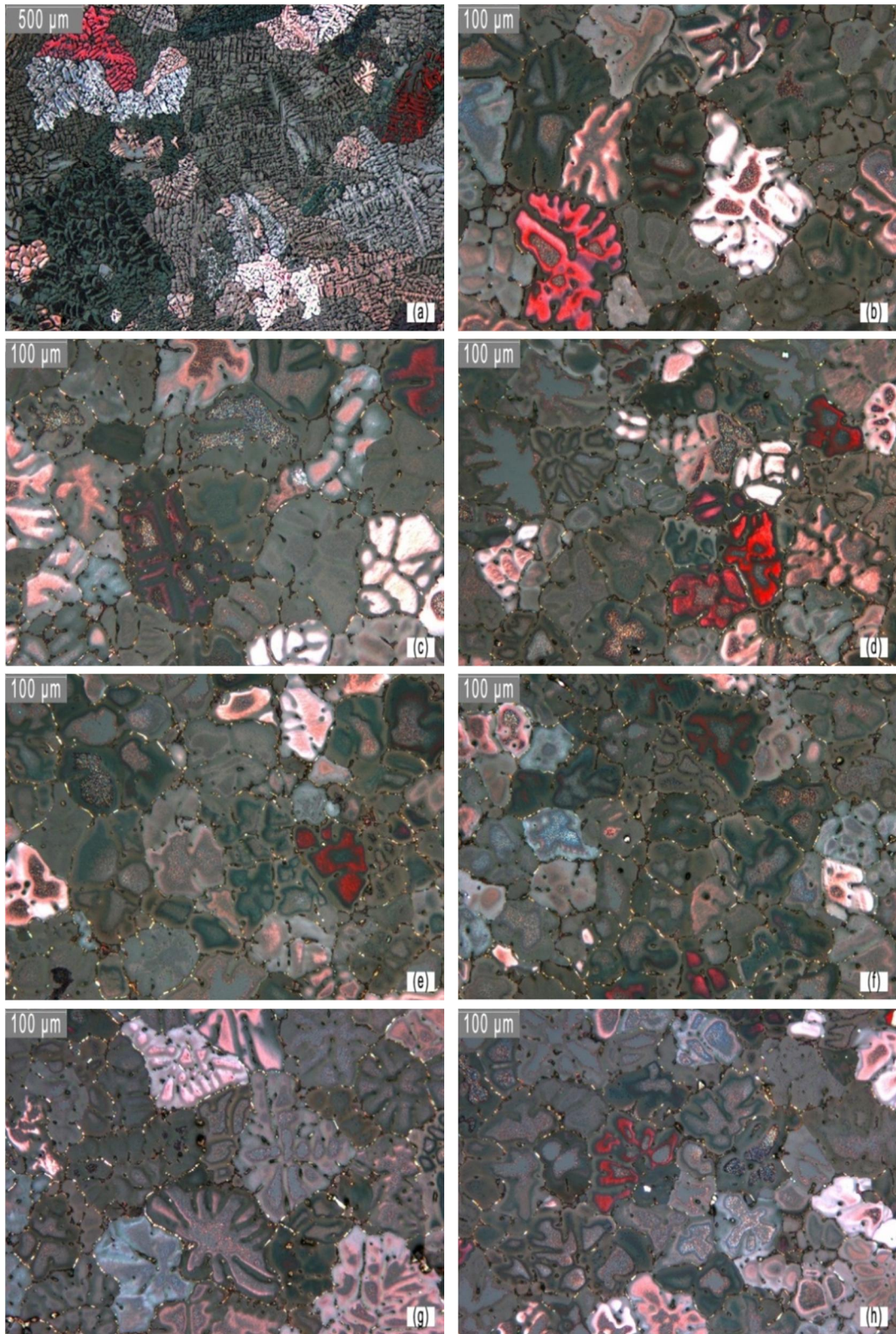
## 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Tane İnceltme Deney Sonuçları

Al - 4,5Cu (A206) alaşımına tane inceltme işlemi uygulanmamış durumda yapılan ALCAN deneyi sonucu optik mikroskoptan elde edilen tane görüntüsü Resim 4.1'de verilmiştir. Deneysel çalışmalar bölümünde anlatılan ve optimum tane boyutunu tespit etmek için farklı oranlarında (%0 - %0,01 - %0,02 - %0,03 - %0,05 - %0,1 - %0,2 ve %0,3) Ti elde etmek için tane inceltici (Al5TiB) ilave edildikten sonra yapılan ALCAN deneyi sonucu elde edilen taneler ise Resim 4.2'de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Tane inceltme yapılmamış A206 alaşımının tane yapısı

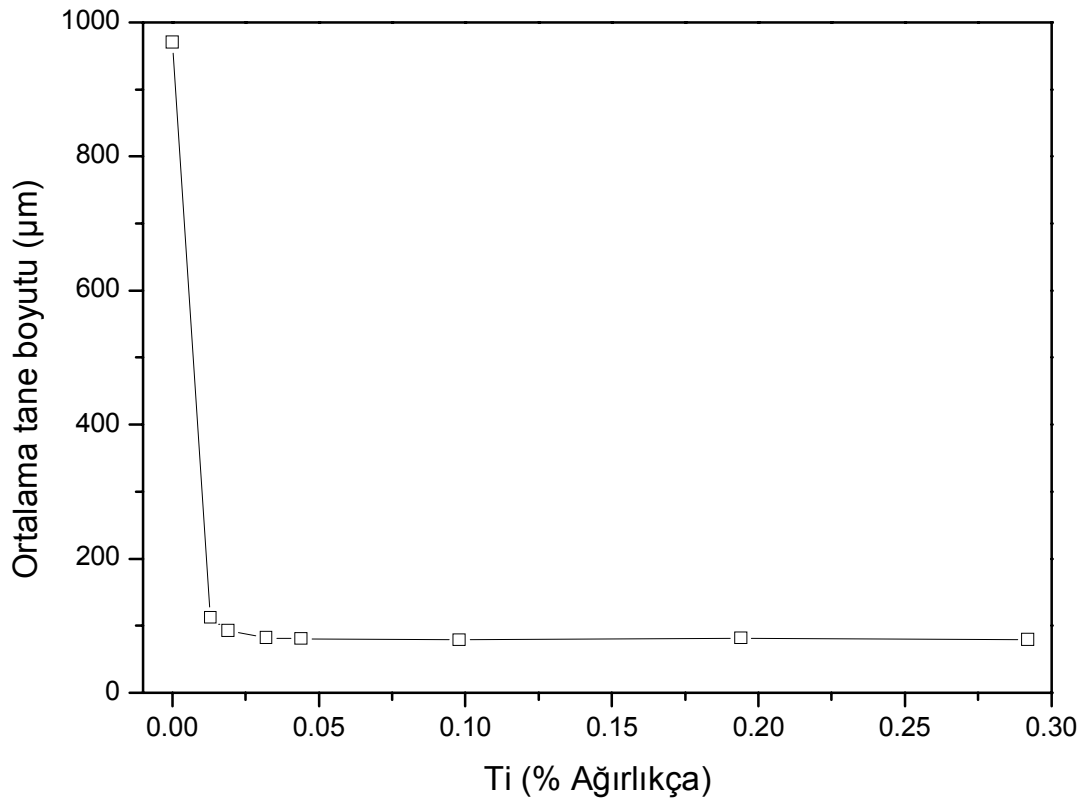


Resim 4.2. A206 alaşımına farklı a) %0,00 b) %0,01 c) %0,02 d) %0,03 e) %0,05 f) %0,10 g) %0,20 h) %0,30 Ti miktarlarında tane inceltici ilavelerinden sonraki tane yapıları

A206 alaşımına ilave edilen % Ti miktarının tane boyutuna etkisi Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1'de görülmektedir. Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1 incelendiğinde tane inceltme uygulanmamış A206 alaşımının ALCAN testi ile belirlenen ortalama tane boyutu 970,1  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. A206 alaşımına ilave edilen Ti %0,05'e kadar ortalama tane boyutunu 970,1  $\mu\text{m}$ 'dan yaklaşık 80  $\mu\text{m}$ 'ye düşürmüştür. Daha yüksek Ti ilavesi ile (%0,05 - %0,3) ortalama tane boyutunda belirgin bir değişim gözlenmemiştir.

Çizelge 4.1. % Ti miktarına göre hesaplanan ortalama tane boyutları

Titanyum (% Ağırlıkça)	Hedeflen	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,2	0,3
	Gerçekleşen	0	0,013	0,019	0,032	0,044	0,098	0,194	0,292
<b>Ortalama tane boyutu (<math>\mu\text{m}</math>)</b>		970,1	112,4	92,3	82,0	80,7	78,9	81,7	79,3



Şekil 4.1. %Ti miktarı ile ortalama tane boyutu değişimi

A206 alaşımının standartlarda belirtilen % Ti oranı 0,15 - 0,3 aralığında

olması gerekmektedir. Daha sonraki yıllarda yapılan araştırmalar sonucu yüksek oranda % Ti ilavesi ile sıcak yırtılma riskinin arttığı belirlenmiş ve B206 standardı geliştirilmiştir.

Literatüre sınırlı kaynaklarda [Sigworth ve DeHart, 2003; Sigworth, 2002; Kamali ve ark., 2014; Kısaoğlu, 2011] Al-4,5Cu alaşımına % Ti miktarının tane boyutuna etkisi araştırılmıştır. Sigworth [Sigworth, 2002] 2002 yılında aldığı bir patent çalışmasında A206 alaşımı için en ideal Ti:B oranının 5:1 olduğunu belirlemiş ve tane boyutlarını % 0,08 Ti miktarında 56  $\mu\text{m}$ , % 0,186 Ti miktarında 118  $\mu\text{m}$  olduğunu tespit etmiştir. Sigworth [Sigworth ve DeHart, 2003] başka bir çalışmasında ise %0,001 Ti miktarında 93  $\mu\text{m}$  tane boyutu elde etmiş ve Ti miktarının artması ile tane boyutunun arttığını rapor etmiştir. Kamali ve arkadaşları [Kamali ve ark., 2014] 22 Ekim 2013 tarihinde yayınlanan bir çalışmada bu çalışmaya benzer Őekilde % 0,05 ile % 0,5 arasında Ti eklendiğinde tane boyutunda belirgin bir değişimin (39 - 42  $\mu\text{m}$  aralığında) olmadığını tespit etmişlerdir. Her üç çalışmada da % Ti miktarının artması ile sıcak yırtılma riskin arttığı bildirilmiştir. Kısaoğlu [Kısaoğlu, 2011] Al - 4,3Cu alaşımına Ti:B oranı 11:1 olan tablet ile %0,0, % 0,008, % 0,01, %0,02 ve % 0,03 Ti ilave etmiş ve en dūřuk tane boyutunu sırası ile 1142  $\mu\text{m}$ , 522  $\mu\text{m}$ , 280  $\mu\text{m}$ , 203  $\mu\text{m}$  ve 177  $\mu\text{m}$  olarak ölçmüştür. % 0 Ti miktarında elde edilen tane boyutu ile bu çalışmada % 0 Ti miktarında elde edilen tane boyutu uyumluluk gōstermektedir.

Őekil 4.1 ve izelge 4.1 incelendiğinde Sigworth'un yaptığı her iki çalışmada elde ettiği tane boyutları ile bu çalışmada elde edilen tane boyutları birbirine oldukça yakındır. Buna karşın Kamali ve arkadaşlarının ele ettikleri tane boyutu daha kūuk iken Kısaoğlu'nun elde ettiği sonuçlar daha yūksektir. Kamali ve arkadaşları tane boyutunu direkt olarak çekme çubuğunun üzerinden belirlemişlerdir. Dōkūlen ekme çubuğunun çapı 10 mm'dir. Dolayısı ile hızlı katılaşma ile de tane boyutu bir miktar dūřmüřtür ve bu çalışmada elde edilen tane boyutundan daha kūuk taneler elde edilmiştir. Kısaoğlu'nun çalışmasında ise 11Ti:1B'lik tuz tabletleri kullanılmıştır. Murty

ve arkadaşları [Murty ve ark, 2002] tane inceltici tabletlerin çubuklar kadar etkili olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca Sigworth [Sigworth, 2002] Al-Cu alaşımları için 5Ti:1B çubukların daha etkili olduğunu bildirmiştir.

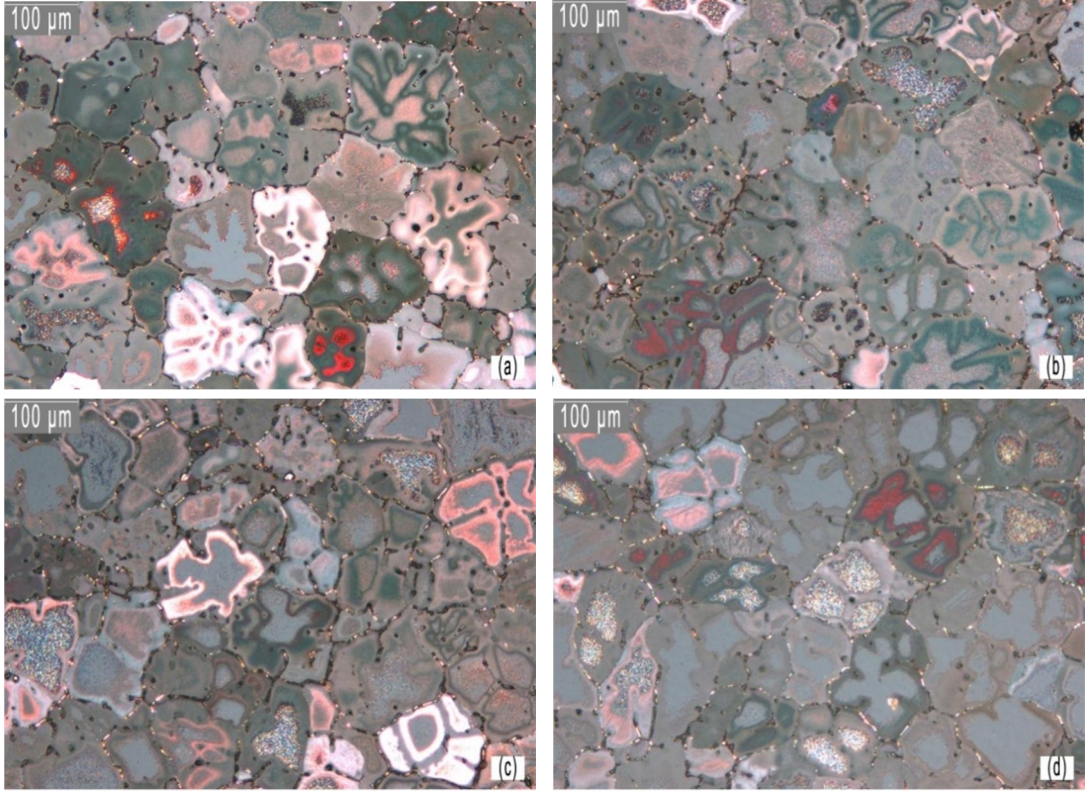
#### 4.2. Tane Boyutuna Bekleme Süresi ve Karıştırmanın Etkisi

Farklı oranlarında Ti ilave edildikten sonra yapılan ALCAN testi sonucu elde edilen tane boyutuna göre en ideal %Ti oranının 0,05 olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra A206 alaşımı yeniden hazırlanarak içerisinde % 0,05 Ti olacak şekilde Al5Ti1B master alaşımı ilave edilmiştir. Al5Ti1B sıvı alaşıma ilave edildikten sonra spektral analiz yapılmış ve içerisinde %0,049 Ti olduğu belirlenmiştir.

Sıvı analizi ayarlandıktan sonra 90 dak. sürekli olarak sıvı metal karıştırmaya tabi tutulmuş ve 30 dak. aralıklarla ALCAN testi ve spektral analiz yapılmıştır. Sürekli karıştırma işlemi yapılarak 0, 30, 60 ve 90. dakikalarda alınan numunelere ait tane yapıları Resim 4.3'de gösterilmiş ve bu resimlere ait tane boyutları ve %Ti, %B ve Ti:B oranı Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.2. incelendiğinde sürekli karıştırma işlemi sırasında alınan numunelere ait ortalama tane boyutlarında 90 dak. boyunca belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Spektral analiz sonuçlarından belirlenen %Ti, %B ve Ti:B oranı incelendiğinde çok belirgin bir değişimin olmadığı görülmektedir.

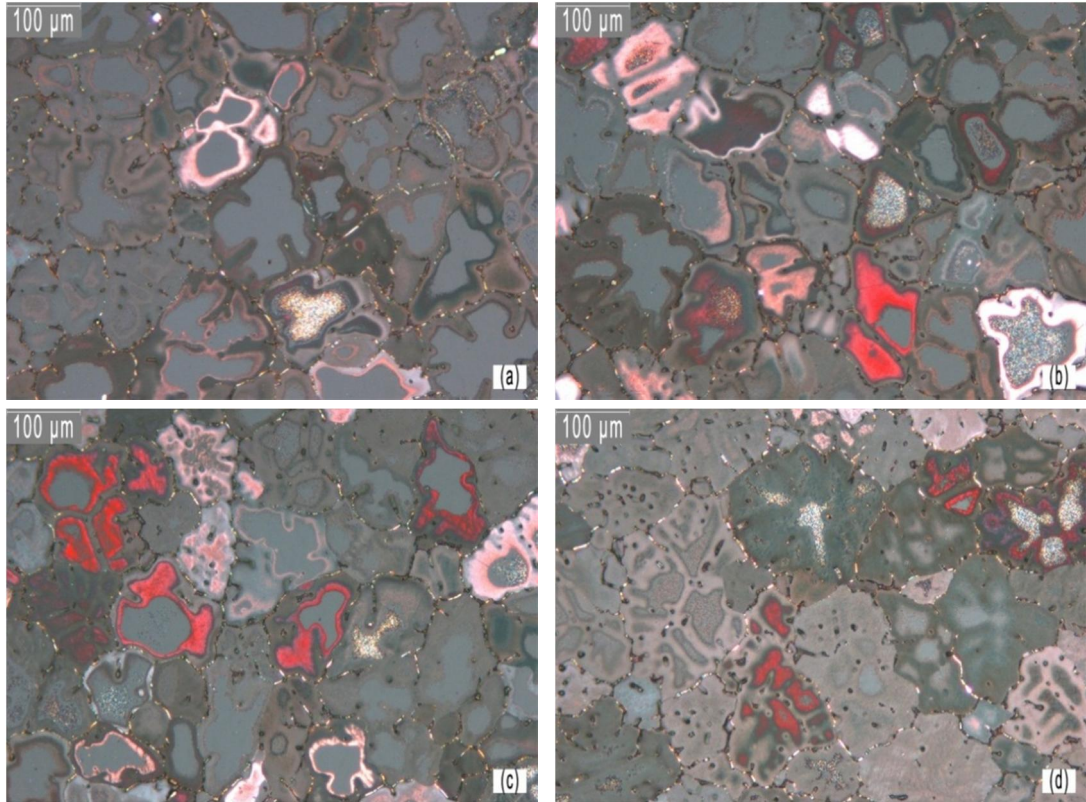
Çizelge 4.2. Sürekli karıştırma işlemi sonucunda elde edilen tane boyutları

Zaman (dak.)	%Ti	%B	Ti:B oranı	Ortalama tane boyutu ( $\mu\text{m}$ )
0	0,049	0,009	5,44	84,0
30	0,046	0,008	5,75	84,1
60	0,047	0,008	5,87	84,9
90	0,048	0,009	5,33	83,6



Resim 4.3. A206 alaşımına %0,05 Ti içerecek Şekilde tane inceltici ilave edildikten sonra sürekli karıştırma işlemi yapılarak a)0 dak. b)30 dak. c)60 dak. d)90 dak. alınan numunelerin tane yapıları

Karıştırma işlemi yapılmadan 0, 30, 60 ve 90. dakikalarda alınan numunelere ait tane yapıları Resim 4.4'de gösterilmiş ve bu resimlere ait tane boyutları ve %Ti, %B ve Ti:B oranı izelge 4.3'de verilmiştir. Çizelge 4.3 incelendiğinde karıştırma işlemi yapılmadan alınan numunelere ait ortalama tane boyutlarında 30 dak. boyunca yaklaşık 88 µm olan ortalama tane boyutları 60 dak. sonra artarak yaklaşık 100 µm'a ve 90 dak. sonra ise 110 µm'a çıkmaktadır. Spektral analiz sonuçlarından belirlenen %Ti ve %B'un sürekli olarak azaldığı ve Ti:B oranının sürekli olarak arttığı çok net bir Şekilde izelge 4.3'de görülmektedir.



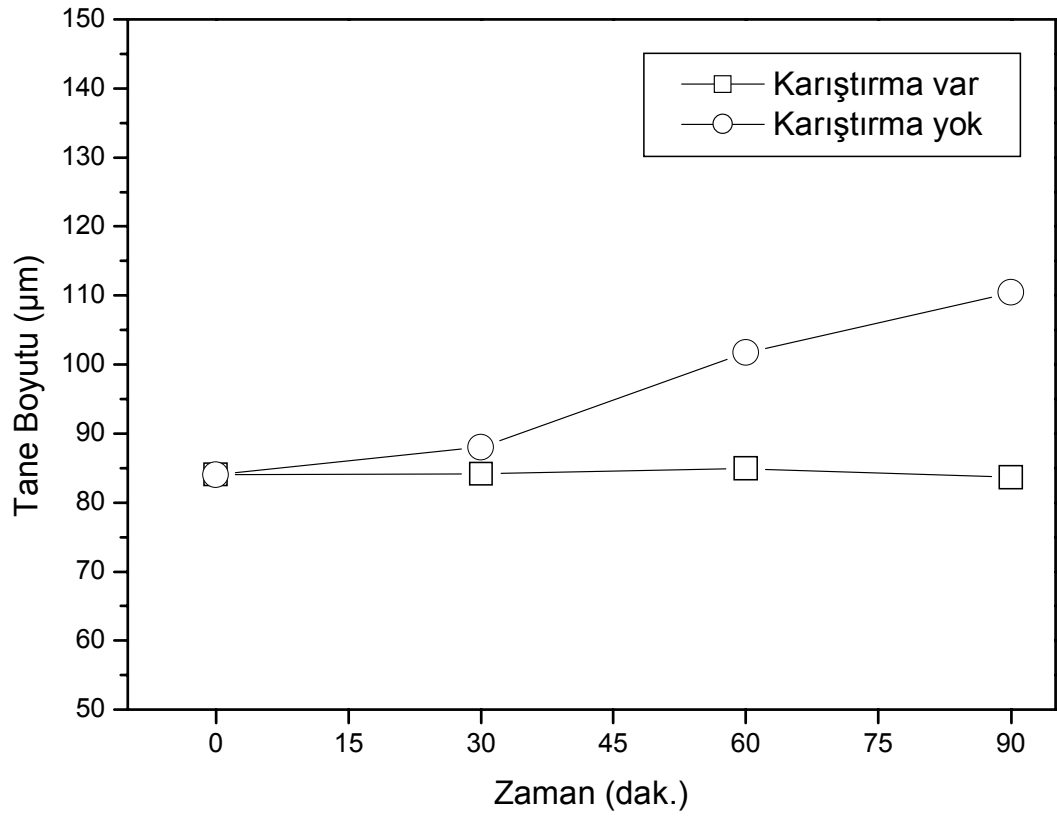
Resim 4.4. A206 alaşımına % 0,05 Ti içerecek şekilde tane inceltici ilave edildikten sonra karıştırma işlemi yapılmadan a)0 dak. b)30 dak. c)60 dak. d)90 dak. alınan numunelerin tane yapıları

Çizelge 4.3. Karıştırma işlemi yapılmadan elde edilen tane boyutları

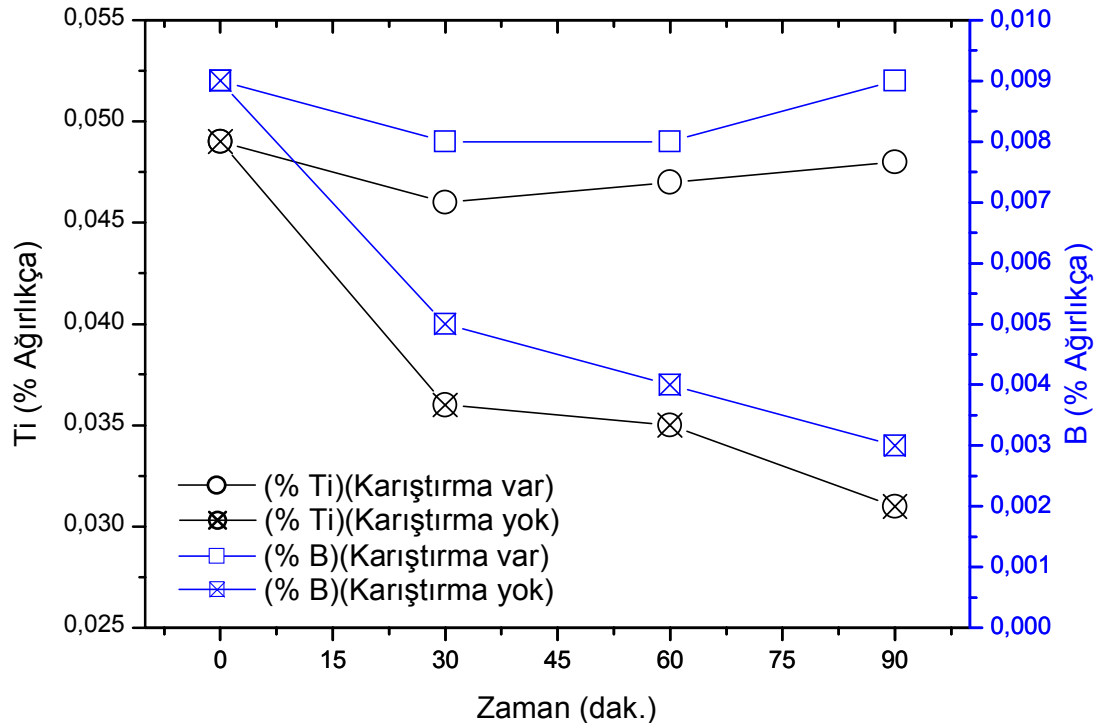
Zaman (dak.)	%Ti	%B	Ti:B oranı	Ortalama tane boyutu (µm)
0	0,049	0,009	5,44	84,0
30	0,036	0,005	7,20	88,0
60	0,035	0,004	8,75	101,7
90	0,031	0,003	10,33	110,4
90*	0,048	0,010	4,8	-

(90\*) 90 dak. beklemeden sonra karıştırma yapıldı.

Sürekli karıştırma işlemi yapılmış ve yapılmamış durumda alınan numunelerin bekleme süresine bağlı olarak ortalama tane boyutuna etkisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu numunelere ait %Ti ve %B değişimi Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Bekleme süresinin tane boyutuna etkisi



Şekil 4.3. Bekleme süresince %Ti ve % B değişimi

Bekleme süresince tane boyutu değişimi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [Kearns, 1996; Jones, 1976; Murty, 2002; Birol,2007; Çolak 2009; Karayazı, 2009; Yurtseven,2009] . Bu çalışmalarda bekleme süresi ile tane boyutunun arttığı belirlenmiştir. Kearns ve arkadaşları [Kearns ve ark, 1996] 300 dakika sıvı metali karıştırmadan tane boyutundaki değişimi incelemişler ve sürekli olarak tane boyutunun arttığını belirlemişlerdir. 300. dakikada sıvı metali karıştırmışlar ve tane boyutunun aniden ilk başlangıç noktasına geri düştüğünü tespit etmişlerdir. Literatürde bekleme süresince karıştırmanın tane boyutuna etkisi ile ilgili herhangi bir çalışma yoktur.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 beraber incelendiğinde sıvı metal bekleme sırasında sürekli karıştırıldığında tane boyutunda ve %Ti, %B ve Ti: B oranında bir değişim meydana gelmemektedir. Diğer taraftan sıvı metal bekleme sırasında herhangi bir şekilde karıştırılmadığında tane boyutunun ve Ti:B oranının zamanla sürekli arttığı, %Ti ve %B miktarının ise sürekli olarak azaldığı net olarak görülmektedir.

Kearns ve arkadaşları [Kearns ve ark, 1996] ergitme ve döküm aşamalarında TiBAI tane incelticilerinin etkinliğini kontrol eden faktörlerin beş temel işlem olduğunu varsaymaktadır. Bunlar;

- ✓ Tane incelticinin eklenmesi sonrası partiküllerin birleşmesi sonucu topaklanmalar meydana gelir. Bu da partikül çökmesine ve sönümüne neden olur.
- ✓ Zr, Cr, Ta gibi eriyikteki çözünen elementlerin segregasyonu sonucu tane incelticinin etkisi azalır. Ti'un yüksek sıcaklıklarda eklenmesi desgregasyona neden olur ve yine tane inceltici etkisi azalır.
- ✓ Çekirdeklenme partikül  $TiB_2$  partiküllerinin boyutu ve  $TiAl_3$  katmanı göre belirlenir. Büyük  $TiB_2$  partikülleri  $TiAl_3$  ile kaplanırken en az alt soğumaya ihtiyaç duyar.

- ✓ Alaşım bileşimi de son tane büyüklüğünü büyük ölçüde belirler.
- ✓ Eriyikteki çözünen madde ilişkileri olası tane inceltme etkisinin bozulmasına ve yapısal aşırı soğutma derecesini etkileyebilir.

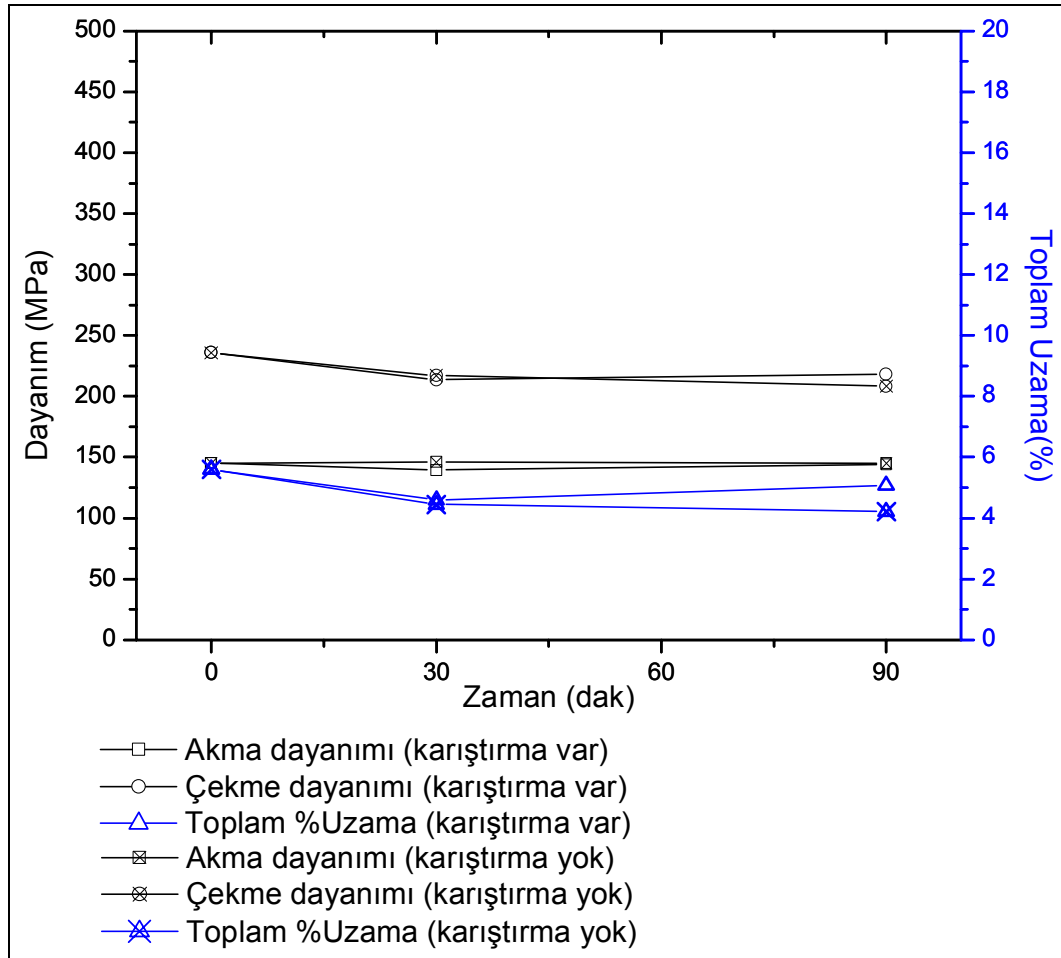
Ti'un yoğunluğu  $4,5 \text{ g/cm}^3$ , B'nin yoğunluğu  $2,08 \text{ g/cm}^3$ ,  $\text{TiB}_2$ 'nin yoğunluğu  $4,52 \text{ g/cm}^3$  ve ergime sıcaklığı  $3230^\circ\text{C}$ 'dir. Bu element ve bileşiklerden sadece B'nin yoğunluğu A206'dan ( $2,7 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçüldü) düşüktür. Dolayısıyla sıvının karıştırılmadığı durumda serbest olan B elementinin sıvı yüzeyinde miktarının artması gerekir. Yapılan analizlerde sıvı karıştırılmadığı durumda %B miktarının sürekli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Yine benzer şekilde %Ti miktarı da azalmaktadır. Kuvvetle muhtemeldir ki Ti ve B sıvı içerisinde küçük partiküller şeklinde  $\text{TiB}_2$  bileşiği durumunda sıvı içerisinde asılı halde varlığını korumaktadır. Bu bileşiğin yoğunluğu A206 alaşımından daha yüksek olduğu için karıştırılmadığı durumda sıvının dibine doğru çökmektedir. Sıvı yüzeyinde yeterli Ti ve B olmadığı ve Ti:B oranının bozulmasından dolayı sürekli olarak tane boyutunun arttığı düşünülmektedir. Buna karşın sıvı beklerken sürekli olarak karıştırıldığında bu  $\text{TiB}_2$  partikülleri sürekli olarak sıvı yüzeyinde varlığını ve oranını korumakta ve yeterli tane inceltici görevini yerine getirmektedir.

### **4.3. Tane İnceltme Sırasında Bekleme Süresi ve Karıştırmanın Mekanik Özelliklere Etkisi**

Çizelge 4.4'de bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının dökülmüş halde %Ti, %B ve mekanik özelliklerin değişimi verilmiştir. Şekil 4.4'de ise dökülmüş halde A206 alaşımının bekleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Sıvı durumda karıştırma ve karıştırma işlemi yapılmadığında dökülmüş halde akma ve çekme dayanımlarında çok belirgin bir fark görülmemiştir, %uzama değeri ise sıvı karıştırılmadığında zamanla düşmektedir.

Çizelge 4.4. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının dökülmüş halde %Ti, %B ve mekanik özelliklerinin (akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama) değişimi

Bekleme (dak.)	%Ti	%B	Ti:B oranı	Akma Dayanımı (Mpa.)	Çekme Dayanımı (Mpa.)	%Uzama
Karıştırma var	0	0,049	5,44	145,0	235,7	5,56
	30	0,046	5,75	139,4	213,6	4,67
	90	0,048	5,33	143,9	218,0	5,08
Karıştırma yok	0	0,049	5,44	145,0	235,7	5,56
	30	0,036	7,20	146,0	217,1	4,45
	90	0,031	10,33	145,0	208,4	4,21

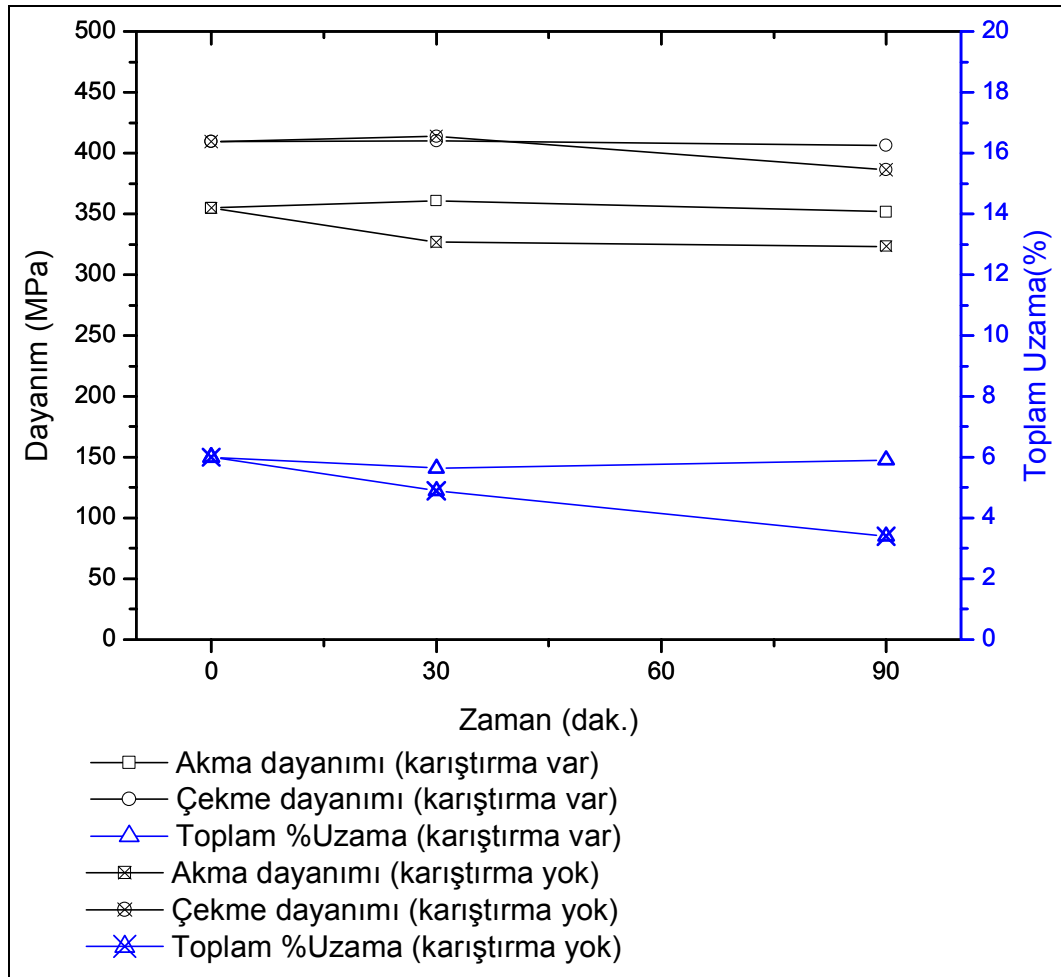


Şekil 4.4. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının dökülmüş halde akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama değişimi

Çizelge 4.5’de bekleme süresine bağlı olarak T6 ısıt işlemleri yapılmış A206 alaşımının %Ti, %B ve mekanik özelliklerin değişimi verilmiştir. Şekil 4.5 ise T6 ısıt işlemleri yapılmış A206 alaşımının bekleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Sıvı durumda sürekli karıştırma yapılarak üretilmiş çekme çubuklarına T6 ısıt işlemleri uygulandıktan sonra elde edilen mekanik özellikler sıvı bekleme süresi ile değişim göstermemiştir. Diğer taraftan sıvının karıştırmaması durumunda ise maksimum çekme dayanımında 0 ve 30 dakikalarda çok önemli bir fark meydana gelmemiştir. Fakat bekleme süresi arttıkça akma dayanımı ve % uzama değerleri sürekli olarak azalmıştır. Bunun nedeninin başlangıç tane boyutunun bekleme zamanı ile artmasından kaynaklandığı (Çizelge 4.3) düşünülmektedir.

Çizelge 4.5. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının T6 halde %Ti, %B ve mekanik özelliklerinin (akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama) değişimi

Bekleme (dak.)	%Ti	%B	Ti:B oranı	Akma Dayanımı (Mpa.)	Çekme Dayanımı (Mpa.)	%Uzama	
Karıştırma var	0	0,049	0,009	5,44	355,0	409,6	6,0
	30	0,046	0,008	5,75	360,9	410,4	5,6
	90	0,048	0,009	5,33	351,9	406,4	5,9
Karıştırma yok	0	0,049	0,009	5,44	355,0	409,6	6,0
	30	0,036	0,005	7,20	326,8	414,0	4,9
	90	0,031	0,003	10,33	323,5	386,4	3,4

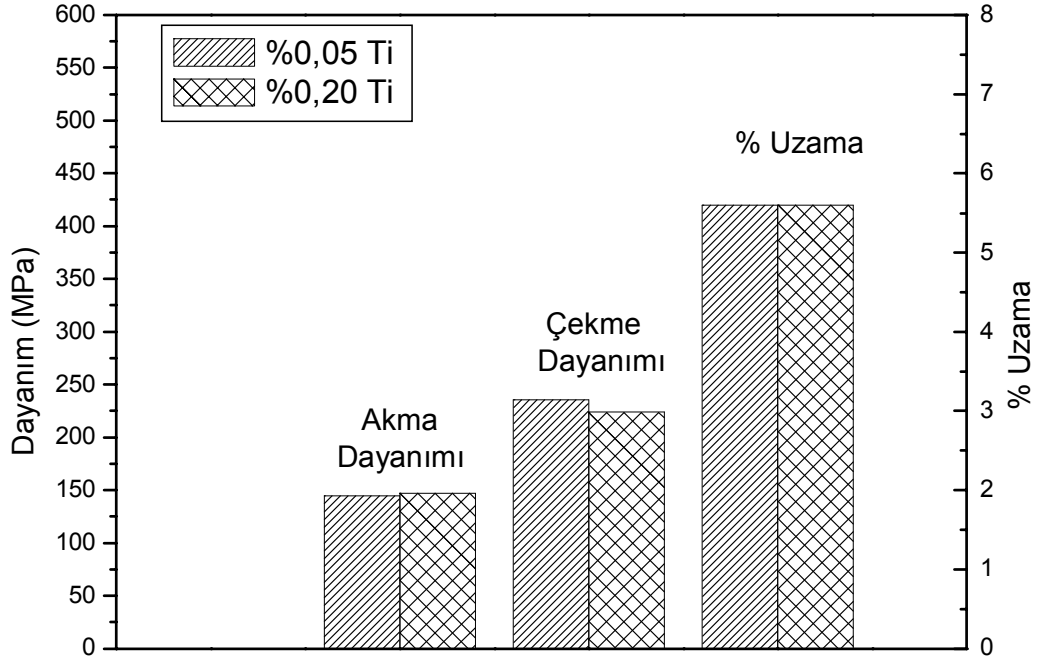


Şekil 4.5. Bekleme süresine bağlı olarak A206 alaşımının T6 ısıl işlem sonrası akma dayanımı, çekme dayanımı ve toplam % uzama değişimi

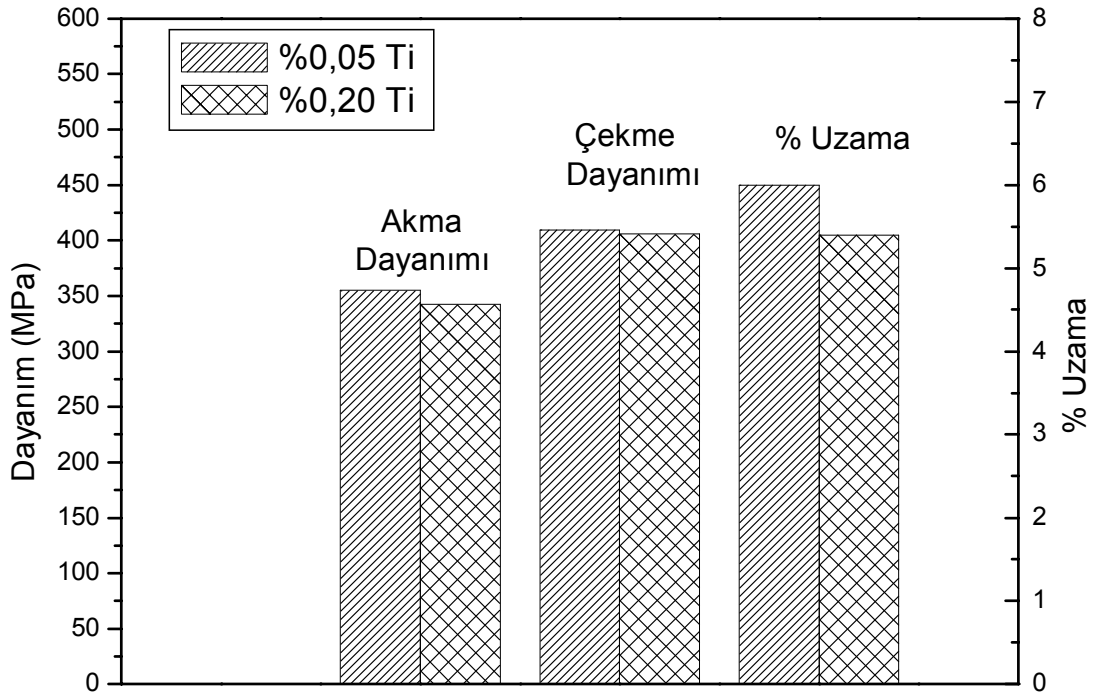
Çizelge 4.6'da farklı %Ti miktarlarındaki A206 alaşımının ısıl işlem yapılmış ve yapılmamış durumda mekanik özelliklerdeki değişimi verilmiştir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de ise mekanik özelliklerdeki değişim grafiksel olarak verilmiştir. Dökülmüş halde %Ti miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerde belirgin bir fark elde edilmemiştir. %0,05 Ti ve %0,2 Ti ilave edilmiş numunelerden 5,6 % uzama, yaklaşık 145 MPa akma dayanımı ve yaklaşık 230 MPa maksimum çekme dayanımı elde edilmiştir. T6 ısıl işleminden sonra % uzama değerinde düşük %Ti durumunda artma meydana gelirken yüksek %Ti durumunda azalma meydana gelmiştir. Akma ve maksimum çekme dayanımı miktarında ise yüksek %Ti durumunda mekanik özelliklerde azalma meydana gelmiştir.

Çizelge 4.6. %Ti miktarına bağlı olarak A206 alaşımının mekanik özelliklerin değişimi

	%Ti	%B	Ti:B oranı	Akma Dayanımı (Mpa.)	Çekme Dayanımı (Mpa.)	%Uzama
Dökülmüş Halde	0,049	0,009	5,44	145,0	235,7	5,6
	0,188	0,035	5,37	147.2	224,0	5,6
T6 Halde	0,049	0,009	5,44	355.0	409,6	6,0
	0,188	0,035	5,37	342.3	405,9	5,4



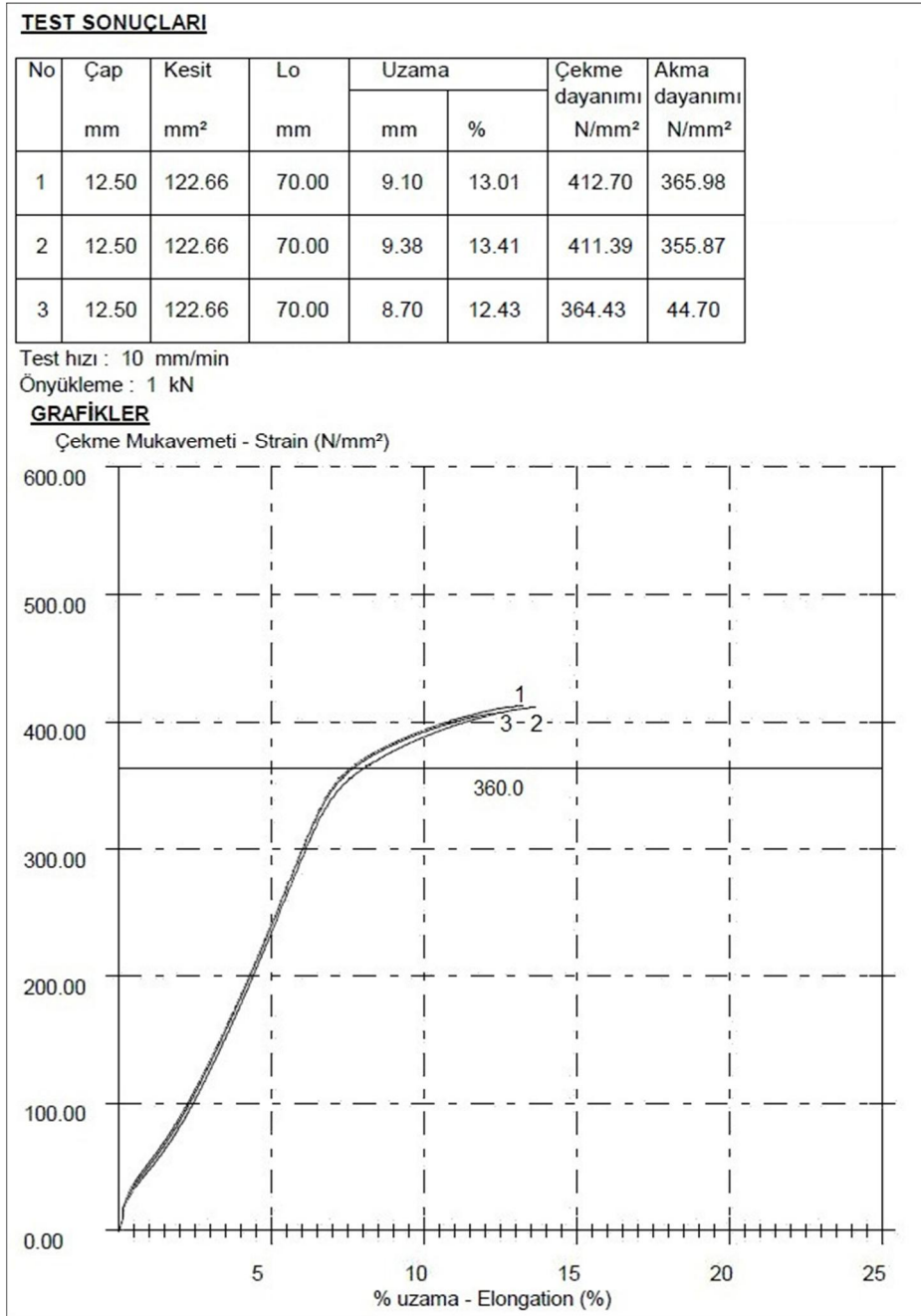
Şekil 4.6. A206 alaşımının dökülmüş halde %Ti miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi



Şekil 4.7. A206 alaşımının T6 halde %Ti miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi

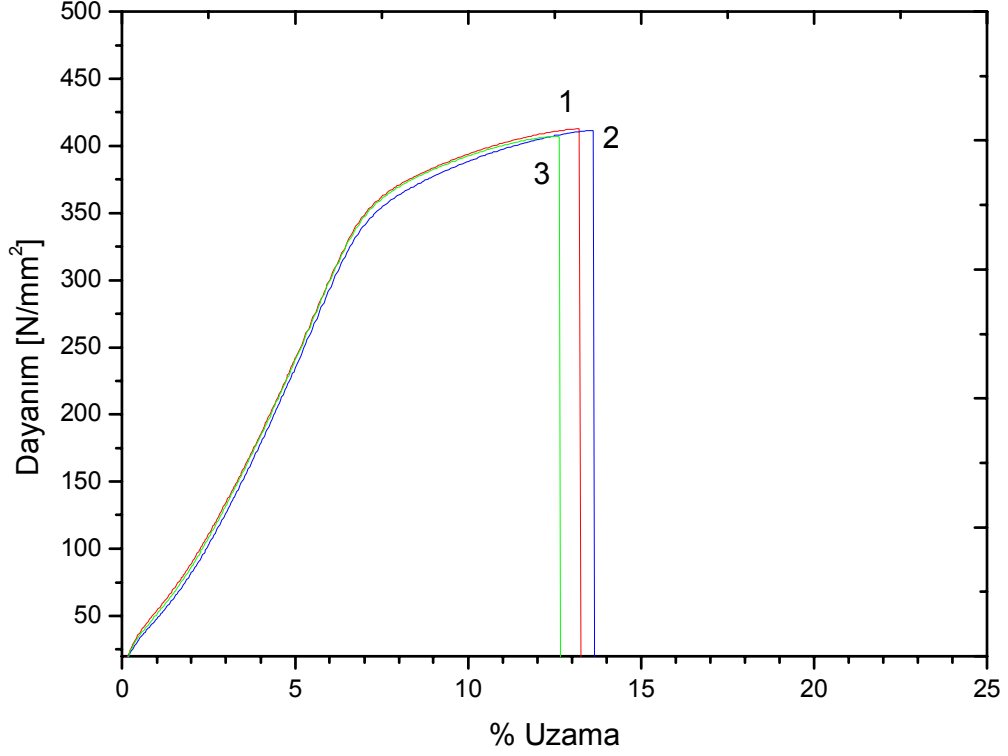
Kamali ve arkadaşları % Ti miktarının Al-4,5Cu-0,3Mg (A206) alaşımının mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır [Kamali ve ark, 2014]. %0,05 Ti ilave edildiğinde dökülmüş halde ve T6 ısıtılmasından sonra sırası ile maksimum çekme dayanımı 217 MPa., 318 MPa. ve % uzamayı 12,2;19 olarak tespit etmişlerdir. %0,3 Ti ilave edildiğinde dökülmüş halde ve T6 ısıtılmasından sonra sırası ile maksimum çekme dayanımı 237 MPa., 350 MPa., ve % uzamayı 11; 16,8 olarak ölçmüşlerdir. Araştırmacıların dökülmüş halde elde ettikleri maksimum çekme dayanımları bu çalışmada elde edilen değerlere yakındır. Diğer taraftan T6 ısıtılmasından sonra elde edilen maksimumum çekme değerleri ise yaklaşık 60 Mpa. daha düşüktür. % uzama değerleri ise bu çalışmada elde edilen değerlerden yaklaşık 3 kat daha fazladır. Araştırmacıların yayınladığı kaynak incelendiğinde % uzama değerlerinin çekme cihazının verdiği değerler olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada da Şekil 4.8'den de görüleceği gibi çekme cihazının verdiği % uzama 13,01 gibi oldukça yüksektir. Fakat çekme cihazının % uzamayı çok hassas vermesi için görüntülü uzama ölçümü veya direkt olarak numune

yüzeyine bağlanmış transdüser ile ölçüm yapılması gerekir. Aksi halde % uzama değerleri yanlış hesaplanmış olur. Diğer türlü en sağlıklı % uzama hesaplaması cihazda çekme işlemi bittikten sonra çekme çubuğunun son boyunun ölçülerek % uzama değerinin belirlenmesidir.



Şekil 4.8. Çekme cihazından alınan test sonuçları ve dayanım - % uzama eğrisi

Çekme cihazı test sonuçlarından alından veriler kullanılarak çizilen grafik ise Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Çekme cihazından test sonuçlarından alınan veriler kullanılarak çizilen dayanım - % uzama eğrisi

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 incelendiğinde % Ti artışı ile dökülmüş halde mekanik özelliklerde belirgin bir fark gözlenmezken T6 ısıtılmasından sonra birlikte % uzama ve akma dayanımının düştüğü görülmektedir. Kamali ve arkadaşları durumu tane sınırlarında görülen  $Al_3Ti$  varlığıyla açıklamışlardır [Kamali ve ark, 2014]. Yüksek % Ti miktarlarında  $Al_3Ti$ 'un tane sınırlarında irileşmesiyle artan yüzey geriliminden dolayı daha fazla mikroçatlak oluşumuna neden olduğunu ve bu çatlakların mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Tane inceltici eklenmemiş halde A206 alaşımına ALCAN deneyi uygulanmış ve ortalama tane boyutunu yaklaşık 970  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir.

Optimum tane inceltici miktarını belirlemek için A206 alaşımına %0, %0,01, %0,02, %0,03, %0,05, %0,1, %0,2 ve %0,3 oranlarında Ti içerecek şekilde Al5TiB eklenmiştir. Tane inceltici eklendikten sonra ALCAN testi uygulanmış ve ortalama tane boyutları sırasıyla 970,1  $\mu\text{m}$ , 112,4  $\mu\text{m}$ , 92,3  $\mu\text{m}$ , 82,0  $\mu\text{m}$ , 80,7  $\mu\text{m}$ , 78,9  $\mu\text{m}$ , 81,7  $\mu\text{m}$ , 79,3  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda alaşıma eklenecek optimum tane inceltici miktarının %0,05 Ti içeren Al5TiB olduğu tespit edilmiştir.

%0,05 Ti oranında karıştırma işlemi yapılmadan alınan spektral analizlerde bekleme süresine bağlı olarak %Ti, %B oranlarının düştüğü ve Ti:B oranının ise yükseldiği tespit edilmiştir.

%0,05 Ti oranında karıştırma işlemi yapılarak alınan spektral analizlerde bekleme süresine bağlı olarak %Ti, %B ve Ti:B oranlarında önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

Bekleme süresine bağlı olarak %0,05 Ti oranında A206 alaşımının ısı işlem öncesi karıştırma işlemi yapılmış ve yapılmamış durumda mekanik özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

Bekleme süresine bağlı olarak %0,05 Ti oranında A206 alaşımının T6 ısı işlemi yapıldıktan sonra karıştırma işlemi sırasında akma dayanımı, çekme dayanımı ve %uzama değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı; karıştırma işlemi yapılmadığında ise akma dayanımı, çekme dayanımı ve %uzama değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

%0,05 Ti oranında A206 alaşımının ısıtılma işlemi öncesi akma dayanımı 145,0 Mpa., çekme dayanımı 235,7 Mpa. ve %uzama 5,6 olarak tespit edilmiştir.

%0,05 Ti oranında A206 alaşımının T6 ısıtılma işlemi yapıldıktan sonra akma dayanımı 355,0 Mpa., çekme dayanımı 409,6 Mpa. ve %uzama 6,0 olarak tespit edilmiştir.

%0,20 Ti oranında A206 alaşımının ısıtılma işlemi öncesi akma dayanımı 147,2 Mpa., çekme dayanımı 224,0 Mpa. ve %uzama 5,6 olarak tespit edilmiştir.

%0,20 Ti oranında A206 alaşımının T6 ısıtılma işlemi yapıldıktan sonra akma dayanımı 342,3 Mpa., çekme dayanımı 405,9 Mpa. ve %uzama 5,4 olarak tespit edilmiştir.

## 5.2. Öneri

Bu çalışmada %0,05 Ti içeren çubuk şeklindeki AlTiB master alaşımlarının tane inceltimi için yeterli olduğu ve daha fazla ilave edilmesi durumunda alaşımda mikroçatlaklara ve ekonomik zarara neden olabileceği tartışılmıştır. Bu durum dikkate alınarak daha kapsamlı bir çalışma yapılmalıdır.

Ti'un yoğunluğu  $4,5 \text{ g/cm}^3$ , B 'un yoğunluğu  $2,08 \text{ g/cm}^3$  ve  $\text{TiB}_2$  yoğunluğu  $4,52 \text{ g/cm}^3$  olduğundan dolayı B elementin sıvı karıştırılmadığı durumda sıvı yüzeyinde artması gerekirken yapılan analizlerde %Ti ve %B miktarında düşme tespit edilmiştir. Sıvı sürekli karıştırıldığında ise %Ti ve %B miktarının değişmediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla sıvı karıştırılmadığı durumda B elementinin konumunu ve bileşik oluşturup oluşturmadığını belirlemek için potanın değişik bölgelerinden numuneler alınarak daha kapsamlı bir çalışma yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- ASM International Handbook Committee, "Casting", **Metals Park, OH, ASM International**, Metals Handbook, 15: 743-770 (1989).
- Backerud, L., "How Does a Good Grain Refiner Work?", **Light Metal Age**, 6-12 (1983).
- Biröl, Y., "The effect of holding conditions in the conventional halide salt process on the performance of Al-Ti-B grain refiner alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 427, **Elsevier**, USA, 142-147 (2007).
- Brown, J. R., "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook", 11. Baskı **Butterworth-Heinemann**, Oxford, 70-77 (1999).
- Bryant, M., Fisher, P., "Grain Refining and the Aluminium Industry (Past, Present and Future)", **Aluminium Casthouse Technology**, July, 4-8 (1993).
- Çolak, M., Kayıkcı, R., "Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme", **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 13(1): 11-17 (2009).
- Cooper, P., Jacob, A., Detomi, A., "Additive developments in the Aluminium Industry", **1. International Congress of the Aluminium Industry**, (2000).
- Demircioğlu, P., "Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Gaz Oluşumu ve Gaz Giderme Teknikleri", Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 58-75 (2002).
- Ertan, S., Kavaklıoğlu, B., Büyükakkaş, F., "Alüminyum Sıvı Metal Temizliğinde Kullanılan Flakslar", **Teknik Alüminyum Sanayi A.Ş.**, İstanbul, 4-5 (2002).
- Gupta, C. K., "Chemical Metallurgy: Principles and Practice", **Wiley-Vch Verlag Gmbh and Co. Kga**, Weinheim, 273-275 (2003).
- Gündüz, S., "Metalurjide Faz Diyagramları", **Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş.**, Ankara, 84-89 (2012).
- Ibarra, D. G., "Control of Grain Refinement of Al-Si Alloys by Thermal Analysis", **Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University**, Montreal Canada, 1-38 (1999).
- Jones, G. P., "Grain Refinement of Castings Using Inoculants for Nucleation Above Liquidus", **Solidification Processing**, The Institute of Metals, 496-499 (1987).

Jones, G. P., Pearson, J., "Factors Affecting the Grain-Refinement of Aluminum Using Titanium and Boron Additives", ***Metallurgical Transactions B***, 7: 223-234 (1976).

Sigworth, G. K., "The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System", ***Metallurgical Transactions A***, 15: 277-282 (1984).

Sigworth, G. K., "Method For Grain Refinement Of High Strength Aluminum Casting Alloys", ***United States Patent, No: US6368427 B1*** (2002).

Sigworth, G. K., Dehart, F., "Recent Developments In The High Strength Aluminum – Copper Casting Alloy A206", ***AFS Trans.***, 111: 341-354 (2003).

Sigworth, G. K., Kuhn, T. A., "Refinement of Al casting alloys", ***AFS Transactions***, 115: 1-12 (2007).

Kamali, H., Emamy, M., Razaghian, A., "The Influence Of Ti On The Microstructure And Tensile Properties Of Al-4.5 Cu-0.3Mg Alloy", *Materials Science and Engineering A*, 590, ***Elsevier***, 161-167 (2014).

Karayazı, A., "Etial 110 alaşımasının dökümünde makro ve mikro porozite oluşumunun modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Sakarya, 72-83 (2009).

Kearns, M. A., Thistlethwaite, S. R., Cooper, P. S., "Recent Advances In Understanding The Mechanism Of Aluminium Grain Refinement By TiBAl Master Alloys", "Light metals 1996", Hale, W., ***TMS***, Warrendale, PA, 713-720 (1996).

Kezkiç, M., "Alüminyum Alaşımlarında Ergimiş Metal Kalitesi, Ergimiş Metal Tretmanı Ve Ergimiş Metal Kontrolü", ***Foseco Döküm, Kocaeli***, 4-8 (2010).

Kısaoğlu, A. K., "Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Kritik Katı Oranı Faktörünün Kalıp Sıcaklığına Bağlı Olarak Modellenmesi", Yüksek lisans tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 63 (2011).

Murty, B. S., Kori, S. A., Chakraborty, M., "Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying", ***International Materials Reviews***, 47(1): 1-19 (2002).

Mwamba, I. A., "Characterisation of Al-Ti-B grain refiners prepared by aluminothermic reduction of TiO<sub>2</sub> and B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", Yüksek lisans tezi, ***Witwatersrand Üniversitesi Mühendislik ve Çevre Fakültesi***, Johannesburg, 29-30 (2005).

Neff, D. V., "Understanding Aluminum Degassing", ***Modern Casting***, 3-4 (2002).

Pasciak, K., Sigworth, G. K., "Role of Alloy Composition in Grain Refining of 319 Alloy", **AFS Trans**, 109: 567-577 (2001).

Porter, D. A., And Easterling, K. E., "Phase transformations in metals and alloys", **Chapman and Hall**, UK, 193-195 (1990).

Yurtseven, Y., "Etial177 Alaşımının Dökümünde Makro ve Mikro Porozite Oluşumunun Modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 67-74 (2009).

Zolotarevsky, V., Belov, N., Glazoff, M., "Casting Aluminium Alloys", **Elsevier**, USA, 397-447 (2007).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TANYEL, Ziya  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 24.10.1985 ANKARA  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (312) 319 76 87  
e-mail : [solidman05@hotmail.com](mailto:solidman05@hotmail.com)

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü/ Metal Eğitimi Bölümü	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Teknik Eğitim Fakültesi/ Döküm Öğretmenliği Bölümü	2009

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, İnternet, Futbol, Müzik